



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Engineering Journal Chiang Mai University

Volume 26(3)2019 September - December 2019
ISSN 0857-2178

Content

การปรับปรุงผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว กรณีศึกษา: โรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว..... (Productivity Improvement of Noodle Production Process in Case Study: Noodle Production Factory) กนกนภา บุญส่งประเสริฐ และ ก้องภู นิมานันท์	1-13
พลของสภาวะแวดล้อมและจลนพลศาสตร์ของแลคเคสต่อการกำจัดไดโคฟอล..... (Effect of Environmental Conditions and Kinetics of Laccase on Dicofol Removal) อภิญญา อ่อนสาร และ ภรณีภา รัตนพงศ์เลขา	14-24
การศึกษามรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงปลา กรณีศึกษา: หมู่บ้านทุ่งยาว.. (Performance Study of Solar PV System for Fish Pond Aerators Case Study: Tungyao Village) อัชรินทร์ อินทนิเวศน์ สุลักษณ์ มงคล และ สราวุธ พลวงษ์ศรี	25-35
การพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ..... (Development of Interlocking Block Pilot Plant Using Mae Moh Power Plant Ash) สุวิทย์ สายสุรนาวิชญ์ และ นิวิธ เจริญใจ	36-56
Stress Concentration Due to Shear Lag Effect in Simply Supported Steel Box Girders with Longitudinal Stiffeners..... Tanpitcha Pumphaka and Taweep Chaisomphob	57-65
การปรับปรุงวิธีการเรียงลำดับข้อมูลในภาพคิวอาร์โค้ดโดยใช้เทคนิค EVM สำหรับของการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้..... (Improved Sorting in QR Code Images Using EVM Technique for Reversible Data Hiding) ชัยพร ปานยงค์ ธีรน้อย ลีลาวิวัฒน์ และ ภัทธวี รังสิรักษ์	66-76
การปรับปรุงประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 โดยการปรับการอุ่นน้ำป้อนที่ทำการผลิต 240 MW และ 180 MW... (Performance Improvement of Mae Moh Power Plant Unit 12 by Adjusting of Feed Water Heater at the Capacity of 240 MW and 180 MW) คมกริช โมงขุนทด และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ	77-87
การปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง กรณีศึกษา: บริษัทผู้ส่งออกผักและผลไม้สด (Productivity Improvement of Namdokmai Mango Packing Process A Case Study: an Exporter of Tropical Fruits and Vegetables) ปริญญ์ พัฒนวงศ์พร	88-101
การลดเวลาติดตั้งและปรับแต่งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก..... (Reducing Setup and Adjustment Time of Plastic Injection Mold) ชุดิกานุจน์ ลิธิระ ญัฐจิรา หมั่นชิด และ นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	102-110
การวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าล่าช้า..... (Cost of Electricity Loss Analysis in Distribution System from Delayed Substation Construction) นันทชัย กานตานันทะ และ พันทิพา ชิตเครือ	111-127



การปรับปรุงผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว⁺ กรณีศึกษา: โรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว⁺ **Productivity Improvement of Noodle Production Process in Case Study: Noodle Production Factory**

กนกนภา บุญส่งประเสริฐ และ ก้องภู นิมานันท์*

Kanoknapa Boonsongprasert and Khongphu Nimanandh*

สาขาวิชาบริหารธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Major of Business Administration, Faculty of Business Administration

239 Huaykaew Rd., T. Suthep, Muang, Chiang Mai

Chiang Mai University, 50200, Thailand

*E-mail: khongphun@hotmail.com, Tel: (66 53) 942102 Fax: (66 53) 892201

บทคัดย่อ

การค้นคว้าแบบอิสระนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวของโรงงานกรณีศึกษาจากการสัมภาษณ์ผู้จัดการทั่วไป ทำให้ทราบว่า ภาระงานของสายการผลิตกับจำนวนพนักงานมีความไม่สมดุลกัน สะท้อนให้เห็นถึงการใช้ทรัพยากรในการผลิตที่ยังไม่มีประสิทธิภาพ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้มี 2 ประเภท ได้แก่ เส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด และเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง โดยมีขอบเขตการศึกษาตั้งแต่กระบวนการทำความสะอาดข้าวจนถึงกระบวนการบรรจุเส้นก๋วยเตี๋ยว การศึกษาในครั้งนี้ดำเนินการปรับปรุงตามวงจรเดมมิง โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์กระบวนการ ทฤษฎีการศึกษาเวลา ทฤษฎีการจัดสมดุลสายการผลิต ทฤษฎีผลิตภาพแรงงาน และทำการวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุของกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยการใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพร่วมกับทฤษฎีความสูญเสีย 7 ประการ และหาแนวทางในการปรับปรุงด้วยหลักการ ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของสายการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดจากเดิม 4.27 เปอร์เซ็นต์ รอบเวลาจริงของการผลิตลดลงเท่ากับ 8.13 เปอร์เซ็นต์ จำนวนพนักงานในกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดลดลง 4 คน และผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 41.57 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง พบว่า ประสิทธิภาพของสายการผลิต เส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง และรอบเวลาจริงของการผลิตเท่าเดิม เท่ากับ 66.85 เปอร์เซ็นต์ และ 18.68 วินาทีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องหนัที่ไม่ได้มีการลงทุนเพิ่ม และขั้นตอนการบรรจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่การปรับปรุงดังกล่าวทำให้จำนวนพนักงานในกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งลดลง 5 คน และผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 16.59 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

The purpose of this independent study is to improve productivity of noodle production process of case study factory. From the general manager's interview found that the workload of the production line and the number of employees is not balancing. This reflected the use of inefficiency production resources. The product used in this study was 2 types include fresh noodle and semi-dry noodle. The scope of this study ranged from rice cleaning process to packing noodle process. This study used quality improvement, process analysis, time study, production line balancing, labor productivity, 7 wastes, 7 QC tools and Eliminate, Combine, Rearrange, and Simplify (ECRS). The study results indicated that the improvement of fresh noodle production process can increase the efficiency of fresh noodle production process 4.27 percent, decrease cycle time 8.13 percent, decrease number employee in this production process 4 persons and increase labor productivity 41.57 percent. And the improvement of semi-dry noodle production process indicated that the efficiency of semi-dry noodle production process and cycle time are the same as 66.85 percent and 18.68 second per kilogram respectively due to the limitations of the machine that no additional investment and packing process can't be changed. But this improvement can decrease number employee in this production process 5 persons and increase labor productivity 16.59 percent.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญในระดับต้น ๆ ของประเทศ เนื่องจากก๋วยเตี๋ยวเป็นอาหารหลักอย่างหนึ่งของคนไทยที่รองลงมาจากข้าว ดังนั้น ในปัจจุบันจึงมีผู้ประกอบการที่ดำเนินการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวในประเทศไทยกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ [1] โรงงานกรณีศึกษาอยู่ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางที่ตั้งอยู่ในจังหวัดเชียงใหม่ ดำเนินการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวในรูปแบบของเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดและเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง ส่งมอบให้แก่ลูกค้าครอบคลุม 8 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง แพร่ แม่ฮ่องสอน น่าน และพะเยา โดยยอดขายมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากการสัมภาษณ์ผู้จัดการทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษาทำให้พบว่าการะงานของสายการผลิตกับจำนวนพนักงานมีความไม่สมดุลกัน สะท้อนให้เห็นถึงการใช้ทรัพยากรในการผลิตที่ยังไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อโรงงานกรณีศึกษา อาทิเช่น ด้านต้นทุนแรงงานของพนักงานในกรณีที่มีจำนวนพนักงานที่มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น และในกรณีที่ความต้องการนั้นเพิ่มมากขึ้น แต่มีการใช้เวลาในการผลิตที่มากเกินไป บางครั้งอาจส่งผลให้ไม่สามารถส่งมอบเส้นก๋วยเตี๋ยวให้กับลูกค้าได้ทันเวลา เป็นต้น อีกทั้งที่แห่งนี้ยังไม่เคยมีการจัดทำเวลามาตรฐานของ

กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว ซึ่งหากทราบถึงเวลามาตรฐานของกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว จะส่งผลให้สามารถวางแผนการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับแนวโน้มความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นได้ ผู้ศึกษาจึงต้องการศึกษาการปรับปรุงผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อนำมาปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวของโรงงานกรณีศึกษาให้มีผลิตภาพเพิ่มมากขึ้น และเป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกันได้

2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงคุณภาพ หรือวงจรเดมมิงเป็นเครื่องมือสำหรับการปรับปรุงกระบวนการทำงาน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการวางแผน ขั้นตอนการปฏิบัติตามแผน ขั้นตอนการตรวจสอบ และขั้นตอนการดำเนินการให้เหมาะสม [2]

แผนภูมิกระบวนการไหล เป็นแผนภูมิที่ใช้วิเคราะห์ขั้นตอนการไหลของวัตถุดิบ ชิ้นส่วน พนักงาน และอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับกิจกรรมต่าง ๆ แสดงเป็นสัญลักษณ์และคำอธิบายประกอบลงในแผนภูมิ สัญลักษณ์มาตรฐานมี 5 ตัว ได้แก่ การปฏิบัติงาน การเคลื่อนย้าย การตรวจสอบ การคอย และการเก็บ [3]

การศึกษาเวลา เป็นเทคนิคเพื่อใช้เวลาในการทำงานจากคนงานที่มีความเหมาะสม และมีอัตราการทำงานที่เป็นปกติ ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานในการวัดผลงาน โดยผลลัพธ์ของการวัดผลงาน คือ เวลามาตรฐาน โดยการคำนวณจำนวนครั้งที่ต้องจับเวลา ใช้สมการที่ (1) และสามารถคำนวณหาค่าเวลาปกติที่มีการการประเมินอัตราการทำงานด้วยวิธี Westinghouse และเวลามาตรฐาน โดยใช้สมการ (2) และ (3) ตามลำดับ [4]

$$N = \left[\frac{\frac{k}{s} \sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2}}{\sum x} \right]^2 \quad (1)$$

โดยที่ N = จำนวนครั้งในการจับเวลาตัวอย่าง
n = จำนวนครั้งที่ต้องจับเวลา
s = ความคลาดเคลื่อน กำหนดเท่ากับ 0.05
k = ตัวประกอบของระดับความเชื่อมั่น เท่ากับ 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.5 เปอร์เซนต์

$$\text{เวลาปกติ} = \text{เวลาเฉลี่ย} \times \text{ค่าอัตราความเร็ว} \quad (2)$$

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติ} (1 + \text{เปอร์เซ็นต์เวลาเผื่อ}) \quad (3)$$

การจัดสมดุลสายการผลิตเป็นการพยายามที่จะจัดสถานีงานต่างๆ ให้มีอัตราการทำงานหรือเวลาที่ใช้เท่า ๆ กัน ภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ คือ เงื่อนไขลำดับก่อนหน้า และข้อจำกัดของรอบเวลาการผลิต [5] สามารถคำนวณรอบเวลาที่กำหนดสำหรับสายการผลิต จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด และประสิทธิภาพของสายการผลิต ดังสมการที่ (4) (5) และ (6) ตามลำดับ

$$C_d = \frac{\text{เวลาสำหรับการทำการผลิต}}{\text{จำนวนผลผลิตที่ต้องการ}} \quad (4)$$

$$N = \frac{\sum_{i=1}^j t_i}{C_d} \quad (5)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^j t_i}{nC_a} \quad (6)$$

โดยที่ N = จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด
E = ประสิทธิภาพของสายการผลิต
 t_i = เวลาของสถานีงานย่อย i
j = จำนวนสถานีงานย่อยทั้งหมด
n = จำนวนสถานีงาน
 C_d = รอบเวลาการผลิตที่กำหนด
 C_a = รอบเวลาจริง

รอบเวลาจริง คือ เวลาการทำงานของสถานีงานที่ใช้เวลานานที่สุด ในสายการผลิตที่ผลิตชิ้นงานเสร็จออกมาแต่ละชิ้น

ผลิตภาพ เป็นดัชนีวัดประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตที่ได้ต่อทรัพยากรที่ใช้ในการผลิต [3] โดยการศึกษาในครั้งนี้วัดผลิตภาพด้านแรงงาน ดังสมการที่ (7)

$$\text{ผลิตภาพแรงงาน} = \frac{\text{ผลผลิต}}{\text{จำนวนชั่วโมงแรงงาน}} \quad (7)$$

โดยจำนวนชั่วโมงแรงงานเป็นชั่วโมงที่ใช้ในการผลิตเท่ากับ จำนวนแรงงานที่ใช้ในการผลิตคูณด้วยเวลาที่ใช้ในการผลิต

เครื่องมือควบคุมคุณภาพเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการไม่เปลี่ยนแปลงและมีสมรรถภาพสูงขึ้น [6] โดยการศึกษาในครั้งนี้ใช้แผนภาพพาเรโต แผนผังก้างปลา และกราฟ

ความสูญเสีย เป็นกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งความสูญเสียของสายการผลิตออกเป็น 7 ประการ ได้แก่ การผลิตมากเกินไป การรอคอย การขนส่ง วัสดุคงคลัง การเคลื่อนที่ การปฏิบัติงานที่ไม่จำเป็น และของเสีย [7]

หลักการ ECRS เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการทำงานที่ดีกว่า ประกอบด้วย 4 หลักการ [3] ดังนี้

การจัดงานที่ไม่จำเป็นทั้งหมด (Eliminate) คือ หากงานที่วิเคราะห์ไม่มีมูลค่าเพิ่มกับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการนั้นออกไป ซึ่งจะทำให้สามารถลดต้นทุนค่าแรงงานทางตรง วัสดุุดิบ และค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องของทั้งหมดได้

การรวมขั้นตอนการปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน (Combine) กล่าวคือ การแบ่งย่อยขั้นตอนการปฏิบัติงานมากเกินไป ทำให้เกิดปัญหา เช่น ปริมาณงานที่ไม่สมดุลกันในแต่ละสายการผลิต ส่งผลให้มีงานค้างหรืองานคอยในการปฏิบัติงาน การรวมงานจึงช่วยลดการทำงานและการเคลื่อนย้ายที่ไม่จำเป็นให้น้อยลง

การสลับเปลี่ยนลำดับการปฏิบัติงาน (Rearrange) เป็นการปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานบางขั้นตอน เป็นส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น

การทำงานให้ง่ายขึ้น (Simplify) เป็นการปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานให้มีความซับซ้อนและยุ่งยากลดลง ช่วยให้การเคลื่อนที่ที่ไม่จำเป็น และความเมื่อยล้าของพนักงานลดลง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในหลายงานวิจัย [8-10] ทำการศึกษาเวลาร่วมกับการจัดสมดุลสายการผลิต โดยการนำเวลามาตรฐานที่ได้จากการศึกษาเวลานั้นมาคำนวณหาประสิทธิภาพของสายการผลิตก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุง เพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

แผนภูมิกระบวนการไหลนิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการผลิต ทำให้ผู้ศึกษาเกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการศึกษได้อย่างชัดเจนมากขึ้น อย่างเช่นงานวิจัย [9-10]

เครื่องมือควบคุมคุณภาพถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดย [9] ได้ใช้แผนภาพพาเรโตในการคัดเลือกกระบวนการทำงานที่เป็นปัญหาสำคัญต่อประสิทธิภาพ

หลักการ ECRS มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการหลายอย่างเช่น [9-10] ได้ใช้หลักการ ECRS เพื่อลดความสูญเปล่าในการผลิตและใช้

หลักการดังกล่าว เพื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน ทำให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตและผลผลิตเพิ่มขึ้น อีกทั้งทำให้รอบเวลาจริงของการผลิตลดลง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ทำการศึกษาระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดและเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง โดยมีการดำเนินงานวิจัยตามวงจรเดมมิง ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการวางแผน

ทำการศึกษาระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวและแสดงกระบวนการย่อยของแต่ละกระบวนการด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล จากนั้นทำการหาเวลามาตรฐานตามทฤษฎีของการศึกษาเวลา คำนวณประสิทธิภาพของสายการผลิตตามทฤษฎีการจัดสมดุลสายการผลิต และคำนวณผลผลิตภาพแรงงานก่อนปรับปรุง ทำการวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุของกระบวนการผลิต โดยการใช้เครื่องมือควบคุมคุณภาพ ร่วมกับทฤษฎีความสูญเสีย 7 ประการ และหาแนวทางในการปรับปรุงด้วยหลักการ ECRS

3.2 ขั้นตอนการปฏิบัติตามแผน

ทำตามที่ได้วางแผนไว้ คำนวณประสิทธิภาพของสายการผลิต และคำนวณผลผลิตภาพแรงงานหลังปรับปรุง

3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบ

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวและผลผลิตภาพแรงงานก่อนและหลังปรับปรุง

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการให้เหมาะสม

เมื่อหลังการปรับปรุงแล้วผลผลิตภาพเพิ่มมากขึ้น จึงจัดทำวิธีการนั้นเป็นมาตรฐาน

4. ผลการวิจัย

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา

ผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษามี 2 ประเภท ดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด คือ เส้นสดเล็ก เส้นสดกลาง และเส้นสดใหญ่ เป็นแผ่นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านหัวรีดออกมาเป็นเส้นและตัดออกมาเป็นก้อน โดยไม่ผ่าน

ขั้นตอนการทำให้แห้งและนำมาบรรจุเป็นห่อ ห่อละ 1 กิโลกรัม ซึ่งกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด ทั้ง 3 ชนิดนี้มีกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน แต่แตกต่างกันตรงขนาดของเส้นเท่านั้น

2) ผลิตภัณฑ์ก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง คือ เส้นเล็ก เป็นแผ่นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการผึ่งลม และนำไปต้ม หลังจากนั้นนำมาหั่นด้วยเครื่องหั่นออกมาเป็นเส้น และนำมาบรรจุเป็นห่อห่อละ 1 กิโลกรัม

4.2 กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

4.2.1 ขั้นตอนการวางแผนปรับปรุงผลผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

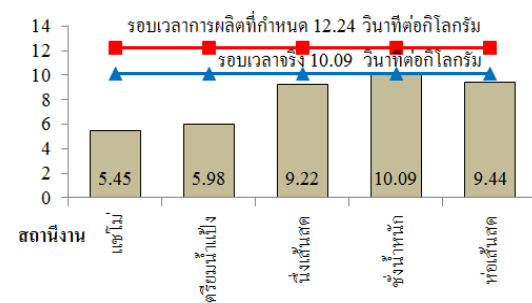
กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด มีกระบวนการหลัก กระบวนการย่อย และจำนวนพนักงานของแต่ละกระบวนการย่อย แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

กระบวนการหลัก	กระบวนการย่อย	จำนวนพนักงาน
แช่ไม่	ทำความสะอาดข้าว	2 คน
	แช่ข้าว	
	ไม่ข้าว	
เตรียมน้ำแป้ง	เตรียมน้ำแป้ง	2 คน
นึ่งเส้นสด	นึ่งเส้นสด	2 คน
บรรจุเส้นสด	ชั่งน้ำหนัก	4 คน
	ห่อแผ่นพลาสติก	4 คน
	ไฮเดน (Plastic Sheet HDPE)	
	ใส่ถุงพลาสติก	4 คน

หลังจากการศึกษากระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด พบว่า เวลาสำหรับการทำการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด เท่ากับ 17 ชั่วโมงต่อกะ และลูกค้ามีความต้องการเส้นสดทั้งหมดเฉลี่ยต่อกะเท่ากับ 4,945 กิโลกรัม สามารถหารอบเวลาการผลิตที่กำหนดโดยแทน

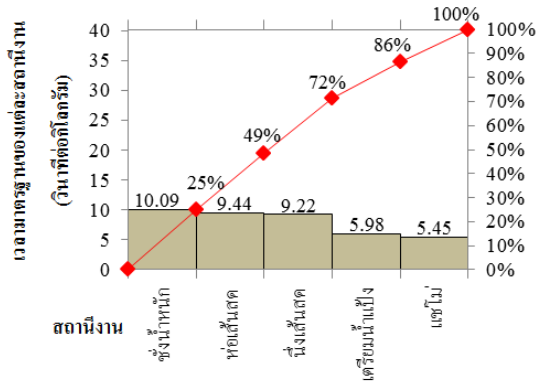
ค่าในสมการที่ 4 ได้รอบเวลาการผลิตที่กำหนด เท่ากับ 12.24 วินาทีต่อกิโลกรัม และระยะเวลารวมทั้งหมดของกระบวนการ หรือเวลารวมของสถานียานย่อยทั้งหมด เท่ากับ 40.18 วินาทีต่อกิโลกรัม สามารถหาจำนวนสถานียานที่น้อยที่สุดที่กระบวนการควรจะมีโดยการแทนค่าในสมการที่ 5 ได้จำนวนสถานียานที่น้อยที่สุดที่ควรจะมี เท่ากับ 4 สถานียาน แต่สามารถแบ่งสถานียานได้ทั้งหมด 5 สถานียาน เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในการผลิตมีการจัดวางเครื่องจักรแยกออกเป็นสัดส่วนที่ชัดเจน และอยู่ห่างกัน สามารถแสดงเวลามาตรฐานของแต่ละสถานียาน ดังรูปที่ 1 ซึ่งจากรูปที่ 1 พบว่า การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดนั้น สามารถผลิตได้ทันต่อความต้องการของลูกค้า เนื่องจากรอบเวลาจริงน้อยกว่ารอบเวลาการผลิตที่กำหนด และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของสายการผลิต ก่อนปรับปรุงจากการแทนค่าในสมการที่ 6 ได้เท่ากับ 79.64 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1 แผนภูมิแสดงเวลามาตรฐานกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดแต่ละสถานียานก่อนปรับปรุง

ณ ระดับความต้องการเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด 4,945 กิโลกรัมต่อกะ มีชั่วโมงแรงงานที่ใช้ในการผลิตต่อกะ เท่ากับ 56.73 ชั่วโมง สามารถคำนวณผลผลิตภาพแรงงานต่อกะก่อนปรับปรุงจากการแทนค่าในสมการที่ 7 ได้เท่ากับ 87.17 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

เมื่อนำเวลามาตรฐานของแต่ละสถานียานที่แสดงในรูปที่ 1 มาจัดทำเป็นแผนภูมิพาเรโต ดังรูปที่ 2



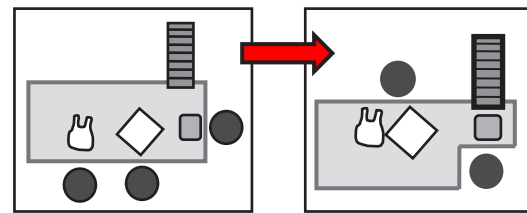
รูปที่ 2 แผนภูมิพาเรโตแสดงเวลามาตรฐานกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดแต่ละสถานีงานก่อนปรับปรุง

จากรูปที่ 2 พบว่า มี 3 สถานีงานที่มีเวลามาตรฐานมากที่สุด คิดเป็น 72 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ สถานีงานชั่งน้ำหนัก สถานีงานห่อเส้นสด และสถานีงานนึ่งเส้นสด ตามลำดับความสำคัญของปัญหา โดยที่สถานีงานนึ่งเส้นสดเป็นสถานีงานที่ไม่สามารถเข้าไปดำเนินการแก้ไขได้ เนื่องจากเป็นการทำงานของเครื่องจักรที่มีการปรับตั้งค่า เพื่อให้ได้เส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดมีคุณภาพที่เหมาะสม

สถานีงานชั่งน้ำหนัก พบปัญหา คือ มีการใช้เวลาในการทำงานมากที่สุด จากการเข้าไปศึกษาโดยการสังเกตแบบไม่มีส่วนร่วม พบว่า สาเหตุหลักเกิดจากความเมื่อยล้าของพนักงานในการเคลื่อนไหวร่างกายที่ซ้ำ ๆ กันในท่าที่ก่อให้เกิดความเมื่อยล้า นั่นคือ การเอื้อมและเอี้ยวตัวเป็นเวลานานตลอดกระบวนการชั่งน้ำหนัก โดยการเคลื่อนไหวร่างกายที่มากเกินไปจนทำให้เกิดจากการมีโต๊ะบรรจุที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงาน ดังรูปที่ 3 โดยสาเหตุของปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของพนักงานที่ไม่จำเป็น จึงทำการปรับเปลี่ยนโต๊ะบรรจุในห้องบรรจุให้มีความเหมาะสม ดังรูปที่ 4 เพื่อให้เกิดความง่ายและสะดวกในการทำงานมากขึ้น (Simplify) ทำให้การเคลื่อนที่ในการเอื้อมและเอี้ยวตัวลดลง ส่งผลให้ความเมื่อยล้าลดลง



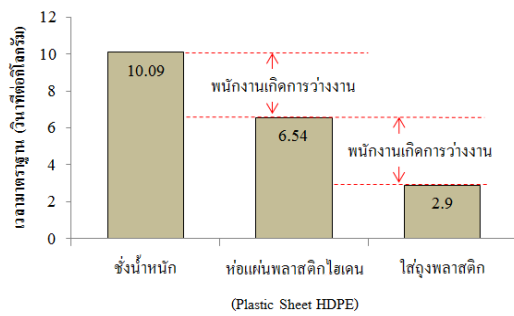
รูปที่ 3 การทำงานในโต๊ะบรรจุเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด



รูปที่ 4 โต๊ะบรรจุในห้องบรรจุก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง ตามลำดับ

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ● แทน พนักงาน, สัญลักษณ์ □ แทน เครื่องชั่งน้ำหนัก, สัญลักษณ์ ◇ แทน แผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE), สัญลักษณ์ ◡ แทน ถุงพลาสติก และสัญลักษณ์ ▤ แทน สายพานลำเลียง

สถานีงานห่อเส้นสด พบปัญหา คือ เกิดการว่างงานของพนักงาน ในสถานีงานห่อเส้นสด ประกอบด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) และกระบวนการใส่ถุงพลาสติก โดยที่กระบวนการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) เป็นขั้นตอนที่ทำต่อจากกระบวนการชั่งน้ำหนักซึ่งอยู่ในสถานีงานชั่งน้ำหนัก สาเหตุเกิดจากจำนวนพนักงานต่อโต๊ะบรรจุมากเกินไป เนื่องจากมีวิธีการทำงานที่แบ่งการทำงานแบบ 1 คนต่อ 1 งาน โดยสาเหตุของปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสูญเสียที่เกิดจากการรอคอยงานจากกระบวนการก่อนหน้า สามารถแสดงการเกิดการว่างงานของพนักงานในสถานีงานห่อเส้นสด ดังรูปที่ 5

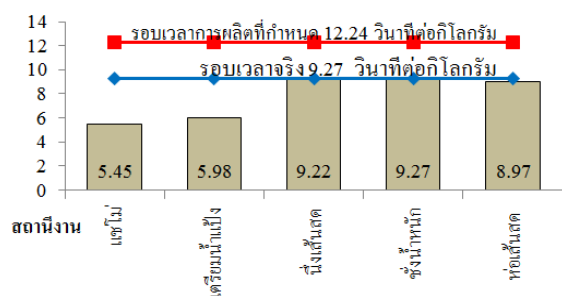


รูปที่ 5 การเกิดการว่างงานของพนักงาน
ในสถานีงานห่อเส้นสด

จึงทำการปรับปรุงโดยการลดพนักงานในสถานีงานห่อเส้นสด 1 คนต่อโต๊ะ (การผลิตมีทั้งหมด 2 กะ ได้แก่ กะเช้า และกะเย็น โดยแต่ละกะมีทั้งหมด 2 โต๊ะ ดังนั้นพนักงานที่ลดลงทั้งหมด เท่ากับ 4 คน) เป็นการขจัดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่า (Eliminate) นั่นคือการขึ้นรอของพนักงานใส่ถุงพลาสติก และทำการปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานของพนักงาน คือ การรวมงานย่อยเข้าด้วยกัน (Combine) โดยการให้พนักงานที่ทำการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) ทำการใส่ถุงพลาสติกด้วย เพื่อลดเวลาการรอคอยงานจากกระบวนการชั่งน้ำหนักที่เป็นกระบวนการก่อนหน้านี้

4.2.2 ขั้นตอนการปฏิบัติตามแผนการปรับปรุงผลผลิตกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

หลังจากปฏิบัติตามแผนที่วางไว้ ยังคงจัดสถานีงานได้ 5 สถานีงาน เนื่องจากทำการปรับปรุงภายในสถานีงานเท่านั้น สามารถแสดงเวลามาตรฐานของแต่ละสถานีงานหลังปรับปรุง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงเวลามาตรฐานกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดแต่ละสถานีงานหลังปรับปรุง

จากรูปที่ 6 เวลารวมของสถานีงานย่อยทั้งหมดเท่ากับ 38.89 วินาทีต่อกิโลกรัม สามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของสายการผลิตหลังปรับปรุงจากการแทนค่าในสมการที่ 6 ได้เท่ากับ 83.91 เปอร์เซ็นต์

ณ ระดับความต้องการเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดเฉลี่ยเท่ากับ 4,945 กิโลกรัมต่อกะ มีชั่วโมงแรงงานที่ใช้ในการผลิตต่อกะ เท่ากับ 40.07 ชั่วโมง สามารถคำนวณผลผลิตภาพแรงงานต่อกะหลังปรับปรุงจากการแทนค่าในสมการที่ 7 ได้เท่ากับ 123.41 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

4.2.3 ขั้นตอนการตรวจสอบผลการปรับปรุงผลผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

ทำการตรวจสอบผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด โดยการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุงของกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลต่าง (%)
ประสิทธิภาพของสายการผลิต (%)	79.64	83.91	+4.27
รอบเวลาจริงของการผลิต (วินาทีต่อกิโลกรัม)	10.09	9.27	-8.13
จำนวนพนักงาน (คน)	18	14	-22.22
ผลิตภาพแรงงาน (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	87.17	123.41	+41.57

4.2.4 ขั้นตอนการดำเนินการให้เหมาะสมหลังการปรับปรุงผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

หลังทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด ทำให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้น รอบเวลาจริงของการผลิตลดลง จำนวนพนักงานลดลง และผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้น จึงนำวิธีการปรับปรุงดังกล่าวมาดำเนินการให้เหมาะสม โดยการกำหนดเป็นมาตรฐานของกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

4.3 กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

4.3.1 ขั้นตอนการวางแผนปรับปรุงผลิตภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง มีกระบวนการหลัก กระบวนการย่อย และจำนวนพนักงานของแต่ละกระบวนการย่อย แสดงดังตารางที่ 3

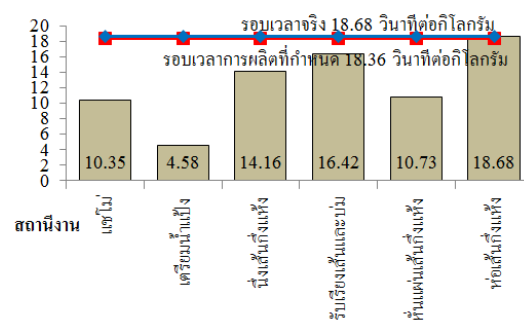
ตารางที่ 3 รายละเอียดกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

กระบวนการหลัก	กระบวนการย่อย	จำนวนพนักงาน
แช่ไม่	ทำความสะอาดข้าว	4 คน
	แช่ข้าว	
	ไม่ข้าว	
เตรียมน้ำแป้ง	เตรียมน้ำแป้ง	6 คน
นึ่งเส้นกึ่งแห้ง	นึ่งเส้นกึ่งแห้ง	
รับเรียงเส้น	รับเรียงเส้น	6 คน
	บ่มเส้น	
บรรจุเส้นกึ่งแห้ง	เลื่อนแท่นหั่นและยกแผ่นก๋วยเตี๋ยวใส่เครื่องหั่น	5 คน
	เครื่องหั่นแผ่นก๋วยเตี๋ยว	
	ยกเส้นก๋วยเตี๋ยวลงบนโต๊ะบรรจุ	
	ชั่งน้ำหนัก	6 คน
	ห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE)	6 คน

ตารางที่ 3 (ต่อ) รายละเอียดกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

กระบวนการหลัก	กระบวนการย่อย	จำนวนพนักงาน
บรรจุเส้นกึ่งแห้ง	ห่อกระดาดปูฟพร้อมติดสติ๊กเกอร์	6 คน

หลังจากการศึกษากิจกรรมการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง พบว่า เวลาสำหรับการทำการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 49 ชั่วโมงต่อกระบวนการ และลูกค้ามีความต้องการเส้นกึ่งแห้งทั้งหมดเฉลี่ยต่อกะเท่ากับ 9,556 กิโลกรัม สามารถหารรอบเวลาการผลิตที่กำหนดโดยแทนค่าในสมการที่ 4 ได้รอบเวลาการผลิตที่กำหนด เท่ากับ 18.36 วินาทีต่อกิโลกรัม และระยะเวลารวมทั้งหมดของกระบวนการ หรือเวลารวมของสถานีงานย่อยทั้งหมด เท่ากับ 74.92 วินาทีต่อกิโลกรัม สามารถหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดที่กระบวนการควรจะมีโดยการแทนค่าในสมการที่ 5 ได้จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดที่ควรจะมีเท่ากับ 5 สถานีงาน แต่สามารถแบ่งสถานีงานได้ทั้งหมด 6 สถานีงาน เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในการผลิตมีการจัดวางเครื่องจักรแยกออกเป็นสัดส่วนที่ชัดเจน และอยู่ห่างกัน สามารถแสดงเวลามาตรฐานของแต่ละสถานีงาน ดังรูปที่ 6

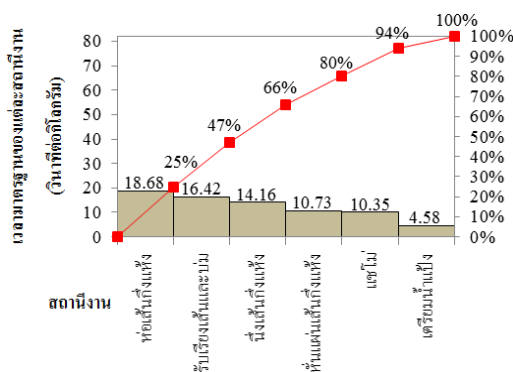


รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงเวลามาตรฐานกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งแต่ละสถานีงานก่อนปรับปรุง

จากรูปที่ 6 พบว่า การผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งนั้น ไม่สามารถผลิตได้ทันต่อความต้องการของลูกค้า เนื่องจากรอบเวลาจริงมากกว่ารอบเวลาการผลิตที่กำหนด และสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของสายการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งก่อนปรับปรุงโดยการแทนค่าในสมการที่ 6 ได้เท่ากับ 66.85 เปอร์เซ็นต์

ณ ระดับความต้องการเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 9,556 กิโลกรัม มีชั่วโมงแรงงานที่ใช้ในการผลิต เท่ากับ 290.30 ชั่วโมง สามารถคำนวณผลผลิตภาพแรงงานก่อนปรับปรุงจากการแทนค่าในสมการที่ 7 ได้เท่ากับ 32.92 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

เมื่อนำเวลามาตรฐานของแต่ละสถานีนงานมาจัดทำเป็นแผนภูมิพารโต ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภูมิพารโตแสดงเวลามาตรฐานกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งแต่ละสถานีนงานก่อนปรับปรุง

จากรูปที่ 7 พบว่า 4 สถานีนงานที่มีเวลามาตรฐานมากที่สุด คิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ สถานีนงานหั่นเส้นกึ่งแห้ง สถานีนงานรับเรียงเส้นและบ่ม สถานีนงานนึ่งเส้นกึ่งแห้ง และสถานีนงานหั่นแผ่นเส้นกึ่งแห้ง ตามลำดับความสำคัญของปัญหา โดยที่สถานีนงานรับเรียงเส้นกึ่งแห้งและบ่ม เป็นสถานีนงานที่ไม่สามารถเข้าไปดำเนินการแก้ไขได้ เนื่องจากกระบวนการรับเรียงเส้น เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลาในการจัดเรียงแผ่นเส้นก๋วยเตี๋ยวให้แผ่นนั้นมีความสม่ำเสมอตลอดเวลาจัดเรียง อีกทั้งกระบวนการบ่มเป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลาเพื่อให้เส้นมีคุณสมบัติที่

เหมาะสม ก่อนที่จะส่งต่อไปยังสถานีนงานหั่นแผ่นเส้นกึ่งแห้ง ซึ่งเป็นสถานีนงานถัดไปได้ และในสถานีนงานนึ่งเส้นกึ่งแห้งเป็นสถานีนงานที่ไม่สามารถเข้าไปดำเนินการแก้ไขได้ เนื่องจากเป็นการทำงานของเครื่องจักรที่มีการปรับตั้งค่า เพื่อให้ได้เส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งที่มีคุณภาพที่เหมาะสม

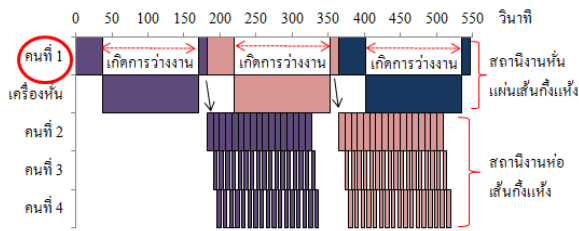
โดยปัญหาและสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นใน 2 สถานีนงาน คือ สถานีนงานหั่นเส้นกึ่งแห้งเป็นสถานีนงานที่ใช้เวลานานที่สุด และเป็นสถานีนงานที่มีความต่อเนื่องกับสถานีนงานหั่นแผ่นเส้นกึ่งแห้งซึ่งเป็นสถานีนงานก่อนหน้า ซึ่งทั้ง 2 สถานีนงานนี้อยู่ในห้องบรรจุ และจากการศึกษาโดยการสังเกตแบบไม่มีส่วนร่วม พบว่า กระบวนการในห้องบรรจุมีการใช้พนักงานประจำโต๊ะที่ไม่เท่ากันทั้งๆที่มีขั้นตอนการทำงานที่เหมือนกันแสดงดังรูปที่ 8 และเกิดการว่างงานของพนักงาน แสดงให้เห็นถึงความสูญเสียที่เกิดจากการรอคอย



รูปที่ 8 การบรรจุเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

หน้าที่ของพนักงานแต่ละคนในห้องบรรจุก่อนปรับปรุงมีรายละเอียด ดังนี้ คนที่ 1 ทำการเลื่อนแท่นหั่น แล้วยกแผ่นก๋วยเตี๋ยวใส่เครื่องหั่น เปิดเครื่องหั่น และทำการยกเส้นลงเมื่อเครื่องหั่นเสร็จ คนที่ 2 ทำการชั่งน้ำหนักเส้นกึ่งแห้ง คนที่ 3 ทำการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) และคนที่ 4 ทำการห่อกระดวยปรีฟ พร้อมติดสติ๊กเกอร์ โดยกระบวนการเลื่อนแท่นหั่นและยกแผ่นก๋วยเตี๋ยวขึ้นเครื่องหั่น กระบวนการที่เครื่องหั่นแผ่นก๋วยเตี๋ยว กระบวนการยกเส้นก๋วยเตี๋ยวลงบนโต๊ะบรรจุเป็นกระบวนการที่ทำเป็นรอบ เฉลี่ยเท่ากับ 17 กิโลกรัมต่อรอบ สามารถแสดงระยะเวลาในห้องบรรจุเส้น

กึ่งแห้งโดยใช้พนักงาน 4 คน ต่อโต๊ะ จำนวน 2 รอบ เท่ากับ 34 ห่อ (34 กิโลกรัม) ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ระยะเวลาในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้ง 4 คนต่อโต๊ะ จำนวน 2 รอบ ก่อนปรับปรุง

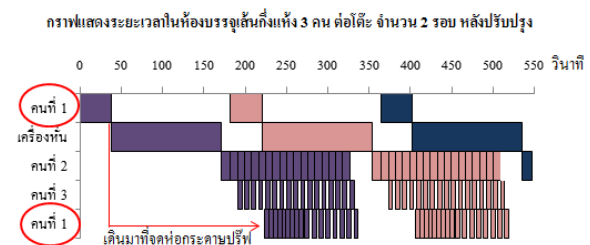
หมายเหตุ : รอบที่ 1 คือ วินาทีที่ 0 ถึง วินาทีที่ 336.77 และ รอบที่ 2 คือ วินาทีที่ 182.41 ถึง วินาทีที่ 519.18

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าพนักงานคนที่ 1 เกิดการว่างงานหลังจากเปิดเครื่องให้ทำงานเป็นระยะเวลา 2.22 นาที และพนักงานจะทำการบรรจุเสร็จก่อนที่เครื่องจะหั่นรอบต่อไปเสร็จเป็นระยะเวลา 16.32 วินาที จึงทำการปรับปรุงโดยการลดจำนวนพนักงานโต๊ะบรรจุจาก 4 คนต่อโต๊ะเหลือ 3 คนต่อโต๊ะ เป็นการขจัดกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่า (Eliminate) นั่นคือ การขึ้นรถเครื่องหั่นของพนักงานคนที่ 1 และทำการปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานโดยการรวมงานย่อย (Combine) ดังนี้ให้พนักงานคนที่ 1 ทำการเลื่อนแท่นหั่น แล้วยกแผ่นเส้นใส่เครื่องหั่น เปิดเครื่องหั่น และเดินไปห่อกระดาษปูฟพร้อมติดสติ๊กเกอร์ และให้พนักงานคนที่ 2 ทำการยกเส้นลงบนโต๊ะบรรจุเมื่อเครื่องหั่นเสร็จ ก่อนทำการชั่งน้ำหนัก

4.3.2 ขั้นตอนการปฏิบัติตามแผนการปรับปรุงผลผลิตกระบวนการผลิตเส้นก๊วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงการทำงานในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้งเท่านั้น โดยมีข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องหั่น คือ เครื่องหั่นมีลักษณะการหั่นในแนวยาวหั่นได้เฉลี่ย 17 กิโลกรัมต่อครั้ง (ไม่ว่าจะใส่จำนวนแผ่นเส้นกึ่งแห้งซ้อนกันมากหรือน้อย เครื่องหั่นจะใช้เวลาเท่ากัน) ประกอบกับการไม่ได้มีการลงทุนเพิ่ม และขั้นตอนการบรรจุไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ จึงทำให้เวลามาตรฐานแต่ละสถานีงานหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับเวลามาตรฐานแต่ละสถานีงาน

ก่อนปรับปรุง โดยหน้าที่ของพนักงานแต่ละคนในห้องบรรจุหลังปรับปรุงมีรายละเอียด ดังนี้ คนที่ 1 ทำการเลื่อนแท่นหั่นแล้วยกเส้นใส่เครื่องหั่น และเปิดเครื่องหั่น จากนั้นเดินไปห่อกระดาษปูฟ พร้อมติดสติ๊กเกอร์ระหว่างรอเครื่องจักรทำงาน คนที่ 2 ทำการยกเส้นลงบนโต๊ะบรรจุ เมื่อเครื่องหั่นเสร็จ และชั่งน้ำหนักเส้นกึ่งแห้ง และคนที่ 3 ทำการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) สามารถแสดงระยะเวลาในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้งหลังปรับปรุง โดยใช้พนักงาน 3 คน ต่อโต๊ะ จำนวน 2 รอบ เท่ากับ 34 ห่อ (34 กิโลกรัม) ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ระยะเวลาในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้ง

3 คนต่อโต๊ะ จำนวน 2 รอบ หลังปรับปรุง

หมายเหตุ : รอบที่ 1 คือ วินาทีที่ 0 ถึง วินาทีที่ 336.77 และ รอบที่ 2 คือ วินาทีที่ 182.41 ถึง วินาทีที่ 519.18

จากรูปที่ 10 พนักงานคนที่ 1 จะใช้เวลาในการเดินจากเครื่องหั่นไปยังจุดห่อกระดาษปูฟ เท่ากับ 3.62 วินาที และพนักงานจะทำการบรรจุเสร็จก่อนที่เครื่องหั่นจะหั่นรอบต่อไปเสร็จเป็นระยะเวลา 16.32 วินาที

จากการปรับปรุงดังกล่าวทำให้พนักงานลดลงแต่ระยะเวลาการทำงานยังคงเท่าเดิม สามารถคำนวณประสิทธิภาพของสายการผลิตเส้นก๊วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งหลังปรับปรุงได้เท่ากับ 66.85 เปอร์เซนต์ และ ณ ระดับความต้องการเส้นก๊วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 9,556 กิโลกรัม มีชั่วโมงแรงงานที่ใช้ในการผลิตเท่ากับ 249.00 ชั่วโมง สามารถคำนวณผลผลิตภาพแรงงานหลังปรับปรุงจากการแทนค่าในสมการที่ 7 ได้เท่ากับ 38.38 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

4.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบผลการปรับปรุงผลภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

ทำการตรวจสอบผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง โดยการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุงของกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

รายละเอียด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลต่าง (%)
ประสิทธิภาพของสายการผลิต (%)	66.85	66.85	0
รอบเวลาจริงของการผลิต (วินาทีต่อกิโลกรัม)	18.68	18.68	0
จำนวนพนักงาน (คน)	39	34	-12.82
ผลผลิตภาพแรงงาน (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	32.92	38.38	+16.59

4.3.4 ขั้นตอนการดำเนินการให้เหมาะสมหลังการปรับปรุงผลภาพกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

หลังทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง ทำให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตและรอบเวลาจริงของการผลิตเท่าเดิม แต่จำนวนพนักงานในกระบวนการผลิตลดลง และผลผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้น จึงนำวิธีการปรับปรุงดังกล่าวมาดำเนินการให้เหมาะสมโดยการกำหนดเป็นมาตรฐานของกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสด

ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดทั้งหมด 2 สถานีงาน ได้แก่ สถานีงานชั่งน้ำหนัก ซึ่งเป็นสถานีงานที่ใช้เวลาในการทำงานมากที่สุด เนื่องจากโต๊ะบรรจุมีความไม่เหมาะสม จึงทำให้พนักงานเกิดการเอื้อมและเอี้ยวตัวตลอดการชั่งน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงความสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของพนักงานที่ไม่จำเป็น จึงทำปรับปรุงโดยการปรับเปลี่ยนโต๊ะบรรจุในห้องบรรจุ ให้มีความเหมาะสมและสถานีงานห่อเส้นสด เป็นสถานีงานที่เกิดการว่างงานของพนักงาน เนื่องจากการทำงานมีการแบ่งเป็น 1 คนต่อ 1 งาน แสดงให้เห็นถึงความสูญเสียที่เกิดจากการรอคอยงานจากกระบวนการก่อนหน้า จึงทำการปรับปรุงโดยการลดจำนวนพนักงาน 1 คน และทำการรวมงานย่อยเข้าด้วยกัน กล่าวคือ ให้พนักงานที่ทำการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) ทำการใส่ถุงพลาสติกด้วย เพื่อลดเวลาการรอคอยงานจากกระบวนการชั่งน้ำหนักที่เป็นกระบวนการก่อนหน้า

จากการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นสดดังกล่าว ทำให้ประสิทธิภาพของสายการผลิตเพิ่มขึ้น 4.27 เปอร์เซ็นต์ รอบเวลาจริงของการผลิตลดลง 8.13 เปอร์เซ็นต์ จำนวนพนักงานลดลง 4 คน และผลผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้น 41.57 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 กระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้ง

ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งของสถานีงานในห้องบรรจุทั้งหมด 2 สถานีงาน ได้แก่ สถานีงานหั่นแผ่นเส้นกึ่งแห้ง และสถานีงานห่อเส้นกึ่งแห้ง โดยสถานีงานห่อเส้นกึ่งแห้งเป็นสถานีงานที่ใช้เวลานานที่สุด และมีความเกี่ยวข้องกับสถานีงานหั่นแผ่นเส้นกึ่งแห้ง อีกทั้งสถานีงานในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้งมีการใช้พนักงานประจำโต๊ะที่ไม่เท่ากันทั้ง ๆ ที่มีขั้นตอนการทำงานที่เหมือนกัน และเกิดการว่างงานของพนักงาน จึงทำการปรับปรุงโดย

การลดพนักงานลงเหลือเพียง 3 คนต่อโต๊ะ และทำการปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานบนโต๊ะบรรจุใหม่ เป็นการรวมงานย่อยไว้ที่พนักงานคนเดียว โดยให้พนักงานคนที่ 1 ทำการเลื่อนแท่นหั่นแล้วยกเส้นใส่เครื่องหั่น เปิดเครื่องหั่น และเดินไปห่อกระดาษปรีฟ พร้อมติดสติ๊กเกอร์ และให้พนักงานคนที่ 2 ทำการยกเส้นลงบนโต๊ะบรรจุเมื่อเครื่องหั่นเสร็จ ก่อนทำการชั่งน้ำหนัก

จากการปรับปรุงกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบกึ่งแห้งดังกล่าว พบว่า ประสิทธิภาพของสายการผลิตและรอบเวลาจริงของการผลิตเท่าเดิมเท่ากับ 66.85 เปอร์เซ็นต์ และ 18.68 วินาทีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับเครื่องหั่น และไม่ได้มีการลงทุนเพิ่ม ประกอบกับขั้นตอนการบรรจุที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่การปรับปรุงดังกล่าวทำให้จำนวนพนักงานในกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบเส้นกึ่งแห้งลดลง 5 คน และผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 16.59 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ด้านพนักงาน

พนักงานควรมีการพัฒนาทักษะให้มีความหลากหลาย เพื่อที่จะสามารถทำงานทดแทนกันได้ในระดับเวลามาตรฐานที่กำหนด อาทิเช่น พนักงานในห้องบรรจุเส้นสด ควรมีทักษะในการชั่งน้ำหนัก และทักษะการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) พร้อมใส่ถุงพลาสติก และพนักงานในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้ง ควรมีทักษะในการยกแผ่นเส้นกึ่งแห้งเข้าเครื่องหั่น ทักษะการชั่งน้ำหนัก ทักษะการห่อแผ่นพลาสติกไฮเดน (Plastic Sheet HDPE) และทักษะการห่อกระดาษปรีฟ

พร้อมติดสติ๊กเกอร์ และควรมีการกำหนดจำนวนผลผลิตเส้นกึ่งแห้งชิ้นต่อโต๊ะบรรจุในแต่ละวัน เพื่อลดความไม่เท่าเทียมกันในการทำงาน

5.2.2 ด้านเครื่องจักร

1) เครื่องจักรต้องมีการบำรุงรักษาอยู่เสมอ โดยมีการวัดประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร เพื่อให้เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่ขัดข้องหรือเสียหายระหว่างกระบวนการผลิต

2) เครื่องหั่นแผ่นก๋วยเตี๋ยวในห้องบรรจุเส้นกึ่งแห้งมีกำลังการผลิตที่ค่อนข้างจำกัด ควรมีการปรับปรุงเครื่องหั่นให้สามารถหั่นเส้นออกมาได้จำนวนมากขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของพนักงานในโต๊ะบรรจุ โดยการเพิ่มความกว้างของใบมีดหั่น และเพิ่มความสูงของกระบะใส่แผ่นเส้นกึ่งแห้งให้สอดคล้องกัน พร้อมทำเครื่องหมายที่กระบะใส่แผ่นเส้นกึ่งแห้ง เพื่อที่จะทำให้ทราบถึงระดับที่เหมาะสมสำหรับการใส่แผ่นเส้นกึ่งแห้งในแต่ละครั้ง และทำให้การหั่นในแต่ละครั้งได้ปริมาณเส้นกึ่งแห้งที่เท่ากัน หรืออาจทำการลงทุนซื้อเครื่องหั่นใหม่ที่มีระบบชั่งน้ำหนักอัตโนมัติมาทดแทน ซึ่งจะทำให้สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการชั่งน้ำหนักได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้จัดการทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษาที่อนุญาตในการเก็บข้อมูล รวมถึงผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาต่าง ๆ รวมถึงการให้ความร่วมมือ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ตลอดการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย. ผลงานวิจัยช่วยยกระดับอุตสาหกรรมการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวไทย. 2556. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.trf.or.th/re-div5/679-2013-12-04-11-05-15>.
- [2] ธัญญาณภาพ อานันทนะ. การประกันคุณภาพ. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2556.
- [3] รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. การศึกษางานอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ, 2552.

- [4] วันชัย ธิวัณนิช. การศึกษาการทำงานหลักการและกรณีศึกษา (พิมพ์ครั้งที่ 8). สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2555.
- [5] บุญบา พุกษาพันธ์รัตน์. การวางแผนและควบคุมการผลิต. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ, 2552.
- [6] ศุภชัย นาทะพันธ์. การควบคุมคุณภาพ. ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ, 2551.
- [7] ฐา คุปต์ชัยธร. การวางแผนและควบคุมการผลิต. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2558.
- [8] ณัฐพล ภู่อ่าง. การปรับปรุงผลิตภาพโดยเทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิตกระเทียมเขียวของห้างหุ้นส่วนจำกัด คำธราการลิกแอนด์โพรเซสฟูดส์ จังหวัดลำพูน. การค้นคว้าแบบอิสระ, สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมเกษตร, คณะบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- [9] สุจินดา ศรีชัยประชา. การปรับปรุงกำลังการผลิตของสายการผลิตชิ้นส่วนเบาะที่นั่งรถยนต์ด้วยแนวคิดระบบการผลิตแบบโตโยต้า. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [10] ศุภฤกษ์ กลิ่นหม่น. การปรับปรุงประสิทธิภาพสายการผลิตการกัดเลนส์ขึ้นรูปค่าสายตา. วิทยานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2559.



ผลของสภาวะแวดล้อมและจลนพลศาสตร์ของแลคเคส

ต่อการกำจัดไดโคฟอล

Effect of Environmental Conditions and Kinetics of Laccase on Dicofol Removal

อภิญา อ่อนสาร และ กรรณิกา รัตนพงศ์เสนา*

Apinya Onsarn and Karnika Ratanapongleka*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

E-mail: apinya.on.58@ubu.ac.th and karnika.r@ubu.ac.th* Tel.: 045-3533342

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการใช้เอนไซม์แลคเคสสำหรับกำจัดยาฆ่าแมลงชนิดไดโคฟอล โดยใช้เอนไซม์แลคเคสจาก *Lentinus polychrous* Lev. จากการศึกษาพบว่าเอนไซม์แลคเคสมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น 3.52 เท่า เมื่อผ่านกระบวนการกรองด้วยเยื่อกรองไมโครและอัลตรา และผลจากการนำเอนไซม์แลคเคสมากำจัดไดโคฟอลพบว่าที่เวลา 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดไดโคฟอลสูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ค่าอุณหภูมิเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส เมื่อควบคุมปริมาณเอนไซม์เท่ากับ 4.32 ยูนิต์ต่อมิลลิลิตร และความเข้มข้นไดโคฟอลเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของแลคเคสกับการกำจัดไดโคฟอลพบว่าค่า K_m เท่ากับ 2.52 มิลลิกรัมต่อลิตร และ V_{max} เท่ากับ 0.93 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที และเมื่อนำอุณหภูมิในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส มาใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 5.45 กิโลจูลต่อโมล และเมื่อนำไปทดสอบโดยอิงจากสภาพแวดล้อมจริงในกรณีที่มีการเจือปนของ NOM, Fe^{2+} และ Mn^{2+} โดยที่ความเข้มข้นของไดโคฟอลที่ใช้เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของ NOM, Fe^{2+} และ Mn^{2+} ที่ใช้อยู่ในช่วง 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า Mn^{2+} มีประสิทธิภาพการกำจัดไดโคฟอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Mn^{2+} โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดได้ 100% ที่ความเข้มข้น Mn^{2+} เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และตรงข้ามกับในกรณีของ NOM และ Fe^{2+} พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NOM และ Fe^{2+} ประสิทธิภาพการกำจัดไดโคฟอลมีแนวโน้มลดลง โดยที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 62.43 และ 45.32 เปอร์เซ็นต์ ของ NOM และ Fe^{2+} ตามลำดับ ส่วนผลของการศึกษาการยับยั้งของ NOM และ Fe^{2+} พบว่าเป็นการยับยั้งแบบไม่แข่งขันและแบบแข่งขัน ตามลำดับ ในขณะที่ Mn^{2+} ช่วยส่งเสริมการกำจัดไดโคฟอล

ABSTRACT

This research shows the usage of enzyme laccase to remove dicofol based insecticide. The Laccase was extracted from *Lentinus polychrous* Lev. It was found that the purity of laccase increased 3.52 folds when passing through micro- and ultra-filtration system. The result of using this enzyme to remove dicofol at 12 hours showed that the removal efficiency reached 100% at pH 7, temperature of 35°C, the activity of the enzyme at 4.32 U/ml and dicofol concentration of 1 mg/l. The kinetics study on dicofol removal with laccase showed that the value of K_m was 2.52 mg/l and V_{max} was 0.93 mg/l/min. To determine the activation energy (E_a), the temperatures in the range of 25-35°C were applied. The value of E_a was 5.45 KJ/mol. According to real environmental condition, the contaminations of NOM,

Fe^{2+} and Mn^{2+} were investigated. At dicofol concentration of 5 mg/l and the concentrations of NOM, Fe^{2+} and Mn^{2+} in the range of 0-50 mg/l displayed that the removal efficiency increased when increasing the concentration of Mn^{2+} . The removal efficiency reached 100% at Mn^{2+} concentration of 50 mg/l. In contradiction, in case of NOM and Fe^{2+} , increasing the concentration of NOM and Fe^{2+} trended to decrease dicofol removal efficiency. The removal efficiencies at the concentrations of 50 mg/l were 62.43 and 45.32%, respectively. The results of inhibition study on NOM, Fe^{2+} and Mn^{2+} showed that NOM and Fe^{2+} were uncompetitive and competitive inhibitors, respectively, meanwhile, Mn^{2+} acted as a promotor for dicofol removal.

1. บทนำ

ไดโคฟอล มีชื่อทางเคมีว่า 2, 2, 2-Trichloro-1, 1-bis (4-chlorophenyl) ethanol เป็นสารเคมีที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากคลอรีน โดยจัดอยู่ในกลุ่มของออร์กาโนคลอรีน (Organochlorines) มีไฮโดรเจนคาร์บอน ออกซิเจน และคลอรีนเป็นส่วนประกอบ [1] สารดังกล่าวมีความเป็นพิษเฉียบพลันต่ำ แต่ตกค้างในระบบสิ่งแวดล้อมได้ยาวนาน ซึ่งไดโคฟอลเป็นสารที่นิยมใช้ในกลุ่มของเกษตรกรทั้งในและต่างประเทศ สำหรับควบคุมหนอน เพลี้ย หรือแมลงต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อต้นพืชและต่อผลผลิต [2] โดยสามารถใช้ได้กับพืชเกือบทุกชนิด เช่น พริก ฝ้าย ข้าวโพด พืชตระกูลถั่ว พืชไร่ พืชสวน รวมถึงไม้ดอก ไม้ประดับเกือบทุกชนิด เป็นต้น [3] การสะสมของสารไดโคฟอลสู่ระบบสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โดยเฉพาะต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น มีความเป็นพิษต่อระบบประสาทและสมอง ระบบเลือด เป็นพิษต่อทารกในครรภ์ ระบบสืบพันธุ์ และที่สำคัญเป็นสารที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ [4] ขณะที่ทางสหภาพยุโรปได้กำหนดให้มีไดโคฟอลปนเปื้อนในน้ำดื่มไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร [5] ปัจจุบันพบว่าวิธีการกำจัดไดโคฟอลออกจากสิ่งแวดล้อมที่น่าสนใจคือการใช้วิธีทางชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่เกิดปฏิกิริยารุนแรงเหมือนปฏิกิริยาทางเคมี ไม่ก่อให้เกิดสารเคมีตกค้างในระบบนิเวศและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

แลคเคส (Benzenediol: oxygen oxidoreductase; EC 1.10.32) พบได้ทั่วไปในเชื้อราจำพวกไวท์รอต (White-rot fungi) ในพืชชั้นสูง แมลง

บางชนิดและแบคทีเรีย เป็นต้น ซึ่งแลคเคสจัดเป็นเอนไซม์ในกลุ่มออกซิโดรีดักเทส ซึ่งสามารถกำจัดสารพิษได้หลากหลาย เช่น สารอินทรีย์ อนินทรีย์ ฟีนอล อะมิโนฟีนอล อะโรมาติก เอมีน สีย้อม และสารกำจัดศัตรูพืชบางชนิด เช่น ดีดีที ดีอีที คลอร์ไพริฟอส วีเอ็กซ์ อาร์วีเอ็กซ์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้นำมากำจัดยาพาราเซตามอล [6] ด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับเอนไซม์ชนิดอื่น ๆ แล้ว แลคเคสเป็นเอนไซม์ที่จำเพาะเจาะจงต่อสารตั้งต้นน้อย จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย [7] โดยแหล่งเอนไซม์แลคเคสในงานวิจัยนี้มาจาก *Lentinus polychrous* Lev. ซึ่งรู้จักกันในชื่อของเห็ดขอนดำ เห็ดลม หรือเห็ดบด พบและนิยมนำมาบริโภคมากในเขตภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นเชื้อราในกลุ่มไวท์รอตชนิดที่สร้างเอนไซม์แลคเคสแล้วขับออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme)

แต่สภาพแวดล้อมในปัจจุบัน ตามแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไป ไม่ได้มีเฉพาะการปนเปื้อนของยาฆ่าแมลงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น จากการสำรวจยังพบสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิต ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในประเทศไทยมีค่าไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบธาตุเหล็กและแมงกานีสซึ่งเป็นธาตุที่พบได้มากในธรรมชาติ ปริมาณของเหล็กและแมงกานีสที่พบอยู่ในช่วง 5-14 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.3-1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เอนไซม์แลคเคสในการกำจัดไดโคฟอลในสภาวะที่เปลี่ยนแปลงเพื่อเอชและอุณหภูมิ รวมถึงในกรณีที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ธรรมชาติ เหล็กและแมงกานีส ตลอดจนศึกษา

รูปแบบการขับขี้ที่มีต่อเอนไซม์แลคเคส ซึ่งการศึกษาตามสภาวะข้างต้นนอกจากจะช่วยให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นแล้ว คาดว่าผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป อีกทั้งเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการตกค้างของยาฆ่าแมลงในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติได้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 สารเคมี

เอนไซม์แลคเคสได้จากก้อนเห็ดคอบจากโรงเพาะเห็ด จ.อุบลราชธานี สารอินทรีย์ธรรมชาติจากหนองอีเจม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสารเคมีที่ใช้เช่น ผงไดโคพอลบริสุทธิ์ เมทานอล (เกรดวิเคราะห์ HPLC $\geq 99.9\%$), สารวิเคราะห์ค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ ABTS และไอรอน (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต ($\geq 99\%$) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา สารวิเคราะห์โปรตีนสำเร็จรูป (Bradford solution) จากบริษัท AppliChem ประเทศเยอรมัน แมงกานีส (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต จากบริษัท Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา

เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ เช่น เครื่อง UV spectrophotometer (SHIMADZU UV1 2 0 4 , Japan) เครื่อง pH meter (Eutech pH 700 Meter, Singapore) เครื่อง HPLC (SHIMADZU CLASS-VP 10AVP, Japan) คอลัมน์ที่ใช้คือ C18 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 7.8 x 300 mm (Vertisep OA 8 um HPLC) และเครื่อง AAS (PerkinElmer AAnalyst200, U.S.)

2.2 การสกัดและทำเอนไซม์กึ่งบริสุทธิ์

เอนไซม์แลคเคสสกัดจากก้อนเห็ดคอบที่เชื้อเจริญได้ประมาณ 15-30 วัน ซึ่งเชื้อเห็ด 1 ก้อน มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อก้อนเท่ากับ 750 กรัม จากนั้นนำก้อนเห็ดมาทำการบดและผสมน้ำปราศจากประจุในอัตราส่วน 1 ก้อนต่อน้ำปราศจากประจุ 1,500 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนผสมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองเศษตะกอนต่าง ๆ ออกด้วยผ้าขาวบาง และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000

รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และนำส่วนใสที่ได้คือเอนไซม์แลคเคสหยาบ จากนั้นเป็นขั้นตอนของการทำให้เอนไซม์กึ่งบริสุทธิ์ โดยนำเอนไซม์แลคเคสหยาบที่ได้จากขั้นตอนข้างต้นมากรองผ่านเยื่อกรองไมโคร ซึ่งมีขนาดมีขนาดคัดกรองโมเลกุลเท่ากับ 0.2 ไมครอน จากนั้นนำมาผ่านเยื่อกรองอัลตราขนาดคัดกรองโมเลกุล 30 กิโลดาลตัน ปรับอัตราการไหลของทั้งสองขั้นตอนเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ได้เอนไซม์แลคเคสกึ่งบริสุทธิ์ไว้ใช้ในขั้นตอนการทดลองต่อไป หากยังไม่ได้ใช้เอนไซม์ทันทีให้จัดเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส

2.3 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดไดโคพอลด้วยแลคเคส

ศึกษาภายใต้การทดลองแบบกะ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอนไซม์เท่ากับ 4.32 ยูนิต์ต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของไดโคพอลเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปรับปริมาตรโดยรวมเป็น 150 มิลลิลิตร แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 3-8 และอุณหภูมิในช่วง 25-65 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลาครั้งละ 20 ไมโครลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นไดโคพอลคงเหลือในระบบ

2.4 การกำจัดไดโคพอลด้วยแลคเคส

ศึกษาการกำจัดไดโคพอลด้วยเอนไซม์แลคเคสในชุดการทดลองแบบกะ ใช้ค่าพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม (จากการศึกษาในข้อ 2.3) นอกจากนี้ยังใช้พารามิเตอร์เดียวกันกับข้างต้นในกรณีที่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) เหล็ก (Fe^{2+}) และแมงกานีส (Mn^{2+}) ในระบบ ซึ่งความเข้มข้นของ NOM, Fe^{2+} และ Mn^{2+} ที่ใช้มีค่าในช่วง 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเปอร์เซ็นต์การกำจัดไดโคพอลด้วยแลคเคส สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$Removal(\%) = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ C_t คือความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

2.5 การตรวจวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์กิจกรรมการทำงานของแลคเคสตามวิธีของ [8] โดยใช้ 2, 2' - azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonate (ABTS) เป็นสารสับสเตรทผสมสารละลายตัวอย่างกับโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์และ ABTS จากนั้นเขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และหยุดปฏิกิริยาด้วย TCA ที่ความเข้มข้น 80% โดยน้ำหนัก แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร โดย 1 หน่วยของเอนไซม์คือจำนวนของเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นต่อนาที

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธี [9] โดยใช้ Bradford reagent สำเร็จรูป และใช้ Bovine serum albumin (BSA) เป็นโปรตีนมาตรฐาน เจือจางให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นนำสารตัวอย่าง ผสมกับ Bradford reagent 200 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำปราศจากประจุ 700 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 595 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานโปรตีน

วิเคราะห์ปริมาณโคโคพอลด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้คอลัมน์ C18 (7.8 x 300 มิลลิเมตร) ตามวิธีของ [10] โดยละลายโคโคพอลด้วยเมทานอล และปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำปราศจากประจุ และเจือจางโคโคพอลเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานโคโคพอล สำหรับโบบายเฟสที่ใช้เป็นเมทานอลต่อน้ำปราศจากประจุ ในอัตราส่วน 80:20 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาณการฉีดตัวอย่างเท่ากับ 20 ไมโครลิตร อัตราการไหลของโบบายเฟสเท่ากับ 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้เป็นอุณหภูมิในสิ่งแวดล้อม (25-32 องศาเซลเซียส) และใช้ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 229 นาโนเมตร

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการทำเอนไซม์แลคเคสถึงประสิทธิภาพ

พบว่าเมื่อนำเอนไซม์แลคเคสผ่านระบบด้วยไมโครฟิวเตรชันและอัลตราฟิวเตรชัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ

เอนไซม์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 3.52 เท่า (ตารางที่ 1) และเมื่อพิจารณาการกรองด้วยระบบไมโครฟิวเตรชัน ในส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง (รีเทนเทท) พบว่ามีปริมาณของโปรตีนและค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ที่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอนไซม์แลคเคสส่วนใหญ่ สามารถผ่านระบบเยื่อกรองชนิดนี้ได้ ในขณะที่โปรตีนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่บางชนิดไม่สามารถผ่านเยื่อกรองได้ จากผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับคุณสมบัติของการกรองชนิดไมโครฟิวเตรชัน ซึ่งเป็นกระบวนการคัดขนาดโมเลกุลของสารหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ที่อยู่ในช่วง 0.1-10 ไมครอนออกจากสารแขวนลอย และเมื่อพิจารณาการกรองชนิดอัลตราฟิวเตรชัน ในส่วนที่ไม่ผ่านเยื่อกรอง (รีเทนเทท) พบว่ามีค่าโปรตีนต่ำแต่ค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์สูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขนาดของเอนไซม์แลคเคสมีมวลโมเลกุลที่มากกว่า 30 กิโลดาลตัน จึงทำให้เยื่อกรองอัลตราสามารถกักเอนไซม์ไว้ได้ และจากการศึกษาสอดคล้องกับข้อมูลคุณสมบัติทั่วไปของเอนไซม์แลคเคสซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 30 กิโลดาลตัน ขึ้นไป [11] และจากงานวิจัยของ [12] สกัดเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสจากก้านกะหล่ำดอก เพื่อใช้สำหรับกำจัดสารพิษฟีนอลหลังจากกระบวนการสกัดเมื่อผ่านเยื่อกรองไมโครและอัลตรา มีค่าความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า

3.2 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดโคโคพอล

3.2.1 ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการกำจัด

ศึกษาการกำจัดโคโคพอลด้วยแลคเคสเมื่อเปลี่ยนแปลงพีเอชของโคโคพอลในชุดการทดลองแบบกะทำการศึกษาที่พีเอชในช่วง 3-8 ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 1 (ก) พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของสารละลายโคโคพอลส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโคโคพอล เมื่อพิจารณาช่วงพีเอชที่ 4, 5, 6 และ 7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโคโคพอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่เวลา 12 ชั่วโมงเท่ากับ 71.60 ± 2.26 , 79.25 ± 3.07 , 90.24 ± 1.58 และ 100% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 การทำเอนไซม์แลคเคสให้บริสุทธิ์ด้วยเยื่อกรองไมโครและอัลตรา

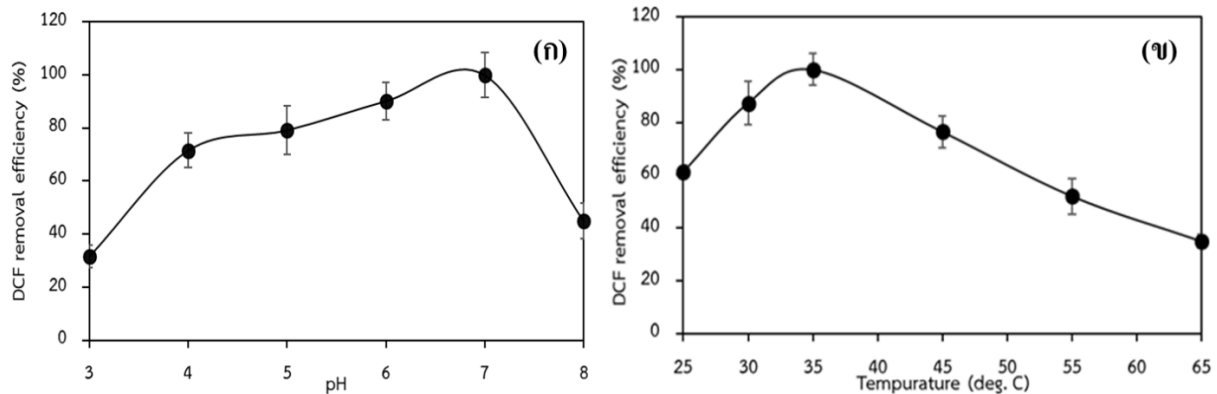
ขั้นตอนการทำบริสุทธิ์		กิจกรรม การทำงานรวม (ยูนิต)	ปริมาณโปรตีนรวม (มิลลิกรัม)	กิจกรรมการทำงาน จำเพาะ (ยูนิตต่อมิลลิกรัม)	ความ บริสุทธิ์ (เท่า)
การสกัดหยาบ		16105	4425	3.64	1
เยื่อกรอง ไมโคร	รีเทนเทท	322.80	160.20	4.60	1.26
	เพอมีเอท	12713.80	651.20	9.70	2.66
เยื่อกรอง อัลตรา	เพอมีเอท	190.40	686.40	0.28	0.08
	รีเทนเทท	2605.20	203.40	12.81	3.52

ส่วนค่าพีเอชที่ 3 และ 8 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 4-7 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเท่ากับ 31.57 ± 3.41 และ $44.93 \pm 2.47\%$ ตามลำดับ จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของพีเอชส่งผลโดยตรงต่อกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์แลคเคส เนื่องจากการปรับพีเอชทำให้ประจุที่อยู่บริเวณเร่งของเอนไซม์แลคเคสเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในบางพีเอชอาจทำให้โครงสร้างของเอนไซม์เกิดการเสื่อมสภาพได้ ซึ่งผลการศึกษาข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัย [13] พบว่าเอนไซม์แลคเคสจากเชื้อราสามารถทำงานได้ดีในสถานะที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 4-7 เมื่อทดสอบกับฟีนอล รวมถึงงานวิจัยของ [14a] พบว่า ค่าการทำงานของเอนไซม์แลคเคสสูงสุดเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 7 เมื่อทดสอบกับสารกลุ่มของออร์กาโนฟอสเฟต ชนิดคลอร์ไพริฟอส และงานวิจัยของ [15a] ได้สกัดเอนไซม์แลคเคสจาก *Pleurotus ostreatus* พบว่าค่ากิจกรรมการทำงานของแลคเคสสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 7.5 เมื่อทดสอบกับยาฆ่าแมลงหลายชนิดในกลุ่มของออร์กาโนฟอสเฟต ได้แก่ VX, RVX และ DiPr-Amiton

3.2.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดไดโคพอล

ศึกษาการกำจัดไดโคพอลด้วยแลคเคสเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 25-65 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 1 (ข) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดไดโคพอลสูงสุดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และต่ำสุดที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และสามารถ

เรียงลำดับประสิทธิภาพการย่อยสลายจากมากไปหาน้อยที่เวลา 12 ชั่วโมงได้ดังนี้ คือ 35, 30, 45, 25, 55 และ 65 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพการกำจัดคือ 100, 87.26 ± 2.26 , 76.82 ± 4.39 , 60.12 ± 1.93 , 46.19 ± 3.3 และ $34.89 \pm 2.48\%$ ตามลำดับ จากผลการศึกษาอธิบายได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิของไดโคพอลจาก 25-35 องศาเซลเซียส ส่งผลให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น และยังช่วยให้เพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารหรือระหว่างเอนไซม์กับสารตั้งต้นได้มากขึ้นด้วย ซึ่งทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [16] จากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 25-45 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอลไม่ต่ำกว่า 60% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอลลดลง เนื่องจากเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางชีวภาพ หากในระบบมีช่วงอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้เอนไซม์เกิดการเสื่อมสภาพทางโครงสร้างได้ จากงานวิจัยของ [14b] ได้สกัดเอนไซม์แลคเคสจาก *Pichia pastoris* เมื่อใช้อุณหภูมิในช่วง 30-80 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส ค่ากิจกรรมการทำงานสัมพัทธ์ของเอนไซม์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 45-100% และเมื่ออุณหภูมิในระบบเพิ่มขึ้น พบว่าค่าการทำงานสัมพัทธ์ของเอนไซม์แลคเคสคงเหลือเท่ากับ 95 และ 84% ที่อุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 1 (ก) ผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดไดโคพอล (ข) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดไดโคพอล

3.2.3 ผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติและโลหะหนักต่อการกำจัดไดโคพอล

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอลในกรณีที่มีสาร NOM, Fe^{2+} และ Mn^{2+} เข้าไปในระบบ ซึ่งความเข้มข้นที่ใช้มีค่าอยู่ในช่วง 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของไดโคพอลเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 โดยอธิบายได้ว่าในกรณีของการเติม NOM พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไดโคพอลลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NOM เพิ่มขึ้น และในกรณีที่มีการเติมสารละลายโลหะหนักมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งการเติม Fe^{2+} ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอลลดลง ตรงข้ามกับในกรณีของการเติม Mn^{2+} ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Mn^{2+} เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดไดโคพอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถเรียงลำดับชนิดของสารที่มีประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอลจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ Mn^{2+} , NOM และ Fe^{2+} ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าในกลุ่มของโลหะหนัก ถึงแม้ว่าสารจะมีประจุชนิดเดียวกัน แต่ให้ผลในทางตรงข้าม เนื่องจากสารที่มีประจุชนิดเดียวกัน ไม่จำเป็นว่าสารจะต้องเข้ากับเอนไซม์ไปจับที่ตำแหน่งเดียวกันเสมอไป ซึ่งจากงานวิจัยของ [15b] โดยทำการศึกษากำจัดไดโคพอลด้วยเซลล์และเมื่อเติม Mn^{2+} ที่ความเข้มข้น 0, 1, 2 และ 4 มิลลิโมล

ต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 42, 63, 74 และ 84% ตามลำดับ และให้เหตุผลว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ Mn^{2+} ส่งเสริมการย่อยสลายไดโคพอลด้วยเอนไซม์เซลล์และจากงานวิจัยของ [17] ทำการศึกษาผลของโลหะหนักต่อค่ากิจกรรมการทำงานของโปรตีนจาก *Aspergillus niger* KIBGE-IB36 จากผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของ Mn^{2+} และ Fe^{2+} เท่ากับ 1, 5, 10 มิลลิโมล ที่เวลา 60 นาที พบว่าเอนไซม์ดังกล่าวมีค่ากิจกรรมการทำงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ 100, 120, 129% ส่วนในกรณีของการเติม Fe^{2+} พบว่ามีค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ลดลงอย่างต่อเนื่องเท่ากับ 85, 70 และ 60% ตามลำดับ และจากรายงานวิจัยของ [18a] ได้ศึกษาการกำจัด bisphenol A (BPA) ด้วยเอนไซม์ Horseradish peroxidase (HRP) และมีการเติม NOM ลงไปในระบบโดยใช้กรดฮิวมิกเป็นกลุ่มตัวแทนของสาร NOM เนื่องจากมีโครงสร้างเหมือนกัน ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกที่ใช้เท่ากับ 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของ BPA เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของเอนไซม์ที่ใช้อยู่ในช่วง 0-300 ยูนิตต่อลิตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าที่การเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เพิ่มขึ้น 200-300 ยูนิตต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด BPA มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของกรดฮิวมิกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติและโลหะหนักที่มีต่อการย่อยสลายไดโคพอลด้วยแลกเคส

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอล (%)		
	สารอินทรีย์ธรรมชาติ	เหล็ก	แมงกานีส
0	70.06 ± 2.03	70.06 ± 2.03	70.06 ± 2.03
1	71.62 ± 1.67	64.75 ± 3.01	72.52 ± 2.58
10	68.36 ± 1.45	62.12 ± 2.21	88.63 ± 1.16
50	62.43 ± 2.39	45.32 ± 0.54	100 ± 0.13

3.2.4 พลังงานกระตุ้นที่มีต่อการกำจัดไดโคพอล

การศึกษาพลังงานกระตุ้น (Activation energy; E_a) ในสภาวะที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติ เหล็กและแมงกานีสเจือปน โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในครั้งนี้อยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35-65 องศาเซลเซียส หาค่า E_a ไม่ได้เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ โดยสามารถหาค่า E_a ได้จากการใช้สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius) แสดงในสมการที่ (2)

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (2)$$

โดยพบว่าค่า R^2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.951-0.983 และมีค่า k_1 ในแต่ละอุณหภูมิที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.079-0.085 แสดงดังตารางที่ 3 และมีค่า E_a ของปฏิกิริยาการกำจัดไดโคพอลเท่ากับ -5.45 กิโลจูลต่อโมล

จากผลการทดลองพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาการกำจัดไดโคพอล ที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส มีค่า E_a เท่ากับ -5.45 กิโลจูลต่อโมล สาเหตุที่ค่าพลังงานกระตุ้นติดลบเนื่องจากปฏิกิริยานี้ต้องการความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจากข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบว่า

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราในการเกิดปฏิกิริยาสำหรับกำจัดไดโคพอลก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิในระบบสูงขึ้น โมเลกุลของสารจะมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่และพลังงานจลน์มากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นไปด้วย จากการศึกษาของ [18b] ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดไดโคพอลด้วยเซลล์แลคโตสรีง โดยช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาเท่ากับ 20-50 องศาเซลเซียส พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาการกำจัดไดโคพอลสูงขึ้นด้วย และมีค่า E_a เท่ากับ -63 กิโลจูลต่อโมล และจากการศึกษาของ [19] ทดสอบโดยใช้เอนไซม์ Milk clotting enzyme หรือ MCE ซึ่งได้จาก *Bacillus subtilis* KU710517 สำหรับเอนไซม์ดังกล่าวนำมาใช้อยู่ในรูปเอนไซม์อิสระ และมีการเติม PEG เพื่อปรับปรุงคุณภาพของเอนไซม์ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาอยู่ในช่วง 50-60 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่ามีค่า k ของเอนไซม์ที่เติม PEG และไม่เติม PEG อยู่ในช่วง 0.00093-0.01583 และ 0.00097-0.00241 ตามลำดับ และเมื่อหาค่า E_a พบว่ามีค่าเท่ากับ -24.56 และ -29.27 กิโลจูลต่อโมล สำหรับในกรณีที่เติม PEG และไม่เติม PEG ตามลำดับ

ตารางที่ 3 พลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการกำจัดไดโคพอล

T (K)	C = C ₀ exp(-kt)		(1/T) x 10 ³	-ln k/s ⁻¹
	k ₁ (h ⁻¹)	R ²		
318	0.079	0.951	3.145	2.590
323	0.083	0.983	3.096	2.560
328	0.085	0.965	3.049	2.513

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารตั้งต้น $C_0(\text{mg.l}^{-1})$ และอัตราการเกิดปฏิกิริยา $V(\text{mg.l}^{-1}.\text{min}^{-1})$

Substrate concentration		Free laccase		R^2
$C_0(\text{mg/l})$	$1/C_0$	v	$1/v$	
1.01	0.99	0.3	3.33	0.975
2.18	0.46	0.43	2.33	0.981
3.09	0.32	0.51	1.96	0.992
4.05	0.25	0.62	1.61	0.996
5.04	0.20	0.75	1.33	0.992

3.3 จลนพลศาสตร์ของแลคเคส

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไดโค-ฟอลที่มีต่อการกำจัดด้วยแลคเคส ในสภาวะที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติเหล็กและแมงกานีส จึงได้มีการนำมาหาจลนพลศาสตร์ของแลคเคสกับการกำจัดสารดังกล่าว โดยใช้สมการของ Michaelis–Menten ซึ่งเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเริ่มต้น (v) ของเอนไซม์ และความเข้มข้นของสารตั้งต้น (C_0) ดังสมการที่ (3)

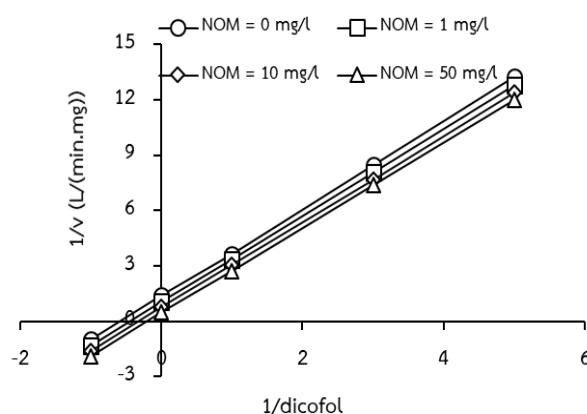
$$V = \frac{V_{\max} \times [C_0]}{K_m + [C_0]} \quad (3)$$

เมื่อ v คืออัตราเร็วเริ่มต้นของปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อ นาที), C_0 คือความเข้มข้นของสารตั้งต้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร), $V_{\max}$ คืออัตราเร็วของปฏิกิริยาเมื่อเอนไซม์จับตัวกับสารตั้งต้นจนอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร.นาที) และ K_m คือค่าคงที่ของ Michaelis ซึ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการจับกันของเอนไซม์และสารตั้งต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

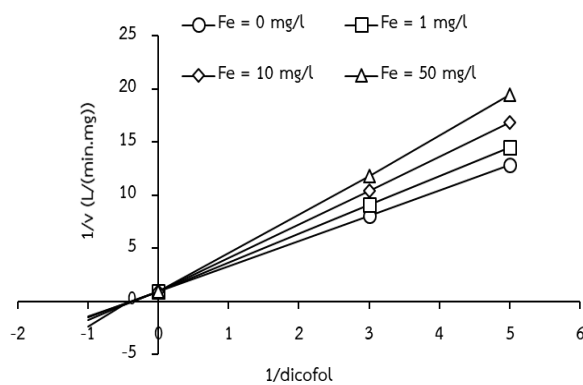
จากการศึกษาพบว่าค่า v ในแต่ละความเข้มข้นมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.975-0.996 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 โดยที่ค่า $V_{\max}$ และ K_m ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง $1/v$ และ $1/C_0$ ซึ่งผลการศึกษาได้ค่า K_m ของปฏิกิริยาเท่ากับ 2.52 มิลลิกรัมต่อลิตร และ $V_{\max}$ ของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.93 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที

3.3.1 ผลของการยับยั้งของ NOM และ Fe^{2+} ที่มีต่อการกำจัดไดโคฟอลด้วยแลคเคส

ศึกษาผลของการยับยั้งของ NOM และ Fe^{2+} สำหรับความเข้มข้นของไดโคฟอลที่ใช้เท่ากับ 1-5 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของ NOM และ Fe^{2+} ที่ใช้อยู่ในช่วง 0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง NOM และ Fe^{2+} กับประสิทธิภาพการกำจัดไดโคฟอลด้วยแลคเคส โดยนำปฏิกิริยาความเร็วที่แตกต่างกันมาใช้ในการพล็อตระหว่าง $1/v$ เทียบกับ $1/C_0$ เพื่อแสดงถึงการยับยั้งปฏิกิริยาการกำจัดไดโคฟอลด้วยแลคเคสของ NOM และ Fe^{2+} ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ NOM และ ความเข้มข้นของไดโคฟอลที่มีต่ออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Fe^{2+} และความเข้มข้นของไดโคฟอลที่มีต่ออัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา

จากรูปที่ 2 ผลการศึกษาเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าลักษณะของกราฟเป็นแบบไม่แข่งขัน (กราฟตัดแกน X ที่จุด $-1/K_m$) ซึ่งเป็นการยับยั้งโดยตัวยับยั้งเข้าจับเฉพาะกับสารประกอบเชิงซ้อนเอนไซม์-สารตั้งต้น แต่ไม่จับกับเอนไซม์อิสระ ซึ่งผลของการจับของตัวยับยั้งทำให้เอนไซม์เสียโครงรูปหรือรูปร่างเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนสารตั้งต้นให้เป็นผลิตภัณฑ์ลดลงหรือหมดไป และเมื่อนำไปวิเคราะห์ตามสมการของ Michaelis-Menten และเขียนกราฟตามสมการ Lineweaver-Burk plots พบว่าทั้งค่าคงที่ของไมเคลิส และค่าความเร็วสูงสุดมีค่าลดลงที่ความเข้มข้นของ Fe^{2+} เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลจากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ [20] ได้ทำการศึกษาลักษณะการยับยั้งของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสกับสาร NOM ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยควบคุมความเข้มข้นของ BPA ที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะการยับยั้งของเปอร์ออกซิเดสเมื่อเติม NOM เป็นการยับยั้งแบบไม่แข่งขัน และจากงานวิจัยของ [21] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างกราฟแบบกราฟฟิก สำหรับการวิเคราะห์การยับยั้งชนิดแข่งขัน และไม่แข่งขัน ซึ่งพบว่ากรดฮิวมิกซึ่งใช้เป็นตัวแทนโครงสร้างของ NOM เป็นการยับยั้งแบบไม่แข่งขัน

จากรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าลักษณะของกราฟเป็นการยับยั้งแบบแข่งขัน ซึ่งจะเกิดจุดตัดบนแกน Y ที่จุดเดียวกัน ลักษณะการยับยั้งแบบนี้ตัวยับยั้ง จะมีโครงสร้างหรือรูปร่างโมเลกุลคล้ายกับสารตั้งต้น มาแย่งจับกับเอนไซม์บริเวณเร่งของเอนไซม์ ทำให้เอนไซม์สามารถจับกับสารตั้งต้นได้น้อยลง ซึ่งการยับยั้งแบบนี้สามารถผันกลับได้ ค่า K_m จึงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้สารตั้งต้นเพิ่มขึ้นเพื่อมาแข่งตัวยับยั้งจับกับเอนไซม์ ในขณะที่ค่า V_{max} มีค่าเท่าเดิม ดังนั้นการเติม Fe^{2+} ส่งผลให้เกิดผลเสียหรือส่งผลให้ด้านลบต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายไดโคฟอลด้วยแลคเคส และจากงานวิจัยของ [22] ศึกษาผลกระทบของโลหะหนักหลายชนิด เช่น N^+ , K^+ , Cd^{2+} และ Mn^{2+} ที่มีต่อการกำจัดไดโคฟอลด้วยเอนไซม์เซลลูเลส พบว่า N^+ และ K^+ ไม่ส่งผลต่อการกำจัดไดโคฟอลด้วยเซลลูเลส สำหรับในกรณีของ Cd^{2+} เป็นการยับยั้งแบบแข่งขัน และ Mn^{2+} ส่งเสริมการกำจัดไดโคฟอลด้วยเซลลูเลส และจากรายงานวิจัยของ [23] ศึกษาผลกระทบของการเติม FeSO_4 และ FeCl_2 ที่ส่งผลต่อการกำจัด PCS ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส พบว่าในกรณีที่เติม FeSO_4 และ FeCl_2 มีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 100% และในกรณีที่เติม FeSO_4 และ FeCl_2 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเหลือเท่ากับ 25 และ 18% ตามลำดับ และได้สรุปไว้ว่า FeSO_4 และ FeCl_2 เป็นตัวยับยั้งประสิทธิภาพการกำจัด PCS ของเอนไซม์เซลลูเลส

4. สรุปผลการศึกษา

เอนไซม์แลคเคสกึ่งบริสุทธิ์ที่สกัดจาก *Lentinus polychrous* Lev. สามารถสลายไดโคฟอลได้ดีในสภาวะที่ไม่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติและเหล็กเจือปน โดยผลของสภาวะแวดล้อม เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและอุณหภูมิพบว่าที่เวลา 12 ชั่วโมง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และอุณหภูมิเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดไดโคฟอลได้สูงสุดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของแลคเคสที่มีต่อการกำจัดไดโคฟอล

(ในกรณีที่ไม่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ เหล็กและแมงกานีส) พบว่ามีค่า K_m เท่ากับ 2.52 มิลลิกรัมต่อลิตร และ V_{max} เท่ากับ 0.93 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่อุณหภูมิช่วง 25-35 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 5.45 กิโลจูลต่อโมล และสำหรับในกรณีที่เติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ เหล็กและแมงกานีส (0-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อการกำจัดไดโคพอลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติและเหล็ก ส่งผลประสิทธิภาพการกำจัดคลดลงไดโคพอลลดลง ตรงข้ามกับในกรณีของแมงกานีส พบว่าความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไดโคพอลเพิ่มขึ้น และเมื่อ

พิจารณาถึงการยับยั้งของการเติมสารอินทรีย์ธรรมชาติ เหล็กและแมงกานีสที่มีต่อการกำจัดไดโคพอลด้วยแลคเคส พบว่าสารอินทรีย์ธรรมชาติและเหล็กเป็นตัวยับยั้งแบบไม่แข่งขันและแบบแข่งขัน ตามลำดับ ในขณะที่แมงกานีสกลับพบว่าช่วยส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์แลคเคส

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Neilson, A.H. An Environmental Perspective on the Biodegradation of Organochlorine xenobiotics. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1996; 37(1): 3-21.
- [2] Osman, K.A., Ibrahim, G.H., Askar, A.I. and Aba Alkhail, A.R.A. Biodegradation Kinetics of Dicofol by Selected Microorganisms. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2008; 91(3): 180-185.
- [3] Mourer, C.R., Hall, G. L., Whitehead, W. E., Shibamoto, T., Shull, L. R. and Schwarzbach, S. E. Chromatographic Determination of Dicofol and Metabolites in Egg Yolks. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 1990; 19(1): 154-156.
- [4] Settini, L., Masina, A., Andron, A. and Axelson, O. Prostate Cancer and Exposure to Pesticides in Agricultural Settings. *International Journal of Cancer*, 2003; 104(4): 458-461.
- [5] Marmot, M., Allen, J., Bell, R., Bloomer, E. and Goldblatt, P. WHO European Review of Social Determinants of Health and the Health Divide. 2012; 380(9846): 1011-1029. [Online], Available: www.thelancet.com.
- [6] สุพจน์ ปูนบุตร และกรรณิกา รัตนพงษ์เสนา. การตรึงแลคเคสและเปรียบเทียบการใช้ในถังปฏิกรณ์แบบกะและแบบไหลต่อเนื่องในหอบรรจุสำหรับกำจัดพาราเซตามอล. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.*, 2560; 10(2): 33-44.
- [7] Ko, C. H. and Chen, S. S. Enhanced Removal of Three Phenols by Laccase Polymerization with MF/UF Membranes. *Bioresource Technology*, 2008. 99(7): p. 2293-2298.
- [8] Shin, K.S. and Lee, Y.J. Purification and Characterization of a New Member of the Laccase Family From the White-Rot Basidiomycete *Coriolus Hirsutus*. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2000; 384(1): 109-115.
- [9] Bradford, M.M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Analytical biochemistry*, 1976: 72(1-2): 248-254.
- [10] Qiu, X., Zhu, T., Yao, B., Hu, J. and Hu, S. Contribution of Dicofol to the Current DDT Pollution in China. *Environmental Science & Technology*, 2005; 39(12): 4385-4390.
- [11] Hamid, M. Potential Applications of Peroxidases. *Food chemistry*, 2009; 115(4): 1177-1186.
- [12] Ratanapongleka, K. and Onsarn, A. Immobilization of Peroxidase from Cauliflower Stem on Ultrafiltration Membrane for Phenol Removal. *Innovation for Sustainable Development: Applied Mechanics and Materials*, 2018; 879: 137-143.

- [13] Madhavi, V. and Lele, S. Laccase: Properties and Applications. *BioResources*, 2009; 4(4): 1694-1717.
- [14] Xie, H., Li, Q., Wang, M. and Zhao, L. Production of a Recombinant Laccase from *Pichiapastoris* and Biodegradation of Chlorpyrifos in a Laccase/Vanillin System. *Journal of microbiology and biotechnology*, 2013; 23(6): 864-871.
- [15] Amitai, G., Adani, R., Sod-Moriah, G., Rabinovitz, I., Vincze, A., Leader, H., Chefetz, B., Leibovitz-Persky, L., Friesem, D. and Hadar, Y. Oxidative Biodegradation of Phosphorothiolates by Fungal Laccase. *FEBS letters*, 1998; 438(3): 195-200.
- [16] Skoronski, E., Fernandes, M., Magalhães Mde, L., da Silva, G.F., João, J.J., Soares, C.H. and Júnior, A.F. Substrate Specificity and Enzyme Recycling Using Chitosan Immobilized Laccase. *Molecules*, 2014; 19(10): 16794-16809.
- [17] Jiang, W., Li, W., Xiao, F., Wang, D. and Wang, Z. Influence of NOM and SS on the BPA Removal via Peroxidase Catalyzed Reactions: Kinetics and Pathways. *Separation and Purification Technology*, 2017; 173: 244-249
- [18] Zhai, Z., Yang, T., Zhang, B. and Zhang, J. Effects of Metal Ions on the Catalytic Degradation of Dicofol by Cellulase. *Journal of environmental sciences*, 2015; 33: 163-168.
- [19] Sattar, H., Aman, A. and Qader, S.A.U. Effect of Metal Ions, Solvents and Surfactants on the Activity of Protease from *Aspergillus Niger* KIBGE-IB3 6. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 2017; 13: 491-495
- [20] Zhang, J., Yan, H., Yang, T. and Zong, Y. Removal of Dicofol from Water by Immobilized Cellulase and Its Reaction Kinetics. *Journal of environmental management*, 2011; 92(1): 53-58
- [21] Wehaidy, H.R., Abdel-Naby, M.A., Shousha, W.G., Elmallah, M.I.Y. and Shawky, M.M. Improving the Catalytic, Kinetic and Thermodynamic Properties of *Bacillus Subtilis* KU710517 Milk Clotting Enzyme via Conjugation with Polyethylene Glycol. *International journal of biological macromolecules*, 2018; 111: 296-301.
- [22] Cornish-Bowden, A. A Simple Graphical Method for Determining the Inhibition Constants of Mixed, Uncompetitive and Non-Competitive Inhibitors. *Biochemical Journal*, 1974; 137(1): 143-144.
- [23] Tejirian, A. and Xu, F. Inhibition of Cellulase-Catalyzed Lignocellulosic Hydrolysis by Iron and Oxidative Metal Ions and Complexes. *Applied and environmental microbiology*, 2010; 76(23): 7673-7682.



การศึกษาสมรรถนะระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับ ระบบเติมอากาศของบ่อเลี้ยงปลา กรณีศึกษา: หมู่บ้านทุ่งยาว Performance Study of Solar PV System for Fish Pond Aerators Case Study: Tungyao Village

อักรินทร์ อินทนินเวศน์* สุลักษณ์ มงคล และ สราวุธ พลวงษ์ศรี

Akarin Intaniwet, Sulaksana Mongkon and Sarawut Polvongsri

หน่วยวิจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

Smart Energy and Environmental Research Unit, School of Renewable Energy,
Maejo University, 50290, Thailand

*E-mail: a.intaniwet@hotmail.co.th, Tel.: 088-2687904

บทคัดย่อ

ในการเลี้ยงปลาของเกษตรกรในชุมชนทุ่งยาวมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องเติมอากาศสำหรับเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอต่อความต้องการของปลา ส่งผลให้เกษตรกรต้องจ่ายค่าไฟต่อเดือนในระดับที่สูง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบจ่ายพลังงานร่วมระหว่างพลังงานไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบไฟฟ้าพื้นฐานโดยใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ควบคุมปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากแต่ละแหล่ง โดยในเวลากลางวันระบบเติมอากาศจะใช้พลังงานจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก แต่ถ้าระบบผลิตไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอ อินเวอร์เตอร์จะทำการดึงไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาเพิ่มเติมเพื่อให้มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอสำหรับการทำงานของเครื่องเติมอากาศ จากการศึกษาพบว่าในวันที่ท้องฟ้าปิด (มีความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่ำกว่า 350 W/m^2) ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีสัดส่วนในการใช้งานเพียง 30.95% แต่ในวันที่ท้องฟ้าเปิด (ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยมากกว่า 350 W/m^2) ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับทดแทนการใช้น้ำมันจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้มากถึง 56.67% ตลอดระยะเวลาการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงแสงให้เป็นไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 15% และมีสมรรถนะระบบเฉลี่ยเท่ากับ 96.6% จากการศึกษาพบว่าระบบการใช้พลังงานร่วมระหว่างพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ และระบบไฟฟ้าพื้นฐานสามารถลดภาระค่าไฟฟ้าของเกษตรกรได้เป็นอย่างมากโดยเฉพาะในวันที่มีแสงอาทิตย์ตกกระทบสูง

คำสำคัญ: ระบบใช้พลังงานร่วม ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องเติมอากาศ สมรรถนะ ประสิทธิภาพ

ABSTRACT

Fish farming business at Tungyao village requires a heavily used of aerators to increase the amount of oxygen level in water to the suitable point where fish can be optimally grown. As a result, fish farmers suffer from a high electricity bill. This work aims to study the performance of the PV system which is part of the hybrid load sharing system. The electrical energy from the PV system is combined with that from the utility grid using a particular inverter that can select the source of energy for the aerator system. During the daytime, aerator system mainly relies on the energy from the PV system. If the energy from solar PV is not enough, the inverter extracts the surplus energy from the utility grid in order to maintain the power level for the aerator system. From the testing, it was found that the energy production from the PV system provided about 30.95% of the total energy required by

the aerator system during the overcast days (average solar intensity $< 350 \text{ W/m}^2$). On the clear sky (average solar intensity $> 350 \text{ W/m}^2$), however, the energy production from the PV system can replace the energy utilization from the utility grid for 56.67%. During the testing period, the panel system exhibited the average conversion efficiency and performance of 15% and 96.6%, respectively. Our study has demonstrated that the hybrid load sharing system can significantly lower the electricity bill especially on the sunny day.

Keywords: Hybrid load sharing system, Solar PV system, Aerator, Performance, Efficiency.

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเกษตรเป็นรากฐาน และในการทำการเกษตรนั้นมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นอย่างมาก ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการตอบสนองนโยบายภาครัฐในด้านพลังงาน เกษตรกรในประเทศไทยได้เริ่มมีการปรับตัวในการใช้พลังงาน โดยได้เริ่มมีการนำเอาพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงมาใช้ในภาคเกษตรกรรมและภาคปศุสัตว์เพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถประหยัดต้นทุนในการผลิต และเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร ยกตัวอย่างเช่น การใช้พลังงานชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น [1] เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลนั้น วัตถุดิบเริ่มต้นซึ่งมีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลักจะต้องถูกนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีความร้อนเพื่อที่จะผลิตพลังงานความร้อน [2] สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกแปลงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากการใช้ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์การแปลงพลังงาน [3]

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานลง เนื่องจากประเทศไทยมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์อยู่ในระดับที่สูง โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ศึกษาศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยและจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียม โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียม และจากการตรวจวัดภาคพื้นดิน พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศเท่ากับ $18 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ [4] ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับ

ที่สูงมาก โดยในการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์นั้นจะนิยมผลิตให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากสามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง กระบวนการผลิตนี้จะต้องอาศัยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์การแปลงพลังงานโดยไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นไฟกระแสตรง ดังนั้นถ้ามีการนำไปใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับจึงต้องอาศัยอินเวอร์เตอร์ในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นไฟกระแสสลับ [5] โดยสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ แดด ลม อุณหภูมิหน้าแผง และค่ารังสีอาทิตย์ เป็นต้น [6]

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจึงเป็นการทำการเกษตรแขนงหนึ่งโดยมีจุดประสงค์หลักคือเพื่อเลี้ยงเป็นอาหาร สัตว์น้ำชนิดหนึ่งที่มีการเพาะพันธุ์กันอย่างกว้างขวางและถือได้ว่าเป็นสัตว์เศรษฐกิจคือ ปลา พันธุ์ปลาที่เกษตรกรไทยนิยมเลี้ยงมีหลายชนิด เช่น ปลานิล ปลาดุก และกึ่ง เป็นต้น [7, 8] การเลี้ยงปลานิลเลี้ยงในบ่อดินซึ่งเป็นลักษณะของการเลี้ยงในน้ำนิ่ง และการเลี้ยงในกระชังซึ่งเป็นลักษณะของน้ำไหล อย่างไรก็ตามความนิยมส่วนใหญ่ของเกษตรกรนิยมเลี้ยงในบ่อดินมากกว่า เนื่องจากสามารถจัดการบ่อได้ง่าย ทำให้เกษตรกรสามารถเพาะพันธุ์ปลาได้ทั้งปี และจากแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของราคาพลังงานส่งผลให้ภาคปศุสัตว์มีภาระค่าใช้จ่ายจากการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเลี้ยงปลา เนื่องจากมีความจำเป็นต้องเปิดเครื่องเติมอากาศ เพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำให้เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของปลาที่เลี้ยง โดยเครื่องเติมอากาศส่วนใหญ่ที่ผู้เลี้ยงปลานิลมาใช้คือ เครื่องเติมอากาศแบบการใช้ใบพัดตีน้ำ [9] โดยที่ความสามารถในการเพิ่มปริมาณออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับลักษณะ รูปร่าง ขนาดของใบพัด และขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ แต่ระบบเดิม

อากาศนี้มีข้อเสียคืองบประมาณและงบดำเนินการสูง จากที่กล่าวมาทำให้ผู้เลี้ยงปลาต้นทุนในการเลี้ยงปลาที่สูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้เครื่องเติมอากาศที่ต้องเปิดทำงานหลาย ชั่วโมงต่อวัน แต่ในขณะที่ราคาขายผลผลิตเท่าเดิม ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการนำเทคโนโลยีพลังงานทดแทนมาใช้เพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายในส่วนของการไฟฟ้าของเกษตรกรลง โดยใช้แหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์

ชุมชนบ้านทุ่งยาว หมู่ที่ 1 ต.สันทรายหลวง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ เป็นชุมชนหนึ่งที่มีการประกอบอาชีพเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่น การเพาะเลี้ยงปลานิลและปลาดุก คิดเป็น 70% ของประชากร และอีก 30% ประชากรประกอบอาชีพทำนา ทำไร่ ทำสวน และอื่น ๆ จากการสำรวจข้อมูลในส่วนการเลี้ยงปลาเบื้องต้น พบว่า ชุมชนได้มีการก่อตั้งชมรมผู้เลี้ยงปลานิลเชียงใหม่ขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ.2547 โดยปัจจุบันมีจำนวนสมาชิกทั้งสิ้นประมาณ 60 คน มีทั้งจากภายในชุมชนบ้านทุ่งยาว และจาก อำเภอแม่ริม อำเภอแม่แตง อำเภอดอยสะเก็ด อำเภอสันกำแพง โดยมีวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานเริ่มแรกเพื่อจัดหาตลาดปลานิลให้แก่สมาชิก โดยมีพื้นที่บ่อเลี้ยงปลาทั้งหมดกว่า 400 ไร่ ฟาร์มเพาะเลี้ยงปลาของสมาชิกมีทั้งฟาร์มขนาดเล็ก และฟาร์มขนาดใหญ่ ฟาร์มขนาดเล็กประกอบด้วยพื้นที่เลี้ยงปลาประมาณ 2-3 ไร่ต่อครัวเรือน มีขนาดพื้นที่บ่อดิน ประมาณ 1-2 งานต่อบ่อ ลึกประมาณ 2-3 เมตร เลี้ยงปลาประมาณ 20,000 ตัวต่อบ่อ สำหรับฟาร์มขนาดใหญ่มีพื้นที่ประมาณ 10 ไร่ ประกอบด้วยขนาดบ่อประมาณ 1-2 ไร่ต่อบ่อ ไปจนถึงบ่อขนาดใหญ่ บ่อละ 8 ไร่ การเลี้ยงปลาในชุมชนบ้านทุ่งยาวนิยมเลี้ยงในบ่อดินใช้เวลาในการเลี้ยง 3-4 เดือนต่อรอบ ปัญหาหลักของการเลี้ยงปลาที่พบคือ ปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำน้อยกว่าความต้องการของปลา ทำให้มีปัญหาปลาตายหรือปลาน็อกน้ำในทั้งในช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืน โดยเฉพาะเมื่อเลี้ยงปลาไประยะเวลาหนึ่ง น้ำในบ่อดินจะเกิดความขุ่นที่เกิดจากตะกอนแพลงก์ตอน โคลนตม จีเลน ผุ่นละออง และสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในบ่อ

ปลา ทำให้แสงส่องผ่านลงไปใต้น้ำได้น้อย ทำให้พืชน้ำและสาหร่ายสังเคราะห์แสงได้น้อย ซึ่งในเวลากลางคืนปัญหามักจะเกิดรุนแรงมากขึ้นเนื่องจากพืชในน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงและให้ออกซิเจนได้ โดยปกติปลาต้องการก๊าซออกซิเจนที่มีค่ามากกว่า 5 mg/l และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) ไม่ต่ำกว่า 3 mg/l ปัจจุบันเกษตรกรแก้ไขปัญหาโดยใช้กังหันน้ำเพื่อเติมออกซิเจน โดยบ่อดินขนาดเล็กจะใช้กังหันน้ำที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 hp 3 เฟส จำนวน 1-2 ชุด ต่อพื้นที่บ่อดิน 1 ไร่ ในขณะที่บ่อดินขนาดใหญ่อาจใช้กังหันน้ำทำงานพร้อมกัน 6 ชุดในการเติมออกซิเจนให้น้ำ สำหรับชั่วโมงการทำงานของกังหันน้ำจะทำงานเฉลี่ย 10 ชั่วโมงต่อวัน ในช่วงเวลาเพาะเลี้ยงปกติ และอาจสูงถึง 15-20 ชั่วโมงต่อวันเมื่อใกล้ช่วงเวลาเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งในบางครั้งเมื่อเกิดไฟฟ้าดับทำให้ไม่สามารถใช้กังหันน้ำได้ ปลาจะเกิดการน็อกน้ำเนื่องจากปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว และการใช้กังหันน้ำยังส่งผลทำให้ค่าไฟฟ้าที่เกษตรกรต้องจ่ายเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าไฟฟ้าที่เกษตรกรต้องจ่ายประมาณ 30,000-40,000 บาทต่อเดือน และค่าไฟฟ้าอาจจะเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเฉลี่ยนี้ขึ้นอยู่กับอายุปลา และจำนวนชั่วโมงที่เปิดกังหันน้ำเติมอากาศ

จากปัญหาที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า เกษตรกรพึ่งพาการใช้ไฟฟ้าในการเลี้ยงปลาเป็นหลักทำให้แบกรับต้นทุนที่สูงและเกิดความเสี่ยงเมื่อเกิดภาวะไฟฟ้าดับ ดังนั้นผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยนำพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าของกังหันน้ำในช่วงเวลากลางวันเพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายในการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และลดความเสี่ยงจากการเกิดสภาวะไฟฟ้าดับ ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจ่ายกระแสไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ สมรรถนะ รวมไปถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตทดแทนได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้จะเป็นการส่งเสริมให้ชุมชนรู้จักการ

ใช้แหล่งพลังงานทางเลือกในการทดแทนการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานรูปแบบเดิม ลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และเป็นการลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกรในระยะยาวต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเก็บข้อมูล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นสองแบบ คือ สมรรถนะของระบบ และประสิทธิภาพของระบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในการประเมินสมรรถนะของระบบจะเริ่มต้นจากการประเมินผลผลิตไฟฟ้าด้าน DC ที่ได้จากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์รายวัน (Y_A , kWh/kW_p) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน DC (E_{DC} , kWh) ต่อค่ากำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_0 , kW_p) โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$Y_A = \frac{E_{DC}}{P_0} \quad (1)$$

$$E_{DC} = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i \quad (2)$$

โดยค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน DC สามารถหาได้จากสมการที่ 2 ซึ่งเป็นผลคูณของกำลังไฟฟ้าด้าน DC (P_i , kW) กับช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล (t_i , hr) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 5 นาที (1/12 ชั่วโมง) โดยจะถือว่าแต่ละช่วงเวลาของการเก็บข้อมูลระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาคงที่ แต่ค่าที่ได้ก็คือค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉพาะภายในช่วงเวลา 5 นาทีเท่านั้น เมื่อทำการหาผลรวมของค่าพลังงานที่ได้ในแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวันจะได้ผลลัพธ์เป็นค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน DC ที่ระบบสามารถผลิตได้ใน 1 วัน

ผลผลิตสุดท้ายของระบบ (Y_F , kWh/kW_p) คือตัวแปรที่แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะรวมของระบบสามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนพลังงานไฟฟ้าด้าน AC (E_{AC} , kWh)

ต่อค่ากำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุดของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_0 , kW_p) โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3 และสำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าด้าน AC สามารถหาได้โดยใช้วิธีการคล้ายกับของค่าพลังงานด้าน DC (สมการที่ 2) ต่างกันแค่เพียงต้องใช้ค่ากำลังไฟฟ้าของด้าน AC มาคำนวณ

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_0} \quad (3)$$

ค่าผลผลิตพลังงานไฟฟ้าตามทฤษฎี (Y_R , kWh/kW_p) ของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ควรจะผลิตได้ในอุดมคติซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานรังสีอาทิตย์รวมตกกระทบ (H_t , kWh/m²) ต่อด้วยค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบ (G_{stc} , 1 kW/m²) ดังแสดงได้ในสมการที่ 4

$$Y_R = \frac{H_t}{G_{stc}} \quad (4)$$

ค่า H_t สามารถหาได้จากผลคูณระหว่างค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบ (I_i , kW/m²) กับช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล (t_i , hr) จากนั้นทำการหาผลรวมของค่าที่ได้ในหนึ่งวัน ผลลัพธ์ที่ได้ก็คือค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบรวมใน 1 วัน (สมการที่ 5)

$$H_t = \sum_{i=1}^n I_i \times t_i \quad (5)$$

ค่า Performance ratio (PR) คือค่าที่ใช้ในการอธิบายสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยค่า PR จะหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าผลผลิตสุดท้ายของระบบต่อค่าผลผลิตอ้างอิง ดังสมการที่ 6 สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะดีจะต้องมีค่า PR ที่เข้าใกล้ 1

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (6)$$

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ ($P_{\max}$, kW) ต่อกำลังแสงอาทิตย์ตกกระทบ (P_{sun} , kW) โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{sun}}} \times 100\% \quad (7)$$

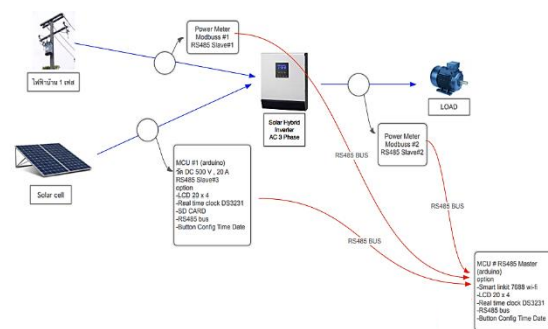
กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ สามารถหาจากผลคูณของค่ากระแส และแรงดันไฟฟ้าที่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้กับอินเวอร์เตอร์ระหว่างที่ ระบบเดิมอากาศทำงาน และค่ากำลังแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผง และพื้นที่รับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

3. วิธีการศึกษา และระบบที่ทำการศึกษา

3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับระบบที่ใช้ในการให้พลังงานกับระบบเดิมอากาศในบ่อเลี้ยงปลา (รูปที่ 1) โดยระบบจะต้องผลิตพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอ กับมอเตอร์ขนาด 3 hp (2.23 kW) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับแบบ 3 เฟส โดยผู้วิจัยจะใช้ไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานเดิมในบ่อปลาซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยไม่ใช้เบตเตอร์ในการสำรองไฟ ระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งให้กับบ่อเลี้ยงปลาประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม ขนาด 315 W (GCL-P6/72, $I_m = 8.47$ A, $V_m = 37.2$ V, $I_{sc} = 9.08$ A, $V_{oc} = 45.6$ V) จำนวน 9 แผง กำลังการติดตั้งสูงสุด 2.8 kW พลังงานไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ สำหรับการแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยใช้ อินเวอร์เตอร์ Siemens รุ่น SINAMICS V20 ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์สำหรับใช้งานกับมอเตอร์โดยเฉพาะ และรองรับการใช้งานสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากระบบเซลล์

แสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Hybrid inverter) ในเวลากลางวันระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อส่งให้กับระบบเดิมอากาศ แต่ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอ อินเวอร์เตอร์ จะทำการดึงกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน เพื่อให้กำลังไฟฟ้ารวมที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ เพียงพอในการที่จะทำให้ระบบเดิมอากาศทำงาน



รูปที่ 1 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมระหว่างพลังงาน
แสงอาทิตย์และระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

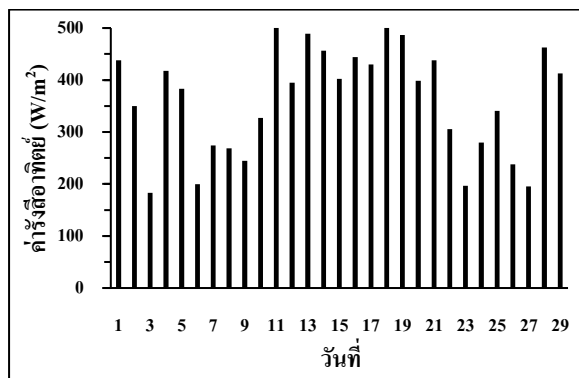
3.2 ระบบเก็บข้อมูลแวดล้อม และข้อมูลทางไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลตัวแปรที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะมีข้อมูลประกอบไปด้วยค่าความเข้มแสงอาทิตย์ซึ่งทำการวัดโดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Hukseflux รุ่น SR-05) การวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้นั้นจะใช้วงจรวัดระบบ DC ที่อ่านแรงดัน และกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 500 V และ 20 A ตามลำดับ สำหรับการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ที่อินเวอร์เตอร์ดึงมาจากระบบของการไฟฟ้า จะทำโดยใช้ Power meter แบบราง DIN รุ่น KP-630D (KEPLER) ข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกลงใน SD card โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 8.00-17.00 น. ทุกวันติดต่อกันเป็นระยะเวลา 1 เดือน คือในช่วงเดือนพฤศจิกายน สำหรับข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องเป็นข้อมูลที่วัดระหว่างช่วงที่มีการเปิด

ระบบเดิมอากาศ และจะต้องเป็นช่วงเวลาที่มียังมีค่ารังสีอาทิตย์มากกว่า 100 W/m^2 ขึ้นไป

4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

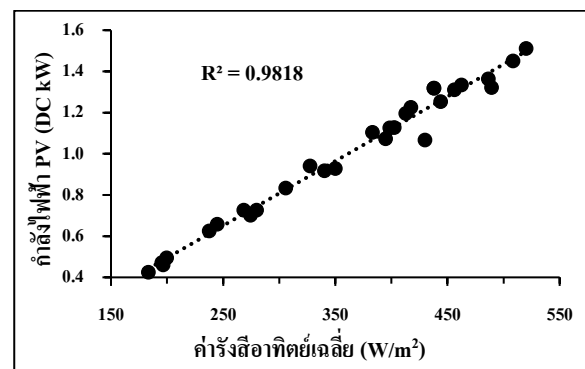
รูปที่ 2 แสดงค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยแต่ละวันระหว่างที่มีการเดินเครื่องเดิมอากาศ จากรูปจะพบว่าความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยตามช่วงเวลาของการเปิดเครื่องเดิมอากาศจะมีค่าเท่ากับ 260 W/m^2 และ 442 W/m^2 สำหรับวันที่ท้องฟ้าปิด และท้องฟ้าเปิดตามลำดับ จากการสังเกตสภาพอากาศระหว่างทำการทดสอบระบบจะพบว่าในวันที่ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยมีค่าไม่เกิน 350 W/m^2 จะเป็นวันที่ท้องฟ้าปิด และมีฝนตกบางเวลา ซึ่งจะมีจำนวน 13 วัน โดยในช่วงเวลานี้จะมีอุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิแผงเฉลี่ยเท่ากับ 27°C และ 30°C ส่วนวันที่ท้องฟ้าเปิดซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 16 วัน จะพบว่าความเข้มแสงอาทิตย์จะมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 520 W/m^2 และมีอุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิแผงเฉลี่ยเท่ากับ 32°C และ 37°C ตามลำดับ



รูปที่ 2 ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยตามช่วงเวลาของการเปิดเครื่องเดิมอากาศ ณ วันที่ทำการทดสอบ

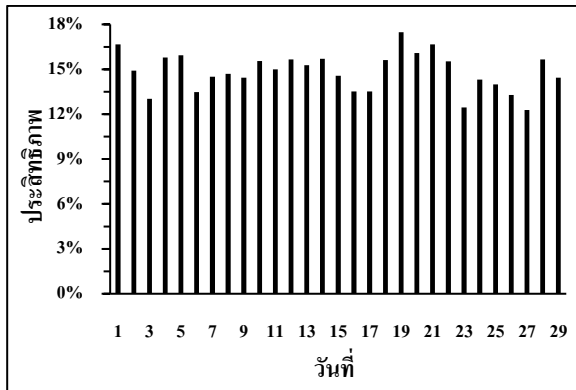
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้จากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) และค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละวันขณะที่เครื่องเดิมอากาศทำงาน จากรูปจะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ($R^2=0.9818$) หมายความว่ากำลังไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาในวันที่เก็บข้อมูล

พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากระบบ PV จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.5 kW หรือคิดเป็น 53% ของกำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุด (2.835 kW) ซึ่งเกิดขึ้นในวันที่มีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในระยะเวลาที่เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 เดือนจะพบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าของระบบ PV มีค่าเท่ากับ 1 kW ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 362 W/m^2 ซึ่งจะพบว่ามีค่าประมาณ 35% ของกำลังไฟฟ้าติดตั้งสูงสุด เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการทดสอบยังมีหลายวันที่ฝนตก และท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมหนาแน่น จึงส่งผลให้ระบบ PV ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

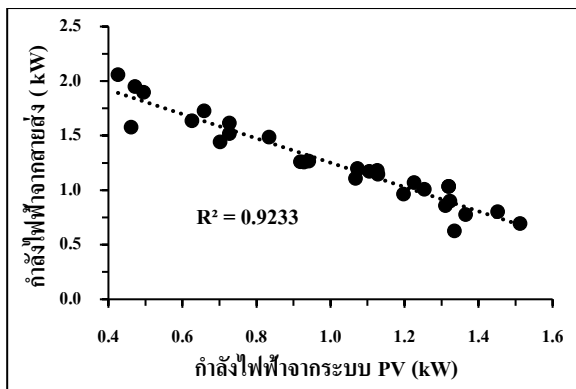


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยช่วงเปิดเครื่องเดิมอากาศ

จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (รูปที่ 4) พบว่าในวันที่แสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 12-15% แต่ในวันที่แสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูง ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจะเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 13-17% โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดการทดสอบมีค่าเท่ากับ 15% ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงค่าปรกติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนผลึกรวม



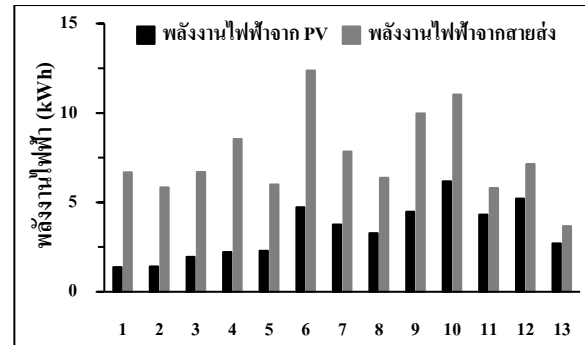
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบ PV สำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า



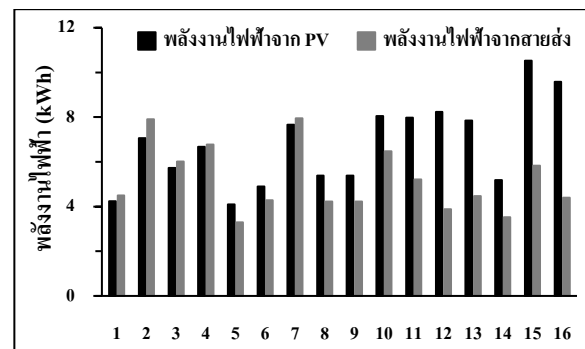
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าจากระบบ PV

เนื่องจากระบบพลังงานของปั๊มออกซิเจนมีลักษณะของการใช้ร่วม (Load sharing) โดยเป็นการใช้งานร่วมกันระหว่างไฟฟ้าจากระบบ PV และจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยอินเวอร์เตอร์จะสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากทั้งสองแหล่งเพื่อให้มีปริมาณเพียงพอกับความต้องการของโหลดมอเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ที่ใช้งานมีกำลังเท่ากับ 2.2 kW รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และกำลังไฟฟ้าจากระบบ PV จากรูปพบว่าในวันที่มีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนมาก ระบบ PV จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้มาก ทำให้สามารถชดเชยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้มาก ซึ่งสังเกตได้จากอินเวอร์เตอร์ดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมาน้อย และในทางกลับกัน ในวันที่ระบบ PV ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อย

ระบบก็จะดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาชดเชยเพิ่มขึ้น เพื่อให้กำลังไฟฟ้ารวมมีปริมาณเพียงพอสำหรับการทำงานของมอเตอร์



รูปที่ 6 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ PV และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ในวันที่ท้องฟ้าปิด



รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ PV และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ในวันที่ท้องฟ้าเปิด

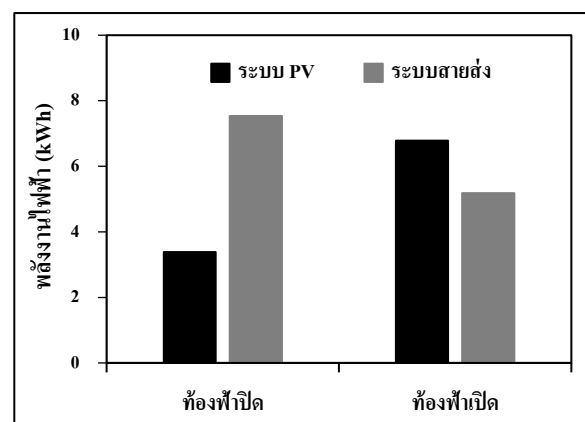
เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ PV และพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่ใช้ร่วมกันสำหรับมอเตอร์เดิมอากาศพบว่าสัดส่วนการชดเชยการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ PV มีค่าไม่คงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบ รวมถึงพฤติกรรมในการเปิดใช้งานระบบเดิมอากาศ รูปที่ 6 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ PV และพลังงานไฟฟ้าที่ดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในวันที่ท้องฟ้าปิด จากรูปจะพบว่าอินเวอร์เตอร์ทำการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเข้ามาชดเชยเป็นปริมาณสูงเนื่องจากปริมาณแสงอาทิตย์ตกกระทบบมีค่าน้อย

ทำให้ระบบ PV ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อย จึงยังคงต้องใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานในปริมาณที่มาก

แต่เมื่อปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบมาก (ท้องฟ้าเปิด) จะพบว่าระบบ PV สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มมากขึ้นดังแสดงได้ในรูปที่ 7 ทำให้สามารถทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้มากขึ้น โดยบางวันปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบ PV มีค่าเท่ากับพลังงานไฟฟ้าที่ระบบดึงมาจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน นั่นหมายความว่าพลังงานไฟฟ้าจากระบบ PV ที่ผลิตขึ้นมาได้มีส่วนการชดเชยประมาณ 50% และมีบางวันที่ระบบ PV สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ในปริมาณที่สูงมาก และสามารถชดเชยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้มากกว่า 50% และจากการสังเกตพฤติกรรมการเปิดปิดระบบเดิมอากาศของเกษตรกรพบว่า จะเปิดปิดตามความคุ้นชินและประสบการณ์ โดยไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณแสงอาทิตย์ตกกระทบบร่วมด้วย จึงทำให้บางช่วงเวลาที่มิมีแสงอาทิตย์สูงแต่ระบบเดิมอากาศไม่ได้ถูกเปิดให้ทำงาน ดังนั้นถ้าสามารถปรับพฤติกรรมการเปิดปิดระบบเดิมอากาศให้ทำงานสอดคล้องกับปริมาณแสงอาทิตย์ตกกระทบบมากขึ้น อาจจะทำให้สัดส่วนการชดเชยการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานด้วยระบบ PV มีค่าเพิ่มสูงมากขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์จะพบว่ามิมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละวัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการเปิดมอเตอร์สำหรับเครื่องเดิมอากาศ โดยปริมาณออกซิเจนในน้ำจะเป็นตัวกำหนดถึงระยะเวลาในการเปิดเครื่องเดิมอากาศในแต่ละวัน

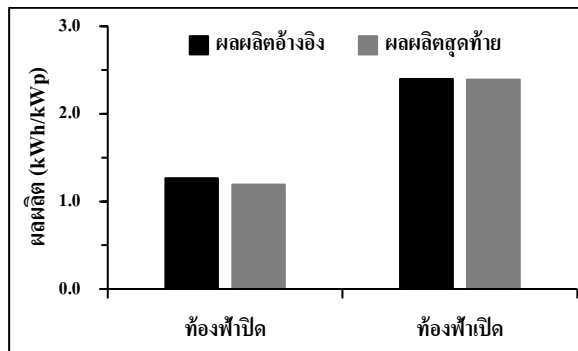
เมื่อพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ผลิตได้ต่อวันของระบบ PV และการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่อวันดังแสดงได้ในรูปที่ 8 จะพบว่า ในวันที่ท้องฟ้าเปิดพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยจากระบบ PV จะมีค่าเท่ากับ 6.78 kWh ซึ่งมีค่ามากกว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.18 kWh แต่ในวันที่ท้องฟ้าปิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันจากระบบ PV จะมีค่าลดลงเป็นอย่างมากโดยมีค่าเหลือเพียง 3.38 kWh หรือลดลงเมื่อเทียบกับวันที่ท้องฟ้าเปิด

ประมาณ 50% ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเฉลี่ยต่อวันมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 7.54 kWh หรือเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่ท้องฟ้าเปิดเท่ากับ 45.5% และเมื่อพิจารณาภาพรวมใน 1 เดือนที่ทำการเก็บข้อมูลพบว่าพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันจากระบบ PV และจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานมีค่าเท่ากับ 5.26 kWh และ 6.24 kWh ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าระบบ PV สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้ามาชดเชยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้ประมาณ 45%

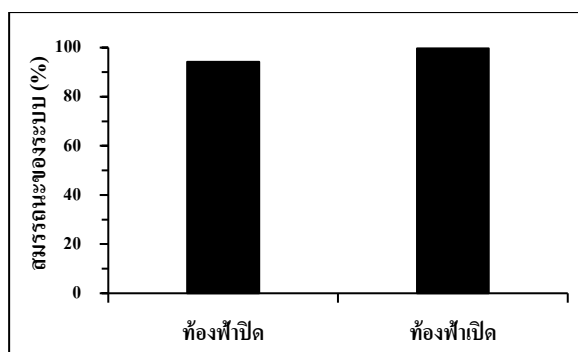


รูปที่ 8 พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อวันที่ผลิตได้จากระบบ PV และการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานต่อวัน สำหรับวันที่ท้องฟ้าเปิด และท้องฟ้าปิด

รูปที่ 9 แสดงค่าผลผลิตอ้างอิง (Y_R) ซึ่งเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตได้ตามทฤษฎี และค่าผลผลิตสุดท้าย (Y_F) ซึ่งเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตได้จริง เปรียบเทียบในวันที่ท้องฟ้าเปิดและวันที่ท้องฟ้าปิด จากรูปจะพบว่าค่าผลผลิตสุดท้ายของระบบจะมีค่าน้อยกว่าค่าผลผลิตอ้างอิงเล็กน้อย แสดงว่าระบบสามารถทำงานได้เต็มสมรรถนะ โดยในวันที่ท้องฟ้าเปิด ค่าเฉลี่ยผลผลิตสุดท้ายต่อวันในช่วงที่เปิดระบบเดิมอากาศจะเท่ากับ 1.19 kWh/kW_p สำหรับในวันที่ท้องฟ้าเปิด ระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก โดยมีค่าผลผลิตสุดท้ายเฉลี่ยต่อวันในช่วงที่เปิดระบบเดิมอากาศเท่ากับ 2.39 kWh/kW_p หรือเพิ่มขึ้น 1.2 kWh/kW_p



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยของผลผลิตอ้างอิง (Y_R) และผลผลิตสุดท้าย (Y_F) รายวัน



รูปที่ 10 ค่าสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยในวันที่ท้องฟ้าปิด และท้องฟ้าเปิด

รูปที่ 10 แสดงค่าสมรรถนะ (PR) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยในวันที่ท้องฟ้าปิด และท้องฟ้าเปิด โดยค่าสมรรถนะนี้จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่งที่ตั้ง หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็นค่าที่แสดงคุณภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ได้จริงต่อด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้ตามทฤษฎี จากรูปพบว่าค่าสมรรถนะของระบบในวันที่ท้องฟ้าเปิดมีค่าสูงกว่าในวันที่ท้องฟ้าปิดโดยมีค่าเท่ากับ 94.1% และ 99.7% สำหรับวันที่ท้องฟ้าปิดและท้องฟ้าเปิดตามลำดับ และตลอดการทดสอบเก็บข้อมูลค่าสมรรถนะของระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 96.6%

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบระบบเดิม
อากาศแบบ PV-hybrid

ตัวแปร	ท้องฟ้าปิด	ท้องฟ้าเปิด
ความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)	262	423
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยด้าน DC (kW)	0.69	1.28
พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยด้าน DC (kWh/วัน)	3.38	6.78
พลังงานไฟฟ้ารวมด้าน DC (kWh)	43.93	108.49
กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (kW)	1.59	0.97
พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (kWh/วัน)	7.54	5.18
พลังงานไฟฟ้ารวมจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (kWh)	98	82.93
สัดส่วนการทดแทนพลังงานของระบบ PV (%)	30.95	56.67
สัดส่วนการใช้พลังงานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน (%)	69.05	43.32
ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (%)	14.03	15.47
สมรรถนะระบบ (%)	94.18	99.70

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบการใช้งานระบบเดิมอากาศแบบ PV-hybrid จากตารางจะพบว่าช่วงที่ทำการทดสอบเป็นช่วงที่มีทั้งวันที่ฝนตก ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุม และวันที่ท้องฟ้าเปิด ซึ่งค่าเฉลี่ยรังสีอาทิตย์ตกกระทบก็จะมีค่าที่แตกต่างกันในช่วงที่ทำการทดสอบต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 เดือนพบว่า ในวันที่ท้องฟ้าปิด ระบบ PV จะผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รวม 43.93 kWh และมีการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเท่ากับ 98 kWh โดยมีร้อยละของพลังงานไฟฟ้าจากระบบ PV ที่สามารถใช้ทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเท่ากับ 30.95% แต่เมื่อพิจารณาวันที่ท้องฟ้าเปิด และมีรังสีอาทิตย์ตกกระทบในระดับที่สูงจะพบว่าระบบ PV สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รวม 108.49 kWh ในขณะที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานเท่ากับ 82.93 kWh ซึ่งในกรณีที่ท้องฟ้าเปิดนี้จะพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ PV มีสัดส่วนในการทดแทนพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานถึง 56.67% ดังนั้นจะพบว่าในวันที่ท้องฟ้าเปิด ระบบ PV สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้เกิน 50% หรือครึ่งหนึ่งของปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้า

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบไฟฟ้าพื้นฐานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องเดิมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งระบบจะผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันสำหรับจ่ายให้กับมอเตอร์ของเครื่องเดิมอากาศและจะทำการดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน

มาเพิ่มถ้าการผลิตพลังงานจากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ จากการศึกษพบว่าในวันที่ท้องฟ้าเปิด ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีสัดส่วนในการใช้งานเพียง 30.95% แต่ในวันที่ท้องฟ้าเปิด ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับทดแทนการใช้งานจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานได้มากถึง 56.67% ตลอดระยะเวลาการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงแสงให้เป็นไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 15% และมีสมรรถนะระบบเฉลี่ยเท่ากับ 96.6% งานวิจัยนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพ และความเป็นไปได้ในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในภาคการเกษตรสำหรับทดแทนการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐานซึ่งจะทำให้เกิดการลดต้นทุนการผลิตของเกษตรกรจากการประหยัดค่าไฟฟ้า และเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนในชุมชนต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับการสนับสนุนทุนในการทำวิจัย รวมไปถึง คุณรณชิต สมมิตร เจ้าของบ่อเลี้ยงปลาในชุมชนทุ่งขาว สำหรับพื้นที่ในการศึกษาและวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaichana, C., Wongsapai, W., Damrongsak, D., Ishihara, K.N. and Luangchosisiri, N. Promoting Community Renewable Energy as a Tool for Sustainable Development in Rural Areas of Thailand. *Energy Procedia*, 2017; 141: 114-118.
- [2] Intaniwet, A. and Chaiyat, N. Levelized Electricity Costing Per Carbon Dioxide Intensity of An Organic Rankine Cycle by Using a Water Hyacinth-Municipal Solid Waste Fuel. *Energy*, 2017; 139: 76-88.
- [3] อรรถกร อาสนคำ, อิสระพงศ์ กันธิยะ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ภายใต้การทำงานจริง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2558; 22 (3): 88-94.
- [4] เสริม จันทร์ฉาย. รังสีอาทิตย์. บริษัทเพชรเกษมพรินติ้ง กรุ๊ป จำกัด, 2557.
- [5] Berwal, A.K., Kumar, S., Kumari, N., Kumar, V. and Haleem, A. Design and Analysis of Rooftop Grid Tied 50 Kw Capacity Solar Photovoltaic (SPV) Power Plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017; 77: 1288-1299.

- [6] ธนัญญ์ ลังกาดี และ อรรถกร อาสนคำ. การประเมินสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในกรณีที่มีและไม่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2559; 23 (3): 130-141.
- [7] Ferreira, J.G., Falconer, L., Kittiwanch, J., Ross, L., Saurel, C., Wellman, K., Zhu, C.B. and Suvanachai, P. Analysis of Production and Environmental Effects of Nile Tilapia and White Shrimp Culture in Thailand. *Aquaculture*. 2015; 447: 23-36.
- [8] Senanan, W., Kapuscinski, A.R., Na-Nakorn, U. and Miller, L.M. Genetic Impacts of Hybrid Catfish Farming (*Clarias Macrocephalus* × *C. Gariepinus*) on Native Catfish Populations in Central Thailand. *Aquaculture*. 2004; 235: 167-184.
- [9] เฉลิมเกียรติ วงษ์เกษ, สุริยันต์ มธุสัทธี, อติศักดิ์ วงสิงห์ และ วิรงรอง แสงเดือน. เครื่องเติมอากาศในน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับบ่อเพาะพันธุ์ปลา. *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8*, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี, 4-6 พฤศจิกายน 2558.



การพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน จากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

Development of Interlocking Block Pilot Plant Using Mae Moh Power Plant Ash

สุวิทย์ สายสุธนาวิษฐ์* และ นีวิท เจริญใจ

Suwit Saisuthanawit and Nivit Charoenchai

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand 50200

*E-mail: suwit.s@egat.co.th, Telephone Number: 082-385-3999

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนโรงงานผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยดำเนินการก่อสร้างอาคารโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน และใช้หลักการการวางแผนโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning: SLP) มาวิเคราะห์ผังโรงงาน และประเมินคะแนนความใกล้ชิดโดยรวม (Total Closeness Rating: TCR) ทำให้ได้แผนภาพแสดงการวางแผนโรงงานบล็อกที่มีความสัมพันธ์ ซึ่งเป็นแนวทางในการลดระยะทางและลดเวลาในการขนย้ายวัสดุให้น้อยลง ผลการศึกษาพบว่า ผังโรงงานผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก โดยมีระยะทางในการขนย้ายที่สั้นที่สุดเท่ากับ 41 เมตรต่อรอบการผลิต และทำให้ได้โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักเพื่อใช้เป็นศูนย์การเรียนรู้ถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักให้กับชุมชนที่สนใจนำไปจัดตั้งกลุ่มวิสาหกิจผลิตบล็อกประสาน

คำสำคัญ: โรงงานต้นแบบ, การผลิตบล็อกประสาน, โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, เถ้าหนัก

ABSTRACT

The purposes of this research is to analyze plant layout of interlocking-block pilot plant using Mae Moh power plant ash for Mae Moh scale and local community scale. To develop a pilot plant, Systematic Layout Planning (SLP) method was used to analyze the plant layout. Besides, the total closeness rating (TCR) technique was applied to calculate for the lowest distance between departments to confirm minimum transportation distance. After completed calculation, a pilot plant was built structuring with the block developed. Then, machines were delivered and installed as designed in the planned layout. It was seen that the transportation distance per a production cycle was 41 meters in a 265 square meters building. So that, the interlocking-block pilot plant will be used as a learning center for the community who interests in setting up an enterprise interlocking block production.

Keywords: Pilot plant, Interlocking block production, Mae Moh Power plant, Bottom ash

1. บทนำ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย มีกำลังการผลิตติดตั้งรวมทั้งสิ้น 2,400 MW ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ปีละประมาณ 18,000 ล้านหน่วย (GWh) โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง ประมาณ 16 ล้านตันต่อปี ในกระบวนการแปรรูปพลังงานสะสมของถ่านหินลิกไนต์ให้เป็นพลังงานนั้นจะมีส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้ คือเถ้าลอย (Fly ash) และเถ้าหนัก (Bottom ash) ปริมาณเถ้าลอยจะพบมากที่สุด โดยพบในปริมาณร้อยละ 80 ของเถ้าทั้งหมด [1] ในปัจจุบันเถ้าลอย จะถูกจำหน่ายให้กับลูกค้าที่ต้องการนำไปใช้งานต่าง ๆ ส่วนเถ้าหนักยังไม่มีมีการนำไปใช้งานมากนัก จากการสำรวจข้อมูลในปี 2558–2559 มีปริมาณเถ้าหนักทั้งในบ่อกำจัด 1,322,378 และ 1,357,225 ตันต่อปี จึงถูกนำไปทิ้งและกองทับถมอยู่เป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ [2-3] ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อในเรื่องการจัดการสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นหากสามารถนำเถ้าหนักไปใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะนำไปสร้างกลุ่มอาชีพและพัฒนาพื้นที่ชุมชนรอบโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จะช่วยลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ และเพิ่มคุณภาพชีวิตความเป็นอยู่ของชุมชนในการที่ใช้ประโยชน์จากของเสียในกระบวนการผลิตให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากการศึกษาเบื้องต้นมีความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าหนักไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างในระบบผนังรับน้ำหนักที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีความสวยงามเป็นเอกลักษณ์ และที่สำคัญเป็นเทคโนโลยีที่เรียนรู้ได้ง่าย ไม่ซับซ้อนมีความสวยงามคงทน และยังมีรูปแบบการจัดวางที่หลากหลายตามแต่ผู้ออกแบบ การผลิตมุ่งเน้นการใช้วัตถุดิบในพื้นที่ เช่น ดินลูกรัง หินฝุ่น ทราช หรือวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสม ผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม นำมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแห้ง บ่มด้วยความชื้นให้แข็งตัว จะได้บล็อกประสานที่มีความแข็งแรง สามารถ

นำมาใช้ในงานก่อสร้างอาคารในระบบผนังรับน้ำหนัก หรือก่อสร้างผสมในรูปแบบอื่น ๆ ได้อีกมากมาย สอดคล้องกับสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ได้ใช้ดินลูกรังดินเหนียวหรือเถ้าโรงไฟฟ้า นำมาผ่านขั้นตอนการบดผสมกับปูนซีเมนต์ ทราชหยาบ ทราชละเอียด และน้ำ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม นำไปอัดขึ้นรูปโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผา บ่มด้วยความชื้น 7-28 วัน บล็อกที่ผลิตได้มีความแข็งแรง ต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารในระบบผนังรับน้ำหนัก หรือก่อสร้างเป็นถังเก็บน้ำได้อย่างรวดเร็ว สวยงามและประหยัด [4] การนำเอาเถ้าหนักไปใช้เป็นส่วนผสมผลิตบล็อกประสานทดแทนปูนซีเมนต์จะเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผลงานเหล่านี้จะเป็นต้นแบบของการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้ง การรักษาสังแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถนำมาส่งเสริมให้ชุมชนโดยรอบโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีความสนใจสร้างเป็นอาชีพให้เกิดรายได้ ดังนั้นจึงต้องพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้า ใช้เป็นศูนย์การเรียนรู้ถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตบล็อกประสาน ส่งเสริมและพัฒนาเป็นกลุ่มอาชีพให้กับสังคมและชุมชนรอบพื้นที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ และช่วยให้สามารถส่งเสริมการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักให้เป็นประโยชน์ต่อสังคมและชุมชน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และเพื่อวางผังโรงงานผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดการพัฒนากระบวนการผลิต

กระบวนการผลิต (Production process) หมายถึงกระบวนการที่ทำให้ปัจจัยการผลิตมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้ผลผลิตตามต้องการมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ อันได้แก่ ปัจจัยนำเข้า (Input) กระบวนการแปลงสภาพ (Conversion Process) และผลผลิต (Output) [16] โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยนำเข้า (Input) คือทรัพยากรขององค์กรที่ใช้ผลิตทั้งที่เป็นสินทรัพย์ที่มีตัวตน (Tangible Assets) เช่น วัตถุดิบ เครื่องจักร อุปกรณ์ และสินทรัพย์ที่ไม่มีตัวตน (Intangible Assets) เช่น แรงงาน ระบบการจัดการ ข่าวดสาร ทรัพยากรที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติและประโยชน์ใช้สอยที่เหมาะสม และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำเพื่อให้สินค้าสำเร็จรูปสามารถแข่งขันทางด้านราคาได้ในท้องตลาด

2. กระบวนการแปลงสภาพ (Conversion Process) เป็นขั้นตอนที่ทำให้ปัจจัยนำเข้าที่ผ่านเข้ามามีการเปลี่ยนแปลงในด้านต่าง ๆ ได้แก่ 1) รูปปลักษณ์ (Physical) โดยการผ่านกระบวนการผลิตในโรงงาน 2) สถานที่ (Location) โดยการขนส่ง การเก็บเข้าคลังสินค้า 3) การแลกเปลี่ยน (Exchange) โดยการค้าปลีก การค้าส่ง 4) การให้ข้อมูล (Informational) โดยการติดต่อสื่อสาร 5) จิตวิทยา (Psychological) โดยการโน้มน้าวการ

3. ผลผลิต (Output) เป็นผลได้จากกระบวนการผลิตที่มีมูลค่าสูงกว่าปัจจัยนำเข้าที่รวมกันอันเนื่องมาจากที่ได้ผ่านกระบวนการแปลงสภาพ ผลผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สินค้า (Goods) และบริการ (Service)

2.2 การวางแผนผังโรงงาน (Plant Layout)

การวางแผนผังโรงงาน หมายถึง งานหรือแผนการในการติดตั้งเครื่องจักร เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัตถุต่าง ๆ ที่จำเป็นในกระบวนการผลิต ภายใต้ข้อจำกัดของโครงสร้าง และการออกแบบของอาคารที่มีอยู่เพื่อทำให้การผลิตมีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสูงสุด [5], [6], [7]

หลักสำคัญขั้นพื้นฐานสำหรับการวางแผนผังโรงงานสามารถแบ่งออกได้ เป็น 3 ประการ คือ

1. ความสัมพันธ์ (Relationship) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ของกิจกรรมต่าง ๆ โดยเริ่มจากกิจกรรมที่มีความสัมพันธ์มากมาหาน้อย กิจกรรมใดที่มีความสัมพันธ์มากก็ให้ใกล้กัน

2. เนื้อที่ (Space) เป็นการพิจารณาเกี่ยวกับเนื้อที่ต่าง ๆ ทั้งจำนวน ชนิด และรูปร่างหรือรูปทรงของเนื้อที่กิจกรรมต่าง ๆ ที่ได้กำหนดในผังโรงงาน

3. การปรับจัดตำแหน่งเนื้อที่ (Adjustment) เป็นการจัดหรือปรับตำแหน่งกิจกรรมต่าง ๆ ให้ได้อย่างเหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ

ทฤษฎีการวางแผนผังโรงงานเป็นการออกแบบวางผังโรงงานหรือสถานที่เพื่อให้เหมาะสมกับ การทำงานการผลิตเครื่องจักรอุปกรณ์การทำงานหรือหน้าร้านในการให้บริการจากกระบวนการผลิตและบริการจะเป็นการผ่านปัจจัยต่าง ๆ เช่น คน เครื่องจักร วัตถุดิบ พลังงาน การออกแบบการวางแผนที่ดี จะช่วยลดต้นทุนในการบริหารงานที่ต่ำลง การทำงานมีความสะดวกและมีประสิทธิภาพ ทำให้คุณภาพชีวิตมีประสิทธิผลมากขึ้น โดยกำหนดตำแหน่งของคน เครื่องจักร วัตถุดิบ และสิ่งสนับสนุนการผลิต อันเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการผลิตให้เหมาะสมทำให้เกิดเวลาสูญเปล่าในการผลิตที่น้อยกว่า และใช้เวลาการผลิตให้สั้นที่สุดส่งผลให้เกิดประโยชน์ในด้านการผลิตที่ต่ำลง ประหยัดค่าใช้จ่าย ในการดำเนินงานทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งใช้เนื้อที่ส่วนที่เป็นพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นข้อได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ หลังจากที่เราได้เลือกทำเลที่ตั้งโรงงาน และได้ทำการก่อสร้างอาคารโรงงานเรียบร้อยแล้วหรือบางครั้งอาจจะจัดหาโรงงานด้วยวิธีการเช่าอาคารที่เขาได้ปลูกสร้างเอาไว้เสร็จแล้ว ผู้บริหารจะเริ่มวางแผนการจัดวางแผนผังโรงงาน เพื่อการที่จะให้สามารถใช้พื้นที่ในโรงงานที่มีอย่างจำกัดและมีราคาแพงให้ได้ใช้ประโยชน์ให้คุ้มค่าที่สุด นอกจากนี้ยังช่วยให้กระบวนการการผลิตเป็นไปอย่างรวดเร็วไม่ขาดช่วงตามขั้นตอนการผลิต และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเคลื่อนย้ายวัสดุจากสถานที่ทำการผลิตแห่งหนึ่งไปยังสถานที่แห่งหนึ่ง ในระบบการผลิตนั้นถือว่า การลำเลียงปัจจัยในการผลิตเข้าสู่ระบบการผลิตนั้นจะมีประสิทธิภาพสูงสุดได้ ก็ต่อเมื่อมีการวางแผนผังโรงงานที่ดีถูกต้องตามหลักวิชาการ ซึ่งงานนี้

ผู้บริหารและวิศวกรโรงงานจะต้องร่วมมือกันทำงานอย่างใกล้ชิด จึงจะทำให้งานสำเร็จลงได้ด้วยดี

แผนภูมิความสัมพันธ์ (The Relationship Chart)

แผนภูมิความสัมพันธ์ [5], [6], [7] เป็นแบบฟอร์มตารางที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมที่ต้องการหาความสัมพันธ์ แผนภูมิความสัมพันธ์แสดงถึงความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมโดยมีคะแนนเป็นตัวแสดงระดับความสัมพันธ์ว่าแต่ละกิจกรรมสัมพันธ์กันมากน้อยแค่ไหน กิจกรรมใดที่มีความสัมพันธ์กันมากก็ให้ความสำคัญอันดับสูง พร้อมกันนั้นก็จะมีเหตุผลสนับสนุนถึงระดับความสัมพันธ์นั้นอีก การวัดระดับความสัมพันธ์ของกิจกรรมต่าง ๆ นั้น แผนภูมิความสัมพันธ์เป็นวิธีที่เหมาะสมในทางปฏิบัติมากกว่าวิธีอื่น ๆ และเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์สำหรับการวางแผนผังโรงงานในสำนักงานหรือพื้นที่ให้บริการที่มีการไหลของวัสดุอย่างมาก แผนภูมิดังกล่าวจะบอกถึงความสำคัญของความสัมพันธ์ได้ในตัวเข้าใจง่าย ดังเช่นกิจกรรมที่อยู่บนเส้นที่ลาดลงเส้นที่ 1 ตัดกับกิจกรรมที่เป็นตัวแทนอยู่บนเส้นที่เอียงขึ้นเส้นที่ 3 ก็แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมที่ 1 กับกิจกรรมที่ 3 ซึ่งส่วนที่ตัดกันจะได้เป็นกรอบที่แสดงความสัมพันธ์ของกิจกรรมแต่ละคู่ แนวความคิดพื้นฐานเหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่ากิจกรรมใดบ้างที่ควรอยู่ใกล้กันหรือห่างกัน โดยการกำหนดคะแนนเพื่อแสดงระดับความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมนั้น ๆ แสดงตามรูปที่ 1

คะแนนที่แสดงค่าระดับความสัมพันธ์ กำหนดเป็น A, E, I, O, U และ X แสดงรายละเอียดดังนี้

A: Absolutely Necessary: เป็นระดับความสัมพันธ์ที่สมบูรณ์แบบที่สุด ต้องอยู่ติดกันหรือใกล้กันมากที่สุด อาจกล่าวได้ว่ามีระดับความสัมพันธ์มากที่สุด

E: Especially Important: เป็นระดับความสัมพันธ์พิเศษแต่น้อยกว่าความสัมพันธ์ระดับ A หรือมีระดับความสัมพันธ์มาก

I: Important: เป็นระดับความสัมพันธ์แบบน้อยกว่าความสัมพันธ์ระดับ E หรือมีระดับความสัมพันธ์ปานกลาง

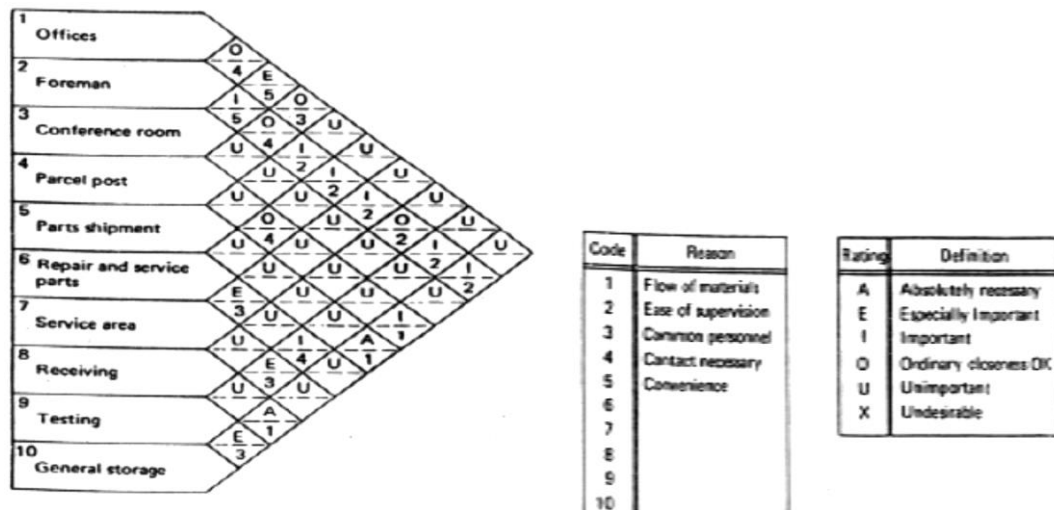
O: Ordinary: เป็นระดับความสัมพันธ์แบบน้อยกว่าความสัมพันธ์ระดับ I หรือมีระดับความสัมพันธ์น้อย

U: Unimportant: เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่มีความสัมพันธ์ มีระดับความสัมพันธ์น้อยที่สุดหรือแทบจะไม่มีระดับความสัมพันธ์เลย หรืออิสระต่อกัน

X: Undesirable: เป็นความสัมพันธ์ในทางลบกิจกรรมคู่ใดที่ถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์ระดับ X แสดงว่าไม่ต้องการให้กิจกรรมคู่นั้นอยู่ใกล้กัน

A, E, I, O และ U เป็นตัวอักษรที่คนส่วนใหญ่จำได้ง่าย จึงใช้เป็นคะแนนเมื่อกำหนดค่า

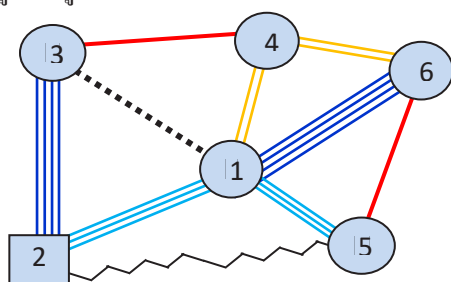
ระดับความสัมพันธ์สำหรับตัวเลขนั้น ในที่นี้ไม่ได้เลือกใช้ เพราะว่าอาจจะให้คะแนนสูงกว่าความเป็นจริง ยิ่งกว่านั้นตัวเลขก็ได้นำมาใช้เป็นรหัสแสดงผล และแสดงลำดับที่กิจกรรมต่าง ๆ อันทำให้เกิดความสับสนในการใช้แผนภูมิได้ การให้คะแนนเพื่อแสดงค่าระดับความสัมพันธ์ต่าง ๆ กิจกรรมใดที่มีความสัมพันธ์มากก็จะมีเหตุผลสนับสนุน เหตุผลแต่ละข้อจะใช้รหัสตัวเลขเขียนลงในแผนภูมิความสัมพันธ์ พร้อมกันนั้นก็ยังมีคำอธิบายเหตุผลตามรหัสต่าง ๆ โดยอธิบายลงในกรอบเหตุผลอยู่ทางขวามือด้านล่างของแผนภูมิ ส่วนรหัสตัวเลขที่เขียนลงในกรอบแสดงความสัมพันธ์ครึ่งล่างนั้นอาจมีเหตุผลสนับสนุน 2 หรือ 3 เหตุผลก็ได้ แต่ไม่ควรมีมากเกินไป อย่างไรก็ตาม เหตุผลทั้งหมดที่สนับสนุนความสัมพันธ์ใกล้หรือไกลของกิจกรรมควรมีประมาณ 10-8 เหตุผลต่อการวิเคราะห์ 1 โครงการ หรืออาจจะมากกว่าแล้วแต่ความจำเป็น ลักษณะเหตุผลที่มีความเป็นไปได้สำหรับการสนับสนุนระดับความสัมพันธ์ต่าง ๆ มีดังนี้ 1) การไหลของวัสดุ 2) ความต้องการติดต่อส่วนบุคคล 3) ใช้อุปกรณ์เหมือนกัน 4) ใช้ข้อมูลร่วมกัน 5) ใช้พนักงานร่วมกัน 6) สะดวกต่อการควบคุมดูแล 7) ต้องการติดต่อกันบ่อยครั้ง 8) ต้องการการบริการเร่งด่วน 9) ประหยัดการติดตั้งระบบสิ่งอำนวยความสะดวก 10) ใช้สาธารณูปโภคร่วมกัน 11) ประสานงานเอกสารร่วมกัน 12) ความต้องการทางด้านการจัดการหรือความสะดวกของบุคคล



รูปที่ 1 ตัวอย่างแผนภูมิความสัมพันธ์

แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ (Relationship Diagram)

แผนภาพความสัมพันธ์เป็นแผนภาพเพื่อแสดงให้เห็นสามารถมองเห็นตำแหน่งของกิจกรรมต่างๆ ว่าควรอยู่ที่ใด โดยนำข้อมูลที่ได้ทำการแจกแจงระดับความสัมพันธ์ของคู่กิจกรรมต่างๆ จากแผนภูมิความสัมพันธ์ เพื่อนำมาเปลี่ยนเป็นการจัดแผนภูมิตามรูปแบบทางภูมิศาสตร์ การเขียนแผนภาพความสัมพันธ์จะเริ่มจากการเลือกเอาคู่กิจกรรมที่มีระดับความสัมพันธ์มากที่สุด (ความสัมพันธ์ระดับ A) มาเขียนก่อน และความสัมพันธ์ระดับรองลงมาตามลำดับ จนกระทั่งคู่กิจกรรมที่มีระดับความสัมพันธ์น้อยที่สุดจะเขียนในขั้นตอนสุดท้าย โดยสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในแผนภาพความสัมพันธ์นั้นจะใช้สัญลักษณ์มาตรฐานเดียวกับการเขียนแผนภูมิขบวนการผลิต การเชื่อมโยงระหว่างกิจกรรมแต่ละคู่จะเชื่อมโยงด้วยจำนวนเส้นจำนวนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และตัวอย่างการเขียนรูป ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเขียนแผนภาพความสัมพันธ์

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ และรหัสต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบการเขียนแผนภาพความสัมพันธ์

รหัสอักษร	คะแนน	ลักษณะเส้น	ความสัมพันธ์
A	4	=====	มากที่สุด
E	3	=====	มาก
I	2	=====	ปานกลาง
O	1	=====	น้อย
U	0		น้อยที่สุด
X	-1	~~~~~	ไม่ต้องการ

การประเมินคะแนนความใกล้ชิดโดยรวม (Total Closeness Rating: TCR)

การประเมินคะแนนความใกล้ชิดโดยรวมเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมหรือแผนงานต่าง ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรม และบอกถึงตำแหน่งที่ตั้งของกิจกรรมหรือแผนกที่สนใจตามความสัมพันธ์ของแต่ละคู่กิจกรรม และพิจารณาข้อจำกัดต่างๆ ประกอบ การสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์เป็นแนวคิดในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับการวางผังโรงงาน ซึ่งแนวคิดดังกล่าวใช้โปรแกรมชื่อว่า CORELAP มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณอัตราความใกล้ชิดรวม (Total Closeness Rating: TCR) [8], [9], [13] โดยกำหนดคะแนนให้แต่ละความสัมพันธ์มีคะแนนดังนี้

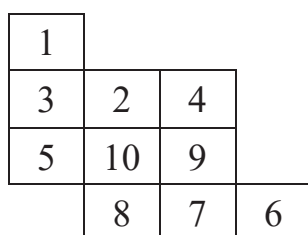
- A มีคะแนนเท่ากับ 10,000
 E มีคะแนนเท่ากับ 1,000
 I มีคะแนนเท่ากับ 100
 O มีคะแนนเท่ากับ 10
 U มีคะแนนเท่ากับ 0
 X มีคะแนนเท่ากับ -10,000

2. คัดเลือกกิจกรรมหรือแผนกแรกที่จะกำหนดลงในผังภาพ โดยพิจารณาค่า TCR ที่มากที่สุด ในกรณีที่มียค่า TCR เท่ากันจะพิจารณาจากจำนวนความสัมพันธ์ (A E I O U)

3. จัดวางตามคะแนน TCR จากมากไปหาน้อย โดยจะเรียงจากด้านซ้ายมือของแผนกแรกแล้วเวียนทวนเข็มนาฬิกา

4. ตรวจสอบว่ากิจกรรมหรือแผนกใดที่ยังไม่ได้พิจารณา กำหนดไว้ในผังโรงงาน หากกิจกรรมใดมีความสัมพันธ์กับแผนกแรกเป็น X ให้พิจารณาเป็นแผนกสุดท้าย กรณีมีมากกว่า 2 กิจกรรม ให้พิจารณาค่า TCR มากไปหาน้อย

5. ตรวจสอบว่ากิจกรรมหรือแผนกใดที่ยังไม่ได้พิจารณา กำหนดไว้ในผังโรงงาน หากกิจกรรมใดมีความสัมพันธ์กับแผนกแรกเป็น A ให้พิจารณาก่อน ในกรณีที่ไม่มีให้พิจารณา E หรือ I หรือ O หรือ U ตามลำดับ สุดท้ายผู้ออกแบบจะได้ผังโรงงานแบบบล็อกที่มีความสัมพันธ์แสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผังโรงงานแบบบล็อกความสัมพันธ์

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต

แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต (Flow Process Chart) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ขั้นตอนการไหลของวัตถุดิบ ชิ้นส่วน พนักงาน และอุปกรณ์ที่เคลื่อนไปในกระบวนการพร้อมกับกิจกรรมต่าง ๆ โดยใช้สัญลักษณ์

มาตรฐาน 5 สัญลักษณ์ ซึ่งกำหนดไว้โดย ASME (American Society of Mechanical Engineers) ดังนี้

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์มาตรฐานที่ใช้แสดงในแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิต

สัญลักษณ์	ชื่อเรียก	คำจำกัดความโดยย่อ
	การปฏิบัติงาน	- การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีหรือฟิสิกส์ของวัตถุ - การประกอบชิ้นส่วน / ถอดส่วนประกอบออก - การเตรียมวัตถุดิบเพื่องานขั้นต่อไป - การวางแผน การคำนวณ การให้คำสั่งหรือการรับคำสั่ง
	การตรวจสอบ	- ตรวจสอบคุณลักษณะของวัตถุ - ตรวจสอบคุณภาพหรือปริมาณ
	การเคลื่อนที่/ย้าย	- การเคลื่อนวัตถุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง - พนักงานกำลังเดิน
	การรอคอย	- การเก็บวัสดุชั่วคราวระหว่างการปฏิบัติงาน - การคอยเพื่อใช้งานขั้นต่อไปเริ่มต้น
	การจัดเก็บ	- การเก็บวัสดุไว้ในสถานที่ถาวรซึ่งต้องอาศัยคำสั่งในการเคลื่อนย้าย - การเก็บชิ้นส่วนที่รอเป็นเวลานาน

แผนภูมิการไหล

การใช้แผนภาพจำลองสถานที่หรือผังบริเวณที่ประกอบกิจกรรมพร้อมตำแหน่งของแผนกงานหรือ

เครื่องจักรที่สำคัญลงในภาพและแสดงเส้นทางการเคลื่อนย้ายพร้อมสัญลักษณ์ลงบนแผนภาพ จะสามารถจำแนกกิจกรรมที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ การปฏิบัติ ไปจนถึงกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า และช่วยชี้ให้เห็นจุดที่เกิดการรอคอย และระยะทางการเคลื่อนย้าย เพื่อนำไปวิเคราะห์ว่าเกิดความสูญเสียเปล่าขึ้นในกระบวนการผลิตหรือไม่ ดังแสดงตามรูปที่ 4

แผนภูมิการไหลของกระบวนการ									
Flow Process Chart									
แผนภูมิหมายเลข _____ แผนที่ _____ ของ _____				สรุปผล					
ผลิตภัณฑ์ / วัสดุ / พนักงาน				Activity	ปัจจุบัน	ปรับปรุง	ลดลง		
				ปฏิบัติงาน					
กิจกรรม :				เคลื่อนย้าย					
				ดำซ้ำ					
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน / ปรับปรุง				ตรวจสอบ					
				เก็บ					
สถานที่ :				ระยะเวลา					
พนักงาน :				ต้นทุน					
บันทึกโดย :				คำนวณ					
อนุมัติโดย :				ค่าวัสดุ					
รวม				รวม					
คำอธิบาย	ปริมาณ	ระยะเวลา (วินาที)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์				หมายเหตุ	
รวม									

รูปที่ 4 แผนภูมิการไหลของกระบวนการ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

แนวทางการดำเนินการศึกษาวิจัย มีขั้นตอนการและวิธีดำเนินการวิจัยแสดงตามลำดับตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	การดำเนินงาน
1	ศึกษาหลักการ แนวคิด ทฤษฎีต่าง ๆ และเก็บรวบรวมข้อมูล รายงานการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก จากแหล่งที่มาของข้อมูลทุติยภูมิ

ตารางที่ 3 (ต่อ) วิธีการดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	การดำเนินงาน
2	ศึกษาวิเคราะห์กระบวนการผลิต และดำเนินการวิเคราะห์ ประเภทเครื่องจักร แผนผังขั้นตอนการผลิตบล็อกประสาน วางผังโรงงานผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะให้สอดคล้องกับขนาดกำลังการผลิต 1,000 ก้อนต่อวัน
3	จัดตั้งโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะในพื้นที่ที่กำหนดเพื่อให้ชุมชนเข้ามาศึกษาดูงานและเรียนรู้การผลิตบล็อกประสานหลังดำเนินการแล้วเสร็จ
4	ดำเนินการติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์เครื่องมือ ติดตั้งระบบสาธารณูปโภคพื้นฐาน เช่น มิเตอร์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้า มิเตอร์น้ำ ระบบน้ำ ส่วนการผลิตหลัก ให้พร้อมสำหรับกระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
5	ดำเนินการเริ่มทดสอบกระบวนการผลิตบล็อกประสาน และทดสอบเครื่องจักรให้สามารถผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ
6	ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ที่เกี่ยวข้องเพื่อสรุปกระบวนการผลิตบล็อกประสานและข้อมูลการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
7	ดำเนินการสรุปผล และวิเคราะห์ผลการศึกษาทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนักโรงไฟฟ้าแม่เมาะ
8	สรุปผลการวิจัย

4. ผลการศึกษาวิจัย

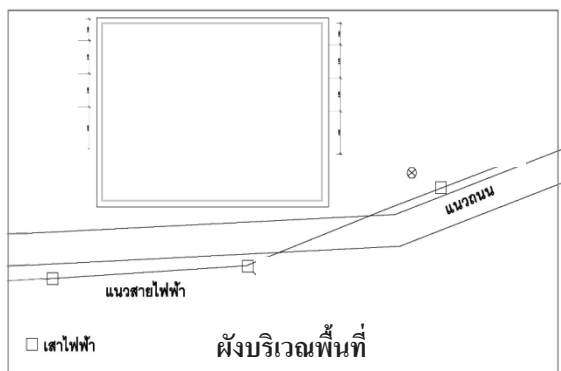
จากการนำเจ้าหน้าที่มาเป็นส่วนผสมผลิตเป็นบล็อกประสานในโครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ [12] สามารถสรุปดังนี้

4.1 ท่าเลที่ตั้งสภาพทั่วไปของโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่ได้ก่อสร้างในพื้นที่บริเวณศูนย์ชีววิถีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนภายในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ในพื้นที่ประมาณ 2,500 ตารางเมตร (ขนาดยาว 50 เมตร และกว้าง 50 เมตร) แสดงตามรูปที่ 5-7



รูปที่ 5 ป้ายโครงการชีววิถีเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน
โรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ตั้งโรงงานต้นแบบ



รูปที่ 6 บริเวณผังพื้นที่ใช้เป็นที่ตั้งโรงงานต้นแบบ
การผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่

การพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้พัฒนาก่อสร้างอาคารจำนวน 2 หลัง ประกอบด้วย อาคารโรงงานต้นแบบที่ก่อสร้างด้วยบล็อกประสานทำมาจากเจ้าหน้าที่ประมาณ 20,000 ก้อน แสดงตามรูปที่ 8-9 เพื่อเป็นอาคารที่ใช้ในการวางเครื่องจักรและผังกระบวนการผลิต 1 โรงงาน และอาคารโรงงานจัดเก็บวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์บล็อกประสานที่ผลิตได้จำนวน 1 โรงงาน แสดงตามรูปที่ 10-11 โดยได้พัฒนาปรับปรุงพื้นที่เตรียมการก่อสร้างแสดงตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 พื้นที่บริเวณจัดตั้งโรงงานต้นแบบการผลิต
บล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่



รูปที่ 8 ภาพโมเดลอาคารโรงงานต้นแบบผลิต
บล็อกลประสานจากเจ้าหน้าที่ด้านหน้า



รูปที่ 9 ภาพโมเดลอาคารโรงงานต้นแบบผลิต
บล็อกลประสานจากเจ้าหน้าที่ด้านหลัง



รูปที่ 10 อาคารโรงงานต้นแบบผลิตบล็อกลประสาน
เจ้าหน้าที่



รูปที่ 11 อาคาร โรงงานจัดเก็บบล็อกลประสานและวัตถุดิบ

4.2 การวิเคราะห์ประเภทเครื่องจักร เครื่องมือวัสดุ อุปกรณ์ และอาคารโรงงานผลิตบล็อกลประสาน

โรงงานต้นแบบผลิตบล็อกลประสานจากเจ้าหน้าที่
โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ก่อสร้างอาคารโรงงานในพื้นที่ขนาด
2,500 ตารางเมตร และกำหนดขนาดกำลังการผลิต 1,000
ก้อนต่อวัน ใช้เครื่องจักร เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ แสดง
ดังตารางที่ 4 ตามแบบสรุปราคากลางงานก่อสร้างอาคาร
(BOQ) ของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
(วว.), 2559 [4] ที่เสนอแบบ BOQ ให้กับ กฟผ.

ตารางที่ 4 รายการเครื่องจักร เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ และ อาคารโรงงานผลิตบล็อกลประสาน

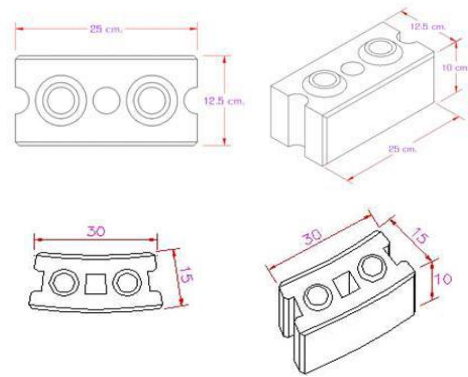
รายการเครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์	จำนวนเงิน (บาท)
ชุดเครื่องอัดไฮดรอลิก 1 ชุด	100,000
หัวอัดบล็อกลประสาน 2 ก้อน 1 ชุด	97,000
เครื่องอัดบล็อกลประสานโค้งแบบมือโยก 1 ชุด	55,000
เครื่องบดร่อนเจ้าหน้าที่ 1 ชุด	55,000
เครื่องผสมวัตถุดิบ 1 ชุด	55,000
ชุดอัดบล็อกลตัวหนอนทางเท้า 1 ชุด	75,000
พาเลทวางบล็อกลสำเร็จรูป	100,000
ชั้นเก็บวางบล็อกลประสาน	100,000
โรงงานผลิตบล็อกลประสานต้นแบบ 1 หลัง	950,000
โรงงานผลิตบล็อกลประสานสำหรับเก็บวัตถุดิบ และบล็อกลประสานที่สำเร็จ 1 หลัง	390,000
วัสดุอุปกรณ์ใช้ในกระบวนการผลิต	50,000
รวม	2,027,000

ที่มา: ราคาคาแบบ BOQ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.),
2559

4.3 กระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก

กระบวนการผลิตบล็อกประสานจากเถ้าหนัก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน ได้ดำเนินการตามขั้นตอนและกระบวนการผลิตสามารถสังเคราะห์ สรุปรายละเอียดและขั้นตอนการผลิตดังนี้

กระบวนการผลิตบล็อกประสาน จะเริ่มจากการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Prepare raw materials) และตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสม เพื่อกำหนดสัดส่วนวัตถุดิบเพื่อการผลิตให้ได้ตามสูตรของสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2560 ถึงแม้ว่าเถ้าหนักเป็นกากของเสียจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า ซึ่งถ้าได้นำมาผสมกับปูนซีเมนต์แล้ว ก็จะไม่ใช่เป็นกากของเสียที่เป็นอันตราย [10], [11], [12] จากนั้นนำวัตถุดิบมาเข้าสู่เครื่องบดร่อน (Mash-Winnow) ให้มีขนาดเล็กลง และลำเลียงวัตถุดิบ (Conveying ingredients system) ที่ผ่านการบดร่อนอย่างละเอียดแล้วไปทำการผสมวัตถุดิบ (Mixed) โดยป้อนปูนซีเมนต์และน้ำเข้าสู่เครื่องผสมเช่นกัน และลำเลียงส่วนผสมที่ได้ตามสูตร (Conveying ingredients system) ไปเข้าเครื่องอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Compressed with a hydraulic injection machine) ได้เป็นผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน จึงนำไปตากแห้ง (Dry out) หลังจากนั้นทำการขนย้ายลำเลียงไปบ่ม (Curing) ต่ออีก เสร็จแล้วจึงจะลำเลียงผลิตภัณฑ์บล็อกประสานสำเร็จรูป (Finished block) ไปกองเก็บที่อาคารเก็บผลิตภัณฑ์บล็อกประสานสำเร็จรูป (Conveyed to the store) ต่อไปตามแผนผังกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 14-15 พบว่าผลิตภัณฑ์บล็อกประสานทำมาจากส่วนผสมวัตถุดิบหลักประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ เถ้าหนัก หินฝุ่น น้ำประปา โดยมีบล็อกประสานจำนวน 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 บล็อกตรงหรือทรงสี่เหลี่ยมใช้สำหรับก่อสร้างอาคารขนาดเต็มก้อน 12.5 x 25 x 10 ซม. และประเภทที่ 2 บล็อกโค้งใช้สำหรับก่อสร้างถึงเก็บน้ำขนาดเต็มก้อน 15 x 30 x 10 ซม. แสดงดังรูปที่ 12-13



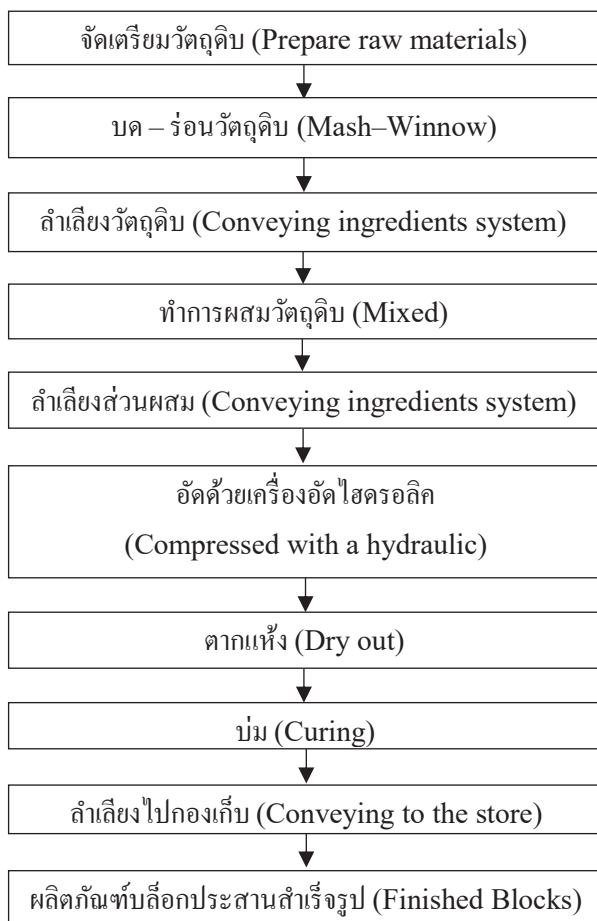
รูปที่ 12 ลักษณะบล็อกประสานแบบตรง และบล็อกประสานแบบโค้ง



รูปที่ 13 บล็อกประสานจากเถ้าหนัก



รูปที่ 14 กระบวนการผลิตบล็อกประสาน



รูปที่ 15 แผนผังกระบวนการผลิตบล็อกประสาน

4.4 ขั้นตอนการวางผังโรงงานผลิตบล็อกประสาน

การวางผังโรงงานผลิตบล็อกประสาน ในบริเวณพื้นที่โครงการชีวิติเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนของโรงไฟฟ้าแม่เมาะด้วยการจำกัดและสภาพบังคับของการใช้พื้นที่ในภาพรวมของโครงการ ดังนั้นจึงใช้วิธีการวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบตามหลักการและทฤษฎีการวางผังโรงงานอย่างมีระบบ (Systematic Layout Planning; SLP) เป็นกระบวนการวางผังโรงงานที่มุ่งเน้นไปที่ระดับความสัมพันธ์ระหว่างสถานีหรือกิจกรรมต่าง ๆ ว่าควรมีการจัดวางใกล้กันหรือไม่ แล้วพิจารณาระดับความใกล้ชิดของแต่ละสถานีที่ละคู่จนครบทุกคู่ โดยพยายามให้สถานีต่าง ๆ มีภาระงานที่สมดุลกัน ซึ่งเป็นแนวทางในการลดระยะทางและลดเวลาในการขนย้ายวัสดุให้น้อยลงช่วยให้

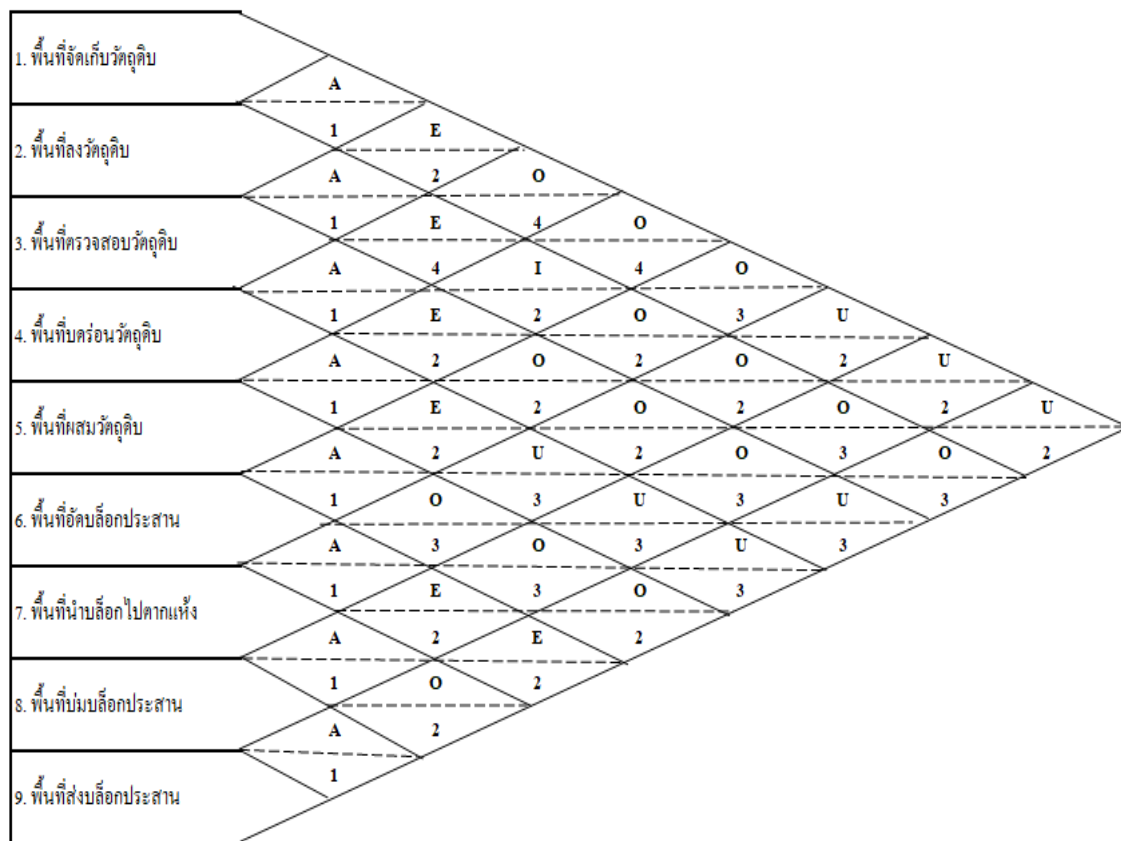
เกิดประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น โดยเขียนแผนภูมิความสัมพันธ์ (Relationship chart) เพื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละบริเวณดังแสดงในรูปที่ 16 ระดับความสัมพันธ์ที่แสดงในแผนภูมิความสัมพันธ์และเหตุผลที่ต้องใช้ระดับความสัมพันธ์นั้น เกิดจากการระดมสมองของทีมงานผู้วิจัยร่วมกันได้กำหนดระดับความสัมพันธ์นั้น จากนั้นแปลงความสัมพันธ์ในแผนภูมิความสัมพันธ์เป็นแผนภาพความสัมพันธ์ เพื่อวางตำแหน่งของพื้นที่แต่ละบริเวณดังแสดงได้ในรูปที่ 17 จากนั้นพิจารณาพื้นที่ที่ต้องการเทียบกับพื้นที่ที่มีอยู่แล้วในโรงงานจะได้ผังโรงงานรวมมา 1 ผัง ในผังโรงงานส่วนนี้ต้องตั้งอยู่ในทำเลที่ตั้งที่เหมาะสมถูกต้องตามหลักมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมที่ดีตามระบบ ISO14001 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งถือเป็นหลักการเบื้องต้นของหลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิตบล็อกประสาน ตามสภาพพื้นที่ที่ได้กำหนด ซึ่งมีทำเลที่ตั้งโดยมีต้นไม้สูงยืนต้นล้อมรอบพื้นที่ตั้งโรงงานต้นแบบ

4.4.1 การจัดทำแผนภูมิความสัมพันธ์ของสถานีงานในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน

การจัดทำแผนภูมิความสัมพันธ์ของสถานีงานแสดงถึงความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรมโดยมีคะแนนเป็นตัวแสดงระดับความสัมพันธ์ว่าแต่ละกิจกรรมมีความสัมพันธ์มากน้อยแค่ไหน ระดับความสัมพันธ์แสดงโดย ตัวอักษรภาษาอังกฤษ A, E, I, O และ U ส่วนตัวเลขจะแทนเหตุผลของกิจกรรมนั้นแสดงตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เหตุผลของความสัมพันธ์ที่ต้องใช้วิเคราะห์ระดับความสัมพันธ์ของสถานีงาน

รหัส	เหตุผล
1	ลำดับต่อเนื่องกัน
2	การควบคุมดูแล
3	ใช้พนักงานร่วมกัน
4	มีฝุ่นละอองมาก



รูปที่ 16 แผนภูมิความสัมพันธ์ (Relationship chart)

4.4.2 วิเคราะห์พื้นที่ที่ต้องการของแต่ละสถานงาน

โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจำเป็นต้องมีพื้นที่ตามการออกแบบประกอบด้วยสถานงานแสดงในตารางที่ 8 จากการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการใช้งานของแต่ละสถานงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. หมายถึง พื้นที่จัดเก็บวัสดุ ใช้พื้นที่ขนาด 25 ตารางเมตร เพื่อใช้จัดเก็บวัสดุเช่น ปูนซีเมนต์ ทรายละเอียด เป็นต้น
2. หมายถึง พื้นที่ลงวัสดุ ใช้พื้นที่ขนาด 9 ตารางเมตร เพื่อใช้เป็นจุดลงวัสดุที่จะเข้ากระบวนการผลิตบล็อกประสานโดยนำมาเป็นส่วนผสมตามสัดส่วนที่กำหนดในรอบการผลิต
3. หมายถึง พื้นที่ตรวจสอบวัสดุ ใช้พื้นที่ขนาด 6 ตารางเมตร เพื่อใช้เป็นพื้นที่ตรวจสอบวัสดุในการผลิตบล็อกประสาน ตามสูตรที่กำหนด

4. หมายถึง พื้นที่บ่มคอนกรีตใช้พื้นที่ขนาด 9 ตารางเมตร เพื่อใช้เป็นพื้นที่บ่มคอนกรีตในการผลิตบล็อกประสาน

5. หมายถึง พื้นที่ผสมวัสดุ ใช้พื้นที่ขนาด 9 ตารางเมตร เพื่อใช้เป็นพื้นที่ผสมวัสดุในการผลิตบล็อกประสาน

6. หมายถึง พื้นที่ผลิตอัดบล็อกประสาน ใช้พื้นที่ขนาด 9 ตารางเมตร เพื่อใช้เป็นพื้นที่ทำการผลิตบล็อกประสานโดยเครื่องจักร

7. หมายถึง พื้นที่นำบล็อกประสานตากแห้ง ใช้พื้นที่ขนาด 20 ตารางเมตรเพื่อใช้วางบล็อกประสานที่ผลิตเสร็จใหม่ๆ ที่ยังไม่แข็งแรง

8. หมายถึง พื้นที่บ่มบล็อกประสานบนชั้นพาเลท ใช้พื้นที่ขนาด 32 ตารางเมตร เพื่อใช้บ่มบล็อกประสานโดยวางก้อนบล็อกประสานบนพาเลท

9. หมายถึง พื้นที่จัดเก็บและส่งผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน ใช้พื้นที่ขนาด 32 ตารางเมตร เพื่อใช้จัดเก็บบล็อกประสานที่ย้ายมาจากพื้นที่บ่มบล็อกประสาน และใช้ส่งบล็อกประสานให้ลูกค้า

จากตารางที่ 8 ได้จำแนกพื้นที่ของแต่ละสถานงาน ทั้งหมด 9 สถานงาน โดยมีพื้นที่ใช้มากที่สุดคือ พื้นที่จัดเก็บและส่งผลิตภัณฑ์บล็อกประสานและพื้นที่บ่มบล็อกประสานบนชั้นพาเลทมีขนาดพื้นที่ 32 ตารางเมตร รองลงมาคือพื้นที่จัดเก็บวัตถุดิบ มีขนาดพื้นที่ 25 ตารางเมตร และพื้นที่ใช้น้อยที่สุดคือพื้นที่ใช้ตรวจสอบวัตถุดิบ ใช้ขนาดพื้นที่ 6 ตารางเมตร

ต่อจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละพื้นที่ในกระบวนการผลิตบล็อกประสานพบว่า ต้องให้ความสำคัญลำดับแรกกับรหัสอักษรความสัมพันธ์ A มีความสัมพันธ์มากที่สุด และรหัสตัวเลข 1 ลำดับต่อเนื่องกันก่อน ในการพิจารณาจัดพื้นที่ในกระบวนการผลิต เช่น พื้นที่ บดร่อนวัตถุดิบต้องอยู่ติดกับพื้นที่ผสมวัตถุดิบ เป็นต้น ทำให้ได้ผังแผนภาพความสัมพันธ์ของพื้นที่ในกระบวนการผลิตบล็อกประสานตามรูปที่ 17

ตารางที่ 8 การจำแนกพื้นที่ของแต่ละสถานงาน

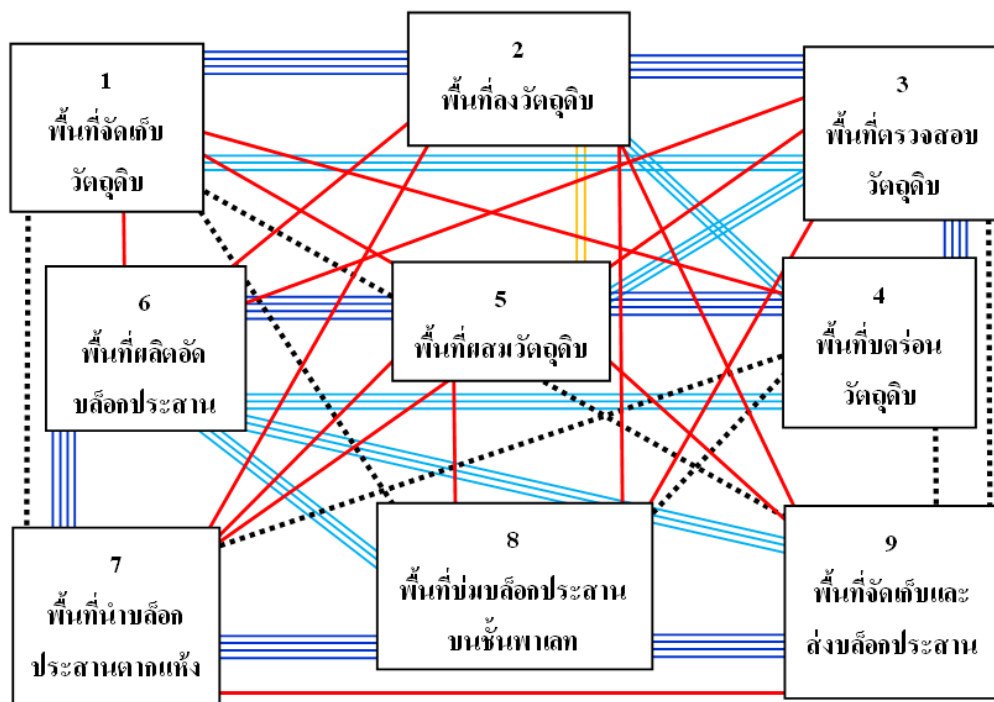
ลำดับ	สถานงาน	พื้นที่ กว้าง x ยาว (เมตร ²)	ขนาดพื้นที่ (ตรม.)
1	พื้นที่จัดเตรียม วัตถุดิบ	5 x 5	25.00
2	พื้นที่ลงวัตถุดิบ	3 x 3	9.00
3	พื้นที่ตรวจสอบ วัตถุดิบ	2 x 3	6.00
4	พื้นที่บดร่อน วัตถุดิบ	3 x 3	9.00
5	พื้นที่ผสมวัตถุดิบ	3 x 3	9.00
6	พื้นที่ผลิตอัดบล็อก ประสาน	3 x 3	9.00

ตารางที่ 8 (ต่อ) การจำแนกพื้นที่ของแต่ละสถานงาน

ลำดับ	สถานงาน	พื้นที่ กว้าง x ยาว (เมตร ²)	ขนาดพื้นที่ (ตรม.)
7	พื้นที่นำบล็อก ประสานตากแห้ง	4 x 5	20.00
8	พื้นที่บ่มบล็อก ประสานบนชั้นพา เลท	4 x 8	32.00
9	พื้นที่จัดเก็บและส่ง ผลิตภัณฑ์บล็อก ประสาน	4 x 8	32.00

ตารางที่ 9 รหัสอักษรจากแผนภูมิความสัมพันธ์

ลำดับ	พื้นที่	รหัสอักษร	ความหมาย
1	จัดเก็บวัตถุดิบ และ ลงวัตถุดิบ	A	มากที่สุด
2	จัดเก็บวัตถุดิบ และ ตรวจสอบวัตถุดิบ	E	มาก
3	จัดเก็บวัตถุดิบ และ บดร่อนวัตถุดิบ	O	น้อย
.			
.			
.			
34	นำบล็อกตากแห้ง และบ่มบล็อก ประสาน	A	มากที่สุด
35	นำบล็อกตากแห้ง และจัดเก็บบล็อก ประสาน	O	น้อย
36	บ่มบล็อกประสาน และจัดเก็บบล็อก ประสาน	A	มากที่สุด



รูปที่ 17 แผนภาพความสัมพันธ์ของพื้นที่ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน

จากรูปที่ 17 แผนภาพความสัมพันธ์ของพื้นที่ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน จะทำให้สามารถกำหนดพื้นที่ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น แล้วนำไปเขียนแผนผังโรงงานให้ถูกต้องมีประสิทธิภาพลดระยะทางการขนย้ายในกระบวนการผลิตได้ ซึ่งพิจารณาจากพื้นที่ที่มีความสำคัญมากที่สุดและลำดับการทำงานต่อเนื่องกัน โดยสรุปดังนี้

จุดงานที่ 1 พื้นที่จัดเก็บวัสดุ และจุดงานที่ 2 พื้นที่ลงวัสดุ ควรมีพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัสดุ

จุดงานที่ 2 พื้นที่ลงวัสดุ และจุดงานที่ 3 พื้นที่ตรวจสอบวัสดุ ควรมีพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัสดุ

จุดงานที่ 4 พื้นที่บดร้อนวัสดุ และจุดงานที่ 5 พื้นที่ผสมวัสดุ ควรมีพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัสดุ

จุดงานที่ 5 พื้นที่ผสมวัสดุ และจุดงานที่ 6 พื้นที่ผลิตอัดบล็อกประสาน ควรมีพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัสดุ

จุดงานที่ 6 พื้นที่ผลิตอัดบล็อกประสาน และจุดงานที่ 7 พื้นที่นำบล็อกประสานตากแห้ง ควรมีพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัสดุ

จุดงานที่ 7 พื้นที่นำบล็อกประสานตากแห้ง และจุดงานที่ 8 พื้นที่บ่มบล็อกประสานบนชั้นพาเลท ควรมีพื้นที่ที่อยู่ใกล้กัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัสดุ

จุดงานที่ 8 พื้นที่บ่มบล็อกประสานบนชั้นพาเลท และจุดงานที่ 9 พื้นที่จัดเก็บและส่งบล็อกประสานควรมีพื้นที่อยู่

ใกล้เคียงกัน เพราะมีความสัมพันธ์มากที่สุด เหตุผลเพราะมีลำดับต่อเนื่องกัน เพื่อลดเวลาในการขนย้ายวัตถุดิบ

ตารางที่ 10 แสดงจำนวนคู่ความสัมพันธ์ของพื้นที่ในกระบวนการผลิตบล็อกประสาน

รหัสความสัมพันธ์	พื้นที่คู่ความสัมพันธ์ในกระบวนการผลิต	รวม
A	1-2,2-3,3-4,4-5,5-6,6-7,7-8,8-9	8
E	1-3,2-4,3-5,4-6,6-8,6-9	6
I	2-5	1
O	1-4,1-5,1-6,2-6,2-7,2-8,2-9,3-6,3-7,3-8,5-7,5-8,5-9,7-9	14
U	1-7,1-8,1-9,3-9,4-7,4-8,4-9	7
	รวมพื้นที่คู่ความสัมพันธ์	36

$$\begin{aligned}
 &\text{จำนวนความสัมพันธ์พื้นที่ในกระบวนการผลิตทั้งหมด} \\
 &= [\text{จำนวนพื้นที่งาน} \times (\text{จำนวนสถานีงาน} - 1)] / 2 \\
 &= [9 \times (9 - 1)] / 2 \\
 &= 36 \text{ คู่ความสัมพันธ์}
 \end{aligned}$$

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการผลิตโดยนำแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของกิจกรรมมาทำการพิจารณาให้คะแนนในตารางการคำนวณคะแนนความใกล้ชิดโดยรวม (Total Closeness Rating: TCR) ภายในโรงงาน โดยกำหนดให้แต่ละความสัมพันธ์มีค่าน้ำหนัก [11, 12, 16] ดังนี้

ความสัมพันธ์ A มีน้ำหนัก 10,000 ความสัมพันธ์ E มีน้ำหนัก 1,000 ความสัมพันธ์ I มีน้ำหนัก 100 ความสัมพันธ์ O มีน้ำหนัก 10 และความสัมพันธ์ U มีน้ำหนัก 0 แสดงดังรูปที่ 18 จะเห็นได้จาก สถานีที่ 6 มีค่า TCR มากที่สุด ซึ่งสามารถคิดค่า TCR ของสถานีที่ 6 ได้เท่ากับ 23,030 สถานีที่ 6 มีตัวอักษร A ทั้งหมด 2 ตัวมีค่าเท่ากับ 20,000 มีตัวอักษร E ทั้งหมด 3 ตัวมีค่าเท่ากับ 3,000 มีตัวอักษร I ทั้งหมด 0 ตัวมีค่าเท่ากับ 0 มีตัวอักษร O ทั้งหมด 3 ตัวมีค่าเท่ากับ 30 มีตัวอักษร U ทั้งหมด 0 ตัวมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นรวมผลค่าตัวอักษร 20,000 + 3,000 + 0 + 30 จะได้ผลรวม TCR เท่ากับ 23,030

ต่อจากนั้นนำค่า TCR มาทำการจัดตำแหน่งของแต่ละสถานีที่มีความสัมพันธ์กันโดยเริ่มจากสถานีที่ได้คะแนนมากที่สุดเป็นอันดับแรก คือสถานีที่ 6 และจัดวางเรียงลงมาตามระดับคะแนนจนถึงสุดท้าย โดยคำนึงถึงข้อกำหนดของระดับความสัมพันธ์กันกล่าวคือ ให้พิจารณาเลือกสถานีงานที่มีผลคะแนนสูงที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้ทำการเลือกสถานีที่ 6 ให้เป็นสถานีแรกที่ถูกบรรจุในผังโรงงาน เนื่องจากผลคะแนน TCR สูงที่สุดขั้นตอนต่อมา พิจารณาเลือกสถานีงานที่มีความสัมพันธ์ระดับ A โดยทำการเลือกบรรจุสถานีที่ 5 ลงในผังโรงงาน เพราะมีความสัมพันธ์ระดับ A กับสถานีที่ 6 จากนั้นทำการเลือกวางสถานีงานไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งพิจารณาจากตำแหน่งที่มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละตำแหน่งถึงจุดศูนย์กลางของตำแหน่งที่ตั้งได้ตำแหน่งที่เหมาะสมคือ 1, 3, 5, 7 ซึ่งผู้วิจัยได้วางในตำแหน่งที่ 1 เพื่อสะดวกในการเขียนภาพโปรแกรมผังโรงงาน จึงกำหนดให้การบรรจุตำแหน่งให้บรรจุในตำแหน่งที่มีเลขตำแหน่งต่ำสุดก่อน แสดงดังรูปที่ 19-21 ส่วนขั้นตอนต่อไปดำเนินการพิจารณาเลือกสถานีงานที่มีความสัมพันธ์ระดับ A โดยทำการเลือกบรรจุสถานีต่อจากสถานีงานที่มีค่าคะแนน TCR มากที่สุด และมีความสัมพันธ์กันมากที่สุดก่อนลงในผังโรงงาน ทำเช่นเดียวกันจนถึงสถานีงานสุดท้าย

STATION	STATION									SUMMARY					TCR
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	E	I	O	U	
1	-	A	E	O	O	O	U	U	U	1	1	0	3	3	11,030
2	A	-	A	E	I	O	O	O	O	2	1	1	4	0	21,140
3	E	A	-	A	E	O	O	O	U	2	2	0	3	1	22,030
4	O	E	A	-	A	E	U	U	U	2	2	0	1	3	22,010
5	O	I	E	A	-	A	O	O	O	2	1	1	4	0	21,140
6	O	O	O	E	A	-	A	E	E	2	3	0	3	0	23,030
7	U	O	O	U	O	A	-	A	O	2	0	0	4	1	20,040
8	U	O	O	U	O	E	A	-	A	2	1	0	3	2	21,030
9	U	O	U	U	O	E	O	A	-	1	1	0	3	3	11,030
														Max	23,030

รูปที่ 18 แผนภาพแสดง Total Closeness Rating: TCR สำหรับกระบวนการผลิต

8	7	6
1	6	5
2	3	4

10	9	8	7
1	5	6	6
2	3	4	5

12	11	10	9
1	5	6	8
2	3	7	7
	4	5	6

รูปที่ 19 แผนภาพแสดงการวางผังโรงงานตามค่าความสัมพันธ์ตัวอักษรและค่า TCR#1-3

13	12	11	10	9
1	4	5	6	8
2	3	4	7	7
			5	6

16	15	14	13	12	11
1	3	4	5	6	10
2	3	4	5	7	9
			6	7	8

18	17	16	15	14	13	12
1	2	3	4	5	6	11
2	3	4	5	6	7	10
			7	8	9	

20	19	18	17	16	15	14
1	2	3	4	5	6	13
2	3	4	5	6	7	12
				7	8	11
				8	9	10

รูปที่ 20 แผนภาพแสดงการวางผังโรงงานตามค่าความสัมพันธ์ตัวอักษรและค่า TCR#4-7

21	20	19	18	17	16	15
1	2	3	4	5	6	14
2	3	4	5	6	7	13
			7	9	8	12
			8	9	10	11

23	22	21	20	19	18	17	16
1	1	2	3	4	5	6	15
2	3	4	5	6	7	7	14
				8	9	8	13
				9	10	11	12

รูปที่ 21 แผนภาพแสดงการวางผังโรงงานตามค่าความสัมพันธ์ตัวอักษรและค่า TCR#8-9

1	2	3	4	5	6
					7
				9	8

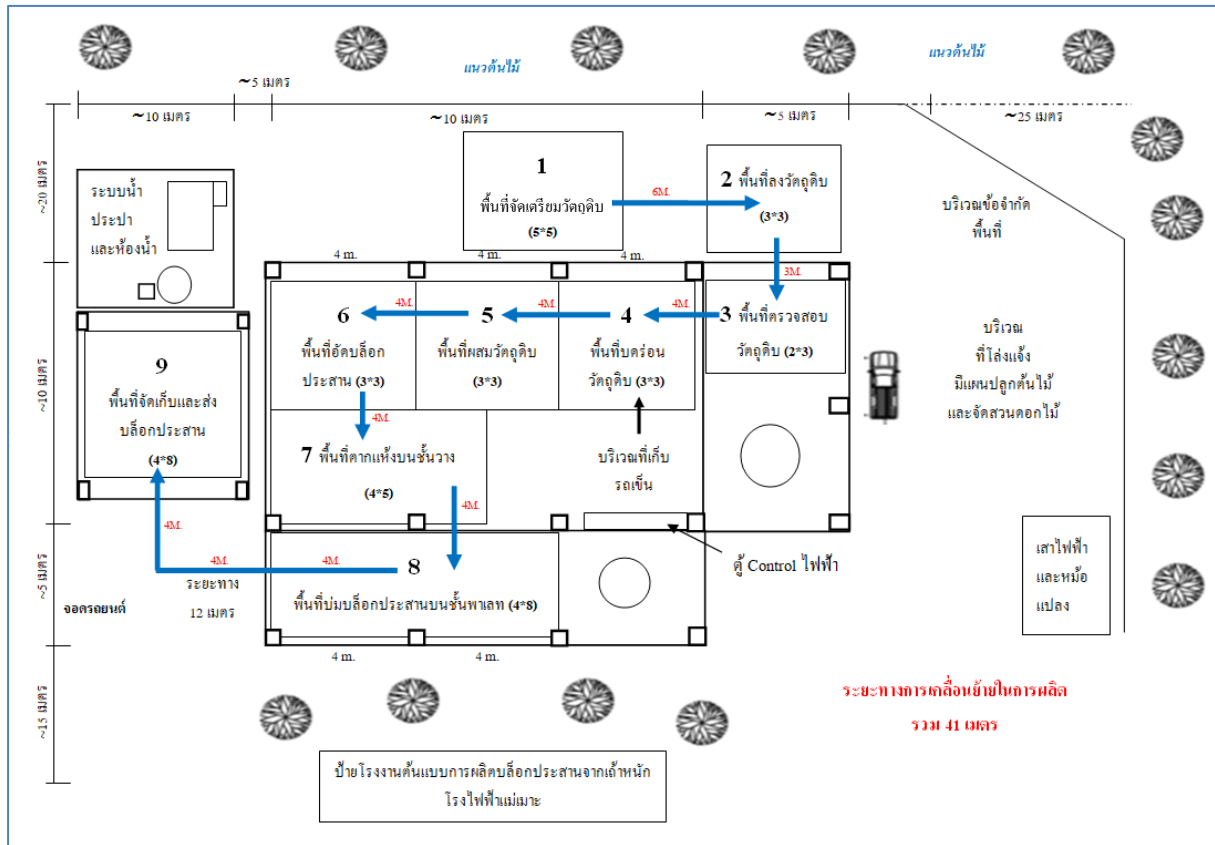
รูปที่ 22 แผนภาพแสดงการวางผังโรงงานบล็อกที่มีความสัมพันธ์

จากรูปที่ 22 แสดงผังโรงงานแบบบล็อกที่มีความสัมพันธ์ จึงได้นำมาวางรูปแบบผังโรงงานตามแบบบล็อกที่มีความสัมพันธ์โดยพิจารณาพื้นที่และความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมประกอบการพิจารณา ได้ผังโรงงานในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเลือกพิจารณารูปแบบที่เหมาะสมในการใช้วางผังโรงงานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดโดยมีข้อจำกัดบางปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบด้วย ข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ ข้อจำกัดเรื่องสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยเฉพาะสถานที่ 1 เป็นพื้นที่จัดเตรียมวัตถุดิบ

เช่น เจ้าหน้าที่ และหินฝุ่น จึงนำไว้ในอาคาร ส่วนสถานที่ 9 เป็นสถานที่เก็บผลิตภัณฑ์บล็อกประสานที่สำเร็จพร้อมจำหน่ายออกไปใช้งาน จึงจัดเก็บไว้ในอาคารโรงงานเก็บบล็อกประสาน ซึ่งเป็นอาคารโรงงานแยกจากพื้นที่ในส่วนกระบวนการผลิต แต่เนื่องจากต้องการให้เห็นความสัมพันธ์จึงนำมาวิเคราะห์ TCR ร่วมด้วย ต่อจากนั้นจึงนำไปทดลองจัดวางผังโรงงาน ได้ผังโรงงานมาจำนวน 3 รูปแบบตามความสัมพันธ์มากที่สุด ดังนี้

[illegible]

52



รูปที่ 25 ผังโรงงานแบบทางเลือกที่ 3

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสถานงานแล้ว ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางเลือกผังโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสาน เพื่อให้ได้ผังโรงงานที่เหมาะสมกับกำลังการผลิตในแผนผังโรงงานประกอบด้วย เครื่องผลิตมี 1 สายการผลิตซึ่งมี 2 เครื่องอัด ประกอบด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก และแบบมือโยก เพียงพอต่อการกำลังการผลิต 1,000 ก้อนต่อวัน ทำการผลิต 8 ชั่วโมงต่อวัน วันทำงาน 26 วันต่อเดือน ดังนั้นกำลังการผลิตเท่ากับ 1,000 ก้อน x 26 วัน x 12 เดือน เท่ากับ 312,000 ก้อนต่อปี โดยมีระยะเส้นทางการขนย้ายและเวลาที่ใช้ในแต่ละสถานี จากการจำลองเก็บข้อมูลตามจุดพื้นที่ แสดงตามแผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิตบล็อกประสาน กับสภาพพื้นที่ในการจัดตั้งโรงงาน สรุปผลแสดงตามรูปที่ 26 และรูปที่ 27

กระบวนการผลิต.....การผลิบล็อกประสาน.....							
สรุปผล	ทำงาน	ขนย้าย	ตรวจสอบ	รอคอย	เก็บรักษา	ระยะทาง (เมตร)	ระยะเวลารวม (นาท)
	○	⇨	□	D	▽		
ผังโรงงานทางเลือกที่ 1	6	8	1	2	1	50	136
ผังโรงงานทางเลือกที่ 2	6	8	1	2	1	47	134
ผังโรงงานทางเลือกที่ 3	6	8	1	2	1	41	132

หมายเหตุ: ดังนั้น ผังโรงงานทางเลือกที่ 3 มีประสิทธิภาพมากที่สุดต่อการผลิต (1 รอบการผลิตได้บล็อกประสานจำนวน 200 ก้อน)

รูปที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบผังโรงงานของทั้ง 3 ผังทางเลือก

จากรูปที่ 26 แสดงการเปรียบเทียบผังโรงงานของทั้ง 3 ผังทางเลือก พบว่า ผังโรงงานทางเลือกที่ 3 มีระยะทางการขนย้ายเท่ากับ 41 เมตรต่อการรอบการผลิตใช้เวลาผลิตบล็อกประสาน 97 นาที และใช้เวลารวมเท่ากับ 132 นาที เป็นผังทางเลือกที่มีระยะทางการขนย้ายสั้นที่สุด และเป็นรูปแบบที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพ

มากที่สุด ประกอบกับเหตุผลที่ต้องการให้วัตถุดิบที่เป็น
 เจ้าหน้าที่ ซึ่งขณะแห่งจะเป็นฝุ่น ถ้าอยู่ด้านข้างโรงงาน
 ต้นแบบ อาจจะส่งผลให้กระทบกับสิ่งแวดล้อมจึงต้องการ
 ให้อยู่ด้านหลังโรงงาน รวมถึงด้านข้างโรงงานต้นแบบจะ
 ทำแผนการปลูกต้นไม้และจัดสวนให้สวยงามเพื่อเป็นที่
 พักผ่อนและจุดถ่ายรูปเมื่อมีผู้สนใจขอมาเยี่ยมชมโรงงาน
 ต้นแบบผลิตบล็อกประสานในอนาคตเป็นต้น ดังนั้น
 สามารถสรุปผลได้ว่า ฟังโรงงานตามรูปแบบที่ 3 ในการ
 กำหนดการไหลของกระบวนการผลิตบล็อกประสานจาก
 เจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะมีความเหมาะสมที่สุด โดยมี
 รายละเอียดของกระบวนการผลิตบล็อกประสานตาม
 แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิตบล็อกประสาน
 ทางเลือกที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด คือระยะทางการขนย้าย
 เท่ากับ 41 เมตรต่อรอบการผลิต

กระบวนการผลิต.....การผลิตบล็อกประสาน.....			
สรุปผล	วิธีการผลิตที่ นำเสนอ	สรุปผล	
การทำงาน	○	ระยะทาง (เมตร)	41 เมตร
การขนย้าย	⇒	เวลาที่ผลิตบล็อกประสาน (นาที)	97 นาที
การตรวจสอบ	□	เวลารวม (นาที)	132 นาที
การรอคอย	◇		
การเก็บรักษา	▽		
ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์	คำอธิบายการทำงาน
	5	● ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานจัดเตรียมวัตถุดิบ (ส่วนผสม) ในพื้นที่จัดเก็บ
6	3	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายวัตถุดิบไปยังพื้นที่ลงวัตถุดิบ
	3	● ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานตรวจสอบวัตถุดิบ
3	2	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายวัตถุดิบไปยังพื้นที่ตรวจสอบส่วนผสม
	8	● ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานตรวจสอบวัตถุดิบและส่วนผสม
4	2	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายวัตถุดิบไปยังเครื่องบด-ร่อน
	15	● ⇒ □ ◇ ▽	ทำการบดร่อนวัตถุดิบ
4	2	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายวัตถุดิบไปยังเครื่องผสม
	15	● ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานทำการผสมวัตถุดิบ
4	2	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายส่วนผสมไปยังเครื่องอัดไฮดรอลิก
		○ ⇒ ● ▽	ส่วนผสมรอที่จุดผลิต
	20	● ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานอัดบล็อกประสานด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก
4	20	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายนำไปตากแห้งไว้ที่ชั้นวาง
		○ ⇒ ● ▽	ตากแห้งที่ชั้นวางทิ้งไว้ 1 วัน (24 ชม.หรือ 1,440 นาที)
	5	○ ⇒ □ ◇ ▽	ทำการสุ่มตรวจสอบบล็อกประสาน
4	15	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายบล็อกประสานไปกองเก็บที่ชั้นทานลุ
		○ ⇒ ● ▽	บ่มที่ชั้นทานลุทิ้งไว้ 7-28 วัน (ขั้นต่ำ 168 ชม.หรือ 10,080 นาที)
12	15	○ ⇒ □ ◇ ▽	พนักงานขนย้ายบล็อกประสานไปกองเก็บที่อาคารเก็บ
		○ ⇒ □ ◇ ▽	จัดเก็บที่ชั้นทานลุในอาคารเก็บบล็อกประสาน

รูปที่ 27 แผนภูมิการไหลของกระบวนการผลิตบล็อก
 ประสานทางเลือกที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด

5. สรุปผลการวิจัย

โรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่
 โรงไฟฟ้าแม่เมาะมีองค์ประกอบ [16] ดังนี้

1. อาคาร โรงงานก่อสร้างในพื้นที่ประมาณ 2,500 ตารางเมตร ประกอบด้วย 2 อาคาร คือ อาคารโรงงานผลิต
 บล็อกประสานต้นแบบ ก่อสร้างด้วยบล็อกประสานที่ผลิต
 มาจากเจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นลักษณะอาคารชั้น
 เดียว จำนวน 1 อาคาร มีขนาดพื้นที่ไม่น้อยกว่า 265
 ตารางเมตร ก่อสร้างด้วยบล็อกประสานที่ทำมาจาก
 เจ้าหน้าที่จำนวนประมาณ 20,000 ก้อน และอาคารโรงงาน

ใช้เก็บผลิตภัณฑ์ลือกประสานที่สำเร็จรูป และใช้เก็บผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์บางส่วนเป็นอาคารชั้นเดียว มีขนาดพื้นที่ไม่น้อยกว่า 90 ตารางเมตร แสดงตามรูปที่ 9-10

2. ใช้เครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตภายในโรงงานต้นแบบ เพื่อรองรับขนาดกำลังการผลิตลือกประสาน 1,000 ก้อนต่อวัน สามารถผลิตลือกประสานได้ 312,000 ก้อนต่อปี แสดงรายการตามตารางที่ 4

3. ใช้อัตรากำลังในกระบวนการผลิตภายในโรงงานต้นแบบจำนวน 6 คน ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง และกำหนดวันทำงาน 26 วันต่อเดือน

4. ขั้นตอนกระบวนการผลิตลือกประสานประกอบด้วยขั้นตอน 1) จัดเตรียมวัตถุดิบ 2) บด-ร่อนวัตถุดิบ 3) ทำการผสมวัตถุดิบ 4) นำวัตถุดิบที่ผสมแล้วมาอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค 5) นำลือกประสานที่ได้ไปตากแห้งเป็นเวลา 1 วัน 6) นำลือกประสานที่ตากแห้งแล้วไปทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7-28 วัน 7) นำลือกประสานสำเร็จ ที่บ่มครบจำนวนวันแล้วย้ายไปจัดกองเก็บในพื้นที่กำหนด

5. การวางผังโรงงานผลิตลือกประสานต้นแบบโดยใช้วิธีการวางผังโรงงานอย่างเป็นระบบ (Systematic Layout Planning; SLP) และใช้การพิจารณาให้คะแนน

ในตารางการคำนวณคะแนนความใกล้ชิดโดยรวม (Total Closeness Rating: TCR) ภายในโรงงานมากำหนดให้แต่ละความสัมพันธ์มีค่าน้ำหนักเพื่อใช้เลือกการวางสถานงานที่มีความใกล้ชิดของแต่ละสถานที่ละคู่จนครบทุกคู่ โดยพยายามให้สถานที่ต่าง ๆ มีการะงานที่สมดุลกัน ช่วยให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น แล้วใช้แผนภูมิการไหล วิเคราะห์ระยะทางขนย้ายในกระบวนการผลิตพบว่าระยะทางสั้นที่สุดเท่ากับ 41 เมตรต่อรอบการผลิต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยฝ่ายจัดการโรงไฟฟ้าแม่เมาะร่วมกับสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และขอขอบคุณผู้บริหาร ผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ทำให้โครงการพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตลือกประสานจากเจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะจนสำเร็จลุล่วง สามารถเป็นโรงงานต้นแบบให้กับโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า รวมถึงเป็นต้นแบบให้ชุมชนได้มาเรียนรู้เทคโนโลยีการผลิตลือกประสานซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความรับผิดชอบต่อสังคมของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. รายงานวิธีการและผลการดำเนินงาน ประจำปี 2560. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2560; 1.
- [2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หลักเกณฑ์และเงื่อนไขการประกาศราคาขายเจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ประจำปี 2559. กองการขายและบริหารสัญญาวัตถุดิบได้, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559.
- [3] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. รายงานประจำปีกองปฏิบัติการระบบลำเลียงถ่านหินและอิมพัชการผลิตรองไฟฟ้าแม่เมาะ ประจำปี 2559. ฝ่ายการผลิตโรงไฟฟ้าแม่เมาะ, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แม่เมาะ, 2559.
- [4] การพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตลือกประสานจากวัตถุดิบได้ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ. เอกสารประกอบสัญญารับทุนวิจัยและพัฒนา นวัตกรรม, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2560.
- [5] ชัยนนท์ ศรีสุกีนานนท์. การออกแบบผังโรงงานเพื่อเพิ่มผลผลิต. กรุงเทพฯ : โอกรูปเพรส, 2548.

- [6] ศุภลักษณ์ สุวรรณ. การวางผังโรงงานสำหรับสายการผลิตผลิตภัณฑ์หลายประเภท เพื่อให้อาหารมีความปลอดภัยและ
ถูกสุขอนามัย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [7] สมศักดิ์ ตรีสัตย์. การออกแบบและวางผังโรงงาน. กรุงเทพฯ: ส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น, 2535.
- [8] สุทธิชัย ขวาคำ. การออกแบบผังโรงงานสำหรับผลิตภัณฑ์หลายประเภทในสายการผลิตเดียวกัน. วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต, สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2554.
- [9] แวดดาว สมานพันธ์ และนันทชัย กานตานันทะ. การปรับปรุงผังโรงงานเพื่อจัดสมดุลกำลังการผลิตโดยเทคนิคการ
จำลองแบบปัญหาในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556; 40 (2):
173-183.
- [10] พงศ์ภูมิ ศรีชมแก้ว. การผลิตอิฐบล็อกประสานจากกากอุตสาหกรรม. งานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์, 2555.
- [11] วุฒินัย กกก้าแหง และวิทยา วุฒิจำนงค์. การประยุกต์ใช้ปั๊มในการผลิตบล็อกประสาน. การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม 2550.
- [12] สุวิทย์ สายสุนาวิชญ์. การพัฒนาโรงงานต้นแบบการผลิตบล็อกประสานจากเจ้าหน้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2561.
- [13] Moore, J. Plant Layout and Design. Macmillan Publishing Co.Inc., 1959.
- [14] Pheerapattana, P. Plant Layout and Equipment. Khonkaen University Publishers, Khonkaen, 2005.
- [15] Heragu, S. Facilities Design. 1st edition, International Thomson Publishing Inc., 1997.
- [16] Panpisut, P. การพัฒนาระบบการผลิต. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://development-production-factor-process.blogspot.com/2013/07/blog-post_21.html.

Stress Concentration Due to Shear Lag Effect in Simply Supported Steel Box Girders with Longitudinal Stiffeners

Tanpitcha Pumphaka¹ and Taweep Chaisomphob²

^{1,2}School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology
Thammasat University 99 Moo. 18, Khlong Luang, Pathum Thani, 12121, Thailand

¹E-mail: baipo.f@gmail.com, Tel: +6682 358 3437

²E-mail: taweep@siit.tu.ac.th, Tel: +6692 284 4081

ABSTRACT

The objectives of this research is to study about the shear lag effect and focus on stress concentration for steel box girder with longitudinal stiffeners. All of models in this research used the finite element method for studying the shear lag effect and the finite element mesh must be made with carefulness to assess stress concentration. The study examines the stress concentration in a flange due to the shear lag in a simply supported steel box girder by the three-dimensional finite element method using shell elements under two loading conditions of uniformly distributed load along girder length and concentrated load. Definitely, parametric study with respect to the geometry of steel box girder is used. The dependency of finite element mesh is carefully emphasized. It is also reported that the stress distributions in the flange are different from those of the elementary theory. Based on the results, empirical formulas are proposed to calculate stress concentration factors due to the shear lag effect.

1. INTRODUCTION

This study aims to investigate shear lag in simply supported steel box girder with stiffener under two loading conditions. The simply supported steel box girder is shown in Figure 1. In the elementary beam theory, the normal stress in the longitudinal direction produced by bending deformation is assumed to be proportional to the distance from neutral axis and uniform across the flange width. If the flange gets wider, this assumption becomes invalid and a phenomenon called shear lag will happen.

The geometric properties of box girders are shown in Figure 1 (c). The geometric properties are half flange width (B), span length (L), height of web (H), thickness of flange (t_f), thickness of web (t_w), cross sectional area of the stiffeners (A_s) and cross sectional area of flange (A_f).

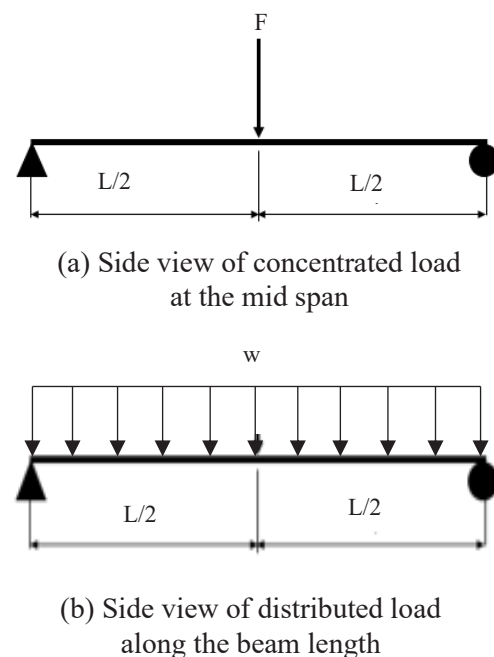
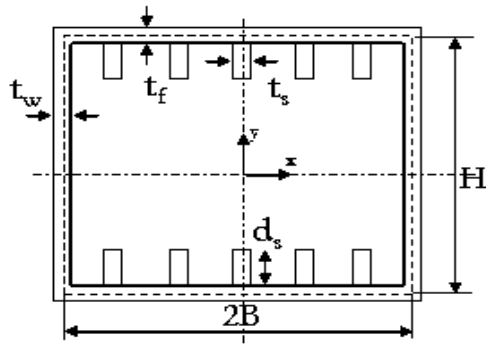


Figure 1 Structural geometry of box girder



(c) Cross section and geometric properties

Figure 1 (Cont.) Structural geometry of box girder

Empirical formulas for assessment of shear lag effect are shown in term of the effective width but this way cannot give the exact value of stress concentration. Moffatt and Dowling [3] give the meaning of the effective width is:

$$B_e = \frac{1}{\sigma_{\max}} \int_0^{2B} \sigma_y dx \quad (1)$$

Where B_e is the half effective width, and the numerator is the integration of the normal stress in the flange, σ_y , while the denominator is the actual maximum normal stress in the flange due to shear lag, $\sigma_{\max}$. Yamaguchi, T., et al. [6] are realized that the evaluation of the maximum stress by the effective width approach invites error by itself. So, in the present study, the empirical formulas are proposed for evaluating stress concentration factors obtained by the present finite element analysis instead of the effective width.

The AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2010 [4] is used for design steel beams. By varying the proportions of geometric properties of the steel girder, the linear FEA is performed. From the results of finite element method (FEM), the proposed formula for calculation stress concentration factor is proposed.

For finite element models, the structure is created by using 3D 4 nodes shell element. Due to symmetry, this study uses a quarter of steel box girder for analysis. In all analyses, finite element program, MARC 2016 [5], is used. The square elements are used in this study. The element

meshes are used to learn about the effect of finite element mesh on stress concentration and used to reduce incorrect value by multimesh extrapolation method for all steel box girders under two loading conditions.

2. Box girder to be analyzed

The stress concentration factors can be evaluated in steel box girder underneath concentrated load. Stress concentration factor, K_e is the ratio of the maximum normal stress in the flange due to the shear lag to that of the elementary beam theory [6]. Previous researches not have the way to calculate a precise stress distribution that have the shear lag. And many researchers do not give their loading condition exactly [6].

In finite element models, a unique load in the beam theory can be applied in various ways [6]. In this study, load conditions that make local effects in the flange are neglected. For the concentrated load, two loading models shown in Figure 2 are adopted: Load C-1 is a concentrated load at the middle of the web, Load C-2 is a uniformly distributed load along the height of the web, Load D-1 is a uniformly distributed load along the centerline of the web and Load D-2 is a uniformly distributed load along the beam axis and the web height of every cross section [6]. Tenchev [1] is one of few researchers that provided loading condition and he used Load C-2 and Load D-1 for his concentrated and distributed load [1].

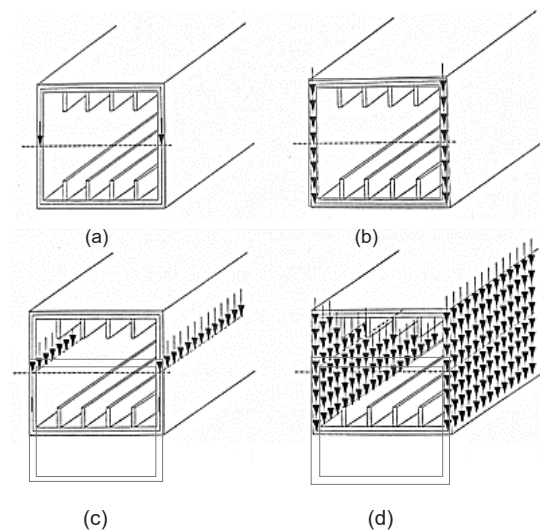


Figure 2 Concentrated load (a) Load C-1, (b) Load C-2; Distributed load (c) Load D-1, (d) Load D-2

3. STRESS EVALUATION

The finite element model is analyzed by finite element method, shell elements are used. The analysis results of finite element mesh are more powerful. The number of elements in Figure 3 are 4,288, 17,152, 68,608, and 274,432 for mesh A to mesh D, respectively.

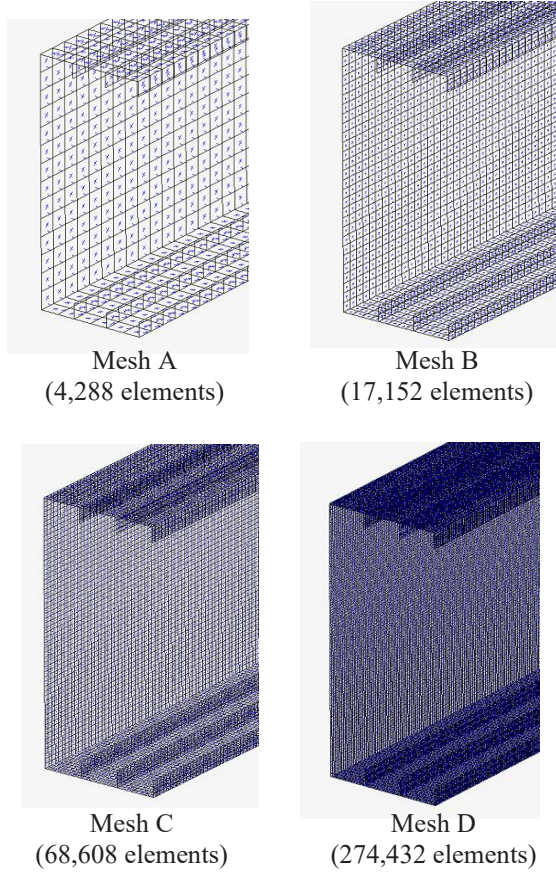


Figure 3 Finite element meshes

The previous study is to learn about the effect of element mesh. Figure 4 shows the normal stress distributions in upper flange at the mid span of steel box girder. In this Figure 4, σ_{FEM} is the normal stress from finite element analysis and σ_{beam} is the normal stress from the elementary beam theory and constant value. This is the result of box girder ($H/L = 0.05$, $B/H = 0.4$, $T_f/T_w = 1.3$, $A_s/A_f = 0.3$) under Load C-2 by four meshes, mesh A to mesh D.

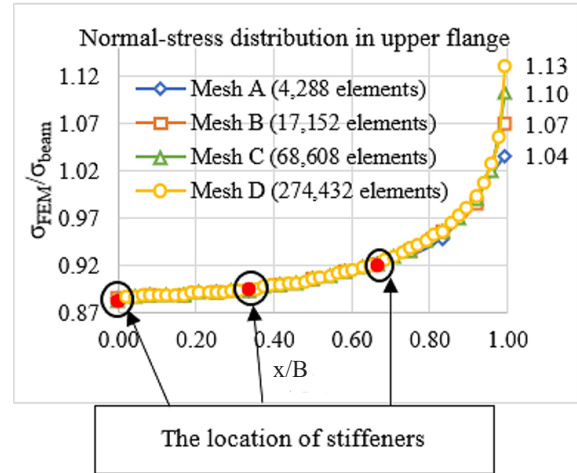


Figure 4 Normal stress distributions in the upper flange

Figure 5 shows the variation of the normal stress in the flange with respect to a representative element size Δ . It is observed that the four lines in the graph become almost straight for small Δ . The linear extrapolation shown by the dotted lines in the graph can be used to estimate the converged stress. “This extrapolation method is called the multimesh extrapolation method” by Cook et al. [2]. Importantly, the four lines in Figure 5 are almost straight, which is in accordance with the description of Cook et al. [2].

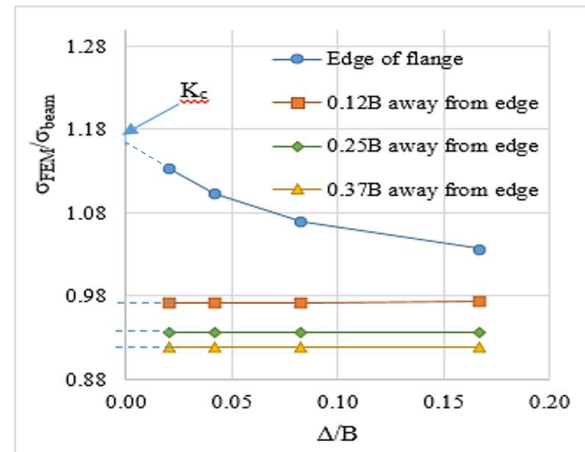


Figure 5 Variation of normal stress with respect to representative element size

4. PARAMETRIC STUDY

Stress concentration factor, K_c stands for the ratio of the maximum normal stress, $\sigma_{max,FEM}$, which is calculated by finite element analysis to the elementary beam theory stress, σ_{beam} . Figure 6 shows the normal stress distribution in the

upper flange at the mid span of simply supported beam with $B/H = 1.0$, $H/L = 0.2$ and $T_f/T_w = 2.5$ is presented in Figure 6. K_c increases with the increase of A_s/A_f . Cross sectional area of stiffener, A_s is equal to area of one stiffener multiplied by no. of stiffeners ($t_s \times d_s \times \text{no. of stiffeners}$) and cross sectional area of flange, A_f is equal to two multiplied by area of flange ($2 \times (2B + t_w) \times t_f$).

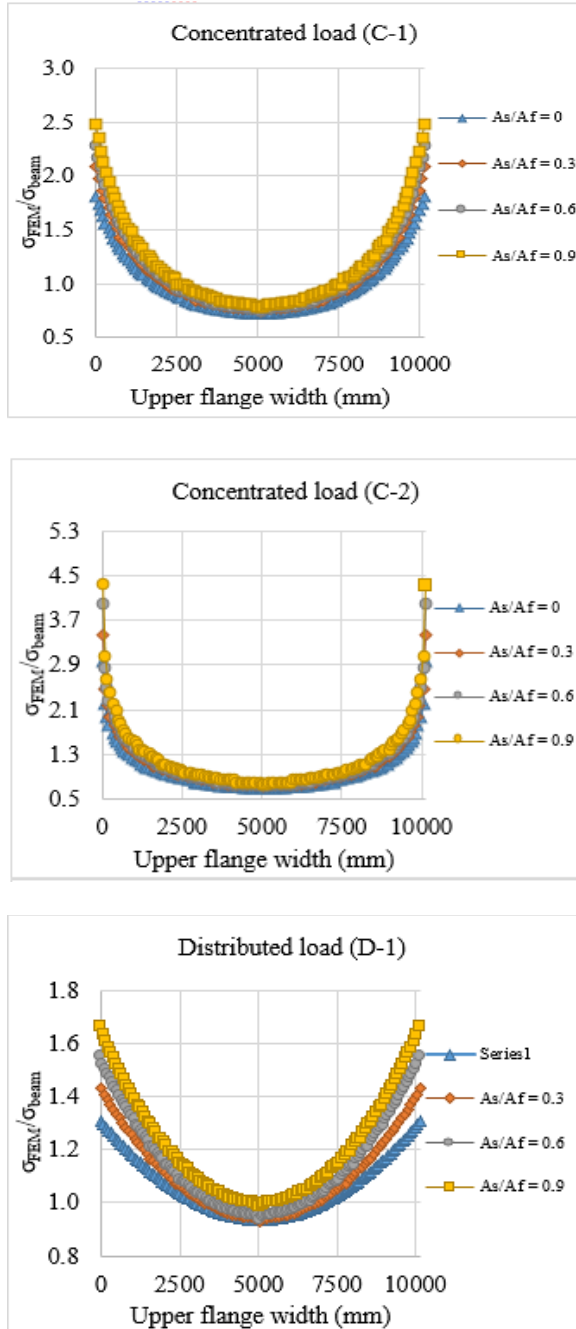


Figure 6 The normal stress distribution in the upper flange at the mid span of simply supported beam

The shear lag effect on simply supported box girder with longitudinal stiffeners depends on five factors:

- Type of loading
- Half flange width/height of web ratio of the girder (B/H)
- Height of web/span length ratio of the girder (H/L)
- Thickness of flange/web ratio of the girder (T_f/T_w)
- Cross sectional area of the stiffeners/area of the flange ratio of the girder (A_s/A_f)

5. FINITE ELEMENT ANALYSIS

For the FEM model, the structural is modeled by using three-dimensional 4-node shell elements. It is noted that due to symmetry only a quarter of the box girder is analyzed as shown in Figure 7. The elasticity modulus of box girder materials is $E = 2.06 \times 10^5$ MPa and Poisson's ratio is equal to 0.3. In finite element model of a quarter of the box girder, the general rule for a symmetry displacement condition is that the displacement vector component perpendicular to the plane is zero and the rotational vector components parallel to the plane are zero. For an anti-symmetry condition, the reverse conditions are applied (displacements in the plane are zero; the rotation normal to the plane is zero) [7].

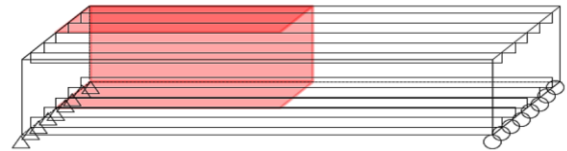


Figure 7 A quarter of box girder

6. Effect of geometric properties

This study uses AASHTO Standard for design initial dimension of steel box girder as shown in Figure 8. The initial proportions are $H/L = 0.05$, $B/H = 0.4$, $t_f/t_w = 1.3$, and $A_s/A_f = 0.3$. From the initial proportions can vary the proportion, and the following values are considered: $H/L = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$; $B/H = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$; $t_f/t_w = 1.3, 1.9, 2.5$. The longitudinal stiffeners in a beam are considered: $A_s/A_f = 0, 0.3, 0.6, 0.9$ in which A_s is total area of stiffeners on each flange and A_f is area of the flange. And the values of H , t_f , t_s , and d_s are fixed equal to 2,027 mm, 12 mm, 12 mm, and 120 mm respectively. The combination of all these values results in 192 models different from each other in geometry.

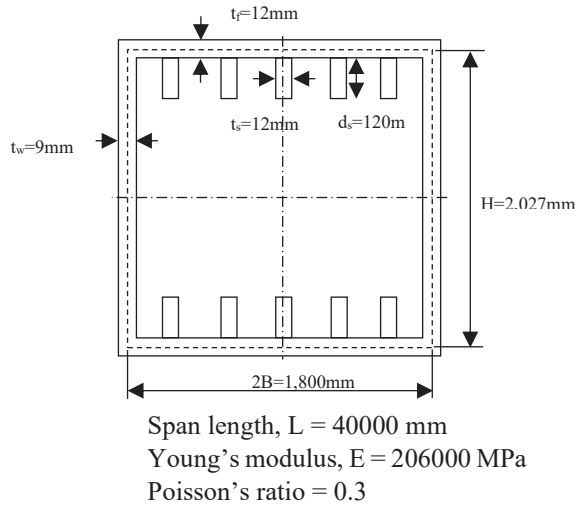


Figure 8 Cross section and geometric properties

Figure 9 shows K_c for the cross section of $A_s/A_f = 0.9$, $t_f/t_w = 1.3$, 1.9 , 2.5 under Load C-1 and Load C-2. Load C-2 makes larger K_c than Load C-1 constantly. K_c value under Load D-1 and Load D-2 are not hardly different, but K_c value under Load D-1 is quite more than that of Load D-2. For distributed load, Load D-1 is used to study. The shear lag phenomenon associated with a wide flange, it is expected that K_c value becomes larger as H/L increase.

(a) $A_s/A_f = 0.9$, $t_f/t_w = 1.3$

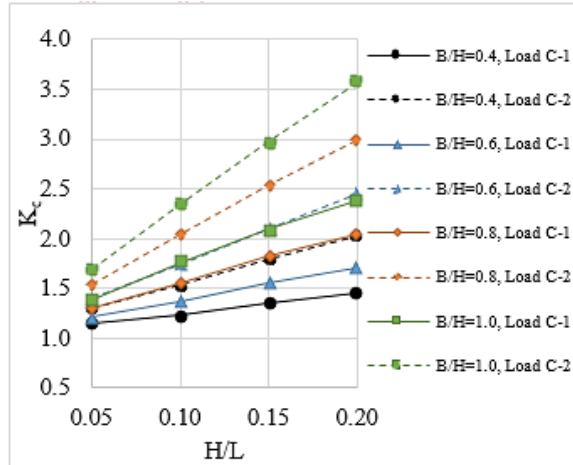
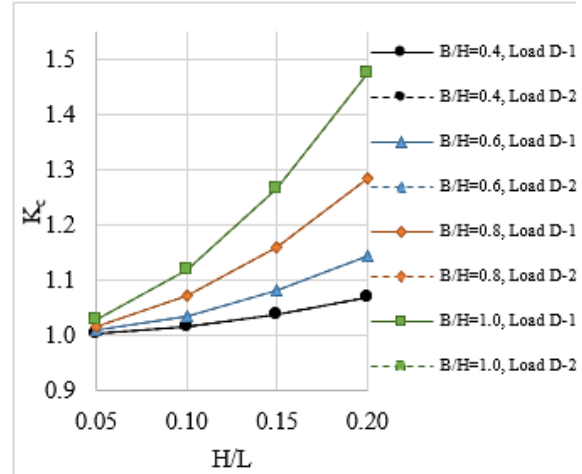
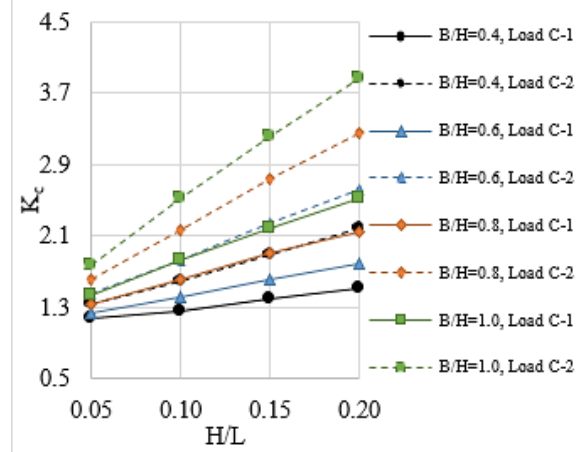


Figure 9 Variation of K_c with respect to H/L



(b) $A_s/A_f = 0.9$, $t_f/t_w = 1.9$



(c) $A_s/A_f = 0.9$, $t_f/t_w = 2.5$

Figure 9 (Cont.) Variation of K_c with respect to H/L

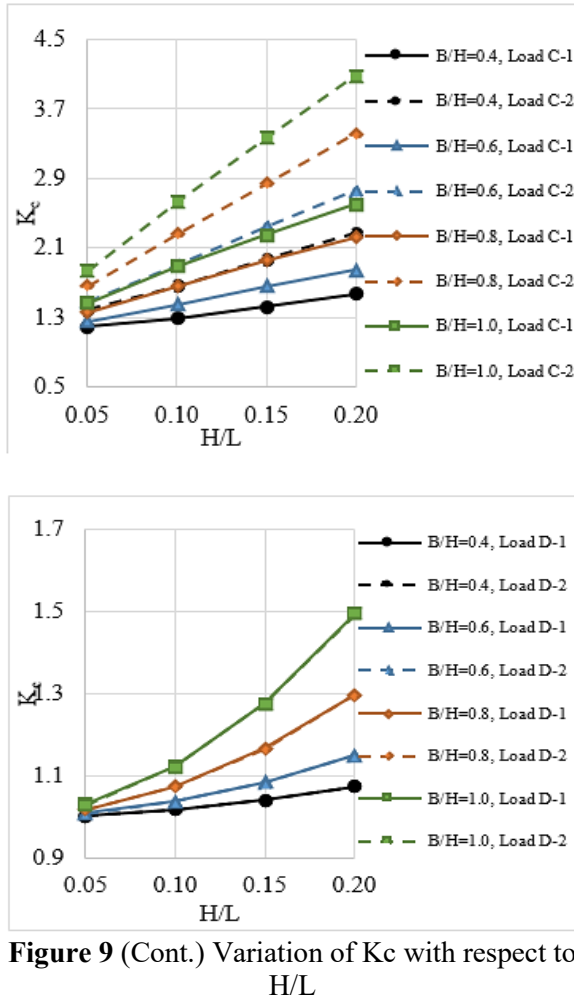
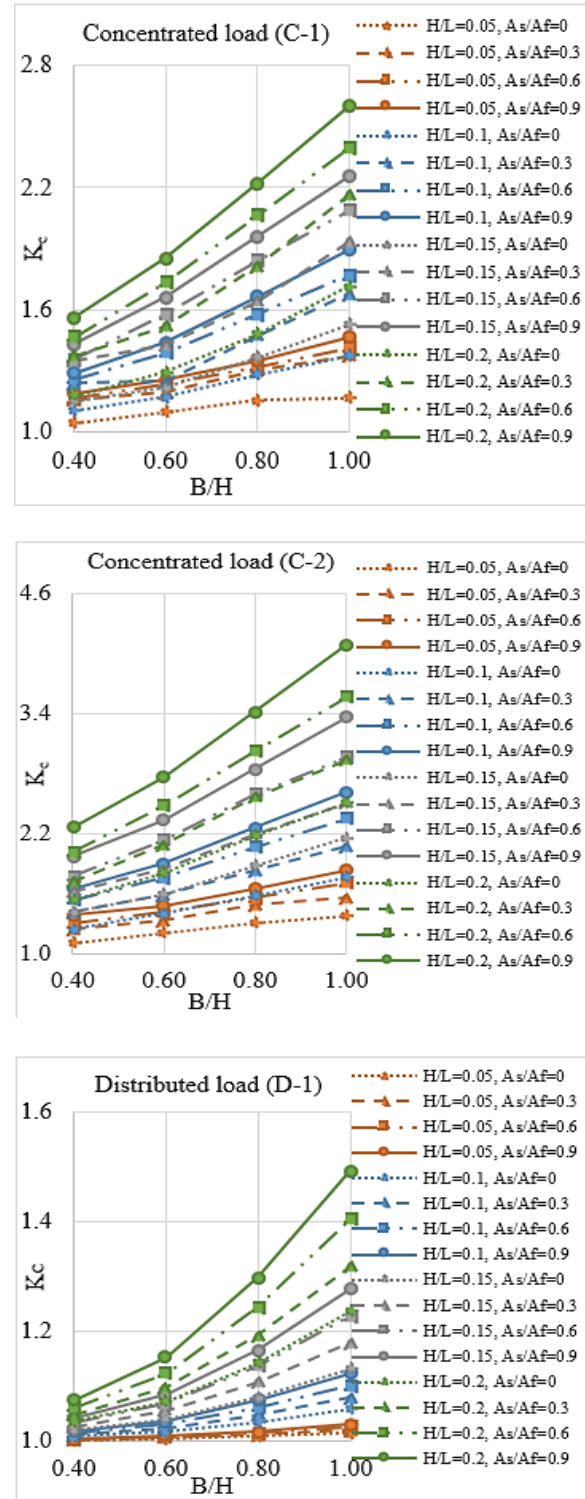


Figure 9, 10, 11 and 12 show some more characteristic results of K_c and may be summarized as follow:

1. K_c grows with increase of H/L .
2. H/L on K_c is small for B/H equal to 0.4 under Load C-1 and Load D-1.
3. B/H has considerable influence on K_c : as B/H become larger, K_c increase in general.
4. B/H on K_c is small for H/L equal to 0.05 under Load C-1, Load C-2 and Load D-1.
5. K_c grows with the increase of t_f/t_w for large H/L .
6. K_c grows with the increase of A_s/A_f for large H/L .



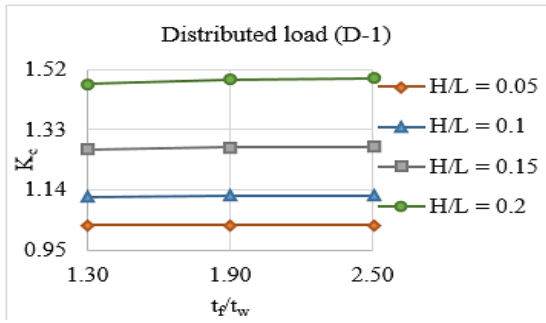
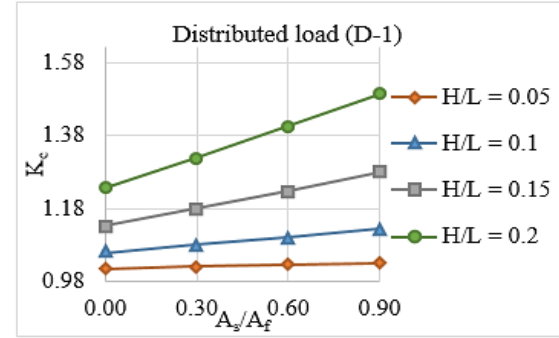
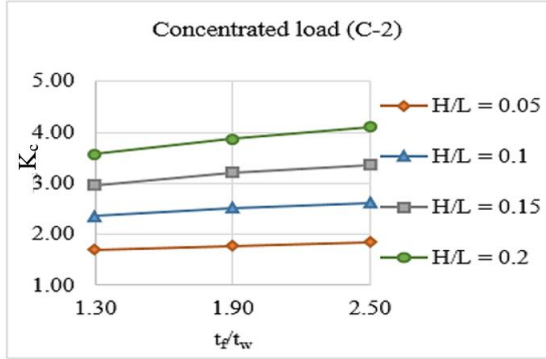
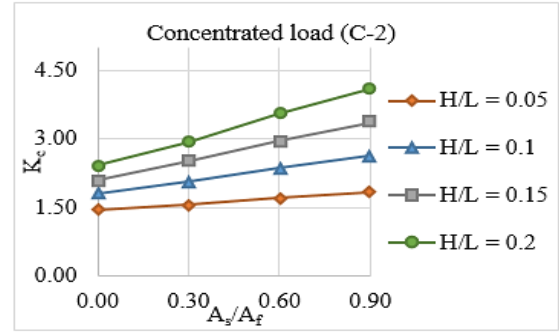
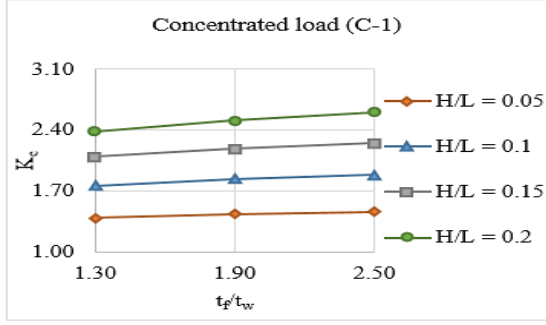


Figure 11 Variation of K_c with respect to t_f/t_w ($B/H=1.0$, $A_s/A_f=0.9$)

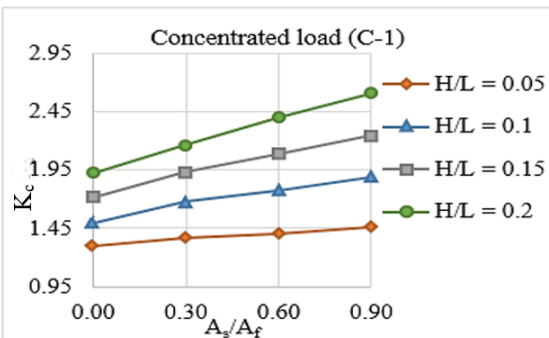


Figure 12 Variation of K_c with respect to A_s/A_f ($B/H=1.0$, $t_f/t_w=2.5$)

Figure 12 (Cont.) Variation of K_c with respect to A_s/A_f ($B/H=1.0$, $t_f/t_w=2.5$)

7. EMPIRICAL FORMULAS

For the discussion in the first section [6], the numerical results give the below formulas:

Concentrated load (Load C-1):

$$K_c = \phi \times a_1 \times \left(\frac{H}{L}\right) + 1 \quad (2)$$

Where

$$\phi = \left(1 + \frac{A_s}{A_f}\right)^{1.1}$$

$$a_1 = b_1 \times \left(\frac{B}{H}\right)^{c_1}$$

$$b_1 = 0.832 \times \ln\left(\frac{t_f}{t_w}\right) + 2.77$$

$$c_1 = -0.034 \times \ln\left(\frac{t_f}{t_w}\right) + 1.744$$

Concentrated load (Load C-2):

$$K_c = \phi \times a_2 \times \left(\frac{H}{L}\right) + 1 \quad (3)$$

Where

$$\phi = \left(1 + \frac{A_s}{A_f}\right)^{1.2}$$

$$a_2 = b_2 \times \left(\frac{B}{H}\right)^{c_2}$$

$$b_2 = 1.756 \times \ln\left(\frac{t_f}{t_w}\right) + 6.101$$

$$c_2 = 0.053 \times \ln\left(\frac{t_f}{t_w}\right) + 1.202$$

Distributed load (Load D-1):

$$K_c = \emptyset \times a_3 \times \left(\frac{H}{L}\right)^2 + 1 \quad (4)$$

Where

$$\emptyset = \left(1 + \frac{A_s}{A_f}\right)^{1.15}$$

$$a_3 = b_3 \times \left(\frac{B}{H}\right)^{c_3}$$

$$b_3 = 1.225 \times \ln\left(\frac{t_f}{t_w}\right) - 0.494 \left(\frac{t_f}{t_w}\right) + 6.001$$

$$c_3 = -0.041 \times \ln\left(\frac{t_f}{t_w}\right) - 0.006 \left(\frac{t_f}{t_w}\right) + 2.371$$

It is noted that the above formulas are applicable for $0.05 \leq \frac{H}{L} \leq 0.2$, $0.4 \leq \frac{B}{H} \leq 1.0$, $1.3 \leq \frac{t_f}{t_w} \leq 2.5$ and $0 \leq \frac{A_s}{A_f} \leq 1.0$.

7.1 Accuracy of the proposed formulas

Figure 13 shows K_c established by the proposed formulas of Eq. (2), Eq. (3) and Eq. (4) with the FEA results. To find the accuracy, the percentage error of the stress concentration factor calculated from this formula [1]:

$$\varepsilon_i = \frac{K_{cEmp} - K_{cFEA}}{K_{cFEA}} \times 100(\%) \quad (5)$$

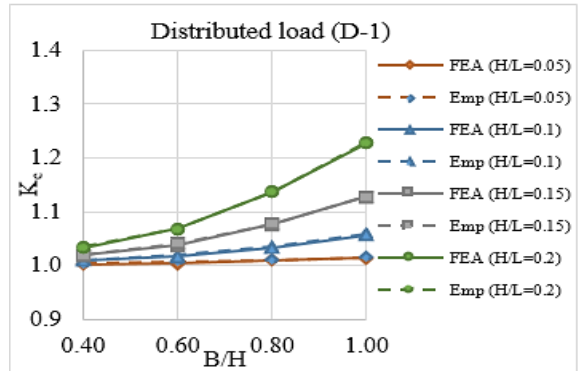
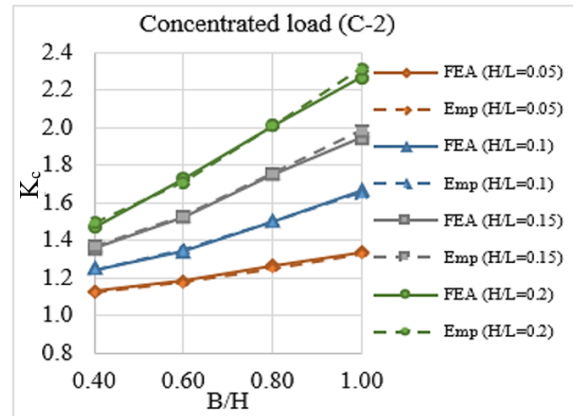
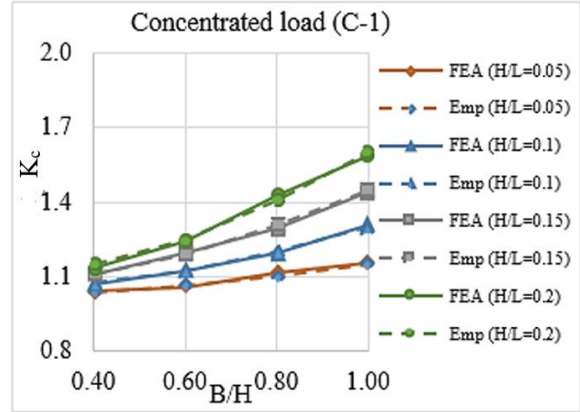
Where K_{cEmp} and K_{cFEA} are the K_c values obtained by the proposed formulas and the present finite element analysis, respectively [6]. The accuracy of the proposed formula for each loading condition is calculated as mean square error by the following equation [1]:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2} \quad (6)$$

Where ε_i is the error computed by Eq. (5) for a present finite element result and N is the number of the present finite element results for a loading condition [1]. N in Eq. (6) is equal 192. Using Eq. (6), the mean square error is 1.92% for Load C-1, 2.84% for Load C-2 and 1.41% for Load D-1.

Figure 13 shows K_c due to proposed formulas and finite element analysis for the cross section of $t_f/t_w = 1.3$ and $A_s/A_f = 0, 0.9$ under Load C-1, Load C-2 and Load D-1.

(a) $t_f/t_w = 1.3$ and $A_s/A_f = 0$



(b) $t_f/t_w = 1.3$ and $A_s/A_f = 0.9$

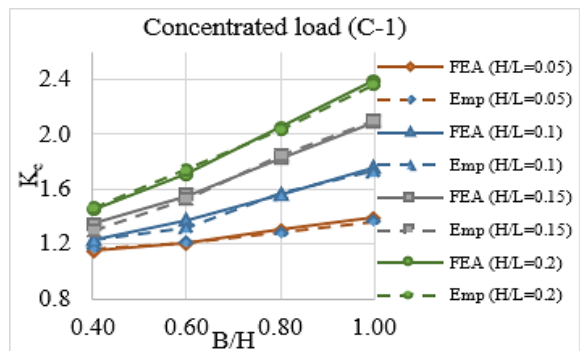


Figure 13 K_c due to proposed formulas and finite element analysis

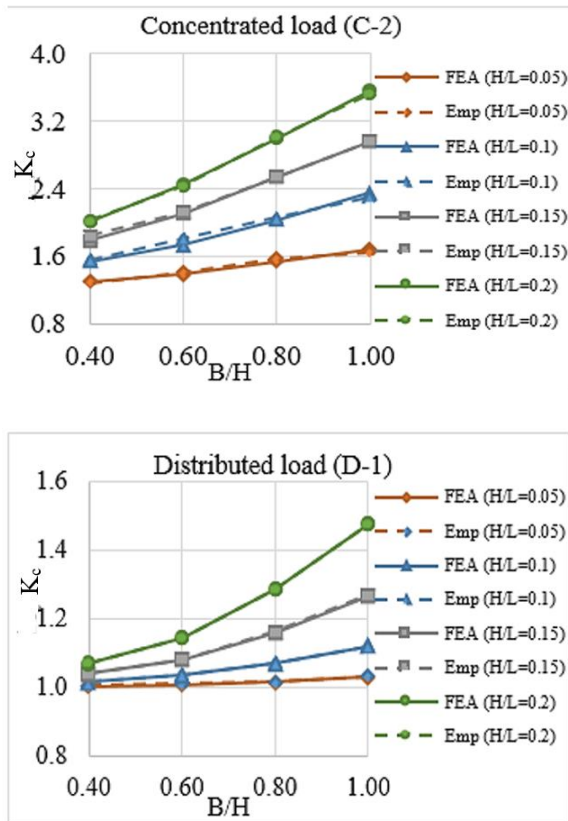


Figure 13 (Cont.) K_c due to proposed formulas and finite element analysis

8. CONCLUSIONS

Three-dimensional finite element analysis of steel box girder with longitudinal stiffeners is operated to show the shear lag effect. The stress concentration factor, K_c is used to determine the shear lag effect on stress concentration. Shell elements are used for all models. Concentrated load and distributed load are employed to various cross-sections of steel box girders. The results show that the stress concentration factor increases with the increase of proportions of geometric properties. From the numerical results, the empirical formulas are proposed to calculate the stress concentration factors. And it is verified that the results of proposed formulas are similar to the present finite element results.

For future study, it is recommended that the study of stress concentration due to shear lag of steel box girder with longitudinal stiffeners should be compared with data from actual steel box girder sample.

REFERENCES

- [1] Tenchev, R.T. Shear Lag in Orthotropic Beam Flanges and Plates with Stiffeners. *International Journal of Solids and Structures*, 1996; 33(9): 1317-1334.
- [2] Cook, R.D. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [3] Moffatt, K.R., and Dowling, P.J. Shear Lag in Steel Box Girder Bridges. *Engineering Structures*. 1975; 53(10): 439-448.
- [4] AASHTO. LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation officials, Washington, DC, 2010.
- [5] MARC Analysis Research Corporation. MARC Manuals Vol. A-D, Rev. K.6. Palo Alto, Calif, USA, 2016.
- [6] Yamaguchi, E., Chaisomphob, T. and Sa-nguanmanasak, J. Stress Concentration and Deflection of Simply Supported Box Girder Including Shear Lag Effect. *Structural Engineering and Mechanics*, 2008; 28(2): 207-220.
- [7] Tech Tips. SolidWorks Express. How to use symmetry and anti-symmetry boundary conditions. 2006; 1-3.



การปรับปรุงวิธีการเรียงลำดับข้อมูลในภาพคิวอาร์โค้ด โดยใช้เทคนิค EVM สำหรับของการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ Improved Sorting in QR Code images Using EVM technique for Reversible Data Hiding

ชัยพร ปานยืนดี ชีรนัย ลีลาวีวัฒน์ และ ภัทรวดี รังสิริรักษ์

Chaiyaporn Panyindee, Teranai Leelawiwat and Pattarawadee Rangsirak

สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin (RMUTR), Nakhon Pathom, 73170, Thailand

E-mail: chaiyaporn.pan@gmail.com, Chaiyaporn.pan@rmutr.ac.th

Telephone Number: +662-889-4585-7, fax: +662-889-4585-7

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอหนึ่งการปรับปรุงวิธีการเรียงลำดับข้อมูลในภาพคิวอาร์โค้ดโดยประยุกต์ใช้เทคนิค EVM เพื่อเรียงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่สอดคล้องก่อนการฝัง ลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายถูกคำนวณใหม่ และใช้แทนที่ค่าความแปรปรวนดั้งเดิม ซึ่งคำนวณได้จากสี่พิกเซลข้างเคียง เพื่อให้ได้รับค่า PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ ค่าความแปรปรวนใหม่สามารถขยายระดับของพื้นที่พิกเซลได้สูงสุด 30 ระดับ สำหรับ 40 ภาพคิวอาร์โค้ดที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นการเรียงลำดับที่มีประสิทธิภาพกว่างานในอดีตก่อนหน้านี้ โดยเฉพาะการฝังข้อมูลขนาดเล็ก

คำสำคัญ: ความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย การฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ คิวอาร์โค้ด EVM

ABSTRACT

This paper presents an improvement of the data sorting method for reversible data hiding in QR code images by applying an EVM technique to sort the prediction error values before embedding. The order of the predicted error values was recalculated and is replaced the original local variance, which was calculated from the four neighboring pixels to get the maximum possible PSNR value. The new variance can extend the level of the pixel area to a maximum of 30 levels with 40 versions of the QR code images that is used for testing. The results showed a more efficient sorting over previous methods, especially small data embedding.

Keywords: prediction error; reversible data hiding; QR code; EVM

1. บทนำ

การฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ (Reversible Data Hiding: RDH) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายงาน เช่น การฝังข้อมูลที่ไม่ต้องการเปิดเผยในภาพทางการแพทย์ การเข้ารหัสลับสำหรับภาพทางการแพทย์ เป็นต้น ในปัจจุบันภาพคิวอาร์โค้ดได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายใน

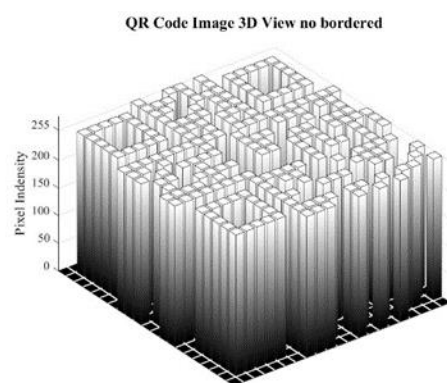
หลายธุรกิจ เนื่องจากประสิทธิภาพที่สูง ต้นทุนต่ำ สามารถเข้าถึงได้ง่าย และยังคงใส่ข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก จึงเป็นที่นิยม อย่างไรก็ตาม ข้อมูลบางประเภทยังคงต้องการความเป็นส่วนตัว เช่น เลขที่ธุรกรรม วันเดือนปีเกิด เลขประจำตัวประชาชน จึงต้องอาศัยวิธีการที่สามารถป้องกัน

การเข้าถึงข้อมูลในส่วนที่ไม่ต้องการเปิดเผย แต่ยังคงให้ภาพควอาร์โค้ดที่สามารถเข้าถึงข้อมูลปกติได้

RDH เป็นหนึ่งแขนงงานของการฝังลายน้ำ (Watermarking) ที่ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง มีนักวิจัยจำนวนมากนำเสนอวิธีการใหม่ ๆ สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของการฝังข้อมูลโดยที่ยังคงสามารถกู้คืนข้อมูลต้นฉบับกลับได้ทั้งหมดแบบไม่สูญเสีย หนึ่งในวิธีการที่ถูกกล่าวขานอย่างยาวนานคือ Difference Expansion (DE) [1] ซึ่งถูกนำเสนอโดย Tian เทคนิคของพวกเขากถูกปรับปรุงในหลายแง่มุม เช่น Thodi และ Rodriguez นำเสนอกระบวนการที่มีชื่อว่า Prediction Error Expansion (PEE) [2] โดยผู้เขียนใช้ค่าการทำนายแทนที่ค่าความแตกต่าง กระบวนการของผู้เขียนช่วยลดความบิดเบือนอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับตัวทำนายรูปแบบใหม่ จึงถูกต่อขยายในอีกหลายงานวิจัย Thodi และ Rodriguez ได้นำเสนออีกหนึ่งการปรับปรุงที่สำคัญ ซึ่งมีผลต่องานยุคสมัยใหม่ คือ Histogram Shift (HS) [3] HS ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาการซ้อนทับกันของพิกเซลหลังการฝังโดยใช้เทคนิค PEE เดิม ผู้วิจัยเรียกเทคนิคนี้ว่า PEHS เทคนิคดังกล่าวช่วยให้ขนาดของพื้นที่แมป (location map) เล็กลง หนึ่งในปัญหาใหญ่ของ RDH คือขนาดของพื้นที่แมปมักมีขนาดใหญ่ เนื่องจากพื้นที่แมปต้องถูกฝังไปพร้อมกับข้อมูลเพื่อใช้ในการกู้คืนกลับ ดังนั้น หากลดขนาดของพื้นที่แมปลงได้ พื้นที่ในการฝังจะสูงขึ้น มีหลายเทคนิค [4]-[5] สามารถลดขนาดของพื้นที่แมปได้ อย่างมีนัยสำคัญ หนึ่งในกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพคือการใช้เทคนิคการเรียงลำดับข้อมูล (Data Sorting: DS) [6] DS สำหรับงาน RDH ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Kamstra และ Heijmans ผู้วิจัยเรียงลำดับข้อมูลสำหรับการฝัง โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์จากพิกเซลข้างเคียงสี่ตำแหน่ง แนวคิดของการเรียงลำดับข้อมูลก่อนการฝังถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [7]-[9]

ในปี ค.ศ.2017 Pandeyindee และคณะ [10] นำเสนอการใช้หลายเทคนิคสำหรับหนึ่งขั้นตอนวิธี RDH ร่วมกับการปรับภาพแบบเชิงเส้นสำหรับภาพควอาร์โค้ด

ในหลายเวอร์ชัน วิธีการของพวกเขาบรรลุการฝังขนาดใหญ่ในขณะที่ความบิดเบือนต่ำเมื่อเทียบกับงานก่อนหน้า [11] หนึ่งในปัญหาสำคัญสำหรับการจัดเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้เพียงสี่พิกเซลข้างเคียงในภาพควอาร์โค้ด สังเกตจากรูปที่ 1 พบว่า ภาพควอาร์โค้ดมีลักษณะของพิกเซลคล้ายคลึงกับสัญญาณรบกวน กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของพิกเซลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เช่น จาก 255 เป็น 0 ซึ่งการใช้ค่าความแปรปรวนจาก 4 ตำแหน่งข้างเคียงไม่เพียงพอเพื่อให้ได้การเรียงลำดับข้อมูลที่ต้องการ



รูปที่ 1 ภาพ QR Code ในมุมมองพิกเซลสามมิติ

งานวิจัยนี้แนะนำเสนอหนึ่งการปรับปรุงสำหรับเทคนิคการเรียงลำดับข้อมูลโดยประยุกต์ใช้ Expand Variance Means (EVM) ร่วมกับหลายเทคนิค อาทิ Histogram Shift, การทำนายโดยใช้ Rhombus, การฝังแบบดับเบิล (Double Embedding Scheme) และการปรับภาพโดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น (WL) การคำนวณค่า EVM ใหม่ ในแต่ละการฝังถูกเพิ่มขอบเขตจนได้รับค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ค่า PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ การเรียงลำดับข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีค่าต่ำควรถูกเรียงขึ้นก่อนค่าที่มีค่าสูงตามค่า EVM เมื่อฝังข้อมูลโดยใช้ HS ความบิดเบือนที่ได้รับจะต่ำตามค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่มีขนาดเล็ก ในทางเดียวกัน เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดเล็กยังคงช่วยลดปัญหา Overflow หรือในอีกความหมายหนึ่ง

ขนาดของพื้นที่ที่สามารถฝังได้สูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่ที่แมปมีขนาดเล็กลง

รายละเอียดส่วนอื่น ๆ ของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้ ส่วนที่ 2 อธิบายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 อธิบายขั้นตอนวิธีที่นำเสนอ ส่วนที่ 4 อธิบายผลการทดลอง และ ส่วนที่ 5 สรุปผลการทดลอง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเรียงลำดับข้อมูลของ RDH

Kamstra และ Heijmans [6] นำเสนอหนึ่งเทคนิคสำหรับการเรียงลำดับข้อมูล วิธีการของพวกเขารเรียงลำดับของกลุ่มพิกเซลตามค่าสหสัมพันธ์ของพิกเซลข้างเคียง งานของพวกเขารระบุประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมในการลดขนาดของพื้นที่ที่แมป อย่างไรก็ตาม การเรียงลำดับใหม่มยังคงอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการ DE ดั้งเดิม ซึ่งสามารถฝังข้อมูลสูงสุดได้เพียง 0-5 bpp Sachnev และคณะ [7] ปรับปรุงกระบวนการโดยนำเสนอการฝังแบบดับเบิล กล่าวคือ ฝังในโครสแฮด และคอตแฮดซึ่งอิสระต่อกัน และใช้ประโยชน์จากสี่ตำแหน่งข้างเคียงในการคำนวณค่าความแปรปรวน (Local Variance: LV) ดังนี้

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\Delta v_k - \Delta \bar{v}_k)^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } \Delta v_1 &= |v_{i,j-1} - v_{i-1,j}|, \Delta v_2 = |v_{i-1,j} - v_{i,j+1}|, \\ \Delta v_3 &= |v_{i,j+1} - v_{i+1,j}|, \Delta v_4 = |v_{i+1,j} - v_{i,j-1}|, \\ \Delta \bar{v}_k &= (\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3 + \Delta v_4) / 4 \end{aligned}$$

Δv_1 คือค่าสมบูรณ์ของผลต่างของสองพิกเซลข้างเคียง $v_{i,j-1}$ และ $v_{i-1,j}$, Δv_2 คือค่าสมบูรณ์ของผลต่างของสองพิกเซลข้างเคียง $v_{i-1,j}$ และ $v_{i,j+1}$, Δv_3 คือค่าสมบูรณ์ของผลต่างของสองพิกเซลข้างเคียง $v_{i,j+1}$ และ $v_{i+1,j}$, Δv_4 คือค่าสมบูรณ์ของผลต่างของสองพิกเซลข้างเคียง $v_{i+1,j}$ และ $v_{i,j-1}$ $\Delta \bar{v}_k$ คือค่าเฉลี่ยของ Δv_1 , Δv_2 , Δv_3 และ Δv_4 การเรียงลำดับของพวกเขามีประสิทธิภาพสูง

อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย และ LV ใช้ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งไม่กระทบต่อการฝังในโครสแฮด และคอตแฮด อย่างไรก็ตาม หนึ่งปัญหาสำหรับภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบจับพลัน เช่น ภาพ Baboon Barbara เป็นต้น การใช้สี่ตำแหน่งข้างเคียงสำหรับคำนวณค่า LV ไม่เพียงพอ เพื่อให้ได้ลำดับการเรียงที่ถูกต้อง Kotvicha และคณะ [9] นำเสนอเทคนิค EVM เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยขยายพิกเซลสำหรับคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า LV เดิม ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\bar{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\sum_{l=-\frac{ex}{2}}^{\frac{ex}{2}} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\frac{ex}{2}} \sum_{l=-\frac{ex}{2}}^{\frac{ex}{2}-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l})}{\frac{ex^2}{2} + ex + 1} \quad (2)$$

$$\bar{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\sum_{l=-\frac{ex-1}{2}}^{\frac{ex-1}{2}} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\frac{ex-1}{2}} \sum_{l=-\frac{ex-1}{2}}^{\frac{ex-1}{2}-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l})}{\frac{ex^2}{2} + 2ex - \frac{3}{2}} \quad (3)$$

งานของพวกเขาก็ให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจสำหรับขนาดพื้นที่ที่แมปที่ลดลง อย่างไรก็ตาม การขยายพื้นที่พิกเซลสำหรับคำนวณค่าการเรียงลำดับ EVM (ดูรูปที่ 2 (ก) ด้านซ้ายมือ) ใหม่ทุกครั้ง ส่งผลโดยตรงต่อเวลาในการประมวลผลที่สูงขึ้นตามการขยายในแต่ละครั้ง ดังกล่าวพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการขยายออกมกอยู่ใกล้ ๆ ตำแหน่งศูนย์กลางการทำนาย ดังนั้น การขยายพื้นที่ออกไปไกลมาก ๆ เป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น

3. วิธีการนำเสนอ

การเรียงลำดับพิกเซลยังคงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ RDH พิกเซลที่ไม่ถูกเรียงมีโอกาสนำให้เกิดปัญหา Overflow และ Underflow สูงกว่าพิกเซลที่มีการเรียงลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาพที่มีความแปรปรวนสูง เช่น ภาพควอเตอร์โค้ด (ดูรูปที่ 2 (ก) ด้านซ้ายมือ) ข้อเท็จจริง

บางประการของแนวคิดการเรียงลำดับข้อมูลพบว่า พิกเซลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายต่ำ เมื่อทำการฝังข้อมูลลงในพิกเซลเหล่านั้นโดยใช้ HS จะมีค่าความผิดพลาดที่ต่ำตามค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายนั้น ในทางกลับกัน พิกเซลที่ไม่ถูกเรียงลำดับ หรือ พิกเซลที่มีบางค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสูงถูกฝังก่อน (ดูรูปที่ 2 (ก) ด้านขวามือ) จะมีค่าความผิดพลาดที่สูง และมีโอกาสเกิดปัญหา Overflow และ Underflow ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งตัวอย่างสำหรับการฝังโดยใช้ HS

กรณี $d = 0$ เมื่อ $u' = 200$, $b = 1$, $T_p = 1$

$$U = 2d + b + u' = 2(0) + 1 + 200 = 201$$

กรณี $d = 2$ เมื่อ $u' = 200$, $b = 1$, $T_p = 1$

$$U = 2d + b + u' = 2(2) + 1 + 200 = 205$$

สังเกต การฝังข้อมูลลงใน $d = 0$ ให้ความบิดเบือนที่ต่ำกว่า $d = 2$ ที่ 4 ระดับ ดังนั้น การเรียงลำดับพิกเซลที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งที่ต้องการ

หนึ่งปัญหาสำคัญของการเรียงลำดับที่ใช้บริเวณพิกเซลข้างเคียงของภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว สำหรับคำนวณค่าความแปรปรวนที่สอดคล้อง สังเกตว่าลำดับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายเรียงผิดพลาด (ดูรูปที่ 2 (ข) ด้านขวามือที่มีวงประสีแดง) ในหลายตำแหน่ง พบได้ในงานวิจัยก่อนหน้า [10] ในบทความเดียวกัน ผู้เขียนได้นำเสนอหนึ่งขั้นตอนวิธี RDH ร่วมกับอีกหนึ่งกลยุทธ์ใหม่สำหรับการปรับปรุงภาพคิวอาร์โค้ดโดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น (WL) วิธีการของพวกเขามุ่งเน้นการแก้ปัญหาการฝังที่ก่อให้เกิด Overflow อย่างไรก็ตาม การเรียงลำดับข้อมูลโดยใช้ LV (ดูรูปที่ 2 (ข) ด้านซ้ายมือ) สำหรับภาพคิวอาร์โค้ด ยังคงให้ผลลัพธ์การทำนายที่ไม่ถูกต้อง สังเกตด้านขวามือในรูปเดียวกันพบบางค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายที่สูงอยู่ก่อนค่าที่ต่ำตามเส้นประสีแดง ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้ นำเสนอหนึ่งการปรับปรุงเทคนิคการเรียงลำดับ โดยประยุกต์ใช้เทคนิค EVM ร่วมกับ WL ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การฝังมีประสิทธิภาพสูงสุด การใช้งานสำหรับการคำนวณ ex ที่เป็นคู่ (even) และคี่ (odd) ในงานวิจัย [9] ดังสมการที่ (2) และ (3) ถูกเขียนใหม่โดยใช้สมการที่ (4)

เพื่อให้สมการกระชับขึ้น หนึ่งความแปรปรวนใหม่ตามรูปแบบขยาย EVM คำนวณได้ดังนี้

$$\bar{\mu}_{i,j}^{ex} = \frac{\sum_{l=-\lfloor ex/2 \rfloor}^{\lfloor ex/2 \rfloor} \mu_{i+l,j+l} + \sum_{k=1}^{\lfloor ex/2 \rfloor} \sum_{l=-\lfloor ex/2 \rfloor-2k}^{\lfloor ex/2 \rfloor-2k} (\mu_{i+l,j+l+2k} + \mu_{i+l+2k,j+l})}{2\lceil ex/2 \rceil^2 + 2\lceil ex/2 \rceil + 1 - 4(ex \bmod 2)} \quad (4)$$

โดยที่ ex คือ ลำดับของการขยายพิกเซลสำหรับคำนวณ EVM ใหม่

l คือ ความยาวของการขยายพิกเซลออกในแต่ละมาร์ก

k คือ จำนวนของระดับการขยายพิกเซล

ข้อเท็จจริงพบว่า การขยายระดับของ ex (ดูรูปที่ 2 (ค)) มีผลต่อการใช้จำนวนพิกเซลที่สูงขึ้นสำหรับการคำนวณ EVM ใหม่ การขยายระดับของ ex ออกไปเป็นสิ่งที่ดี แต่ในบางเวอร์ชันของภาพคิวอาร์โค้ด การขยาย ex ออกไปไกลมาก ๆ มักเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น ซึ่งไม่ได้ช่วยให้ค่า PSNR สูงขึ้น ดังนั้น ในงานนี้ 30 ระดับของ ex จึงถูกใช้ทดสอบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด รายละเอียดของขั้นตอนการฝัง และการกู้คืนอธิบายต่อไปในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

3.1 ขั้นตอนการฝังข้อมูล

1) นำภาพคิวอาร์โค้ดสีมาแยกเลเยอร์ทั้ง 3 ออกจากกัน (R, G, B)

2) แบ่งพิกเซลในแต่ละเลเยอร์ออกเป็น 2 เซต (คอสเซต และคอตเซต ตาม [9]) และปรับภาพด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W เริ่มจากค่าที่ 1 ตาม [10]

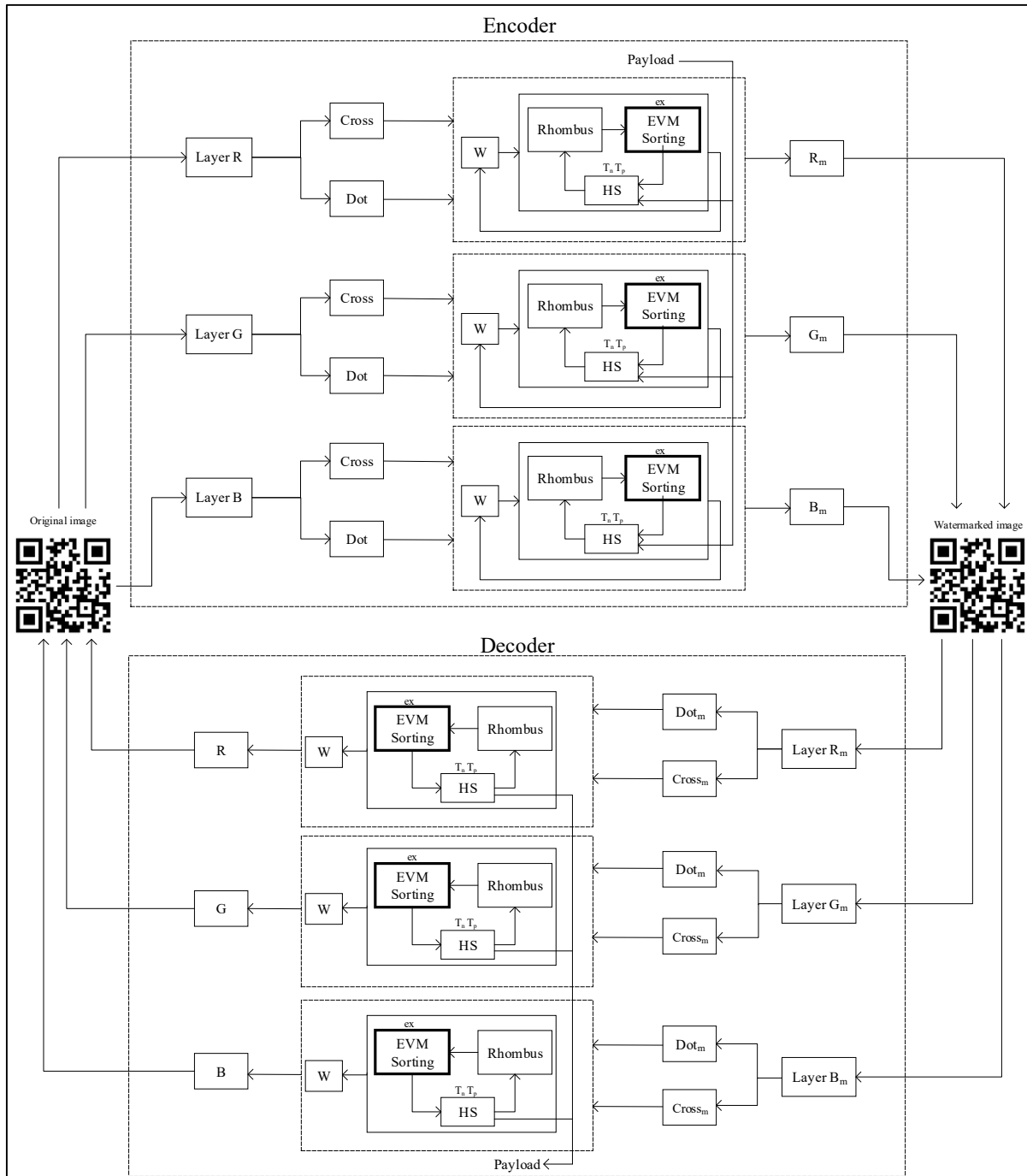
3) หาค่าการทำนาย u' , ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ และค่าความแปรปรวน μ ตาม [7]

4) เรียงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ โดยเรียงตามค่า EVM ใหม่ เริ่มจากค่าที่ 1

5) ใช้เทคนิค DMT ตาม [10] เพื่อตรวจสอบสถานะของทุกพิกเซลก่อนการฝัง

6) หาช่วงค่าขีดแบ่ง (T_n และ T_p) ที่เหมาะสมสำหรับการฝังข้อมูลโดยใช้เทคนิค HS ตาม [3]

70



รูปที่ 3 ไดอะแกรมกระบวนการฝังข้อมูล และกู้คืนข้อมูล

7) ทำซ้ำขั้นตอน 3-6 โดยเรียงลำดับค่าความกว้างของ EVM ขึ้นไปจนครบ 30 ระดับ

8) ปรับภาพด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W ค่าถัดไป และทำตามขั้นตอนที่ 4-10 จนถึงค่า W สุดท้าย

9) แยก LSB เสดเดอร์ขนาด 208 บิตสำหรับผู้รับ เพื่อให้สามารถกู้คืนต้นฉบับ และข้อมูลที่ฝังได้ ซึ่งประกอบไปด้วยเพย์โหลด 56 บิต, ค่าจัดแบ่ง (T_n และ T_p) 16 บิต และค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น 136 บิต

10) รวมเลขรหัสทั้ง 3 เฟรมที่ถูกส่งข้อมูลแล้ว (R_m , G_m , B_m) เข้าด้วยกัน เสร็จสิ้นขั้นตอนการส่งข้อมูลสำหรับครอสเซต ในคอตเซตทำเหมือนกันกับครอสเซตตามลำดับ

3.2 ขั้นตอนการกู้คืนข้อมูล และภาพต้นฉบับ

1) แยกเลขรหัสที่ถูกส่งข้อมูลทั้ง 3 ออกจากกัน (R_m , G_m , B_m)

2) แยกค่าเฮดเดอร์ขนาด 208 บิตที่กันไว้ก่อนหน้านี้สำหรับผู้รับของแต่ละเลขรหัสออกมา ซึ่งประกอบด้วยเพย์โหลดขนาด 56 บิต, ค่าจัดแบ่ง T_n และ T_p ขนาด 16 บิต และค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นที่ได้จากการประมวลผลเบื้องต้นขนาด 136 บิต

3) แบ่งพิกเซลของแต่ละเลขรหัสออกเป็น 2 เซตตามขั้นตอนการส่ง คำนวณค่าการทำนาย u' และค่า EVM โดยเรียงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ ตามค่า EVM

4) ตรวจสอบสถานะของพิกเซลโดยใช้ DMT และกู้คืนข้อมูล, กู้คืนค่าการทำนายคลาดเคลื่อน

5) นำภาพคิวอาร์โค้ดที่ได้กู้คืนปรับภาพด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก W เพื่อปรับค่าเฉลี่ยให้กลับเป็นค่าดั้งเดิม

6) รวมเลขรหัสดั้งเดิมทั้ง 3 เฟรม (R , G , B) เข้าด้วยกัน เสร็จสิ้นขั้นตอนการกู้คืนข้อมูล และภาพต้นฉบับ

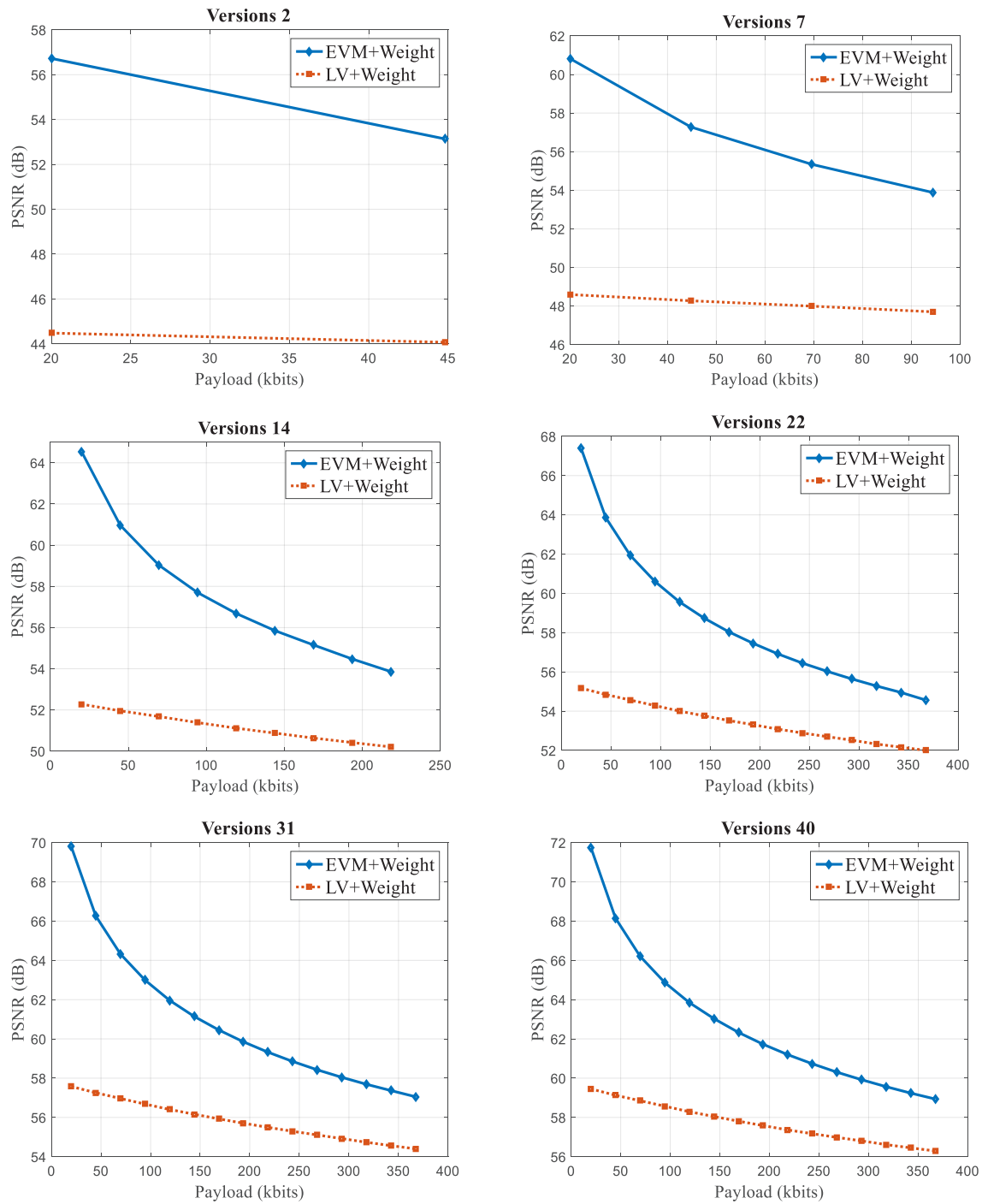
4. ผลการทดลอง

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอ ผู้วิจัยใช้ค่า PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) ในการวัดผลลัพธ์เปรียบเทียบกับงาน [10] ภาพคิวอาร์โค้ดทั้งหมดมีการตั้งค่ามาตรฐานการสร้าง

เช่นเดียวกับในก่อนหน้า ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเป็นบิตแบบสุ่ม ค่า WL ที่เหมาะสมถูกใช้ร่วมกับกระบวนการ RDH ที่ปรับปรุงประสิทธิภาพการเรียงลำดับ เพื่อให้ได้รับค่า PSNR สูงสุดที่เป็นไปได้ ในส่วนนี้ EVM ใหม่ถูกประยุกต์ใช้ ตาราง 1 แสดงประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอโดยส่งเพย์โหลดหลายขนาดกับการขยาย ex 1-30 ระดับกับภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 40 (เวอร์ชันสูงสุด ขนาดใหญ่สุด) สังเกตว่า ที่ปริมาณการส่งขนาดเล็ก (20 kbit) ให้ผลลัพธ์ PSNR ที่สูงกว่าการส่งขนาดใหญ่ (367.20 kbit) เฉลี่ยประมาณ 2 dB ในเกือบทุกการขยาย ระดับการขยายที่เหมาะสมมักสูงขึ้นตามขนาดของการส่งเนื่องจาก 2 ปัจจัย คือ ขนาดของภาพ และความแปรปรวนของพิกเซลภายในภาพ ในตารางที่ 2 สังเกตขนาดของการส่งที่ 367.20 kbits ภาพคิวอาร์โค้ดที่ส่งได้จะเริ่มต้นที่เวอร์ชัน 20-40 การขยาย ex ให้ผลลัพธ์ค่า PSNR ที่สูงกว่าแบบที่ไม่ได้ขยาย ในรูปที่ 6 สังเกตว่าที่เพย์โหลดขนาดเล็กให้ความบิดเบือนที่ต่ำมาก ในทางเดียวกันค่า PSNR ที่สูงตั้งแต่เริ่มต้นการส่งเมื่อเทียบกับ non- ex [10] กราฟค่า PSNR แสดงให้เห็นผลลัพธ์การบิดเบือนที่ต่ำกว่า หรือในอีกความหมายหนึ่งการเรียงลำดับข้อมูลโดยการขยายพิกเซลสำหรับการทำนายใหม่ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องเข้าใกล้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายสูงกว่าแบบที่ไม่มีการขยายพิกเซล พิกเซลที่มีการแปรปรวนสูง ๆ ในภาพให้การตอบสนองที่ดีมากสำหรับการประยุกต์ใช้ EVM ร่วมกับ WL ที่เหมาะสม ถึงแม้ว่าการคำนวณจะสูงขึ้น ค่า PSNR ที่ได้รับ และขนาดของการส่งที่ใหญ่ขึ้นเป็นสิ่งที่น่าพึงพอใจสำหรับการนำเสนอ

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การฝังข้อมูล ex 1-30 ของภาพ QR Code เวอร์ชัน 40

ex	Payload (kbits)							
	20.00		119.20		367.20		367.20	
	PSNR	Weight	PSNR	Weight	PSNR	Weight	PSNR	Weight
1	71.558	0.98431	63.792	0.98431	61.695	0.98431	58.918	0.97647
2	71.562	0.98431	63.816	0.98431	61.708	0.98431	58.916	0.97647
3	71.582	0.98431	63.817	0.98431	61.724	0.98431	58.925	0.97647
4	71.599	0.98431	63.816	0.98431	61.703	0.98431	58.919	0.97647
5	71.660	0.98431	63.822	0.98431	61.705	0.98431	58.922	0.97647
6	71.590	0.98431	63.821	0.98431	61.705	0.98431	58.913	0.97647
7	71.594	0.98431	63.830	0.98431	61.708	0.98431	58.919	0.97647
8	71.603	0.98431	63.821	0.98431	61.708	0.98431	58.920	0.97647
9	71.581	0.98431	63.825	0.98431	61.705	0.98431	58.921	0.97647
10	71.611	0.98431	63.822	0.98431	61.716	0.98431	58.930	0.97647
11	71.607	0.98431	63.826	0.98431	61.717	0.98431	58.926	0.97647
12	71.600	0.98431	63.831	0.98431	61.709	0.98431	58.932	0.97647
13	71.600	0.98431	63.828	0.98431	61.715	0.98431	58.927	0.97647
14	71.621	0.98431	63.823	0.98431	61.711	0.98431	58.919	0.97647
15	71.612	0.98431	63.847	0.98431	61.713	0.98431	58.927	0.97647
16	71.618	0.98431	63.820	0.98431	61.715	0.98431	58.928	0.97647
17	71.609	0.98431	63.820	0.98431	61.715	0.98431	58.922	0.97647
18	71.634	0.98431	63.829	0.98431	61.711	0.98431	58.922	0.97647
19	71.625	0.98431	63.823	0.98431	61.710	0.98431	58.923	0.97647
20	71.634	0.98431	63.831	0.98431	61.712	0.98431	58.930	0.97647
21	71.617	0.98431	63.820	0.98431	61.708	0.98431	58.927	0.97647
22	71.595	0.98431	63.832	0.98431	61.715	0.98431	58.921	0.97647
23	71.606	0.98431	63.828	0.98431	61.707	0.98431	58.923	0.97647
24	71.642	0.98431	63.828	0.98431	61.718	0.98431	58.927	0.97647
25	71.668	0.98431	63.829	0.98431	61.713	0.98431	58.926	0.97647
26	71.611	0.98431	63.829	0.98431	61.715	0.98431	58.926	0.97647
27	71.629	0.98431	63.833	0.98431	61.708	0.98431	58.932	0.97647
28	71.614	0.98431	63.834	0.98431	61.711	0.98431	58.927	0.97647
29	71.600	0.98431	63.829	0.98431	61.718	0.98431	58.930	0.97647
30	71.606	0.98431	63.828	0.98431	61.707	0.98431	58.932	0.97647



รูปที่ 6 กราฟแสดงค่า PSNR VS Payload ของวิธีการที่นำเสนอ (EVM+Weight) โดยเปรียบเทียบกับงานในอดีต (LV+Weight) [10] สำหรับ 6 ภาพตัวอย่างที่ได้

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์ค่า PSNR และค่าถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดสำหรับภาพควอาร์โค้ด 40 เวอร์ชัน

QR Code Image	Payload (20 kbits)			Payload (193.60 kbits)			Payload (367.20 kbits)		
	PSNR (dB)	Weight	<i>ex</i>	PSNR (dB)	Weight	<i>ex</i>	PSNR (dB)	Weight	<i>ex</i>
Version 1	55.575	0.98824	12	-	-	-	-	-	-
Version 2	56.724	0.98039	30	-	-	-	-	-	-
Version 3	57.703	0.97255	30	-	-	-	-	-	-
Version 4	58.611	0.98039	15	-	-	-	-	-	-
Version 5	59.409	0.97255	30	-	-	-	-	-	-
Version 6	60.134	0.98824	12	-	-	-	-	-	-
Version 7	60.824	0.97255	30	-	-	-	-	-	-
Version 8	61.463	0.98039	15	-	-	-	-	-	-
Version 9	62.068	0.98824	12	-	-	-	-	-	-
Version 10	62.639	0.98824	30	-	-	-	-	-	-
Version 11	63.118	0.98039	8	-	-	-	-	-	-
Version 12	63.625	0.97255	12	53.649	0.97255	30	-	-	-
Version 13	64.056	0.98039	30	53.956	0.97255	8	-	-	-
Version 14	64.547	0.98039	15	54.471	0.97255	5	-	-	-
Version 15	64.957	0.98039	15	54.975	0.98431	30	-	-	-
Version 16	65.336	0.98824	30	55.367	0.98039	30	-	-	-
Version 17	65.710	0.98824	30	55.758	0.98039	12	-	-	-
Version 18	66.076	0.98824	12	56.115	0.97255	30	-	-	-
Version 19	66.419	0.97255	12	56.466	0.98039	5	-	-	-
Version 20	66.792	0.97255	30	56.814	0.98824	30	53.814	0.97255	12
Version 21	67.126	0.98431	30	57.139	0.98824	12	54.208	0.98431	15
Version 22	67.388	0.98039	8	57.447	0.98039	30	54.566	0.98039	12
Version 23	67.719	0.98039	8	57.751	0.98431	30	54.948	0.97255	12
Version 24	68.003	0.98039	15	58.037	0.98039	30	55.252	0.98431	30
Version 25	68.276	0.98039	30	58.322	0.98039	8	55.532	0.98431	30
Version 26	68.554	0.97255	30	58.601	0.97255	30	55.799	0.97255	30
Version 27	68.822	0.97255	8	58.858	0.97255	30	56.068	0.97647	12
Version 28	69.076	0.98039	30	59.117	0.98039	5	56.326	0.97647	12
Version 29	69.309	0.97255	12	59.374	0.98039	8	56.575	0.98039	30
Version 30	69.564	0.98824	12	59.616	0.97255	12	56.816	0.97255	8
Version 31	69.802	0.97647	30	59.852	0.98824	30	57.053	0.98824	30
Version 32	70.025	0.98039	30	60.074	0.98824	12	57.287	0.97255	12
Version 33	70.284	0.97255	12	60.311	0.98039	15	57.510	0.97255	30
Version 34	70.475	0.97647	30	60.524	0.98824	30	57.725	0.98824	30
Version 35	70.688	0.97647	30	60.738	0.98824	30	57.939	0.98824	30
Version 36	70.896	0.97647	30	60.946	0.98824	30	58.147	0.98824	30
Version 37	71.092	0.98039	30	61.142	0.98824	12	58.354	0.97255	12
Version 38	71.326	0.97255	12	61.353	0.98039	15	58.551	0.97255	30
Version 39	71.487	0.98039	30	61.543	0.97255	30	58.747	0.98039	30
Version 40	71.743	0.98824	15	61.726	0.98039	3	58.935	0.97255	12

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอหนึ่งการปรับปรุงวิธีการเรียงลำดับข้อมูลบนพื้นฐานกระบวนการ RDH ดั้งเดิม สำหรับภาพควอาร์โค้ดโดยประยุกต์ใช้เทคนิค EVM ร่วมกับ WL การปรับระดับที่เหมาะสมถูกใช้ประโยชน์อย่างมีนัยสำคัญต่อความบิดเบือนของภาพหลังการส่ง การขยายพิกเซล

สำหรับคำนวณค่าการเรียงลำดับใหม่ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะภาพที่มีความแปรปรวนของพิกเซลสูง ๆ วิธีการที่นำเสนอให้ปริมาณการส่งที่สูงกว่า ในขณะที่ความบิดเบือนหลังการส่งต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานเมื่อเร็ว ๆ นี้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สำหรับทุนสนับสนุน
การทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tian, J. Reversible Data Embedding Using a Difference Expansion. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003; 13(8): 890-896.
- [2] Thodi, D. M. and Rodriguez, J. J. Reversible Watermarking by Prediction-Error Expansion. 6th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, 28-30 March, Lake Tahoe, NV, USA, 2004; 21-25.
- [3] Thodi, D. M. and Rodriguez, J. J. Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007; 16(3): 721-730.
- [4] Ni, Z., Shi, Y., Ansari, Q. N. and Su, W. Reversible Data Hiding. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2006; 16(3): 354-362.
- [5] Kim, H. J., Sachnev, V., Shi, Y. Q., Nam, J. and Choo, H. G. A Novel Difference Expansion Transform for Reversible Data Embedding. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008; 3(3): 456-465.
- [6] Kamstra, L. H. J. and Heijmans, A. M. Reversible Data Embedding into Images Using Wavelet Techniques and Sorting. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005; 14(12): 2082-2090.
- [7] Sachnev, V., Kim, H. J., Nam, J. Suresh, S. and Shi, Y.-Q. Reversible Watermarking Algorithm Using Sorting and Prediction. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009; 19(7): 989-999.
- [8] Kang, S., Hwang, H. J. and Kim, H. J. Reversible Watermarking Using an Accurate Predictor and Sorter Based on Payload Balancing. *ETRI Journal*, 2012; 34(4): 410-420.
- [9] Kotvicha, A., Sanguansat, P. and Kasemsan, M.L.K. Expand Variance Mean sorting for Reversible Watermarking. 2012 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 12-15 August, Hong Kong, 2012; 668-673.
- [10] ชัยพร ปานยินดี ธีรณัช สิลาวิวัฒน์ และภัทรวดี รังสิรักษ์. การศึกษาและพัฒนาขั้นตอนวิธีการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้โดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นสำหรับภาพคิวอาร์โค้ด. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2560; 1.
- [11] ปรีญาทิพย์ แดงมี และวรพล สิลาเกียรติสกุล. การอำพรางข้อมูลลับด้วย Steganography บน QR Code. *Journal of Information Science and Technology*, 2015; 5(1): 35-41.



การปรับปรุงประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 โดยการ ปรับการอุ่นน้ำป้อนที่กำลังการผลิต 240 MW และ 180 MW Performance Improvement of Mae Moh Power Plant Unit 12 by Adjusting of Feed Water Heater at the Capacity of 240 MW and 180 MW

คมกริช โมงขุนทด และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ

Khomkrit Mongkhuntod and Chatchawan Chaichana

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University
239 Huaykaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200
E-mail: Khomkrit.m@egat.co.th

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นเชื้อเพลิงมีกำลังการผลิต 300 เมกะวัตต์ (MW) ได้เดินเครื่องมาเป็นระยะเวลามากกว่า 20 ปี อุปกรณ์หลักต่าง ๆ ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานานก็ย่อมมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง มีผลให้ประสิทธิภาพรวมของโรงไฟฟ้าต่ำลงด้วย ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงอุปกรณ์หลักของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 คือการเปลี่ยนกังหันไอน้ำแรงดันสูงและกังหันไอน้ำแรงดันต่ำ ผลทำให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 มีอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Heat Rate) ที่ดีขึ้นจากเดิม 0.85% และสามารถประหยัดค่าเชื้อเพลิงลงจากนั้นได้มีการศึกษาการปรับการผันไอน้ำที่มาจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนให้มากขึ้นที่กำลังการผลิต 300 MW โดยใช้โปรแกรมจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ผลการศึกษาพบว่า การผันไอน้ำมาอุ่นเครื่องอุ่นน้ำป้อนทำให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงดีกว่าเดิม 0.116% โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการผันไอน้ำจากกังหันไอน้ำมาอุ่นเครื่องอุ่นน้ำป้อนโดยแบบจำลองโรงไฟฟ้าที่กำลังการผลิต 240 MW (80% Load) และกำลังการผลิต 180 MW (60% Load) ผลที่ได้คือที่ 80% ของกำลังการผลิตค่า Heat Rate ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ดีขึ้น 0.1% และที่ 60% ของกำลังการผลิตค่า Heat Rate ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ดีขึ้น 0.07%

คำสำคัญ: เครื่องอุ่นน้ำป้อน, ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า, อัตราความร้อน

ABSTRACT

Mae Moh Power Plant Unit 12 is a coal fired power plant capacity of 300 MW. It has been operated more than 20 years. The major equipment has degraded from this reason. The high pressure and low pressure steam turbine has been change for new one to improve plant efficiency. From this improvement, heat rate is better than that of before period by 0.85%. Then, it has the research about increasing the extraction steam flow from turbine to heat up in feed water heater in case of 300 MW power plant capacity. The result is decrease the heat rate about 0.116%. In this research focus on increasing the extraction steam flow from turbine to heat up in feed water heater in case of 240 MW

(80% Load) and 180 MW (60% Load). The result at 80% load is decreasing the heat rate by 0.1% and at 60% load is decreasing the heat rate by 0.07%.

Keywords: Feed Water Heater, Power Plant Efficiency, Heat rate

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เป็นเชื้อเพลิง มีกำลังการผลิต 300 เมกะวัตต์ (MW) เริ่มเดินเครื่องในระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2538 ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าใช้หม้อไอน้ำผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนไอน้ำเพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบน้ำควบแน่นหม้อเวียนจะมีเครื่องอุ่นน้ำป้อน (Feed Water Heater) เพื่ออุ่นน้ำในระบบหม้อเวียนให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนการให้ความร้อนในหม้อไอน้ำอยู่ 7 เครื่อง ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องอุ่นน้ำป้อนแรงดันต่ำ (Low Pressure Heater) 4 เครื่อง เครื่องกำจัดอากาศ (Deaerator) 1 เครื่อง และเครื่องอุ่นน้ำป้อนแรงดันสูง (High Pressure Heater) 2 เครื่อง โดยโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 เดินเครื่องมาเป็นระยะเวลานานกว่า 20 ปี เครื่องอุ่นน้ำป้อนทั้ง 7 เครื่องก็ถูกใช้งานมาเป็นระยะเวลานานเช่นกัน โดยไม่ได้มีการตรวจสอบในช่วงที่มีการหยุดบำรุงรักษาตามวาระเลข ซึ่งแน่นอนว่าประสิทธิภาพด้านการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนต่างๆ ย่อมเปลี่ยนแปลงไปจากการออกแบบและทำการเดินเครื่องครั้งแรก โดยในช่วงการบำรุงรักษาตามวาระของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 วันที่ 19 ตุลาคม 2556 – 14 ธันวาคม 2556 นั้นได้มีโครงการเปลี่ยนกังหันไอน้ำแรงดันสูง (High Pressure Turbine) และกังหันไอน้ำแรงดันต่ำ (Low Pressure Turbine) โดยในการเปลี่ยนอุปกรณ์กังหันไอน้ำในครั้งนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ (Plant Efficiency) ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ให้มีกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น 5% และค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Heat Rate) ลดลง 0.85% โดยส่งผลทำให้ค่าสมดุลความร้อน (Heat Balance) ของวงจรผลิตไฟฟ้าเปลี่ยนไป ต่อมาได้มีการศึกษาการปรับอัตราไหลของเครื่องอุ่นน้ำป้อน

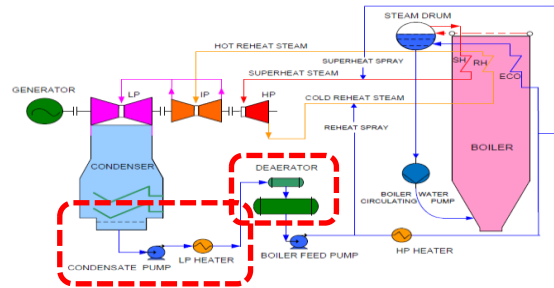
โดยมีแนวคิดในการผันเอา Extraction Steam ที่ได้เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงประสิทธิภาพกังหันไอน้ำมาอุ่นน้ำป้อนแต่ละเครื่องให้มากขึ้นที่กำลังการผลิต 100% เพื่อให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งการศึกษาได้ใช้โปรแกรม Gate Cycle และผลการศึกษาพบว่าสามารถทำให้ค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง (Heat Rate) ลดลง 0.116% และประสิทธิภาพดีขึ้น [1] โดยบทความนี้จะเป็นการวิจัยการปรับอัตราไหลของ Extraction Steam โดยใช้โปรแกรม Gate Cycle มาทำการศึกษาที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 กำลังการผลิต 80% (240MW) และที่กำลังการผลิต 60% (180MW)

ฐิติพร สุภามิ [2] ได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าที่จะใช้วัสดุสมรรถนะของกระบวนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยเทียบระหว่างค่า Target Heat Rate กับ Actual Heat Rate เพื่อเป็นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การหาแนวทางปรับปรุงกระบวนการเดินเครื่องหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งผลของงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่า Target Heat Rate ใหม่ภายใต้สภาพการทำงานจริงในปัจจุบัน ส่งผลให้การประเมินประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าสามารถที่จะทำได้แม่นยำขึ้น

Fernandez et al. [3] ได้ทำการวิเคราะห์เชิงความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เพื่อศึกษาว่าไอน้ำที่นำมาจากกังหันไอน้ำเพื่อมาอุ่นน้ำในเครื่องอุ่นน้ำป้อนนั้นมีคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่เหมาะสมกับการเดินเครื่องปัจจุบันหรือไม่ โดยได้สร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ความผิดปกติของค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเดินเครื่องของเครื่องอุ่นน้ำป้อน เพื่อให้สามารถป้องกันการเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ต้องหยุดเดินเครื่องลง

AnkurKeetee et al. [4] ได้ทำการวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์ของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนขนาด 120 MW ที่สภาพปัจจุบันพบว่าค่าพารามิเตอร์ขาเข้าของกังหันไอน้านั้นไม่ได้ตามที่ออกแบบไว้ จึงทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าของ Heat Rate และ Correction Factor ในกรณีของอุณหภูมิขาเข้าที่แตกต่างกัน แต่แรงดันขาเข้าคงที่ ซึ่งจาก Correction Curve ของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับค่า Heat Rate นั้นจะสามารถหา Correction Curve ได้ โดยจาก Correction Curve นั้นได้ทำการกำหนดแรงดันขาเข้าของกังหันไอน้านี้ที่จะและปรับอุณหภูมิขาเข้าของกังหันไอน้ำจะพบว่าค่ากำลังการผลิตและค่า Heat Rate ก็แปรผันไปตามการปรับเช่นกัน

Thongpattanakun [5] ได้นำเสนอขั้นตอนในการปรับอัตราการไหลของอากาศและก๊าซไอเสียที่เครื่องอุ่นอากาศของหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้าถ่านหิน เพื่อควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization, FGD) เครื่องอุ่นอากาศจะมี 2 ชุด ได้แก่ชุดเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ (Primary Air Heater, PAH) และชุดเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ (Secondary Air Heater, SAH) โดยจะนำข้อมูลการเดินเครื่องที่สภาพการทำงานจริงมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสียกับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียรวมก่อนเข้าสู่ระบบ FGD โดยจะหาสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิก๊าซไอเสียรวมไม่เกิน 180°C เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เงื่อนไขที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ จะถูกนำไปเทียบกับสภาวะการทำงานอ้างอิงที่ทำงานปัจจุบันและหาสภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาจาก การลดการใช้ปริมาณถ่านหิน จากผลการศึกษาพบว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD ได้ ไม่เกิน 180°C และมีศักยภาพในการลดอัตราการป้อนถ่านหิน 15.22 ตันต่อชั่วโมงคิดเป็นมูลค่าประมาณ 285,825.22 บาทต่อวัน



รูปที่ 1 โรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12
กำลังการผลิต 300 MW

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์หลักของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

2.1.1. หม้อไอน้ำ (Boiler)

ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Boiler Efficiency (\%)} = \frac{\text{Boiler Output Energy (KW)}}{\text{Boiler Input Energy (KW)}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

$$\text{Boiler Output Energy [kW]} = [m'_{MS} \times (h_{MS} - h_{FW-in})] + [m'_{RH} \times (h_{RH} - h_{Cold-RH})] + [m'_{RH-Spray} \times (h_{RH} - h_{RH-Spray})]$$

$$\text{Boiler Input Energy [kW]} = m'_{Coal} \times (HHV+B)$$

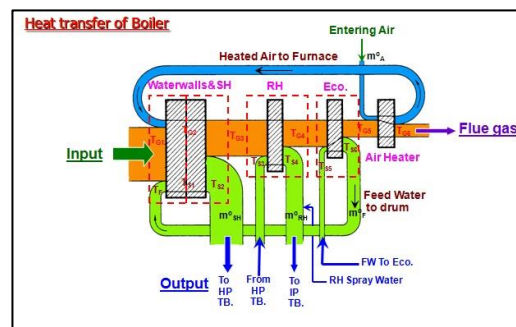
โดย

m'_{Coal} = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านหิน [kg/s]

HHV = ความร้อนขั้นสูงของถ่านหิน

B = พลังงานความร้อนโดยประมาณที่เพิ่ม

ให้กับ Boiler [kJ/kg] จะมาจาก 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ Sensible Heat-in Fuel, Heat in Entering Air และ Heat Supplied by Auxiliary Drive



รูปที่ 2 คุณพลังงานใน Boiler

2.1.2 กังหันไอน้ำ (Steam Turbine)

ประสิทธิภาพของ Steam Turbine จะคำนวณควบคู่กับสมรรถนะของ Generator (Steam Turbine Generator) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการนี้

$$\text{Steam Turbine – Generator Heat Rate}[\text{kJ/kWh}] = \frac{\text{Heat Input to Steam Turbine}[\text{kJ}]}{\text{Electrical Power Output}[\text{kW}] \times \text{Time}[\text{hour}]} \quad (2)$$

โดยที่

Steam Turbine–Generator Heat Rate คือ อัตราการป้อนพลังงานความร้อนเข้าสู่ Steam Turbine เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน Generator ให้ทำการผลิตไฟฟ้าจำนวนหนึ่งหน่วย [kJ/kWh] และ Heat Input to Steam Turbine คือ พลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ Steam Turbine[kJ] สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Heat Input to Steam Turbine}[\text{kJ}] = [m'_{MS} \times (h_{MS} - h_{FW-in})] + [m'_{RH} \times (h_{RH} - h_{Cold-RH})] + [m'_{RH-Spray} \times (h_{RH} - h_{RH-Spray})] \quad (3)$$

โดยที่

m'_{MS} = อัตราการไหลของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง [kg/s]

h_{MS} = เอนทาลปีของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง [kJ/kg]

h_{FW-in} = เอนทาลปีของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ Boiler [kJ/kg]

m'_{RH} = อัตราการไหลของไอน้ำหลังให้ความร้อนซ้ำ [kg/s]

h_{RH} = เอนทาลปีของไอน้ำหลังให้ความร้อนซ้ำ [kJ/kg]

$h_{Cold-RH}$ = เอนทาลปีของไอน้ำก่อนให้ความร้อนซ้ำ [kJ/kg]

$m'_{RH-Spray}$ = อัตราการไหลของน้ำสำหรับลดอุณหภูมิไอน้ำก่อนให้ความร้อนซ้ำ [kg/s]

$h_{RH-Spray}$ = เอนทาลปีของน้ำสำหรับลดอุณหภูมิไอน้ำก่อนให้ความร้อนซ้ำ [kJ/kg]

m'_{FW-in} = อัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าสู่ Boiler [kg/s]

Electrical Power Output = กำลังไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าสามารถผลิตได้ [kW]

Time = ระยะเวลาที่โรงไฟฟ้าเดินเครื่องผลิตไฟฟ้า [Hour]

2.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency: η_{th}) ของกระบวนการหรือวัฏจักรใด ๆ คือ ค่าที่คำนวณเปรียบเทียบระหว่างงานสุทธิของระบบ (Net Work : W_{net}) กับพลังงานความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (Heat Input : Q_H) ดังสมการนี้

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_H} \quad (4)$$

โดยที่ W_{net} = งานสุทธิที่ระบบสามารถผลิตได้

Q_H = ปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับ Boiler [kW]

2.3 อัตราการใช้ความร้อนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้า (Heat Rate)

ค่าอัตราพลังงานความร้อนในการผลิตไฟฟ้าหนึ่งหน่วยไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า มีหน่วย kJ/kWh คือค่าอัตราส่วนระหว่างผลรวมปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิงได้แก่ ถ่านหินลิกไนต์และน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเป็นพลังงานที่เข้าสู่ระบบ (Input) มีหน่วย kcal กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จำนวนหนึ่งหน่วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานที่ออกจากระบบ (Output) มีหน่วย kWh ดังสมการนี้

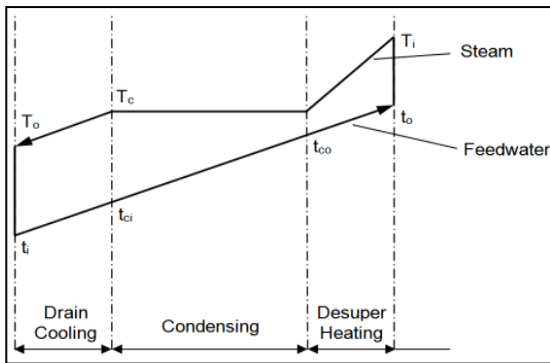
$$\text{Heat rate} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \right] = \frac{(\text{ปริมาณลิกไนต์}[\text{kg}] \times \text{ค่าความร้อนลิกไนต์} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right])}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้}[\text{kWh}]} \quad (5)$$

2.4 ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนในโรงไฟฟ้า

ค่าที่นิยมในการใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนตามมาตรฐาน ASME PTC 12.1 [6] คือค่า Terminal Temperature Difference (TTD) และค่า Drain Cooling Approach (DCA) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$TTD = T_C - t_o \quad (6)$$

$$DCA = T_i - t_i \quad (7)$$



รูปที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณ TTD และ DCA

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

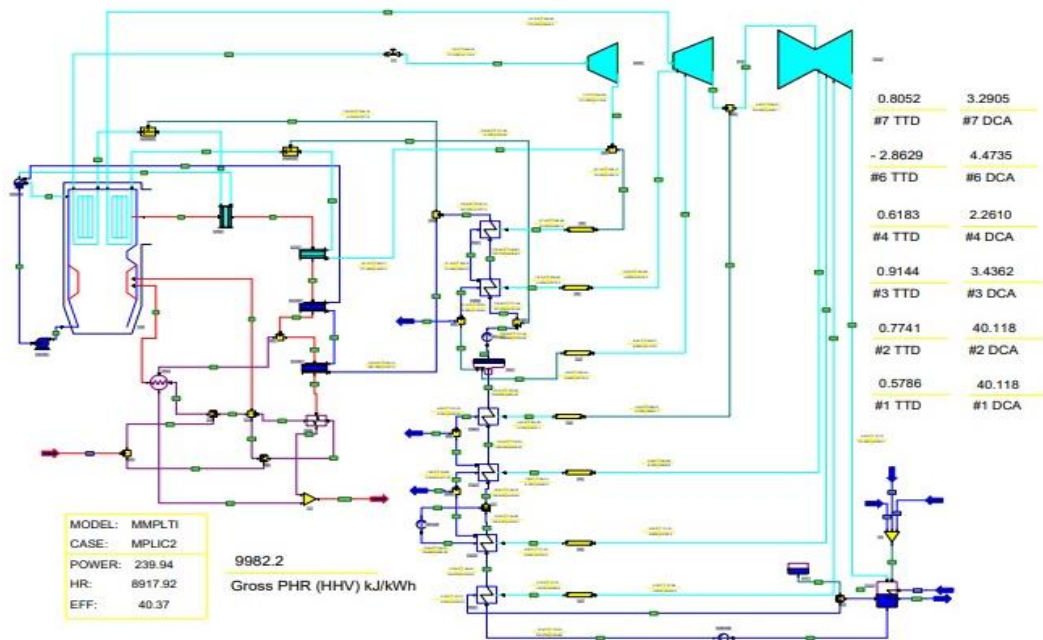
3.1 เก็บข้อมูลเพื่อนำไปป้อนในแบบจำลองโปรแกรม Gate Cycle

เก็บตามมาตรฐานการวัดประสิทธิภาพ โรงไฟฟ้า ASME PTC 6 ซึ่งจะเก็บข้อมูลที่การเดินเครื่อง 80% และ 60% ของกำลังการผลิต โดยแต่ละช่วงจะเก็บเป็น

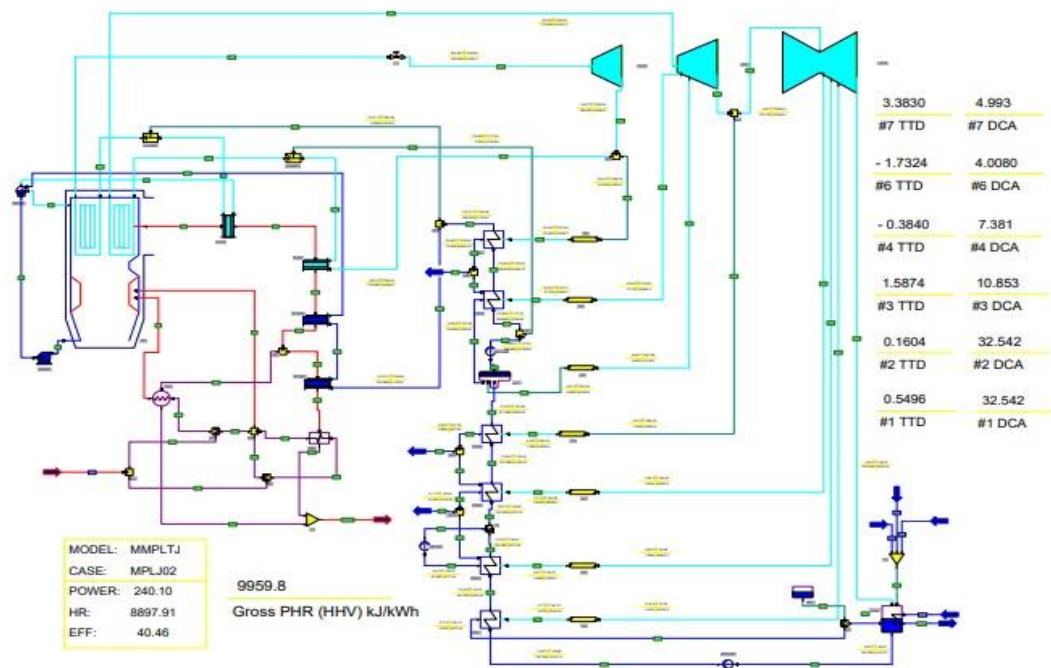
เวลา 2 ชั่วโมงโดยควบคุมให้โรงไฟฟ้าเดินเครื่องเสถียรที่สุดโดยไม่มีปัจจัยภายนอกอื่น ๆ รบกวน และนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจรับ ซึ่งทั้ง 2 ช่วงคือช่วงตรวจรับตอนออกแบบและช่วงตรวจรับตอนการปรับปรุงประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จึงใช้การเปรียบเทียบโดยอ้างอิงทั้ง 2 ช่วงเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่มีผลต่อค่า Heat Rate ของโรงไฟฟ้า โดยแบบจำลองจะจำแนกได้ดังนี้

ตารางที่ 1 แบบจำลองในงานวิจัย

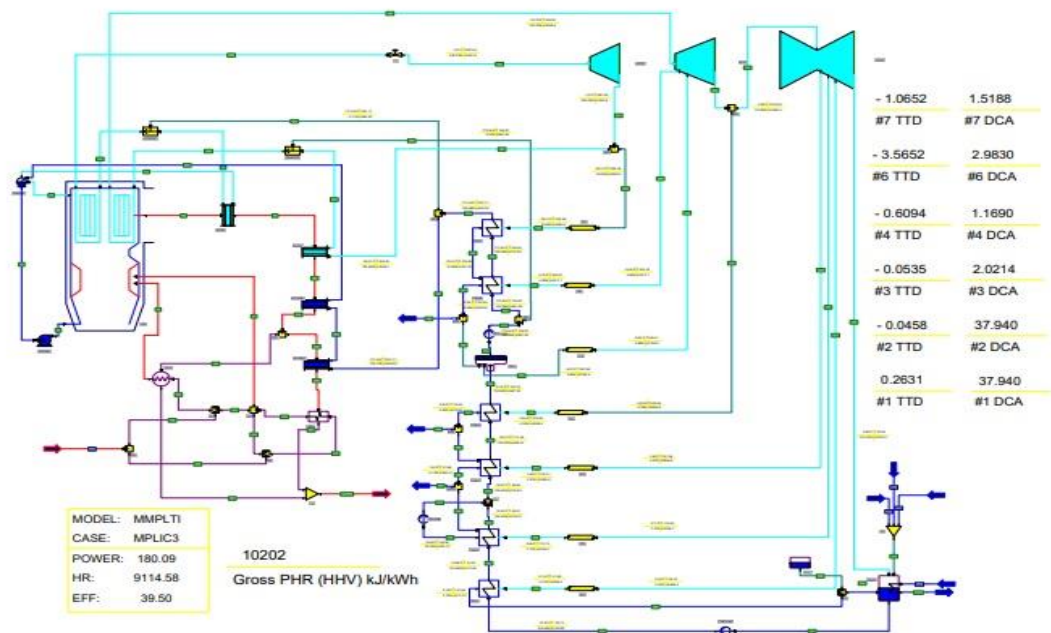
สภาวะ	80% Load	60% Load
ช่วงออกแบบ	Case 1	Case 4
ช่วงหลังปรับปรุงประสิทธิภาพ	Case 2	Case 5
ช่วงหลังการปรับ Extraction Steam	Case 3	Case 6



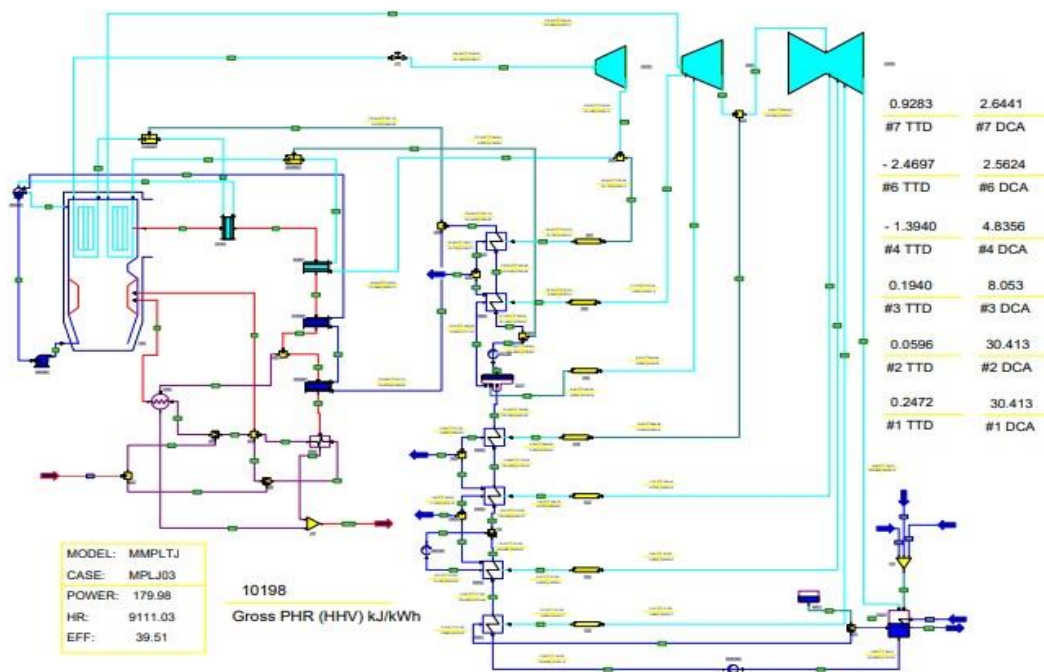
รูปที่ 4 แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ช่วงออกแบบที่กำลังการผลิต 240 MW (Case 1)



รูปที่ 5 แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 หลังปรับปรุงประสิทธิภาพกังหันไอน้ำที่กำลังการผลิต 240 MW (Case 2)



รูปที่ 6 แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ช่วงออกแบบที่กำลังการผลิต 180 MW (Case 4)



รูปที่ 7 แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 หลังปรับปรุงประสิทธิภาพกังหันไอน้ำที่กำลังการผลิต 180 MW (Case 5)

3.2 คำนวณค่าประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อน

ทำการคำนวณค่า TTD และ DCA ของเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 1-7 เปรียบเทียบระหว่าง Case 1 และ Case 2 ที่กำลังการผลิต 80% Load จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบระหว่าง Case 4 และ Case 5 ที่กำลังการผลิต 60% Load

3.3 ทำการปรับ Extraction Steam

ทำการปรับอัตราการไหลของ Extraction Steam ที่เข้ามาอุ่น Feed Water Heater เครื่องที่ 3, 4, 6 และ 7 แต่เครื่องที่ 1, 2 และ 5 จะไม่ทำการปรับ เนื่องจากเครื่องที่ 1 และ 2 นั้นถูกติดตั้งใน Condenser ซึ่งใช้ Steam จาก Low Pressure Turbine มาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งไม่สามารถปรับได้ส่วนเครื่องที่ 5 เป็น Deaerator ซึ่งการปรับจะส่งผลต่อค่า Dissolve Oxygen ซึ่งเป็นค่าควบคุม โดยในงานวิจัยนี้จะหลีกเลี่ยงการปรับที่เครื่องที่ 5 ส่วนเครื่องที่ 3, 4, 6 และ 7 จะใช้โปรแกรม Gate Cycleอ้างอิง Model Case 2 และ Case 5 ในการปรับ โดยจากข้อมูลผลการวิเคราะห์

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (UA) ของเครื่องอุ่นน้ำป้อนทั้ง 4 ตัวพบว่าเครื่องที่ 3 และ 7 มีค่า UA สูงกว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 4 และ 6 ซึ่งค่า UA นั้นแสดงถึงประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพภาพรวมของโรงไฟฟ้า จึงเลือกทำการปรับเฉพาะที่เครื่องที่ 3 และ 7 จากนั้นพบว่าในการปรับอัตราการไหลของไอน้ำที่มาจากเครื่องที่ 7 เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าลดลง ผู้วิจัยจึงเลือกทำการปรับเฉพาะเครื่องที่ 3

4. ผลการวิจัย

4.1 ค่า TTD และ DCA ที่ 80% Load

ตารางที่ 2 ค่า TTD ที่ 80% Load

Heater No.	Case 1	Case 2
Heater 3	0.9144	1.5847
Heater 4	0.6183	-0.384
Heater 6	-2.8629	-1.7324
Heater 7	0.8052	3.383

ตารางที่ 3 ค่า DCA ที่ 80% Load

Heater No.	Case 1	Case 2
Heater 3	3.4362	10.853
Heater 4	2.261	7.381
Heater 6	4.4735	4.008
Heater 7	3.2905	4.993

จากการคำนวณค่า TTD และ DCA ของเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 3, 4, 6 และ 7 ที่กำลังการผลิต 80% ในตารางที่ 2 และ 3 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 พบว่าค่า TTD ของเครื่องที่ 3, 6 และ 7 มีค่าสูงขึ้น แต่เครื่องที่ 4 มีค่าต่ำลง ส่วนค่า DCA ของเครื่องที่ 3, 4 และ 7 มีค่าสูงขึ้น แต่เครื่องที่ 6 มีค่าต่ำลง จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนทั้ง 4 ตัวมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ส่วนที่เครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 4 มีค่า TTD สูงขึ้นนั้นเนื่องมาจากมีอัตราการไหลของ Extraction Steam เพิ่มขึ้นหลังจากการปรับปรุงประสิทธิภาพกังหันไอน้ำจึงทำให้มีไอน้ำมาอุ่นน้ำป้อนสูงขึ้น โดยความเป็นจริงแล้วเครื่องที่ 4 มีประสิทธิภาพที่ต่ำลง สาเหตุหลักที่ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนต่ำลงมาจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลาและไม่มีกรถอดมาบำรุงรักษาเลย

4.2 ค่า TTD และ DCA ที่ 60% Load

ตารางที่ 4 ค่า TTD ที่ 60% Load

Heater No.	Case 4	Case 5
Heater 3	-0.05	0.19
Heater 4	-0.61	-1.39
Heater 6	-3.57	-2.47
Heater 7	-1.07	0.93

ตารางที่ 5 ค่า DCA ที่ 60% Load

Heater No.	Case 4	Case 5
Heater 3	2.02	8.05
Heater 4	1.17	4.83
Heater 6	2.98	2.56
Heater 7	1.52	2.64

จากการคำนวณค่า TTD และ DCA ของเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 3, 4, 6 และ 7 ที่กำลังการผลิต 60% ในตารางที่ 4 และ 5 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 พบว่าค่า TTD ของเครื่องที่ 3, 4, 6 และ 7 มีค่าสูงขึ้น

ส่วนค่า DCA ของเครื่องที่ 3, 4 และ 7 มีค่าสูงขึ้น แต่เครื่องที่ 6 มีค่าต่ำลง จึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนทั้ง 4 ตัวมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงเช่นเดียวกับที่กำลังการผลิต 80% สาเหตุหลักที่ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นน้ำป้อนต่ำลงมาจากการใช้งานมาเป็นระยะเวลานานและไม่มีกรถอดมาบำรุงรักษาเลย

4.3 ผลการปรับอัตราการไหลของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่กำลังการผลิต 80% และ 60%

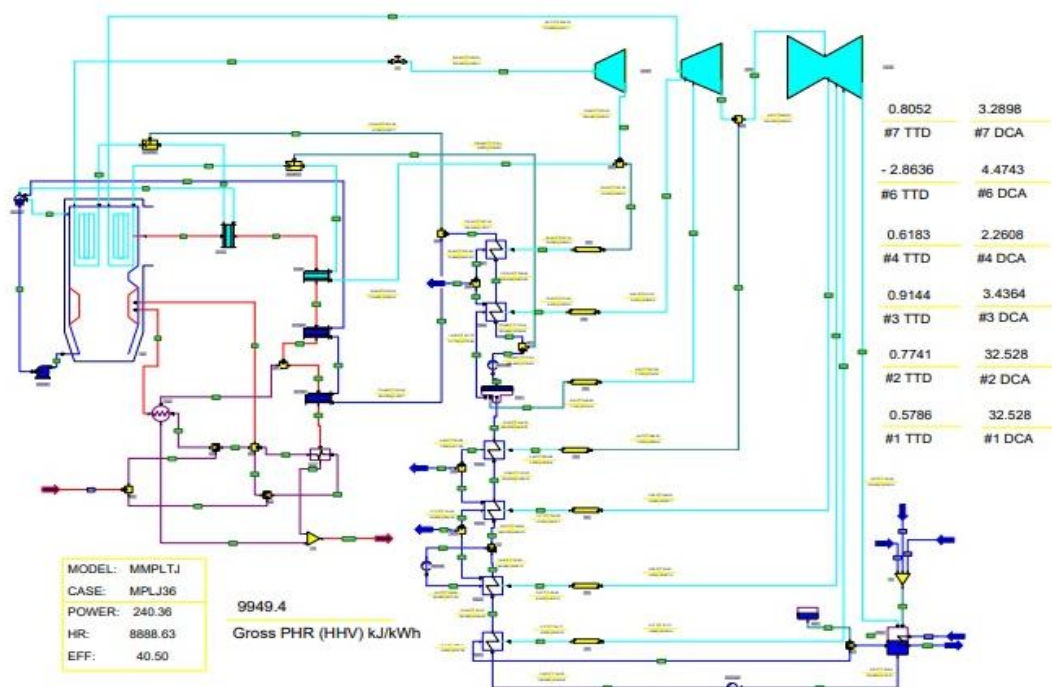
ในการปรับอัตราการไหลที่มาจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 3 ที่ 100% ของกำลังการผลิตนั้นสามารถปรับได้มากที่สุดเพิ่มขึ้น 10% อ้างอิงตามมาตรฐาน ASME PTC 12.1 และที่สถานะการปรับที่ 10% นี้ทำให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยเมื่อทำการจำลองโดยโปรแกรม Gate Cycle มาเป็นสถานะที่ 80% และ 60% นั้นจะแสดงดังตารางที่ 6 สำหรับที่ 80% Load และได้ Model ดังรูปที่ 7 สำหรับที่ 60% Load จะได้ดังตารางที่ 7 และได้ Model ดังรูปที่ 8 โดยเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 4-7 ค่าอัตราการไหลจะเปลี่ยนแปลงตามการปรับที่เครื่องที่ 3

ตารางที่ 6 อัตราการไหล Extraction Steam ที่ 80% Load

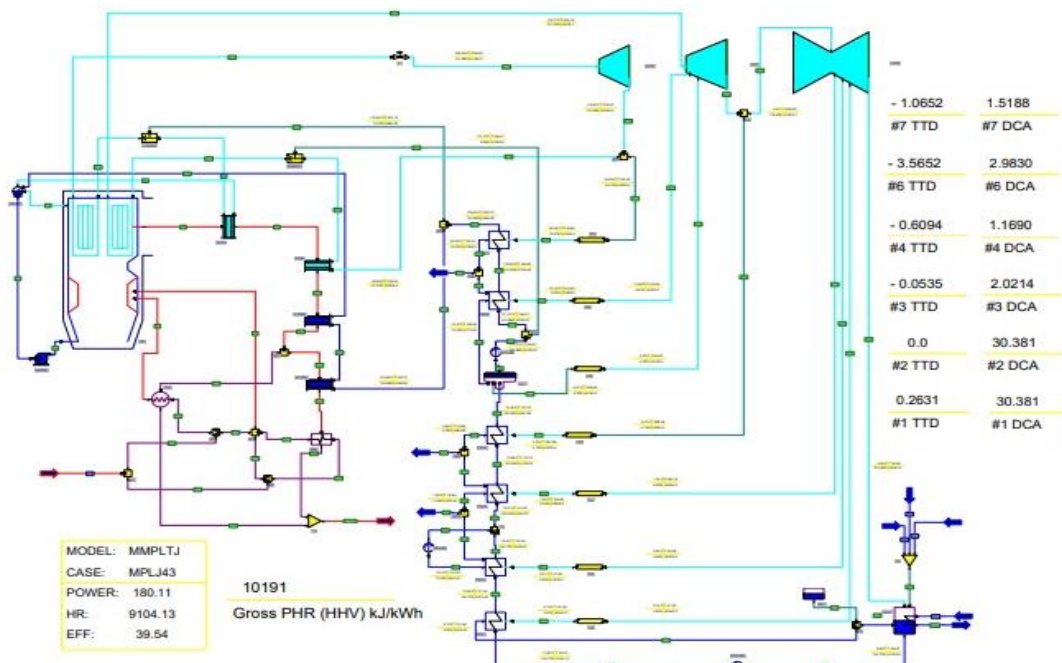
Heater No.	อัตราการไหล Extraction Steam Case 2 (kg/s)	อัตราการไหล Extraction Steam Case 3 (kg/s)
3	8.63	8.79
4	7.69	7.72
6	6.11	6.47
7	14.54	15.24

ตารางที่ 7 อัตราการไหล Extraction Steam ที่ 60% Load

Heater No.	อัตราการไหล Extraction Steam Case 5 (kg/s)	อัตราการไหล Extraction Steam Case 6 (kg/s)
3	6.37	6.33
4	5.36	5.12
6	4.35	4.72
7	10.17	10.51



รูปที่ 7 แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 หลังการปรับ Extraction Steam 240 MW (Case 3)

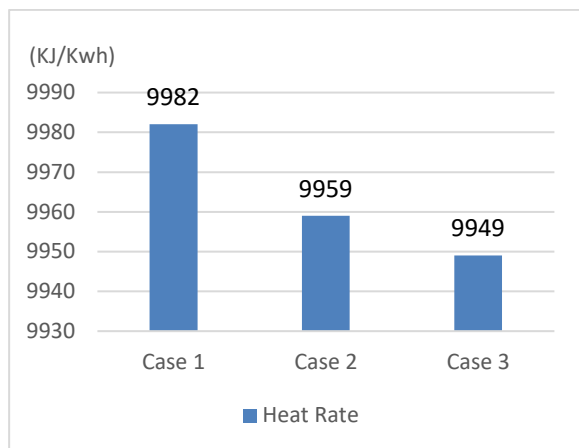


รูปที่ 8 แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 หลังการปรับ Extraction Steam 180 MW (Case 6)

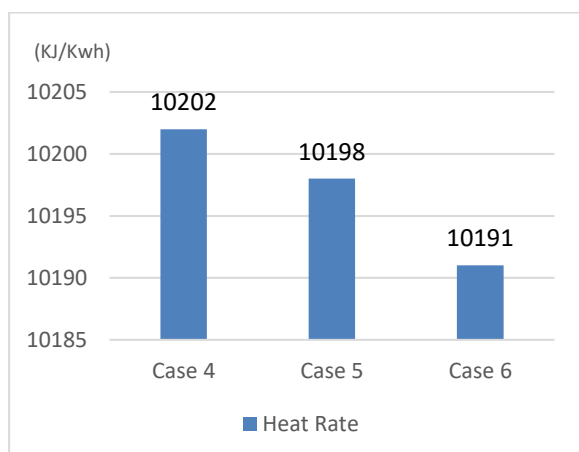
จากการปรับอัตราการไหลของไอน้ำที่เข้าเครื่องอุ่นน้ำป้อนเครื่องที่ 3 ตามตารางที่ 6 และ 7 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่กำลังการผลิต 80% และ 60% ตามลำดับพบว่า

ค่า Gross Heat Rate ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 ที่ 80% Load มีค่าเท่ากับ 9,949 kJ/kWh ซึ่งมีค่าดีกว่าก่อนทำการปรับคือ 9,959 kJ/kWh คิดเป็นดีขึ้น 0.1%

และที่ 60% Load มีค่าเท่ากับ 10,191 kJ/kWh ซึ่งมีค่าดีกว่าก่อนทำการปรับคือ 10,198 kJ/kWh คิดเป็นดีขึ้น 0.07% สามารถแสดงดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบ Heat Rate ที่ 80% Load



รูปที่ 10 เปรียบเทียบ Heat Rate ที่ 60% Load

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการใช้แบบจำลองโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 โดยโปรแกรม Gate Cycle มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำป้อน โดยจะใช้แบบจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 2 ช่วงคือช่วงตรวจรับโรงไฟฟ้า

จากบริษัทผู้ผลิตและช่วงปัจจุบันหลังจากมีการปรับปรุงประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า ซึ่งจะเปรียบเทียบ 2 ค่าคือ Terminal Temperature Difference (TTD) และ Drain Cooling Approach (DCA) ที่โรงไฟฟ้ากำลังการผลิต 80% และ 60% จากนั้นจะอ้างอิงแบบจำลองช่วงปัจจุบันหลังจากมีการปรับปรุงประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าเพื่อนำมาปรับอัตราการไหลของ Extraction Steam ที่นำไอน้ำจากกังหันไอน้ำมาอุ่นเครื่องสูบน้ำป้อนแต่ละตัวให้มากขึ้นเพื่อให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีขึ้นซึ่งโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะใช้ค่า Heat Rate เป็นค่าบ่งบอกประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า

เมื่อปรับอัตราการไหลของ Extraction Steam ที่แบบจำลองกำลังการผลิต 80% และ 60% ผลที่ได้คือที่ 80% ของกำลังการผลิตค่า Gross Heat Rate ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 มีค่าเท่ากับ 9,949 kJ/kWh ซึ่งมีค่าดีกว่าก่อนทำการปรับคือ 9,959 kJ/kWh คิดเป็นดีขึ้น 0.1% และที่ 60% ของกำลังการผลิตค่า Gross Heat Rate ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะหน่วยที่ 12 มีค่าเท่ากับ 10,191 kJ/kWh ซึ่งมีค่าดีกว่าก่อนทำการปรับคือ 10,198 kJ/kWh คิดเป็นดีขึ้น 0.07%

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการ กฟผ.-มช., การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้โปรแกรม Gate Cycle ในการดำเนินงานของโครงการวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Khomkrit, M. Chaichana, C. and Nuntaphan, A. Thermal Efficiency Analysis and Optimal of Feed Water of Mae Moh Power Plant. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 2017; 11(12).

- [2] Supasri, T., Vorayos, N. and Thongchiew, P. Performance Analysis Model Development for Mae Moh Coal-Fired Power Plant. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 2013; 7(9): 1882-1886.
- [3] Álvarez-Fernández, M., Portillo-Valdés, L.D., Alonso-Tristán, C. Thermal Analysis of Closed Feed Water Heater in Nuclear Power Plant. *Applied Thermal Engineering*, 2014; 68: 45-58.
- [4] Anker, K. and Khunwawala, A.L. Thermodynamic Analysis of 120 MW Thermal Power Plant with Combined Effect of Constant Inlet Pressure (124.61 bar) and Difference Inlet Temperatures. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2013; 1: 17-25.
- [5] Tongpattanakul, P. Thermal Management of Waste Heat Recovery System in Coal-Fired Power Plant for Tempera. *Energy and Mass Transfer 15th*, 2016, pp.304.
- [6] The American Society of Mechanical Engineers. Close Feed Water Heater. NY, USA, 2000.



การปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสด พันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง กรณีศึกษา: บริษัทผู้ส่งออกผักและผลไม้สด Productivity Improvement of Namdokmai Mango Packing Process A Case Study: an Exporter of Tropical Fruits and Vegetables

ปริญญ์ พัฒนวัฒนศัพท์

Parinya Pattanawasarnorn

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen,

Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

1 Moo 6 Kamphaeng Saen District, Amphur Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

E-mail: fengpypa@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ที่มีสภาวะการแข่งขันสูง ทุกบริษัทจำเป็นต้องลดเวลานำ (Lead Time) ทำให้ต้นทุนต่ำที่สุด และมีระดับการให้บริการลูกค้าสูงเพื่อความอยู่รอด การศึกษาในครั้งนี้จึงเสนอแนวทางในการลดเวลานำ และรอบเวลา (Cycle Time) ในการทำงาน พร้อมทั้งระบุขั้นตอนและเวลาการทำงานของพนักงานให้เป็นมาตรฐาน และจัดทำคู่มือมาตรฐานการปฏิบัติงานเพื่อเป็นฐานข้อมูลให้แก่บริษัท โดยผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองของบริษัทผู้ส่งออกผักและผลไม้สด โดยสามารถแบ่งปัญหาออกเป็น 5 ปัญหา ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกทำการปรับปรุง 3 ปัญหาแรกที่ส่งผลกระทบต่อบริษัทมากที่สุดคือ 1) ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอน 2) พนักงานทำงานซ้ำซ้อน และ 3) ไม่มีการกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ชัดเจน มาทำการปรับปรุงโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์วิธีการ การวิเคราะห์กระบวนการ และการคำนวณเวลามาตรฐาน ผลการศึกษาสรุปได้ว่าสามารถลดเวลานำในการทำงาน จากเดิม 95.2 วินาทีต่อกิโลกรัม เป็น 66.2 วินาทีต่อกิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 30.5 และลดรอบเวลาในการทำงานจากเดิม 30.4 วินาทีต่อกิโลกรัม เป็น 17.6 วินาทีต่อกิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 42.1 จากผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เชื่อมั่นได้ว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น

ABSTRACT

Nowadays, competitive companies require of short lead times, low costs and high customer service levels to survive. The paper proposes an approach to reduce lead time and cycle time in the process including identify employee's procedures and working hours as standard for provide an operations procedures manual for the company. It is based on a case study of the Namdokmai mango packing process of Shine Forth Co., Ltd. The problem can be divided into 5 problems. The researchers have chosen to improve the 3 problems that most effect on company. First, they don't have standard time in procedures. Second, the employees work duplicate. Finally, employees don't have clearly duty. These problems were solved by process analysis and standard time techniques. The paper reports numerical results that can reduce lead time by 30.5 percent from 95.2 to 66.2 seconds per kilogram and

reduce cycle time by 42.1 percent from 30.4 to 17.6 seconds per kilogram. This result ensures that company can be more efficient process.

1. บทนำ

มะม่วงเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยการปลูกมะม่วงมีมากทั่วทั้งประเทศ ซึ่งพันธุ์ที่นิยมปลูกเพื่อบริโภคผลสุก ได้แก่ น้ำดอกไม้ ไซคอนันต์ และมหาชนก ผลผลิตมะม่วงของไทยมีคุณภาพดี เป็นที่ยอมรับของตลาดทั้งในและต่างประเทศ นับจากเดือนมกราคมถึงพฤศจิกายน พ.ศ. 2559 ประเทศไทยส่งออกมะม่วงสดประมาณ 32 ล้านตัน มูลค่าการส่งออกรวม 1,156 ล้านบาท [1] ตลาดส่งออกที่สำคัญคือประเทศญี่ปุ่น ยุโรปและอเมริกา มะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้เป็นพันธุ์ส่งเสริมพันธุ์แรกที่ถูกเพื่อการส่งออก เนื่องจากมีกลิ่นและรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ ส่งผลให้มีมูลค่าการจำหน่ายที่สูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงควรส่งเสริมให้ผู้ประกอบการมีการผลิตที่มีคุณภาพเพื่อเพิ่มศักยภาพในการส่งออก [2]

กรณีศึกษาของบริษัทผู้ส่งออกผักและผลไม้สด จ.ปทุมธานี เป็นหนึ่งในผู้ส่งออกผลไม้ชั้นนำที่มีคุณภาพในประเทศไทย ก่อตั้งในปี พ.ศ. 2533 ซึ่งเดิมเป็นบริษัทออกแบบบรรจุภัณฑ์ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2543 บริษัทได้เริ่มส่งออกผลไม้ไทยเพื่อสนับสนุนเกษตรกรในท้องถิ่น ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ของบริษัทมี 3 ประเภทคือ 1) ผลไม้สด 2) ผลไม้แกะสลัก 3) ผลไม้อบแห้ง โดยมีผลไม้หลากหลายชนิด ส่งไปยังประเทศต่างๆ ทั่วโลกทั้งประเทศจีน ญี่ปุ่น เยอรมนี สหรัฐอเมริกาและตะวันออกกลาง ฯลฯ

โดยบริษัทได้ให้ความสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการบรรจุหีบห่อเพื่อเพิ่มศักยภาพในการส่งออก ซึ่งผู้วิจัยได้เข้าไปศึกษาดูงานที่บริษัททำให้พบเห็นปัญหาคือ 1) การหยิบมะม่วงเข้า-ออกจากกล่องมากเกินความจำเป็นในขั้นตอนของการบรรจุหีบห่อ ทำให้พนักงานเสียเวลาในการทำงาน 2) หน้าที่การทำงานของพนักงานไม่ชัดเจน ทำให้เกิดการแย่งกันทำงานในบางช่วงเวลา 3) ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอน ส่งผลให้ไม่สามารถคาดการณ์ผลผลิตในแต่ละวันได้ 4) มีการจัดสรรอุปกรณ์ทำงานที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดความ

ไม่สะดวกสบายในการทำงาน 5) พื้นที่การทำงานมีความแออัด ส่งผลให้พนักงานทำงานไม่สะดวก ดังนั้นการแก้ปัญหาจึงเน้นไปที่การแก้ไขขั้นตอนการทำงานเป็นหลัก เพื่อให้เกิดการบรรจุหีบห่อได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยงานวิจัยนี้จะเลือกมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองเป็นกรณีศึกษา ซึ่งเป็นสินค้าหลักของบริษัทคิดเป็นร้อยละ 80 ของสินค้าทั้งหมด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการนำเทคนิควิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์เข้าไปปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง โดยได้นำเทคนิคการศึกษาการทำงาน (Work Study) ในหัวข้อการวิเคราะห์วิธีการ (Method Analysis) การวิเคราะห์กระบวนการ (Process Analysis) และเวลามาตรฐาน (Standard Time) เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการปัจจุบัน จากนั้นทำการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานและหาเวลามาตรฐาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบรรจุหีบห่อและลดเวลานำ (Lead Time) ในการทำงาน ซึ่งหมายถึงระยะเวลาในการรอคอยผลิตภัณฑ์หลังจากที่ได้มีการเริ่มกระบวนการผลิต และลดรอบเวลา (Cycle Time) ในการทำงาน ซึ่งหมายถึง เวลาที่ใช้ในการผลิตหนึ่งรอบกระบวนการ [3]

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

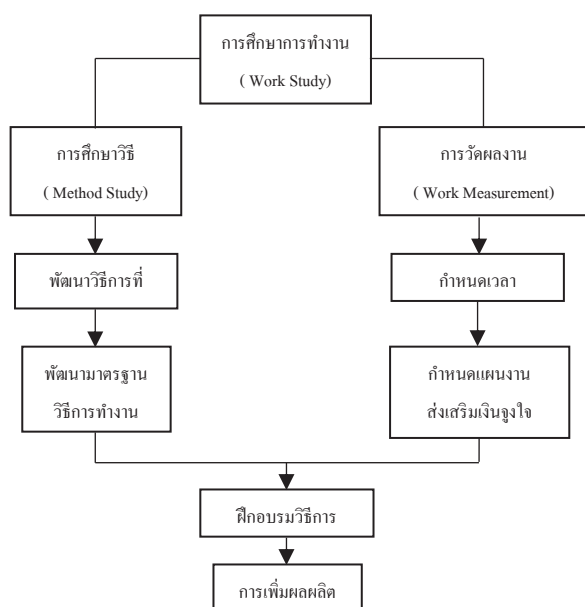
2.1 ข้อมูลทั่วไปของมะม่วง

มะม่วงเป็นไม้ผลยืนต้นเขตร้อน ไม่ผลัดใบ ทรงพุ่มสูงประมาณ 5-10 เมตร การแตกกิ่งแขนงจากลำต้นหลักจะอยู่ในระดับต่ำ ใบเป็นใบเดี่ยว ก้านใบเรียวยาว 6-7 ซม. ผิวใบเขียวเข้ม ขนาดใบกว้างประมาณ 5.5-6.5 ซม. ยาวประมาณ 24-25 ซม. ดอกเป็นช่อมีสีแดงอมชมพู ออกตามปลายกิ่ง ดอกประกอบด้วยดอกตัวผู้และดอกสมบูรณ์เพศในช่อเดียวกัน รูปทรงผลกลมแบนเล็กน้อย ผลกว้างประมาณ 5.5-6 ซม. เมื่อสุกเปลือกจะมีสีเหลืองอมเขียว

เนื้อภายในมีสี่เหลี่ยม รสหวานอมเปรี้ยว เมล็ดคล้ายรูปหัวใจแบน ซึ่งหนึ่งเมล็ดจะเพาะได้ต้นกล้าหลายต้น [4]

2.2 การศึกษาการทำงาน (Work Study)

การศึกษาการทำงาน คือ การศึกษาวิธีและการวัดผลงาน ใช้ในการศึกษากระบวนการทำงานและองค์ประกอบต่างๆ เพื่อปรับปรุงการทำงานให้ดีขึ้น และใช้ประโยชน์ด้านการพัฒนามาตรฐานของการทำงานและเวลาทำงานเพื่อนำไปสู่การเพิ่มผลผลิต ดังรูปที่ 1 [5]



รูปที่ 1 การศึกษาการทำงาน

การศึกษาวิธีการทำงาน (Method Study) หมายถึง การศึกษาวิธีการทำงานจากการบันทึกและวิเคราะห์วิธีการทำงานขององค์การที่กำลังทำอยู่ เพื่อเสนอวิธีการทำงานแบบใหม่อย่างมีระบบและประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการทำงานให้ มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล การศึกษาวิธีการทำงานจะช่วยให้เกิดการปรับปรุงกระบวนการในการทำงานให้มีความเหมาะสมกับการปฏิบัติงาน ซึ่งขั้นตอนของการศึกษาวิธีการทำงานพอสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเลือกงาน : ควรเลือกงานที่มีเหตุผลควรที่ได้รับการปรับปรุง

ขั้นตอนที่ 2 การเก็บข้อมูลวิธีการทำงาน : เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงวิธีการทำงาน เราจำเป็นต้องทำการเก็บข้อมูลวิธีการทำงานของงานที่เราเลือกที่จะศึกษาวิธีการทำงาน

แล้ว การบันทึกข้อมูลวิธีการทำงานให้ถูกต้องแม่นยำครบถ้วนตามความเป็นจริงเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์วิธีการทำงาน : การวิเคราะห์วิธีการทำงานจะใช้ “เทคนิคการตั้งคำถาม” เพื่อช่วยให้สามารถกำหนดแนวทางในการปรับปรุงวิธีการทำงาน เทคนิคการตั้งคำถามนี้เรียกโดยย่อว่า “6W-1H”

ขั้นตอนที่ 4 การปรับปรุงวิธีการทำงาน : ขั้นตอนการปรับปรุงวิธีการทำงานเป็นเพียงการเลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงงาน (Reengineering) ซึ่งมีหลักการ คือ การตัด (Eliminate), การแยก/รวม (Separate/Combine), การเปลี่ยนขั้นตอน (Change), การทำกระบวนการให้เรียบง่าย (Simplify) และ การใช้เครื่องมือเข้ามาช่วย (Use)

ขั้นตอนที่ 5 การเปรียบเทียบการวัดผลงานการทำงาน : ค่าที่ใช้เปรียบเทียบวัดผลงานการทำงานได้เหมาะสมที่สุดคือ ค่าอัตราผลิตภาพ (Productivity Index) หรืออัตราการเพิ่มผลผลิต

ขั้นตอนที่ 6 การพัฒนามาตรฐานวิธีการทำงาน : การพัฒนาวิธีการทำงานที่ปรับปรุงแล้วให้เป็นวิธีการมาตรฐานเพื่อใช้เป็นแนวปฏิบัติมาตรฐานตามวิธีการทำงานที่ปรับปรุงแล้ว

ขั้นตอนที่ 7 การส่งเสริมการใช้วิธีการทำงานที่ปรับปรุงแล้ว : ขั้นตอนนี้ต้องใช้ความสามารถทางจิตวิทยาและมีมนุษยสัมพันธ์ในการส่งเสริมผลักดันให้คนงานซึ่งมักจะมีแนวโน้มที่จะใช้วิธีการทำงานของตนเอง ให้เปลี่ยนแปลงวิธีการทำงานตามมาตรฐานวิธีการทำงาน ต้องอาศัยความเชี่ยวชาญทางด้านนี้โดยเฉพาะ

ขั้นตอนที่ 8 การติดตามการใช้วิธีการทำงานที่ปรับปรุงแล้ว : เป็นความจำเป็นอย่างยิ่งในการพยายามรักษาวิธีการทำงานที่ปรับปรุงแล้วให้มีการใช้งานอย่างต่อเนื่องและคงอยู่จนกว่าจะพัฒนาวิธีการทำงานที่ดียิ่งๆ ขึ้นไปอีก

การศึกษาเวลา (Time Study) คือ เทคนิคการวัดผลงานโดยมีผลลัพธ์ เรียกว่า “เวลามาตรฐาน” ซึ่งมีกระบวนการเพื่อกำหนดหาเวลาในการทำงานภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน ซึ่งคำนวณได้จาก [6]

เวลามาตรฐาน = $NT + (NT \times \%Allowance)$ (1)
โดยที่

NT คือ เวลาปกติ (Normal Time)

$Allowance$ คือ เวลาส่วนเพื่อ

2.3 เครื่องมือควบคุมคุณภาพ 7 ชนิด (7 QC Tools)

การควบคุมคุณภาพการผลิตนั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมในปัจจุบัน นอกจากการแข่งขันทางด้านราคา คุณภาพของสินค้าก็ถือเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญนอกจากจะเป็นการแสดงถึงมาตรฐาน และการประกันคุณภาพของสินค้าแล้ว ยังเป็นกลยุทธ์ในการลดต้นทุนอีกด้วย [7]

ในกระบวนการผลิตมีเครื่องมือที่มีความสำคัญหลายชนิด ซึ่งในที่นี้จะใช้เครื่องมือในการควบคุมคุณภาพที่เรียกว่า Seven QC Tools ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 7 เครื่องมือ ดังนี้

1. แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet)
2. แผนผังกาเรโด (Pareto Diagram)
3. แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause & Effect Diagram)
4. กราฟ (Graph)
5. ฮิสโตแกรม (Histogram)
6. แผนผังการกระจาย (Scatter Diagram)
7. แผนภูมิควบคุม (Control Chart)

3. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน อันประกอบไปด้วย

3.1 การศึกษากระบวนการและการตั้งปัญหา

เป็นการศึกษาสภาพการทำงานปัจจุบันในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วง ซึ่งประกอบด้วยจำนวนพนักงาน ขั้นตอน และเวลาทำงานของพนักงานในแต่ละงานย่อย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำวิจัย พร้อมทั้งสัมภาษณ์ผู้บริหารเพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหาโดยใช้แผนภูมิพาเรโตจากสภาพการทำงานในปัจจุบันพบว่าพนักงานมีหน้าที่การทำงานที่ไม่ชัดเจน ทำให้เกิดกร

ทำงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นที่มาในการปรับปรุงกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองเพื่อส่งออกไปยังนครเชียงใหม่ กรณีศึกษาของบริษัทผู้ส่งออกผักและผลไม้สด เพื่อระบุขั้นตอนและเวลาการทำงานของพนักงานให้เป็นมาตรฐาน

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงก่อนปรับปรุง

เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการปรับปรุงผ่านการจับเวลาแบบต่อเนื่อง (Continuous Timing) จำนวน 20 รอบโดยใช้แบบฟอร์มบันทึกเวลาในแต่ละงานย่อย ภายใต้อัตราความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หากชุดข้อมูลมีความเชื่อมั่นน้อยกว่าร้อยละ 95 จะทำการเก็บชุดข้อมูลเวลาเพิ่ม

3.3 การวิเคราะห์วิธีการทำงานก่อนปรับปรุง

เป็นการวิเคราะห์กระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงเพื่อหาสาเหตุและวิธีการปรับปรุงปัญหาโดยการสัมภาษณ์หัวหน้างานและพนักงานเกี่ยวกับขั้นตอนการทำงานด้วยเทคนิคการตั้งคำถาม 5W-1H และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิการไหล (Flow Process Chart), เวลามาตรฐาน (Standard Time) และการวิเคราะห์วิธีการ (Method Analysis) เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน

3.4 การปรับปรุงวิธีการทำงาน

เป็นการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานเพื่อลดความสูญเปล่าด้วยเทคนิค ECRS โดยกำจัดงานที่ไม่จำเป็นออกรวมงานที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันให้อยู่ในขั้นตอนเดียวกัน เรียงลำดับการทำงานให้มีความเหมาะสมมากขึ้น และหาวิธีการทำงานที่ง่ายขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการรวมถึงสามารถลดเวลานำ (Lead Time) และรอบเวลา (Cycle Time) ในการทำงานได้ จากนั้นนำวิธีการปรับปรุงที่ได้ไปปฏิบัติจริงเป็นระยะเวลา 1 เดือน แล้วจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลผ่านการจับเวลาแบบต่อเนื่อง (Continuous Timing) ในแต่ละงานย่อย ภายใต้อัตราความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และหาเวลามาตรฐานหลังปรับปรุงก่อนนำไปเปรียบเทียบชี้วัดผลวิธีการทำงาน

3.5 การเปรียบเทียบชีวิตการทำงาน

เป็นการเปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานระหว่างก่อนและหลังปรับปรุงโดยมีตัวชี้วัดคือเวลานำ (Lead Time) และรอบเวลา (Cycle Time) ในการทำงานให้สามารถลดลงได้มากกว่าร้อยละ 10 หากไม่สามารถลดได้ตามสมมติฐานจะทำการปรับปรุงวิธีการทำงานใหม่ เพื่อให้ตรงตามสมมติฐาน

3.6 การพัฒนามาตรฐานขั้นตอนการทำงาน

เป็นการพัฒนาขั้นตอนการทำงานให้เป็นมาตรฐานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติตามขั้นตอนการทำงานที่ปรับปรุงแล้วโดยมีการจัดทำคู่มือเกี่ยวกับรายละเอียดขั้นตอนการทำงานและเวลามาตรฐานในแต่ละงาน

3.7 จัดทำคู่มือมาตรฐานขั้นตอนการปฏิบัติงาน

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานต่อบริษัทโดยชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงและประโยชน์ที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุง และจัดทำคู่มือขั้นตอนการปฏิบัติงาน โดยที่ผู้วิจัยและผู้ปฏิบัติงานจริงได้พัฒนาคู่มือร่วมกัน เพื่อให้เหมาะสม สอดคล้อง และสามารถใช้งานได้อย่างจริงในสายการผลิตโดยที่ต้องคำนึงถึงขั้นตอนที่สามารถถ่ายทอดให้พนักงานอ่านและเข้าใจชัดเจนและง่ายต่อการสอนพนักงานทั้งเก่าและพนักงานใหม่

4. ผลการวิจัย

4.1 การศึกษากระบวนการและการตั้งปัญหา

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลจากบริษัท สามารถนำมาวิเคราะห์ตั้งแต่การได้รับคำสั่งซื้อจากลูกค้าจนกระทั่งขนส่งไปให้ลูกค้า เมื่อลูกค้าติดต่อสั่งซื้อกับบริษัท บริษัทจะทำการตรวจสอบคำสั่งการผลิต โดยเช็คตารางการผลิตว่าสามารถผลิตได้ตรงตามปริมาณและอยู่ในเวลาที่ลูกค้าต้องการได้หรือไม่ หากไม่สามารถทำได้จะปฏิเสธคำสั่งซื้อ หากสามารถทำได้จะทำการยืนยันคำสั่งซื้อ และติดต่อเกษตรกรในรายชื่อของบริษัท เพื่อทำการเช็คปริมาณมะม่วง หากเกษตรกรมีปริมาณมะม่วงเพียงพอกับความต้องการจะทำการสั่งซื้อมะม่วงจากเกษตรกรรายนั้น หากเกษตรกรมีปริมาณมะม่วงไม่เพียงพอกับความต้องการ

จะทำการติดต่อเกษตรกรรายอื่นเพิ่มเติม เมื่อเกษตรกรขนส่งมะม่วงมาบริษัท ทางบริษัทจะทำการสุ่มตรวจคุณภาพของมะม่วง คิดเป็นร้อยละ 1 ของน้ำหนักรวม โดยจะทำการเช็คน้ำหนักมะม่วงว่าได้ตรงตามคำสั่งซื้อหรือไม่ เช็คผิวมะม่วงว่าเกิดการชำรุด ถลอก แตกมีลายตำหนิมีรอยน้ำยางหรือไม่ และแบ่งมะม่วงออกตามเกรด สำหรับมะม่วงในฤดูกาล เกรด A มะม่วงลายได้สูงสุด 5% เกรด B มะม่วงลายได้สูงสุด 10% และเกรด C มะม่วงลายเกิน 10% สำหรับมะม่วงนอกฤดูกาล เกรด A ลายแบบบางเกรด B มะม่วงลายเข้มไม่เกิน 30% และกำหนดให้มะม่วงทั้งในและนอกฤดูกาลทุกเกรดจะต้องมีเปอร์เซ็นต์ความแก่ที่ 85% ขึ้นไปจากนั้นทำการเช็คจุดโรค (Anthracnose) ที่ผิวมะม่วงหากผ่านการตรวจสอบ มะม่วงก็จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการบรรจุหีบห่อ ซึ่งในกระบวนการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ การเตรียมบ่มน้ำยา เริ่มจากการนำมะม่วงมาตัดหัว จากนั้นรอน้ำยางสะเด็ดเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมะม่วงใส่ตะกร้าเพื่อทำการแช่น้ำยา โดยจะถูกแช่ทั้งหมด 5 อย่าง ได้แก่ อย่างคลอรีนเป็นเวลา 5 นาที อย่างน้ำร้อนเป็นเวลา 5 นาที อย่างน้ำเย็นเป็นเวลา 3 นาที อย่างน้ำยากันราเป็นเวลา 5 นาที และน้ำยาบ่มเป็นเวลา 2 วินาที จากนั้นทำการเช็คมะม่วงและนำไปบ่ม ส่วนที่ 2 คือ การบรรจุหีบห่อ เริ่มจากการนำมะม่วงที่ผ่านการบ่มแล้วมาคัดความสุก โดยให้มะม่วงที่มีความสุกใกล้เคียงกันอยู่ในตะกร้าเดียวกัน จากนั้นนำมะม่วงใส่กล่องให้มีน้ำหนัก 4.5 กิโลกรัมต่อกล่อง แล้วจึงทำการใส่โฟมเน็ต ภาชนะติดสติ๊กเกอร์ Q สติกเกอร์ที่อยู่ และทำการรัดสายกล่อง จากนั้นทำการเตรียมขนส่งไปยังสนามบินและส่งมอบให้แก่ลูกค้า

จากการสัมภาษณ์กับทางบริษัทพบว่ามีปัญหาดังนี้ การกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ไม่ชัดเจน ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอน พนักงานทำงานซ้ำซ้อน มีการจัดสรรอุปกรณ์ทำงานที่ไม่เหมาะสม และพื้นที่การทำงานมีความแออัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

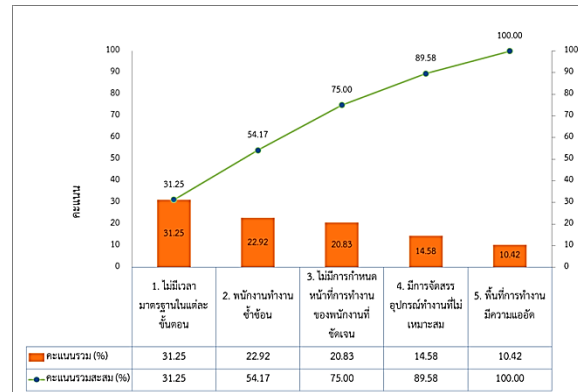
- 1) การกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ไม่ชัดเจน ปัจจุบันบริษัทไม่มีการกำหนดจำนวนพนักงานในแต่ละ

ละสถานีงานที่ชัดเจน ทำให้จำนวนพนักงานไม่สอดคล้องกับงาน เช่น เกิดการแย่งกันทำงานในบางช่วงเวลา และเกิดความแออัดในพื้นที่ทำงาน อาจส่งผลให้พนักงานมีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลง

- 2) ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอนปัจจุบันบริษัทไม่มีการกำหนดขั้นตอนการทำงานที่เป็นมาตรฐาน ทำให้พนักงานมีวิธีการทำงานที่แตกต่างกันตามความถนัดของแต่ละบุคคล ส่งผลให้เวลาในการทำงานมีความแตกต่างกันด้วย ทางบริษัทจึงไม่สามารถคาดการณ์ผลผลิตที่แน่นอนได้
- 3) พนักงานทำงานซ้ำซ้อนปัจจุบันพนักงานมีการหยิบมะม่วงเข้า – ออกจากกล่องมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นในบางสถานี ทำให้เกิดการดำเนินงานที่ไม่จำเป็นและเสียเวลาในการทำงาน
- 4) มีการจัดสรรอุปกรณ์ทำงานที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกสบายในการทำงานและเสียเวลาในการหยิบอุปกรณ์ เช่น ในการติดสติ๊กเกอร์ที่อยู่จะต้องมีการติดสติ๊กเกอร์ที่อยู่ลูกค้า ที่อยู่บริษัท และวันทานซึ่งพนักงานวางสติ๊กเกอร์ปะปนกัน ทำให้ต้องใช้เวลาในการค้นหา
- 5) พื้นที่การทำงานมีความแออัดปัจจุบันบริษัทเป็นอาคารพาณิชย์ซึ่งมีพื้นที่คับแคบและไม่เหมาะสมกับกระบวนการทำงาน ทำให้พนักงานทำงานได้ไม่สะดวกและไม่สามารถเพิ่มสายการผลิต

จากการศึกษากระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การเตรียมบ่มน้ำยา และ 2) การบรรจุหีบห่อ

จากการสัมภาษณ์กับทางบริษัทพบว่ามีปัญหา 5 ปัญหา ซึ่งผู้วิจัยให้ค่าน้ำหนักของความเป็นไปได้ในการแก้ไขปัญหา ความรุนแรงของปัญหา นโยบายในการแก้ไขปัญหา และความเร่งด่วนในการแก้ไขปัญหาเป็นร้อยละ 25 เท่ากันทุกด้าน เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการและนโยบายของบริษัท โดยใช้แผนภูมิพาเรโต แสดงลำดับความสำคัญของปัญหา

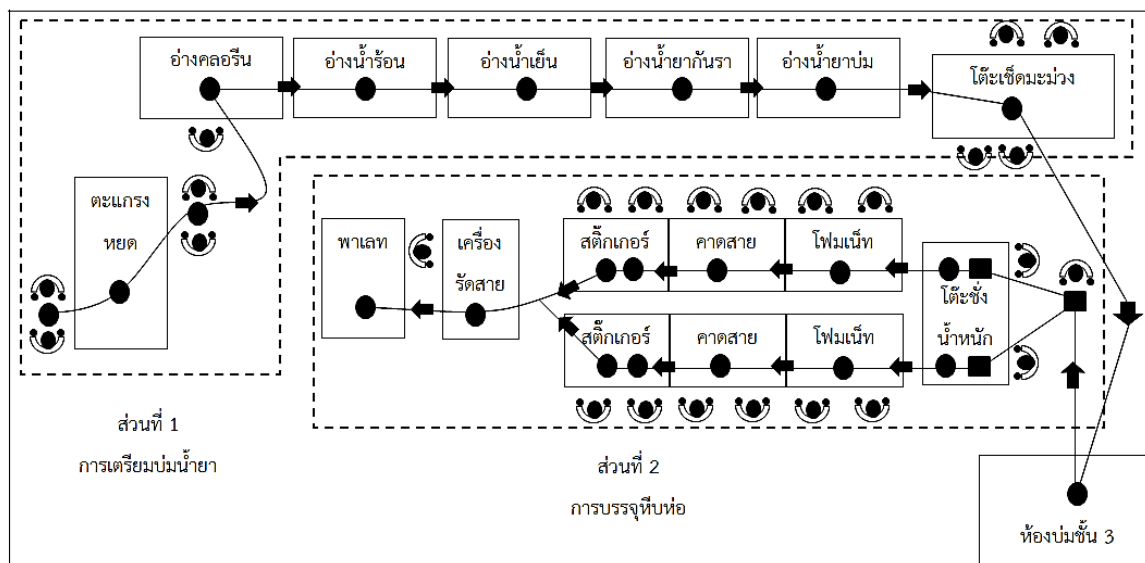


รูปที่ 2 แผนภูมิพาเรโต

จากแผนภูมิพาเรโตดังรูปที่ 2 แสดงร้อยละตามลำดับความสำคัญของหัวข้อปัญหา ซึ่งปัญหาที่ควรได้รับการแก้ไขเป็นลำดับแรกคือ ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอนคิดเป็นร้อยละ 31.25 ปัญหารองลงมาคือพนักงานทำงานซ้ำซ้อน ไม่มีการกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ชัดเจน มีการจัดสรรอุปกรณ์ทำงานที่ไม่เหมาะสม และพื้นที่การทำงานมีความแออัด คิดเป็นร้อยละ 22.92, 20.83, 14.58 และ 10.42 ตามลำดับ

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกแก้ปัญหา 3 อันดับแรกตามความต้องการเบื้องต้นของผู้บริหาร โดยการปรับปรุงกระบวนการจะต้องสามารถกำหนดเวลาและขั้นตอนการทำงานที่เป็นมาตรฐานให้แก่พนักงานได้ ลดความซ้ำซ้อนของการทำงานได้ และสามารถกำหนดหน้าที่การทำงานที่ชัดเจนให้แก่พนักงานได้ ซึ่งยังคงตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของมะม่วง

หลังจากนั้นได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลกระบวนการผลิตในส่วนกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงในสภาพปัจจุบัน โดยใช้แผนผังการไหล (Flow Process Diagram) และแผนภูมิการไหล (Flow Process Chart) ของมะม่วง ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 แผนผังการไหล (Flow Diagram) ของระบบน้ำในกระบวนการบรรจุหีบห่อ ก่อนการปรับปรุง

4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลในการบรรจุหีบห่อระบบน้ำก่อนปรับปรุง

จากการเก็บข้อมูลเวลาสามารถนำมาคำนวณหาเวลาปกติและเวลามาตรฐาน ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 เวลาปกติและเวลามาตรฐานในแต่ละงานของการเตรียมบ่มน้ำยา

งาน ที่	ชื่องาน	จำนวนพนักงานต่อ หน่วยการทำงาน (คน)	หน่วยการ ทำงาน	เวลาปกติ (วินาที)	เวลาส่วนเผื่อ (ร้อยละ)	เวลามาตรฐาน (วินาทีต่อกิโลกรัม)
1	ตัดขั้วมะม่วง	2	1 ตะกร้า	45.8	16	10.9
2	หีบมะม่วง	2	1 ตะกร้า	67.9	16	6.6
3	แช่น้ำยา	1	6 ตะกร้า	1245.0	27	22.5
4	เชื่อมมะม่วง	2	1 ตะกร้า	79.9	12	6.3

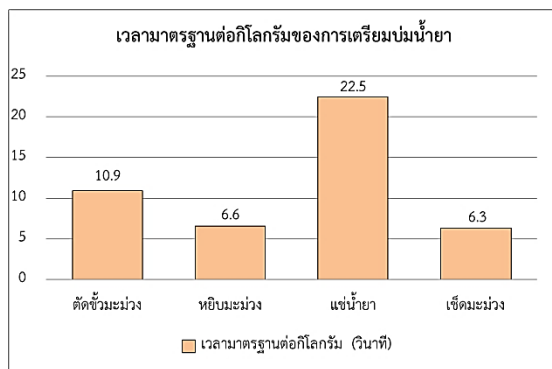
ตารางที่ 2 เวลาปกติและเวลามาตรฐานในแต่ละงานของของการบรรจุหีบห่อ

งาน ที่	ชื่องาน	จำนวนพนักงานต่อ หน่วยการทำงาน (คน)	หน่วยการ ทำงาน	เวลาปกติ (วินาที)	เวลาส่วนเพื่อ (ร้อยละ)	เวลามาตรฐาน (วินาทีต่อกิโลกรัม)
1	คัดมะม่วง	1	1 ตะกร้า	57.2	32	6.2
2	ชั่งน้ำหนัก	1	1 กล่อง	46.1	16	5.9
3	ใส่โฟมเนื้ท	1	1 กล่อง	120.2	14	30.4
4	คาดสาย	1	1 กล่อง	115.2	14	29.2
5	สตีกเกอร์ Q	1	1 กล่อง	36.8	14	9.3
6	สตีกเกอร์ที่อยู่	1	1 กล่อง	37.8	16	9.6
7	รัดสายกล่อง	1	1 กล่อง	18.3	13	4.6

หมายเหตุ : 1 ตะกร้า $\approx$ 12 กิโลกรัม และ 1 กล่อง $\approx$ 4.5 กิโลกรัม

4.3 การวิเคราะห์วิธีการทำงานก่อนปรับปรุง

4.3.1 จากการคำนวณหาเวลามาตรฐานของการเตรียมบ่ม น้ำยาสามารถแสดงเป็นกราฟ ดังรูปที่ 4



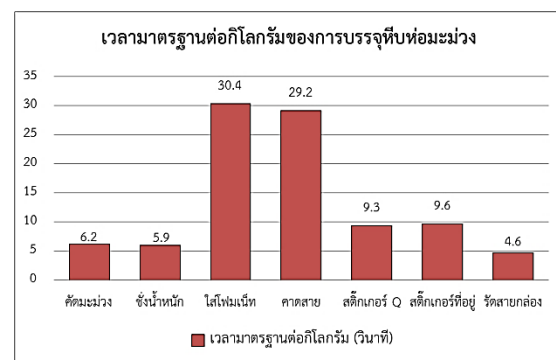
รูปที่ 4 กราฟเวลามาตรฐานต่อกิโลกรัมของ
การเตรียมบ่มน้ำยา

จากกราฟเวลามาตรฐานของงานตัดขั้วมะม่วงอยู่ที่ 10.9 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานหีบมะม่วงอยู่ที่ 6.6 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานแช่น้ำยาอยู่ที่ 22.5 วินาทีต่อกิโลกรัม และเวลามาตรฐานของงานเช็ดมะม่วงอยู่ที่ 6.3 วินาทีต่อกิโลกรัม โดยรอบเวลาในการเตรียมบ่มน้ำยาอยู่ที่ 22.5 วินาทีต่อกิโลกรัม

จะเห็นได้ชัดที่เป็นคอขวดของกระบวนการ คือ งานแช่น้ำยาทำให้มะม่วงเกิดการรอคอยเป็นเวลา 15.9 วินาทีต่อกิโลกรัมก่อนการแช่น้ำยา และพนักงานเช็ดมะม่วงเกิด

การว่างงาน 16.2 วินาทีต่อกิโลกรัม ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกงานแช่น้ำยานี้มาตั้งคำถามเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุง

4.3.2 จากการคำนวณหาเวลามาตรฐานของการบรรจุหีบห่อมะม่วงสามารถแสดงเป็นกราฟ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟเวลามาตรฐานต่อกิโลกรัมของ
การบรรจุหีบห่อมะม่วง

จากกราฟเวลามาตรฐานของงานคัดมะม่วงอยู่ที่ 6.2 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานชั่งน้ำหนักอยู่ที่ 5.9 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานใส่โฟมเนื้ทอยู่ที่ 30.4 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานคาดสายอยู่ที่ 29.2 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานสตีกเกอร์ Q อยู่ที่ 9.3 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานสตีกเกอร์ที่อยู่อยู่ที่ 9.6 วินาทีต่อกิโลกรัม และเวลามาตรฐานของงานรัดสายกล่องอยู่ที่ 4.6

วินาทีต่อกิโกรัมโดยรอบเวลาในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงอยู่ที่ 30.4 วินาทีต่อกิโกรัม

จะเห็นได้เวลามาตรฐานของงานใส่โฟมเน็ทและคาดสายสูงกว่าเวลามาตรฐานในงานอื่นๆมาก จึงทำให้เกิดคอขวดของกระบวนการ คือ มะม่วงเกิดการรอคอยเป็นเวลา 24.5 วินาทีต่อกิโกรัม ก่อนการใส่โฟมเน็ท และพนักงานติดสติ๊กเกอร์ Q เกิดการว่างงาน 19.9 วินาทีต่อกิโกรัม

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกงานใส่โฟมเน็ทและคาดสายนี้มาตั้งคำถามเพื่อทำการออกแบบสายการผลิตใหม่และ

ปรับปรุงการทำงานในบางขั้นตอนให้มีความสมดุลกันมากที่สุด

จากกราฟจะเห็นได้เวลามาตรฐานของงานใส่โฟมเน็ทและคาดสายสูงกว่าเวลามาตรฐานในงานอื่นๆมาก จึงทำให้เกิดคอขวดของกระบวนการ คือ มะม่วงเกิดการรอคอยเป็นเวลา 24.5 วินาทีต่อกิโกรัมก่อนการใส่โฟมเน็ท และพนักงานติดสติ๊กเกอร์ Q เกิดการว่างงาน 19.9 วินาทีต่อกิโกรัม

เมื่อทราบถึงจุดที่เป็นปัญหาในกระบวนการแล้ว จึงทำการตั้งคำถาม Why-Why Chart เพื่อหาแนวทางการแก้ไข ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปแนวทางการแก้ไข

งาน	ขั้นตอนการทำงานในปัจจุบัน	แนวทางการแก้ไข
1. แขน้ำยา	นำมะม่วงมาแช่น้ำยาคลอรีน 5 นาที, น้ำร้อน 5 นาที, น้ำเย็น 3 นาที, น้ำยากันรา 5 นาที และน้ำยาบ่ม 2 วินาที โดยใช้พนักงาน 1 คน	ยังคงขั้นตอนเดิมเนื่องจากการควบคุมคุณภาพของมะม่วง
2. ใส่โฟมเน็ท	หยิบและพับโฟมเน็ท จากนั้นนำมะม่วงใส่โฟมเน็ทโดยใช้พนักงาน 1 คนต่อกล่อง	ให้พนักงาน 1 คนพับโฟมเน็ท และพนักงาน 1 คนนำมะม่วงใส่โฟมเน็ท
3. คาดสาย	ลอกและคาดสายสติ๊กเกอร์รอบมะม่วงโดยใช้พนักงาน 1 คนต่อกล่อง	ยังคงขั้นตอนเดิม แต่เพิ่มพนักงานเป็น 2 คนต่อกล่องโดยขึ้นตรงข้ามกัน
4. ติดสติ๊กเกอร์ Q	ลอกและติดสติ๊กเกอร์ Q บนมะม่วงโดยใช้พนักงาน 1 คนต่อกล่อง	รวมสถานีงาน โดยใช้พนักงาน 1 คนต่อกล่องในการติดสติ๊กเกอร์ Q และที่อยู่ตามลำดับ
5. ติดสติ๊กเกอร์ที่อยู่	ติดสติ๊กเกอร์ที่อยู่ พร้อมระบุจำนวนลูกและสายพันธุ์บนกล่อง โดยใช้พนักงาน 1 คนต่อกล่อง	

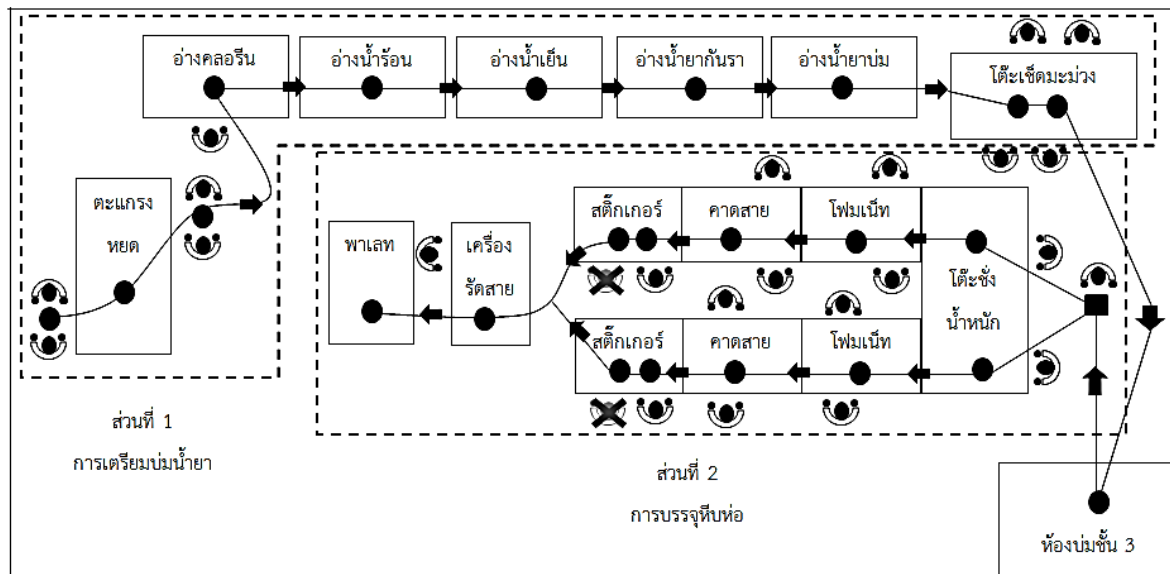
4.4 การปรับปรุงวิธีการทำงาน

จากลำดับความสำคัญของปัญหา 3 อันดับแรก ได้แก่ การกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ไม่ชัดเจน พนักงานทำงานซ้ำซ้อน และไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอน จึงได้ทำการหาเวลามาตรฐานในแต่ละงานเพื่อให้ทราบถึงสภาพปัจจุบันของบริษัท และจากการสัมภาษณ์เพื่อสอบถามถึงสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้นำเทคนิควิศวกรรมอุตสาหกรรมมาใช้ในปรับปรุงขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) งานใส่โฟมเน็ทและคาดสายให้พนักงานทำงาน 2 คนต่อกล่องเป็นการนำเทคนิค Line Balancing มาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาคอขวด โดยในงานใส่โฟมเน็ทให้พนักงานคนที่ 1 ทำการพับโฟมเน็ท พนักงานคนที่ 2 นำมะม่วงใส่โฟมเน็ท และกำหนดให้พนักงานขึ้นตำแหน่งตรงข้ามกัน ในงานคาดสายให้พนักงานทั้ง 2 คนทำงานเหมือนกัน ซึ่งยังคงทำตามขั้นตอนเดิม และกำหนดให้พนักงานขึ้นตำแหน่งตรงข้ามกัน

2) รวมสถานีของงานติดสตีกเกอร์ Q และที่อยู่เข้าด้วยกันเป็นการนำเทคนิค ECRS: Combine มาใช้เพื่อลดการว่างงานของพนักงาน โดยใช้พนักงาน 1 คน ติดสตีกเกอร์ Q และที่อยู่ตามลำดับ

จากแนวทางการปรับปรุงข้างต้นสามารถเขียนเป็นแผนผังการไหล (Flow Diagram) ของมะม่วงในการบรรจุหีบห่อได้ดังนี้



รูปที่ 6 แผนผังการไหล (Flow Diagram) ของมะม่วงในกระบวนการบรรจุหีบห่อหลังปรับปรุง

จากการเก็บชุดข้อมูลเวลาหลังปรับปรุงจำนวน 20 ชุดข้อมูล สามารถนำมาหาเวลาปกติ โดยมีการคำนวณเช่นเดียวกันกับก่อนปรับปรุง ภายได้ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หากชุดข้อมูลมีความเชื่อมั่นน้อยกว่าร้อยละ 95 จะทำการคำนวณหาจำนวนชุดข้อมูลที่เหมาะสม และเก็บ

ข้อมูลเวลาตามที่คำนวณได้จากนั้นนำมาคำนวณหาเวลาปกติจากเวลาตัวแทน (Representative Time) และการประเมินอัตราการทำงานของพนักงานได้ ดังตารางที่ 4.12 และคำนวณหาเวลามาตรฐาน จากเวลาปกติรวมกับค่าเผื่อได้ ดังตารางที่ 4

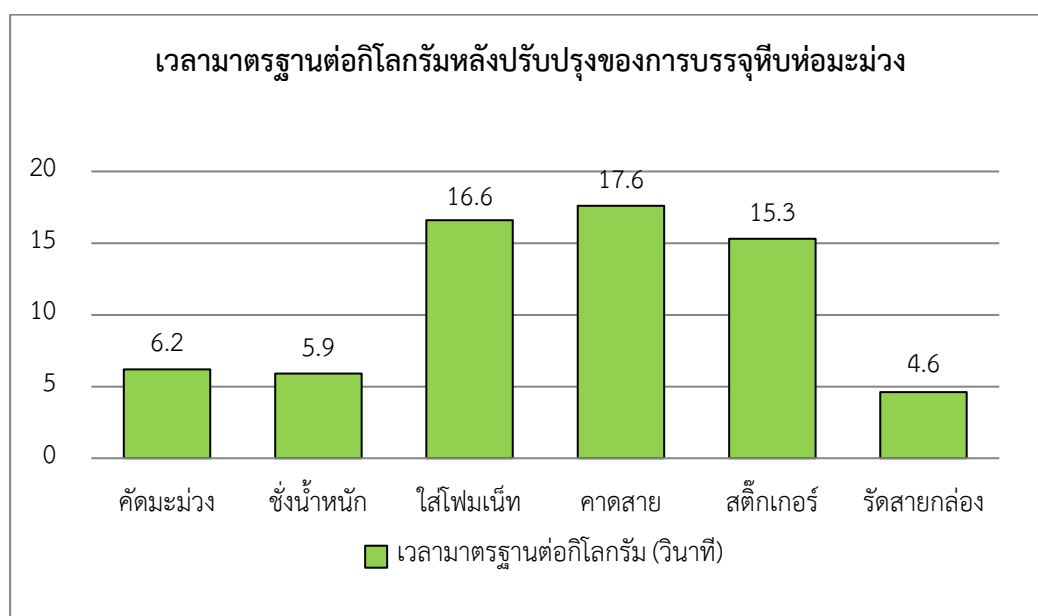
ตารางที่ 4 เวลาปกติในแต่ละงานของของการบรรจุหีบห่อ

งานที่	ชื่องาน	จำนวนพนักงานต่อหน่วยการทำงาน (คน)	หน่วยการทำงาน	เวลาปกติ (วินาที)
1	คัดมะม่วง	1	1 ตะกร้า	57.2
2	ชั่งน้ำหนัก	1	1 กล่อง	46.1
3	ใส่โฟมเน็ต	2	1 กล่อง	65.6
4	คัดสาย	2	1 กล่อง	69.5
5	สตีกเกอร์	1	1 กล่อง	60.4
6	รัดสายกล่อง	1	1 กล่อง	18.3

ตารางที่ 5 เวลามาตรฐานในแต่ละงานของการบรรจุหีบห่อ

งานที่	ชื่องาน	จำนวนพนักงานต่อสถานี (คน)	หน่วยการทำงาน	เวลาส่วนเผื่อ (ร้อยละ)	เวลามาตรฐาน (วินาทีต่อกิโลกรัม)
1	คัดมะม่วง	1	1 ตะกร้า	32	6.2
2	ชั่งน้ำหนัก	1	1 ถัง	16	5.9
3	ใส่โฟมנית	2	1 ถัง	14	16.6
4	คาดสาย	2	1 ถัง	14	17.6
5	สตักเกอร์	1	1 ถัง	14	15.3
6	รัดสายกล่อง	1	1 ถัง	16	4.6
รวม		8	-	-	66.2

หมายเหตุ 1 ตะกร้า $\approx$ 12 กิโลกรัม และ 1 ถัง $\approx$ 4.5 กิโลกรัม



รูปที่ 7 กราฟเวลามาตรฐานต่อกิโลกรัมหลังปรับปรุงของการบรรจุหีบห่อมะม่วง

จากกราฟเวลามาตรฐานของงานคัดมะม่วงอยู่ที่ 6.2 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานชั่งน้ำหนักอยู่ที่ 5.9 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานใส่โฟมניתอยู่ที่ 16.6 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานคาดสายอยู่ที่ 17.6 วินาทีต่อกิโลกรัม เวลามาตรฐานของงานสตักเกอร์อยู่ที่ 15.3 วินาทีต่อกิโลกรัม และเวลา

มาตรฐานของงานรัดสายกล่องอยู่ที่ 4.6 วินาทีต่อกิโลกรัม โดยรอบเวลาหลังปรับปรุงในการบรรจุหีบห่อมะม่วงอยู่ที่ 17.6 วินาทีต่อกิโลกรัม

4.5 การเปรียบเทียบชี้วัดผลวิธีการทำงาน

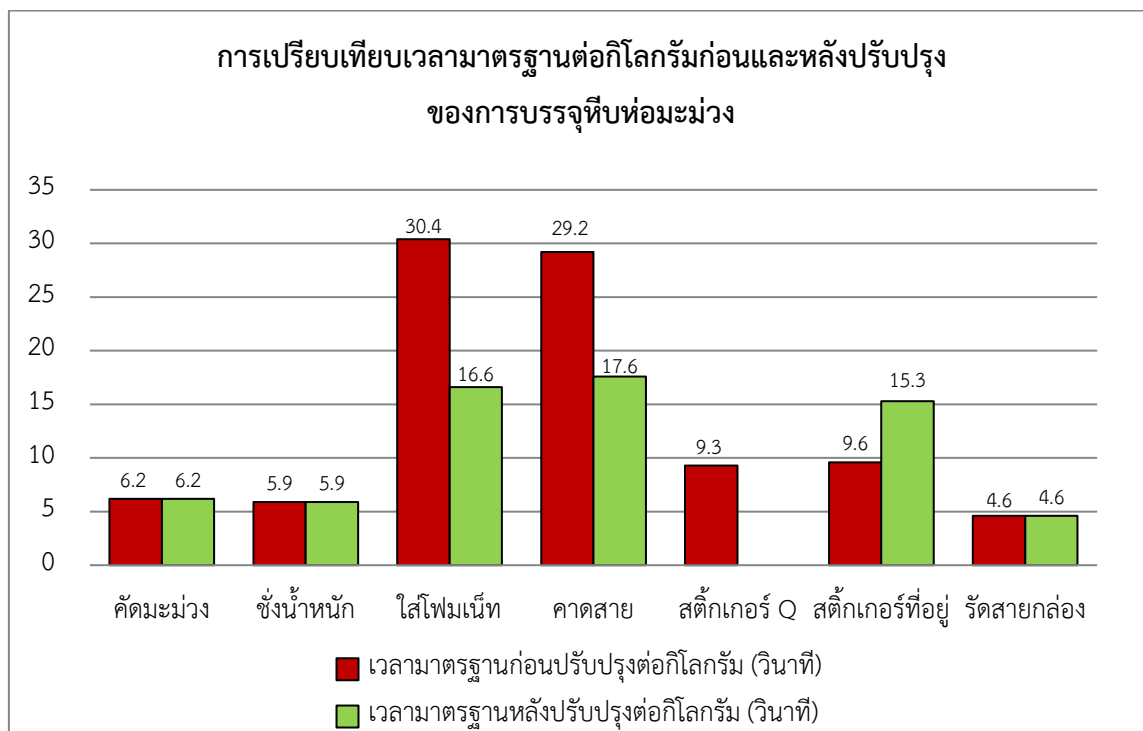
จากการวิเคราะห์ข้อมูลก่อนและหลังปรับปรุง สามารถเปรียบเทียบเวลามาตรฐานได้ดังนี้

ตารางที่ 6 เวลามาตรฐานก่อนและหลังปรับปรุงในแต่ละงานของการบรรจุหีบห่อ

งานที่	ชื่องาน	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง	
		จำนวนพนักงานต่อสถานี (คน)	เวลามาตรฐาน (วินาทีต่อกิโลกรัม)	จำนวนพนักงานต่อสถานี (คน)	เวลามาตรฐาน (วินาทีต่อกิโลกรัม)
1	คัดมะม่วง	1	6.2	1	6.2
2	ชั่งน้ำหนัก	1	5.9	1	5.9
3	ใส่โฟมเนื้	2	30.4	2	16.6
4	คาดสาย	2	29.2	2	17.6
5	สตีกเกอร์ Q	1	9.3	1	15.3
6	สตีกเกอร์ที่อยู่	1	9.6		
7	รัดสายกล่อง	1	4.6	1	4.6
รวม		9	95.2	8	66.2

จากตารางจะเห็นได้ว่า เวลามาตรฐานในการทำงานก่อนปรับปรุงเป็น 95.2 วินาทีต่อกิโลกรัม หลังปรับปรุงเป็น 66.2 วินาทีต่อกิโลกรัม ลดลง 29.0 วินาทีต่อกิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 30.5 ซึ่งเป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานหลัก คือ สามารถลดเวลาในการทำงานได้มากกว่าร้อยละ 10 และรอบเวลาในการทำงานก่อนปรับปรุงเป็น 30.4 วินาทีต่อกิโลกรัม หลังปรับปรุงเป็น 17.6 วินาทีต่อกิโลกรัม

ลดลง 12.8 วินาทีต่อกิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 42.1 ซึ่งเป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานหลัก คือ สามารถลดรอบเวลาในการทำงานได้มากกว่าร้อยละ 10 และจากการรวมสถานีของงานสตีกเกอร์ Q และที่อยู่เข้าด้วยกันทำให้สามารถลดจำนวนพนักงานในสถานีนั้นจากเดิม 2 คนเป็น 1 คนต่อสายการผลิต และกำหนดจำนวนพนักงานในแต่ละสถานีดังแสดงในตาราง 4.11



รูปที่ 8 กราฟการเปรียบเทียบเวลามาตรฐานต่อกิโลกรัมก่อนและหลังปรับปรุง

4.6 การพัฒนามาตรฐานขั้นตอนการทำงาน

จากผลการปรับปรุงที่สามารถลดเวลานำและรอบเวลาในการทำงานได้มากกว่าร้อยละ 10 จึงได้กำหนดให้เป็นมาตรฐานโดยการจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานและระบุเวลามาตรฐานรวมถึงจำนวนพนักงานที่ใช้ในแต่ละงานเพื่อให้พนักงานเดิมและพนักงานใหม่สามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 ผู้วิจัยได้ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในบริษัทกรณีศึกษาของบริษัทผู้ส่งออกผักและผลไม้สด ในส่วนของกระบวนการบรรจุหีบห่อกล่องน้ำหนักรวม 4.5 กิโลกรัมของมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทอง เพื่อส่งออกไปนครเชียงใหม่ เนื่องจากเป็นสินค้าหลักของบริษัทซึ่งคิดเป็นร้อยละ 80 ของสินค้าทั้งหมด โดยปัญหาที่เลือกนำมาปรับปรุงด้วยการใช้หลักของพาเรโต ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอนส่งผลให้เวลาในการทำงานมีความแตกต่างกัน เนื่องจากพนักงานมีวิธีการทำงานที่แตกต่างกันตามความถนัดของแต่ละบุคคลทางบริษัทจึงไม่สามารถคาดการณ์ผลผลิตที่แน่นอนได้ 2) พนักงานทำงานซ้ำซ้อนปัจจุบันพนักงานมีการหยิบมะม่วงเข้า - ออกจากกล่องมากเกินไปจนเกิดความจำเป็นในบางสถานการณ์ ทำให้เกิดการทำงานที่ไม่จำเป็นและเสียเวลาในการทำงาน 3) ไม่มีการกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ชัดเจนทำให้จำนวนพนักงานไม่สอดคล้องกับงาน เช่น เกิดการแย่งกันทำงานในบางช่วงเวลา และเกิดความแออัดในพื้นที่ทำงาน อาจส่งผลให้พนักงานมีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงผู้วิจัยจึงปรับปรุงปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย คือสามารถลดเวลานำ (Lead Time) และรอบเวลา (Cycle Time) ในการทำงานลงได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของมะม่วงและยังคงตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า

การปรับปรุงในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการจัดสมดุลสายการผลิต (Line Balancing) และหลักการ ECRS

เพื่อให้กระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงของบริษัทมีประสิทธิภาพมากขึ้น และวิธีการปฏิบัติงานที่กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการปรับปรุงในกระบวนการบรรจุหีบห่อผลไม้ชนิดอื่น ๆ ให้แก่บริษัทได้ ข้อมูลที่ผู้วิจัยนำมาวิเคราะห์นั้นมาจากการจับเวลาจริงในกระบวนการบรรจุหีบห่อมะม่วงสดพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองและการปรับปรุงครั้งนี้สามารถลดเวลานำในการทำงาน (Lead Time) ลง 29.0 วินาทีต่อกิโลกรัม จากเดิม 95.2 วินาทีต่อกิโลกรัม เป็น 66.2 วินาทีต่อกิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 30.5 และลดรอบเวลาในการทำงาน (Cycle Time) ลงได้ 12.8 วินาทีต่อกิโลกรัม จากเดิม 30.4 วินาทีต่อกิโลกรัม เป็น 17.6 วินาทีต่อกิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 42.1 โดยการกำหนดมาตรฐานการปฏิบัติงานในครั้งนี้ ผู้วิจัยเชื่อมั่นว่าคู่มือการปฏิบัติงานทำให้กระบวนการบรรจุหีบห่อมีประสิทธิภาพมากขึ้นและบริษัทสามารถวางแผนการผลิตได้ดียิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะพบว่าจากกรณีศึกษาที่ผู้วิจัยได้ปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ 3 ปัญหา คือ ไม่มีเวลามาตรฐานในแต่ละขั้นตอน พนักงานทำงานซ้ำซ้อน และไม่มีกำหนดหน้าที่การทำงานของพนักงานที่ชัดเจน ซึ่งปัญหาที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุง คือการจัดสรรอุปกรณ์ทำงานที่ไม่เหมาะสม และพื้นที่การทำงานมีความแออัด ดังนั้นเพื่อให้การปรับปรุงสามารถครอบคลุมความต้องการของผู้บริหาร งานวิจัยในอนาคตที่ผู้วิจัยสนใจที่จะดำเนินการศึกษาต่อ คือ จัดสรรอุปกรณ์และพื้นที่การทำงาน เพื่อให้พนักงานสามารถทำงานได้สะดวกและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

นอกจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว บริษัทยังมีปัญหาในการสั่งซื้อและจัดเก็บบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสมกับปริมาณความต้องการใช้งานจริง ซึ่งเป็นอีกงานวิจัยหนึ่งที่ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษา เนื่องจากทำให้เกิดต้นทุนจมและมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น เช่น ค่าใช้จ่ายในการเช่าพื้นที่จัดเก็บบรรจุภัณฑ์ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น ดังนั้นหากสามารถคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมจะมีส่วนช่วยลดต้นทุนให้กับบริษัทได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาและบุคลากรซึ่ง
ผู้ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและรวมถึง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการ
ทำงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถิติการส่งออก. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export.php.
- [2] อภัสสร ศิริจริยวัตร, กอบชัย คำศรีพล, และ สุกฤษ กำนัดพันธุ์. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงสุกตัดแต่งในระหว่างการเก็บรักษาแบบแช่เย็น. *วารสารแก่นเกษตร*, 2558; 43(1): 851-856.
- [3] วิทยา สุหฤทธดำรง, ยุพา กลอนกลาง, และสุนทร ศรีลังกา. มุ่งสู่สินค้าด้วยการจัดการสายธารคุณค่า : Value Stream Management 8 ขั้นตอนในการวางแผน วาดผัง และรักษาการปรับปรุงแบบลีนให้ยั่งยืน. บริษัท อี.ไอ.สแควร์ พับลิชชิง จำกัด, 2550.
- [4] โครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืช. มะม่วง. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.rspg.or.th/plants_data/kp_bot_garden/kpb_02-3.htm.
- [5] จักรกฤษณ์ วันดี. การเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการด้านระบบสารสนเทศ. วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยสยาม, 2557.
- [6] รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. การศึกษางานอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์ท็อป, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2550.
- [7] ปริญญ์ พัฒนวัฒน์พร. แนวทางการประยุกต์ใช้เทคนิควิศวกรรมอุตสาหกรรมเข้าไปช่วยแก้ปัญหาให้กับภาคธุรกิจอุตสาหกรรมขนาดเล็กของไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2550.
- [8] คลอเคลีย วจนะวิชากร และ เชษฐ ศรีโมตรี. การพัฒนาปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโรงผลิตน้ำดื่มบรรจุขวด มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี. *วารสารการเกษตรราชภัฏ*, 2555; 11(2).
- [9] Chueprasert, M. and Ongkunaruk, P. Productivity Improvement Based Line Balancing: A Case Study of Pasteurized Milk Manufacturer. *International Food Research Journal*, 2015; 22(6): 2313-2317.



การลดเวลาติดตั้งและปรับแต่งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

Reducing Setup and Adjustment Time of Plastic Injection Mold

ชุติกานจน์ ลิธีระ* ณัฐธิชา หมั่นชิด และ นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

Chutikan Leetera*, Natticha Munkeed and Ninlawan Choomrit

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ,

63 หมู่ 7 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,
63 Moo 7, Rangsit-nakhonnayok Road, Ongkharak District, Nakhon Nayok 26120

*E-mail : chutikan.sand@gmail.com, ninlawan@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการปรับลดเวลาการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ของกระบวนการฉีดพลาสติกในโรงงานตัวอย่าง จากการสำรวจกระบวนการฉีดพลาสติกพบว่า เครื่องฉีดพลาสติกแบบสองหัว ขนาด 260 ตัน มีการสูญเสียเวลาในการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์นานถึง 194.36 นาที โดยมีกิจกรรมที่ใช้เวลานานประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) การดำเนินการแก้ไขในส่วนของการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ คือ การเตรียมอุปกรณ์ การถอด/ต่อสายน้ำ และการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการไข Clamp และ 2) การดำเนินการแก้ไขในส่วนของการปรับค่าพารามิเตอร์ จึงเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว เพื่อแยกกิจกรรมการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ออกเป็นงานภายใน (งานที่จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักรเท่านั้น จึงจะทำได้) และงานภายนอก (งานที่ไม่จำเป็นต้องหยุดเครื่องจักร) นำงานภายนอกไปทำคู่ขนานกับงานภายใน และปรับปรุงงานภายในและงานภายนอก เพื่อลดเวลาการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ให้ลดลง โดยเลือกเฉพาะงานภายในที่ใช้เวลาปรับเปลี่ยนมากกว่า 5 นาที และงานทั้งหมดที่ได้ดำเนินการแก้ไขแล้วทั้งสองส่วนข้างต้น ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ปัญหาด้วยคำถาม ทำไม-ทำไม ร่วมกับการควบคุมด้วยการมองเห็น การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ผลการแก้ไขปรับปรุงพบว่า เวลาในการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์จาก 194.36 นาที เหลือ 131.40 นาที เวลาที่ลดลง คือ 62.56 นาที คิดเป็นร้อยละ 32.19

ABSTRACT

The objective of this research paper is to search for setup-time reduction in mold change of injection process. From surveying in a plastic injection process, an injection molding machine in 260 tons capacity with two-nozzle type takes long setup time in mold change about 194.36 minutes. There are two main activities 1) mold change: preparing tools, connecting water pipes and changing tool in fixing clamp and 2) parameter adjustment. Quick changeover technique; separate internal activities (those can only be performed when the machine is stopped) and external activities (those can be done while the machine is still running), convert internal to external activities and streamline all activities, is applied to reduce setup time. Internal activities with setup time five minutes more are selected then utilize why-why analysis, visual control, tool replacement and preventive maintenance as improvement tools. The result reveals that setup time is decreased from 194.36 minutes to 131.40 minutes. Reduction time is 62.56 minutes which is 32.19%.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมพลาสติกมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจชาติ ในสภาวะการณ์ปัจจุบันธุรกิจทุกแขนงมีการแข่งขันทางการค้าที่รุนแรง ลูกค้ามีความต้องการสินค้าที่มีความหลากหลายในเวลาอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องประสบปัญหาการแข่งขันระหว่างผู้ประกอบการเป็นจำนวนมากการเพิ่มอัตราการผลิตและการปรับปรุงการทำงานจึงเป็นหัวใจสำคัญของการอยู่รอดทางธุรกิจและการเติบโตทางอุตสาหกรรม

โรงงานตัวอย่างเป็นผู้รับจัดชิ้นงานพลาสติกตามความต้องการของลูกค้าในอุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องฉีดพลาสติกมีตั้งแต่ขนาดเล็ก 35 ตัน ถึงขนาดใหญ่ 450 ตัน จากการสำรวจข้อมูลกระบวนการฉีดพลาสติกพบว่าการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์แต่ละครั้งจะใช้เวลานานประมาณ 3 ชั่วโมงก่อนที่จะเริ่มผลิตจริง โดยขั้นตอนเริ่มจากการเตรียมแม่พิมพ์ตามแผนการผลิต เตรียมเม็ดพลาสติก เปลี่ยนแม่พิมพ์ และทำการฉีดตามพารามิเตอร์มาตรฐานทางคณะผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางในการลดเวลาของการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์โดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว ร่วมกับหลักการลดความสูญเปล่า ECRS (การกำจัด Eliminate, การรวมกัน Combine, การจัดใหม่ Rearrange และการทำให้ง่าย Simplify) โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อหาแนวทางในการปรับลดเวลาการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ของกระบวนการฉีดพลาสติกในโรงงานตัวอย่าง ขอบเขตการวิจัยจะศึกษาเฉพาะเครื่องฉีดพลาสติกขนาด 260 ตันซึ่งเป็นเครื่องฉีดแบบสองหัวและใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลักของโรงงาน

2. การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว

การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว (Quick Changeover) [1] เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดเวลาปรับเปลี่ยนเครื่องจักรหรือปรับเปลี่ยนชิ้นงานโดยมีเป้าหมายให้ใช้เวลาปรับต่ำกว่า 10 นาที เพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต เป็นเทคนิคสำคัญที่

นำเอาหลักการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) มาปฏิบัติ ขั้นตอนการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ งานภายใน (Internal Setup) และงานภายนอก (External Setup) งานภายใน หมายถึง งานที่สามารถทำได้ก็ต่อเมื่อเครื่องจักรต้องหยุดทำงานเท่านั้น เช่น การถอดสายน้ำออกจากแม่พิมพ์ เป็นต้น งานภายนอก หมายถึง งานที่สามารถทำได้ในขณะที่เครื่องจักรกำลังทำงานอยู่ เช่น การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ เป็นต้น ขั้นตอนการดำเนินการมี 3 ขั้นตอน คือ

1) แยกงานภายในและงานภายนอกออกจากกัน (Separate Internal and External Setup)

ส่วนนี้จะมีการที่ทั้งงานภายในและงานภายนอกปะปนกันอยู่ ให้แยกให้ออกว่า อะไรคืองานภายในและงานภายนอกจริง ๆ ให้นำกิจกรรมที่เป็นงานภายนอกมาทำก่อนที่เครื่องจักรจะหยุด และจะเหลืองานที่เป็นงานภายในจริง ๆ

2) เปลี่ยนงานภายในให้เป็นงานภายนอก (Convert Internal to External Setup)

ขั้นตอนนี้จะเป็นงานภายในล้วน ๆ ที่จะต้องเปลี่ยนออกมาให้เป็นงานภายนอก โดยอาจทำการจัดเตรียมสภาวะการปฏิบัติงานไว้ล่วงหน้า หรือการวิเคราะห์งานภายในแต่ละกิจกรรมอย่างละเอียดเพื่อหาแนวทางการปรับเปลี่ยนเป็นงานภายนอก

3) ทำการปรับปรุงงานทั้งสองประเภท (Further Improvement on both Setup Operations)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับปรุงทั้งงานภายในและงานภายนอกให้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น ใช้การควบคุมด้วยการมองเห็น (Visual Control) การปฏิบัติงานแบบคู่ขนาน (Parallel Operations)

เทคนิคการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็วถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนประกอบของอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [2, 3] การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยระบบสุญญากาศ [4] และการเพิ่มประสิทธิผลโดยรวมในกระบวนการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก [5] นอกจากนี้ยังพบการนำเทคนิคนี้ไปใช้ร่วมกับเครื่องมือในการแก้ปัญหา

อื่น ๆ เช่น การผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just in Time, JIT) เพื่อให้เกิดการไหลอย่างต่อเนื่องด้วยเวลาจัดส่งและระดับสินค้าคงคลังที่ลดลง [6] และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการของทาคุชิ (Taguchi Experimental Design) เพื่อลดจำนวนครั้งในการปรับค่าพารามิเตอร์ [7] รวมถึงการพัฒนาวิธีการใหม่ ๆ ที่มีเทคนิคนี้เป็นแนวคิดพื้นฐาน เช่น Tailored SMED ที่เพิ่มขึ้นขั้นตอนของการลดงานภายนอก [8] หรือ FIS-SMED ที่นำกระบวนการทางพีชคณิตมาใช้ในการกำหนดค่าปรับแต่งพารามิเตอร์ [9]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น

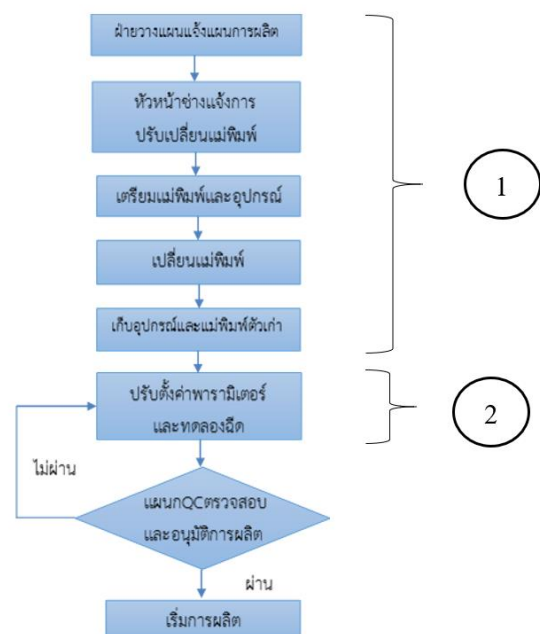
จากการรวบรวมข้อมูลการผลิตในกระบวนการฉีดพลาสติกพบว่าในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ทุกครั้งจะใช้เวลานานถึง 3 ชั่วโมงตั้งแต่การแจ้งเปลี่ยนแม่พิมพ์ ถอดและเปลี่ยนแม่พิมพ์ ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อทดลองฉีดจนสามารถเริ่มการผลิตได้ คิดเป็น 12.5% ของเวลาทำงาน 1 วัน (2 กะ รวมเวลาทำงาน 24 ชั่วโมง) ดังรูปที่ 1 โดยเครื่องฉีดพลาสติกแบบสองหัวฉีดขนาด 260 ตันเป็นเครื่องฉีดที่มีกำลังการผลิตสูงที่สุด เมื่อพิจารณากระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์ สามารถจำแนกงานออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ (1) การปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ (Mold Change) และ (2) การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter Adjustment)

3.2 การวิเคราะห์กระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์

ขั้นตอนการเปลี่ยนแม่พิมพ์แบ่งเป็น 54 งานย่อย แต่ละงานย่อยจะดำเนินต่อเนื่องกันตามลำดับ ลำดับงานและเวลาของแต่ละงานได้มาจากการวิเคราะห์แผนภูมิการไหลและจับเวลารวม 3 ครั้งมาคำนวณเป็นเวลาเฉลี่ย การเปลี่ยนแม่พิมพ์จะใช้พนักงานทั้งหมด 3 คน โดยที่ขั้นตอนที่ 1-4, 15, 21-23, 39 และ 45-54 ใช้พนักงาน 1 คน ส่วนขั้นตอนที่เหลือจะใช้พนักงาน 2 คน หลักการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็วเริ่มต้นด้วยการจำแนกงานออกเป็น 2 ประเภทคืองานภายนอก 4 งาน และงาน

ภายใน 50 งาน ทำการรวบรวมเวลาของแต่ละงานรวมทั้งหมด 3 ครั้งเพื่อหาเวลาเฉลี่ย พบว่างานภายนอก (ลำดับที่ 1-4) รวมเวลาเฉลี่ย 16.22 นาที เป็นงานที่ทำเตรียมไว้ได้ก่อนในขณะที่เครื่องจักรทำงานอยู่ ส่วนงานภายใน (ลำดับที่ 5-54) รวมเวลาเฉลี่ย 178.14 นาที เป็นงานที่ทำได้เมื่อหยุดเครื่องจักรเท่านั้น แสดงดังตารางที่ 1

หลังจากจำแนกประเภทของงานแล้ว จะทำการเปลี่ยนงานภายในให้เป็นงานภายนอก เมื่อพิจารณาจากลำดับที่ 22, 23 และ 39 พบว่าเป็นการค้นหาอุปกรณ์คือ Center Mold, Clamp และสายน้ำหล่อเย็น สามารถจัดเตรียมอุปกรณ์เหล่านี้ไว้ก่อนได้ นั่นคือเปลี่ยน 3 งานนี้ให้เป็นงานภายนอก ทำให้ลดเวลาของงานภายในเดิมจาก 178.14 นาที เหลือเป็น 172.34 นาที หรือลดลง 5.40 นาที และงานภายนอกจะเพิ่มขึ้นเป็น 22.02 นาที จากนั้นจะทำการแยกงานภายนอกออกไปดำเนินการคู่ขนานกับงานภายใน ส่งผลให้เวลาในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ลดลงเหลือเฉพาะงานภายในเท่านั้น ดังนั้นเวลาเฉลี่ยในการเปลี่ยนแม่พิมพ์จากเดิม 194.36 นาที จะลดเหลือ 172.34 นาที คิดเป็น 11.33% ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 กระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์

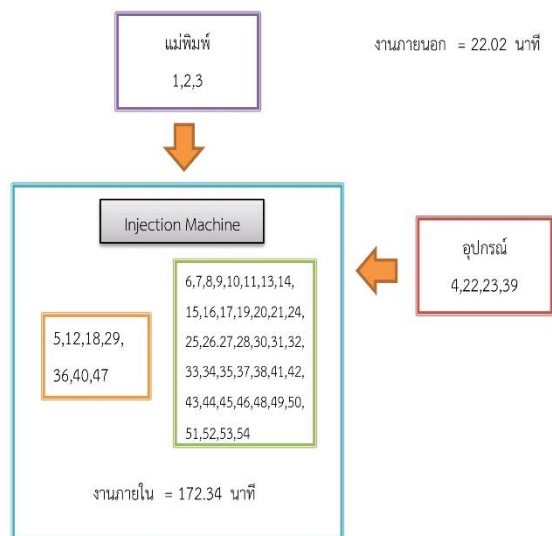
ตารางที่ 1 การจำแนกงานภายในและงานภายนอก

ขั้นตอนการดำเนินการ	งาน	เวลาเฉลี่ย (นาที:วินาที)
1. หัวหน้าช่างแจ้งช่างทำการเปลี่ยนแม่พิมพ์	Ex	0.57
2. ช่างเช็ดและเบกแม่พิมพ์	Ex	1.48
3. ใช้ Hand Lift ย้ายแม่พิมพ์ไว้ข้างเครื่องฉีด	Ex	3.55
4. เตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแม่พิมพ์	Ex	9.42
5. ถอดสายน้ำออกจากแม่พิมพ์ทั้ง 2 ตัว	In	9.53
6. ทำความสะอาดตัวถัง	In	4.40
7. ถอดหัวสกรูเครื่องฉีด	In	0.44
8. เช็ดทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์	In	0.56
9. ฉีดสเปรย์กันสนิมที่แม่พิมพ์ทั้ง 2 ตัว	In	1.34
10. เลื่อนหัวสกรูเครื่องไปด้านหน้างานแม่พิมพ์ปิด	In	0.39
11. นำรอกเกี่ยว Hook ที่แม่พิมพ์ตัวที่ 1 และ ล็อก	In	1.07
12. หีบประแจไขคลาย Clamp ทั้งหมด (แม่พิมพ์ 1)	In	9.28
13. ถอดหัวสกรูเครื่องฉีด	In	0.37
14. ขกแม่พิมพ์ตัวที่ 1 ออกจากเครื่องฉีด และ วางลง	In	1.15
15. คลายตัว Lock ของรอกกับแม่พิมพ์ตัวที่ 1	In	0.13
16. เลื่อนหัวสกรูเครื่องไปด้านหน้างานแม่พิมพ์ปิด	In	0.31
17. นำรอกเกี่ยว Hook ที่แม่พิมพ์ตัวที่ 2 และ ล็อก	In	1.09
18. หีบประแจไขคลาย Clamp ทั้งหมด (แม่พิมพ์ 2)	In	9.01
19. ถอดหัวสกรูเครื่องฉีด	In	0.54
20. ขกแม่พิมพ์ตัวที่ 2 ออกจากเครื่องฉีด และ วางลง	In	1.09
21. คลายตัว Lock ของรอกกับแม่พิมพ์ตัวที่ 2	In	0.58
22. เดินหา Center Mold มาประกอบ	In	2.35
23. เดินหา Clamp	In	1.23
24. นำรอกเกี่ยว Hook ที่แม่พิมพ์ใหม่ตัวที่ 1	In	1.04
25. เช็กรูกรไหลของน้ำ โดยการฉีดน้ำเข้าไป	In	1.24
26. ขกแม่พิมพ์ใหม่ตัวที่ 1 เข้าเครื่องฉีด	In	1.51
27. เลื่อนหัวสกรูเครื่องฉีดมาให้ติดแม่พิมพ์	In	0.57
28. ปรับแม่พิมพ์เพื่อให้ตรงกับช่องหัวฉีด	In	4.06
29. นำประแจมาไข Clamp ให้แน่นเข้ากับ เครื่องฉีด	In	9.12

ตารางที่ 1 (ต่อ) การจำแนกงานภายในและงานภายนอก

ขั้นตอนการดำเนินการ	งาน	เวลาเฉลี่ย (นาที:วินาที)
30. คลาย Lock ของรอกกับแม่พิมพ์ออก	In	0.51
31. นำรอกเกี่ยว Hook ที่แม่พิมพ์ใหม่ตัวที่ 2	In	1.08
32. เช็กรูกรไหลของน้ำโดยการฉีดน้ำเข้าไป	In	1.18
33. ขกแม่พิมพ์ใหม่ตัวที่ 2 เข้าเครื่องฉีด	In	1.48
34. เลื่อนหัวสกรูเครื่องฉีดมาให้ติดแม่พิมพ์	In	0.51
35. ปรับแม่พิมพ์เพื่อให้ตรงกับช่องหัวฉีด	In	3.59
36. นำประแจมาไข Clamp ให้แน่นเข้ากับ เครื่องฉีด	In	8.57
37. คลาย Lock ของรอกกับแม่พิมพ์ออก	In	0.53
38. ตรวจสอบวงสวิงและตั้งค่าโปรแกรม	In	4.52
39. เดินหาสายน้ำหล่อเย็น	In	1.42
40. ต่อสายน้ำ	In	12.19
41. ตรวจสอบโดยนำประแจมาไขเพื่อให้แน่น	In	3.52
42. เก็บอุปกรณ์ รอก Hand Lift และแม่พิมพ์	In	2.08
43. เช็ดทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์	In	4.07
44. เดิมเม็ดพลาสติก โดยใช้เม็ด Scrap	In	1.32
45. เช็การหลอมเหลวของเม็ดพลาสติก โดย ฉีดทิ้ง	In	4.44
46. ตั้งค่าเครื่อง โดยตั้งค่าตามมาตรฐาน	In	2.13
47. ทดลองฉีดเม็ด Scrap และปรับค่างานฉีด สำเร็จ	In	34.05
48. ตักเม็ด Scrap ที่เหลือออกจากถัง	In	2.13
49. ทำความสะอาดถัง	In	1.15
50. เทเม็ดพลาสติกจริงลงถัง	In	1.47
51. ฉีดเม็ดเก่าทิ้ง	In	4.43
52. เริ่มฉีดขึ้นงานเพื่อตรวจสอบก่อนผลิตจริง	In	2.52
53. พนักงาน QC มาตรวจสอบหน้างาน และ อนุมัติฉีด	In	4.30
54. เตรียมเครื่องเพื่อผลิตจริง	In	2.15
รวมเวลาทั้งหมด		194.36
งานภายนอก		16.22
งานภายใน		178.14

หมายเหตุ: Ex คือ งานภายนอก และ In คือ งานภายใน



รูปที่ 2 การเปลี่ยนงานภายในให้เป็นงานภายนอก

3.3 การปรับปรุงงานภายในของการเปลี่ยนแม่พิมพ์

จากการเปลี่ยนงานภายในให้เป็นงานภายนอก ทำให้เหลืองานภายในทั้งหมด 47 งาน รวมเวลาเฉลี่ย 172.34 นาที ขั้นตอนต่อไปเป็นการหาแนวทางการลดเวลาของงานภายใน เพื่อทำให้กระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์รวดเร็วขึ้น โดยเลือกงานภายในที่ใช้เวลามากกว่า 5 นาที มีทั้งหมด 7 งาน (ดังตารางที่ 2) รวมเวลาเฉลี่ย 92.55 นาที คิดเป็น 53.70% ของเวลาภายในทั้งหมด เพื่อนำมาหาแนวทางในการปรับปรุงต่อไป

งานภายใน 6 ลำดับแรกจะเป็นการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ ส่วนงานลำดับที่ 7 จะเป็นการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์

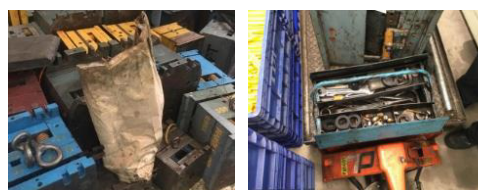
3.3.1 การปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์

ประกอบด้วยงานถอด/ต่อสายน้ำ (ลำดับที่ 5 และ 40) และการไข Clamp (ลำดับที่ 12, 18, 29 และ 36) แนวทางการปรับปรุงมีดังนี้

1) การเตรียมอุปกรณ์ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแม่พิมพ์มีการจัดเก็บที่ไม่เป็นระเบียบ ประกอบกับมีแม่พิมพ์หลายแบบที่ใช้กับเครื่องฉีดพลาสติกขนาด 260 ตัน ดังนั้นจึงจัดหากล่องใส่อุปกรณ์ (ดังรูปที่ 3) และจัดทำบัญชีอุปกรณ์ที่จำแนกตามกลุ่มแม่พิมพ์ทั้งหมด 4 กลุ่ม (ดังตารางที่ 3) เพื่อสะดวกต่อการค้นหาและใช้งาน

ตารางที่ 2 งานภายในที่มีเวลามากกว่า 5 นาที

ลำดับ	กิจกรรม	เวลาเฉลี่ย (นาที : วินาที)
5	ถอดสายน้ำออกจากแม่พิมพ์ทั้ง 2 ตัว	9.53
12	หีบประแจไขคลาย Clamp ทั้งหมด (แม่พิมพ์ 1)	9.28
18	หีบประแจไขคลาย Clamp ทั้งหมด (แม่พิมพ์ 2)	9.01
29	นำประแจมาไข Clamp ให้แน่นเข้ากับเครื่องฉีด	9.12
36	นำประแจมาไข Clamp ให้แน่นเข้ากับเครื่องฉีด	8.57
40	ต่อสายน้ำ	12.19
47	ทดลองฉีดเม็ด Scrap และ ปรับค่าจนฉีดสำเร็จ	34.05



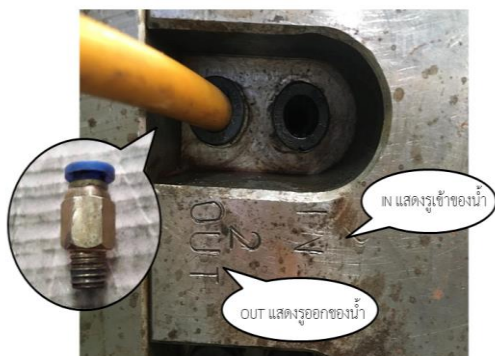
(ก) ก่อนปรับปรุง (ข) หลังปรับปรุง

รูปที่ 3 กล่องอุปกรณ์

ตารางที่ 3 บัญชีอุปกรณ์จำแนกตามกลุ่มของแม่พิมพ์

ลำดับ	อุปกรณ์	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3	กลุ่มที่ 4	หมายเหตุ
1	ไขควง	1 อัน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	
2	ประแจเลื่อน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	
3	ท่อแป๊ป	1 อัน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	
4	ประแจเอลเบอร์	1 อัน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	
5	รอก	1 อัน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	
6	ตัวเกี่ยวที่แม่พิมพ์	1 อัน	1 อัน	1 อัน	1 อัน	
7	โซ่	1 เส้น	1 เส้น	1 เส้น	1 เส้น	
8	สเปร์ยกันสนิม	1 กระป๋อง	1 กระป๋อง	1 กระป๋อง	1 กระป๋อง	
9	ผ้าเช็ดงาน	2 ผืน	2 ผืน	2 ผืน	2 ผืน	
10	สายน้ำ	8 เส้น	12 เส้น	8 เส้น	4 เส้น	
11	Quick Fitting	24 ตัว	32 ตัว	24 ตัว	16 ตัว	สามารถติดตั้งถาวรที่แม่พิมพ์ได้
12	เทปพันเกลียว	1 ม้วน	1 ม้วน	1 ม้วน	1 ม้วน	ใช้สำหรับติด Quick Fitting Joint
13	ตู้ควบคุม	-	-	1 ตู้	-	

2) การถอด/ต่อ สายน้ำ เสนอให้เปลี่ยนข้อต่อสายน้ำเป็นแบบ Quick Fitting Joint และทำสัญลักษณ์ Visual Control แสดงจุดที่เข้าและออกของน้ำ โดยการตอกสัญลักษณ์คือ IN แสดงรูเข้า OUT แสดงรูออก และตัวเลขแสดงจำนวนรูของสายน้ำ (ดังรูปที่ 4)

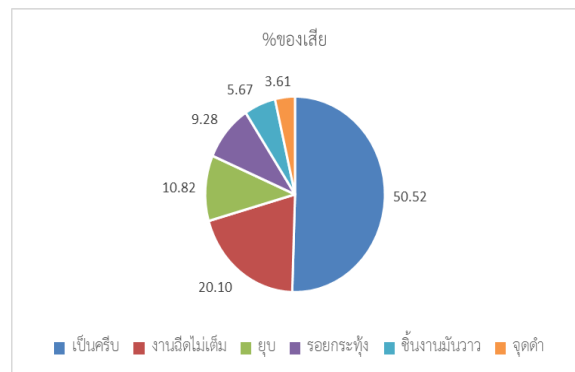


รูปที่ 4 การทำสัญลักษณ์ที่แม่พิมพ์

3) การไข Clamp เดิมใช้ประแจตัวที่ ทางผู้วิจัยร่วมกับทีมช่าง ค้นหาอุปกรณ์อื่นที่จะช่วยทำงานได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น โดยพิจารณาระหว่างบล็อกกลมและชุดประแจกระบอก ด้วยข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่าย จึงตัดสินใจเปลี่ยนเป็นชุดประแจกระบอกซึ่งมีราคาถูกกว่า

3.3.2 การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์

การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และทดลองฉีดจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์นั้นเป็นงานที่ใช้เวลาเฉลี่ยนานถึง 34.05 นาที การลดเวลาในการปรับตั้งทำได้โดยศึกษาจากลักษณะของของเสียที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์จากการรวบรวมข้อมูลตั้งแต่วันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ถึงวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2561 พบว่าชิ้นงานที่เกิดครีบก้นมากที่สุดคือร้อยละ 50.52 (ดังรูปที่ 5) เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการตั้งคำถาม ทำไม-ทำไม (Why-why Analysis) พบว่าสาเหตุของการเกิดครีบก้นมาจากเม็ดพลาสติก เครื่องฉีดพลาสติก แม่พิมพ์ และค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 5 สัดส่วนของเสียที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์

แนวทางปรับปรุงเพื่อลดการเกิดครีบ มีดังนี้

- 1) การอบเม็ดพลาสติก ทางโรงงานมีเครื่อง Hopper ที่ใช้อบเพื่อลดความชื้น แต่บางครั้งไม่ได้ถูกนำมาใช้งาน หรือใช้งานตามประสบการณ์ของพนักงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงรวบรวมมาตรฐานทั่วไปของการอบเม็ดพลาสติกโดยคัดเลือกเฉพาะชนิดของเม็ดพลาสติกที่ทางโรงงานใช้ ระบุอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบ
- 2) จัดทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับเครื่องฉีดพลาสติกแบบสองหัวฉีดขนาด 260 ตัน และกลุ่มแม่พิมพ์ ประกอบด้วยการส่วนประกอบหลักและใบรายการตรวจสอบสภาพรายวัน
- 3) การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เริ่มด้วยการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีด ตั้งแต่วันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2561 ถึงวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 รวม 10 วัน (ดังรูปที่ 6) พบว่าสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นน้อยที่สุดคือวันที่ 5 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ร้อยละ 2.78 ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ค่าพารามิเตอร์นี้ (ดังตารางที่ 4) มาทดลองฉีดพลาสติก ร่วมไปกับการบำรุงรักษาเครื่องฉีดและแม่พิมพ์พลาสติก



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบสัดส่วนของเสีย

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ในการทดลอง

Nozzle		พลาสติก		ยาง	
Cylinder Temp	H1	275		210	
	H2	225		195	
	H3	200		185	
	H4	190		180	
Mold Temp	Core	16		16	
	Cav.	25		25	
Hopper Drying		85		-	
Inj. Press		55	50	50	50
Inj. Speed		14	14	35	38
Hold Press		65		55	
Time Hold		5		5	
Screw Position		161		36.8	
Cooling Time		38		38	
Monitoring Actual	Cycle time	80		80	
	Inj. Time	3	2	0.15	0.33
	Cushion	0.3		0.1	

หลังทำการบำรุงรักษาเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ตามแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ จึงได้ทดลองฉีดผลิตภัณฑ์ตัวเดิมด้วยค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดเป็นเวลา 10 วัน (ตั้งแต่วันที่ 1-10 เมษายน พ.ศ. 2561) พบว่า สัดส่วนของเสียหลังปรับปรุงลดลงจากเดิม ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุง

วันที่	จำนวนผลิต (ชิ้น)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	สัดส่วนของเสีย (%)
1 เม.ย. 2561	2060	5	0.24
2 เม.ย. 2561	2013	12	0.60
3 เม.ย. 2561	2075	10	0.48
4 เม.ย. 2561	1991	12	0.60
5 เม.ย. 2561	2064	4	0.19
6 เม.ย. 2561	1845	11	0.60
7 เม.ย. 2561	2180	0	0.00
8 เม.ย. 2561	2054	12	0.58
9 เม.ย. 2561	2120	9	0.42
10 เม.ย. 2561	2014	5	0.24

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

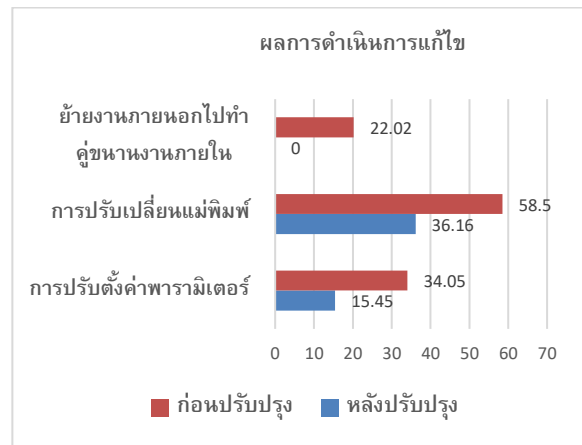
จากการปรับปรุงงานภายในทั้งสองส่วนคือการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ และการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ส่งผลต่อการลดเวลาในกระบวนการเปลี่ยนแม่พิมพ์ ดังตารางที่ 6 การปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ทั้ง 6 งาน เดิมใช้เวลาเฉลี่ย 58.5 นาที ลดลงเหลือ 36.16 นาที ส่วนการปรับค่าพารามิเตอร์ เดิมใช้เวลา 34.05 นาที ลดลงเหลือ 15.45 นาที

ตารางที่ 6 เวลาที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ก่อนและหลังการปรับปรุง

กิจกรรม	ก่อนปรับปรุง (นาที : วินาที)	หลังปรับปรุง (นาที : วินาที)
การปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์		
ถอดสายน้ำออกจากแม่พิมพ์ทั้ง 2 ตัว	9.53	4.38
หยิบประแจไขคลาย Clamp ทั้งหมด (แม่พิมพ์ 1)	9.28	6.15
หยิบประแจไขคลาย Clamp ทั้งหมด (แม่พิมพ์ 2)	9.01	6.59
นำประแจมาไข Clamp ให้แน่นเข้ากับเครื่องฉีด	9.12	5.35
นำประแจมาไข Clamp ให้แน่นเข้ากับเครื่องฉีด	8.57	6.59
ต่อสายน้ำ	12.19	5.50
การปรับค่าพารามิเตอร์		
ทดลองฉีดเม็ด Scrap และ ปรับค่าจนฉีดสำเร็จ	34.05	15.45

สรุปผลการลดเวลาในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ทั้งหมด โดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว เริ่มตั้งแต่การจำแนกงานภายในและงานภายนอก การเปลี่ยนงานภายในให้เป็นงานภายนอก และการปรับปรุงงานภายใน (ดังรูปที่ 7) เดิมใช้เวลาเปลี่ยนแม่พิมพ์ทั้งหมด

194.36 นาที ลดลงเหลือ 131.40 นาที (2 ชั่วโมง 11 นาที) หรือลดลง 62.56 นาที คิดเป็น 32.19% ของเวลาทั้งหมด ซึ่งเป็นการลดลงของเวลาในการย้ายงานภายนอกไปทำคู่ขนานงานภายใน 22.02 นาที การปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ 22.34 นาที และการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ 18.20 นาที



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลการปรับปรุง

4.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ทางโรงงานควรมีการจัดอบรมแลกเปลี่ยนความรู้เบื้องต้นในการบำรุงรักษา ระหว่างช่างซ่อมกับพนักงานฝ่ายผลิต เพื่อพนักงานปฏิบัติงานได้ด้วยตนเองและสามารถแก้ไขปัญหาหน้างานได้ทันที
- 2) ควรมีการศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า คือ Injection Press, Injection Speed และ Screw Position มีการปรับเปลี่ยนค่าที่ใช้ในการฉีดและไม่ตรงกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้
- 3) นำวิธีการปรับปรุงที่ใช้กับเครื่องฉีดพลาสติกแบบสองหัวขนาด 260 ตัน ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรที่มีอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่คล้ายคลึงกันได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พรเทพ เหลือทรัพย์สุข และยุพร กลอนกลาง. การปรับเปลี่ยนเครื่องจักรอย่างรวดเร็ว (Quick Changeover for Operators: The SMED System). กรุงเทพฯ: อี.ไอ.สแควร์ สำนักพิมพ์, 2550.

- [2] บุญสิน นาคอนคู่. การลดเวลาในการปรับตั้งแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2555.
- [3] ธนัฐพงษ์ บุญสุวรรณโน และสาธิตินิ สันติธีรากุล. การลดเวลาการติดตั้งแม่พิมพ์ของงานฉีดพลาสติกในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2560.
- [4] วัชรกร อรุณวิราม, บุญชัย แซ่สั่ว และสุภรัชชัย วรรณ. การลดเวลาสูญเสียเปล่าและของเสียในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยระบบสัญญาณ. บัณฑิตศึกษา, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2558.
- [5] จารุเดช หิรัญวัฒน์สุข, อริย บุญคำเนิน และนิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์. การเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องพิมพ์ 2 สี ในกระบวนการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2561; 29(1): 45 – 52.
- [6] Rodríguez-Méndez, R., Sánchez-Partida, D., Flores, J.L.M. and Arvizu, E. A Case Study: SMED & JIT Methodologies to Develop Continuous Flow of Stamped Parts into AC Disconnect Assembly Line in Schneider Electric Tlaxcala Plant. *International Federation of Automatic Control*, 2515; 48-3: 1399–1404.
- [7] Karasu, K.M., Cakmakci, M., Merve B.Cakiroglu, M.B., Ayva, E. Demirel-Ortabas, N. Improvement of changeover times via Taguchi empowered SMED/case study on injection molding production. *Measurement*, 2014; 47: 741–748.
- [8] Ferradas, P.G. and Salonitis, K. Improving Changeover Time: A Tailored SMED Approach for Welding Cells. *Procedia CIRP*, 2013; 7: 598-603.
- [9] Karasu, M.K. and Salum, L. FIS-SMED: A Fuzzy Inference System Application for Plastic Injection Mold Changeover. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018; 94: 545–559.



การวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าล่าช้า

Cost of Electricity Loss Analysis in Distribution System from Delayed Substation Construction

นันทชัย กานตานันทะ* และ พันทิวา ชิตเครือ

Nantachai Kantananttha* and Pantiwa Chitkrue

สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

Graduate Program in Engineering Management, Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Kasetsart University

50 Ngamwongwan Road, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

E-mail: *nantachai.k@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการจำหน่ายไฟฟ้าต่ำ คือ การที่มีสถานีไฟฟ้าไม่เพียงพอ ส่งผลให้ต้องส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งจำหน่ายที่มีระยะไกล เกิดความไม่เสถียรในระบบไฟฟ้าอยู่เป็นระยะ ๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียไปในระบบ โดยการประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า โดยทำการประมาณค่าความสูญเสียในขณะที่ไม่มีโหลด ขณะที่มีโหลด และจากปัจจัยอื่น ๆ ส่วนที่สอง คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายระดับแรงดันปานกลาง คำนวณโดยใช้หลักการการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Newton-Raphson จากโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้น จากนั้นนำค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ประมาณได้ มาคำนวณเป็นค่าเงินตามเวลาที่ต้องมีการสร้างสถานีไฟฟ้าแห่งใหม่ ผลการวิจัยพบว่าค่าไฟฟ้าที่สูญเสียจะมีค่ามากขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป โดยมีค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงเท่ากับ 497.18 กิโลวัตต์ คิดเป็นเงินเท่ากับ 2,542.35 บาทต่อชั่วโมง ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปประกอบการพิจารณาการก่อสร้างสถานีไฟฟ้ากรณีศึกษาในเวลาที่เหมาะสม

ABSTRACT

One critical issue of low power distribution efficiency is that there is not enough substation. This causes the electric power must be transmitted along the transmission line for a long distance which periodically results in the instability of the electric power distribution. Therefore the objective of this research is to analyze the electric power loss in the system. The electric power loss estimation is divided into two parts. The first part is the electric power loss due to the power transformer in the substation which is estimated from the electric power loss during unloading, loading and other factors. The second part is the electric power loss due to the medium voltage transmission line which is calculated using the power flow principle by Newton-Raphson method from the developed MATLAB program. Then the estimated electric power loss is calculated in terms of money according to the time to build a new substation. The result shows that the cost of electric power loss will increase over time. The hourly electric power loss is 497.18 kW, equivalent to 2,542.35 baht per hour. The cost of electric power loss will be taken into consideration of the case study substation construction at the appropriate time.

1. บทนำ

ปัจจุบันภาครัฐมีการสนับสนุนและส่งเสริมในการกระจายตัวของกิจการธุรกิจอุตสาหกรรม รวมถึงมีการขยายตัวของบ้านจัดสรร คอนโดมิเนียม ที่อยู่อาศัยของผู้ใช้ไฟฟ้าในประเทศไทย ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีอัตราเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ต้องมีการดำเนินการลงทุนก่อสร้างระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและความมั่นคงในการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากรายงานสถิติข้อมูลพลังงานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้มีการเก็บสถิติการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2560 [1] แสดงไว้ดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 สถิติการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556-2560

ปี	การจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า (เมกะวัตต์ชั่วโมง)
2556	116,793,350
2557	120,200,480
2558	124,376,080
2559	125,798,070
2560	130,237,600

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเพิ่มสถานีไฟฟ้าให้เพียงพอต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงมีความสำคัญในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพราะเมื่อมีสถานีไฟฟ้าไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดปัญหา ไฟตก ไฟดับ สาเหตุมาจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในพื้นที่แต่ละส่วนต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระยะทางไกล ทำให้ต้องแบกรับค่าใช้จ่ายที่เกิดจากความสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งค่าความสูญเสียนี้มีค่าค่อนข้างสูง โดยในระบบไฟฟ้าจะมีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ค่าความสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้า กำลังในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [2,3] และค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่สายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [3-5] ยิ่งสายส่งจำหน่ายไฟฟ้ามีความยาวของสายมากจะทำให้เกิดค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ามาก ดังนั้นการเพิ่ม

สถานีไฟฟ้าให้เพียงพอจะทำให้สายส่งจำหน่ายไฟฟ้าส่งจ่ายไฟฟ้าในระยะทางที่สั้นลง จะช่วยลดค่าความสูญเสียและสามารถตอบสนองความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้ยังช่วยให้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เนื่องจากโครงการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแต่ละโครงการใช้งบประมาณในการก่อสร้างจำนวนมาก และเป็นการสร้างสถานีไฟฟ้าใหม่ตามโหลดพยากรณ์ที่มีอยู่ โดยไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากความสูญเสียกำลังไฟฟ้า ทำให้ต้องแบกรับค่าใช้จ่ายที่เกิดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในกรณีที่ไม่สามารถก่อสร้างสถานีไฟฟ้าได้ตามแผนงานที่วางไว้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งจากหม้อแปลงไฟฟ้าและสายส่งจำหน่ายระดับแรงดันปานกลาง โดยประยุกต์ใช้หลักการการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Newton-Raphson เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน แล้วนำมาคำนวณเป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อนำไปประกอบการพิจารณาการสร้างสถานีไฟฟ้ากรณีศึกษาในเวลาที่เหมาะสม

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า
2. กำหนดสถานีไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ใช้ในการวิจัย พร้อมรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

2.1 ข้อมูลโหลดพยากรณ์ของสถานีไฟฟ้าในเขตพื้นที่กรณีศึกษา โดยนำข้อมูลโหลดพยากรณ์ตั้งแต่ปี 2561 ถึงปี 2565 มาพิจารณา

2.2 ข้อมูลรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ที่ถูกติดตั้งในสถานีไฟฟ้า และสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า แรงดันปานกลาง (22 kV)

2.3 ข้อมูลของสถานีไฟฟ้า และสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับสถานีไฟฟ้าการศึกษา ซึ่งข้อมูลจะประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าของการส่งจำหน่ายไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดในแต่ละสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า

2.4 ข้อมูลรายละเอียดของหม้อแปลงจำหน่ายที่อยู่ปลายสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง เนื่องจากที่ปลายสายของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดันปานกลาง จะมีหม้อแปลงจำหน่ายทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ปลายทาง หม้อแปลงจำหน่ายจึงใช้เสมือนโหลดจริงของการส่งจ่ายไฟฟ้า

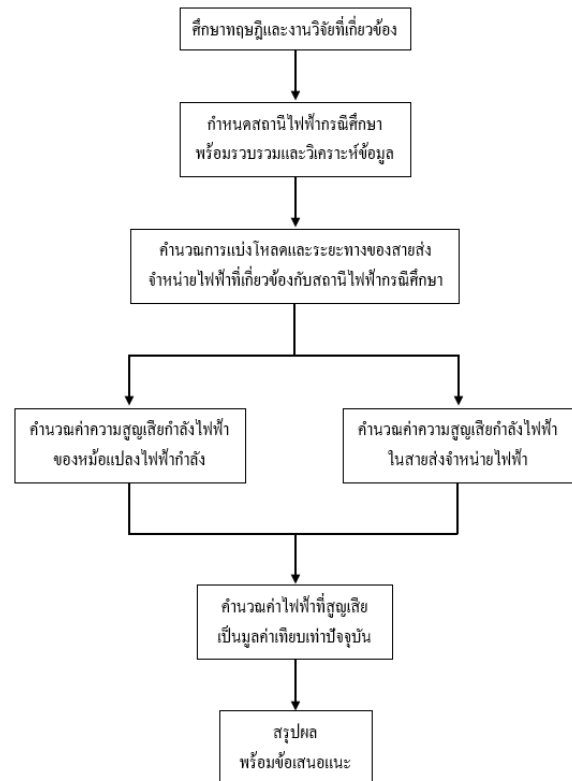
3. จำนวนการแบ่งโหลดและระยะทางของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับสถานีไฟฟ้าการศึกษา ถ้าได้รับการก่อสร้างและจ่ายไฟแล้ว จะต้องแบ่งโหลดจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่มีอยู่เดิม จึงจำลองการแบ่งโหลดโดยคำนึงถึงโหลดพยากรณ์ที่มีอยู่ด้วย

4. จำนวนหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง โดยจะคำนวณค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้าที่ได้จ่ายไฟแล้ว ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ก่อสร้าง

5. จำนวนหาค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้หลักการการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Newton-Raphson จากโปรแกรมประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB

6. นำค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ได้จากข้อ 4 และ 5 มาคำนวณเป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน เนื่องจากมีค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบไฟฟ้ามากขึ้นในแต่ละปี จึงต้องนำค่าไฟฟ้าที่สูญเสียที่เกิดขึ้นในอนาคตแปลงกลับมาให้เป็นมูลค่าเงินในปัจจุบัน

7. สรุปผลการวิเคราะห์ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า พร้อมข้อเสนอแนะ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ปัจจุบันทำให้เกิดค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า การประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส การคำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการคำนวณมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน

4.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า [6]

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ ระบบที่เชื่อมโยงระหว่างระบบส่งกำลังไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้า โดยไฟฟ้าจะถูกลดแรงดันให้ต่ำ จนมีค่าเหมาะสมที่จะจำหน่ายให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ดังนี้

1. สถานีไฟฟ้า เป็นสถานที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยมีการแปลงจากระดับ

แรงดันที่สูงไปยังแรงดันที่ต่ำลงผ่านหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง สถานีไฟฟ้าจะมีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าเชื่อมอยู่ เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟ อีกทั้งยังมีระบบป้องกันอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า การเลือกใช้การจัดรูปแบบของสถานีไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความสำคัญของโหลดที่จ่ายไฟ วงเงินลงทุนในการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า และความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าที่ต้องการ รูปแบบของสถานีไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ สถานีไฟฟ้าแบบใช้นวนอากาศ และสถานีไฟฟ้าแบบใช้นวนก๊าศ

2. สายส่งจำหน่ายไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ส่งกำลังไฟฟ้าจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยจะมีตัวนำกำลังไฟฟ้าผ่านไปมาตามแนวสายส่ง แรงดันที่ใช้ในส่งจำหน่ายไฟฟ้า คือ แรงดันไฟฟ้าระดับปานกลางไปจนถึงสิ้นสุดที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

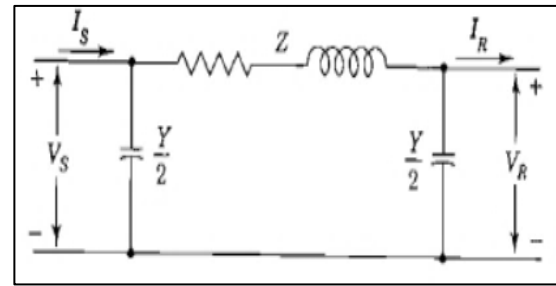
4.2 ปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า

ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกิดจาก 3 ปัจจัย ดังนี้ [7]

1. ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากปรากฏการณ์โคโรนา เกิดขึ้นที่สายไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 230-400 kV และเกิดขึ้นเมื่อสภาพอากาศไม่ดี เช่น หิมะตก ฝนตก ลูกเห็บตก หรืออากาศแห้งแล้งมาก [8]

2. ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังในสถานีไฟฟ้า ประกอบด้วย ค่าขณะไม่มีโหลด ค่าขณะมีโหลด และปัจจัยอื่น ๆ [2]

3. ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าเนื่องจากความต้านทาน แบบจำลองของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่มีความยาวปานกลางหนึ่งเฟส แสดงตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าที่มีความยาวปานกลาง [9]

ซึ่งมีพารามิเตอร์ของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ดังสมการ (1) (2) และ (3) [9]

$$Z = R - jX \quad (1)$$

เมื่อ Z คือ อิมพีแดนซ์ (Ω)

R คือ ความต้านทาน (Ω)

j คือ ส่วนจินตภาพ

X คือ รีแอक्टแดนซ์ (Ω)

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{V} = |Y| \angle \phi = G - jB \quad (2)$$

เมื่อ Y คือ แอดมิตแดนซ์ (S)

Z คือ อิมพีแดนซ์ (Ω)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

ϕ คือ มุมของแอดมิตแดนซ์ (Rad)

G คือ คอนดักแตนซ์

j คือ ส่วนจินตภาพ

B คือ ซัสเซพแตนซ์

$$Loss = I^2 R \quad (3)$$

เมื่อ $Loss$ คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า (W)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

R คือ ความต้านทาน (Ω)

โดยสมการ (1) (2) และ (3) ต้องมีหน่วยเดียวกัน โดยทำเป็นค่าเปอร์ยูนิต (per unit, p.u.) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าจริงต่อค่าฐาน นำมาใช้คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันลัดวงจร และการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ [9]

4.3 การประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าสามเฟส [10]

การคำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของสายส่งที่แรงดันระดับปานกลาง โดยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธี Newton-Raphson จะมีวิธีคำนวณยุ่งยาก แต่มีความแม่นยำสูงและมีประสิทธิภาพกว่าวิธี Gauss-Seidel ซึ่งวิธี Newton-Raphson เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ระบบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน สามารถหาคำตอบสมการ n ตัวแปร โดยเริ่มจากการสมมติคำตอบในครั้งแรกก่อน แล้วคำนวณหาค่าความผิดพลาด เพื่อนำไปปรับเปลี่ยนค่าของคำตอบในรอบถัดไป [3] ตามสมการ (4) โดย $\mathbf{J}^{(k)}$ เป็นจาโคเบียนเมตริกซ์ จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (5)

$$\mathbf{X}^{(k+1)} = \mathbf{X}^{(k)} + \Delta \mathbf{X}^{(k)} \quad (4)$$

$$\Delta \mathbf{X}^{(k)} = \left(\mathbf{J}^{(k)} \right)^{-1} \Delta \mathbf{C}^{(k)} \quad (5)$$

เมื่อ $\mathbf{X}$ คือ เมตริกซ์ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

$\mathbf{J}$ คือ จาโคเบียนเมตริกซ์

$\mathbf{C}$ คือ เมตริกซ์ตัวแปรที่ทราบค่า

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Newton-Raphson สามารถหาส่วนต่างของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) โดยเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ตามสมการ (6)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \quad (6)$$

เมื่อ ΔP_i คือ ผลต่างกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i (W)

ΔQ_i คือ ผลต่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i (VAR)

$\Delta |V_i|$ คือ ผลต่างแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (V)

$\Delta \delta_i$ คือ ผลต่างมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (rad)

$\mathbf{J}$ คือ จาโคเบียนเมตริกซ์

สมการ (7) และ (8) ใช้ในการหาผลต่างของค่าจริงที่บัสใด ๆ กับค่าที่ได้จากการคำนวณแต่ละรอบของการทำซ้ำ จนกระทั่งค่าผลต่างกำลังไฟฟ้าผิดพลาดที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10^{-4} ถึง 10^{-6}

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (7)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (8)$$

เมื่อ P_i^{sch} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i (W)

Q_i^{sch} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i (VAR)

$P_i^{(k)}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงคำนวณที่บัส i (W)

$Q_i^{(k)}$ คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคำนวณที่บัส i (VAR)

ซึ่งกำลังไฟฟ้าจริงคำนวณและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคำนวณ สามารถหาได้จากสมการ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$P_i = \sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (9)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^N |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (10)$$

เมื่อ P_i คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงคำนวณที่บัส i (W)

Q_i คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคำนวณที่บัส i (VAR)

V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i (V)

V_j คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส j (V)

Y_{ij} คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j (S)

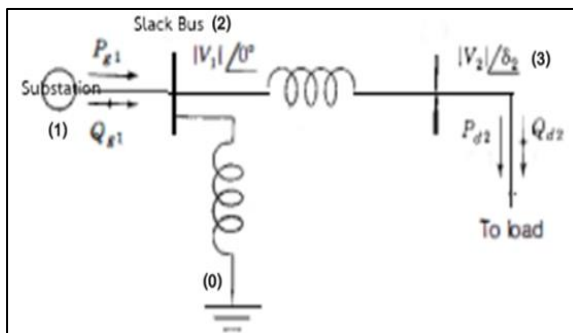
δ_i คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i (rad)

δ_j คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j (rad)

θ_{ij} คือ มุมของค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส j (rad)

N คือ จำนวนบัส

บัสสำหรับศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้ามีทั้งหมด 3 ประเภท คือ บัสที่มีแรงดันคงที่ บัสอ้างอิง และบัสภาระไฟฟ้า โดยรูปที่ 3 แสดงระบบที่มีบัสเชื่อมกัน 3 บัส คือ บัสที่มีแรงดันคงที่ แทนด้วยบัสหมายเลข 1 บัสอ้างอิง แทนด้วยบัสหมายเลข 2 และบัสภาระไฟฟ้า แทนด้วยบัสหมายเลข 3 (กรณีมีบัสภาระไฟฟ้าเพียงบัสเดียว) ส่วนหมายเลข 0 คือ การต่อลงดิน



รูปที่ 3 ระบบมีการไหลของกระแสไฟฟ้า [10]

เมตริกซ์แอดมิตแตนซ์สามารถหาได้จากสมการ (11)

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} + y_{13} & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{21} & y_{20} + y_{21} + y_{23} & -y_{23} \\ -y_{31} & -y_{32} & y_{30} + y_{31} + y_{32} \end{bmatrix} \quad (11)$$

เมื่อ y_{10}, y_{20}, y_{30} คือ แอดมิตแตนซ์ระหว่างหมายเลข 0 กับบัสหมายเลข 1 2 และ 3 ตามลำดับ

y_{12}, y_{13} คือ แอดมิตแตนซ์ระหว่างบัสหมายเลข 1 กับบัสหมายเลข 2 และ 3 ตามลำดับ

y_{21}, y_{23} คือ แอดมิตแตนซ์ระหว่างบัสหมายเลข 2 กับบัสหมายเลข 1 และ 3 ตามลำดับ

y_{31}, y_{32} คือ แอดมิตแตนซ์ระหว่างบัสหมายเลข 3 กับบัสหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับ

การหาโหลดเริ่มต้น จะทำโดยการหาอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้ารวมกับผลรวมของค่าพิกัดของ

หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังที่ปลายสาย (Utilization Factor) แล้วเอาอัตราส่วนที่ได้ไปคูณกับพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในแต่ละจุดของปลายสาย [5]

ผลต่างของค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสามารถคำนวณได้จากผลต่างค่ากำลังไฟฟ้าจริงและผลต่างค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัสอ้างอิง ตามสมการ (12) ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของสถานีไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัสที่มีแรงดันคงที่ ตามสมการ (13)

$$S_{Error} = \sqrt{P_{Error}^2 + Q_{Error}^2} \quad (12)$$

$$S_{Substation} = \sqrt{P_{Substation}^2 + Q_{Substation}^2} \quad (13)$$

เมื่อ S_{Error} คือ ผลต่างค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (kW)
 P_{Error} คือ ผลต่างค่ากำลังไฟฟ้าจริง (kW)
 Q_{Error} คือ ผลต่างค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (kW)
 $S_{Substation}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของสถานีไฟฟ้า (kW)
 $P_{Substation}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของสถานีไฟฟ้า (kW)
 $Q_{Substation}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของสถานีไฟฟ้า (kW)

จากนั้นทำการเปรียบเทียบ S_{Error} และ $S_{Substation}$ ถ้าค่าสัมบูรณ์ของ S_{Error} มีค่ามากกว่า 1% ของ $S_{Substation}$ ($|S_{Error}| > 1\% S_{Substation}$) ให้ทำการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่โหลด ตามสมการ (14) และ (15)

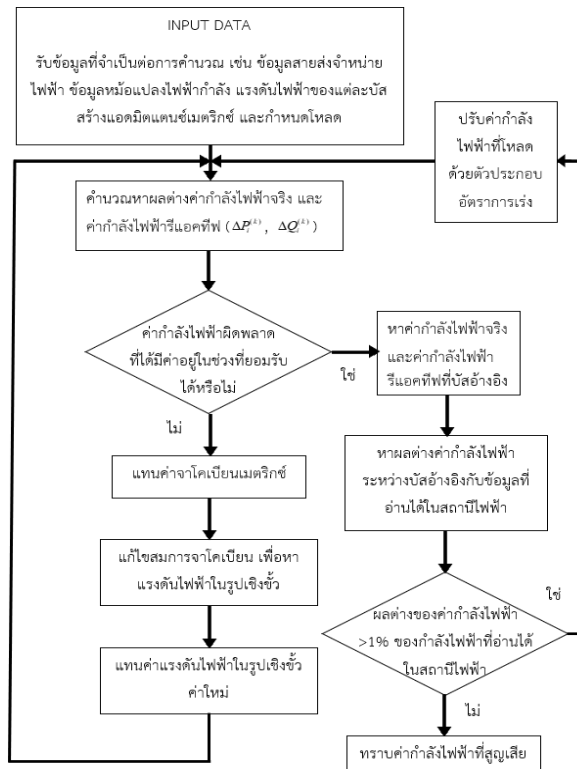
$$P_{Load}^{k+1} = P_{Load}^k - \lambda_p P_{Error} \quad (14)$$

$$Q_{Load}^{k+1} = Q_{Load}^k - \lambda_Q Q_{Error} \quad (15)$$

เมื่อ P_{Load} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด (kW)
 Q_{Load} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่โหลด (kW)

โดยที่ λ_p และ λ_Q เป็นตัวประกอบอัตราการเร่งมีค่าเท่ากับ 0.9 [5] เมื่อทำการปรับกำลังไฟฟ้าที่โหลดด้วยตัวประกอบอัตราเร่งจนกระทั่งค่าสัมบูรณ์ของ S_{Error} มีค่าน้อยกว่า 1% ของ $S_{Substation}$ จะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ปลายสายตามที่ต้องการ

ดังนั้น จะได้แผนภาพการไหลของกำลังไฟฟ้าขึ้นพื้นฐานสำหรับวิธี Newton-Raphson ตามรูปที่ 4 ขั้นตอนตามแผนภาพนี้จะทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริง และค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัสอ้างอิง [5]



รูปที่ 4 แผนภาพการคำนวณกำลังไฟฟ้า

4.4 การคำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขณะที่มีโหลด [10]

โหลด คือ ภาระของวงจรไฟฟ้าที่นำมาต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องจักร เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ในการคิดค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าต้องใช้โหลดในการคำนวณ จะทำให้ค่าความสูญเสียที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ซึ่งการคำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในขณะที่มีโหลดจะคำนวณโดยใช้ตัวประกอบค่าความสูญเสียของโหลด (Load Loss Factor, LLF) คือ อัตราส่วนของความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยกับความสูญเสียกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ค่าความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่อชั่วโมงคำนวณได้ ตามสมการ (16)

$$TR_L = \left(W_i + W_c \left[\frac{Max.load}{Tr.Rated} \right]^2 LLF + W_{other} \right) T \quad (16)$$

เมื่อ TR_L คือ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (kW)

W_i คือ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในขณะไม่มีโหลด (kW)

W_c คือ ค่าความสูญเสียในสายทองแดงขณะมีโหลด (kW)

$Max.load$ คือ ค่าโหลดสูงสุด ณ ช่วงเวลาคำนวณ (kW)

$Tr.Rated$ คือ พิกัด หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (MVA)

W_{other} คือ ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังโดยปัจจัยอื่นๆ (kW)

T คือ ช่วงเวลาที่คิดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า (ชั่วโมง)

ค่าความสูญเสียในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าต่อชั่วโมงสำหรับระบบไฟฟ้า 3 เฟส คำนวณได้ตามสมการ (17)

$$Line Loss = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \times R \times L \times LLF \quad (17)$$

เมื่อ $Line Loss$ คือ ค่าความสูญเสียในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า (W)

I_a คือ กระแสไฟฟ้าที่เฟส a (A)

I_b คือ กระแสไฟฟ้าที่เฟส b (A)

I_c คือ กระแสไฟฟ้าที่เฟส c (A)

R คือ ค่าความต้านทานของตัวนำไฟฟ้า (Ω/km)

L คือ ค่าความยาวสายส่ง (km)

4.5 การคำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการคำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สิ่งจำเป็นที่ต้องเตรียมก่อนเพื่อ

ประมาณการเกี่ยวกับการพยากรณ์ของรูปแบบจำลอง มีดังนี้ [11]

1. รูปแบบมาตรฐานโหลดของสายส่ง
2. ฐานข้อมูลที่มีอยู่ของการวัดค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า
3. โปรแกรมสำหรับการคำนวณค่าความสูญเสียของสายส่ง

งานวิจัยของ [3] และ [12] ใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่

MATLAB คือโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่มีสิ่งแวดล้อมในการคำนวณของตัวเอง และมีภาษาเฉพาะตัวในการเขียนโปรแกรมเองได้ การพัฒนาโปรแกรมด้วย MATLAB มีความง่ายและเร็วกว่าภาษาอื่น ๆ และด้วยตัวลักษณะการทำงานเชิงเมตริกซ์ ทำให้สามารถจัดการกับอาร์เรย์ได้ง่าย [13]

4.6 มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน [14]

มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน (Present Worth) คือ การกำหนดค่าเงินในปัจจุบัน ซึ่งต่างจากมูลค่าอนาคต (Future Worth) เนื่องจากอัตราดอกเบี้ย สามารถหาได้จากสมการ (18)

$$P = F \frac{1}{(1+i)^n} \quad (18)$$

เมื่อ P คือ มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน

F คือ มูลค่าสุดท้ายหรือมูลค่าอนาคต

i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อระยะเวลา

n คือ ระยะเวลาที่พิจารณา

5. ผลการวิจัย

5.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

5.1.1 ข้อมูลโหลดพยากรณ์

กำหนดสถานีไฟฟ้าการศึกษา คือ สถานีไฟฟ้าที่ยังไม่ได้ก่อสร้าง แทนด้วย สถานีไฟฟ้า D เมื่อพิจารณาข้อมูลระบบไฟฟ้าในเขตพื้นที่ก่อสร้างสถานีไฟฟ้า D จะพบว่าสถานีไฟฟ้าที่ใกล้เคียง คือ สถานีไฟฟ้า A B และ

C ข้อมูลโหลดพยากรณ์ของสถานีไฟฟ้าในเขตพื้นที่การศึกษาที่ใช้พิจารณา แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 โหลดจริงและโหลดพยากรณ์ของสถานีไฟฟ้าในพื้นที่การศึกษา

สถานีไฟฟ้า	โหลดจริง (MW)		โหลดพยากรณ์ (MW)				
	2559	2560	2561	2562	2563	2564	2565
A	52	55	50	51	52	53	54
B	18	19	12	13	14	15	16
C	63	65	47	48	49	50	51
D			37	38	39	40	41

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าโหลดจริงในปี 2559 ถึง 2560 ของสถานีไฟฟ้า A, B และ C มีค่าสูง เนื่องจากต้องรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในขณะที่ปี 2561 ถึงปี 2565 สถานีไฟฟ้า A, B และ C มีค่าโหลดพยากรณ์ลดลงเนื่องจากการจ่ายไฟจากสถานีไฟฟ้า D

5.1.2 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า

ข้อมูลรายละเอียดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า

รายละเอียด	บริษัทผู้ผลิต		
	P1	P2	P3
Substation	A	B	C
No-load loss (kW)	23	23	23
Load loss (kW)	133	133	133
Other loss (kW)	2	2	2

5.1.3 ข้อมูลสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

ข้อมูลรายละเอียดของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง แสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

รายละเอียด	บริษัทผู้ผลิต	
	E1	E2
Substation	A และ B	C
Resistance (Ω -km)	0.193	0.193
Inductance (mH/km)	0.388	0.434
Capacitance (μ H/km)	0.217	0.166

5.1.4 ข้อมูลค่ากำลังไฟฟ้า

ข้อมูลสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยมีข้อมูลโหลดสูงสุด ต่ำสุด และโหลดเฉลี่ย ของสถานีไฟฟ้า A B และ C และสายส่งไฟฟ้า โดยข้อมูลของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าจะประกอบด้วย ค่าแรงดันไฟฟ้าของการส่งจำหน่ายไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดในแต่ละสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในปี 2559 และปี 2560

5.2 การแบ่งโหลดจากสถานีไฟฟ้า A B และ C กรณีที่มีสถานีไฟฟ้า D

สถานีไฟฟ้า D คือ สถานีไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ยังไม่ได้ก่อสร้าง มีสถานีไฟฟ้าที่ใกล้เคียง คือ สถานีไฟฟ้า A, B และ C ดังนั้น จึงต้องทำการแบ่งโหลดจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า A, B และ C ที่อยู่ในพื้นที่ที่จะก่อสร้างของสถานีไฟฟ้า D ได้แก่ สายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 จากสถานีไฟฟ้า A หมายเลข B05 จากสถานีไฟฟ้า B หมายเลข C04, C05 และ C10 จากสถานีไฟฟ้า C แต่ละสายส่งจำหน่ายไฟฟ้ามีหม้อแปลงจำหน่ายอยู่ปลายสาย รูปที่ 4 แสดงแผนภาพเส้นเคเบิลของวงจรสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า A05 โดยบัสหมายเลข 1 แทนสถานีไฟฟ้า A บัสหมายเลข 2 แทนบัสอ้างอิง และบัสหมายเลข 3 ถึง 104 แทนบัสโหลดที่มีหม้อแปลงจำหน่ายอยู่ปลายสายจำนวน 102 เครื่อง

การแบ่งโหลดจะคำนึงถึงระยะทางและโหลดพยากรณ์ที่มีอยู่ สายส่งจำหน่ายไฟฟ้า A05 ถ้าวัดระยะทางด้วยโปรแกรม Google Map จากสถานีไฟฟ้า A ถึงบัสสิ้นสุดของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า A05 ที่บัส 104 จะมี

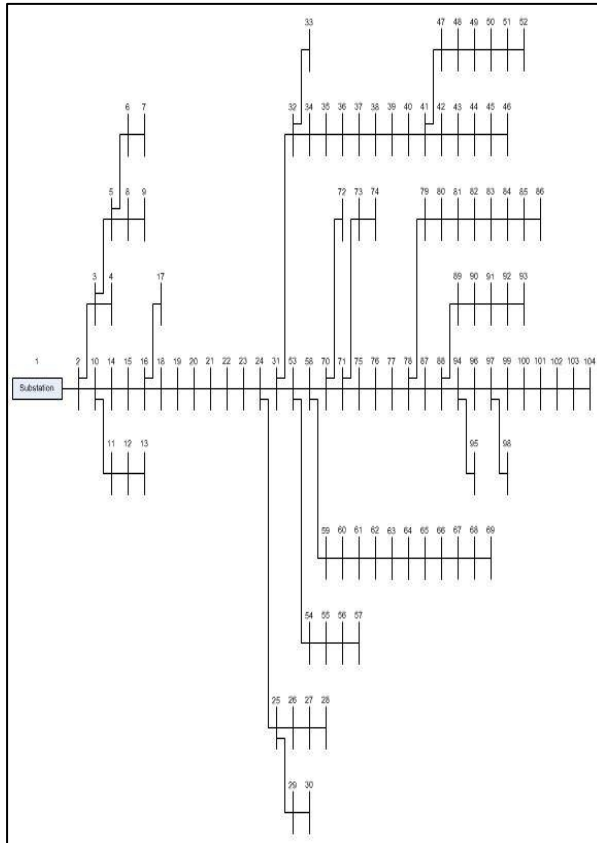
ความยาวทั้งสิ้น 4.25 กิโลเมตร ดังนั้น ระยะทางของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 ที่สถานีไฟฟ้า D ใช้จะยาวเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหรือเท่ากับ 2.125 กิโลเมตร จากโปรแกรม Google Map สถานีไฟฟ้า D อยู่ใกล้กับบัส 104 และระยะทางจากสถานีไฟฟ้า A ถึงบัส 30 เท่ากับ 2.2 กิโลเมตร ถ้าวัดตั้งแต่บัส 31 เป็นต้นไป จะทำให้สถานีไฟฟ้า A มีโหลดลดลง 4.7 เมกะวัตต์ ใกล้เคียงกับโหลดพยากรณ์ในปี 2561 ที่สถานีไฟฟ้า A จะมีโหลดลดลงประมาณ 5 เมกะวัตต์ ดังนั้น จึงใช้บัส 31 ถึงบัส 104 เป็นโหลดที่สถานีไฟฟ้า A ต้องแบกรับโหลดแทนหากสถานีไฟฟ้า D ไม่สามารถจ่ายไฟได้ตามโหลดพยากรณ์ ตามตารางที่ 5

จากนั้นทำการแบ่งโหลดเช่นเดียวกันในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข B05 C04 C05 และ C10

ตารางที่ 6 แสดง Ratio ของโหลดที่สถานีไฟฟ้าต้องแบกรับหลังการแบ่งตามโหลดและระยะทางของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่ง Ratio นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่อไป ทั้งนี้ หากสถานีไฟฟ้า D ไม่สามารถจ่ายไฟได้ตามโหลดพยากรณ์ สถานีไฟฟ้า A, B และ C ต้องรับโหลดแทนสถานีไฟฟ้า D

ตารางที่ 5 การคิดโหลดที่ปลายสายของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 เมื่อแบ่งโหลดให้กับสถานีไฟฟ้า D

บัส	ผลรวมของพิกัดหม้อแปลงจำหน่าย (กิโลวัตต์)	Ratio
3 ถึง 30	6,760	0.1887
31 ถึง	29,060	0.8113
รวม	35,820	1



รูปที่ 4 แผนภาพเส้นเคเบิลของวงจรสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า
หมายเลข A05

5.3 กำหนดค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง

ค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังหาได้จากการแทนค่าในสมการ (16) แล้วนำมาคูณกับ Ratio ของหม้อแปลงจำหน่ายตามตารางที่ 6 ส่วนค่า W_i W_c และ W_{other} ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง แสดงตามตารางที่ 7

โดย W_i W_c และ W_{other} เป็นค่าที่ สามารถหาได้จากค่ามาตรฐานของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแต่ละผลิตภัณฑ์ตามตารางที่ 3 และ ตัวประกอบค่าความสูญเสีย (Loss factor) ของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หาได้จากสมการ (19) [10]

$$Loss Factor = LF^2 + 0.273(LF - K)^2 \quad (19)$$

เมื่อ Loss Factor คือ ตัวประกอบค่าความสูญเสีย

LF คือ ค่าเฉลี่ยโหลด / ค่าสูงสุดของโหลด

K คือ ค่าต่ำสุดของโหลด / ค่าสูงสุดของโหลด

ตารางที่ 6 ค่า Ratio ที่คิดตามโหลดพยากรณ์ และ
ระยะทางของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า

สายส่ง จำหน่าย	Ratio ของโหลดที่แบบรับโดยสถานี			
	A	B	C	D
A05	0.1887	-	-	0.8113
B05	-	0.2685	-	0.7315
C04	-	-	0.3967	0.6033
C05	-	-	0.4404	0.5596
C10	-	-	0.1958	0.8042

ตารางที่ 7 ค่า W_i W_c และ W_{other} ของหม้อแปลงไฟฟ้า
กำลัง

บริษัทผู้ผลิต	P1	P2	P3
W_i (kW)	23	23	23
W_c (kW)	133	133	133
W_{other} (kW)	2	2	2

ตารางที่ 8 ข้อมูลโหลดของสถานีไฟฟ้า A (A05)

ข้อมูล	สถานีไฟฟ้า A		สายส่งจำหน่าย ไฟฟ้า หมายเลข A05	
	2559	2560	2559	2560
โหลดสูงสุด (MW)	65.4	59.4	10.1	6.6
โหลดต่ำสุด (MW)	7.3	6.0	0.3	0.8
โหลดเฉลี่ย (MW)	32.3	33.5	3.0	3.6

ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่อชั่วโมงเมื่อสถานีไฟฟ้า A มีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 จะได้เท่ากับค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าขณะที่มีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 ลบด้วยค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าขณะที่ไม่มีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 แล้วนำค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ได้คูณด้วยค่า Ratio ของหม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งได้จากการแบ่งตามโหลดและระยะทางของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับสถานีไฟฟ้า A ใช้หม้อ

แปลงไฟฟ้ากำลังผลิตภัณฑ์ P1 ขนาดพิกัด 50 MVA จำนวน 2 เครื่อง โดยมีข้อมูลโหลดตามตารางที่ 8 เมื่อแทนค่าในสมการที่ (16) และ (19) จะได้ข้อมูลในการคิดค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในกรณีที่ไม่มีและไม่มีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า A05 ดังตารางที่ 9 จากนั้นนำข้อมูลความสูญเสียทั้งสองกรณีมาหาผลต่างแล้วคูณด้วยค่า Ratio จะได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในกรณีที่ไม่มีสถานีไฟฟ้า D หรือขณะที่สถานีไฟฟ้า A ต้องแบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ข้อมูลในการคิดค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้า A

ข้อมูล	กรณีมีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า หมายเลข A05		กรณีไม่มีสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า หมายเลข A05	
	ปี 2559	ปี 2560	ปี 2559	ปี 2560
โหลดสูงสุด (MW)	65.4	59.4	55.3	52.8
โหลดต่ำสุด (MW)	7.3	6.0	7.0	5.2
โหลดเฉลี่ย (MW)	32.3	33.5	29.3	29.9
LF	4.4247	5.5833	4.1857	5.7500
K	8.9589	9.9000	7.9000	10.1538
$Loss Factor$	25.1903	36.2606	21.2865	38.3570
TR_{Rated} (MVA)	100	100	100	100
W_i (kW)	23	23	23	23
W_c (kW)	133	133	133	133
W_{other} (kW)	2	2	2	2
TR_L ใน 1 ชั่วโมง (kW)	42.8538	42.3616	38.8724	38.7944

ตารางที่ 10 ค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้า A

ข้อมูลสถานีไฟฟ้า A	กรณีที่สถานีไฟฟ้า A ต้องแบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D	
	ปี 2559	ปี 2560
ผลต่าง TR_L ใน 1 ชั่วโมง (kW)	3.9814	3.5672
Ratio ที่สถานีไฟฟ้า D แบกรับ	0.8113	0.8113
TR_L ใน 1 ชั่วโมง (kW)	3.2301	2.8940

จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง เช่นเดียวกันในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข B05, C04, C05 และ C10 จะได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้า A, B และ C ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในปี 2559 และปี 2560 ตามตารางที่ 11

ดังนั้น ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้า A, B และ C ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในปี 2559 มีค่าเท่ากับ 28.4282 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และในปี 2560 มีค่าเท่ากับ 24.9803 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

5.4 คำนวณหาค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า

การประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า จะทำการวิเคราะห์สายส่งจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง เนื่องจากความต้านทาน โดยการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB มาใช้ในการประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า เริ่มจากการเตรียมข้อมูลเพื่อป้อนในโปรแกรม MATLAB ได้แก่ ค่ารีซิสแตนซ์ (R) รีแอคแตนซ์ (X) อิมพีแดนซ์ (Z) แอดมิตแตนซ์ (Y) คอนดักแตนซ์ (G) และชัซเซฟแตนซ์ (B) แสดงตามตารางที่ 12

ตารางที่ 11 ค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้า A, B และ C

สถานีไฟฟ้า	สายส่งจำหน่าย	TR_L ใน 1 ชั่วโมง (kW)	
		ปี 2559	ปี 2560
A	A05	3.2301	2.8940
B	B05	5.2316	5.5360
C	C04	7.0778	5.5056
	C05	5.5068	4.9192
	C10	7.3819	6.1254
รวม		28.4282	24.9803

ตารางที่ 12 ข้อมูลสำหรับใช้คำนวณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าสำหรับสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า

บริษัทผู้ผลิต	E1	E2
Resistance (Ω -km)	0.193	0.193
Inductance (mH/km)	0.388	0.434
Capacitance (mH/km)	0.217	0.166
R (p.u.)	0.0399	0.0399
X_L	0.122	0.136
X_L (p.u.)	0.0252	0.0282
X_C	14,662.7566	19,167.5794
X_C (p.u.)	3,029.4952	3,960.2437
B_C (p.u.)	0.00033	0.00025
Z (p.u.)	0.0399 - j0.0252	0.0399 - j0.0282

ค่าแรงดันไฟฟ้าของการส่งจำหน่ายไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดแสดงตามตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ข้อมูลสถานีไฟฟ้า A สายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05 ที่ใช้ในการป้อนโปรแกรม

รายละเอียด	A05	
	ปี 2559	ปี 2560
Voltage magnitude in p.u. at Slack bus (p.u.)	1.02	1.04
Voltage angle at Slack bus (Degree)	0	0
Voltage magnitude in p.u. at Load bus (p.u.)	1.00	1.00
Voltage angle at Load bus (Degree)	0	0
Voltage magnitude in p.u. at Generator bus (p.u.)	1.00	1.00
Voltage angle at Generator bus (Degree)	0	0
Maximum Generator real power (MW)	10.1	6.6
Maximum Generator reactive power (MVar)	5	4.2
Average Generator real power (MW)	3	3.6
Average Generator reactive power (MVar)	1.6	2.3
Base MVA	100	100
Maximum Utilization Factor (Real power)	0.2820	0.1843
Maximum Utilization Factor (Reactive power)	0.1396	0.1173
Average Utilization Factor (Real power)	0.0829	0.0993
Average Utilization Factor (Reactive power)	0.0446	0.0645

เมื่อป้อนข้อมูลในโปรแกรม MATLAB โปรแกรมจะทำตามขั้นตอนในรูปที่ 4 เมื่อโปรแกรมทำครบทุกขั้นตอนแล้ว จะได้ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าปรากฏ ตามสมการ (20)

$$S_{Loss} = \sqrt{P_{Loss}^2 + Q_{Loss}^2} \quad (20)$$

เมื่อ S_{Loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียปรากฏ (kW)

P_{Loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจริง (kW)

Q_{Loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟ (kW)

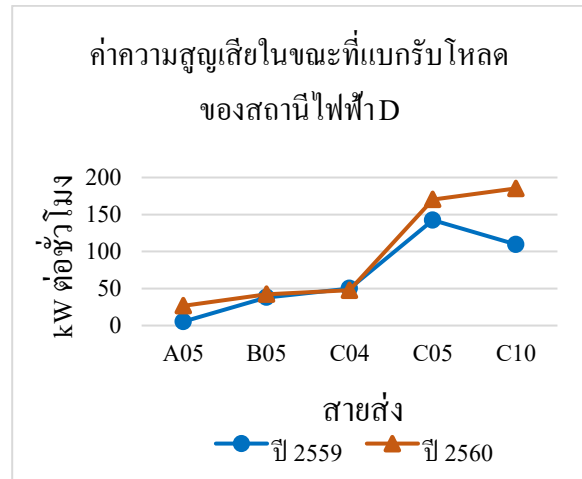
นำ S_{Loss} ที่โหลดสูงสุด และ S_{Loss} ที่โหลดเฉลี่ยไปหาตัวประกอบค่าความสูญเสียของโหลด (Load Loss Factor) ซึ่งมีความสัมพันธ์ คือ อัตราส่วนของความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยกับความสูญเสียกำลังไฟฟ้าสูงสุด ทำให้ได้ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า ตามความยาวของสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าจากสมการ (17) เมื่อทำการคำนวณตามขั้นตอนข้างต้นแล้ว จะได้ค่าความสูญเสียในสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05, B05, C04, C05 และ C10 ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในปี 2559 และปี 2560 ตามตารางที่ 14 และรูปที่ 5

ตารางที่ 14 ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D

สายส่งหมายเลข	Line Loss ใน 1 ชั่วโมง (kW)	
	ปี 2559	ปี 2560
A05	5.2112	26.6070
B05	37.9472	42.3369
C04	50.0350	47.7094
C05	142.4601	170.2707
C10	109.4365	185.2803
รวม	345.0901	472.2044

ดังนั้น ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าหมายเลข A05, B05, C04, C05 และ C10 ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในปี 2559 มีค่าเท่ากับ 345.0901 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และในปี 2560 มีค่าเท่ากับ 472.2044 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในปี 2560 มีค่าเพิ่มขึ้นจากปี 2559 สาเหตุเนื่องจากมีโหลดการใช้งานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 5 ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D

5.5 คำนวณมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย

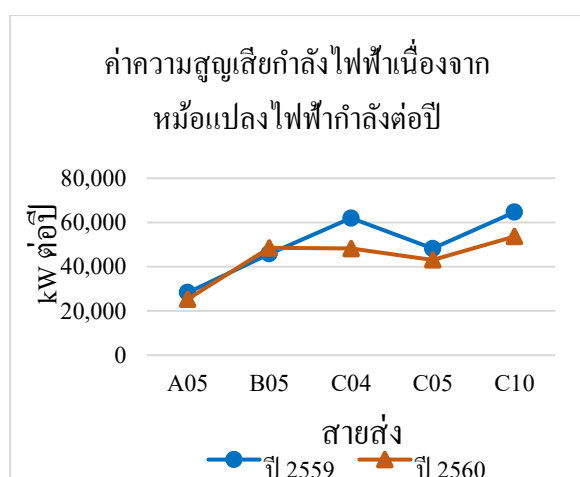
จากผลการวิจัยข้อ 5.3 และ 5.4 จะได้ค่าความสูญเสียต่อชั่วโมงในระบบไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้าและสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในปี 2559 และปี 2560 จากนั้นจึงคำนวณเป็นค่าความสูญเสียต่อปี โดยคูณค่าความสูญเสียต่อชั่วโมงกับ 8,760 ซึ่งเป็นจำนวนชั่วโมงต่อปี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 15 และรูปที่ 6 และ 7

จากนั้นนำค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณเป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน เนื่องจากมีค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบไฟฟ้ามากเพิ่มขึ้นในแต่ละปี จึงต้องนำค่าไฟฟ้าที่สูญเสียที่เกิดขึ้นในอนาคตแปลงกลับมาให้เป็นมูลค่าเงินในปัจจุบัน

จากตารางที่ 15 จะเห็นว่าค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในปี 2559 รวมกันมีค่าเท่ากับ 3,272,020.35 kW และในปี 2560 มีค่าเท่ากับ 4,355,337.28 kW ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 1,083,316.93 kW คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า เท่ากับ 33.11% ดังนั้น จึงใช้ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าในปี 2561 ถึงปี 2565 เพิ่มขึ้นในอัตราปีละ 33.11% ทำให้ได้ค่าประมาณของค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของปี 2561 ถึงปี 2565 ดังตารางที่ 16 และรูปที่ 8

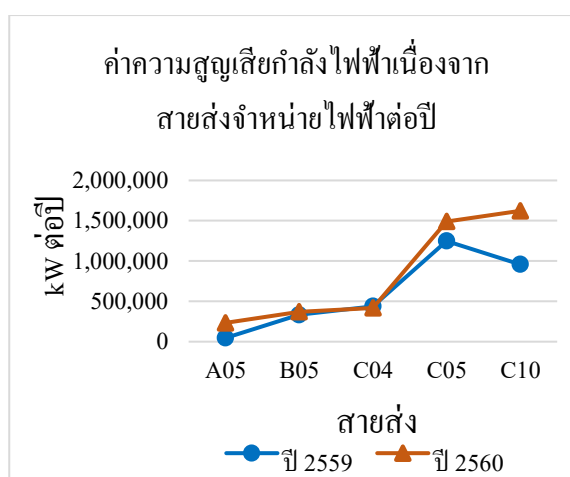
ตารางที่ 15 ค่าความสูญเสียเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้าและสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D

สายส่งหมายเลข	ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่อปี (kW)		ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้ากำลังต่อปี (kW)	
	ปี 2559	ปี 2560	ปี 2559	ปี 2560
A05	28,295.78	25,351.73	45,650.46	233,077.30
B05	45,828.60	48,495.40	332,417.30	370,871.37
C04	62,001.49	48,229.08	438,306.81	417,934.12
C05	48,239.28	43,092.20	1,247,950.86	1,491,571.62
C10	64,665.78	53,658.72	958,664.01	1,623,055.75
รวม	249,030.93	218,827.13	3,022,989.43	4,136,510.16



รูปที่ 6 ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังต่อปี

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในปี 2560 มีค่าเพิ่มขึ้นจากปี 2559 สาเหตุเนื่องจากมีโหลดการใช้งานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D มีค่าสูงขึ้น

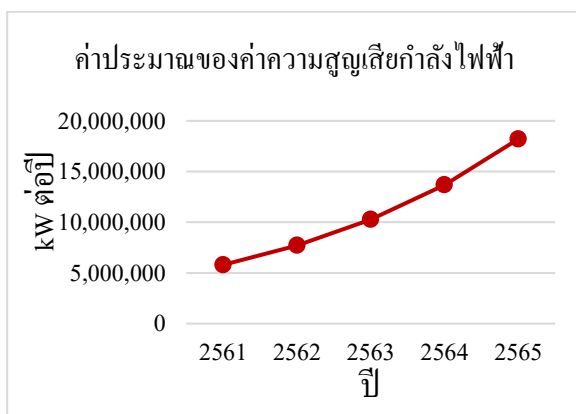


รูปที่ 7 ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าต่อปี

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้าในปี 2560 มีค่าเพิ่มขึ้นจากปี 2559 สาเหตุเนื่องจากมีโหลดการใช้งานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งจำหน่ายไฟฟ้า ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D มีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 16 ค่าประมาณของค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของปี 2561 ถึงปี 2565

ปี	ค่าประมาณของค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า (kW)
2561	5,797,324.22
2562	7,716,731.44
2563	10,271,625.65
2564	13,672,407.05
2565	18,199,136.25



รูปที่ 8 ค่าประมาณของค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าของปี 2561 ถึงปี 2565

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่าค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าแต่ละปีมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากโหลดหรือมีผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วยของอัตราแรงดัน 22 kV มีค่าเท่ากับการใช้พลังงาน 1 กิโลวัตต์ ใน 1 ชั่วโมง มีค่าไฟฟ้าเท่ากับ 5.1135 บาทต่อหน่วย ดังนั้น เมื่อคูณค่าประมาณของค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ากับค่าไฟฟ้าต่อหน่วยจะได้ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเมื่อแปลงค่าไฟฟ้าที่สูญเสียเป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันตามสมการ (18) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ลูกค้ารายย่อยชั้นดี (Minimum Retail Rate, MRR) เท่ากับ 7% จะได้มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในปี 2561 ถึงปี 2565 ตามตารางที่ 17

จากตารางที่ 17 สามารถคำนวณหามูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสะสมของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียเมื่อสถานีไฟฟ้า D

ยังไม่ได้ก่อสร้างเป็นเวลา 5 ปี ได้ตามตารางที่ 18 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อสถานีไฟฟ้า D ไม่สามารถจำหน่ายไฟฟ้าได้ตามโหลดพยากรณ์ภายในปี 2561 จะมีค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย 27,705,249.93 บาท และค่าไฟฟ้าที่สูญเสียนี้อาจเพิ่มขึ้นตามเวลา จนมีมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสะสมของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียสูงถึง 265,984,315.97 บาท ในปี 2565

ตารางที่ 17 ค่าไฟฟ้าที่สูญเสียและมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ปี	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท)	มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท)
2561	29,644,617.42	27,705,249.93
2562	39,459,506.24	36,878,043.22
2563	52,523,957.75	49,087,810.98
2564	69,913,853.47	65,340,049.97
2565	93,061,283.20	86,973,161.87

ตารางที่ 18 มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสะสมของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียเมื่อสถานีไฟฟ้า D ยังไม่ได้ก่อสร้างเป็นเวลา 5 ปี

ปี	มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสะสมของค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท)
2561	27,705,249.93
2562	64,583,293.15
2563	113,671,104.13
2564	179,011,154.10
2565	265,984,315.97

6. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า โดยทำการประมาณค่าความสูญเสียในขณะที่ไม่มีโหลด ขณะที่ไม่มีโหลด และจากปัจจัยอื่น ๆ ส่วนที่สอง คือ ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจากสายส่ง

จำหน่ายระดับแรงดันปานกลาง โดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น จากนั้นนำค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ได้ มาคำนวณเป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันที่แผนงานล่าช้า

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อสถานีไฟฟ้า D จำหน่ายไฟฟ้าไม่ปฏิบัติตามโหลดพยากรณ์ที่กำหนดไว้ จะส่งผลกระทบต่อให้มีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยมีค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าสรุปได้ ดังนี้

(1) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในสถานีไฟฟ้า ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในปี 2559 มีค่าเท่ากับ 249,030.93 กิโลวัตต์ และในปี 2560 มีค่าเท่ากับ 218,827.13 กิโลวัตต์

(2) ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้า เนื่องจากสายส่งจำหน่ายระดับแรงดันปานกลาง ในขณะที่แบกรับโหลดของสถานีไฟฟ้า D ในปี 2559 มีค่าเท่ากับ 3,022,989.43 กิโลวัตต์ และในปี 2560 มีค่าเท่ากับ 4,136,510.16 กิโลวัตต์

ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าโดยรวมในปี 2560 เพิ่มขึ้น 33.11% เมื่อเทียบกับปี 2559 และเมื่อใช้อัตราการเพิ่มขึ้นดังกล่าวมาประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ก็จะสามารถประมาณค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าที่สูญเสียในปี 2561 ถึงปี

2565 ได้ รวมถึงยังสามารถคำนวณเป็นมูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันสะสมของค่าไฟฟ้าที่สูญเสียได้อีกด้วย

ผลการวิจัยพบว่า ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับเพิ่มมากขึ้นในทุกปี โดยมีค่าสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อสถานีไฟฟ้า D ไม่สามารถจำหน่ายไฟฟ้าได้ต่อชั่วโมงเท่ากับ 497.18 กิโลวัตต์ คิดเป็นเงินเท่ากับ 2,542.35 บาทต่อชั่วโมง เมื่อคิดเป็นระยะเวลา 1 ปี จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น 27,705,249.93 บาท และค่าใช้จ่ายนี้จะเพิ่มขึ้นจนถึง 265,984,315.97 บาท เมื่อไม่สามารถจำหน่ายไฟฟ้าได้เป็นระยะเวลา 5 ปี ซึ่งเท่ากับราคาราก่อสร้างสถานีไฟฟ้า 1 สถานี จะเห็นว่าแผนงานก่อสร้างสถานีไฟฟ้า ควรนำค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมในการพิจารณาการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแห่งใหม่ในเวลาที่เหมาะสมต่อไป

ทั้งนี้ โปรแกรม MATLAB ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น สามารถประยุกต์ใช้กับระบบจำหน่ายในพื้นที่อื่น ๆ ได้ เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ควรพัฒนาโปรแกรม MATLAB คู่กับโปรแกรม MS-Excel เพื่อสะดวกในการนำค่ามาคำนวณ เนื่องจากข้อมูลของสถานีไฟฟ้าเก็บในรูปแบบของไฟล์ MS-Excel ถ้าสามารถดึงค่าจากโปรแกรม MS-Excel มาที่โปรแกรม MATLAB จะสะดวกยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การจำหน่ายพลังงานไฟฟ้า. 2562. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.egat.co.th>
- [2] Kulkarni, V.A. and Katti, P.K. Estimation of Distribution Transformer Losses in Feeder Circuit. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2011; 3 (5): 659-662.
- [3] Pande, S. and Ghodekar, J.G. Computation of Technical Power Loss of Feeders and Transformers in Distribution System Using Load Factor and Load Loss Factor. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 2012; 3 (6): 22-25.
- [4] Bamigbola, O.M., Ali, M.M. and Oke, M.O. Mathematical Modeling of Electric Power Flow and the Minimization of Power Losses on Transmission Lines. *Applied Mathematics and Computation*, 2014; 241: 214-221.
- [5] ศิริชัย วัฒนาโสภณ. การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร, 2554.
- [6] ชัด อินทะสี. การส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้า. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพมหานคร, 2554.

- [7] Chatterje, S. and Mandal, S. A Novel Comparison of Gauss-Seidel And Newton-Raphson Methods for Load Flow Analysis. International Conference on the Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 16 - 18 March, Chennai, India, 2017.
- [8] Momani, M.A. Factor affecting corona power losses in Jordan power grid. The 2015 Third International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), 29 April – 1 May, Beirut, Lebanon, 2015.
- [9] Grainger, J.J. and Stevenson, W.D. Power System Analysis. McGraw-Hill, New York, 1994.
- [10] Singhal, K. Comparison between Load Flow Analysis Methods in Power System Using MATLAB. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2014; 5 (5): 1412-1419.
- [11] Kral, V., Rusek, S. and Rudolf, L. Calculation and Estimation of Technical Losses in Transmission Network. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012; 88: 88–91.
- [12] Mandava, S., Ramesh, V. and Karthikeyan, P. A Simple Load Flow Method for Radial Distribution System, International Conference on the Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 9-11 January, Vellore, India, 2014.
- [13] ปริญญ์ สกวนสัจย์. คู่มือการใช้งาน MATLAB. บริษัท ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด, นนทบุรี, 2556.
- [14] Newman, D.G., Eschenbach, T.G. and Lavelle, J.P. Engineering Economic Analysis. Oxford University Press, United States of America, 2004.



การออกแบบและสร้างตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม

Design and Implementation of Proportional- Resonant Controller for Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique

กวีวัชร โพธิ์ดำรงชัย¹ วันจักร์ เล่นวารี^{1*} และ คณาพจน์ ยอดมณี²

Kaweewat Podumrongchai¹, Wanchak Lenwari^{1*} and Kanapot Yodmanee²

¹ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

กรุงเทพมหานคร 10140

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

วิทยาเขตวังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์ 77110

¹Department of Control System and Instrumentation Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

²Department of Electrical Engineering Technology Faculty of Industry and Technology
Rajamangala University of Technology Rattanakosin Wang Klai Kangwon Campus,
Prachuap Khiri Khan, 77110

E-mail: wanchak.len@kmutt.ac.th, Telephone Number:085-400-5975

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-Resonant: PR) สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter: SAPF) ชนิด 1 เฟส การควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานอยู่บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม ซึ่งใช้กระแสอ้างอิงที่ใช้ชดเชยเป็นกระแสของแหล่งจ่าย การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมอาศัยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) การตรวจสอบการทำงานของระบบควบคุมที่นำเสนอใช้การจำลองและการทดสอบ ต้นแบบของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ได้ถูกพัฒนาขึ้นและทดสอบโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าจริงที่มีฮาร์มอนิก จากผลการทดสอบแสดงว่าวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) ของกระแสแหล่งจ่ายได้ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE Standard 519-2014

คำสำคัญ: วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส, ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-Resonant Controller), วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm), การควบคุมกระแสทางอ้อม (Indirect Current Control)

ABSTRACT

The design and implementation of proportional-resonant (PR) controller for single-phase shunt active power filters (SAPF) is presented in this paper. The control of SAPF is implemented based on an indirect current control technique which employs the reference compensating current as reference source current. Controller parameters are optimized through the use of Genetic Algorithms (GA). The validation of the proposed control system is done through both simulation and experiment. The prototype of a single-phase SAPF is developed and tested under a real supply voltage which contains harmonics. Experimental results show that SAPF reduces the source current total harmonics distortion (THD) to less than 5% which complies with IEEE Standard 519-2014.

Keyword: Single Phase Shunt Active Power Filters, Proportional-Resonant Controller, Genetic Algorithms, Indirect Current Control

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้เครื่องมือทางไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความสะดวกสบายในการใช้ชีวิตประจำวันมากขึ้น ตัวอย่าง เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร และอุปกรณ์อัตโนมัติต่าง ๆ ซึ่งจะสร้างมลพิษทางไฟฟ้าขึ้น เรียกว่าฮาร์โมนิก (Harmonic) และความเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (Voltage distortion) ทำให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าต่ำลง เกิดจากการใช้งานโหลดประเภทแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) เช่น วงจรเรียงกระแส (Rectifier) แปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งโหลดประเภทนี้ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบมีการทำงานที่ผิดพลาดและก่อให้เกิดการชำรุดเสียหายได้ [1-2] ดังนั้นการกำจัดฮาร์โมนิกให้ลดลงสามารถทำได้โดยการใช่วงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active Power Filter) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่กำจัดฮาร์โมนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสและระบบไฟฟ้าสามเฟส [3]

วิธีการอ้างอิงบนแกนดีคิว (D-Q Reference frame) นั้นจะนิยมใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟของระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งจะไม่สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าหนึ่งเฟสได้โดยตรง แต่สามารถทำได้โดยสมมุติตัวแปรขึ้นให้ค่าของตัวแปรหรือสัญญาณที่สมมุติขึ้นมานั้นทำมุมล่าช้ากับสัญญาณที่กำหนดหรือสัญญาณที่ต้องการวัดค่าออกไป 90 องศาเพื่อให้สามารถคำนวณบนพื้นฐานของพาร์กได้ [4-5] ซึ่งเทคนิคการหาค่าอ้างอิงบนแกนดีคิวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟ (Active power filters)

เป็นการหาค่าขนาดและแรงดันในปริมาณดีไซน์บนพื้นฐานการแปลงแกนของพาร์ก (Park transformation) [6]

วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) สามารถนำมาช่วยหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสที่เหมาะสม [7-8] โดยได้มีการนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

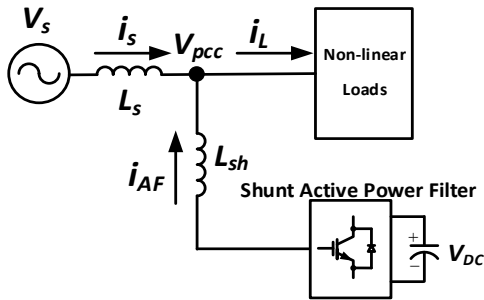
เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจะเกิดค่าอัตราขยายเป็นอนันต์ ซึ่งมีข้อยกเว้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ ดังนั้นตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ (Proportional-resonant controller) [9] จะสามารถจะปรับตัวตามความถี่เรโซแนนซ์ได้และยังเป็นตัวควบคุมกระแสที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการควบคุมกระแสอ้างอิงที่เป็นสัญญาณกระแสสลับ

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อมด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม ผลการจำลองและผลการทดสอบจริงแสดงประสิทธิภาพการกำจัดฮาร์โมนิกในระบบให้มีค่าตามมาตรฐาน IEEE Std 519-2014 [10]

2. ทฤษฎี

การควบคุมกระแสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน (Shunt Active Power Filter) สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ การควบคุมกระแสแบบทางตรงและการควบคุมกระแสแบบทางอ้อม จากรูปที่ 1

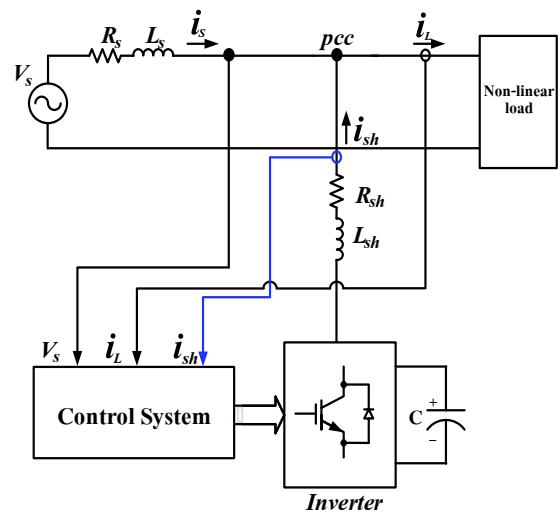
แสดงหลักการพื้นฐานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบมีจุดประสงค์เพื่อกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบเพื่อให้กระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์และมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานมากที่สุด



รูปที่ 1 วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน

2.1 การควบคุมกระแสแบบทางตรง

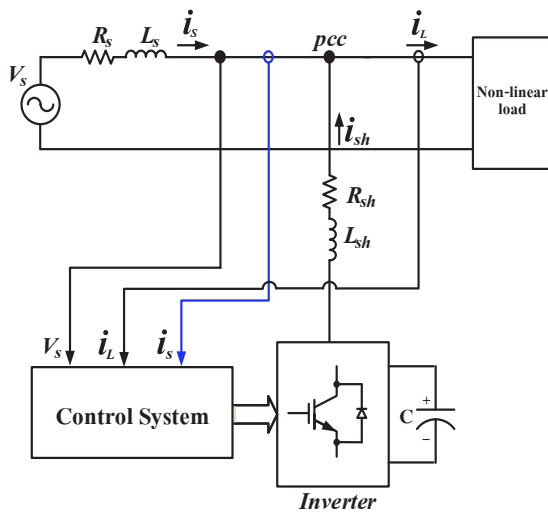
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางตรง โดยการควบคุมกระแสแบบทางตรงจะใช้สัญญาณกระแสอ้างอิง i_{sh}^* ที่เป็นกระแสฮาร์มอนิกที่ผ่านการคำนวณจากการวัดกระแสที่โหลด i_L และวัดกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{sh} เพื่อทำการป้อนกลับ (Feedback) ไปยังระบบควบคุม เพื่อให้ระบบควบคุมสามารถติดตามกระแสชดเชยให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงได้ ส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าหมดไปและกระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ เหลือไว้เฉพาะความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) [11-13] ซึ่งการควบคุมกระแสแบบทางตรงมีข้อดีคือ การออกแบบตัวควบคุมสามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากสามารถรู้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบ แต่ข้อเสียคือ เนื่องจากการควบคุมกระแสแบบทางตรง จะเป็นการควบคุมกระแสที่ฉีดเข้าระบบ i_{sh} ซึ่งความถูกต้องจะขึ้นกับความถูกต้องกระแสอ้างอิง i_{sh}^* และประสิทธิภาพของตัวควบคุม



รูปที่ 2 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางตรง

2.2 การควบคุมกระแสแบบทางอ้อม

จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยการควบคุมกระแสแบบทางอ้อม จะใช้สัญญาณอ้างอิง i_s^* ที่เป็นกระแสรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน ที่ผ่านการคำนวณจากการวัดกระแสที่โหลด i_L และวัดกระแสที่แหล่งจ่าย i_s เพื่อทำการป้อนกลับไปยังระบบควบคุม เพื่อบังคับให้กระแสที่แหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐานเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกออกไป [14-17] ซึ่งการควบคุมกระแสแบบทางอ้อมมีข้อดีคือ สามารถควบคุมกระแส i_s โดยตรงทำให้แน่ใจว่ากระแส i_s เป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ข้อเสียคือ การออกแบบตัวควบคุมมีความซับซ้อนเนื่องจากไม่ทราบค่าฟังก์ชันถ่ายโอนที่แน่นอน



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนาน
ชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม

2.3 ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์จะมีอัตราขยายเป็นค่าอนันต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ สมการของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์แสดงได้ดังสมการที่ (1) [18]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (1)$$

ตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ได้นำมาพัฒนาสำหรับการประยุกต์ใช้บนแกนหยุดนิ่ง (Stationary reference frame) เพื่อควบคุมสัญญาณที่มีความถี่มูลฐานได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุมชนิดนี้ได้มีการแก้ไขส่วนของเรโซแนนซ์ โดยเพิ่มเทอม ω_0 ตามสมการที่ (2) [19]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_r \omega_0 s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

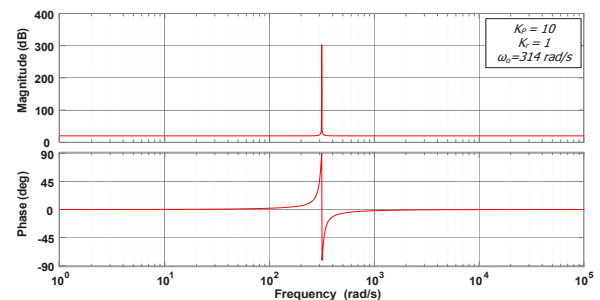
โดย

K_p คือ อัตราขยายแบบสัดส่วน

K_r คือ อัตราขยายแบบเรโซแนนซ์

ω_0 คือ ความถี่เรโซแนนซ์

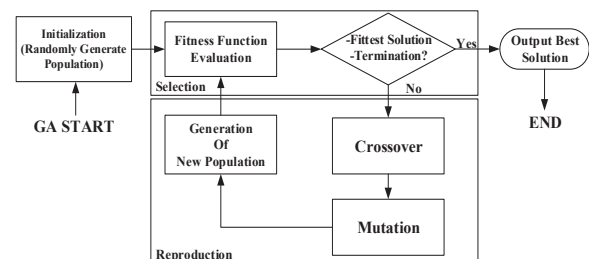
จากรูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ด้วยแผนภาพโบเดของสมการที่ (2) โดยกำหนดให้ $K_p=10$, $K_r=1$ และ $\omega_0 = 50 \text{ Hz}$ (314 rad/s) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีอัตราขยายที่สูง ทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวควบคุมสำหรับสัญญาณอ้างอิงที่เป็นกระแสสลับที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกความถี่เรโซแนนซ์ที่ 50 Hz



รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวควบคุม
สัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์

2.4 ขั้นตอนวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม

วิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) หรือ GA เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุศาสตร์ รูปที่ 5 แสดงองค์ประกอบและการทำงานของ GA



รูปที่ 5 องค์ประกอบและการทำงานของวิธีพื้นฐานเชิง
พันธุกรรม

องค์ประกอบและการทำงานของ GA สามารถอธิบายคือ

1. การสร้างประชากรเริ่มต้น(Initial population)
ประชากร (Population) เริ่มต้นของระบบ GA คือ เซตของคำตอบแต่ละชุด โดยที่แต่ละคำตอบแต่ละชุด คือ วิธีการแก้ปัญหา การแทนค่าของคำตอบแต่ละชุด หรือ โครโมโซม(Chromosome) ขึ้นอยู่กับลักษณะและธรรมชาติของงาน วิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ คือ บิตสตริง หรือค่า “0” และ “1” ตัวอย่างเช่น ใช้ 8-บิตสตริง เพื่อแทนความฉลาด ดังนั้นคำตอบแต่ละชุดที่ฉลาดที่สุด อาจสามารถแทนค่าได้เป็นโครโมโซม “11111111” และคำตอบแต่ละชุดที่ฉลาดน้อยที่สุดอาจสามารถแทนค่าได้เป็นโครโมโซม “00000000” การใช้ค่า “0” และ “1” ในการแทนค่าโครโมโซมเป็นวิธีที่ธรรมดาและสะดวกที่สุด วิธีการใช้ค่าอื่นเช่นตัวอักษรและตัวเลขฐานสิบ ได้มีการถูกนำมาแทนค่าโครโมโซมได้เหมือนกันและเช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าโครโมโซมเป็นแบบตัวเลขฐานสิบ แต่ขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ใช้ GA อยู่ในขณะนั้น [20]

2. การประเมินค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function evaluation) เป็นขั้นตอนในการประเมินว่าโครโมโซมหนึ่ง ๆ ดีหรือไม่คืออย่างไร เมื่อเทียบกับโครโมโซมอื่น ๆ ที่มีในกลุ่มประชากรนั้น ๆ โดยปกติแล้ว การประเมินค่าความเหมาะสมของโครโมโซมจะคำนวณจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective/Evaluation function) ถือเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการของ GA ที่ใช้ในการประเมินผลคำตอบของระบบว่าดีหรือไม่ดี ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่ทำการประเมินคำตอบจากโครโมโซมโดยเทียบกับเป้าหมายของระบบ ในกรณีที่เป็น ปัญหาของการ คำนวณค่า น้อยที่สุด (Minimization problem) โครโมโซมที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของระบบจะมีตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ตัวอย่างของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้แก่ ฟังก์ชันทั่วไปที่ใช้คำนวณค่าผิดพลาดของระบบ (Error) เช่น MSE (Mean-squared error) ,SSE (Sum-squared error) ,RMSE (Root-mean-squared error) หรือ IAE (Integral of absolute error) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของระบบดังกล่าวก็คือต้องการให้ค่าความผิดพลาดของระบบ

มีค่าน้อยที่สุด ค่าการประเมิน (Evaluation value) ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นตัวบอกว่าคำตอบของระบบขณะนั้นดีหรือไม่คืออย่างไรในกรณีนี้ สำหรับคำตอบหนึ่ง ๆ ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าหมายถึงคำตอบนั้นจะเป็นคำตอบที่ดีกว่าเช่นกัน

3. การคัดเลือกสายพันธุ์ (Selection)

การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นขั้นตอนในการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจากภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด ซึ่งโครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปใช้เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ “พ่อแม่” เพื่อใช้ในการให้กำเนิดลูกหลานในรุ่นถัดไป โดยปกติแล้ว เพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ดี ต้นกำเนิดของสายพันธุ์จะต้องดีด้วย จึงกลายเป็นปัญหาว่าจะทำการคัดเลือกต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ดีได้อย่างไร การคัดเลือกสายพันธุ์เป็นการจำลองการคัดเลือกโครโมโซมที่จะสามารถอยู่รอดได้ในแต่ละรุ่น สำหรับ GA นั้นจะทำการคัดเลือกโครโมโซมโดยการพิจารณาที่ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้น ๆ ดังนั้น โครโมโซมไหนมีค่าความเหมาะสมที่ดีย่อมหมายถึงการเป็นโครโมโซมที่ดีและควรมีโอกาสที่จะให้ลูกหลาน (Off-spring) ในจำนวนที่มากกว่าได้ ซึ่งย่อมเป็นการบ่งบอกว่าโอกาสในการอยู่รอดในรุ่นถัดไปจะมีเพิ่มมากขึ้นด้วย

4. ปฏิบัติการทางสายพันธุ์ (Genetic operation)

หรือ (Reproduction) หลังจากจบวนการคัดเลือกได้ดำเนินไปจนเสร็จสมบูรณ์ โครโมโซมลูกหลานจะถูกสร้างขึ้นใหม่ จากโครโมโซมที่ถูกคัดเลือกมาเป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์ โดยการเอาโครโมโซมที่เป็นต้นกำเนิดสายพันธุ์นั้นมาทำการเปลี่ยนแปลงให้เกิดโครโมโซมใหม่ขึ้น ขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของวัฏจักรของ GA ซึ่งมีการคาดหวังว่าโครโมโซมลูกหลานที่เกิดขึ้นนั้นจะได้รับส่วนของโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์โดยผ่านปฏิบัติการทางสายพันธุ์นี้ จะมีอยู่ 2 วิธีหลัก ๆ คือ การทำครอสโอเวอร์และการทำมิวเทชัน

- ครอสโอเวอร์ (Crossover) เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซม โดยทำการรวมส่วนย่อยระหว่างโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ ตั้งแต่สองโครโมโซมขึ้น

ไป เพื่อให้กลายเป็นโครโมโซมลูกหลานโครโมโซมลูกหลานที่ได้จากการครอสโอเวอร์นี้จะมีพันธุกรรมจากต้นกำเนิดสายพันธุ์อยู่ในตัว

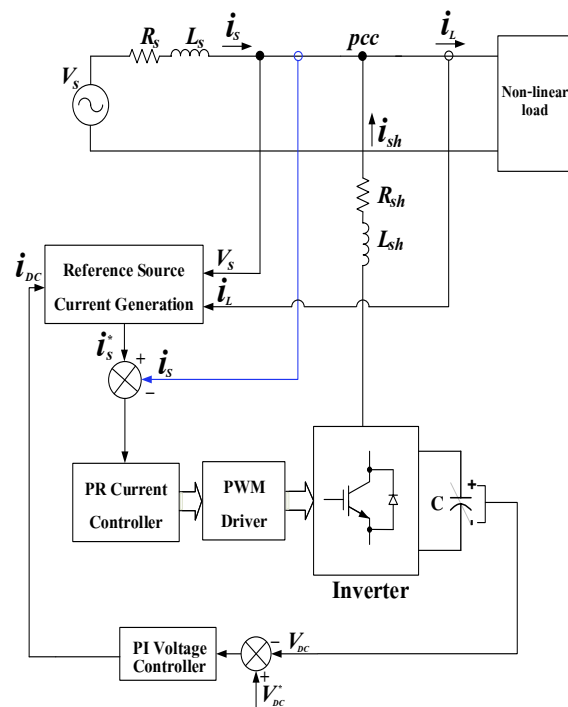
- มิวเทชัน (Mutation) เป็นวิธีการแปรผันยีนหรือส่วนย่อยของโครโมโซม ซึ่งเปรียบเทียบได้กับการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต ด้วยปกติแล้วการทำมิวเทชันจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ถ้ามิวเทชันคือการเปลี่ยนแปลงยีนของโครโมโซมแล้ว ในระบบจริงมิวเทชันก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงเชิงตัวเลขเช่นกัน การทำมิวเทชันเปรียบเสมือนการก้าวเดินไปสู่คำตอบของระบบ เช่นเดียวกับการทำครอสโอเวอร์ ยิ่งไปกว่านั้นการทำมิวเทชันยังสามารถถูกพิจารณาเพื่อทำให้เกิดความหลากหลายขึ้นในกลุ่มประชากร มีผลให้คำตอบที่เกิดขึ้นในขบวนการ GA ครอบคลุมพื้นที่การค้นหาคำตอบได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น

5. การแทนที่ (Replacement) คือขั้นตอนหลังจากที่กระบวนการ GA ได้โครโมโซมรุ่นลูกหลานมาเรียบร้อยแล้ว ค่อยจะนำโครโมโซมรุ่นลูกหลานใหม่ที่ได้ไปแทนที่ประชากรรุ่นเก่า เพื่อที่จะทำให้ประชากรรุ่นถัดไปประกอบไปด้วยโครโมโซมใหม่ ๆ ซึ่งเป็นโครโมโซมที่ดีกว่าเนื่องจากได้รับการสืบสายพันธุ์ที่ดีจากโครโมโซมต้นกำเนิดสายพันธุ์ที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้ว

3. ระบบที่นำเสนอ

3.1 ตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์สำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส

วงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อมที่นำเสนอ แสดงในรูปที่ 6 จะสังเกตได้ว่าการวัดค่ากระแส แรงดันและความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น โดยตัวควบคุม PR จะบังคับกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ i_{sh} เพื่อให้ได้ i_s ให้ตามกระแสอ้างอิง i_s^* ซึ่งตัวควบคุมกระแสชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ถูกออกแบบให้มีความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเท่ากับความถี่มูลฐาน 50 เฮิรตซ์



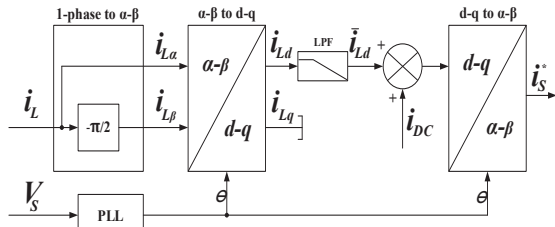
รูปที่ 6 โครงสร้างระบบที่นำเสนอ

3.2 เทคนิคการสร้างสัญญาณอ้างอิง

การสร้างสัญญาณอ้างอิงคือ การวัดค่ากระแสโหลด i_L เข้ามาคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุม การตรวจจับกระแสโหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงบนแกนดีควิโดยใช้พื้นฐานการแปลงแกนของพาร์จะสามารถนำมาใช้กำจัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟแบบขนานได้

จากรูปที่ 7 แสดงบล็อกไดอะแกรมการตรวจจับกระแสโหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง i_s^* โดยทำการกำหนดค่าของตัวแปรหรือสัญญาณกระแสที่โหลด i_L และทำการแปลงแกนให้ไปอยู่บนแนวแกนหยุดนิ่ง $\alpha - \beta$ ซึ่งจะได้ตัวแปร $i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$ จากนั้นกำหนดให้ตัวแปร $i_{L\beta}$ ทำมุมล้าหลังออกไป 90 องศา หรือ $-\pi/2$ ต่อมาทำการเปลี่ยนกระแสโหลด $i_{L\alpha}$ และ $i_{L\beta}$ ให้ไปอยู่บนแกนดีควิ (D-Q Reference frame) ผลลัพธ์ที่ได้คือ $d - Axis (i_{Ld})$ และ $q - Axis (i_{Lq})$ เมื่อได้ค่า i_{Ld} และ i_{Lq} จะทำการนำกระแส i_{Ld} ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ไปบวกกับเทอมของการ

ควบคุมบัสแรงดันดีซี (DC-Link) จะได้ค่า $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ จากนั้นทำการอินเวอร์ส (Inverse) ค่ากระแส $\bar{i}_{Ld} + i_{DC}$ ในรูปแบบแกนดิกิวให้กลับไปอยู่ในรูปของแกนหยดนิ่ง ดังนั้นจะได้ค่ากระแสอ้างอิง i_s^*



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมการตรวจจับสนะแสงโหลดเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง i_s^*

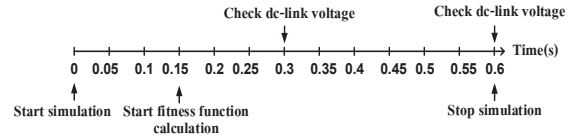
3.3 การออกแบบตัวควบคุมกระแสด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม

ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PR ตามสมการ (2) โดยกำหนดให้ $\omega_0 = 2\pi(50)$ เรเดียนต่อวินาที ซึ่งวิธีการออกแบบจะเริ่มต้นจากการสุ่มค่าของ K_p และ K_r โดยกำหนด K_p อยู่ในช่วง $[0-20]$ และ K_r อยู่ในช่วง $[0-20]$ ต่อมาทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับ GA แสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการกำหนดให้ค่าที่ 50 รุ่น (Generations) และในแต่ละรุ่น ให้คำนวณรอบละ 10 คำตอบแต่ละชุด ในขณะกระบวนการทำ GA นั้น ได้กำหนดให้หาค่าความผิดพลาดของระบบ มีค่าน้อยที่สุดด้วยวิธี Integral of absolute error (IAE) โดยเป็นการวัดค่าระหว่างกระแสอ้างอิง i_s^* กับกระแสแหล่งจ่าย i_s ดังสมการ (3) เมื่อทำการหาค่ากระบวนการ GA แล้วเราจะได้อัตราพารามิเตอร์ออกมาเช่น ค่าอัตราขยายและค่าความผิดพลาด

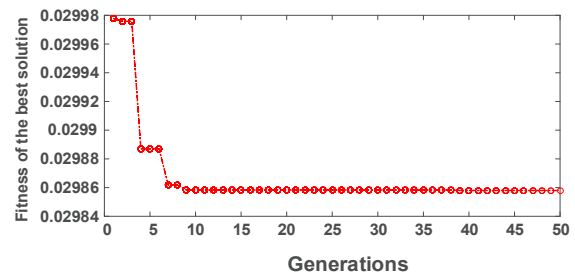
$$IAE = \int_0^T |i_s(t) - i_s^*(t)| dt \quad (3)$$

รูปที่ 8 แสดงไทม์มิงไดอะแกรมของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมกระแส โดยกำหนดให้ $t_0 = 0.15$ s คือเวลาเริ่มต้น เพื่อให้ระบบเสถียรก่อนหาค่าที่เหมาะสมและ $T = 0.6$ s คือเวลาสิ้นสุด

การคำนวณแต่ละรอบ นอกจากนี้มีการตรวจสอบความไม่เสถียรของระบบ ด้วยการวัดค่าแรงดัน DC-link ที่เวลา $t = 0.3$ ถึง 0.59 s



รูปที่ 8 ไทม์มิงไดอะแกรมของการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุมกระแส



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Fitness Function กับจำนวนรอบ

หลังจากทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม GA แล้ว กราฟความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 9 สังเกตได้ว่าค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจากค่าเริ่มต้น เนื่องจาก GA ในแต่ละรุ่นจะมีการเลือก 10 คำตอบแต่ละชุดมาหาความเหมาะสม ทำให้แต่ละรอบมีการเจอคำตอบแต่ละชุดที่เหมาะสมกับระบบ วิธีการนี้เป็นการเพิ่มความเร็วในการค้นหา หากเทียบกับจำนวนคำตอบแต่ละชุดที่น้อย ซึ่งจะใช้เวลาและจำนวนรุ่นที่มากกว่า

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมกระแสชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ที่เหมาะสมที่สุดและมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด K_p มีค่าเท่ากับ 12.7254 และ K_r มีค่าเท่ากับ 9.7077 ตัวควบคุมที่ได้หาค่าเหมาะสมที่สุดแล้วแสดงดังสมการ (4)

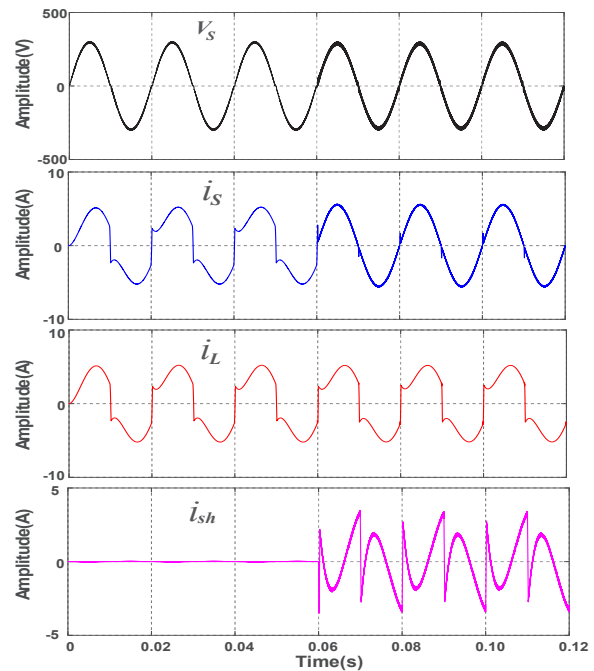
$$G_c(s) = 12.7254 + \frac{9.7077\omega_0 s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (4)$$

4. ผลการจำลองระบบ

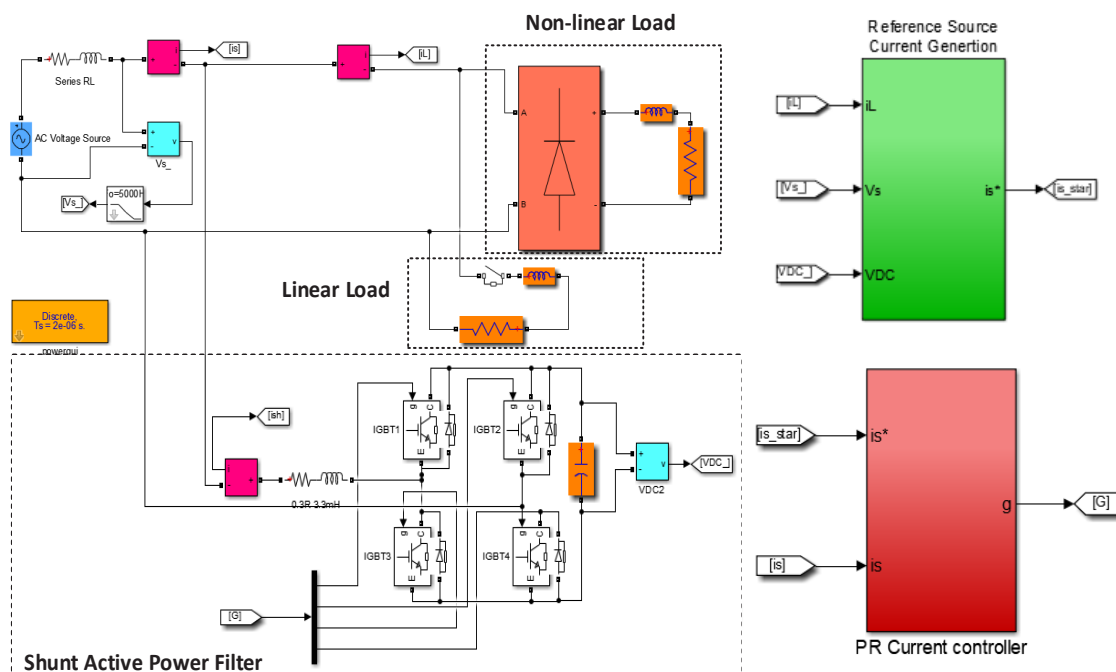
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองการทำงานของวงจรกำลังแอกทีฟ ดังรูปที่ 10 โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงในตารางที่ 1 จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK (SimPowerSystems)

4.1 ผลการจำลอง

รูปที่ 11 แสดงรูปคลื่น V_s , i_s , i_L และ i_{sh} ก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t=0.06$ s จะเห็นได้ว่าก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิกนั้น กระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับกระแสโหลด i_L แสดงว่ายังมีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่และหลังจากทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t = 0.06$ s จะเห็นได้ว่ากระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ซึ่งแสดงว่าสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้จริง ส่งผลให้สามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 28.28% เป็น 2.58%



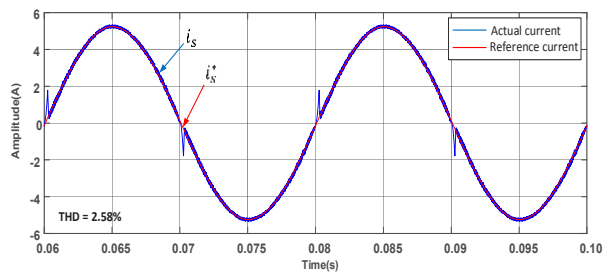
รูปที่ 11 รูปคลื่นสัญญาณของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ก่อนและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่เวลา $t = 0.06$ s



รูปที่ 10 บล็อกการจำลองของระบบ

รูปที่ 12 แสดงรูปคลื่นสัญญาณ i_s และ i_s^* กรณีต่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สภาวะคงตัว จะเห็นได้

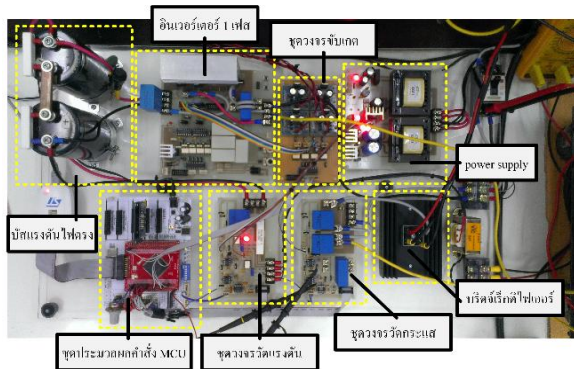
ว่ากระแสที่แหล่งจ่าย i_s มีรูปคลื่นสัญญาณเป็นรูปไซน์ที่สมบูรณ์และใกล้เคียงกับ i_s^*



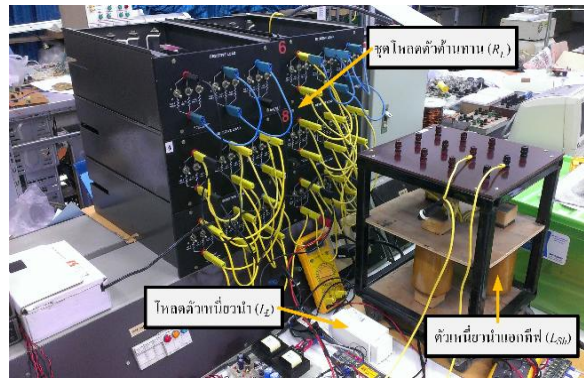
รูปที่ 12 รูปคลื่นสัญญาณ i_s และ i_s^* ที่สภาวะคงตัว

5. ผลการทดสอบจริง

จากรูปที่ 13 และ 14 เป็นการเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจริงของชุดควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยในส่วนของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย ชุดประมวลผลคำสั่งโปรแกรม MCU ชุดวงจรวัดแรงดัน ชุดวงจรวัดกระแส ชุดแหล่งจ่ายกำลัง ชุดวงจรอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส บัสแรงดันไฟตรง วงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ ชุดโหลดตัวต้านทาน R_L โหลดตัวเหนี่ยวนำ L_L และตัวเหนี่ยวนำแอกทีฟ L_{Sh} โดยค่าพารามิเตอร์ของระบบแสดงในตารางที่ 1

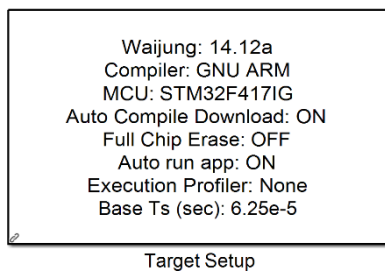


รูปที่ 13 วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 14 วงจรโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นและตัวเหนี่ยวนำ

ส่วนประกอบของซอฟต์แวร์ของชุดวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสทางอ้อม สร้างขึ้นโดยโปรแกรม Matlab/Simulink ด้วย Waijung Blockset รูปที่ 15 บล็อกไดอะแกรม Waijung target setup ทำหน้าที่กำหนดเวลาการทำงานของระบบทั้งหมด Sampling time โดยจะเป็นตัวจัดลำดับเวลาของการทำงานในแต่ละบล็อกไดอะแกรม เพื่อจะส่งให้ Systick module จัดลำดับก่อนและหลังของเวลาในการทำงานของบล็อกไดอะแกรมทั้งระบบให้เหมาะสมที่สุด (น้อยที่สุด) ในการประมวลผลแต่ละคาบของเวลาอัตราการสุ่ม (Sampling time) และเป็นบล็อกการกำหนดให้ระบบทราบว่า GNU ARM เป็นตัวคอมไพเลอร์ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เบอร์ STM32F417IG (LQFP176); FiO2 โดยกำหนดค่าการทำงานสัญญาณนาฬิกา (Clock configuration) เป็น FiO2 (HSEOSC-8MHz/HCLK-168MHz) และการถ่ายโอนข้อมูลจะเลือกใช้ ST-LINK เป็นตัวเชื่อมต่อสื่อสารในการโปรแกรมหรือแก้ไขโดยตรง โดยการถ่ายโอนข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ USB ลงบนบอร์ด STM32F4 FiO2

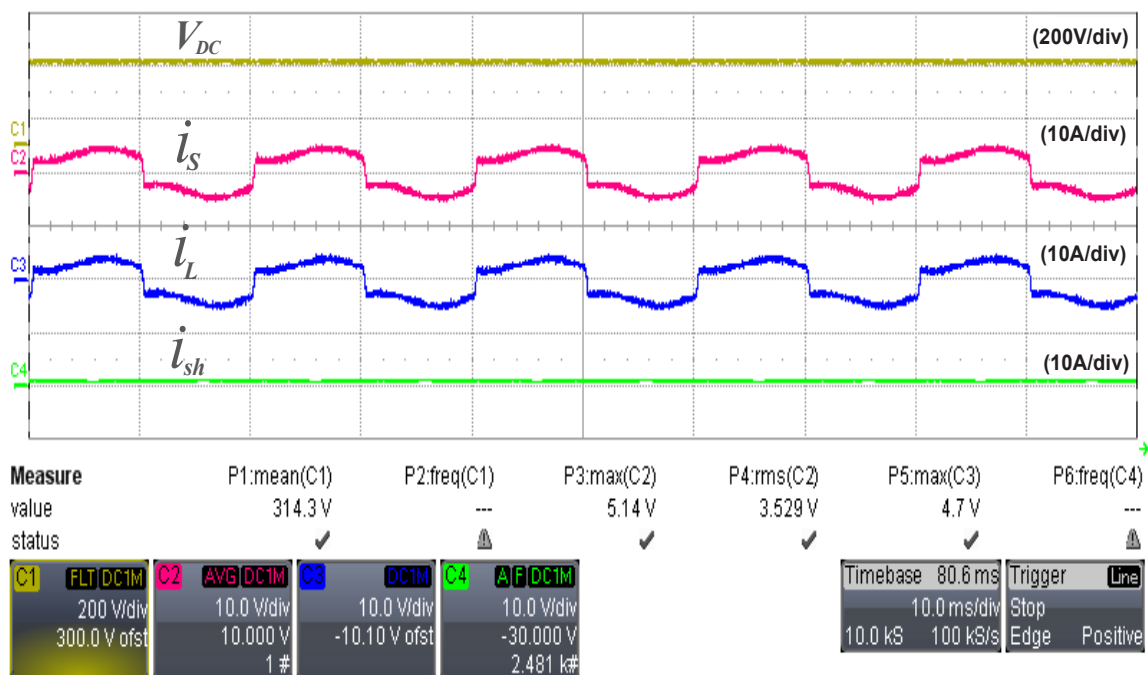


รูปที่ 15 บล็อกไดอะแกรม Waijung Target Setup

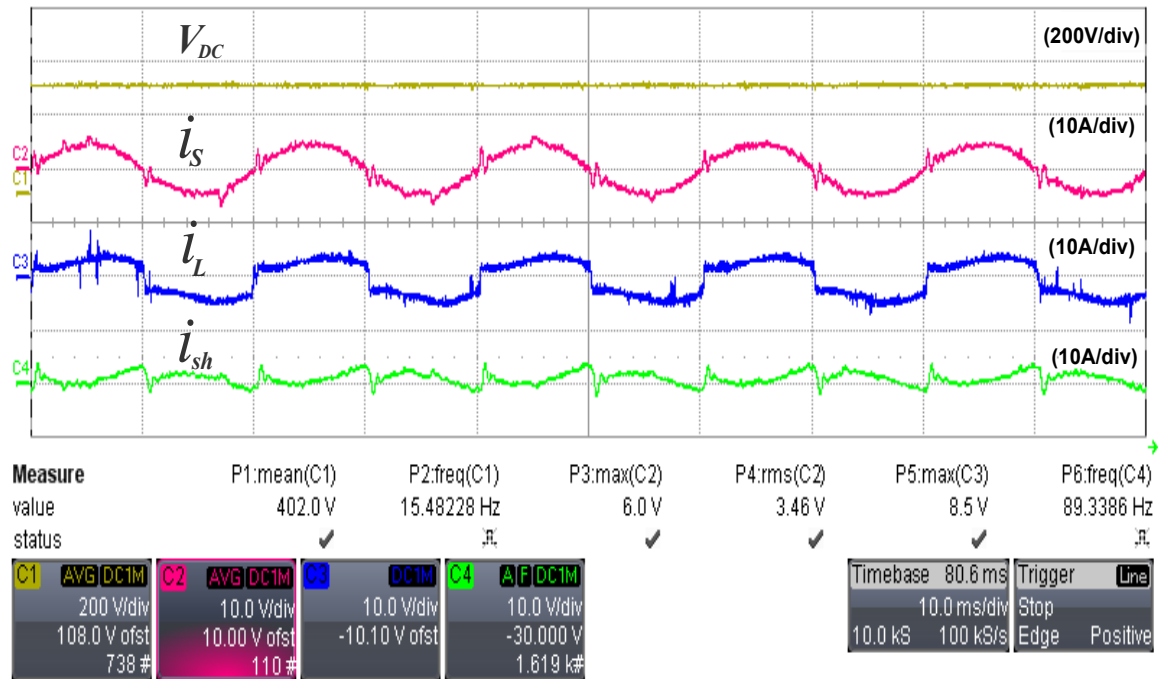
รูปที่ 16(ก) แสดงรูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก จะเห็นว่าก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กระแสที่แหล่งจ่าย i_S มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับกระแสโหลด i_L แสดงว่ายังมีกระแสฮาร์มอนิกปะปนอยู่ รูปที่ 16(ข) แสดงรูปคลื่นสัญญาณ

V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก กระแสที่แหล่งจ่าย i_S มีรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ มีความถี่เท่ากับ 50 เฮิรตซ์

รูปที่ 17(ก) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก จะเห็นว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมด้วย YOKOGAWA รุ่น CW500 (% THD_{i_S}) เท่ากับ 28.07% โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมแรงดัน (% THD_{V_s}) แสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 17(ข) แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิกสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมจาก 28.07% เป็น 4.54%

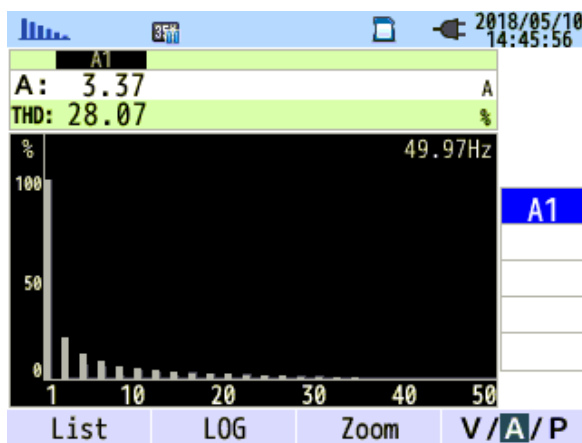
(ก) รูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

รูปที่ 16 เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{Sh} ก่อนและหลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

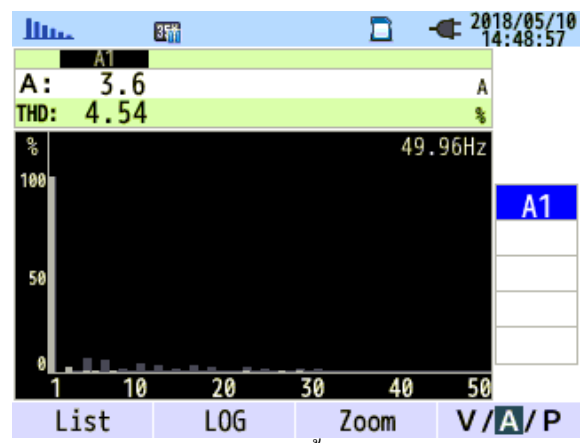


(ข) รูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{sh} หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

รูปที่ 16 (ต่อ) เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณ V_{DC} , i_S , i_L และ i_{sh} ก่อนและหลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น



(ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ก่อนชดเชยกระแสฮาร์มอนิก



(ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม หลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ที่สภาวะคงตัว

รูปที่ 17 เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม ก่อนและหลังชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

6. สรุปการทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบและสร้างชุดควบคุมวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานชนิด 1 เฟส ที่ควบคุมกระแสแบบทางอ้อม โดยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ ด้วยวิธีพื้นฐานเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกให้ลดลง ทำให้กระแสของแหล่งจ่ายใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์เหลือไว้เฉพาะความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) และเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยใช้วิธีการพื้นฐานเชิงพันธุกรรมเข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมชนิดสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการทำงานของระบบผลการจำลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 28.28% เป็น 2.58% และผลการทดสอบกับระบบจริงสามารถลดค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THD_i) จาก 28.07% เป็น 4.54% สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ IEEE Std 519-2014

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
แหล่งจ่ายแรงดันและความถี่	220 Vrms, 50 Hz
ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมแรงดัน (%THD _{V_s}) ณ ห้องทดลอง	1.95%
โหลดแบบไม่เชิงเส้น	วงจรเรียงกระแส, 149 mH, 80 Ω

ตารางที่ 1 (ต่อ) พารามิเตอร์ของระบบ

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
อิมพีแดนซ์ของตัวกรองแอกทีฟ	3.75 mH, 0.3 Ω
แรงดันบัลไฟตรงอ้างอิง	400 V
คาปาซิเตอร์บัลแรงดันไฟตรง	1100 μF, 900 V
ความถี่การสวิตช์	16 kHz
ความถี่การสุ่มสัญญาณ	16 kHz
อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์	1,200 V, 21 A
อัตราขยายตัวควบคุมกระแสชนิด PR	K _p = 12.7254, K _r = 9.7077
อัตราขยายตัวควบคุมแรงดันที่บัลแรงดันไฟตรงชนิด PI	K _p = 0.1820, K _i = 4.8934

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของ GA

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K _p	[0-20]
ค่าอัตราขยายแบบเรโซแนนซ์ K _r	[0-20]
ค่าความห่างของรุ่น (Generation Gap)	0.9
ค่าอัตราการไขว้เปลี่ยนพันธุ์ (Crossover Rate)	0.7
ค่าอัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Rate)	0.05

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก “Research Strengthening Project of the Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi”

เอกสารอ้างอิง

- [1] A report prepared by Load Characteristics Task Force. The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads. *IEEE Power Engineering Review*, 1985; PAS-104(9): 2555–2563.

- [2] Balda, J. C., Griffithki, D. C., McEachern, A., Barnes, T. M., Hartmann, D. P., Phileggi, D. J., Emmanuel, A. E., Horton, W. F., Reid, W. E., Ferraro, R. J. and Jewell, W. T. Effects of Harmonics on Equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993; 8(2): 672–680.
- [3] Jou, H. C., Wu, J. C. and Chu, H. Y. New Single-Phase Active Power Filter. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1994; 141(3): 129-134.
- [4] Liu, J., Yang, J. and Wang, Z. A New Approach for Single-Phase Harmonic Current Detecting and Its Application in a Hybrid Active Power Filter. IECON'99. Conference Proceedings. 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 29 November -3 December, San Jose, California, United State, 1999; 849-854.
- [5] Zhang, R., Cardinal, M., Szczesny, P. and Dame, M. A Grid Simulator with Control of Single-Phase Power Converters in D-Q Rotating Frame. 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 23-27 June, Cairns, Qld., Australia, 2002; 1431-1436.
- [6] Bhattacharya, S. and Divan, D. Synchronous Frame Based Controller Implementation for a Hybrid Series Active Filter System. Conference Record 30th IEEE Industry Applications, 8-12 October, Orlando, Florida, United States, 1995; 2531-2540.
- [7] Yodmanee, K. and Lenwari, W. PI Controller Optimization for Indirect Current Control for Single-Phase Shunt Active Filter. *Ladkrabang Engineering Journal*, 2016; 33(1): 42-47.
- [8] Lenwari, W., Sumner, M. and Zanchetta, P. The Use of Genetic Algorithms for the Design of Resonant Compensators for Active Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009; 56(8): 2852-2861.
- [9] Lenwari, W. Optimized Design of Modified Proportional-Resonant Controller for Current Control of Active Filters. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 25-28 February, Cape Town, South Africa, 2013; 894-899.
- [10] 519-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Standard 519-2014 (Revision of IEEE Standard 519-1992), 11 June 2014; 1-29.
- [11] Komrska, T., Zak, J. and Peroutka, Z. Control Strategy of Active Power Filter with Adaptive FIR Filter-Based and DFT-Based Reference Estimation. International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 14-16 June, Pisa, Italy, 2010; 1524-1529.
- [12] Usman, H., Hizam, H., Amram, M. and Radzi, M. Simulation of Single-Phase Shunt Active Power Filter with Fuzzy Logic Controller for Power Quality Improvement. 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology, 18-20 November, Langkawi, Malaysia, 2013; 353-357.
- [13] Angélico, B.A., Campanhol, L.B.G. and Oliveira da Silva, S.A. Proportional-Integral/Proportional-Integral-Derivative Tuning Procedure of a Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Bode Diagram. *IET Power Electronics*, 2014; 7(10): 2647-2659.
- [14] Rahmani, S., Al-Haddad, K. and Fnaiech, F. Reduced Switch Number Single-Phase Shunt Active Power Filter Using an Indirect Current Control Technique. 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology, 10-12 December, Maribor, Slovenia, Slovenia, 2003; 1107-1112.
- [15] Khadkikar, V., Singh, M., Chandra, A. and Singh, B. Implementation of Single-Phase Synchronous DQ Reference Frame Controller for Shunt Active Filter Under Distorted Voltage Condition. 2010 Joint International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems (PEDES), 20-23 December, New Delhi, 2010; 1-6.
- [16] Adel, M., Zaid, S. and Mahgoub, O. Improved Active Power Filter Performance Based on an Indirect Current Control Technique. *Journal of Power Electronics*, 2011; 11(6): 931-937.
- [17] Trinh, Q. N. and Lee, H. H. An Advanced Current Control Strategy for Three-Phase Shunt Active Power Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013; 60(12): 5400-5410.
- [18] Fukuda, S. and Imamura, R. Application of A Sinusoidal Internal Model to Current Control of Three-Phase Utility-Interface Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005; 52(2): 420–426.

- [19] Zmood, D. N., Holmes, D. G. and Bode, G. Frequency Domain Analysis of Three Phase Linear Current Regulators. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001; 37(2): 601–610.
- [20] Haupt, R.L. and Haupt, S.E. Practical Genetic Algorithms. 2nd ed., John Wiley & Sons Press, United States of America, 2004; 27-65.



การวิเคราะห์ความถูกต้องความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ โดยการปรับแก้แบบจุดตัดระหว่างแนวกบินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา

Analysis of Airborne Gravity Accuracy Using Cross-over Adjustment in Chao Phraya Basin.

ณัฐนันท์ ดวงดี^{1,2} พุทธิพล ดำรงชัย¹ และ ชวิศ ศรีมณี¹

Nuttanon Duangdee^{1,2} Puttipol Dumrongchai¹ and Chawis Srimanee¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

² กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย

Chiang Mai University, 50200, Thailand

Royal Thai Survey Department, Royal Thai Armed Forces Headquarters.

E-mail: Nuttanon_d@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ สำหรับการคำนวณหาชื่อยอดบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยาด้วยการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบิน ข้อมูลถูกจำแนกออกเป็นสองกรณี คือ ข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินและข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบิน จากนั้นนำข้อมูลทั้งสองชุดมาทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง ลงสู่ระดับทะเลปานกลางเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน ผลการทดสอบของข้อมูลทั้งสองชุดพบว่า ชุดข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่า โดยที่ค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 3.991 มิลลิแกล ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินมีค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 4.485 มิลลิแกล และนำข้อมูลทั้งสองชุดมาทำการคำนวณชื่อยอดเพื่อเปรียบเทียบกับความสูงชื่อยอดที่ได้จากหมุดร่วมค่าระดับความสูง ผลการทดสอบของข้อมูลทั้งสองชุดพบว่าชุดข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ดีกว่าเท่ากับ 0.096 เมตร ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินมีค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่ากับ 0.100 เมตร

คำสำคัญ: การปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบิน แบบจำลองชื่อยอด การลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง ลิสต์แคว์คอลโลเคชั่น

ABSTRACT

This research aims to analyze the airborne gravity data accuracy using cross-over adjustment for geoid determination in Chao Phraya basin. The data sets were categorized into the cases of with and without cross-over adjustment. Both types of the data sets were then reduced to mean sea level by means of downward continuation to be compared with terrestrial gravity data sets. The adjusted data yielded the more accurate result. The root mean square (rms) value of it was 3.991 mGal while the rms value was 4.485 mGal for the case of no data adjustment. The computed geoid heights using both types of the data were compared with the geoid computed using GNSS/Leveling co-points. The geoid using the adjusted data yielded the more accurate result. The rms value of it was 0.096 m. while the rms value was 0.1 m. for the case of no data adjustment.

Keyword: Cross-over Adjustment, Geoid Model, Downward Continuation, Least Squares Collocation, GNSS/Leveling co-points

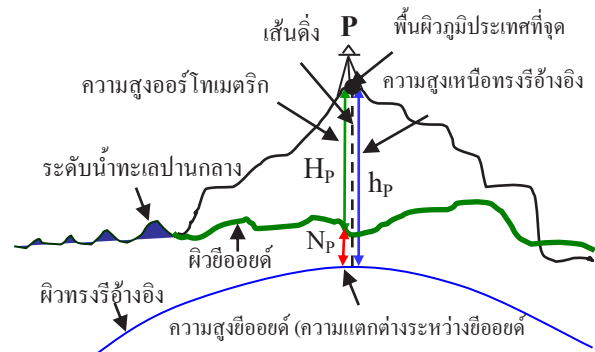
1. บทนำ

เมื่อก้าวถึงระบบพิกัดทางดิ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับแบบจำลองขี้อยอด เนื่องจากขี้อยอดเป็นผิวระดับอ้างอิงของโลกที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่าความสูงต่ำของภูมิประเทศและสามารถหาความสูงเหนือระดับทะเลปานกลางร่วมกับเทคโนโลยี GNSS ได้ ที่ผ่านมามีประเทศไทยได้ใช้แบบจำลองขี้อยอดสากล ชื่อว่า EGM96[12] EGM2008 [2] และได้ใช้แบบจำลองขี้อยอดท้องถิ่นบริเวณประเทศไทยชื่อ THAI12H [3] ในการหาค่าระดับความสูง แต่ค่าระดับที่ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนสูงอยู่ที่ประมาณ 5-30 ซม. จึงไม่สามารถนำมาใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องที่ดีกว่าได้ เช่น งานทางด้านวิศวกรรมงานบริหารจัดการด้านอุทกภัย เป็นต้น ทำให้ 2-3 ปี ที่ผ่านมามีประเทศไทยได้มีการพัฒนาแบบจำลองขี้อยอดความละเอียดสูงด้วยความร่วมมือระหว่างกรมแผนที่ทหารและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีทั้งการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินและภาคอากาศซึ่งในการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเป็นการรังวัดครอบคลุมทั้งผืนแผ่นดินทั่วทั้งประเทศเป็นครั้งแรกของประเทศไทย ในการรังวัดประเภทนี้สามารถรังวัดในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น เทือกเขาสูง ป่ารกทึบ และตามแนวชายแดน เป็นต้น งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเท่านั้น ซึ่งเป็นการปรับปรุงข้อมูลให้มีความถูกต้องมากขึ้นเพื่อปรับปรุงความถูกต้องแบบจำลองขี้อยอด งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวบินเป็นหลักการและวิธีที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล [8]

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำเอาทฤษฎีในการคำนวณหาขี้อยอด การปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวบินและการลดทอนลงอย่างต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ

2.1 ทฤษฎีการคำนวณหาขี้อยอด



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของโลก ขี้อยอด และทรงรีอ้างอิง

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของผิวโลกจริง ขี้อยอด และ ทรงรีอ้างอิง ซึ่ง ความสูงขี้อยอด (geoid undulation) คือ ระยะที่วัดตามแนวเส้นดิ่งที่ตั้งฉากกับผิวขี้อยอด เขียนเป็นสมการพื้นฐานได้ว่า

$$H_p = h_p - N_p \quad (1)$$

โดยที่ H_p คือความสูงออร์โทเมตริกที่จุด P บนพื้นโลก h_p คือความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง และ N_p คือ ความสูงขี้อยอดหรือค่าความแตกต่างระหว่างพื้นผิวขี้อยอดและพื้นผิวทรงรี การคำนวณแบบจำลองขี้อยอดนั้นจะใช้ทฤษฎีของโมโลเดนสกี (Molodensky's theory) ซึ่งเป็นการคำนวณแบบจำลองขี้อยอด โดยผ่านกระบวนการคำนวณหาความสูงอะนอลมอลี (height anomaly) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่สามารถหลีกเลี่ยงสมมุติฐานของสโตกส์ในการเคลื่อนย้ายมวลสารลงสู่ผิวขี้อยอดในการคำนวณสามารถหาความสูงขี้อยอดที่จุดใดๆ (กำหนดให้เป็นจุด P) จากสมการดังนี้ [7]

$$N_p \approx \zeta_p + \frac{\Delta g_B H}{\gamma_0} \quad (2)$$

เมื่อ ζ_p คือความสูงอะนอมอลี่, H คือความสูงออร์โทเมตริก ที่ได้จากแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (digital elevation model), Δg_B คือ บูเกอร์อะนอมอลี่ และ γ_0 คือ ความโน้มถ่วงปกติ

2.2 การปรับแก้วิธีลีสต์แคว์แบบมีเงื่อนไขบังคับ

หลักการปรับแก้แบบลีสต์แคว์เป็นการใช้หลักการทางคณิตศาสตร์มาทำการคำนวณปรับแก้ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพให้มีความถูกต้อง โดยทฤษฎีของการปรับแก้แบบลีสต์แคว์เริ่มจากสมการพื้นฐานทางลีสต์แคว์

$$Y = AX + e \quad (3)$$

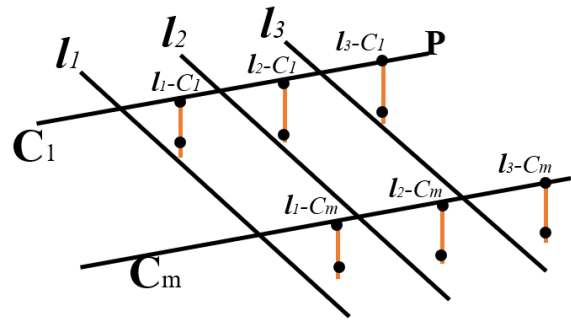
เมื่อ Y คือค่าสังเกต หรือค่าที่ได้จากการรังวัด (observation) A คือค่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ X คือเวกเตอร์ของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบและ e คือค่าเศษเหลือสมการแบบมีเงื่อนไข เขียนได้ว่า

$$K_0 = KX \quad (4)$$

เมื่อ K_0 คือ เวกเตอร์ของค่าความแตกต่างของค่าฟรีแอร์อะนอมอลี่ (free-air anomaly หรือเขียนย่อว่า FAA) ซึ่งเป็นค่าความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดได้และได้ถูกลดทอนให้มีขนาดที่เหมาะสมในการคำนวณความสูงขี้อยัดที่จุดตัดระหว่างแนวกบินที่เลือกไว้ใช้เป็นจุดจริง, K คือ เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของสมการเงื่อนไขและ X เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบ

2.3 การปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบิน

ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่รังวัดได้หลังจากได้ข้อมูลที่ถูกกรองแล้ว จะนำมาคำนวณปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวกบินเพื่อทำให้ข้อมูลที่รังวัดในแต่ละแนวกบินมีความคงเส้นคงวา อีกทั้งเป็นการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลด้วยว่ามีความคลาดเคลื่อนเท่าใด จากการพิจารณาที่จุดตัดระหว่างข้อมูลแนวกบินเหนือ - ใต้และแนวกบินตะวันออก - ตะวันตก



รูปที่ 2 แสดงจุดตัดระหว่างแนวกบิน

จากรูปที่ 2 เขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ที่แนวกบินตามยาว (along-tracks) ดังสมการที่ (5) และแนวกบินตามขวาง (cross-tracks) ดังสมการที่ (6)

$$y_{l_m} = m_{l_m} X_{l_m} + b_{l_m} \quad (5)$$

$$y_{C_m} = m_{C_m} X_{C_m} + b_{C_m} \quad (6)$$

เมื่อ y_{l_m} คือ ค่า FAA ที่แนวกบินตามยาวแนวกบินที่ m , y_{C_m} คือ ค่า FAA ที่แนวกบินตามขวางแนวกบินที่ m และ X คือ ค่าพารามิเตอร์ของความชันและ b คือ จุดตัดแกน

2.4 ทฤษฎีในการลดทอนอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีลีสต์แคว์คอลโลเคชัน

หลักการสถิติแบบลีสต์แคว์คอลโลเคชัน (least-squares collocation) [1,5,6,11,13] ถูกนำมาใช้ในการลดทอนอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งผนวกข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดต่างระดับความสูงและต่างชนิดของการรังวัดเข้าด้วยกัน โดยคำนึงถึงลักษณะทางสถิติของข้อมูลที่วัดต่างชนิดกัน โดยที่ FAA จะต้องผ่านกระบวนการลดทอนอย่างต่อเนื่องลงสู่ระดับทะเลปานกลางด้วยระยะกริดที่เหมาะสมดังสมการ (7) ต่อไปนี้

$$\Delta \bar{g} = C_{\Delta g \Delta g} (C_{\Delta g \Delta g} + D_{\Delta g \Delta g})^{-1} \Delta g \quad (7)$$

เมื่อ $\Delta \bar{g}$ คือ ค่าทำนายของฟรีแอร์อะนอมอลี่ที่จุดที่ต้องการหาค่า, Δg คือ ชุดข้อมูลที่ได้จากการรังวัดทาง

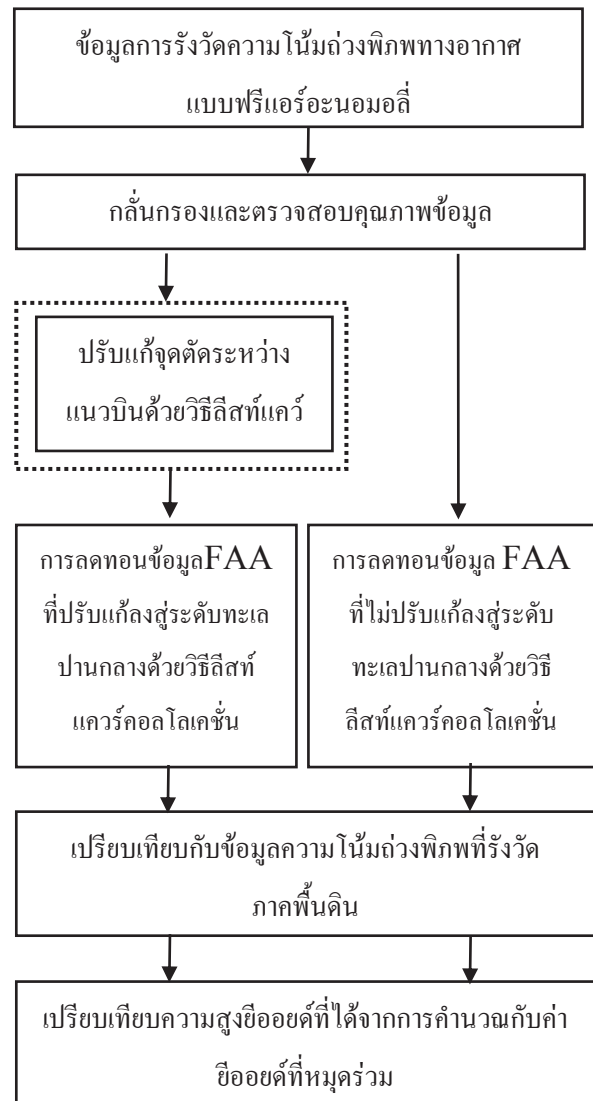
อากาศ $C_{\Delta g \Delta g}, C_{\Delta g \Delta g}, D_{\Delta g \Delta g}$ คือเมตริกความแปรปรวนร่วมระหว่างค่าทำนายและค่าสังเกต และระหว่างค่าสังเกตด้วยกันและ ค่ารบกวนด้วยกัน ตามลำดับ

3. วิธีการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการทำวิจัยตั้งแต่การเตรียมข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่กรมแผนที่ทหารทำการรังวัดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2560 โดยนำข้อมูลดิบมาทำการวิเคราะห์และตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็นสองชุดคือ ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวมินและข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวมินด้วยวิธีลีสท์แคว์ และทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องลงสู่ระดับทะเลปานกลางด้วยวิธีลีสท์แคว์คอลโลเคชั่น ตลอดจนการเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดภาคพื้นดินและเปรียบเทียบกับความสูงยิออซด์ที่ได้จากการคำนวณกับค่ายิออซด์ที่ห้มาพร้อม ซึ่งกระบวนการในการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ในรูปที่ 3

3.1 การเตรียมข้อมูล

ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศซึ่งได้มาจากการรังวัดโดยใช้เครื่องบิน Beechcharft Super King Air B200 ที่มีการติดตั้งเครื่องรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ ชื่อว่า TAGS-6 (Turnkey Airborne Gravity System 6) [9] และในขณะที่ทำการรังวัดต้องมีผู้ควบคุมซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุม ดูแล ตรวจสอบการทำงานของ TAGS-6 แสดงในรูปที่ 4

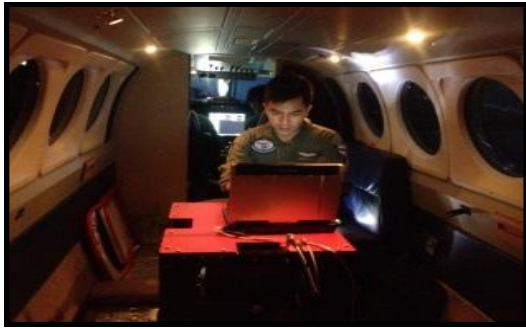


รูปที่ 3 กระบวนการในการวิจัย

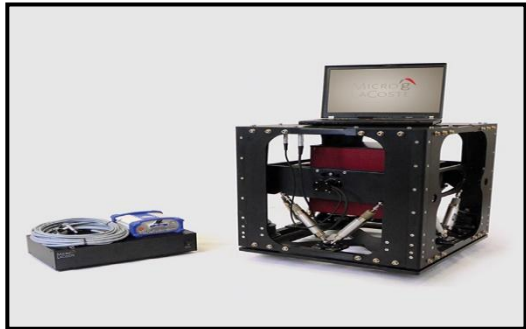


(ก)

รูปที่ 4 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานเก็บข้อมูล
(ก) เครื่องบิน Beechcharft Super King Air B200,
(ข) ผู้ควบคุมในการรังวัด และ (ค) เครื่องรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ TAGS-6



(ข)

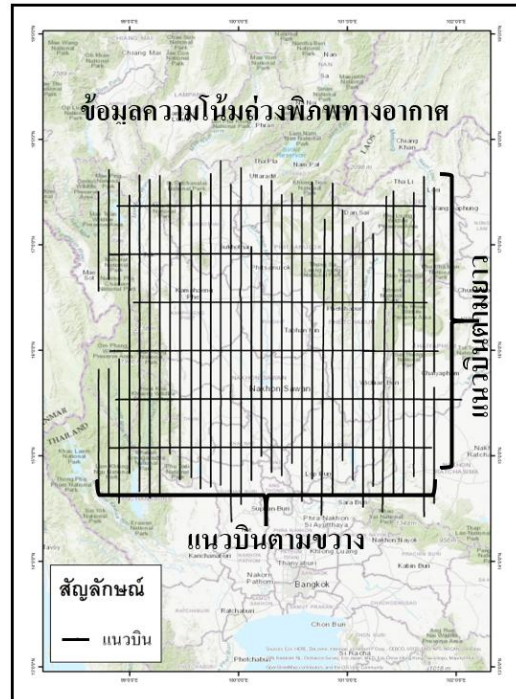


(ค)

รูปที่ 4 (ต่อ) อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานเก็บข้อมูล
(ก) เครื่องบิน Beechcraft Super King Air B200,
(ข) ผู้ควบคุมในการรังวัด และ (ค) เครื่องรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ TAGS-6

ในการบินตามแนวยาว (ทิศทางเหนือ-ใต้) ซึ่งแต่ละแนวบินจะห่างกันประมาณ 10 กิโลเมตร และทำการบินตามแนวตัดขวาง (ทิศทางตะวันออก - ตะวันตก) ซึ่งแต่ละแนวบินห่างกันประมาณ 50 กิโลเมตร ในวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ดังแสดงในรูปที่ 5 ในขณะที่รังวัดใช้โปรแกรม PiperPro ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง TAGS-6 และ โปรแกรม AGSys6 เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศตามแนวบินที่ทำการรังวัด กรองสัญญาณเพื่อเป็นการขจัดสิ่งรบกวน (noise) ที่เกิดจากการรังวัด ข้อมูลที่ทุกๆช่วง 90 วินาที เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมและมีคุณภาพมากที่สุด ส่วนข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินเป็นข้อมูลตามมาตรฐานของคณะกรรมการการรังวัดขั้นสูงปี ค.ศ.1984 (Federal Geodetic Control Committee1984 หรือเขียนย่อว่า FGCC1984) [10]

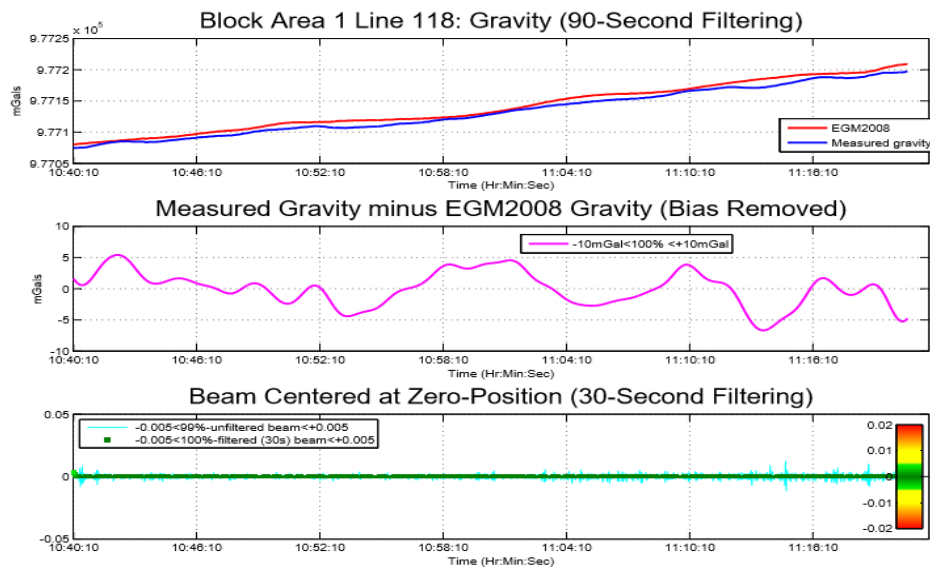
โดยทำการรังวัดด้วยเครื่อง Scintex CG-5 ซึ่งเป็นเครื่องมือรังวัดความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินแบบสัมพัทธ์ผลิตโดยประเทศแคนาดา [11]



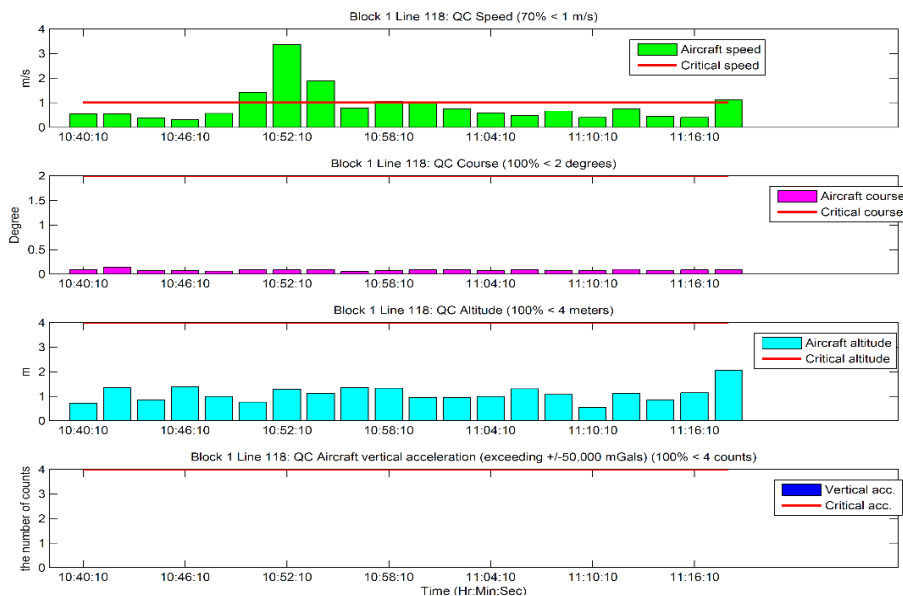
รูปที่ 5 แสดงข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศและพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

3.2 วิเคราะห์ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของข้อมูล

ในการวิเคราะห์ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพนั้น ทำการนำข้อมูลดิบจากการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศมากรองข้อมูลเบื้องต้น เพื่อขจัดสิ่งรบกวน (noise) [11] ที่ได้จากการรังวัดออก จากนั้นนำข้อมูลไปทำการแสดงในรูปของกราฟเพื่อตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะของกราฟเมื่อเทียบกับEGM2008 เบื้องต้น ว่าข้อมูลดิบที่รังวัดได้นั้นมีแนวโน้มและทิศทางไปในแนวทางเดียวกันหรือไม่ ซึ่งค่าความแตกต่างของความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเมื่อเทียบกับEGM2008 ไม่ควรเกิน ± 10 mGal และค่าความคงที่ของแกนสปริง (spring beam) ไม่ควรเกิน ± 0.005 ตลอดแนวบิน ซึ่งค่าเกณฑ์เหล่านี้เป็นค่าที่ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทางสถิติว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในการใช้ตรวจสอบข้อมูลของกรมแผนที่ทหารดังแสดงในรูปที่ 6



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ตัวอย่าง (ก) การกรองสัญญาณการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดทางอากาศกับ EGM2008 และ
(ข) การตรวจสอบการสั่นสะเทือนของเครื่องบินในขณะรังวัด

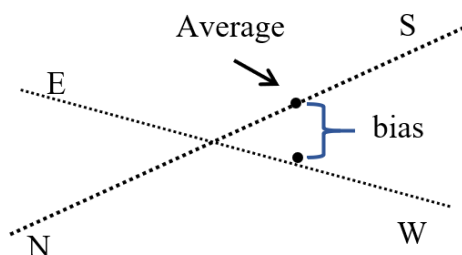
จากรูปประกอบด้วยกราฟแสดงความเร็วคงที่ของเครื่องบินขณะรังวัดในแต่ละแนวนบินไม่ควรแปรเปลี่ยนเกิน 1 เมตรต่อวินาที ความสม่ำเสมอของทิศทางเหนือ-ใต้ในแต่ละแนวนบินไม่ควรต่างกันเกิน 2 องศาในแนวเหนือ-ใต้และความสม่ำเสมอของความสูงบินขณะรังวัดในแต่ละแนวนบินไม่ควรต่างกันเกิน 4 เมตร กราฟแสดงความ

สม่ำเสมอของความเร่งในแนวดิ่งของเครื่องบินขณะรังวัดในแต่ละแนวนบินไม่ควรเกิน 4 ครั้ง เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวได้จากข้อมูลที่เป็นมาตรฐานและเหมาะสมที่สุดทางสถิติในการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศบริเวณประเทศไทย จะสังเกตได้ว่ากราฟที่สูงผิดปกติเกินเกณฑ์ที่กำหนดเนื่องจากเครื่องบินเกิดการสั่นสะเทือนทั้งแนวนราบ

และแนวโค้งซึ่งมีผลทำให้ค่าความโน้มถ่วงพิพผันแปรได้ สาเหตุเนื่องมาจากสภาพอากาศในขณะที่บินเกิดสภาพความปั่นป่วนในอากาศขึ้นเป็นระยะๆ ทำให้ค่าความโน้มถ่วงพิพที่รังวัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น หากพิจารณาแล้วว่าข้อมูลเกิดข้อผิดพลาดสูงจึงจำเป็นที่จะต้องตัดข้อมูลที่คลาดเคลื่อนสูงทิ้งไปหากข้อมูลเกือบ 30 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมดในแนวนั้นๆ เกิดความคลาดเคลื่อนสูงจะทำการขึ้นบินรังวัดแนวนั้นใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ดีที่สุด

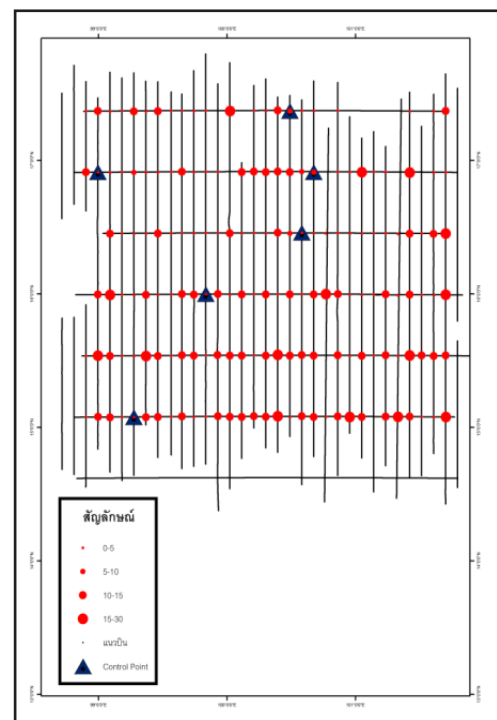
3.3 การพิจารณาจุดตัดระหว่างแนวนบิน

ข้อมูลความโน้มถ่วงพิพที่รังวัดได้หลังจากที่ได้ทำการกรองสัญญาณเพื่อเป็นการขจัดสิ่งรบกวนที่เกิดจากการรังวัดข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมและมีคุณภาพมากที่สุด ข้อมูลที่กรองแล้วจะต้องถูกนำมาคำนวณปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินเพื่อที่จะทำให้ข้อมูลที่วัดในแต่ละแนวนบินมีความคงเส้นคงวา อีกทั้งเป็นการตรวจสอบคุณภาพเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูล จากการพิจารณาที่จุดตัดระหว่างข้อมูลแนวนบินเหนือ-ใต้ (along-track) และข้อมูลแนวนบินตะวันออก - ตะวันตก (cross-track) โดยการปรับแก้จุดตัดด้วยวิธีลิสต์แคว์แบบมีเงื่อนไขบังคับ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วค่าความโน้มถ่วงพิพทางอากาศที่จุดตัดระหว่างแนวนบินควรมีค่าความแตกต่างเป็นศูนย์ซึ่งขนาดของค่าความแตกต่างหรือที่เรียกว่า ค่าความเบี่ยงเบน (bias) ดังแสดงในรูปที่ 7 ที่เกิดขึ้นสามารถนำมาพิจารณาความถูกต้องเบื้องต้นของผลการรังวัดทางอากาศได้จากการพิจารณาค่าทางสถิติของค่าต่างที่จุดตัดทั้งหมดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 7 แสดงจุดตัดระหว่างแนวนบินที่จะทำการหาค่าเบี่ยงเบน (bias)

หลังจากคำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนครบทุกจุดตัดเรียบร้อยแล้ว จะเลือกจุดตัดที่มีค่าที่ต่ำที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความแตกต่างของจุดตัดระหว่างแนวนบินหรือความเบี่ยงเบน (bias) ที่น้อยที่สุดโดยจำนวนจุดตัดที่ใช้จริงต้องเลือกให้เหมาะสมและครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด มาทำการตรึง (fix) ก่อนทำการปรับแก้แบบลิสต์แคว์ จากนั้นนำไปปรับแก้โดยฟอร์มสมการ $y = ax + b$ โดยที่ a คือความชัน (slope) และ b คือ ค่าคงที่ สามารถเขียนในรูปของเมตริกเพื่อนำไปคำนวณในโปรแกรม Matlab เพื่อปรับแก้ข้อมูลความโน้มถ่วงพิพทางอากาศทั้งหมดตามข้อ 2.2 ในงานวิจัยนี้จะเลือกจุดตัดทั้งหมด 6 ค่า เป็นหมวดตรงแสดงในรูปที่ 8 โดยแต่ละจุดตัดมีความแตกต่างไม่เกิน 2 มิลลิแกล ซึ่ง เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดใน การปรับแก้ลิสต์แคว์แบบมีเงื่อนไขบังคับ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่ได้เลือกตำแหน่งหมวดบริเวณพื้นที่ฝั่งตะวันออกเฉียงใต้เนื่องจากข้อมูลความโน้มถ่วงพิพบริเวณนี้ได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนของเครื่องบินค่อนข้างมาก



รูปที่ 8 แสดงการเลือกจุดตัดที่มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดเพื่อใช้ในการตรึง

3.4 การลดทอนลงอย่างต่อเนื่องค่าความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ

ในการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ จะนำข้อมูลที่ได้ทำการตรวจสอบและปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินมาทำการลดทอนข้อมูลรังวัดที่ระดับเพดานบินประมาณ 4,000 เมตร ลงสู่ผิวระดับทะเลปานกลางด้วยระยะกริดที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรม Gravsoft ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองชีออกซ์ [4] สำหรับข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องแล้วจึงทำการเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

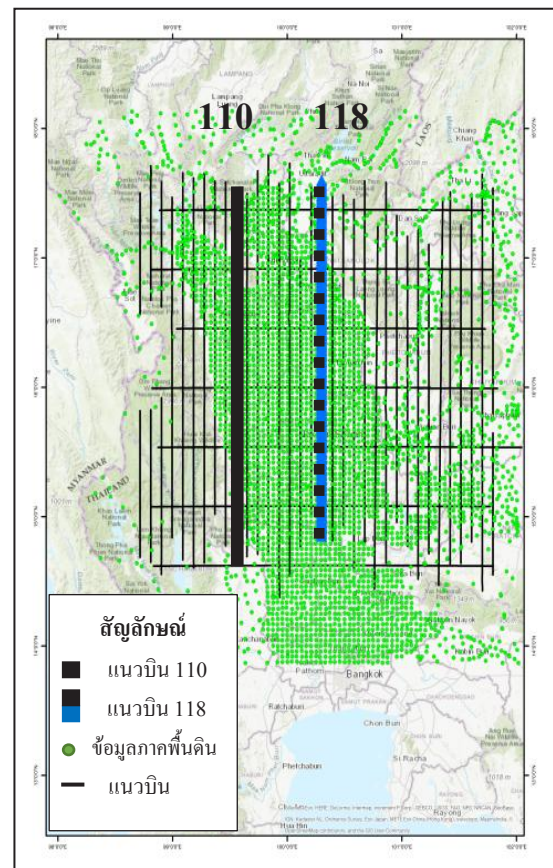
3.5 การวิเคราะห์ผล

3.5.1 การเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

การเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน หลังจากที่ได้ทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศก็จะได้ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่อยู่ระดับทะเลปานกลาง จากนั้นแบ่งข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศออกเป็นสองชุดข้อมูล คือ ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินกับข้อมูลทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบิน ส่วนข้อมูลภาคพื้นดินนั้นนำมาจากที่ทางกรมแผนที่ทหารรังวัดทั้งหมดประมาณ 2,000 จุด ซึ่งแต่ละจุดห่างกันประมาณ 5 กิโลเมตร ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา จากนั้นนำข้อมูลภาคพื้นดินมาทำการประมาณค่าภายใน (interpolation) เพื่อทำให้ข้อมูลภาคพื้นดินอยู่ในรูปของกริดโดยใช้โปรแกรม ArcGIS สำหรับขั้นตอนการเปรียบเทียบผู้วิจัยจะเลือกมาสองแนวนบิน คือแนวนบินที่ 110 และ 118 โดยพิจารณาแล้วว่าเป็นแนวนบินที่มีลักษณะของข้อมูลที่ดีที่สุดและอยู่บริเวณที่มีข้อมูลความโน้มถ่วงภาคพื้นดินหนาแน่นพอสมควรเพื่อให้การเปรียบเทียบนั้น ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในการประเมินผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติในการเปรียบเทียบจะใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองหรือ root mean square (rms.) เพื่อประเมินความถูกต้องดังสมการ (8) ต่อไปนี้

$$rms = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}} \quad (8)$$

เมื่อ x คือ ค่า FAA ที่รังวัดทางอากาศ, $\bar{X}$ คือ ค่า FAA ที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดิน, n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด หลังจากทำการเปรียบเทียบก็จะนำข้อมูลทั้งหมดคือ ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบิน ข้อมูลทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินและข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน มาวิเคราะห์ในลักษณะของกราฟเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่หลังจากที่ได้ทำการเปรียบเทียบกันแล้ว



รูปที่ 9 ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเลือกสองแนวนบินเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดิน

3.5.2 เปรียบเทียบความสูงขี้อยอดที่ได้จากการคำนวณกับค่าขี้อยอดที่หุดร่วม

ในการเปรียบเทียบความสูงขี้อยอดที่ได้จากการคำนวณกับค่าขี้อยอดที่คำนวณได้จากหุดร่วม GNSS และค่าระดับโดยหลังจากที่ได้ทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศสูงระดับทะเลปานกลางที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 ลิปดา ซึ่งเป็นระยะกริดที่เหมาะสมที่สุด [11] โดยนำข้อมูลทั้งสองชุดคือข้อมูลที่ไม่ปรับแก้และข้อมูลที่ปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนบินมาคำนวณแบบจำลองขี้อยอด ซึ่งในการคำนวณแบบจำลองขี้อยอดนั้น จะใช้ทฤษฎีของโมโลเดนสกี [13] ซึ่งเป็นการคำนวณขี้อยอด โดยผ่านกระบวนการคำนวณหาความสูงอะนอลมอลลี (height anomaly) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่สามารถหลีกเลี่ยงสมมุติฐานของสโตกส์ในการเคลื่อนย้ายมวลสารลงสู่ผิวขี้อยอด

หลังจากที่ได้ทำการคำนวณขี้อยอดหรือเรียกว่าแบบจำลองขี้อยอดเรียบร้อยแล้ว จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเปรียบเทียบกับความสูงขี้อยอดที่ได้จากหุดร่วมซึ่งเป็นหุดที่มีทั้งพิภพทางราบ - ทางดิ่งและค่าความโน้มถ่วงพิภพตามมาตรฐานชั้นที่ 1 โดยหุดร่วมที่จะนำมาทำการเปรียบเทียบบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยามีทั้งหมด 56 หุด โดยการหาความแตกต่างของความสูงขี้อยอดที่ได้จากการคำนวณกับค่าขี้อยอดที่หุดร่วมโดยสามารถหาได้จากสมการ (9) ดังนี้

$$e = (h - H_{Kolak}) - N_{MSL} \quad (9)$$

โดยที่ e คือ ความแตกต่างความสูงขี้อยอด, h คือ ความสูงเหนือทรงรีได้จากการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS, H_{Kolak} คือ ความสูงออร์โทเมตริกที่อ้างอิงจุดกำเนิดจากเกาะหลักและ N คือ ความสูงขี้อยอดที่ได้จากแบบจำลองขี้อยอด

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินนั้น โดยจะนำข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้และข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนบินที่ลดทอนลงสู่ระดับทะเลปานกลาง ในการเปรียบเทียบของแต่ละชุดข้อมูลจะเลือกแนวนบินที่ดีที่สุดสองแนวนบิน งานวิจัยนี้จะเลือกแนวนบิน 110 และ 118 จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) เพื่อประเมินความถูกต้องซึ่งได้ผลทางสถิติในตารางที่ 1

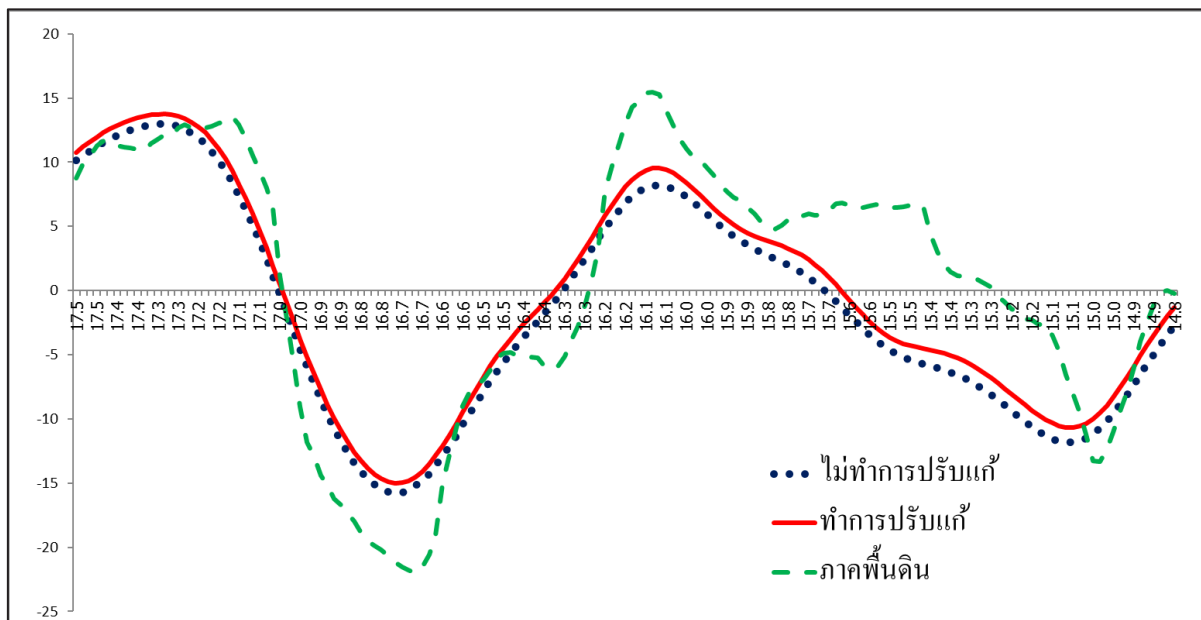
ตารางที่ 1 ค่าทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

เปรียบเทียบข้อมูลภาคพื้นดิน (mGal)				
ชนิดข้อมูล	Min	Max	Mean	RMS
ไม่ทำการปรับแก้	-12.355	8.463	-0.096	4.485
ทำการปรับแก้	-11.203	7.505	-0.246	3.991

ผลจากการเปรียบเทียบทางสถิติจากตารางที่ 1 พบว่าข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนบินแล้วจะมีค่าความถูกต้อง (rms) อยู่ที่ 3.991 มิลลิแกล ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนบินซึ่งมีค่า (rms) อยู่ที่ 4.485 มิลลิแกล ผลการเปรียบเทียบสะท้อนให้เห็นว่า ข้อมูลที่ได้รับการปรับแก้จุดดัดระหว่างแนวนบินแล้วนั้นส่งผลทำให้ค่าความแตกต่างของค่าความโน้มถ่วงพิภพแต่ละจุดดัดระหว่างแนวนบินมีความกระชับเข้าใกล้กันมากขึ้นกว่าข้อมูลเดิม และข้อมูลที่ปรับแก้แล้วมีค่าความชันที่มีความคงเส้นคงวามากขึ้น

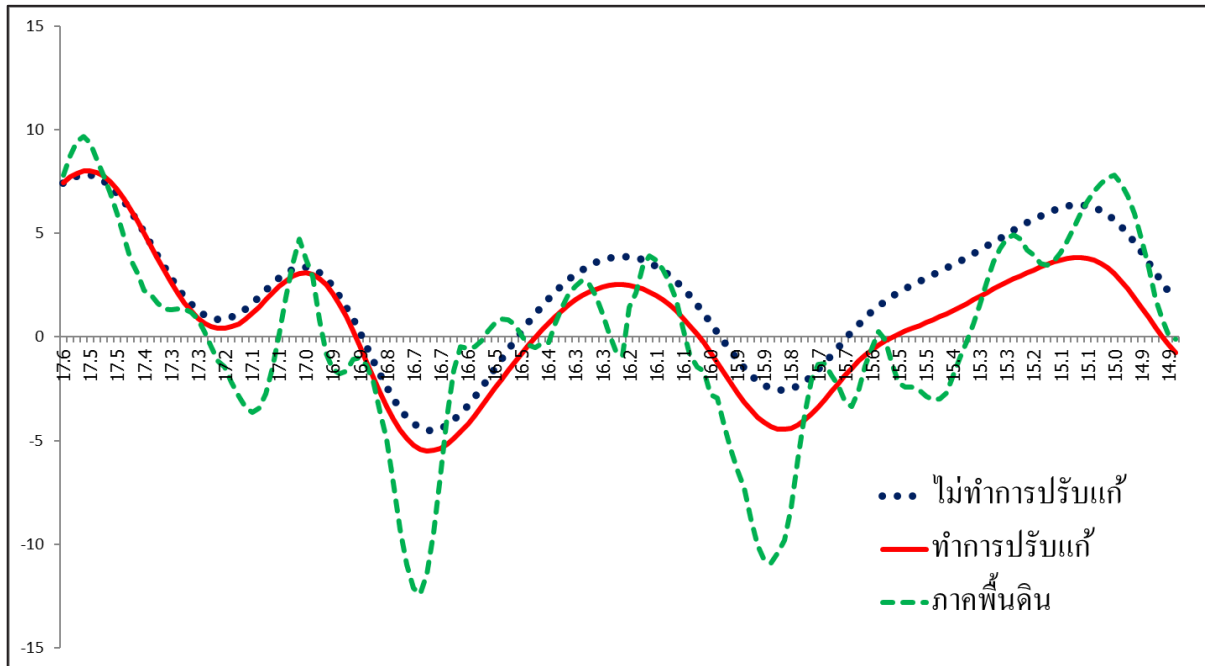
จากรูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้ของแนวนบิน 110 และ 118 กับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน ซึ่งเป็นการพิจารณาคุณภาพข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพที่รังวัดทางอากาศ ว่าข้อมูลหลังจากทำการเปรียบเทียบกันแล้วมีความสอดคล้องกันของข้อมูลมากน้อยเพียงใด โดยการตรวจสอบกับข้อมูลที่ได้จากการรังวัดภาคพื้นดิน ซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องค่อนข้างสูงและพิจารณาความสอดคล้องกันของสัญญาณโดยแสดงในรูปของกราฟ ในการเปรียบเทียบเพื่อทำการ

ตรวจสอบนั้นจะเลือกแนวนบินที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะอากาศในระหว่างการบินน้อยที่สุดและแนวนบินนั้นจะต้องอยู่บริเวณพื้นที่ที่มีข้อมูลภาคพื้นดินหนาแน่นพอสมควร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกแนวนบินที่ 110 และ 118 เมื่อวิเคราะห์จากกราฟจะเห็นได้ว่าข้อมูลภาคพื้นดินมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้ นั่นหมายความว่าข้อมูลการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศนั้นมีคุณภาพค่อนข้างดีสอดคล้องกับข้อมูลภาคพื้นดิน



(ก)

รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนบินของแนวนบิน (ก) 110 และ (ข) 118 กับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน



(ข)

รูปที่ 10 (ต่อ) กราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ทำการปรับแก้และไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินของแนวนิน (ก) 110 และ(ข) 118 กับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน

4.2 เปรียบเทียบค่าความสูงย้อยยัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยยัดที่หมุดร่วม

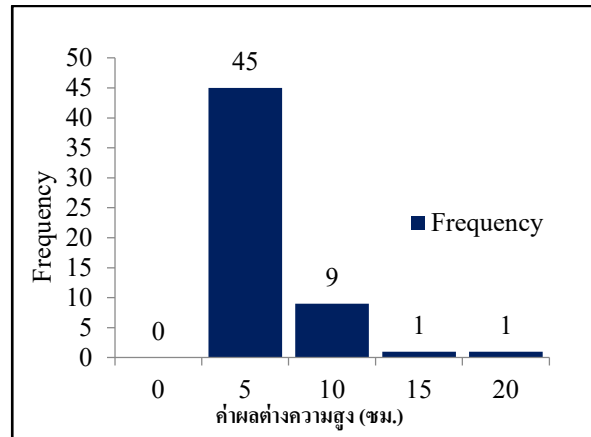
ในการเปรียบเทียบความสูงย้อยยัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยยัดที่หมุดร่วมนั้น หลังจากที่ได้ทำการลดทอนของข้อมูลทั้งสองชุดคือข้อมูลที่ไม่ปรับแก้และข้อมูลที่ปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินลงสู่ระดับทะเลปานกลางเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบจะต้องทำการคำนวณแบบจำลองย้อยยัดของข้อมูลทั้งสองชุดนี้ก่อน โดยใช้โปรแกรม Gravsoft และนำมาเปรียบเทียบกับหมุดร่วม จำนวน 56 หมุด ในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งหมุดเหล่านี้เป็นหมุดที่มีค่าระดับทางดิ่งที่ได้จากการเดินระดับจริง ส่วนค่าทางราบและค่าความโน้มถ่วงพิภพวัดตามเกณฑ์งานชั้นที่ 1 ของกรมแผนที่ทหาร และนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) เพื่อประเมินความถูกต้องแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลทางสถิติในการเปรียบเทียบผลต่าง 56

หมุด จะสังเกตได้ว่าความสูงย้อยยัดที่คำนวณจากข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินซึ่งให้ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rms) เพื่อประเมินความถูกต้องที่ดีกว่าอยู่ที่ 9.6 เซนติเมตร ส่วนความสูงย้อยยัดที่คำนวณจากข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินให้ค่าเฉลี่ย กำลังสอง (rms) อยู่ที่ 10 เซนติเมตร ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความถูกต้องของแบบจำลองย้อยยัดที่คำนวณจากข้อมูลที่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน ดีกว่าและพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นพื้นที่ทำการวิจัยที่ได้รับผลกระทบจากขอบพื้นที่ (edge effect) น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินของข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศทำให้ข้อมูลมีความคงเส้นคงวามากขึ้น ส่งผลให้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหมุดร่วม ย่อมทำให้ความถูกต้องของความสูงย้อยยัดที่คำนวณจากข้อมูลที่ทำการปรับแก้ดีกว่าข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้

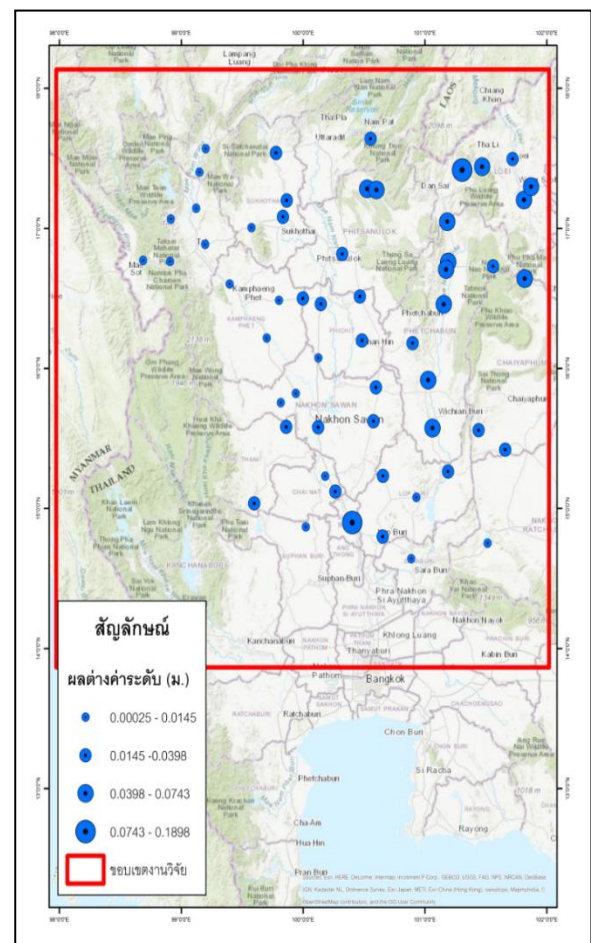
ตารางที่ 2 ค่าทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดที่ห้มา

เปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดที่ห้มา (m)				
ชนิดข้อมูล	Min	Max	Mean	RMS.
ไม่ทำการปรับแก้	0.710	1.354	0.940	0.100
ทำการปรับแก้	0.693	1.303	0.934	0.096

ส่วนจากรูปที่ 11 แสดงแผนภูมิและตำแหน่งของผลต่างจากการเปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดเพื่อทำการตรวจสอบที่ห้มาจำนวน 56 หุมด บริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา ที่มีระยะห่างระหว่างหุมดตั้งแต่ 30 – 50 กิโลเมตร ซึ่งหุมดรวมเป็นหุมดที่มีค่าระดับตามมาตรฐานงานชั้นที่ 1 (FGCC1984) จากแผนภูมิจะเห็นว่าหุมดส่วนใหญ่ทั้งหมด 54 หุมด นั้นมีผลต่างไม่เกิน 10 เซนติเมตร แต่มีเพียงสองหุมดที่มีขนาดโตกว่า 10 เซนติเมตร ซึ่งจะอยู่บริเวณเทือกเขาสูงและพื้นที่ราบลุ่มบางพื้นที่ อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ นั้น สาเหตุอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์การรังวัดหรือความคลาดเคลื่อนจากผู้รังวัดในขณะนั้นก็ได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 (ก) แผนภูมิแสดงผลต่างจากการเปรียบเทียบความสูงย้อยดัดที่ได้จากการคำนวณกับค่าย้อยดัดที่ห้มา (ข) ภาพแสดงตำแหน่งของหุมดรวมจำนวน 56 หุมด บริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา

5. สรุป

จากการวิจัยสรุปได้ว่าข้อมูลที่นำมาใช้ทำวิจัยทั้งหมด นำมาจากทางกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้ทำการรังวัดใน โครงการพัฒนาแบบจำลองฮัยออยด์ ความละเอียดสูงของ ประเทศไทยในปี พ.ศ.2558-2560 ทั้งข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศและข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา กระบวนการตรวจสอบ และควบคุมคุณภาพข้อมูลเบื้องต้น โดยการนำ EGM2008 มาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ในการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินด้วยวิธีลีสท์แคว์เพื่อปรับให้ความชัน (slope) ของข้อมูลแนวนินเหนือ -ใต้ และ แนวนิน ตะวันตก - ตะวันออก มีความคงเส้นคงวา ทำให้ค่าความแตกต่างของค่าความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ (FAA) ที่จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น และทำการลดทอนลงอย่างต่อเนื่องลงสู่ระดับทะเลปานกลาง ด้วยวิธีลีสท์แคว์คอลโลเคชัน ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดินจากข้อมูลภาคพื้นดินประมาณ 2,000 จุด โดยจะเลือกแนวนินที่ดีที่สุดสองแนวนินและอยู่ ณ บริเวณที่มีข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินหนาแน่นพอสมควร เพื่อเปรียบเทียบผล เมื่อวิเคราะห์ผลปรากฏว่า ข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าความถูกต้อง 4.484 มิลลิเมตร

ส่วนข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน มีค่าความถูกต้อง 3.991 มิลลิเมตร จากหมุดร่วมทั้งหมด 56 หมุด ในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา เมื่อเปรียบเทียบกับความสูงฮัยออยด์ที่ได้จากการคำนวณกับค่าฮัยออยด์ที่หมุดร่วมผลการวิเคราะห์ปรากฏว่าข้อมูลที่ทำกรปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินให้ค่าความถูกต้องที่ดีกว่า โดยที่ค่าความถูกต้อง 0.096 เมตร ในขณะที่ข้อมูลที่ไม่ทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนินมีค่าความถูกต้อง 0.100 เมตร สามารถสรุปได้ว่าเมื่อทำการรังวัดข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงจำเป็นที่จะทำการปรับแก้จุดตัดระหว่างแนวนิน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก พล.ต.ชัยวัฒน์ พรหมทอง หัวหน้าโครงการพัฒนาแบบจำลองฮัยออยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย ภายใต้แผนยุทธศาสตร์การบริหารจัดการน้ำระยะเร่งด่วน ปีงบประมาณปี พ.ศ. 2558-2560

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kotsakis, C. Least-squares collocation with covariance-matching constraints. *Journal of Geodesy*, 2007; 81(10): 661-677.
- [2] Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.K. and Factor, J.K. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research*, 2012; 117, B04406, doi: 10.1029/2011JB008916.
- [3] Dumrongchai, P., Wichienchareon, C. and Promtong, C. Local Geoid Modeling for Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 2012; 8(4):15-26.
- [4] Forsberg, R. and Tscherning, C. An Overview Manual for the GRAVSOFIT Geodetic Gravity Field Modelling Programs. National Space Institute (DUT-Space) and Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark, 2008.
- [5] Forsberg, R. A New Covariance Model for Inertial Gravimetry and Gradiometry. *Journal of Geophysical Research*, 1987; 92(B2), 1305-1310.
- [6] Forsberg, R. and Tscherning, C. The Use of Height Data in Gravity Approximation by Collocation. *Journal of Geophysical Research*, 1981; 86(B9): 7843-7854.
- [7] Heiskanen, W. and Moritz, H. Physical Geodesy. WH Freeman, San Francisco, 1967.

- [8] Serpas, J. G. and Jekeli, C. Local geoid determination from airborne vector gravimetry. *Journal of Geodesy*, 2005; 78(10), 577-587.
- [9] Micro-g LaCoste. TAGS Turnkey Airborne Gravity System. *AIR III Hardware & Operations Manual*, 2010.
- [10] Bossler, J.D. Standards and Specifications for Geodetic Control Networks. Federal Geodetic Control Committee, Rockville, Mary Land, USA, 1984.
- [11] พุทธิพล ดำรงชัย, ชัยวัฒน์ พรหมทอง, ชวิศ ศรีมณี. ผลเบื้องต้นของการรังวัดความโน้มถ่วงพิภพทางอากาศ สำหรับการคำนวณหาแบบจำลองขั้วออกซ์บริเวนลุ่มน้ำเจ้าพระยา. *วารสารสมาคมสำรวจข้อมูล ระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย*, 2560; 18: 269-280.
- [12] Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Torrence, M. H., Wang, Y. M., Williamson, R. G. Pavlis, E. C., Rapp, R. H. and Olson, T. R. The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 20771, 1998.
- [13] Moritz, H. Advanced Physical Geodesy. Herbert Wichman Verlag, Karlsruhe, 1980.



การประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพ

Life Cycle Assessment of Organic Rankine Cycle Power Plant Combined with Centralized Drying Room from Geothermal Energy

ปานิส อ่อนดอกไม้ และ นัฐพร ไชยญาติ*

Panisa Ondokmai and Nattaporn Chaiyat*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, 63 Moo 4 Nongharn, Sansai, Chiang Mai, 50290

*Corresponding author: benz178tii@hotmail.com, +66(0) 882523088

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพ โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้มาตรฐาน ISO14040 และ ISO14044 ในการวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมชั้นกลางทั้งหมด 10 ประเภท ซึ่งการพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนประกอบไปด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดประมาณ 10 kW_e และห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ขนาดประมาณ 20 kW ที่ขับเคลื่อนโดยน้ำพุร้อนอุณหภูมิ 105 °C และอัตราการไหลเชิงมวล 3 L/s ที่มีอายุการใช้งาน 20 y หน่วยการทำงานของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน คือ 1 MJ จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนเท่ากับ 24.97% ในขณะที่ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากระบบผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 5.60E-02 kg CO₂ eq/MJ การลดลงของชั้นโอโซนมีค่าเท่ากับ 2.62E-09 kg CFC-11 eq/MJ การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์มีค่าเท่ากับ 5.91E-01 kg 1,4-DB eq/MJ การเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควันมีค่าเท่ากับ 2.67E-04 kg PM10 eq/MJ การเกิดภาวะฝนกรดมีค่าเท่ากับ 8.51E-04 kg SO₂ eq/MJ การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดมีค่าเท่ากับ 2.01E-04 kg P eq/MJ การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดินมีค่าเท่ากับ 4.04E-05 kg 1,4-DB eq/MJ การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำมีค่าเท่ากับ 6.79E-03 kg 1,4-DB eq/MJ การลดลงของเหล็กมีค่าเท่ากับ 1.89E-01 kg Fe eq/MJ และการลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าเท่ากับ 1.07E-02 kg oil eq/MJ

คำหลัก: การประเมินวัฏจักรชีวิต, โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์, ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์, พลังงานความร้อนใต้พิภพ

ABSTRACT

This research studies environmental impacts of an organic Rankine cycle (ORC) power plant combined with a centralized drying room from geothermal energy by using a life cycle assessment (LCA) under the ISO14040 and 14044 standards to consider the 10 impact categories of the midpoint environment impact. A combined heat and power (CHP) comprised of a 10 kW_e ORC unit and a 20 kW centralized drying room, which is driven by hot spring temperature and mass flow rate of 105 °C and 3 L/s, respectively, with life span at 20 y and functional unit as 1 MJ. From the study results, the CHP

efficiency is 13.46%, while the environment impacts of the CHP system consist of climate change at $5.60\text{E-}02$ kg CO_2 eq/MJ, ozone depletion at $2.62\text{E-}09$ kg CFC-11 eq/MJ, human toxicity of $6.91\text{E-}01$ kg 1,4-DB eq/MJ, particulate matter formation of $2.67\text{E-}04$ kg PM10 eq/MJ, terrestrial acidification at $8.51\text{E-}04$ kg SO_2 eq/kWh, freshwater eutrophication as $2.01\text{E-}04$ kg P eq/MJ, terrestrial ecotoxicity of $4.04\text{E-}05$ kg 1,4-DB eq/MJ, freshwater ecotoxicity as $6.79\text{E-}03$ kg 1,4-DB eq/MJ, metal depletion with $1.89\text{E-}01$ kg Fe eq/MJ and fossil depletion at $1.07\text{E-}02$ kg oil eq/MJ.

Keywords: Life cycle assessment, Organic Rankine cycle power plant, Centralized drying room, Geothermal energy

1. บทนำ

พลังงานความร้อนได้พิภพในปัจจุบันเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจในการนำมาประโยชน์ เนื่องจากเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น Clark et al. [1] ที่ได้นำเสนอ การนำพลังงานความร้อนได้พิภพมาผลิตพลังงานไฟฟ้า และมีการปล่อยมลพิษน้อยกว่าการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการสร้างโรงไฟฟ้าต้องใช้วัสดุและพลังงาน ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพตามมา เช่น Frick et al. [2] และ Florian et al. [3] ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพแบบระบบสองวงจร (Binary cycle power plant) ในผลกระทบ 3 ด้าน อันประกอบไปด้วย การเกิดภาวะโลกร้อน การเกิดภาวะความเป็นกรด และการเกิดภาวะการเจริญผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด Martínez-Corona et al. [4] ได้ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพใน 7 ด้าน คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชน้ำในแหล่งน้ำจืด การเกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ การลดลงของเหล็ก การเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควัน และการเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดินสำหรับประเทศไทยมีการนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น การผลิตไฟฟ้า การทำความร้อน การทำความเย็น และในการท่องเที่ยวเชิงนันทนาการต่าง ๆ อาทิเช่น นัฐพร และ ชัชวาล [5] นำพลังงานความร้อนได้พิภพหรือน้ำพุร้อนมาใช้ในการอบแห้งพืชผลทางการเกษตร สุรศักดิ์ [6] ทำการศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานความ

ร้อนทั้งจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพในการอบแห้งพริกและกระเทียม เชิดชัย [7] ทำการศึกษาการอบแห้งดินหอม โดยใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพ Chaiyat et al. [8] นำเสนอแนวทางการใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนได้พิภพแบบขั้นบันได ในการผลิตไฟฟ้า ระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน และห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ ตามลำดับ ทั้งนี้ในปัจจุบันประเทศไทยมีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพเพียงแห่งเดียว คือ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพฝาง อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ [9]

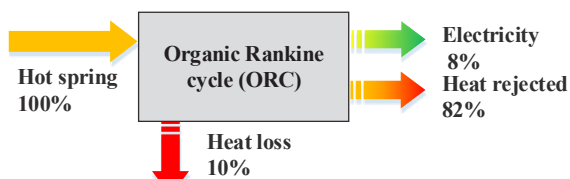
ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้น พบว่าการนำพลังงานความร้อนได้พิภพมาใช้ประโยชน์ ควรมีการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย และจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน (Combined heat and power, CHP) ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน ของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ที่ทำงานร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์จากพลังงานความร้อนได้พิภพของประเทศไทย โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

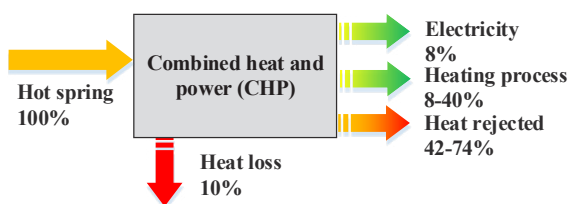
2.1 การผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน (Combined heat and power)

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เป็นระบบที่สามารถนำความร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

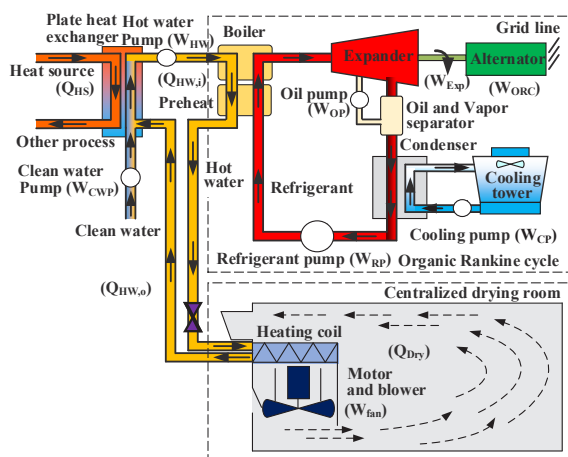
เนื่องจากสารทำงานในระบบมีจุดเดือดต่ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ (น้ำพุร้อน) สามารถผลิตไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 1 แต่ทั้งนี้ความร้อนที่ออกจากวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านความร้อนต่อไปได้ คือ นำความร้อนมาใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรด้วยห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ [10] โดยสามารถผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนได้ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 1 การผลิตไฟฟ้าจากน้ำพุร้อน



รูปที่ 2 การผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนจากน้ำพุร้อน



รูปที่ 3 แผนภาพการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน

จากรูปที่ 3 แสดงแผนภาพการทำงานของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน คือ แหล่งความร้อน (Heat source) จากน้ำพุร้อนป้อนให้แก่หม้อต้ม (Boiler) ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า

จากนั้นเมื่อออกจากหม้อต้มแล้วจะถูกส่งไปเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Preheat) ก่อนส่งต่อไปยังแผงแลกเปลี่ยนความร้อน (Heating coil) ของระบบอบแห้ง เพื่อผลิตความร้อนสำหรับการอบแห้งต่อไป

ทั้งนี้ในการประเมินประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ และการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ แสดงดังสมการต่อไปนี้

ประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

$$\eta_{\text{ORC}} = \frac{W_{\text{ORC,G}} - W_{\text{RP}} - W_{\text{OP}}}{Q_{\text{HW,1}}} \quad (1)$$

ประสิทธิภาพของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

$$\eta_{\text{Dry}} = \frac{Q_{\text{Dry}}}{Q_{\text{HW,2}} + W_{\text{fan}}} \quad (2)$$

ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน

$$\eta_{\text{CHP}} = \frac{(W_{\text{ORC,G}} - W_{\text{RP}} - W_{\text{OP}} - W_{\text{fan}}) + Q_{\text{Dry}}}{Q_{\text{HW,total}}} \quad (3)$$

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle assessment, LCA)

การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นวิธีการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ภายใต้มาตรฐานสากล ISO14040 และ ISO14044 ใช้ในการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต ในเชิงปริมาณการใช้ทรัพยากร มลพิษที่เกิดขึ้น และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากการผลิตของผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิต ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้งาน รวมถึงการใช้ซ้ำ การหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ และการกำจัดทิ้งหลังหมดอายุการใช้งาน ซึ่งแบ่งกระบวนการประเมินวัฏจักรชีวิตออกเป็น 4 ขั้นตอน [11] ดังนี้

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition) คือ การระบุเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงสาเหตุที่ต้องการศึกษา

2. การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory analysis) คือ ขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดทำเป็นฐานข้อมูล โดยการรวบรวมปริมาณสารขาเข้าและขาออกที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

3. การประเมินผลกระทบ (Impact assessment) คือ การนำผลจากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการมาทำการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปของตัวชี้วัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อบ่งชี้ค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

4. การแปลผล (Interpretation) คือ การแปลผลการศึกษา โดยการวิเคราะห์ผลลัพธ์ อภิปรายผล และสรุปผลที่เกิดขึ้น

3. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ จากพลังงานความร้อนได้พิภพของกิจการน้ำพุร้อนสันกำแพง อำเภอแม่อน ตามพระราชดำริจังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) และ (ข) ซึ่งมีอุณหภูมิของน้ำพุร้อนผิวดินประมาณ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ร่วมกับไอน้ำพุร้อนประมาณ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่อัตราการไหลเชิงมวลประมาณ 3 L/s เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าของวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ขนาดประมาณ 10 kW_e และทำความร้อนของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ขนาดประมาณ 20 kW ที่มีอายุการใช้งาน 20 y ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



(ก) โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์

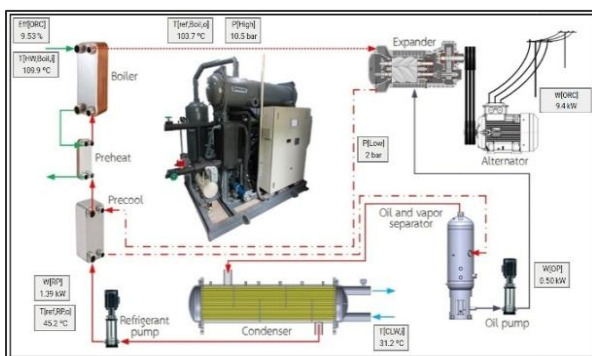
(ข) ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

รูปที่ 4 ภาพรวมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

3.1 การทดสอบและวิเคราะห์ระบบ

ทำการเก็บข้อมูลที่ระบบตรวจวัดและแสดงผลอัจฉริยะ [12] ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) หลังจาก

นั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและความร้อน นำไปประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมต่อหน่วยในหัวข้อ 3.4 ต่อไป



(ก) หน้าจอแสดงผลของการผลิตไฟฟ้า



(ข) หน้าจอแสดงผลของการผลิตความร้อน

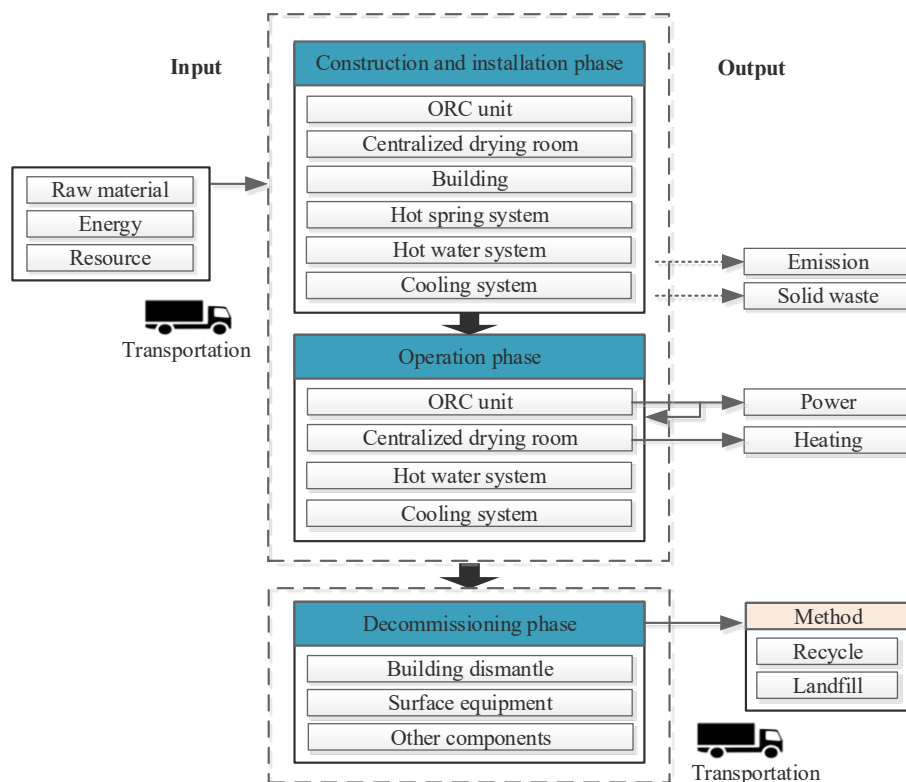
รูปที่ 5 หน้าจอแสดงผลระบบตรวจวัดและแสดงผลอัจฉริยะ (www.tdetlab.com) [12]

3.2 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

- เป้าหมาย คือ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพ
- ขอบเขตการศึกษา คือ แบบแกรเดิล-ทูล-เกรฟ (Cradle-to-grave) ซึ่งพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ

การใช้วัสดุ พลังงาน และทรัพยากร การขนส่ง กระบวนการสร้าง กระบวนการใช้งาน และกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 6

- หน่วยการหน้าที่การทำงาน คือ การผลิตไฟฟ้า 1 kWh การผลิตพลังงานความร้อน 1 kW และการผลิตไฟฟ้ารวมความร้อน 1 MJ



รูปที่ 6 ขอบเขตการศึกษาในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต

3.3 การวิเคราะห์บัญชีรายการ

โดยในขั้นตอนนี้จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและจัดทำบัญชีรายการข้อมูลของปริมาณสารขาเข้าและขาออกในกระบวนการสร้าง กระบวนการใช้งาน และกระบวนการกำจัดซาก ตลอดวัฏจักรชีวิตโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

3.4 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ โดยใช้โปรแกรม SimaPro เวอร์ชัน 8.5.2 วิธี ReCiPe Midpoint (H) V1.13 [13] เพื่อทำการ

วิเคราะห์ผลกระทบชั้นกลางทั้งหมด 10 ประเภท จากทั้งหมด 18 ประเภท โดยคัดเลือกประเภทผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เนื่องจากผลกระทบบางประเภทไม่ได้เกี่ยวเนื่องและอยู่ในพื้นที่ที่ติดตั้งระบบ เช่น การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชน้ำในทะเล และการเกิดภาวะเป็นพิษต่อน้ำทะเล การใช้พื้นที่เกษตรกรรม เขตเมือง และพื้นที่ทรัพยากรธรรมชาติ รวมถึงการลดลงของน้ำ และส่วนการเกิดรังสีไอออนที่ถูกตัดออกเนื่องจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยไม่ได้รวมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งประเภทผลกระทบมีดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change, CC); kg CO₂ eq
- การลดลงของชั้นโอโซน (Ozone depletion, OD); kg CFC-11 eq
- การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์ (Human toxicity, HT); kg 1,4-DB eq
- การเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควัน (Particulate matter formation, PMF); kg PM10 eq
- การเกิดภาวะฝนกรด (Terrestrial acidification, TA); kg SO₂ eq
- การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด (Freshwater eutrophication, FE); kg P eq
- การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดิน (Terrestrial ecotoxicity, TET); kg 1,4-DB eq
- การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำ (Freshwater ecotoxicity, FET); kg 1,4-DB eq
- การลดลงของเหล็ก (Metal depletion, MD); kg Fe eq
- การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil depletion, FD); kg oil eq

3.5 การแปลผลกระทบ

ในขั้นตอนนี้ทำการแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน สรุปผลที่เกิดขึ้น และทำการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกับโรงไฟฟ้าอื่น ๆ

4. ผลการศึกษา

จากการศึกษาการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน

ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าด้วยวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ และการผลิตความร้อนของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ ซึ่งค่าที่ปรากฏในการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1 เป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบที่นำมาใช้ในการคำนวณ จากการวิเคราะห์ พบว่า วัฏจักรแรงดันอินทรีย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทั้งหมด 9.40 kW_e ที่ประสิทธิภาพ 9.53% และห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์สามารถผลิตความ

ร้อนได้สุทธิ 22.26 kW ที่ประสิทธิภาพ 56.16% ซึ่งห้องอบแห้งสามารถควบคุมอุณหภูมิความร้อนขาเข้าและอุณหภูมิอากาศภายในห้องได้ ด้วยการควบคุมวาล์วไฟฟ้าสำหรับจ่ายน้ำร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง และเมื่อทั้งสองระบบผลิตพลังงานร่วมกัน พบว่า ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อนตลอดอายุการใช้งานมีค่าเท่ากับ 24.97%

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ของระบบ

Parameter	Data
ORC system	
Hot water entering the boiler (T _{HW,i}) [°C]	109.9
Hot water leaving the boiler (T _{HW,o}) [°C]	99.04
Heat source capacity (Q _{HW,1}) [kW]	76.49
Cooling water entering the condenser (T _{CLW,i}) [°C]	30.00
Cooling water leaving the condenser (T _{CLW,o}) [°C]	36.40
Heat sink capacity (Q _c) [kW]	42.80
Refrigerant pump power (W _{RP}) [kW _e]	1.41
Oil pump power (W _{OP}) [kW _e]	0.49
Gross power output (W _{ORC,G}) [kW _e]	9.40
Net power output ¹ (W _{ORC,N}) [kW _e]	7.57
ORC efficiency ² (η _{ORC}) [%]	9.53
Centralized drying room	
Hot water entering the heating coil (T _{HW,i}) [°C]	80.79
Hot water leaving the heating coil (T _{HW,o}) [°C]	71.72
Heat source capacity (Q _{HW,2}) [kW]	38.80
Fan power (W _{fan}) [kW _e]	0.84
Net energy output (Q _{Dry}) [kW]	22.26
Efficiency system ³ (η _{Dry}) [%]	56.16
CHP system	
Net power output ⁴ (W _{CHP}) [kW _e]	6.73
CHP efficiency ⁵ (η _{CHP}) [%]	24.97

Remark: ¹ W_{ORC,N} = W_{ORC,G} - W_{RP} - W_{OP}

² η_{ORC} = (W_{ORC,G} - W_{RP} - W_{OP}) x 100 / Q_{HW,1}

³ η_{Dry} = Q_{Dry} x 100 / (Q_{HW,2} - W_{fan})

⁴ W_{CHP} = W_{ORC} - W_{RP} - W_{OP} - W_{fan}

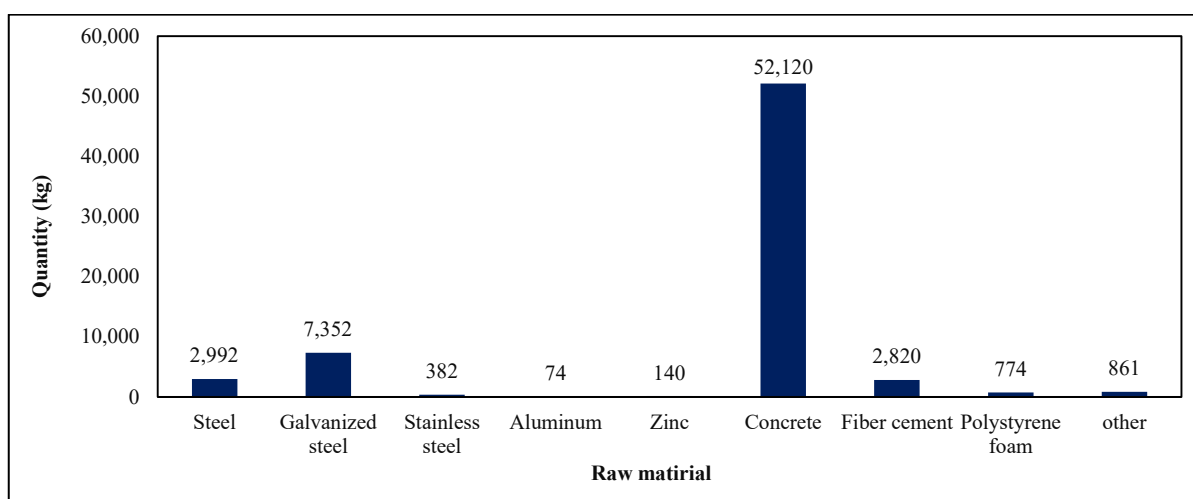
⁵ η_{CHP} = ((W_{ORC} - W_{RP} - W_{OP} - W_{fan}) + Q_{Dry}) x 100 / Q_{HW,tatal}

4.2 ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการ

จากการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์บัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ โรงเรือน ระบบน้ำสะอาด และระบบจ่ายน้ำพุร้อน พบว่า ปริมาณการใช้วัตถุดิบในกระบวนการสร้างของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ประกอบไปด้วยผนังห้องที่ทำจากโพลีไธรีนโพรพิลีน ภายในห้องมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อและครีป พัดลมแบบหมุนตามแนวแกน ขั้วนำผลผลิตถัสดำ โครงสร้างผนังจากเหล็กที่ทำจากเหล็กและติดทับด้วยสังกะสี ส่วน

โครงสร้างโรงเรือนเป็นวัสดุประเภทเหล็ก พื้น เสา คาน ใช้คอนกรีตผสมเสร็จ กระเบื้องหลังคาเป็นวัสดุประเภทไฟเบอร์ซีเมนต์ ระบบน้ำพุร้อนใช้ท่อเหล็กกล้าไนซ์สำหรับส่งจ่ายน้ำพุร้อน และระบบน้ำสะอาดประกอบไปด้วยเครื่องกรองน้ำสเตนเลส ถึงเก็บน้ำสะอาดและน้ำดิบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นถอดประกอบได้ และถึงเก็บน้ำร้อน เป็นต้น ในกระบวนการสร้างใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 25 kWh รวมถึงการมีการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลในการขนส่งวัสดุต่าง ๆ ปริมาณ 350 L (โดยข้อมูลใช้ในโปรแกรม SimaPro เลือกรูปแบบ Market) ในกระบวนการใช้งาน พบว่า มีการป้อนวัตถุดิบ

ให้แก่ระบบ คือ น้ำพุร้อน 5,500 m³ น้ำสะอาด 50 m³ เรซินสำหรับกรองน้ำสะอาด 350 L และมีการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ปั๊มต่าง ๆ และมอเตอร์พัดลม 126,000 kWh ทั้งนี้ในกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานพบว่า มีวัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ (Recycle) อาทิเช่น เหล็ก เหล็กกล้าไนซ์ สเตนเลส และสังกะสี เป็นต้น โดยเฉลี่ยคิดเป็น 45.87% และในส่วนที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่จะถูกนำไปฝังกลบ (Landfill) อย่างถูกหลักสุขาภิบาล อาทิเช่น พลาสติก คอนกรีต ไฟเบอร์ซีเมนต์ เป็นต้น โดยเฉลี่ยคิดเป็น 54.13%



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการข้อมูลของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

4.3 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

การศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ โดยทำการประเมินจากบัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตด้วยโปรแกรม SimaPro ทำการพิจารณาที่ผลกระทบชั้นกลาง โดยผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ ทำการอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัย [14] ที่ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทั้งหมด 9.4 kWe ที่ใช้

สารทำงาน R-245fa เป็นเวลา 20 y โดยมีระยะเวลาการทำงาน 24 h/d และ 350 d/y สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทั้งหมดสุทธิ 1,271,760 kWh/Lifetime ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจากการศึกษา พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการใช้วัสดุประเภทเหล็ก เหล็กกล้าไนซ์ และสารทำงาน R-245fa ที่เป็นสารเคมีสังเคราะห์ และจากการแปลผลการศึกษา โดยเฉลี่ยจากผลกระทบทั้ง 10 ด้าน ในแต่ละกระบวนการ พบว่า ในกระบวนการสร้างเกิดผลกระทบ 75% ในกระบวนการใช้งาน 12% และกระบวนการกำจัดซาก 13%

ตารางที่ 2 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าถ่านหินอินทรี [14]

Environmental impact	Construction phase	Operation phase	Decommissioning phase		Total Emission		Unit
			Recycle	Landfill	Lifetime	1 kWh	
CC	3.39E+04	5.90E+04	-6.47E+04	5.02E+03	3.32E+04	1.32E-02	kg CO ₂ eq
OD	3.45E-03	2.94E-05	-1.44E-04	4.48E-04	3.78E-03	1.50E-09	kg CFC-11 eq
HT	2.77E+04	3.12E+02	-3.27E+03	2.79E+03	2.75E+04	1.09E-02	kg 1,4-DB eq
PMF	5.91E+01	1.42E+00	-2.69E+01	1.28E+01	4.65E+01	1.85E-05	kg PM10 eq
TA	1.48E+02	2.58E+00	-9.42E+01	1.73E+01	7.40E+01	2.94E-05	kg SO ₂ eq
FE	1.48E+01	2.13E-01	-1.40E+00	2.26E+00	1.58E+01	6.29E-06	kg PO ₄ eq
TET	2.90E+00	2.11E+01	-1.06E+00	2.15E+01	4.45E+01	1.76E-05	kg 1,4-DB eq
FET	4.35E+02	7.39E+00	-6.45E+01	8.53E+01	4.63E+02	1.84E-04	kg 1,4-DB eq
MD	1.75E+04	3.73E+01	-2.33E+03	4.53E+03	1.97E+04	7.82E-03	kg Fe eq
FD	9.64E+03	1.15E+02	-5.68E+03	1.47E+03	5.54E+03	2.20E-03	kg oil eq

ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ ซึ่งสามารถผลิตความร้อนได้ 22.26 kW โดยใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ มีอายุการใช้งานตลอดวัฏจักรชีวิตคิดที่ 20 y ระยะเวลาการทำงาน 12 h/d และทำงาน 350 d/y สามารถผลิตพลังงานความร้อนได้ 1,869,840 kW/Lifetime

ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ในกระบวนการสร้าง ผลกระทบส่วนใหญ่ส่งผลให้เกิดด้านการเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์ การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำ และการการลดลงของเหล็ก ซึ่งเกิดจากการใช้วัสดุประเภทเหล็กจำนวน 2,992 kg เหล็กกล้าในชิ้น จำนวน 7,352 kg และ

อะลูมิเนียมจำนวน 74 kg ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดกระบวนการใช้งาน ผลกระทบส่วนใหญ่ส่งผลให้เกิดด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศการเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์ และการลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิลสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารกรองเรซินในขั้นตอนการกรองน้ำสะอาดจำนวน 100 L สำหรับแหล่งพลังงานความร้อนที่ป้อนให้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้ารวมความร้อนเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ จึงส่งผลให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ค่อนข้างต่ำ ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน จากผลการวิเคราะห์บัญชีรายการ มีวัสดุบางส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่

ตารางที่ 3 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

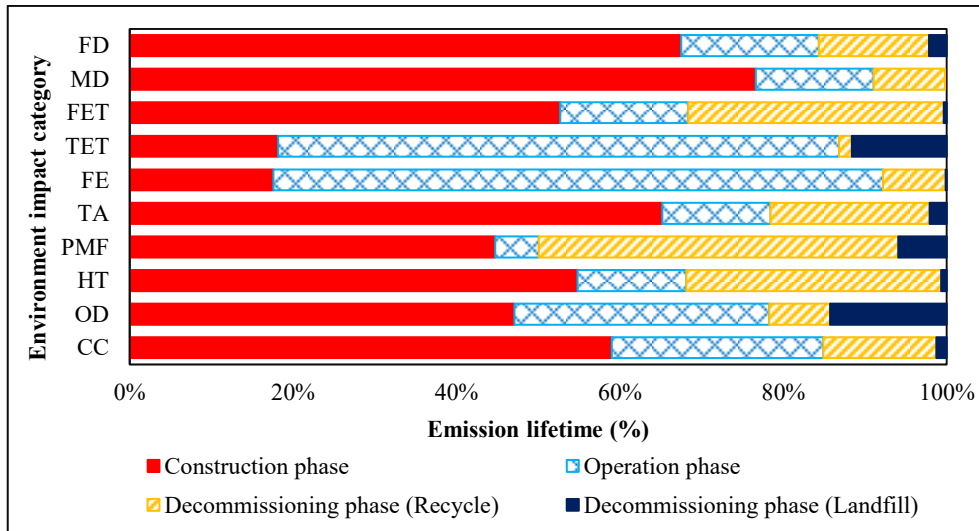
Environmental impact	Construction phase	Operation phase	Decommissioning phase		Total Emission		Unit
			Recycle	Landfill	Lifetime	1 kWh	
CC	3.24E+04	1.42E+04	-7.58E+03	7.03E+02	3.97E+04	8.64E-02	kg CO ₂ eq
OD	1.02E-03	6.78E-04	-1.61E-04	3.11E-04	1.85E-03	4.03E-09	kg CFC-11 eq
HT	9.82E+03	2.39E+03	-5.59E+03	1.19E+02	6.74E+03	1.47E-02	kg 1,4-DB eq
PMF	4.70E+01	5.59E+00	-4.62E+01	6.20E+00	1.26E+01	2.74E-05	kg PM10 eq
TA	1.25E+02	2.54E+01	-3.73E+01	3.99E+00	1.17E+02	2.55E-04	kg SO ₂ eq
FE	5.89E+00	2.50E+01	-2.56E+00	4.64E-02	2.83E+01	6.17E-05	kg PO ₄ eq
TET	4.90E+00	1.85E+01	-4.26E-01	3.13E+00	2.61E+01	5.68E-05	kg 1,4-DB eq
FET	2.24E+02	6.65E+01	-1.33E+02	1.52E+00	1.59E+02	3.46E-04	kg 1,4-DB eq
MD	9.28E+03	1.74E+03	-1.06E+03	2.67E+01	9.94E+03	2.16E-02	kg Fe eq
FD	8.44E+03	2.11E+03	-1.68E+03	2.72E+02	9.14E+03	1.99E-02	kg oil eq

จึงส่งผลให้ค่าผลกระทบลดลง และผลกระทบในกระบวนการนี้เป็นผลมาจากการฝังกลบวัสดุดิบ ส่วนใหญ่

ผลกระทบเกิดจากไฟเบอร์ซีเมนต์ โพลีสไตรีนโฟม เหล็ก รวมถึงพลาสติกต่าง ๆ ที่ย่อยสลายยาก และเมื่อทำการ

พิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดวัฏจักรชีวิตของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อทำการพิจารณา พบว่า ในกระบวนการสร้าง

เกิดผลกระทบ 50.38% ในกระบวนการใช้งาน 27.92% และกระบวนการกำจัดซาก 21.7



รูปที่ 8 สัดส่วนของกระทบทางสิ่งแวดล้อมในแต่ละกระบวนการของห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

เมื่อทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตไฟฟ้ารวมความร้อนที่ 1 MJ มีการปล่อยผลกระทบดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 5.60×10^{-2} kg CO₂ eq/MJ การลดลงของชั้นโอโซนมีค่าเท่ากับ 2.62×10^{-9} kg CFC-11 eq/MJ การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์มีค่าเท่ากับ 6.91×10^{-1} kg 1,4-DB eq/MJ การเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควันมีค่าเท่ากับ 2.67×10^{-4} kg PM10 eq/MJ การเกิดภาวะฝนกรดมีค่าเท่ากับ 8.51×10^{-4} kg SO₂ eq/MJ การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดมีค่าเท่ากับ 2.01×10^{-4} kg P eq/MJ การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดินมีค่าเท่ากับ 4.04×10^{-5} kg 1,4-DB eq/MJ การเกิดภาวะที่พิษต่อแหล่งน้ำมีค่าเท่ากับ 6.79×10^{-3} kg 1,4-DB eq/MJ การลดลงของเหล็กมีค่าเท่ากับ 1.89×10^{-1} kg Fe eq/MJ และการลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าเท่ากับ

1.07×10^{-2} kg oil eq/MJ และโดยเฉลี่ยจากข้อมูลของผลกระทบทั้ง 10 ด้าน ในกระบวนการ เมื่อทำการพิจารณาผลกระทบในกระบวนการสร้างเกิดขึ้นมากที่สุดประมาณ 83.63% รองลงมา คือ เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานโดยเฉลี่ยประมาณ 13.22% แต่ทั้งนี้วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกครั้ง ทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงโดยเฉลี่ยประมาณ 11.06% จึงส่งผลให้เกิดผลกระทบในกระบวนการกำจัดซากประมาณ 2.16% และเกิดผลกระทบในกระบวนการใช้งานน้อยที่สุด คือ โดยเฉลี่ยประมาณ 4.15% และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์เพียงอย่างเดียวกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์แล้ว พบว่าการผลิตไฟฟ้ารวมความร้อนสามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมลงได้ โดยเฉลี่ยประมาณ 18.71%

ตารางที่ 4 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

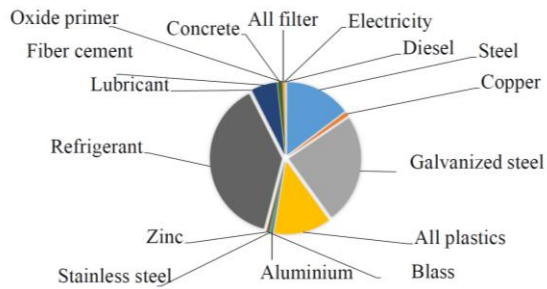
Environmental impact	Construction phase	Operation phase	Decommissioning phase		Total Emission		Unit
			Recycle	Landfill	Lifetime	1 MJ	
CC	1.16E+05	2.88E+04	-5.79E+04	2.43E+03	8.96E+04	5.60E-02	kg CO ₂ eq
OD	3.95E-03	5.30E-05	-2.91E-04	4.75E-04	4.19E-03	2.62E-09	kg CFC-11 eq
HT	1.12E+06	3.02E+02	-1.11E+04	2.34E+02	1.11E+06	6.91E-01	kg 1,4-DB eq
PMF	5.02E+02	1.17E+01	-1.00E+02	1.28E+01	4.26E+02	2.67E-04	kg PM10 eq
TA	1.39E+03	4.60E+01	-8.17E+01	1.02E+01	1.36E+03	8.51E-04	kg SO ₂ eq
FE	5.30E+02	1.12E-01	-2.09E+02	8.84E-02	3.21E+02	2.01E-04	kg PO ₄ eq
TET	5.59E+01	6.42E+00	-9.39E-01	3.30E+00	6.47E+01	4.04E-05	kg 1,4-DB eq
FET	1.11E+04	2.38E+01	-2.72E+02	3.17E+00	1.09E+04	6.79E-03	kg 1,4-DB eq
MD	3.26E+05	1.08E+01	-2.45E+04	1.26E+02	3.02E+05	1.89E-01	kg Fe eq
FD	1.73E+04	2.84E+03	-3.64E+03	6.60E+02	1.72E+04	1.07E-02	kg oil eq

4.4 การแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

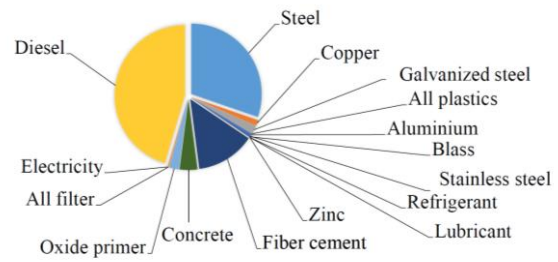
ในการแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์แต่ละผลกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) – (ญ) จากผลการศึกษา พบว่า ผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) เป็นผลมาจากการใช้สารทำงาน R-245fa 38% เหล็ก 15% เหล็กกล้าไนซ์ 24% เหล็ก 15% พลาสติก 13% และอื่น ๆ ด้านการลดลงของชั้นโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้เชื้อเพลิงดีเซลในการขนส่ง 45% การใช้เหล็กในการทำโครงสร้าง 30% และอื่น ๆ 5% ผลกระทบด้านการเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์และการเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 9 (ค) (ข) และ (ฅ) เป็นผลมาจากเหล็กมากกว่า 90% ทองแดง 4% และอื่น ๆ 6% ผลกระทบด้านการเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควันและการเกิดภาวะฝนกรด ดังแสดงในรูปที่ 9 (ง) และ (จ) เป็นผลมาจากเหล็กประมาณ 85% เหล็กกล้าไนซ์ 6% ทองแดง 4% และอื่น ๆ 5% ด้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดและการเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดิน การลดลงของเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 9 (ฉ) และ (ช) เป็นผลมาจากการเหล็ก 75% สารกรองและเหล็กกล้าไนซ์ประมาณ 20% และอื่น ๆ 5% ผลกระทบด้านการลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นผลมาจาก

การใช้เหล็ก 25% เหล็กกล้าไนซ์ 32% พลาสติก 29% และอื่น ๆ 9% ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาวัสดุที่ทำให้เกิดผลกระทบส่วนใหญ่มาจากการใช้เหล็กที่ใช้ในการทำโครงสร้างของอุปกรณ์ในระบบ เนื่องจากการออกแบบระบบเพื่อให้มั่นคงและใช้งานได้ยาวนาน จึงมีการใช้เหล็กในปริมาณที่สูง และโครงสร้างที่ใช้ในการทำโรงเรือน เหล็กกล้าไนซ์ที่ใช้ในระบบส่งจ่ายน้ำพุร้อน โพลีเอทรีนโพลี (พลาสติก) ที่ใช้ทำผนังห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ สารทำงาน R-245fa ในระบบการผลิตไฟฟ้า และเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลที่ใช้ในการขนส่งวัสดุ

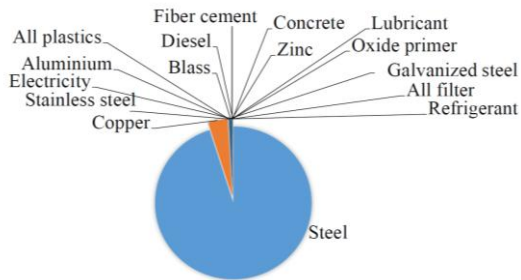
จากผลการศึกษาการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ นำมาทำการเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ ในประเทศไทย พบว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนได้พิพม์ค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเท่ากับ 0.0132 kg CO₂ eq/kWh ซึ่งมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของชานนท์ [18] ที่ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการผลิตไฟฟ้าจากแกลบเท่ากับ 0.8063 kg CO₂ eq/kWh การผลิตไฟฟ้าจากขานอ้อย 0.4140 kg CO₂ eq/kWh และมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของเนตรชนากานต์ และเศรษฐ์ [19] ที่ทำการประเมินผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าจากขยะเทศบาลด้วยระบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์เท่ากับ 0.9305 kg CO₂ eq/kWh



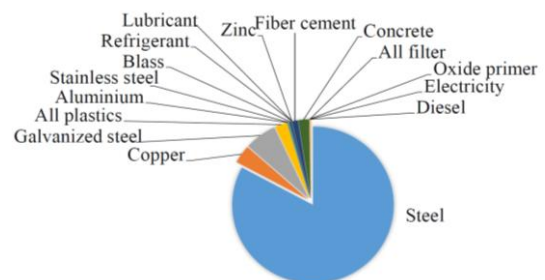
(ก) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ



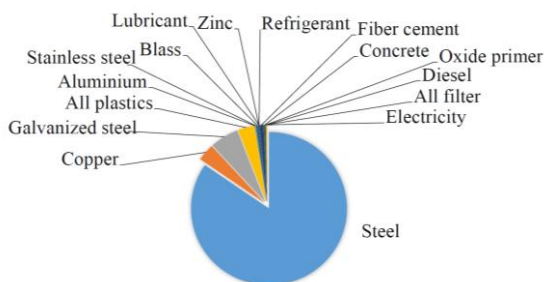
(ข) การลดลงของชั้นโอโซน



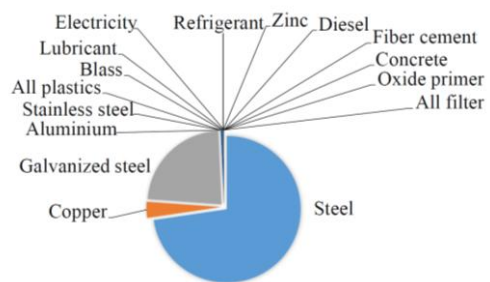
(ค) การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์



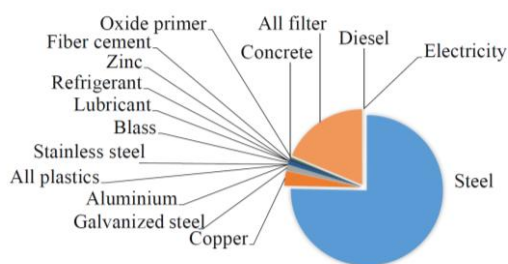
(ง) การเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควัน



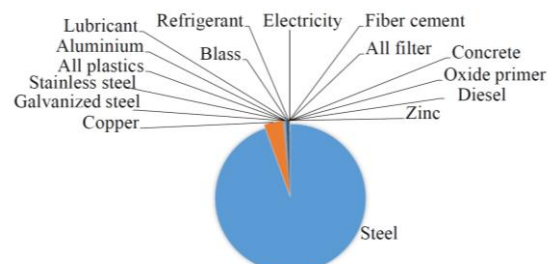
(จ) การเกิดภาวะฝนกรด



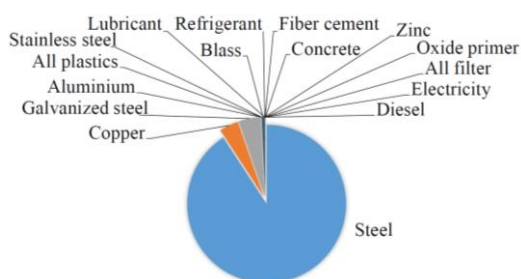
(ฉ) การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชน้ำในแหล่งน้ำจืด



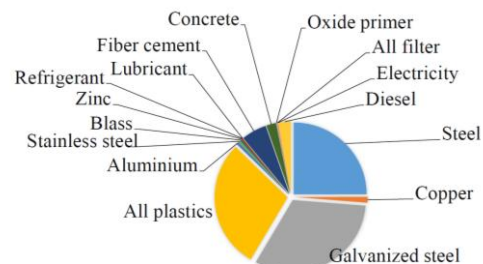
(ช) การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดิน



(ซ) การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำ



(ฌ) การลดลงของเหล็ก



(ญ) การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิล

รูปที่ 11 ผลกระทบที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์

อนึ่งเมื่อนำผลการศึกษางานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่คล้ายคลึงกัน เพื่อทดสอบค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า การปล่อยผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพของ Frick et al. [2] ที่ใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent data 2.0 และอายุการใช้งาน 30 y พบว่า มีการปล่อยผลกระทบในกระบวนการสร้างประมาณ 98.23% การใช้งาน 1.6% และการกำจัดซาก 0.9% Florian et al. [3] ที่ทำการประเมินโดยใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent data 2.2 และ PROBAS ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพมีอายุการใช้งานที่ 30 y พบว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการใช้งาน โดยส่งผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 13.5% ด้านการเกิดภาวะความเป็นกรด 31% และด้านการผิปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด 25.5% Gambao et al. [15] ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพที่มีอายุการใช้งาน 25 y โดยใช้โปรแกรม SimaPro 7 จากผลการศึกษาพบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการขุดเจาะ และการรั่วไหลของสารทำงาน Marchand et al. [16] ทำการประเมินโดยใช้ฐานข้อมูลจาก IPCC, ReCiPe และ CML2 ซึ่งระบบมีอายุการใช้งานที่ 30 y

จากผลการศึกษาพบว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากกระบวนการสร้างและติดตั้ง รองลงมาคือกระบวนการใช้งาน และการกำจัดซาก ตามลำดับ และ Lacirignola and blanc [17] ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพที่มีอายุการใช้งาน 25 y โดยใช้ฐานข้อมูล Ecoinvent data 2.2 โดยผลการศึกษาที่มีผลที่ใกล้เคียงและไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ จากผลการศึกษาของงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้น พบว่า ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ มีค่าที่ได้จากการประเมินที่ใกล้เคียงและไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยอื่น ๆ แต่เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เนื่องจากการขุดเจาะน้ำพุร้อนสำหรับประเทศไทยและของงานวิจัยนี้ เป็นการขุดเจาะระดับตื้น (ไม่เกิน 300 m) ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของต่างประเทศที่ทำการขุดเจาะระดับลึก (ในช่วง 2-3 km) จึงทำให้ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ได้ของงานวิจัยนี้ มีค่าน้อยกว่างานวิจัยต่าง ๆ เล็กน้อย แต่ทั้งนี้ ในส่วนของห้องอบแห้งพลังงานความร้อนได้พิภพ ไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม มีเพียงการสร้างและทดสอบ [5,8] จึงทำให้ในการทดสอบผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมความร้อน ไม่มีผลจากงานวิจัยใด ๆ ใช้ในการทดสอบและเปรียบเทียบ

ตารางที่ 5 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้พิภพ (หน่วยการทำงาน 1 kWh)

Environment impact	Panisa et al. [14]	Frick et al. [2]	Florian et al. [3]	Gambao et al. [15]	Marchand et al. [16]	Lacirignola and blanc [17]
CC	1.32E-02	5.66E-01	9.72E-02	5.79E+00	4.70E-02	4.98E-02
OD	1.50E-09	-	-	9.39E-05	-	-
HT	1.09E-02	-	-	-	-	-
PMF	5.91E+01	-	-	-	-	-
TA	2.94E-05	1.08E-03	1.79E-04	1.20E-02	1.95E-03	-
FE	6.29E-06	5.99E-05	2.35E-05	4.17E-01	1.68E-06	-
TET	1.76E-05	-	-	-	-	-
FET	1.84E-04	-	-	-	-	-
MD	7.82E-03	-	-	-	-	-
FD	2.20E-03	-	-	-	-	-

5. ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม มีแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

1. การลดผลกระทบที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าควร มุ่งเน้นไปที่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยการพัฒนา และปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. การลดผลกระทบที่เกิดจากการผลิตความร้อนของ ห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์ ควรคว้สตุที่ใช้ในการทำผนัง ห้อง และพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัคคลม เพื่อลด ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของ โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้ง แบบรวมศูนย์จากพลังงานความร้อนได้พิภพ มีผล การศึกษาดังต่อไปนี้

- โรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ร่วมกับห้อง อบแห้งแบบรวมศูนย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้สุทธิ 6.73 kW_e และสามารถผลิตพลังงานความร้อนได้สุทธิ 22.06 kW ที่ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้ารวมความร้อน เท่ากับ 24.97%
- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 5.60E-02 kg CO₂ eq/MJ
- การลดลงของชั้นโอโซนมีค่าเท่ากับ 2.62E-09 kg CFC-11 eq/MJ
- การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์มีค่าเท่ากับ 6.91E-01 kg 1,4-DB eq/MJ
- การเกิดภาวะก่อตัวของฝุ่นละอองหมอกควันมีค่า เท่ากับ 2.67E-04 kg PM10 eq/MJ
- การเกิดภาวะฝนกรดมีค่าเท่ากับ 8.51E-04 kg SO₂ eq/MJ
- การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชน้ำในแหล่งน้ำจืดมี ค่าเท่ากับ 2.01E-04 kg P eq/MJ
- การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อดินมีค่าเท่ากับ 4.04E-05 kg 1,4-DB eq/MJ

- การเกิดภาวะที่เป็นพิษต่อแหล่งน้ำมีค่าเท่ากับ 6.79E-03 kg 1,4-DB eq/MJ

- การลดลงของเหล็กมีค่าเท่ากับ 1.89E-01 kg Fe eq/MJ

- การลดลงของเชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าเท่ากับ 1.07E-02 kg oil eq/MJ

โดยพิจารณาแต่ละกระบวนการ พบว่า ผลกระทบที่ เกิดขึ้นสูงสุด คือ กระบวนการสร้างประมาณ 82.63% รองลงมา คือ กระบวนการกำจัดซากด้วยวิธีการฝังกลบ ประมาณ 13.22% และต่ำที่สุด คือ กระบวนการใช้งาน โดยเฉลี่ยประมาณ 4.15%

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัย แม่โจ้ ภายใต้ โครงการผลิตและพัฒนาศัคยภาพบัณฑิต ทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และโครงการ การผลิตไฟฟ้า ร่วมกับการทำความเย็นและความร้อนแบบชั้นบันได จาก พลังงานความร้อนได้พิภพในประเทศไทย กองทุนเพื่อ ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและ พลังงานปี 2560 กระทรวงพลังงาน ที่มอบทุนการ สนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

8. รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน (kW, kJ)
W	กำลังไฟฟ้า (kW)
ตัวกรีก	ความหมาย
η	ประสิทธิภาพ (%)
ตัวห้อย	ความหมาย
CLW	Clean water pump
CHP	Combined heat and power
CP	Cooling pump
e	Electricity
Exp	Expander
G	Gross power output
HS	Heat source
HW	Hot water
N	Net power output

OP	Oil pump	RP	Refrigerant pump
ORC	Organic Rankine cycle		

เอกสารอ้างอิง

- [1] Clark, C., Sullivan, J., Harto, C., Han, J., and Wang, M. Life Cycle Environmental Impacts of Geothermal Systems, PROCEEDINGS, Thirty-Seventh workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University, Stanford, California, 30 January – 1 February 1, 2012.
- [2] Frick, S., Kaltschmitt, M., and Schröder, G. Life Cycle Assessment of Geothermal Binary Power Plants Using Enhanced Low-Temperature Reservoirs, *Energy*, 2010; 35: 2281-2294.
- [3] Florian, H., Christopher, S., and Dieter, B. (2016). Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal power generation considering low-GWP working fluids, *Geothermics*, vol. 64, November 2016, pp. 392-400.
- [4] Martínez-Corona, J. I., Gibon, T., Hertwich, E., and Parra-Saldívar, R. Hybrid Life Cycle Assessment of a Geothermal Plant: From Physical to Monetary Inventory Accounting, *Journal of Cleaner Production*, 2017; 142: 2509-2523.
- [5] นัฐพร ไชยญาติ และ ชัชวาลย์ ชัยชนะ. ห้องอบแห้งพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Drying Room from Geothermal Energy). การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 8, 12-13 มีนาคม, ณ โพธิ์หวดล รัสอร์ต แอนด์ สปา เชียงราย, 2552.
- [6] สุรศักดิ์ เทียบรัตน์. การอบแห้งพริกและกระเทียมโดยใช้พลังงานความร้อนทิ้งจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, 2540.
- [7] เชิดชัย อุทธากิจ. การอบแห้งดินหอมแบ่งโดยใช้พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, 2538.
- [8] Chaayat, N., Chaichana, C., and Singharajwarapan, F.S. Geothermal Energy Potentials and Technologies in Thailand. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2014; 4: 1-9.
- [9] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2557. พลังงานความร้อนใต้พิภพ. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สารานุกรมพลังงานทดแทน, กรุงเทพมหานคร. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://ienergyguru.com/2015>
- [10] นัฐพร ไชยญาติ. การออกแบบระบบพลังงานทดแทน (Renewable Energy System Design). วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, สำนักพิมพ์: มหาวิทยาลัยแม่โจ้, พิมพ์ครั้งที่ 3, 2560.
- [11] เสริฐ สัมภักดิ์ทะกุล (2555). การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment of Products). [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/profile/Sate_Sampattagul/publication/303793131_Life_Cycle_Assessment_of_Products_karprameinwadcakrachiwitkhxngphlitphanth/links/5752ba5808ae17e65ec3924d/LifeCycleAssessmentofProductskarprameinwadcakrachiwitkhxngphlitphanth.pdf
- [12] ห้องวิจัยการออกแบบและเทคโนโลยีด้านอุณหภาพ (Thermal Design and Technology Laboratory) (2561). ระบบตรวจวัดและแสดงผลการทำงานอัจฉริยะ. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.tdetlab.com>.
- [13] Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. ReCiPe 2008: a Life Cycle Impact Assessment Method which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. First edition (version 1.08) Report I: Characterisation, 2017.

- [14] ปาณิส อ่อนดอกไม้, นัฐพร ไชยญาติ, จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, วรยมล เลิศจตุรนนท์ และสุรัตน์ เศษโพธิ์. การประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพของกิจการน้ำพุร้อนสันกำแพง อำเภอแม่ออน ตามพระราชดำริ. การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3, 24 - 25 พฤษภาคม, ณ โรงแรม ลอฟท์ มาเนีย บูติก โฮเทล, จังหวัดชุมพร, 2561.
- [15] Gamboa, M., Iribarren, D., and Dufourab, J. On the Environmental Suitability of High- and Low-Enthalpy Geothermal Systems. *Geothermics*, 2017; 53: 27–37.
- [16] Marchand, M., Blanc, I., Marquand, A., Beylot, A., Courtade, S., and Hervé Traineau, H. Life Cycle Assessment of High Temperature Geothermal Energy Systems. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, April 19-25, Melbourne, Australia, 2015.*
- [17] Lacirignola, M. and Blanc, I. Environmental Analysis of Practical Design Options for Enhanced Geothermal Systems (EGS) Through Life-Cycle Assessment. *Renewable Energy*, 2013; 50: 901-91.
- [18] ชานนท์ จันทรวงศ์. การประเมินและการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ระหว่าง โรงไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กับ โรงไฟฟ้าชีวมวลจากแกลบ, ชานอ้อย. นเรศวรวิจัย ครั้งที่ 13: วิจัยและนวัตกรรม ขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม, 20-11 กรกฎาคม, ณ อาคารเอกาทศรถ, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก, 2560.
- [19] เนตรชนากานต์ สุนันดา และเศรษฐ์ สัมภิตตะกุล. การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากขยะเทศบาลด้วยระบบวัฏจักรแรงดันอินทรีย์. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม*, 2560; 1-14.



การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัด ในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม

A Study of Relation Between Straightness and Cutting Force in Aluminium Turning

พรรณีภา พ่วงพัด* และ สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ

Pannipa Puangpad* and Somkiat Tangjitsitcharoen

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand
E-mail: pannipa.puangpad@gmail.com*, somkiat.ta@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงกับอัตราส่วนแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะกลึงชิ้นงานอะลูมิเนียม โดยติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนชุดป้อนมีดของเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัด ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงตัด และความตรงของชิ้นงาน จะถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ดังนี้คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิด และอัตราส่วนแรงตัด จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ความเร็วตัด และรัศมีงูมกมิดมากขึ้น จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความตรงที่ดีขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัด และความตรงพิจารณาได้จากสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นในโดเมนความถี่ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นที่ค่าเดียวกัน ดังนั้นอัตราส่วนแรงตัดจึงสามารถนำมาใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ในขณะตัดได้ อัตราส่วนแรงตัดถูกนำมาใช้เพื่อทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะกลึงด้วยสมการเอกซ์โพเนนเชียล วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุนามถูกประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของสมการที่ใช้ในการทำนายความตรงของชิ้นงานในขณะตัด ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากสมการพบว่าอัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด รองลงมาคือ รัศมีงูมกมิด ความลึกในการตัด ความเร็วตัด และอัตราส่วนแรงตัด ตามลำดับ และสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์โดยมีระดับความแม่นยำเท่ากับ 89.13%

ABSTRACT

The objective of this research is to study the relation between the straightness of aluminium and the cutting force ratio during the aluminium turning. The dynamometer is installed on the turret of CNC turning machine in order to monitor and obtain the cutting force. The relation between the cutting force ratio and the straightness is investigated under the cutting conditions, which are the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, the tool nose radius and the cutting force ratio. From the experimental results, when the cutting speed and the tool nose radius increase, the straightness will improve. The relation between the dynamic cutting force and the straightness profile can be verified in the frequency domain by using the Fast Fourier Transform (FFT). The results showed that the dynamic cutting force and the straightness profile appear at the same frequency. Therefore, the cutting force

ratio can be used to predict the straightness during the turning process. The relation has been proposed and model by applying the exponential function. The multiple regression analysis is utilized to calculate the powers of the model by using the least square method at 95% confident level. From the model, the feed rate was the most significant factor affecting the straightness. The model has been verified by the cutting tests that the straightness can be predicted by the high accuracy of 89.13%

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานประเภทโลหะ นอกจากกลุ่มเหล็กกล้าแล้ว ปัจจุบันได้มีการใช้อะลูมิเนียมเข้ามาทดแทน เพื่อช่วยในการลดน้ำหนักผลิตภัณฑ์ และ ชิ้นงานที่เป็นทรงกระบอกส่วนใหญ่ต้องอาศัยการกลึงในการผลิตจึงมีการนำเครื่องจักรกลที่มีความละเอียดสูงมาใช้ นั่นก็คือเครื่องจักรกลที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computerized Numerical Control Machine, CNC) และในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตต้องการชิ้นงานที่มีความถูกต้อง แม่นยำของรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความตรงของชิ้นงานที่มีผลต่อความถูกต้อง และการประกอบชิ้นส่วนชิ้นงานในขั้นตอนถัดไป [1]

ในโลกของการแข่งขันที่สูงขึ้น โรงงานการผลิตต้องปรับตัวให้ตอบสนองอย่างทันทั่วถึง เมื่อมีเงื่อนไขการผลิตที่แตกต่างกันเข้ามา การพิจารณาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขและอัตราส่วนแรงตัด จึงถูกนำมาพิจารณา เพื่อให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด รวมไปถึงการลดต้นทุนและเวลาในการผลิตด้วย ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม นั้นถือว่าเป็นประโยชน์สามารถหาความสัมพันธ์ความตรงของชิ้นงานจากแรงตัดในขณะตัด และเงื่อนไขการตัดได้ ส่งผลต่อการผลิตชิ้นงาน ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึงเหล็กกล้า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดและความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน จะถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด รัศมีงูมกมิด และมุมคายเศษโลหะ จนสามารถสร้างสมการทำนายความตรงของชิ้นงานได้ในขณะตัดโดยใช้อัตราส่วนแรงตัดเมื่อเงื่อนไขการตัดจะ

เปลี่ยนไป จากงานวิจัยพบว่าแรงป้อนตัดสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ค่าความตรงของชิ้นงานได้ เนื่องจากแรงป้อนตัดเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดรอยป้อนตัด (feed mark) ขึ้นบนผิวชิ้นงานซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าของความตรงของชิ้นงาน [2] และได้มีงานวิจัยอื่น ๆ [3], [4] ที่ได้มีการพัฒนาการตรวจสอบความตรงและความขรุขระของชิ้นงานด้วยวิธีการต่าง ๆ กันไป โดยใช้แรงตัดในการหาความสัมพันธ์พร้อมกับพิจารณาเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน ซึ่งได้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันตามปัจจัยดังต่อไปนี้

1) ความเร็วตัด

ถ้าความเร็วตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิในขณะตัดสูง ชิ้นงานจะอ่อน ทำให้แรงในขณะตัดน้อยลง ตัดได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานลดลง นั่นคือชิ้นงานจะมีความตรงมากขึ้น

2) ความลึกในการตัด

ถ้าความลึกในการตัดในการตัดเพิ่ม พื้นที่การตัดจะเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้แรงตัดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น ความตรงชิ้นงานจึงลดลง

3) รัศมีงูมกมิดตัด

ถ้าใช้มีดตัดที่มีรัศมีงูมกมิดตัดใหญ่ สามารถช่วยลบรอยป้อนตัดที่ตกค้างบนผิวชิ้นงาน ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานจะมีค่าลดลงทำให้ความตรงผิวชิ้นงานดีขึ้น

4) อัตราการป้อนตัด

ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนตัด พื้นที่การตัดจะมากขึ้น แรงตัดจะสูงขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัด ค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์สูง ความตรงของชิ้นงานจะลดลง

5) มุมคายเศษวัสดุ

ถ้ามุมคายเศษวัสดุมาก จะทำให้เศษโลหะที่เกิดขึ้นในขณะตัดเคลื่อนที่ออกได้ง่าย ความต้านทานการเคลื่อนที่

ของมีดตัดและเศษโลหะตกลง ดังนั้นแรงตัดที่เกิดขึ้น ในขณะที่ตัดจึงลดลง ค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์จะต่ำ ความตรงของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้แสดงให้เห็นว่าความตรงของชิ้นงานมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งมีทั้งปัจจัยที่สามารถควบคุมได้คือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด ชนิดวัสดุของมีด รัศมีงูมมีด ชนิดของวัสดุ ขนาดของชิ้นงาน ลักษณะเศษโลหะ เป็นต้น นอกเหนือปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ยังมีปัจจัยที่เกิดขึ้นขณะตัดซึ่งไม่สามารถควบคุมได้เช่น การสั่นสะเทือน อุณหภูมิ เสียง แต่สามารถใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์มาช่วยในการตรวจติดตามวัดแรงในขณะที่ตัดได้ นั่นก็คือไดนาโมมิเตอร์นั่นเองซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดแรงที่ใช้ในเครื่องจักรกลอัจฉริยะ [5]

งานวิจัยที่ศึกษาความสัมพันธ์ของความตรงกับแรงตัดส่วนใหญ่จะวิจัยจากชิ้นงานเหล็กกล้า แต่ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตได้ปรับเปลี่ยนมาใช้อะลูมิเนียมมากขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จึงต้องนำมาพิจารณาว่าถ้าชิ้นงานเป็นอะลูมิเนียม ความสัมพันธ์ต่าง ๆ จะสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาหรือไม่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ใช้เซนเซอร์เพื่อวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่กลึงโดยใช้การเก็บค่าสัญญาณผ่านเครื่องออสซิลอสโคป เพื่อนำมาอธิบายความสัมพันธ์ความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมกับแรงตัดที่เกิดขึ้นนั่นเอง

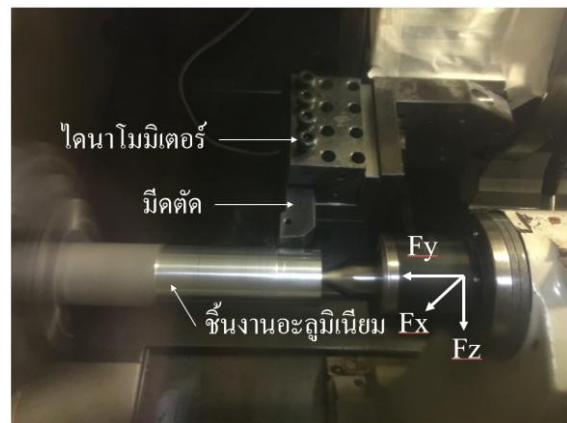
2. วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงของชิ้นงานอะลูมิเนียมกับอัตราส่วนแรงตัด รวมถึงเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ จนสามารถสร้างสมการทำนายความตรงผิวชิ้นงานเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้

2.1 รูปแบบการทดลอง

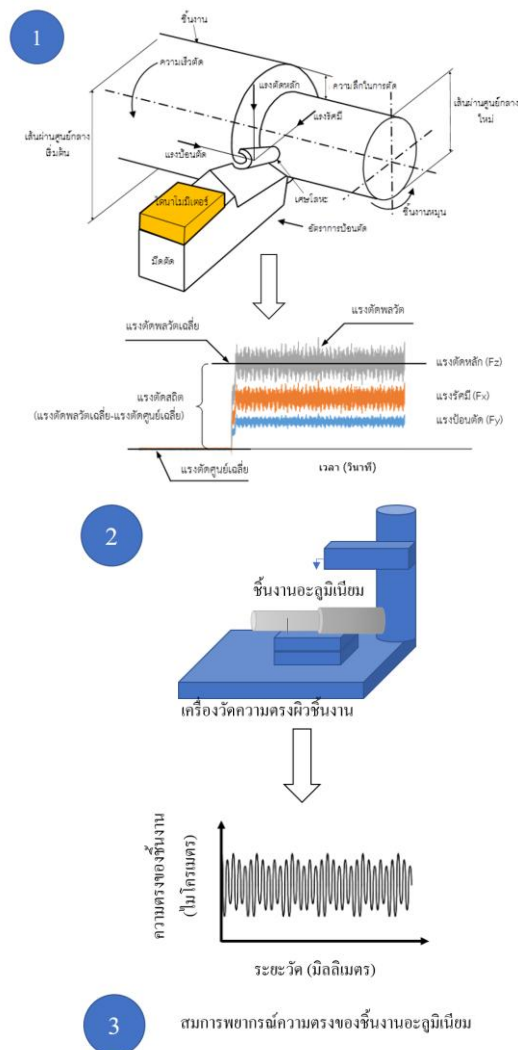
งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine) ชนิด 4 แกนยี่ห้อ Mazak รุ่น Nexus 200MY/MSY ที่ติดเซนเซอร์วัดแรงหรือไดนาโมมิเตอร์

ในการตรวจติดตามและประมาณค่าความตรงของผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมเกรด 6063 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และทำการปอกผิวชิ้นงานให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 49.8 – 50.2 มิลลิเมตร และทำการตัดด้วยมีดมีด (Insert) การ์ไบด์เคลือบผิวยี่ห้อ Kyocera มีรหัสมีดมีด 2 รหัสคือ TPMR 160304HQ ที่มีรัศมีงูมมีดขนาด 0.4 มิลลิเมตร และรหัส TPMR 160308HQ ที่มีรัศมีงูมมีดขนาด 0.8 มิลลิเมตร โดยทั้ง 2 มีดมีดมีมุมคายเศษโลหะ 11 องศา เป็นบวกตามคำแนะนำของผู้ผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องกลึงซีเอ็นซี

การทำการทดลองนี้เพื่อที่จะสามารถสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ความตรงของผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมในขณะที่ตัดได้ โดยต้องทดสอบกับเงื่อนไขการตัดที่หลากหลายเพื่อต้องการการจัดเก็บข้อมูลที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด ความลึกในการตัด รัศมีงูมมีด และอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งมีกรอบแนวคิดงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดงานวิจัย

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

การกำหนดเงื่อนไขในการตัดที่เกี่ยวกับการเลือกใช้ความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อนตัด (Feed Rate) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และมุมคายเศษวัสดุ (Rack Angle) ต้องมีความถูกต้องและเหมาะสม เพื่อให้กระบวนการตัดเนื้อมีประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของมีดตัด ดังนั้นในการเลือกปัจจัยและระดับปัจจัยต่าง ๆ จึงได้มีการพิจารณาดังต่อไปนี้คือ

1) ความเร็วตัด (v) ได้กำหนดระดับปัจจัย 3 ระดับ คือ 150 200 และ 250 เมตรต่อนาทีเป็นค่าความเร็วตัดที่อยู่ในช่วง 70 - 290 เมตรต่อนาที ซึ่งเป็นช่วงความเร็วตัดที่ใช้สำหรับมีดคมคาร์ไบด์เคลือบผิว และเนื่องจากวัสดุ

ประเภทอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติความแข็งแรง และจุดหลอมเหลวต่ำ ส่งผลให้มีความอ่อนตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนจากการตัด ถ้าใช้ความเร็วในการตัดที่สูงเกินไป อุณหภูมิในการตัดจะสูงตามไปด้วย ส่งผลทำให้เกิดเศษโลหะหลอมติดกับมีดมีด และทำให้ผิวสำเร็จชิ้นงานมีรอยที่เกิดจากเศษโลหะ ทำให้ค่าความตรงชิ้นงานต่ำ

2) อัตราการป้อนตัด (f) ได้กำหนดระดับปัจจัย 3 ระดับคือ 0.10 0.125 และ 0.150 มิลลิเมตรต่อรอบ เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นและการศึกษาความรู้เชิงทฤษฎีพบว่าถ้าอัตราการป้อนตัดต่ำ จะทำให้ผิวชิ้นงานมีค่าความตรงสูง และระดับปัจจัยของอัตราการป้อนตัดก็อยู่ในช่วงอัตราการป้อนตัดที่ผู้ผลิตมีดมีดได้แนะนำอีกด้วย ซึ่งมีช่วงอัตราการป้อนตัด 0.08 - 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ

3) ความลึกตัด (D) ได้กำหนดระดับปัจจัย 3 ระดับคือ 0.10 0.20 และ 0.30 มิลลิเมตร การใช้ความลึกตัดที่น้อยส่งผลให้ได้ผิวชิ้นงานมีค่าความตรงสูงกว่าการใช้ความลึกตัดมาก แต่ไม่ควรใช้ความลึกตัดที่น้อยเกินไป เพราะจะถูกอิทธิพลของรัศมีงูมกดมาดบัง

4) รัศมีงูมกด (Rn) ได้กำหนดระดับปัจจัยที่ 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของรัศมีงูมกดที่ส่งผลต่อความตรงของชิ้นงาน ถ้ารัศมีงูมกดมากจะส่งผลให้ชิ้นงานมีคุณภาพผิวที่ดี แต่ถ้าหากรัศมีงูมกดมีค่ามากเกินไป จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนในขณะตัด ส่งผลให้คุณภาพผิวชิ้นงานไม่ดี

นอกจากนี้ยังมีมุมคายเศษโลหะบวกและลบซึ่งปัจจัยต่อคุณภาพชิ้นงานอีกด้วย แต่ในงานวิจัยนี้จะกำหนดมุมคายเศษโลหะเป็นบวกเท่านั้น เพราะจากทฤษฎีมุมคายเศษโลหะที่เป็นบวก จะช่วยให้เศษโลหะไหลออกดีทำให้เศษโลหะไม่พันกับชิ้นงานและมีดตัด ทำให้ไม่เกิดรอยที่เกิดจากเศษโลหะที่ชิ้นงาน และมุมคายเศษโลหะที่เป็นมุมบวกทำให้มุมระนาบเนื้อมีเพิ่มขึ้น ระนาบเนื้อมีลดลง ทำให้ลดแรงในการตัดได้ ทำให้คุณภาพผิวสำเร็จของชิ้นงานดี

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการตัด

ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
ความเร็วตัด (v)	150	200	250	เมตร ต่อนาที
อัตราป้อนตัด (f)	0.100	0.125	0.150	มิลลิเมตร ต่อรอบ
ความลึกตัด (D)	0.10	0.20	0.30	มิลลิเมตร
รัศมีจุมกมิด (R_n)	0.4	0.8	-	มิลลิเมตร

การทดลองประกอบไปด้วยปัจจัย 4 ปัจจัยคือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด และรัศมีจุมกมิด แต่ละปัจจัยมีระดับปัจจัย 3 ระดับ ยกเว้นรัศมีจุมกมิด มีระดับปัจจัย 2 ระดับ จะได้รับการทดลองทั้งหมด 54 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด

Order	V	f	D	R_n
1	150	0.1	0.1	0.4
2	150	0.1	0.1	0.8
3	150	0.1	0.2	0.4
4	150	0.1	0.2	0.8
5	150	0.1	0.3	0.4
6	150	0.1	0.3	0.8
7	150	0.125	0.1	0.4
8	150	0.125	0.1	0.8
9	150	0.125	0.2	0.4
10	150	0.125	0.2	0.8
11	150	0.125	0.3	0.4
12	150	0.125	0.3	0.8
13	150	0.15	0.1	0.4
14	150	0.15	0.1	0.8
15	150	0.15	0.2	0.4
16	150	0.15	0.2	0.8
17	150	0.15	0.3	0.4
18	150	0.15	0.3	0.8
19	200	0.1	0.1	0.4
20	200	0.1	0.1	0.8
21	200	0.1	0.2	0.4

ตารางที่ 2 (ต่อ) เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด

Order	V	f	D	R_n
22	200	0.1	0.2	0.8
23	200	0.1	0.3	0.4
24	200	0.1	0.3	0.8
25	200	0.125	0.1	0.4
26	200	0.125	0.1	0.8
27	200	0.125	0.2	0.4
28	200	0.125	0.2	0.8
29	200	0.125	0.3	0.4
30	200	0.125	0.3	0.8
31	200	0.15	0.1	0.4
32	200	0.15	0.1	0.8
33	200	0.15	0.2	0.4
34	200	0.15	0.2	0.8
35	200	0.15	0.3	0.4
36	200	0.15	0.3	0.8
37	250	0.1	0.1	0.4
38	250	0.1	0.1	0.8
39	250	0.1	0.2	0.4
40	250	0.1	0.2	0.8
41	250	0.1	0.3	0.4
42	250	0.1	0.3	0.8
43	250	0.125	0.1	0.4
44	250	0.125	0.1	0.8
45	250	0.125	0.2	0.4
46	250	0.125	0.2	0.8
47	250	0.125	0.3	0.4
48	250	0.125	0.3	0.8
49	250	0.15	0.1	0.4
50	250	0.15	0.1	0.8
51	250	0.15	0.2	0.4
52	250	0.15	0.2	0.8
53	250	0.15	0.3	0.4
54	250	0.15	0.3	0.8

2.3 วิธีการทดลอง

เงื่อนไขการทดลองทั้งหมดนี้จะถูกทำการทดลองดังขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) เตรียมชิ้นงานอะลูมิเนียมทรงกระบอกโดยการทำขั้นศูนย์ที่ตัวชิ้นงาน เพื่อที่จะติดตั้งกับเครื่องกลึงซีเอ็นซีได้
- 2) เปิดเครื่องกลึงซีเอ็นซี พร้อมตรวจสอบว่าลัวแรงดัน

3) นำไดนาโมมิเตอร์ติดตั้งเข้ากับชุดป้อมมิคของเครื่องกลึงซีเอ็นซี และต่อสายสัญญาณของไดนาโมมิเตอร์เข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ

4) นำสายสัญญาณของเครื่องออสซิลโลสโคปต่อเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณซึ่งมีทั้งหมด 3 เส้นคือเส้นของแรงในแนวรัศมี (F_x) เส้นของแรงป้อนตัด (F_y) และเส้นของแรงตัดหลัก (F_z)

5) เปิดเครื่องขยายสัญญาณ รวมทั้งเปิดและตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคปที่ Low-Pass Filter 500 Hz Sampling Rate 1 Ks/s และ Record Length 10 K

6) ติดตั้งชิ้นงานอะลูมิเนียมทรงกระบอกกับหัวจับชิ้นงาน (Chuck) ที่ระยะจับ 100 มิลลิเมตร พร้อมทั้งยื่นศูนย์ชิ้นงาน เพื่อไม่ให้ชิ้นงานสั่นสะเทือนขณะตัด

7) กลึงปอกผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมเพื่อเตรียมผิวชิ้นงานที่มีความยาว 130 มิลลิเมตร

8) กลึงชิ้นงานตามเงื่อนไขตารางที่ 2 โดยกลึงความยาว 30 มิลลิเมตรต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง

9) บันทึกแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดผ่านเครื่องออสซิลโลสโคปในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ไดนาโมมิเตอร์จะส่งสัญญาณแรงตัดพลวัตไปยังเครื่องขยายสัญญาณเพื่อทำการขยายสัญญาณแรงตัด และเก็บข้อมูลที่ 10,000 ค่าต่อวินาที

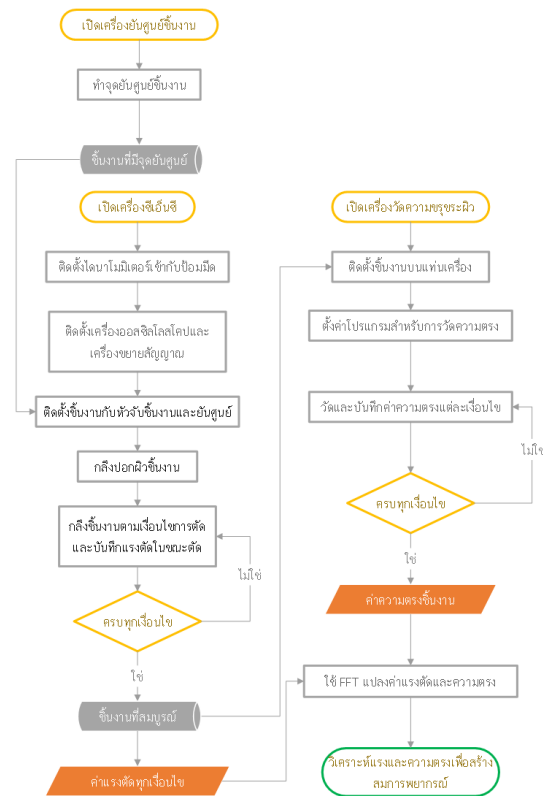
10) สังเกตลักษณะของผิวชิ้นงานหลังการตัด ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของเม็ดมีดพร้อมบันทึกผล และเก็บตัวอย่างเศษโลหะที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

11) ใช้เครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงานยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-400 วัดค่าความตรงของชิ้นงาน ตั้งค่าระยะการลากหัวเข็มเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการลากเข็ม 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และอัตราการสุ่มเท่ากับ 400 ข้อมูลต่อวินาที โดยวัดแบบทำซ้ำ 3 ครั้งต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง

12) ใช้การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) เพื่อแปลงข้อมูลในโดเมนของเวลา (Time domain) ให้อยู่ในโดเมนของความถี่ (Frequency domain) เพื่อนำไปสู่วิเคราะห์สัญญาณ

แรงตัดที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ และความตรงของชิ้นงานที่ได้จากเครื่องวัดความขรุขระชิ้นงาน

ซึ่งขั้นตอนการทดลองที่กล่าวมาสามารถแสดงได้ดังแผนผังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง

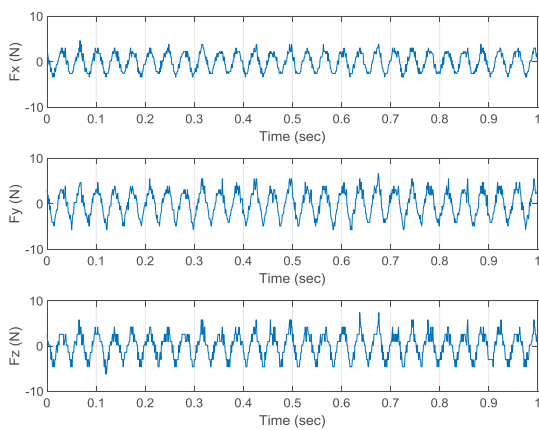
3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองตามเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 54 เงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 2 สามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณแรงตัดที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ และความตรงของชิ้นงานที่ได้จากเครื่องวัดความขรุขระชิ้นงานได้ดังนี้

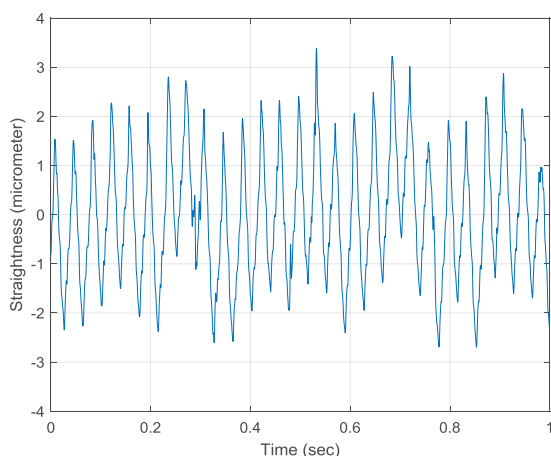
3.1 การวิเคราะห์ความตรงผิวชิ้นงาน และสัญญาณแรงตัดพลวัตโดยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงตัดกับความตรงผิวชิ้นงานจะถูกอธิบายได้โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ของแรงตัดพลวัตและความตรงผิวชิ้นงาน โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier

Transform: FFT) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่แปลงข้อมูลสัญญาณในโดเมนเวลา (Time Domain) ให้เป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลในโดเมนความถี่จะสามารถแยกความถี่ที่อยู่บนโดเมนเวลาให้อยู่บนกราฟโดเมนความถี่ได้ เมื่อนำข้อมูลสัญญาณมาพล็อตเทียบกับเวลา ข้อมูลจะเป็นคลื่นไซน์ (Sine wave) ส่งผลทำให้การประมวลผลข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังแสดงในตัวอย่างเงื่อนไขการตัดที่ความเร็วตัด 250 เมตรต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.1 มิลลิเมตร และรัศมีงูมมิด 0.4 มิลลิเมตร

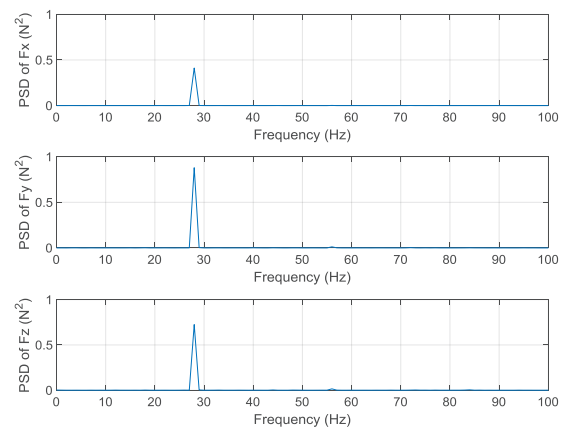


รูปที่ 4 แรงตัดในโดเมนเวลา

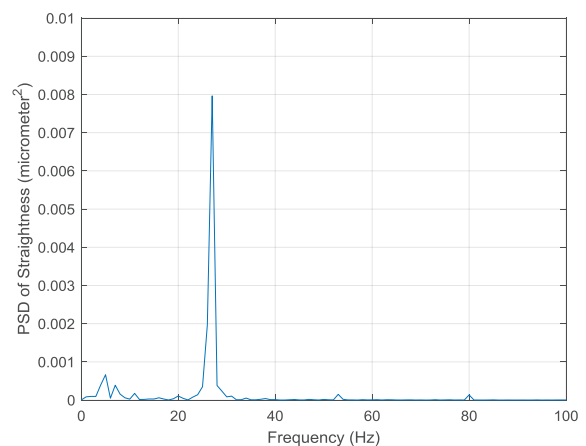


รูปที่ 5 ความตรงของชิ้นงานในโดเมนเวลา

จากรูปที่ 4 และ 5 เป็นการวิเคราะห์ในโดเมนเวลาของสัญญาณแรงตัดพลวัตกับความตรงของชิ้นงานที่มีจำนวนลูกคลื่นที่สอดคล้องกัน ในระยะเวลาอ้างอิงที่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณทั้งสองน่าจะมีค่าความถี่ที่สอดคล้องกัน จึงได้นำข้อมูลทั้งสองมาทำการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่เพื่อแยกสัญญาณที่เกิดขึ้นด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว พบว่าการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ของสัญญาณแรงตัดพลวัตและความตรงของชิ้นงานเกิดขึ้นที่ความถี่ตรงกันที่ 27 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 6 และ 7 จึงสามารถกล่าวได้ว่าความตรงของชิ้นงานกับสัญญาณแรงตัดพลวัตที่เกิดขึ้นในขณะตัดมีความสัมพันธ์กัน



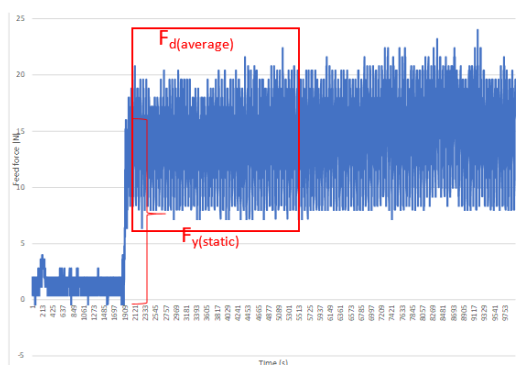
รูปที่ 6 แรงตัดในโดเมนความถี่



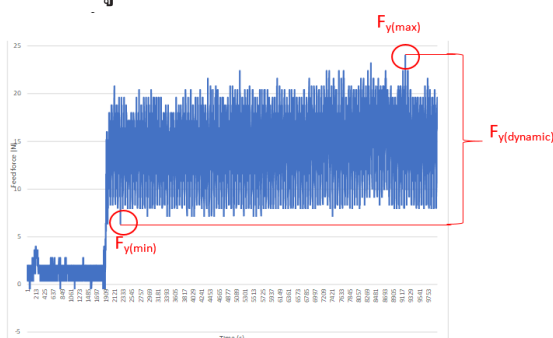
รูปที่ 7 ความตรงของชิ้นงานในโดเมนความถี่

เนื่องจากความตรงชิ้นงานและสัญญาณแรงตัดพลวัตในโดเมนความถี่ที่เกิดขึ้นในขณะตัดมีความสัมพันธ์กัน

จึงสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลาเพื่อนำมา
คำนวณอัตราส่วนแรงตัดจากสัญญาณแรงตัด โดยการ
คำนวณแรงตัดในโดเมนเวลาจะพิจารณาจากผลต่างของ
ค่าแรงป้อนตัดพลวัตที่มากที่สุด ($F_y(\max)$) กับค่าแรง
ป้อนตัดพลวัตที่น้อยที่สุด ($F_y(\min)$) ซึ่งมีความสัมพันธ์
กับความตรงขึ้นงานเบี่ยงเบนจากศูนย์ที่สูงที่สุด ($\max$)
กับค่าที่น้อยที่สุด ($\min$) โดยวิธีการคำนวณแรงตัดเพื่อหา
อัตราส่วนแรงตัดดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 การคำนวณแรงป้อนตัดสถิต



รูปที่ 9 การคำนวณแรงป้อนตัดพลวัต

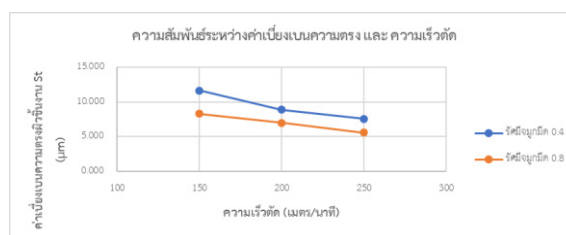
แต่แรงคดพลวัตอาจแปรผันไปตามเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ดังนั้นอัตราส่วนแรงคดคดพลวัตและแรงป้อนคดคด จึงนำมาใช้เพื่อประมาณค่าความตรงของชิ้นงาน โดยพิจารณาได้ว่าอัตราส่วนแรงคดคดสามารถคำนวณความตรงของชิ้นงานได้โดยไม่แปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการตัด ทำให้สามารถทำนายความตรงของชิ้นงานได้เมื่อเงื่อนไขการตัดเปลี่ยนแปลงดังแสดงในสมการ

$$\text{อัตราส่วนแรงตัด} = \left(\frac{F_{y(\max)} - F_{y(\min)}}{F_{y(s)}} \right) \quad (1)$$

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ความตรงขึ้นงาน และเงื่อนไขการตัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของ
ชิ้นงาน ที่ได้รับอิทธิพลจากเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ
ประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัด และ
รัศมีงมกมิด แสดงได้ดังต่อไปนี้

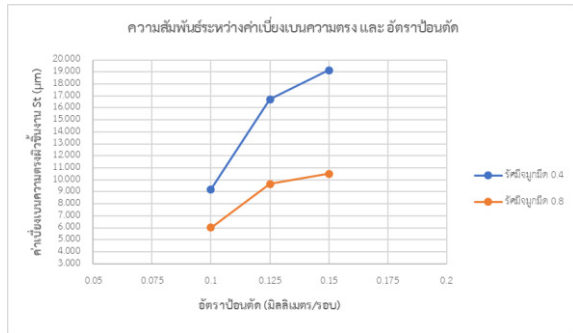
1) ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเปี่ยงเบนศูนย์
ของชิ้นงานและความเร็วตัด



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของ
 จินงานกับความเร็วตัดต่าง ๆ ที่อัตราป้อนตัด 0.125
 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุก
 มีด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความ
ตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและความเร็วตัดที่เงื่อนไข
ความเร็วตัดต่าง ๆ อัตราป้อนตัด 0.125 มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกตัด 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมีด 0.4 และ 0.8
มิลลิเมตร เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นความตรงเบี่ยงเบนศูนย์
ของชิ้นงานจะลดลง แสดงว่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของ
ชิ้นงานและความเร็วตัดมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกัน
ข้าม ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มดีขึ้น เนื่องจาก
ความเร็วตัดที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้อุณหภูมิในขณะตัด
สูงขึ้น ชิ้นงานจะมีความร้อน และจะอ่อนตัวลง ทำให้ง่าย
ต่อการตัด แร่งที่ใช้ในการตัดจึงน้อยลง

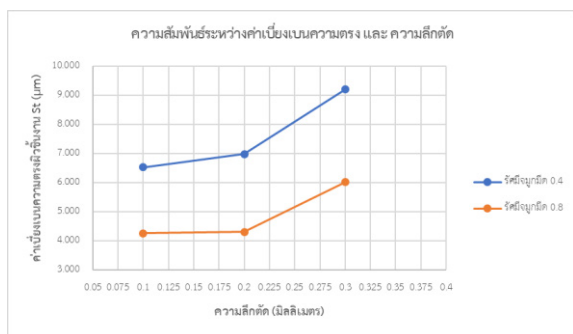
2) ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์
ของเงินงานและอัตราป้อนตัด



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร โดยความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานกับอัตราป้อนตัดมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัด ค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าความตรงของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง

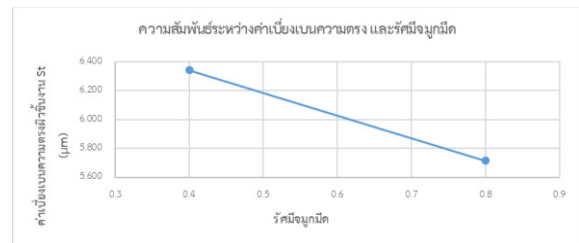
3) ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและความลึกตัด



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานกับความลึกตัดต่าง ๆ ที่ความเร็วตัด 200 มิลลิเมตรต่อรอบ อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร และรัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและความลึกตัดต่าง ๆ พบว่าถ้าความลึกตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นได้ว่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและความลึกตัดมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ความลึกตัดที่มีค่าสูงขึ้น จะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในขณะตัด เพราะพื้นที่ในการตัดเพิ่มมากขึ้น แรงตัดจึงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ชิ้นงานที่ได้จึงมีแนวโน้มของความตรงของชิ้นงานลดลง

4) ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและรัศมีจุกมิด



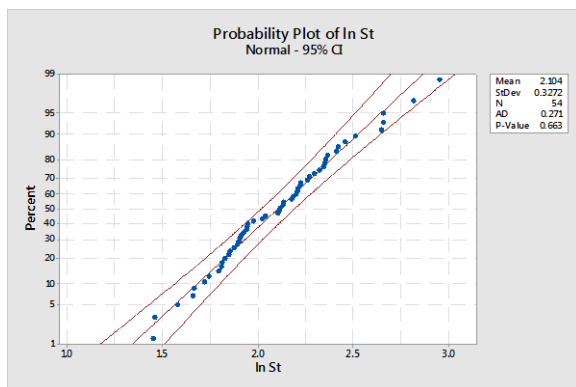
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานกับรัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 ที่ความเร็วตัด 150 มิลลิเมตรต่อรอบ อัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตร และความลึกตัด 0.1 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและรัศมีจุกมิด 0.4 และ 0.8 พบว่ารัศมีจุกมิด 0.8 ทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานต่ำกว่ารัศมีจุกมิด 0.4 จึงสามารถสรุปได้ว่าถ้ารัศมีจุกมิดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง นั่นคือผิวชิ้นงานจะดีขึ้น

3.3 การสร้างสมการทำนายความตรงผิวชิ้นงาน

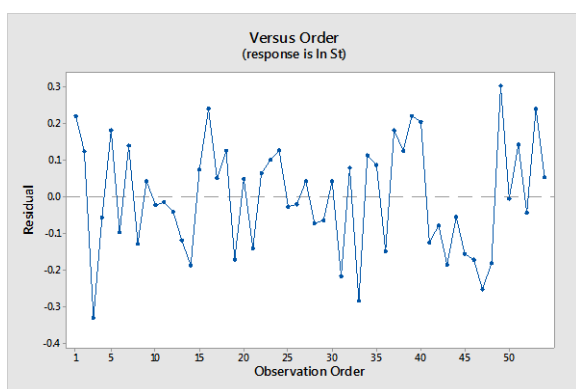
จากการทดลอง และการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความตรงชิ้นงานกับอัตราส่วนแรงตัด และเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ สามารถสร้างสมการทำนายความตรงผิวชิ้นงานได้ โดยต้องทดสอบข้อมูลด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับ

สมการ โดยจะมีการทดสอบสมมติฐานดังต่อไปนี้คือ การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความมีเสถียรภาพความแปรปรวน โดยแสดงผลได้ดังนี้



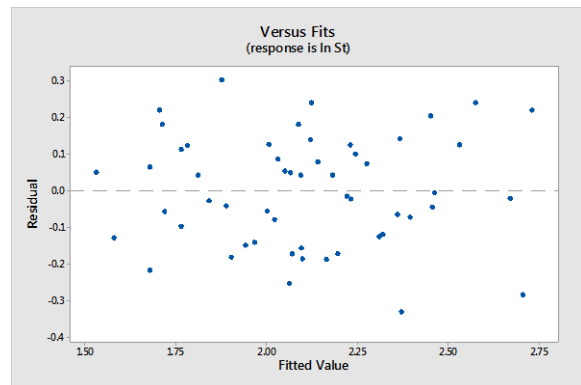
รูปที่ 14 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

จากรูปที่ 14 แสดงการทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูล พบว่ากราฟความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน มีลักษณะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.663 และมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นผลการทดสอบสมมติฐานจึงสรุปได้ว่าข้อมูลความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 15 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากรูปที่ 15 แสดงกราฟ Residual versus Order ของความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนและลำดับการทดลอง มีลักษณะกระจายตัวไม่มีแนวโน้มเป็นรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ดังนั้นข้อมูลความตรงเบี่ยงเบนศูนย์มีความเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 16 การทดสอบความมีเสถียรภาพความแปรปรวน

จากรูปที่ 16 แสดงกราฟ Residual versus Fits ของความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน โดยข้อมูลกระจายตัวรอบศูนย์ใกล้เคียงกัน และไม่มีแนวโน้ม ดังนั้นความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง

ดังนั้นจึงสามารถสร้างสมการทำนายค่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน ที่มีตัวแปรคือความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความลึกในการตัด รัศมีงูมมิด และอัตราส่วนแรงตัด โดยผ่านการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) และประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของการถดถอยด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) [6] , [7] โดยจะได้สมการดังนี้

$$S_t = 329.3101 \cdot V^{-0.2670} \cdot F^{0.9780} \cdot D^{0.2883} \cdot R_n^{-0.3926} \cdot \frac{F_y(\max) - F_y(\min)}{F_y(s)}^{0.2234} \quad (2)$$

โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานและตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ความเร็วตัด (V) มีสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นลบ แสดงได้ว่าความเร็วตัด และความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานแปรผกผันกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น จะเกิดความร้อนทำให้วัสดุชิ้นงานอ่อน ทำให้ตัดได้ง่าย และใช้แรงตัดลดลง ทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานลดลง หรือผิวชิ้นงานมีความตรงมากขึ้น
2. อัตราป้อนตัด (F) มีสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นบวก แสดงว่าอัตราป้อนตัด และความตรงเบี่ยงเบนศูนย์

ของชิ้นงานแปรผันตรงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราป้อนตัดเพิ่มขึ้น จะใช้แรงตัดมาก ทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมากขึ้น หรือผิวชิ้นงานมีความตรงน้อยลง

3. ความลึกในการตัด (D) มีสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นบวก แสดงว่าความลึกในการตัด และความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานแปรผันตรงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อความลึกในการตัดเพิ่ม ทำให้พื้นที่ในการตัดลึกมากขึ้น ต้องใช้แรงในการตัดมาก ทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมากขึ้น หรือผิวชิ้นงานมีความตรงน้อยลง

4. รัศมีงูมมิด (R_n) มีสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นลบ แสดงว่ารัศมีงูมมิด และความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานแปรผกผันกัน ซึ่งอธิบายได้ว่ารัศมีงูมมิด ขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง หรือมีความเรียบมากขึ้นนั่นเอง ซึ่งอธิบายได้ว่าถ้ารัศมีงูมมิดขนาดใหญ่ จะลดรอยป้อนตัดได้ ทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานลดลง หรือผิวชิ้นงานมีความตรงมากขึ้น

5. อัตราส่วนแรงตัด ($\frac{F_y(\max)-F_y(\min)}{F_y(s)}$) มีสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นบวก แสดงว่าอัตราส่วนแรงตัด และความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานแปรผันตรงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมากขึ้น หรือผิวชิ้นงานมีความตรงน้อยลง

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรแต่ละตัวจะเห็นได้ว่าอัตราป้อนตัดมีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมากที่สุด ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมากที่สุดก็คืออัตราป้อนตัด รองลงมาคือรัศมีงูมมิด ความลึกในการตัด ความเร็วตัด และอัตราส่วนแรงตัด ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้า

3.4 การทดสอบความแม่นยำของสมการ

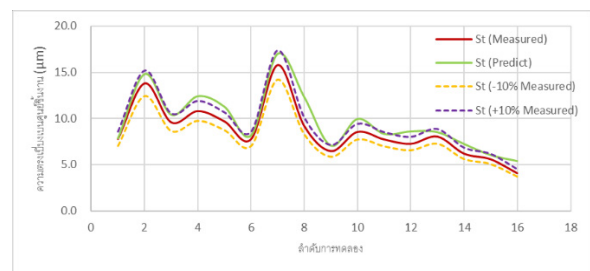
เพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของการทำนายความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน จึงทำให้ต้องมีการทดสอบความแม่นยำของสมการเกิดขึ้น ซึ่งได้อุปกรณ์

วัสดุชิ้นงานเหมือนเดิม เพียงแต่ทำการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบความแม่นยำของสมการเพิ่มเติมดังนี้

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการทดสอบความแม่นยำของสมการ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย
ความเร็วตัด (v)	180	260	เมตรต่อนาที
อัตราป้อนตัด (f)	0.1	0.15	มิลลิเมตรต่อรอบ
ความลึกตัด (D)	0.1	0.3	มิลลิเมตร
รัศมีงูมมิด (R_n)	0.4	0.8	มิลลิเมตร

จากผลการทดลองค่าเบี่ยงเบนความตรงของชิ้นงาน (St) ที่ได้จากเครื่องวัดความขรุขระผิวชิ้นงาน และค่าที่ได้จากสมการการทำนายค่าเบี่ยงเบนความตรงของชิ้นงานนั้น มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน มีบางเงื่อนไขที่มีค่าแตกต่างออกไป ดังแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 17 กราฟการทดสอบความแม่นยำของสมการความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน

โดยสามารถคำนวณผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายความตรงผิวชิ้นงานได้ที่ 10.87% นั่นก็คือ สมการทำนายความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานจะมีค่าความแม่นยำเท่ากับ 89.13% ซึ่งถือว่าสมการสามารถทำนายความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน กับแรงตัด ในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม ได้ว่าแรงตัดแบบพลวัต

มีความสัมพันธ์กันกับความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงาน ทั้งใน โดเมนเวลาและโดเมนความถี่ และสามารถอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ในเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ได้ว่าเมื่อใช้ความเร็วตัดสูง และรัศมีงูมกมิดมาก แต่อัตราป้อนตัด และความลึกในการตัดต่ำ จะส่งผลให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานมีค่าลดลง ทำให้อะลูมิเนียมมีผิวชิ้นงานที่ดีขึ้น และจากสมการทำนายความตรงผิวชิ้นงานสามารถระบุได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความตรงเบี่ยงเบนของชิ้นงานมากที่สุดก็คือ อัตราป้อนตัด ส่วนปัจจัยอื่น ๆ คือ รัศมีงูมกมิด ความลึกในการตัด ความเร็วตัด และอัตราส่วนแรงตัด เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความตรงเบี่ยงเบนของชิ้นงานรองลงมาตามลำดับ และได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของสมการโดยสร้างเงื่อนไขใหม่ขึ้น พบว่าสมการทำนายความตรงเบี่ยงเบนของชิ้นงานมีความแม่นยำถึง 89.13%

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมานั้น เมื่อเปรียบเทียบกับ วัสดุชนิดเหล็กกล้าจะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์ต่าง ๆ มีความสอดคล้องกันกับการใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 18

งานวิจัย	วัสดุชิ้นงาน	เงื่อนไขการตัด					ผลการวิจัย
		V	F	D	Rn	Y	
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดในกระบวนการกลึงของอลูมิเนียม	อลูมิเนียม (A6063)	150	0.1	0.1	0.4	+11	- อัตราป้อนตัด เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด
		200	0.125	0.2	0.8		- การเพิ่มความเร็วตัด รัศมีงูมกมิด และลดอัตราป้อนตัด กับความลึกให้ได้อะลูมิเนียมจะช่วยให้ความตรงเบี่ยงเบนศูนย์ของชิ้นงานลดลง ทำให้ได้ความตรงชิ้นงานมากขึ้น
		250	0.15	0.3			
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึง	เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S455	100	0.15	0.4	0.4	-6	- อัตราการป้อนตัด และอัตราส่วนแรงตัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด
		150	0.2	0.6	0.8	+11	- ความตรงของชิ้นงานขึ้นเมื่อได้ความเร็วตัด รัศมีงูมกมิด และมุมคายเศษโลหะ
		200	0.25	0.8			- ความเค้นโลหะมีค่ามาก ส่วนอัตราส่วนแรงตัด อัตราป้อนตัด ความลึกตัดน้อย
การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความละเอียดของชิ้นงานในกระบวนการกลึงเชิงอัตโนมัติด้วยการแปลงเวกเตอร์	เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S455	100	0.15	0.4	0.4	-6	- อัตราป้อนตัด มีอิทธิพลต่อค่าความตรงของชิ้นงานมากที่สุด เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดพบว่าความตรงเบี่ยงเบนศูนย์มีค่ามากขึ้น
		150	0.2	0.6	0.8	+11	- การเพิ่มความเร็วตัด รัศมีงูมกมิด และมุมคายเศษโลหะ ในขณะที่ยังรักษาอัตราการป้อนตัด และความลึกตัดที่น้อยๆ ความตรงของชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่ดีขึ้น
		200	0.25	0.8			- อัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัต มีอิทธิพลต่อความกลมมากที่สุด เมื่ออัตราส่วนค่าเฉลี่ยความแปรปรวนแรงตัดพลวัตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกลมที่ได้ดีขึ้น
การพยากรณ์การรวมการสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานในการกลึงของอลูมิเนียม	อลูมิเนียม (A6063)	150	0.1	0.1	0.4	+11	- อัตราป้อนตัดมีอิทธิพลต่อความขรุขระผิวเฉลี่ย (Ra) และความขรุขระผิวสูงสุด (Rz) มากที่สุด
		200	0.125	0.2	0.8		- ความขรุขระผิวเฉลี่ยและค่าขรุขระผิวสูงสุด จะมีค่าลดลงเมื่อใช้อัตราป้อนตัด และความเร็วในการตัดต่ำ ในขณะที่ได้ความเร็วตัดและรัศมีงูมกมิดมาก
		250	0.15	0.3			

รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลการวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีขนาดเล็กและต้องการความตรงของชิ้นงานเพื่อการประกอบในกระบวนการถัดไปได้ ชิ้นงานที่ได้จะมีคุณภาพชิ้นงานที่ตรงตามแบบที่ระบุไว้สามารถลดอัตราของเสียในการผลิต ลดเวลาและต้นทุนในการผลิตเมื่อไม่มีของเสียในกระบวนการเกิดขึ้น และสามารถนำไปพัฒนาระบบติดตามความตรงของชิ้นงานในขณะตัดได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือสำหรับการทดลองวิจัย รวมถึงคำแนะนำ ช่วยเหลือ ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย. การสำรวจสถานภาพอุตสาหกรรมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-ferrous metals) อะลูมิเนียม. 2557.
- [2] ชรารัตน์ ชาญสูงเนิน. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตรงของชิ้นงานกับแรงตัดในกระบวนการกลึง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2557.
- [3] มู้อึมิน ศาสน์สันติวงศ์. การพัฒนาการทำนายค่าความตรงและความกลมของชิ้นงานในกระบวนการกลึงซีเอ็นซีโดยใช้การแปลงเวฟเลต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2558.
- [4] อาทิตยา ชัยจรีนนท์. การพยากรณ์ในกระบวนการสำหรับความขรุขระผิวชิ้นงานในการกลึงอะลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2560.
- [5] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2555.
- [6] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2545.
- [7] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. ed. 8, John Wiley & Sons, New York, 2009.



ฮิวริสติกสำหรับการจัดลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์ม

Heuristic Based Scheduling for Tablets Film Coating Process

จุฑามาส ผลตระกูล* และ พิธิษฐ์ จารุมณีโรจน์

Chutamas Pontrakul and Pisit Jarumaneeroj

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท

เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand.

*E-mail: chutamas.pon@gmail.com, Telephone Number: 02-2038695

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อค้นหาลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่สามารถลดเวลาปิดงานของระบบ (Makespan) และจำนวนงานล่าช้า (Number of Tardy jobs) ลงให้มีค่าน้อยที่สุด ภายใต้กรอบเวลากำหนดส่งมอบ (Time Window) ทั้งนี้ปัญหาการจัดตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มจัดเป็นปัญหาการวางแผนการผลิตรูปแบบหนึ่ง ซึ่งจำเป็นต้องมีการล้าง และปรับตั้งเครื่องจักรทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนรายการยา หากแต่เวลาที่ใช้ในการล้าง และปรับตั้งเครื่องจักรของแต่ละรายการยากลับขึ้นอยู่กับลำดับและรายการยาหน้า ส่งผลทำให้เกิดงานล่าช้าจากการวางแผนที่ขาดประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้แก้ปัญหาดังกล่าวโดยแปลงปัญหาการจัดตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มไปเป็นปัญหาการจัดเส้นทางรถที่มีกรอบของเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW) แล้วจึงทำการหาคำตอบของปัญหาดังกล่าวด้วยฮิวริสติกแบบสองขั้น (2-Phase Heuristic) ตามหลักการค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable Neighborhood Search, VNS) โดยคำตอบเริ่มต้นของฮิวริสติกดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นจากการกระจายงานพื้นฐานอย่างง่าย (EDD และ LPT) แล้วจึงดำเนินการปรับปรุงคำตอบดังกล่าวด้วย 2OPT, RELOCATION และ SWAP ตามลำดับ เพื่อทดสอบความสามารถของฮิวริสติกที่ถูกพัฒนาขึ้น คำตอบที่ได้จากฮิวริสติกจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยผู้วิจัยพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากฮิวริสติกมีคุณภาพใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) โดยมีความแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดโดยเฉลี่ยไม่เกิน 2% สำหรับปัญหาที่มีขนาด 10 ถึง 30 รายการยา อย่างไรก็ตาม เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น (มากกว่า 40 รายการยา) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านความจำในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ หากแต่ฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถหาคำตอบได้ในกรอบเวลาอันสั้น

คำสำคัญ: การจัดตารางการทำงาน, ปัญหาการจัดเส้นทางรถที่มีกรอบของเวลา, ฮิวริสติก

ABSTRACT

The main objective of this research is to determine tablets film coating sequences on parallel machines such that both the completion time (makespan) and the number of tardy jobs are minimized. The underlying tablets film coating problem investigated in this paper is one of production planning problems that requires considerably long periods of cleaning and setup whenever production orders,

i.e. drugs, have been changed. As these times vary and depend on the previously coated drugs, inefficient planning may eventually lead to delivery delay. We show that this problem could be transformed into the Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW), where a variable arc exchange heuristic is devised to solve such a problem. Our proposed heuristic is a 2-phase one, where the initial solutions are constructed from easy-to-implement dispatching heuristics, i.e. Earliest Due Date (EDD) and Longest Processing Time (LPT); and, once completed, they are then iteratively improved by a series of improvement operators – 2OPT, RELOCATION, and SWAP – mimicking the concept of Variable Neighborhood Search (VNS) until no improvement could be found. The results from our proposed heuristics are comparatively good, when compared to those of the optimization model, in terms of solution quality as the gap is less than 2% for instances of 10-30 orders; but, they require much less computation time, which is crucial from a practical point of view. Though the optimizer fails to provide the optimal solution when the number of orders increases to more than 40, due to run-out-of-memory error, the proposed heuristics are still be able to provide acceptably good solutions within an acceptable period of time.

Keywords: Job scheduling, Vehicle Routing Problem with Time Window, Heuristic

1. บทนำ

ยา (Medicine) คือ สารที่รับรองไว้ในเภสัชตำรับ (Pharmacopoeia) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ บำบัด บรรเทา รักษา ป้องกัน โรคหรือความเจ็บป่วยของมนุษย์และสัตว์ การใช้ยาให้มีประสิทธิผลมากที่สุดนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ และความปลอดภัยของผู้ใช้ยา การผลิตยาจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญ ซึ่งผู้ผลิตหรือผู้จัดจำหน่ายจำเป็นต้องได้รับอนุญาตให้ผลิตและออกจำหน่ายจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ก่อน อีกทั้งยังต้องมีมาตรฐานการผลิตที่ดี เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยาที่มีคุณภาพ มีประสิทธิผลในการรักษา และมีความปลอดภัยในการใช้งาน

ยารักษาโรคโดยทั่วไปมักมีขนาดหรือปริมาณด้วยสำคัญปกติที่ร่างกายได้รับในหน่วยมิลลิกรัม ผู้ผลิตยาจึงจำเป็นต้องเตรียมยาโดยผสมส่วนประกอบอื่นนอกเหนือไปจากตัวยาสำคัญเพื่อให้ส่วนผสม หรือยาเตรียม (Pharmaceutical Dosage Forms) มีปริมาณมากพอสำหรับยาหนึ่งขนาด ทั้งนี้ ผู้ผลิตยาอาจพัฒนายาเตรียมขึ้นมาหลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับความสะดวก ความปลอดภัย และผลของการรักษา เช่น ยาเตรียมรูปแบบของแข็ง (Solid dosage form) ซึ่งมีทั้งชนิดที่ใช้รับประทานและชนิดที่ใช้ภายนอก โดยยาเม็ด (Tablets) จัดเป็นรูปแบบยาเตรียมของแข็งที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากความสะดวกในการบริหารจัดการ มีความ

ปลอดภัยสูง ผู้ป่วยสามารถรับยาในขนาดที่ถูกต้องแน่นอน มากกว่ายาน้ำ สามารถกลบกลืน รสของตัวยาได้ง่าย สะดวกในการพกพา เก็บรักษาและขนส่ง ตลอดจนมีความคงตัวดีกว่ายาน้ำ [1] อย่างไรก็ตาม ยาเม็ดบางประเภทอาจมีข้อจำกัดในการผลิต เช่น มีความไม่คงตัวทางกายภาพ มีกลิ่นหรือมีรสชาติอันไม่พึงประสงค์ ส่งผลให้เกิดการพัฒนายาเม็ดเคลือบ (Coated Tablets) ขึ้น

ยาเม็ดเคลือบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ (1) ยาเม็ดเคลือบน้ำตาล (Sugar-coated Tablets) และ (2) ยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (Film-coated Tablets) แต่เนื่องจากฟิล์มเคลือบมีคุณสมบัติป้องกันเมื่อยาจากความชื้นในอากาศได้ดีกว่าน้ำตาล และฟิล์มเคลือบยังช่วยเพิ่มความคงตัวทางกายภาพ ช่วยกลบกลืน และรสชาติอันไม่พึงประสงค์ของยา ทำให้ยาไม่น่ารับประทาน อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นเครื่องหมายการค้าของผู้ผลิตได้อีกด้วย [2] ยาเม็ดเคลือบฟิล์มจึงได้รับความนิยมมากกว่ายาเม็ดเคลือบน้ำตาล

สำหรับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มนั้น นิยมผลิตเป็นรุ่นการผลิต (Batch or Lot) ที่ไม่ต่อเนื่อง โดยขนาดของรุ่นมักถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าตามประเภทและคุณลักษณะของเมื่อยา เพื่อให้ได้เมื่อยาเคลือบฟิล์มที่มีคุณภาพสม่ำเสมอทั่วกัน [3] โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การเตรียมแกรนูลยา (Granulation) (2) การตอก

อัดเม็ดยา (Direct Compression) และ (3) การเคลือบฟิล์มยา (Tablets Film Coating) โดยขั้นตอนการเคลือบฟิล์มยานั้นจัดเป็นขั้นตอนที่มีความซับซ้อน และใช้เวลายาวนานที่สุด เนื่องจากเครื่องเคลือบฟิล์ม (Film coater) มีจำนวนจำกัด และที่เวลาใด ๆ เครื่องเคลือบฟิล์มหนึ่ง ๆ สามารถเคลือบยาได้เพียง 1 รายการเท่านั้น นอกจากนี้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนข้ามผลิตภัณฑ์ (Cross-contamination) ที่อาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้งาน เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของยา ต้องล้างทำความสะอาดและปรับตั้งเครื่องเคลือบฟิล์มใหม่ทุกครั้ง โดยเวลาที่ใช้ในการล้างและปรับตั้งเครื่องเคลือบฟิล์มจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับลำดับงานก่อนหน้า (Sequence-Dependent Setup Time)

ผู้วางแผนจัดตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มอาจจัดให้มีการเคลือบฟิล์มยาชนิดเดียวกันต่อเนื่องกันไป เพื่อหลีกเลี่ยงเวลาสูญเปล่าที่เกิดขึ้นจากการล้างและปรับตั้งเครื่องจักร อย่างไรก็ตาม การดำเนินการดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อกำหนดส่งมอบ หรืออาจก่อให้เกิดเวลารอในกรณีขาดวัตถุดิบสำหรับการเคลือบยา และอาจก่อให้เกิดแถวคอยของรายการยาพร้อมเคลือบได้ ดังนั้นผู้วางแผนจึงจำเป็นต้องพิจารณาเวลาปิดงานของระบบ (Makespan) [4] ควบคู่ไปกับลำดับการผลิตด้วย แต่เนื่องจากปัญหาการจัดตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) [5] โดยเราสามารถแปลงปัญหาดังกล่าวไปเป็นปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีกรอบของเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW) ได้ การค้นหาแผนการผลิตที่มีประสิทธิภาพภายใต้กรอบเวลาดังกล่าวที่จำกัดจึงทำได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัญหามีขนาดใหญ่ที่มีเครื่องเคลือบฟิล์ม และรายการยารอเคลือบจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาฮิวริสติกสำหรับปัญหาดังกล่าวขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาปิดงานของระบบ (Makespan) และจำนวนงานล่าช้า (Number of Tardy jobs) ให้มีค่าน้อยที่สุด

ฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นเป็นฮิวริสติกแบบสองขั้น (2-Phase Heuristic) โดยในขั้นตอนแรกจะมุ่งเน้นไปที่

การสร้างคำตอบเริ่มต้นจากกฎการจ่ายงานพื้นฐานอย่างง่าย เช่น กำหนดการส่งมอบเร็วที่สุด (Earliest Due Date, EDD) หรือเวลาในการเคลือบที่ยาวนานที่สุด (Longest Processing Time, LPT) แล้วจึงทำการปรับปรุงคำตอบดังกล่าวด้วย 2OPT, RELOCATION และ SWAP ตามหลักการของการค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable Neighborhood Search, VNS) ในขั้นตอนถัดมา

ในการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากฮิวริสติก และคำตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ในปัญหาที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยพิจารณาทั้งในมุมมองของคุณภาพคำตอบ และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

2. การทบทวนวรรณกรรม

ปัญหาการจัดตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มมีความคล้ายคลึงกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ (Vehicle Routing Problem, VRP) ซึ่งเป็นส่วนต่อขยายของปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem, TSP) โดยรายการยาเปรียบได้กับตำแหน่งของลูกค้า (Node) ในขณะที่เส้นทางเดินรถของพนักงานขาย หรือรถ (Tour) เปรียบได้กับลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มบนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ

ถึงแม้ว่า การหาคำตอบของปัญหา TSP และ VRP แบบต่าง ๆ สามารถดำเนินการได้ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimizer) วิธีการดังกล่าวกลับสามารถใช้ได้ในปัญหา TSP และ VRP ที่มีขนาดเล็กเท่านั้น เนื่องจากทั้งปัญหา TSP และ VRP ล้วนแล้วแต่เป็นปัญหาในกลุ่มเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) กล่าวคือ เป็นปัญหาที่ปริภูมิผลเฉลย (Solution Space) และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Computational Time) ขยายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้นเพียงเล็กน้อย อีกทั้งยังไม่มีวิธีการใดที่หาคำตอบที่ดีที่สุด

ของปัญหาในกลุ่มดังกล่าวได้ในฟังก์ชันเวลาโพลีโนเมียล การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาเหล่านี้ภายในกรอบเวลาการตัดสินใจที่จำกัดจึงเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัญหาขนาดใหญ่ที่มีจำนวนเส้นทาง (เครื่องเคลือบฟิล์ม) หรือลูกค้า (รายการยา) จำนวนมาก ด้วยเหตุดังกล่าว นักวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมแก้ปัญหาในกลุ่มดังกล่าวด้วยวิธีการฮิวริสติก (Heuristic) แบบต่าง ๆ แทน ถึงแม้ว่าคำตอบที่ได้จะไม่ใช่ว่าคำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม [6]

2.1 ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problems, TSP)

ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย หรือ TSP เป็นปัญหาในกลุ่มโลจิสติกส์ที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเนื่องจากเป็นปัญหาการขนส่งพื้นฐาน และยังเป็นส่วนหนึ่งของปัญหาโลจิสติกส์ที่ซับซ้อนอื่น ๆ เช่น ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ หรือ VRP จุดประสงค์หลักของปัญหา TSP คือ การค้นหาหาเส้นทางเดินรถที่มีต้นทุนต่ำที่สุดจำนวน 1 เส้นทาง โดยเส้นทางดังกล่าวต้องมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นจุดเดียวกัน (Depot) อีกทั้งเส้นทางดังกล่าวยังต้องผ่านตำแหน่งของลูกค้าทุกรายรายละเอียดหนึ่งครั้งโดยไม่มีการผ่านซ้ำซ้อน [7]

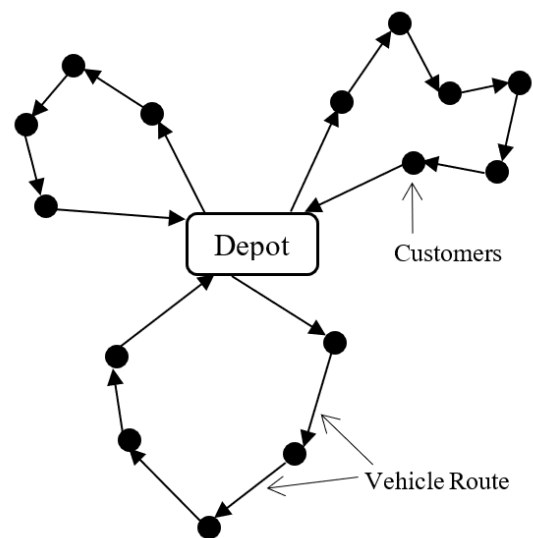
ตัวชี้วัดหลักของปัญหา TSP อาจเป็นระยะทาง หรือ เวลาที่ใช้ไปในการเดินทางทั้งหมด ซึ่งโดยทั่วไปเราสามารถแบ่งประเภทของปัญหา TSP ออกได้เป็น 2 กลุ่มตามคุณลักษณะของค่าใช้จ่ายระหว่างสองจุดใด ๆ กล่าวคือ (1) ในกรณีที่ค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างสองจุดใด ๆ มีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับทิศทางการเดินทาง ปัญหา TSP ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ปัญหา TSP แบบสมมาตร (Symmetric TSP) และ (2) ในกรณีที่ค่าใช้จ่ายในการเดินทางระหว่างสองจุดใด ๆ มีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับทิศทางการเดินทาง ปัญหา TSP ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ปัญหา TSP แบบอสมมาตร (Asymmetric TSP)

ในกรณีที่จำนวนเส้นทาง และข้อจำกัดด้านการขนส่งเพิ่มมากขึ้น ปัญหาดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ หรือ VRP ซึ่งปัญหา VRP นี้เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีรูปแบบที่หลากหลาย ขึ้นอยู่

กับข้อจำกัดที่พิจารณา เช่น ข้อจำกัดด้านกรอบของเวลา (Time Windows) ข้อจำกัดด้านทรัพยากรการขนส่ง (Fleet of Vehicles) และข้อจำกัดด้านการขนส่งอื่นๆ ส่งผลทำให้ปัญหา VRP เป็นหนึ่งในปัญหาที่มีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย

2.2 ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ (Vehicle Routing Problem, VRP)

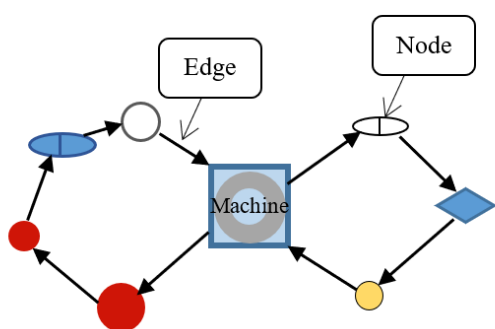
ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ หรือ VRP เป็นปัญหาการตัดสินใจที่มีความซับซ้อน และมีข้อจำกัดที่จำเป็นต้องพิจารณาจำนวนมาก คำตอบของปัญหาดังกล่าวมักประกอบไปด้วย จำนวนพาหนะที่ใช้ในการขนส่งสินค้า และเส้นทางเดินรถขนส่งสินค้าที่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งน้อยที่สุด รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างคำตอบของปัญหา VRP ที่มี 3 เส้นทางเดินรถขนส่ง โดยแต่ละเส้นทางมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดที่ศูนย์กระจายสินค้า หรือ Depot



รูปที่ 1 ตัวอย่างคำตอบของปัญหา VRP

ในกรณีที่ลูกค้า หรือศูนย์กระจายสินค้ามีข้อจำกัดด้านเวลาการรับ-ส่งสินค้า ปัญหา VRP ดังกล่าวจะถูกเรียกว่า ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีกรอบของเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Window) หรือ VRPTW [8] ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าปัญหา VRP โดยทั่วไป

ในการแปลงปัญหาการจัดการตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มบนเครื่องจักรแบบขนาน [9] ไปเป็นปัญหา VRP นั้น สามารถทำได้โดยกำหนดให้ Node แทนรายการยา (Batch Order) และ Arc แทนเวลาที่ใช้ไปในการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแปลงปัญหาการจัดการตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มให้เป็นปัญหา VRP

ในกรณีที่รายการยามีเวลาพร้อมเคลือบ (Ready Time) และกำหนดส่งมอบ (Due date) เราสามารถแปลงปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหา VRPTW ได้ โดยเพิ่มองค์ประกอบของกรอบเวลาลงไปในแต่ละรายการยา

2.3 การค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable Neighborhood Search, VNS)

วิธีการค้นหาคำตอบในย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน หรือ VNS เป็นวิธีการปรับปรุงคำตอบของปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน [10] โดย VNS ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัญหาการจัดเส้นทางรถแบบต่าง ๆ ทั้งนี้ VNS จะทำการปรับปรุงคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution) ด้วยวิธีการค้นหา (Local Search) แบบต่าง ๆ อย่างเป็นลำดับขั้น ซึ่งการปรับปรุงนี้จะถูกดำเนินการวนซ้ำไปจนกว่าคำตอบที่ได้ไม่เกิดการปรับปรุงขึ้นอีก แล้วจึงหยุดการค้นหา

การพัฒนาคำตอบ (Tour Improvement) ด้วยวิธีการค้นหาแบบต่าง ๆ นี้ มักขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของปัญหาที่พิจารณา [11] โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ sequential 2OPT ในการสลับเปลี่ยนตำแหน่งภายในเส้นทาง (Intra-route) และเลือกใช้วิธี Relocation

(Inter-route 1-0 move) และการสลับที่ SWAP (Inter-route 1-1 exchange) ในการสลับเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างเส้นทางข้างเคียง (Inter-route) เนื่องจากความง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้ อีกทั้งยังเป็นลำดับการค้นหาที่เพิ่มขอบเขตในการค้นหาคำตอบให้กว้างขึ้น (Diversification) อีกด้วย

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ลักษณะของปัญหา

กระบวนการเคลือบฟิล์มเม็ดยาของโรงงานกรณีศึกษา เป็นสายการผลิตที่มีเครื่องจักรแบบขนาน โดยมีข้อจำกัดหลักอยู่ที่ลำดับการผลิตมีผลต่อเวลาล้างทำความสะอาด (Cleaning time) และปรับตั้งเครื่องเคลือบฟิล์ม (Setup time) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องเคลือบฟิล์มนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของแตงกวา และเป็นเวลาสูญเปล่าที่ไม่สามารถผลิตได้ แม้ว่ารายการยาที่ผลิตต่อเนื่องกันจะเป็นยาชนิดเดียวกัน แต่ต่างรุ่นการผลิต (Batch) ก็ตาม ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดเครื่องเคลือบฟิล์มจะเกิดขึ้น เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดยา โดยในขั้นตอนดังกล่าวจะมีการล้างทำความสะอาดเศษผงยาและน้ำยาเคลือบที่ยังเหลือตกค้างอยู่ในเครื่องเคลือบฟิล์ม เพื่อให้มั่นใจว่ายาชนิดใหม่ที่จะทำการผลิตต่อไม่มีสารปนเปื้อนที่เกิดจากยาจากหน้าหลงเหลืออยู่ ตามหลักการของ GMP (Good Manufacturing Practice) และประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง การกำหนดรายละเอียดเกี่ยวกับหลักเกณฑ์และวิธีการในการผลิตยาแผนปัจจุบันตามกฎหมายว่าด้วยยา พ.ศ. 2554 ที่มีเป้าหมายสำคัญในการลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนข้ามผลิตภัณฑ์ระหว่างขั้นตอนการผลิตยา

นอกเหนือไปจากเวลาข้างต้นแล้ว ยังมีเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มยา (Processing time) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของยาแต่ละชนิด โดยยาแต่ละรายการสามารถเริ่มผลิตได้เมื่อยาเม็ดแกน (Core tablets) พร้อม

และเครื่องจักรผ่านการล้างและการปรับตั้งเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ทั้งนี้ แผนการผลิตที่จัดทำขึ้นต้องให้ความสำคัญกับทั้งกำหนดส่งมอบของแต่ละรายการยา ตลอดจนเวลาปิดงานเพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานล่วงเวลา ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตยาของโรงงานกรณีศึกษา โดยผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นทั้งต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และฮิวริสติก ซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

3.2 การเตรียมข้อมูลนำเข้า

3.2.1 รายละเอียดคำสั่งผลิต

รายละเอียดคำสั่งผลิตเป็นส่วนเชื่อมโยงงานในพื้นที่ผลิตกับการวางแผนผลิต โดยข้อมูลในคำสั่งผลิตที่สำคัญประกอบไปด้วย

- รายการยา หรือรายการยาเม็ดเคลือบฟิล์ม ซึ่งมีการระบุชนิดของยา และความแรงในหน่วยมิลลิกรัม (mg) โดยรายการยาของโรงงานกรณีศึกษา มีหน่วยนับเป็นรุ่น หรือ Batch
- ขนาดของรุ่นการผลิต (Batch size) มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg)
- จำนวนรายการยา หรือจำนวนรายการยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่ต้องทำการผลิต
- ข้อมูลของยาเม็ดแกน (Core tablets) ซึ่งประกอบไปด้วยกำหนดส่งมอบ วันที่และเวลาที่ดอกยาเม็ดเสร็จ

3.2.2 เวลามาตรฐาน (Standard Time)

คำสั่งผลิตของแต่ละงานจะถูกอธิบายในรูปของเวลามาตรฐานที่ได้จากการเก็บข้อมูลในโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องเคลือบฟิล์ม และเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มแต่ละรายการยา ตลอดจนเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องเคลือบฟิล์มระหว่างรายการยา

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

3.3.1 ค่าดัชนี (Indices)

N = รายการยา หรือรุ่นการผลิต (Batch)

$N = 1, 2, \dots, |N|$

N_0 = รายการยา หรือรุ่นการผลิต ซึ่งนับรวมถึงจุดอ้างอิงเริ่มต้น

$N_0 = 1, 2, \dots, |N|$

M = เครื่องเคลือบฟิล์มที่พิจารณา

$M = 1, 2, \dots, |M|$

3.3.2 ค่าคงที่ (Parameters)

s_j = เวลาที่ใช้ในการผลิตรายการยา j ซึ่งนับรวมถึงเวลาในการปรับตั้งเครื่องเคลือบฟิล์มสำหรับรุ่นการผลิตดังกล่าวด้วย

c_{ij} = เวลาล้างทำความสะอาดเครื่องเคลือบฟิล์มเมื่อมีการเปลี่ยนรายการผลิตจากรายการยา i ไปรายการยา j

e_j = เวลาเร็วสุดที่สามารถเริ่มผลิตรายการยา j ได้ (ready time)

l_j = กำหนดส่งมอบ (due date) ของรายการยา j

Planning Period = เวลาปฏิบัติงาน 5 วันต่อเนื่อง (นาท)

M_1, M_2 = ตัวเลขที่มีค่าจำนวนมาก ๆ เช่น สองเท่าของ Planning Period

o = ค่าปรับที่เกิดจากงานเสร็จไม่ทันกำหนดส่งมอบ (นาทต่องานล่าช้า)

3.3.3 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$$x_{ij}^m = \begin{cases} 1, & \text{เมื่อผลิตรายการยา } j \text{ หลังจาก } i \\ & \text{บนเครื่องจักร } m, \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

t_j^m = เวลาเริ่มต้นผลิตรายการยา j บนเครื่องจักร m

A_j^m = เวลาล่าช้าของรายการยา j บนเครื่องจักร m

B_j^m = เวลาที่รายการยา j เสร็จก่อนเวลาส่งมอบเมื่อทำการผลิตรายการดังกล่าวบนเครื่องจักร m

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{เมื่อผลิตรายการยา } j \text{ เสร็จล่าช้า,} \\ 0, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

$$Z_j = \begin{cases} 0, & \text{เมื่อผลิตรายการยา } j \text{ เสร็จล่าช้า,} \\ 1, & \text{กรณีอื่น ๆ} \end{cases}$$

Makespan (C_{max}) = เวลาปิดงานของระบบ (นาท)

3.3.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการจัดการตารางการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์ม มุ่งเน้นไปที่การลดเวลาปิดงานของระบบ และจำนวนงานล่าช้าที่เกิดขึ้นจากการส่งมอบไม่ทันกำหนดลง โดยมีการเปลี่ยนแปลงหน่วยของจำนวนงานล่าช้าให้อยู่ในหน่วยเดียวกันกับเวลาปิดงานของระบบ (นาทีก) ด้วยค่าคงที่ O (ค่าปรับ) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\min Z = C_{max} + \sum_{j \in N} O y_j \quad (1)$$

3.3.5 ข้อจำกัด (Constraints)

ข้อจำกัดของปัญหาการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์ม มี 3 ประเภทหลัก ดังนี้

A ข้อจำกัดด้านความต้องการ (Demand constraints)

- Out from depot

$$\sum_{j \in N} x_{\emptyset j}^m = 1; \forall m \in M \quad (2)$$

- Back to depot

$$\sum_{j \in N} x_{j\emptyset}^m = 1; \forall m \in M \quad (3)$$

ข้อจำกัดในสมการที่ 2 และ 3 กำหนดให้ลำดับการผลิตบนเครื่องเคลือบฟิล์มต้องมีจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดที่จุดอ้างอิงเริ่มต้นเสมอ

- Out degree

$$\sum_{m \in M} \sum_{j \in N_{\emptyset}} x_{ij}^m = 1; \forall i \in N \quad (4)$$

- Flow balancing

$$\sum_{i \in N_{\emptyset}} x_{ij}^m = \sum_{i \in N_{\emptyset}} x_{ji}^m; \forall j \in N, \forall m \in M \quad (5)$$

สมการที่ 4 และ 5 กำหนดให้เส้นทางการไหลของรายการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มในแต่ละเครื่องเคลือบมีความต่อเนื่องกันไป โดยรายการยาใด ๆ จะถูกผลิตบนเครื่องจักรหนึ่ง ๆ ได้เพียงครั้งเดียว และเมื่อรายการยานั้นผลิตเสร็จสิ้นแล้วจะต้องดำเนินการผลิตรายการยาต่อไป

หรือเชื่อมต่อกับจุดอ้างอิงเริ่มต้นเพื่อป้องกันการสิ้นสุดของลำดับการผลิตเสมอ

B ข้อจำกัดด้านกรอบเวลา (Time window constraints)

- Starting time for the depot

$$t_j^m \geq t_i^m + s_i^m + c_{ij}^m x_{ij}^m - M_1(1 - x_{\emptyset j}^m) \quad (6)$$

เมื่อ $\forall i, j \in N, \forall m \in M$

- Starting time for all jobs

$$t_j^m \geq t_i^m + s_i^m + c_{ij}^m x_{ij}^m - M_1(1 - x_{ij}^m) \quad (7)$$

เมื่อ $\forall i, j \in N, \forall m \in M$

$$t_j^m \geq e_j; \forall j \in N, \forall m \in M \quad (8)$$

$$t_j^m + s_j^m - l_j = A_j^m - B_j^m; \forall j \in N, \forall m \in M \quad (9)$$

สมการที่ 6 และ 7 กำหนดเวลาเริ่มต้นของรายการยา j ที่เป็นไปได้บนเครื่องเคลือบฟิล์ม m โดยเวลาเริ่มผลิตของรายการยา j จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเวลาเสร็จงานของรายการยาก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม เวลาเริ่มต้นที่ได้ต้องอยู่ภายในกรอบของเวลาซึ่งถูกกำหนดด้วยสมการที่ 8 เนื่องจากรายการยา j จะเริ่มผลิตได้ในช่วงเวลา e_j (ready time) ถึง l_j (due date) เท่านั้น

สมการที่ 9 บ่งบอกความล่าช้าของรายการยา j บนเครื่องเคลือบฟิล์ม m เมื่อพิจารณาสมการที่ 9 โดยละเอียดจะพบว่า เมื่อการผลิตรายการยา j ล่าช้า ค่าผลลัพธ์ทางฝั่งซ้ายของสมการ 9 จะมีค่าเป็นบวก ส่งผลทำให้ A_j^m มีค่าเป็นบวก และ B_j^m มีค่าเป็นศูนย์ ในทางตรงกันข้าม ถ้ารายการยา j ถูกผลิตเสร็จก่อนกำหนดส่งมอบ ค่าผลลัพธ์ทางฝั่งซ้ายของสมการ 9 จะมีค่าเป็นลบ ส่งผลทำให้ค่าของ A_j^m เป็นศูนย์ และ B_j^m มีค่าเป็นบวก

- Makespan

$$C_{max} \geq t_j^m + s_j^m + c_{j\emptyset}^m; \forall j \in N, \forall m \in M \quad (10)$$

สมการที่ 10 บ่งบอกเวลาปิดงานของระบบ ซึ่งนับจากเวลาที่รายการยาสุดท้ายผลิตเสร็จสิ้น

- If-then constraint

$$\sum_{m \in M} A_j^m \leq M_2(1 - Z_j); \forall j \in N \quad (11)$$

$$-(y_j - 1) \leq M_2 Z_j; \forall j \in N \quad (12)$$

สมการที่ 11 และ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจ A_j^m , Z_j และ y_j เพื่อป้องกันความล่าช้าของรายการขา j กล่าวคือ ถ้ารายการขา j ล่าช้า หรือ $A_j^m > 0$ จะส่งผลทำให้ $Z_j = 0$ และ $y_j = 1$ ในทางตรงกันข้าม หากรายการขา j มีสถานะเสร็จทันกำหนด หรือ $A_j^m = 0$ จะส่งผลทำให้ $Z_j = 1$ และ $y_j = 0$

C ข้อจำกัดขอบเขต (Boundary constraints)

$$x_{ij}^m = \{0,1\}; \forall i,j \in N_0, \forall m \in M \quad (13)$$

$$y_j = \{0,1\}; \forall j \in N_0 \quad (14)$$

$$Z_j = \{0,1\}; \forall j \in N_0 \quad (15)$$

$$t_j^m \geq 0; \forall j \in N, \forall m \in M \quad (16)$$

$$A_j^m \geq 0; \forall j \in N, \forall m \in M \quad (17)$$

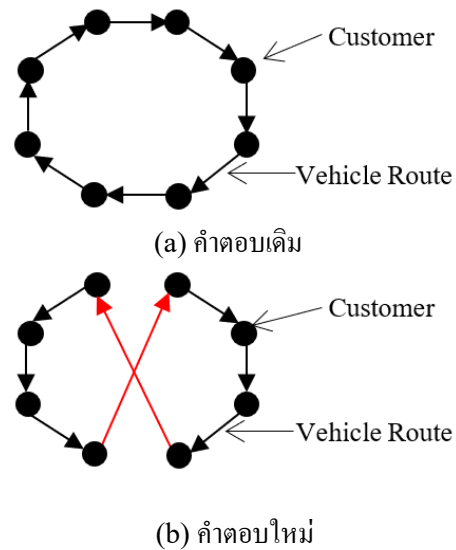
สมการและอสมการขอบเขตเหล่านี้ แสดงช่วงของค่าตัวแปรตัดสินใจต่าง ๆ โดยสมการที่ 13-15 กำหนดค่าของตัวแปรตัดสินใจที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 (Binary integer) ในขณะที่สมการที่ 16 และ 17 กำหนดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจที่มีค่าไม่ติดลบ (Non-negativity decision variables)

4. อีวิริสติกสำหรับการจัดการตารางการผลิตยานยนต์เคลื่อนที่

นอกเหนือจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 3.3 ผู้วิจัยยังได้พัฒนาอีวิริสติกแบบสองขั้นขึ้นเพื่อหาคำตอบของปัญหาดังกล่าว โดยอีวิริสติกที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นอีวิริสติกแบบสองขั้น (Two-phase heuristic) [12] กล่าวคือ ในขั้นตอนที่ 1 คำตอบเริ่มต้นจะถูกสร้างขึ้นจากกฎการจ่ายงานพื้นฐานอย่างง่าย 2 รูปแบบ ได้แก่ การจัดลำดับงานโดยวิธี Earliest Due Date (EDD) และ Longest Processing time (LPT) แล้วจึงทำการพัฒนาคำตอบดังกล่าวด้วย VNS ผ่านการปรับปรุง 3 รูปแบบ ได้แก่ Sequential 2OPT,

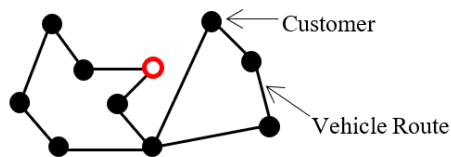
Relocation และ SWAP อย่างเป็นลำดับขั้นในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- Sequential 2OPT (Intra-route improvement operator) เป็นการเปลี่ยนลำดับของรายการภายในเครื่องเคลื่อนที่เดียวกัน ผ่านการตัดและเชื่อมรายการ 2 คู่เข้าด้วยกัน โดยเส้นเชื่อมรายการใหม่ต้องมีจุดร่วมระหว่างเส้นที่ตัด และเส้นที่เชื่อมเดิมเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3

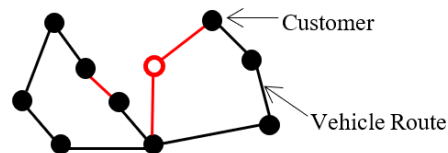


รูปที่ 3 ตัวอย่างของการสลับคำตอบด้วยวิธี 2OPT

- Relocation เป็นการโอนย้ายรายการจำนวน 1 รายการใด ๆ แบบสุ่มจากเครื่องเคลื่อนที่หนึ่งไปยังอีกเครื่องหนึ่ง ซึ่ง Relocation จัดเป็นการปรับปรุงแบบข้ามเส้นทาง (Inter-route improvement operator) รูปแบบหนึ่ง [13] ดังแสดงในรูปที่ 4



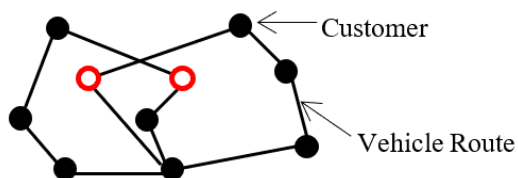
(a) คำตอบเดิม



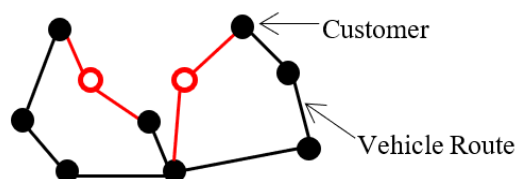
(b) คำตอบใหม่

รูปที่ 4 ตัวอย่างของการสลับคำตอบด้วยวิธี VNS แบบ Inter-route 1-0 move

- SWAP เป็นการปรับปรุงข้ามเส้นทางอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งจะแตกต่างไปจาก Relocation โดย SWAP จะทำการสลับรายการขาใด ๆ แบบสุ่มจำนวน 1 คู่จากรายการขบวนสองเครื่องเคลื่อนฟิล์มใด ๆ [14] ดังแสดงในรูปที่ 5



(a) คำตอบเดิม



(b) คำตอบใหม่

รูปที่ 5 ตัวอย่างของการสลับคำตอบด้วยวิธี VNS แบบ SWAP

นอกจากนี้ ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงลำดับการผลิต ฮิวริสติกจะวนเรียก Sequential 2OPT ขึ้นมาใหม่ทุกครั้งจนกว่าจะไม่เกิดการปรับปรุงใด ๆ จาก SWAP จึง

หยุดการค้นหา ดังอธิบายได้ด้วยรหัสเทียม (Pseudo code) ดังแสดงในรูปที่ 6

Pseudo Code for the Proposed Heuristic

```

1: Input: A network of size N, where  $N > 1$ 
2: Find an initial solution using EDD or LPT rule
3: z = true
4: while z = true
5:   Call 2OPT
6:   if no better solution is found
7:     terminate 2OPT
8:   else
9:     return a better tour as a new solution
10:    call 2OPT (Back to Line 5)
11:   end if
12:
13: Call RELOCATION
14: if no better solution is found
15:   terminate RELOCATION
16: else
17:   return a better tour as a new solution
18:   call 2OPT (Back to Line 5)
19: end if
20:
21: Call SWAP
22: if no better solution is found
23:   terminate SWAP
24:   z = false (terminate)
25: else
26:   return a better tour as a new solution
27:   call 2OPT (Back to Line 5)
28: end if
29: end while
30: return best-found cost-minimizing solution
  
```

รูปที่ 6 รหัสเทียมแสดงการทำงานของฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้น

5. ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณ

ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการคำนวณนี้ อ้างอิงจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากโรงงานกรณีศึกษา โดยผู้วิจัยได้ทำการสร้างรูปแบบปัญหา (Problem Setting) ขึ้นจากการสุ่มด้วยการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform

Distribution) ของรายการยา 7 ชนิดที่แตกต่างกันบนเครื่องฟิล์มจำนวน 2 เครื่อง ภายใต้กรอบการวางแผน 14 วัน นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการแปรค่าจำนวนรายการยาในแต่ละตัวอย่างปัญหา ซึ่งมีค่าเริ่มต้นที่ 10 รายการยา และค่าสูงสุดที่ 50 รายการยา โดยในแต่ละรูปแบบปัญหาจะประกอบไปด้วยตัวอย่างปัญหา (Problem Instance) ที่มีรายการผลิตแตกต่างกัน 5 ชุดคำสั่ง

5.2 ผลการเปรียบเทียบด้านเวลา และคุณภาพของคำตอบ

ผลลัพธ์ของฮิวริสติกที่ถูกพัฒนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในด้านเวลาในการหาคำตอบ และคุณภาพของคำตอบสามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 1-3 ตามลำดับ ทั้งนี้การทดลองทั้งหมดเกิดขึ้นบนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ CPU Intel Core-i7 2.20 GHz ด้วยแรม 8 GB. และใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ในขณะที่ใช้โปรแกรมภาษา Python ในการหาคำตอบจากฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นทั้ง 2 รูปแบบ

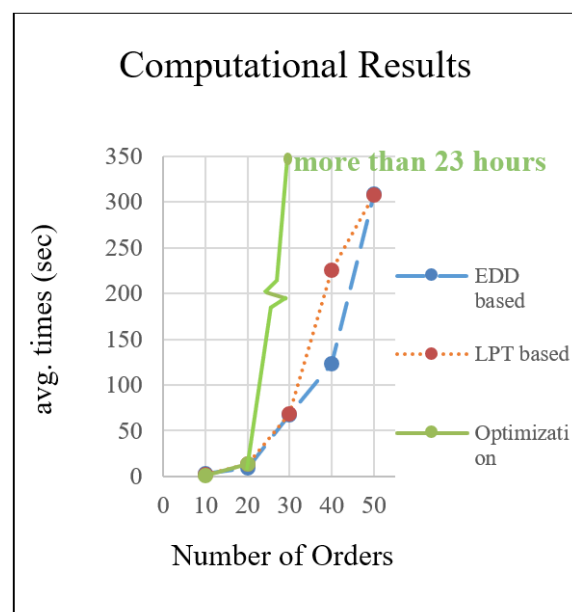
ตารางที่ 1 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และฮิวริสติกที่นำเสนอทั้ง 2 รูปแบบ (หน่วย: วินาที)

Number of orders	Proposed Heuristic		Optimization
	EDD based	LPT based	
	avg. time		avg. time
10	3.47	2.22	0.66
20	9.18	13.71	13.92
30	67.15	68.45	83,960.16 ^a
40	122.93	225.12	- ^b
50	309.16	308.23	- ^b

a. เวลาที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบจาก 3 ตัวอย่าง.

b. ไม่สามารถหาคำตอบได้ เนื่องจากติดข้อจำกัดด้านความจำในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ หรือ Run-out-of-memory error.

ในมุมมองของเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า เมื่อปัญหามีขนาดเล็ก กล่าวคือ มีจำนวนรายการยาระหว่าง 10 ถึง 20 รายการ เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และฮิวริสติกที่นำเสนอทั้งสองวิธีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นที่ 30 รายการยา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กลับใช้เวลามากถึงกว่า 23 ชั่วโมงในการหาคำตอบ (ดูรูปที่ 7 ประกอบ) นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังสามารถหาคำตอบของปัญหาตัวอย่างได้เพียง 3 จาก 5 ตัวอย่างเท่านั้น และเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นเกินกว่า 30 รายการยา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากปัญหาข้อจำกัดด้านความจำในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ (Run-out-of-memory error) ในขณะที่ฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถให้คำตอบได้ในช่วง 2-6 นาที ถึงแม้ว่าคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการหาคำตอบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับฮิวริสติกที่นำเสนอทั้ง 2 รูปแบบ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบด้านคุณภาพของคำตอบระหว่างการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับฮิวริสติกที่นำเสนอด้วยวิธีเบื้องต้น EDD (หน่วย: นาที)

No. of orders	Optimization		EDD based heuristic		%Difference of solution quality ^a
	avg. makespan	No. of Tardy job	avg. makespan	No. of Tardy job	
10	3,715	0	3,715	0	0.00%
20	4,727	0	4,800	0	1.54%
30	6,213	0	6,265	0	0.84% ^b

^a การคำนวณคุณภาพของคำตอบ (เวลาปัดงาน) เทียบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

^b การคำนวณคุณภาพของคำตอบ (เวลาปัดงาน) คัดจากตัวอย่างปัญหาเพียง 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบด้านคุณภาพของคำตอบระหว่างการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับฮิวริสติกที่นำเสนอด้วยวิธีเบื้องต้น LPT (หน่วย: นาที)

No. of orders	Optimization		LPT based heuristic		%Difference of solution quality ^a
	avg. makespan	No. of Tardy job	avg. makespan	No. of Tardy job	
10	3,715	0	3,715	0	0.00%
20	4,727	0	4,789	0	1.31%
30	6,213	0	6,138	1	-1.21% ^{b,c}

^a การคำนวณคุณภาพของคำตอบ (เวลาปัดงาน) เทียบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

^b การคำนวณคุณภาพของคำตอบ (เวลาปัดงาน) คัดจากตัวอย่างปัญหาเพียง 3 ตัวอย่าง

^c ถึงแม้ว่าเวลาปัดงานของฮิวริสติกแบบ LPT จะมีค่าต่ำกว่าเวลาปัดงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำตอบที่ได้จากฮิวริสติกแบบ LPT กลับก่อให้เกิดงานล่าช้าขึ้น จำนวน 1 งาน

ในมุมมองของคุณภาพคำตอบ ตารางที่ 2 และ 3 แสดงการเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบจากฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นเทียบกับคำตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวัดจากเวลาปัดงานของระบบโดยเฉลี่ย และจำนวนงานล่าช้าที่ส่งมอบไม่ทันกำหนด จากปัญหาที่มีขนาด 10-30 รายการฯ จะเห็นได้ว่าคุณภาพของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติกนั้น แตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ ในปัญหาที่มีขนาดเล็ก (10 รายการฯ) คำตอบที่ได้จากฮิวริสติกมีคุณภาพไม่แตกต่างไปจากคำตอบที่ดีที่สุด แม้ฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นจะใช้เวลาในการหาคำตอบยาวนานกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ตาม

สำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่ 20 และ 30 รายการฯ ฮิวริสติกที่นำเสนอทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ในด้านคุณภาพของคำตอบแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเฉลี่ยไม่เกิน 2% หากแต่ฮิวริสติกแบบ

LPT ก่อให้เกิดงานล่าช้าขึ้นจำนวน 1 งาน ในตัวอย่างปัญหาที่มีขนาด 30 รายการฯ

สาเหตุที่ฮิวริสติกแบบ LPT ก่อให้เกิดงานล่าช้าขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการเรียงลำดับงานแบบ LPT มิได้คำนึงถึงกำหนดส่งมอบของงาน หากแต่มุ่งเน้นไปที่การลดเวลาปัดงานของระบบ ในขณะที่การจัดเรียงแบบ EDD นั้นมุ่งเน้นไปที่กำหนดเวลาส่งมอบ หากแต่ละเลยเวลาปัดงานของระบบ ด้วยเหตุดังกล่าว เมื่อทำการจัดเรียงลำดับการผลิตตามเม็ดเคลือบฟิล์มด้วยฮิวริสติกแบบ LPT จึงทำให้เวลาปัดงานของระบบต่ำกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หากแต่การได้มาซึ่งเวลาปัดงานดังกล่าวก็แลกมาด้วยงานล่าช้าจำนวน 1 งาน ทั้งนี้ ในกรณีที่ผู้วางแผนจัดลำดับการผลิตต้องการหลีกเลี่ยงงานล่าช้า ผู้วางแผนอาจกำหนดให้ค่าปรับมีค่าสูงขึ้น

5.3 การประยุกต์ใช้อัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นในการจัดลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์ม ณ โรงงานกรณีศึกษา

นอกเหนือไปจากการทดลองกับตัวอย่างปัญหาที่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องได้นำเอาอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นไปทดลองใช้เปรียบเทียบกับวิธีการจัดการตารางการผลิตรายสัปดาห์ในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา โดยทำการทดลองต่อเนื่องเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ซึ่งในแต่ละสัปดาห์มีจำนวนรายการยาโรเค็บบแตกต่างกันไปตั้งแต่ 23 ถึง 48 รายการยา

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ทั้งในมุมมองของคุณภาพคำตอบ และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของการจัดลำดับตารางการผลิตทั้งสามวิธีสามารถแสดงได้ด้วย ตารางที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการจัดการตารางการผลิตรายสัปดาห์แบบเดิม และการจัดการตารางการผลิตด้วยอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นทั้งสองรูปแบบ (หน่วย: นาที)

Week	การจัดการตารางการผลิตแบบเดิม		EDD based heuristic		% Difference of solution quality ^a	LPT based heuristic		%Difference of solution quality ^a
	Makespan	#Tardy job	Makespan	#Tardy job		Makespan	#Tardy job	
1	6,500	4	6,450	2	-0.77 %	6,390	2	-1.69 %
2	5,390	1	5,220	0	-3.15 %	4,925	0	-8.63 %
3	2,430	0	2,405	0	-1.03 %	2,145	0	-11.73 %
4	5,620	2	4,920	0	-12.46 %	5,190	0	-7.65 %

^a การคำนวณคุณภาพของคำตอบ (เวลาปฏิบัติงาน) เทียบจากเวลาปฏิบัติงานของการจัดการตารางการผลิตแบบเดิม

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบระหว่างอัลกอริธึมแบบ EDD และ LPT (หน่วย: นาที)

Week	Number of orders	Proposed Heuristic	
		EDD based	LPT based
1	48	112.33	152.39
2	40	52.52	124.39
3	23	18.33	28.71
4	40	145.96	188.59

จากตารางที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ว่า การจัดการลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบันมีเวลาปฏิบัติงาน และจำนวนงานล่าช้าสูงกว่าวิธีการอัลกอริธึมที่นำเสนอทั้งสองวิธี โดยอัลกอริธึมแบบ EDD สามารถลดเวลาปฏิบัติงานโดยเฉลี่ยจากเดิมได้ 2.55% ในขณะที่อัลกอริธึมแบบ LPT สามารถลดเวลาปฏิบัติงานโดยเฉลี่ยลงได้ประมาณ 5.52% ภายใต้กรอบเวลาการตัดสินใจอันรวดเร็ว ไม่เกิน 190 วินาทีเท่านั้น

5.3 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการทดลองจากตัวอย่างปัญหาที่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่า การแก้ปัญหาลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์มเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์นั้น สามารถดำเนินการได้ในปัญหาที่มีขนาดเล็กถึงปัญหามขนาดกลางเท่านั้น เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อาจไม่เหมาะสม เนื่องจากจำเป็นต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ยาวนาน และอาจไม่สามารถหาคำตอบได้ในบางกรณี เนื่องจากติดข้อจำกัดด้านความจำในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาอัลกอริธึมขึ้นมา 2 รูปแบบ โดยอ้างอิงจากกฎการจ่ายงานพื้นฐานอย่างง่าย (EDD และ LPT) แล้วจึงทำการประยุกต์ใช้ VNS ในการปรับปรุงคำตอบอย่างเป็นลำดับขั้น ผ่านขั้นตอนการปรับปรุง 3 รูปแบบ ได้แก่ Sequential 2OPT, Relocation และ SWAP ทั้งนี้

ผลลัพธ์ที่ได้จากฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นเป็นที่น่าสนใจทั้งในมุมมองของคุณภาพคำตอบที่แตกต่างไปจากคำตอบที่ดีที่สุดเฉลี่ยไม่เกิน 2% (ในปัญหาที่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้) และในมุมมองของเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบที่รวดเร็วในหลักนาที

ผู้วิจัยยังได้ทดลองนำเอาฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นไปใช้ทดลองเปรียบเทียบกับกรปฏิบัติการปฏิบัติหน้างานของโรงงานกรณีศึกษา โดยผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่า ฮิวริสติกดังกล่าวสามารถลดเวลาปิดงาน และจำนวนงานล่าช้าที่เกิดขึ้นได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้อาจแตกต่างกันไปในแต่ละกรณีขึ้นอยู่กับรายการยา และจำนวนรายการยาที่ถูกนำไปจัดลำดับการผลิตในแต่ละสัปดาห์

ถึงแม้ว่าฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นจะเป็นไปเพื่อการจัดลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์ม โครงสร้างของฮิวริสติกดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับการผลิตสินค้า หรือผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น ๆ ที่มีความใกล้เคียงกับยาเม็ดเคลือบฟิล์มได้ เช่น ผลิตภัณฑ์สบู่เหลว ยาสระผม หรือยาสีฟัน ซึ่งจำเป็นต้องมีการล้างสายการผลิตเมื่อมีการเปลี่ยนสูตรผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นยังมีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีคำสั่งผลิตเร่งด่วนเข้ามา ผู้วางแผนการผลิตสามารถนำเอาข้อมูลการผลิตชุดใหม่มาใช้วางแผนการผลิตร่วมกับข้อมูลการผลิตชุดเดิมได้ผ่านการวนซ้ำหาคำตอบใหม่

เอกสารอ้างอิง

- [1] ทัดทรง ท้วทพิทย์ และคณะ. ยาเม็ด. คณะเภสัชศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2534.
- [2] Remington, J.P. and Beringer, P. Remington: The Science and Practice of Pharmacy. Lippincott Williams & Wilkins Company, Philadelphia, 2005.
- [3] พิกภ พลิตาภรณ์. การกำหนดตารางการผลิตและการควบคุม. สำนักพิมพ์ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.
- [4] ปารเมศ ชูติมา. เทคนิคการจัดตารางดำเนินงาน. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [5] Karabulut, K. and Tasgetiren, F. A variable iterated greedy algorithm for the traveling salesman problem with time windows. *Information Sciences*, 2014; 279: 383-395.
- [6] วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ. หลักการหาความเหมาะสมที่ดีที่สุด. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [7] Dumas, Y., Desrosiers, J., Gelinas, E. and Solomon, M. An Optimal Algorithm for the Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Operations Research*, 1995; 43(2): 367-371.
- [8] Kirci, P. An Optimization Algorithm for a Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Indian Academy of Sciences*, 2016; 519-529.
- [9] Yeh, W.-C., Chuang, C. and Lee, C. Uniform Parallel Machine Scheduling with Resource Consumption Constraint. *Applied Mathematical Modelling*, 2014; 39(8): 2131-2138.
- [10] Hansen, P. and Mladenović, N. Variable Neighborhood Search: Principles and Applications. *European Journal of Operational Research*, 2001; 130(3): 449-467.
- [11] Dib, O., Manier, A., Moalic, L. and Caminada, A. Combining VNS with Genetic Algorithm to Solve the One-To-One Routing Issue in Road Networks. *Computers and Operations Research*, 2017; 78: 420-430.
- [12] Jarumaneeroj, P. and Kunaporn, S. A Variable Neighbourhood Search Approach for Crew Transportation Problems. 2017 the 4th International Conference Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 27-29 April, Nagoya, Japan, 2017.
- [13] Hamzadayi, A. and Yildiz, G. Modeling and Solving Static M Identical Parallel Machines Scheduling Problem with A Common Server and Sequence Dependent Setup Times. *Computers & industrial engineering*, 2017; 106: 287-298.
- [14] Todosijević, R., Hanafi, S., Urošević, D., Jarboui, B. and Gendron, B. A General Variable Neighborhood Search for the Swap-Body Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, 2016; 78: 468-479.



การลดปัญหาการแห้งสัมผัสของสีน้ำมัน

Reduction of Touch Dry Problem of Enamel Paint

พลภัฏฐกร ใจผ่องอัครกุล และ นภัสดวงค์ โอสอศิลป์*

Phalatkorn Jaipongakkharakul and Napassavong Osothsilp*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand
E-mail: phalatkorn.jai@gmail.com, napassavong.o@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสีน้ำมัน (Enamel Paint) เพื่อลดสัดส่วนจำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพจากปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดโดยให้มีต้นทุนที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่ำที่สุด ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ระยะคือ 1) การนิยามปัญหา โดยระบุสภาพปัญหาในปัจจุบันที่จะปรับปรุง 2) การวัด โดยวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี 3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยระดมสมองเพื่อระบุและคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะศึกษา ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญได้แก่ ระยะเวลาปั่นกวนสีและปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ 4) การปรับปรุงแก้ไขปัญหา โดยการใช้การทดสอบสมมติฐานทางสถิติแบบ Two Proportions Z-Test เพื่อหาเวลาในการปั่นกวนสีที่เหมาะสมและใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบชนิตส่วนประสมกลางเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปริมาณสารเร่งแห้งสามชนิด 5) การติดตามควบคุม โดยการทดสอบเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงและกำหนดแผนควบคุม หลังการปรับปรุงพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตลดลงจาก 72% เป็น 21% และสามารถประหยัดต้นทุนที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพได้ 171,084 บาทต่อปี

คำสำคัญ: สีน้ำมัน, การแห้งสัมผัสของสี, การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ, การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

ABSTRACT

The objective of this research is to improve a production process of Enamel paint. This research has an aim to reduce proportion of production cycles that needs quality improvement related to touch dry time over limit with the lowest the quality improvement cost. This research applied Six Sigma methodology, consisting of 5 phases: 1) Define phase: select and define important problem. 2) Measure phase: analyze the accuracy and precision of touch dry inspection system. 3) Analysis phase: brainstorm and select input factors for study, which were stirring time and drier quantity. 4) Improve phase: find out optimum stirring time using Two Proportions Z-Test and optimum drier quantity using Central Composite Design of Experiment (CCD). 5) Control phase: confirm experimental result after improvement and set up a control plan. After improvements, it was found that the proportion of production cycles that need unnecessary quality improvement over limit over one time reduced from 72% to 21% and saved the quality improvement cost of 171,084 bath per year.

Keywords: Enamel Paint, Touch Dry, Hypothesis Testing, Central Composite Design (CCD)

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตสีน้ำมันต้องการให้ระยะเวลาการแห้งสัมผัสของสี (Touch Dry) อยู่ในเวลาที่กำหนด แต่เมื่อผลิตรอบแรกตามสูตรเพื่อการผลิตแล้วมีบางรอบการผลิตที่มีการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดทำให้ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการเติมวัตถุดิบสารเร่งแห้งเพื่อทำให้การแห้งสัมผัสของสีอยู่ในเวลาที่กำหนด ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาต้องเติมสารเร่งแห้งเพื่อการปรับปรุงคุณภาพจำนวนหลายรอบซึ่งเกินความจำเป็น เนื่องจากไม่ทราบปริมาณสารเร่งแห้งที่ต้องเติมที่เหมาะสม ซึ่งหากจำเป็นต้องมีการเติมสารเร่งแห้งควรมีการเติมเพียง 1 รอบเท่านั้นเพื่อที่จะทำให้การแห้งสัมผัสของสีอยู่ในระยะเวลาที่กำหนด

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง เพื่อลดสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบ และมีต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพต่ำสุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้แนวทางการปรับปรุงคุณภาพ [1-5] ตามแนวทางซิกซ์ ซิกมาซึ่งมี 5 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การนิยามปัญหา (Define) ระบุสภาพปัญหาที่จะปรับปรุง กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย
- 2) การวัด (Measure) วิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบคุณภาพการแห้งสัมผัสของสี
- 3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analysis) ระดมสมองเพื่อระบุและคัดเลือกปัจจัยนำเข้า การทดสอบสมมติฐานความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยนำเข้าที่ศึกษา
- 4) การปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Improve) หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกิน

เวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งด้วยการออกแบบการทดลองชนิดพื้นผิวผลตอบ และหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

5) การตรวจติดตามควบคุม (Control) ทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง และกำหนดแผนควบคุมในการติดตามกระบวนการ

การแห้งตัวของสีน้ำมัน [6] คือ สีได้รับออกซิเจนในอากาศเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันตามลำดับ สีเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นฟิล์มสีเคลือบปกป้องพื้นผิว นิยมใช้สารเร่งแห้ง (Drier) เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองในการเร่งการแห้งตัวของแอลคิเดเรซินซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของสีน้ำมัน สารเร่งแห้งที่ใช้แบ่งออกได้ 3 ชนิด ดังนี้

1. Primary Drier ทำหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอลคิเดเรซินให้เกิดการสลายตัวของฟรีเรดิคัลของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์และการแห้งตัวในขั้นตอนต่อไป ช่วยในการแห้งตัวชั้นบนสุดของฟิล์มสี นิยมใช้เป็นโคบอลต์ (Co)

2. Secondary Drier ทำหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของฟรีเรดิคัลของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ทำให้เชื่อมกันเป็นสายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ให้เกิดการแห้งตัวเป็นฟิล์มสีของแอลคิเดเรซิน ช่วยในการแห้งตัวทุกชั้นของฟิล์มสี นิยมใช้เป็นเซอร์โคเนียม (Zr)

3. Auxiliary Drier ทำหน้าที่ส่งเสริมการทำงานของ Primary Drier ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น นิยมใช้เป็นแคลเซียม (Ca) เมื่อแคลเซียมทำงานร่วมกับโคบอลต์จะช่วยในการแห้งตัวชั้นล่างสุดของฟิล์มสี

ปริมาณสารเร่งแห้งโลหะที่แนะนำเทียบกับปริมาณแอลคิเดเรซินรวมในสูตรเพื่อการผลิตที่เหมาะสมต่อการแห้งสัมผัสของสีน้ำมันชนิดแอลคิเดเรซินได้ถูกแนะนำไว้โดยงานวิจัยก่อนหน้า [7],[8] ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าที่แนะนำถูกกำหนดเป็นช่วงค่าต่ำสุดและสูงสุดที่ควรจะใช้ ซึ่งในงานวิจัยผู้วิจัยต้องการทราบค่าที่เหมาะสมที่สุดกับกระบวนการผลิตที่ศึกษา ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะทำการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่ง

แห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง เพื่อนำสมการนั้นมาหาคำตอบค่าปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมที่ทำให้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบลดลงและให้ต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่ำที่สุด

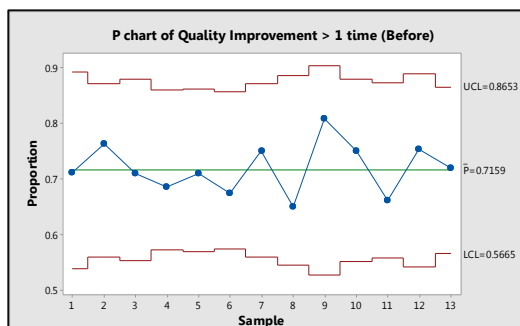
ตารางที่ 1 ปริมาณสารเร่งแห้งโลหะที่แนะนำเทียบกับปริมาณแอลคิลเรซินรวมในสูตรเพื่อการผลิต

Drier	(%Metal Recommend)	
	Minimum	Maximum
Co	0.06	0.20
Zr	0.30	0.40
Ca	0.02	0.30

3. วิธีการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การกำหนดปัญหาของงานวิจัย

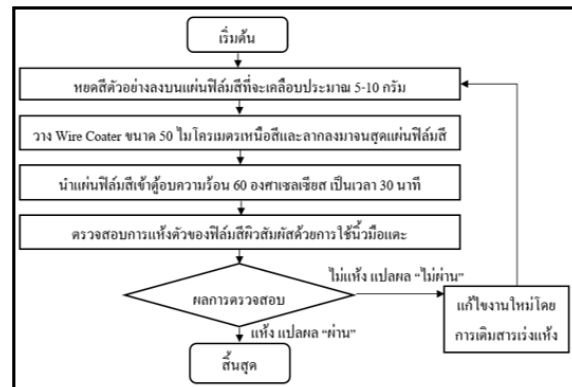
ผู้วิจัยได้สำรวจสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการเติมสารเร่งแห้งมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตในปี พ.ศ. 2560 ดังแสดงในแผนภูมิควบคุม p รูปที่ 1 คิดเป็นค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัญหาเท่ากับ 0.72 ของจำนวนรอบการผลิตที่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด จึงได้กำหนดเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนปัญหานี้ลง 50% จาก 0.72 เหลือเป็น 0.36



รูปที่ 1 แผนภูมิควบคุม p ของสัดส่วนปัญหาก่อนปรับปรุงกระบวนการ

3.2 การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

เริ่มจากการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด (Measurement System Analysis) โดยการประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี โดยมีวิธีการตรวจสอบดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี

การตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสีจะตรวจสอบหลังจากอบแผ่นฟิล์มสีในตู้อบความร้อน 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีแล้ว หาก 30 นาทีแผ่นฟิล์มสีไม่แห้งซึ่งแปลผลเป็น “ไม่ผ่าน” ต้องมีการเติมสารเร่งแห้งเพิ่มเพื่อทำให้การแห้งตัวของแผ่นฟิล์มสีอยู่ในเวลา 30 นาทีตามเกณฑ์ที่กำหนด เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบ

แผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบ	คำอธิบาย	การแปลผล
	สีไม่ติดนิ้วมือ	ผ่าน (G)
	สีไม่ติดนิ้วมือ แผ่นฟิล์มสีเหนียวหนึบเล็กน้อย เมื่อยกนิ้วออก แผ่นฟิล์มสีหลุดออกจากนิ้วมือ	ผ่าน (G)

ตารางที่ 2 (ต่อ) เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบ

แผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบ	คำอธิบาย	การแปลผล
	สิดิติดนิ้วมือ	ไม่ผ่าน (NG)
	ฟิล์มสิดิติดนิ้วขึ้นมา กับนิ้วมือเมื่อยกฟิล์มสี	ไม่ผ่าน (NG)

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสิดิติดนี้

1. คัดเลือกพนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพจำนวน 3 คนที่มีความชำนาญเพื่อนำมาทดสอบการแห้งสัมผัสของสิดิติด
2. กำหนดขนาดตัวอย่างและจำนวนครั้งการตรวจสอบ อ้างอิงเกณฑ์ของ Fasser and Brettner [9] จึงได้กำหนดขนาดตัวอย่างต่ำสุดเป็น 12 รุ่นและพนักงานแต่ละคนจะต้องตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละรุ่น ตัวอย่างสิดิติดประกอบด้วย สิดิติดแห้งตัวอยู่ในเวลาที่กำหนดหรือไม่มีสิดิติดนิ้วมือ แปลผลเป็น “ผ่าน” จำนวน 4 รุ่น สิดิติดแห้งตัวเกินเวลาที่กำหนดหรือมีสิดิติดนิ้วมือ แปลผลเป็น “ไม่ผ่าน” จำนวน 4 รุ่น สิดิติดแห้งตัวอยู่ในเวลาที่กำหนดแบบกำกวมคือ ไม่มีสิดิติดนิ้วมือและแผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบเหนียวหนึบแต่เมื่อยกนิ้วออกแผ่นฟิล์มสีหลุดออกจากนิ้วมือ แปลผลเป็น “ผ่าน” จำนวน 2 รุ่น และสิดิติดแห้งตัวเกินเวลาที่กำหนดแบบกำกวมคือ ไม่มีสิดิติดนิ้วมือและแผ่นฟิล์มสีที่ทดสอบเหนียวหนึบเมื่อยกนิ้วออกแผ่นฟิล์มสียังติดนิ้วมือ แปลผลเป็น “ไม่ผ่าน” จำนวน 2 รุ่น
3. กำหนดพนักงานแต่ละคนตรวจสอบการแห้งสัมผัสของตัวอย่างสิดิติด 12 รุ่นและตรวจสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้งตามลำดับอย่างสุ่ม ประเมินผลการตรวจสอบสิดิติด “ผ่าน” และ “ไม่ผ่าน”
4. ทำการประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบด้วยโปรแกรมมินิแทป โดยเกณฑ์การ

ยอมรับการประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบอ้างอิงเกณฑ์ของ AIAG [10]

Attribute Agreement Analysis

Within Appraisers

Assessment Agreement				
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
1	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
2	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
3	12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: Appraiser agrees with him/herself across trials.

Each Appraiser vs Standard

Assessment Agreement				
Appraiser	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
1	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
2	12	12	100.00	(77.91, 100.00)
3	12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: Appraiser's assessment across trials agrees with the known standard.

Assessment Disagreement						
Appraiser	# NG / G	Percent	# G / NG	Percent	# Mixed	Percent
1	0	0.00	0	0.00	0	0.00
2	0	0.00	0	0.00	0	0.00
3	0	0.00	0	0.00	0	0.00

NG / G: Assessments across trials = NG / standard = G.
G / NG: Assessments across trials = G / standard = NG.
Mixed: Assessments across trials are not identical.

Between Appraisers

Assessment Agreement				
	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
	12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: All appraisers' assessments agree with each other.

All Appraisers vs Standard

Assessment Agreement				
	# Inspected	# Matched	Percent	95% CI
	12	12	100.00	(77.91, 100.00)

Matched: All appraisers' assessments agree with the known standard.

รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสิดิติด

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการตรวจสอบพบว่า ดัชนีชี้วัดทั้งสี่ค่าได้แก่ เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบ เปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพผลความสามารถในการวัดซ้ำของการตรวจสอบมีค่าเท่ากับ 100% ซึ่งผ่านเกณฑ์การยอมรับอ้างอิงจาก AIAG [10] แสดงว่าพนักงานทุกคนเข้าใจวิธีการตรวจสอบและสามารถตัดสินใจได้ถูกต้อง จึงยอมรับความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัดนี้ หลังจากนั้นจะวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการต้องปรับปรุงคุณภาพเรื่องการแห้งสัมผัสของสิดิติดจำนวนหลายรอบ

3.3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

ผู้วิจัยทำการระดมสมอง หาสาเหตุปัจจัยนำเข้าที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา จัดลำดับความสำคัญสาเหตุของปัญหา และคัดเลือกสาเหตุเพื่อทำการปรับปรุงต่อไป

3.3.1 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

ผู้วิจัยได้ใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผลในการหาสาเหตุที่เป็นไปได้ของปัญหาการปรับปรุงคุณภาพการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดจำนวนหลายรอบ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยแยกสาเหตุของปัญหาตามหมวดหมู่ ได้แก่

1) สาเหตุจากพนักงาน (Man) ได้แก่ ปัจจัยพนักงานไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานวิธีการทำงาน พนักงานเผลอเรงแห้งออกจากภาชนะบรรจุไม่หมดทำให้ปริมาณสารเรงแห้งไม่ครบตามที่กำหนด จึงสื่อสารให้เห็นความสำคัญของปริมาณสารเรงแห้งส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี

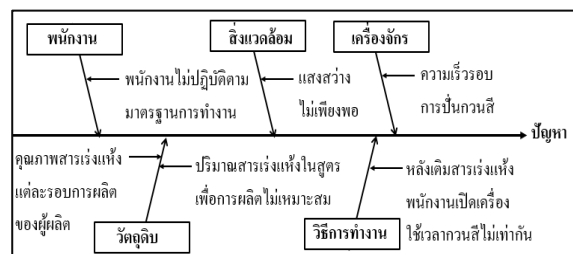
2) สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine) ได้แก่ ปัจจัยความเร็วรอบในการปั่นกวนสีอาจส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี แต่มีข้อจำกัดว่าเครื่องจักรถูกกำหนดความเร็วไว้และไม่สามารถที่จะปรับเปลี่ยนลดความเร็วรอบได้ จึงต้องกำหนดความเร็วรอบเป็นค่าคงที่ 600 รอบต่อนาที

3) สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material) ได้แก่ ปัจจัยความผันแปรเปอร์เซ็นต์โลหะสารเรงแห้งแต่ละรอบการผลิตเมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากเปอร์เซ็นต์โลหะถ้ามีเท่ากับหรือมากกว่าเกณฑ์จะทำให้เร่งปฏิกิริยาการแห้งของสีได้เร็วกว่าเปอร์เซ็นต์โลหะที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด และปัจจัยปริมาณสารเรงแห้งในสูตรเพื่อการผลิตไม่เหมาะสมเนื่องจากสารเรงแห้งที่ใส่ครบสูตรแล้วยังพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาอยู่ ก่อนการปรับปรุงมีแนวทางในการเติมคือ เติมสารเรงแห้งรอบละ 10% ของน้ำหนักสารเรงแห้งที่กำหนดไว้ในสูตรและเติมได้สูงสุด 5 รอบการเติมสารเรงแห้งรอบละ 10% ทำให้ต้องมีการเติมหลายรอบนั่นคือ ปริมาณสารเรงแห้งที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพแต่ละรอบไม่เหมาะสม ดังนั้นปัจจัยความผันแปรเปอร์เซ็นต์โลหะสารเรงแห้งและปัจจัยปริมาณสารเรงแห้งในสูตรเพื่อการผลิตไม่เหมาะสมอาจส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี

4) สาเหตุจากวิธีการทำงาน (Method) ได้แก่ ปัจจัยเวลาที่ใช้น้ำปั่นกวนสีแตกต่างกันส่งผลต่อสารเรงแห้งไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับสี เวลาปั่นกวนสีที่น้อยเกินไปทำให้สารเรง

แห้งกระจายตัวไม่ทั่วถึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการเร่งแห้งของสีช้า ปัจจุบันพนักงานต่างคนใช้เวลาในการปั่นกวนสีไม่เท่ากันจึงต้องหาวลามาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับปั่นกวนสี ดังนั้นปัจจัยเวลาที่ใช้น้ำปั่นกวนสีที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อการแห้งสัมผัสของสี

5) สาเหตุจากสภาพแวดล้อม (Environment) ได้แก่ ปัจจัยแสงสว่างไม่เพียงพอ การตรวจสอบการแห้งของสีใช้นิ้วสัมผัสแผ่นฟิล์มสีและดูว่ามีสีติดนิ้วมือหรือไม่ แสงสว่างจึงส่งผลต่อการพิจารณา ทุกเดือนมีการตรวจวัดแสงสว่างและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นปัจจัยแสงสว่างไม่เพียงพอไม่มีผลต่อการพิจารณาผลการตรวจสอบ



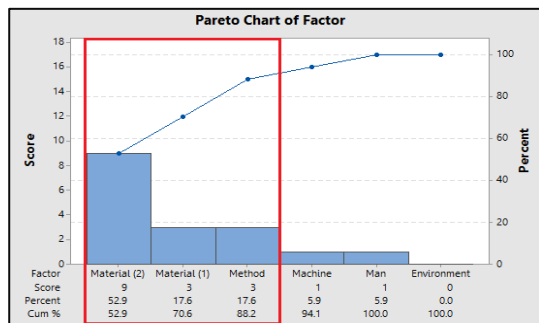
รูปที่ 4 แผนผังแสดงสาเหตุและผลของปัญหาการปรับปรุงคุณภาพการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดหลายรอบ

3.3.2 การจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุของปัญหาโดยเมทริกซ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลปัจจัยทั้งหมดจากแผนผังแสดงสาเหตุและผลมาใส่ลงในเมทริกซ์สาเหตุและผลเพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยมีเกณฑ์ประเมินดังนี้

- 0 หมายถึง ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อปัญหา
- 1 หมายถึง ปัจจัยมีผลกระทบน้อยต่อปัญหา
- 3 หมายถึง ปัจจัยมีผลกระทบปานกลางต่อปัญหา
- 9 หมายถึง ปัจจัยมีผลกระทบสูงต่อปัญหา

จากนั้นใช้กราฟคะแนนและเปอร์เซ็นต์สะสมของคะแนนความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อปัญหา เพื่อคัดกรองสาเหตุที่จะนำไปศึกษาในงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟคะแนนและเปอร์เซ็นต์สะสมของคะแนน ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อปัญหา

จาก 6 ปัจจัยพบว่า มี 3 ปัจจัยที่มีเปอร์เซ็นต์สะสมคะแนนรวมมากกว่า 80% ที่จะนำไปศึกษาในงานวิจัย ซึ่งมีดังนี้

ลำดับ	หมวดหมู่	ปัจจัย
1	Material	สัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่ไม่เหมาะสมในสูตรเพื่อการผลิต
2	Material	ความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตของผู้ผลิต
3	Method	เวลาที่ใช้ปั่นกวนสีหลังเติมสารเร่งแห้งแตกต่างกัน

3.4 การวิเคราะห์และทดสอบนัยสำคัญของปัจจัย

3.4.1 ปัจจัยความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตของผู้ผลิต

การศึกษานี้เพื่อดูว่าเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งมีระดับความผันแปรเป็นไปตามเกณฑ์การควบคุมคุณภาพที่กำหนดให้ โคบอลต์ เซอร์โคเนียม และแคลเซียมมีเปอร์เซ็นต์โลหะเท่ากับ $10 \pm 0.10\%$, $12 \pm 0.10\%$ และ $10 \pm 0.10\%$ ในสารละลายตามลำดับ ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างสารเร่งแห้งชนิดละ 40 รอบการผลิตและหาปริมาณเปอร์เซ็นต์โลหะที่อยู่ในสารเร่งแห้ง

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ โดยพิจารณาความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่จำเป็นในการเก็บข้อมูล ดังสมการที่ 1

$$n = (Z_\alpha)^2 \frac{\left[\frac{1}{9(C_{pk})^2} + \frac{1}{2} \right]}{\left[1 - \frac{C_{pk}}{C_p} \right]^2} \quad (1)$$

จากการคำนวณพบว่าต้องใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 38, 36 และ 38 รอบการผลิต ในการประเมินความสามารถของกระบวนการในเรื่องเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้ง โคบอลต์ เซอร์โคเนียม และแคลเซียมตามลำดับ ข้อมูล 40 รอบการผลิตที่จัดเก็บมาเพียงพอแล้วสำหรับการประเมิน

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ

Drier	Co	Zr	Ca
Histogram			
$\bar{x}$	10.0037	12.0027	10.0038
p-Value	0.115	0.062	0.067
C_p	1.42	1.96	1.69
C_{pk}	1.37	1.90	1.62

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการของข้อมูลเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้ง ผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1) การทดสอบสมมติฐานข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ค่า p-Value จากการทดสอบเท่ากับ 0.115, 0.062 และ 0.067 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นไม่ปฏิเสธ H_0 สรุปว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

2) จากแผนภูมิฮิสโตแกรมพบว่า ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งทั้งสามชนิดอยู่ใกล้ค่าเป้าหมายและความผันแปรของกระบวนการมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนอนุโลม (Tolerance) โดยพิจารณาจากค่า C_p และ C_{pk} ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์ยอมรับที่ 1.33

ดังนั้นปัจจัยความผันแปรของเปอร์เซ็นต์โลหะในสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตมีค่าน้อยและค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้ค่าเป้าหมาย ทำให้เชื่อว่าสารเร่งแห้งแต่ละรอบการผลิตมีเปอร์เซ็นต์โลหะ โคบอลต์ 10% เซอร์โคเนียม 12% และแคลเซียม 10% ในสารละลาย

3.4.2 ปัจจัยเวลาที่ใช้ปั่นกวนสีหลังเติมวัตถุดิบสารเร่งแห้ง

การทดสอบสมมติฐานเวลาที่ใช้ปั่นกวนสีหลังเติมสารเร่งแห้งที่แตกต่างกันว่ามีผลต่อการแห้งสัมผัสของสีหรือไม่ เพื่อกำหนดเป็นเวลามาตรฐานสำหรับปั่นกวนสีในแต่ละรอบ ผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างสีหลังจากที่พนักงานเติมสารเร่งแห้งและใช้เวลาปั่นกวนสี 5, 10, 15 และ 20 นาทีจำนวน 30 รอบการผลิตต่อระยะเวลาปั่นกวนสีค่าหนึ่ง ๆ

การทดสอบสมมติฐานความแตกต่างสัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนดเมื่อเวลาปั่นกวนสีที่แตกต่างกันทำโดยการเปรียบเทียบข้อมูลสัดส่วนที่แต่ละคู่ของเวลาทดสอบด้วย Two Proportions Z-Test ที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 \neq p_2$$

โดยที่

p_1 คือ สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด ณ เวลาที่ใช้ปั่นกวนสีเวลาที่ 1

p_2 คือ สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด ณ เวลาที่ใช้ปั่นกวนสีเวลาที่ 2

สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนดถูกคำนวณดังสมการที่ 2 และผลการตรวจสอบดังแสดงในตารางที่ 4

$$p = \frac{x}{n} \quad (2)$$

โดยที่

p คือ สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด

x คือ จำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด

n คือ จำนวนรอบทั้งหมดที่ทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสี

ตัวแปร	ผลการตรวจสอบการแห้งสัมผัสของสีหลังเติมสารเร่งแห้งและใช้เวลาปั่นกวน ณ เวลาต่าง ๆ			
	5 นาที	10 นาที	15 นาที	20 นาที
x	21	19	10	10
n	30	30	30	30
p	0.70	0.63	0.33	0.33

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างสัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนดที่คู่เวลาทดสอบต่าง ๆ

เวลาที่ 1	p_1	เวลาที่ 2	p_2	p-Value
5 นาที	0.70	10 นาที	0.63	0.291
10 นาที	0.63	15 นาที	0.33	0.007
15 นาที	0.33	20 นาที	0.33	0.500

จากการทดสอบพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบที่สีแห้งสัมผัสเกินเวลาที่กำหนด ณ เวลาปั่นกวนสีที่ 5 และ 10 นาทีไม่แตกต่างกัน เวลา 10 และ 15 นาทีแตกต่างกัน และเวลา 15 และ 20 นาทีไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 วิเคราะห์ได้ว่าหลังเติมสารเร่งแห้งและใช้เวลาปั่นกวนสี 5 และ 10 นาทีสารเร่งแห้งยังไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับสี แต่ที่เวลา 15 นาทีสารมีความเข้ากันมากกว่าที่ 10 นาที ซึ่งถ้าใช้เวลาปั่นกวนสีน้อยเกินไปสารเร่งแห้งกระจายตัวไม่ทั่วถึงเกิดปฏิกิริยาการเร่งแห้งของสีจะช้า ทำให้การแห้งสัมผัสของสีที่ตรวจสอบ ณ เวลา 10 และ 15 นาทีนั้นแตกต่างกัน แต่ ณ เวลา 15 และ 20 นาที ให้ผลไม่แตกต่างกัน แสดงว่าในช่วงเวลาปั่นกวนสี 15 ถึง 20 นาทีสารเร่งแห้งเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับสีแล้ว ผู้วิจัยจึงกำหนดเวลามาตรฐานสำหรับปั่นกวนสีในแต่ละรอบคือ 15 นาที แต่ที่ 15 นาทีนี้สัดส่วนปัญหายังมากอยู่คือ 33% ซึ่งเกิดจากปริมาณสารเร่งแห้งที่ใส่ไม่เหมาะสมจึงต้องศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนี้ต่อไป

3.4.3 ปัจจัยสัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่ไม่เหมาะสมในสูตรเพื่อการผลิต

สารเร่งแห้ง 3 ชนิดทำหน้าที่เร่งการเกิดปฏิกิริยาการแห้งตัวของสีแตกต่างกัน เมื่อพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดในระหว่างกระบวนการผลิตสีจะมีการเติมสารเร่งแห้งทันทีและมีจำนวนหลายรอบเนื่องจากไม่ทราบปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงจะปรับปรุงปัจจัยสำคัญนี้โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมสำหรับสูตรเพื่อการผลิตโดยจะแสดงรายละเอียดในระหว่างการปรับปรุงแก้ไขปัญหา

4. การปรับปรุงแก้ไขปัญหา

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมกับสูตรเพื่อการผลิตที่ทำให้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่พบปัญหาเวลาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดและต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งต่ำที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าที่ศึกษา

ปัจจัยนำเข้าที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารเร่งแห้ง โคบอลต์ เซอร์โคเนียม และแคลเซียม

4.2 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองสำหรับการทดลองคือ สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด (Y_1) และต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง (Y_2) ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนวัตถุดิบสารเร่งแห้ง (Y_3) และต้นทุนการแก้ไขงานใหม่กรณีแต่งเจดสีใหม่ (Y_4)

4.3 การกำหนดแบบการทดลอง

ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) ชนิดส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เนื่องจากแบบการทดลอง CCD จะให้สมการความสัมพันธ์ที่มีความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีกว่าแบบการทดลองอื่น ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยทำให้สร้างเมทริกซ์การออกแบบ (Matrix design) ได้จำนวน 20 การทดลอง (2^k

Factorial Runs ระดับ ± 1 จำนวน 8 การทดลอง, Axial Runs ระดับ $\alpha = \pm 1.682$ จำนวน 6 การทดลอง, Center Runs ระดับ 0 จำนวน 6 การทดลอง)

4.4 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า

ปัจจัยนำเข้าเป็นข้อมูลประเภทผันแปร (Variable Data) ซึ่งสามารถทำการทดลองที่ระดับ ± 1.682 ได้ และระดับของปัจจัยนำเข้าคือ ปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสมกับสูตรเพื่อการผลิต จำนวนดังสมการที่ 3

$$\% \text{ Drier in Recipe} = \left[\frac{\% \text{ Drier Recommend}}{\% \text{ Metal in Drier}} \right] \times \% \text{ Alkyd Resin} \times \left[\frac{\% \text{ Solid Resin}}{100} \right] \quad (3)$$

โดยที่

% Drier in Recipe คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งแต่ละชนิดในสูตรเพื่อการผลิต

% Drier Recommend คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งโลหะที่แนะนำในสูตรการผลิต แสดงไว้ในตารางที่ 1
% Metal in Drier คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณโลหะที่อยู่ในสารเร่งแห้งที่ใช้คือ Co 10%, Zr 12% และ Ca 10%

% Alkyd Resin คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณสารแอลคิเดรีซินที่มีลักษณะเป็นของเหลวรวมทั้งหมดในสูตรเพื่อการผลิต

% Solid Resin คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาณแอลคิเดรีซินของแข็งที่อยู่ในสารละลายแอลคิเดรีซินซึ่งมีค่าเท่ากับ 65%

ตารางที่ 6 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า

ปัจจัย	ระดับที่ทำการทดลอง				
	-1.682	-1	0	+1	1.682
A (Co)	0.63	0.70	0.80	0.89	0.96
B (Zr)	1.41	1.45	1.51	1.57	1.61
C (Ca)	0.77	0.91	1.11	1.31	1.45

หมายเหตุ: ปัจจัยนำเข้าหน่วยเป็น เปอร์เซ็นต์

ระดับต่ำสุดของแต่ละปัจจัย ($\alpha = -1.682$) กำหนดให้อยู่ที่ค่ากลางของช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งที่แนะนำเนื่องจากเป็นปริมาณที่ใช้ในสูตรเพื่อการผลิต ปัจจุบันที่ยังพบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด และยังคงมีการใส่สารเร่งแห้งอีกหลายรอบ ส่วนระดับสูงสุดของแต่ละปัจจัย ($\alpha = +1.682$) กำหนดไว้ที่

ค่าสูงสุดของช่วงเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารเร่งแห้งที่แนะนำ ซึ่งเป็นปริมาณสารเร่งแห้งที่มากเกินไปจนอาจส่งผลให้ฟิล์มเสียหายได้เมื่อแห้งตัวเร็วเกินไป

4.5 การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดลอง

ผู้วิจัยได้กำหนดขนาดตัวอย่างในแต่ละการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนรอบในการผลิตที่ต้องเก็บข้อมูลในแต่ละการทดลองโดยใช้สมการคำนวณหาขนาดตัวอย่างกรณีตัวแปรตอบสนองเป็นข้อมูลประเภทสัดส่วน [11] ดังสมการที่ 4 และ 5

$$n = (Z_{1-\alpha/2} + Z_{1-\beta})^2 / (N)(\delta)^2 \quad (4)$$

$$\delta = \arcsin [\sqrt{p_0 + (\Delta/2)}] - \arcsin [\sqrt{p_0 - (\Delta/2)}] \quad (5)$$

โดยที่

n คือ ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ในการแต่ละการทดลอง

α คือ 0.05 จะได้ $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$

β คือ 0.1 จะได้ $Z_{1-\beta} = 1.282$

N คือ 8 การทดลอง (จำนวนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล)

δ คือ ค่าความแตกต่างของค่าที่ได้รับการแปลงข้อมูลแล้ว

p_0 คือ 0.72 (สัดส่วนปัญหาในปัจจุบัน)

Δ คือ 0.36 (ความเปลี่ยนแปลงที่ต้องการตรวจจับได้คำนวณจากเป้าหมายที่ต้องการลดสัดส่วนปัญหาจาก 0.72 เป็น 0.36 คือ $0.72 - 0.36 = 0.36$)

จากการคำนวณพบว่า ขนาดตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในแต่ละการทดลองที่กำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อย่างน้อยต้องมีค่าเท่ากับ 8 ตัวอย่างหรือ 8 รอบการผลิต

4.6 วิธีทำการทดลอง

วิธีการเตรียมตัวอย่างมีดังนี้คือ ชั่งน้ำหนักและผสมวัตถุดิบตามสูตรเพื่อการผลิตได้แก่ สารเพิ่มเนื้อ สารยัดสารเติมแต่ง แม่สี และตัวทำละลาย ผสมกันเป็นสีตัวอย่าง จากนั้นแบ่งสีออกเป็น 160 ตัวอย่าง (20 การทดลอง ๆ ละ 8 ตัวอย่าง) นำสีแต่ละตัวอย่างเติมสารเร่งแห้งตามสัดส่วนปริมาณตามที่ออกแบบการทดลองไว้แล้วนำมาปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสี 15 นาทีจากนั้นตรวจสอบคุณภาพการ

แห้งสัมผัสของสีว่าแห้งหรือไม่และตรวจสอบคุณภาพค่าความแตกต่างสี (DE) หาก $DE > 0.5$ ซึ่งเกินช่วงที่ยอมรับต้องแก้ไขเคลือบสีโดยแต่งเคลือบใหม่ให้ $DE < 0.5$

4.7 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 7 โดยแต่ละการทดลองคำนวณต้นทุนจาก 8 รอบการผลิต ซึ่งมีน้ำหนักการผลิตเฉลี่ย 2,500 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต

ตารางที่ 7 ผลการทดลอง

การทดลอง	ระดับปัจจัยนำเข้า			ตัวแปรตอบสนอง			
	A	B	C	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	1	-1	1	0.00	84163	77857	6306
2	-1	1	-1	1.00	68343	68343	0
3	0	0	0	0.00	73100	73100	0
4	-1	1	1	1.00	72992	72386	606
5	0	0	0	0.00	73100	73100	0
6	-1.682	0	0	1.00	67106	66500	606
7	0	0	0	0.00	73100	73100	0
8	1.682	0	0	0.00	87456	79700	7756
9	0	0	-1.682	1.00	70606	69700	906
10	0	0	0	0.00	73100	73100	0
11	0	0	0	0.00	73100	73100	0
12	-1	-1	1	1.00	70814	70008	806
13	1	-1	-1	0.00	78649	73814	4836
14	0	-1.682	0	0.00	76746	75100	1646
15	1	1	-1	0.00	79908	76192	3716
16	0	1.682	0	1.00	72206	71100	1106
17	0	0	1.682	0.00	82046	76500	5546
18	0	0	0	0.00	73100	73100	0
19	-1	-1	-1	1.00	65965	65965	0
20	1	1	1	0.00	85541	80235	5306

4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งกับสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด (Y_1) และต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง (Y_2) ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด (Best Subset Regression) เลือกสมการถดถอยที่มีความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีที่สุด โดยใช้เกณฑ์ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับแล้วสูงที่สุด

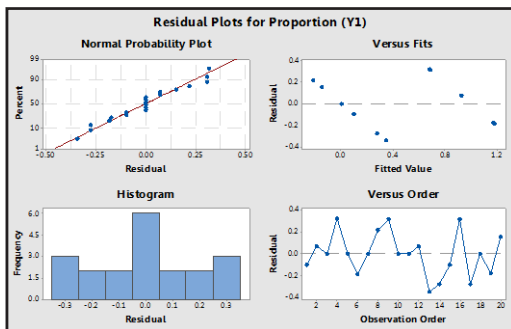
ก. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง กรณีตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด (Y_1) โดยการตรวจสอบสมมติฐาน 3 ข้อดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ค่า p-Value จากการทดสอบเท่ากับ 0.057 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการที่ค่าส่วนตกค้างจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงใน Normal Probability Plot ในรูปที่ 6

2. การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลอง พบว่าไม่แสดงสัญญาณของการเกิดแนวโน้ม สรุปว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

3. การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าพิชของข้อมูลพบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่มไม่มีรูปแบบที่เป็นแนวโน้มเพิ่มตามค่าพิช สรุปว่าความแปรปรวนส่วนตกค้างมีค่าคงที่

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐานเป็นไปตามหลักการ $\epsilon = NID(0, \sigma^2)$ จึงสามารถนำสมการถดถอยไปใช้ในการพยากรณ์ได้



รูปที่ 6 การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างของตัวแปรตอบสนอง Y_1 ของสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่ส่งผลต่อสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด พบว่า สมการถดถอยมีเทอมของผลกระทบหลักของปัจจัยและเทอมกำลังสองของทั้งสามปัจจัยคือ A, B, C, AA, BB และ CC สมการถดถอยมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (s) เท่ากับ 0.236134 และมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการ

ตัดสินใจที่ปรับแล้ว (R-Sq (adj)) เท่ากับ 76.72% ดังแสดงในรูปที่ 7

$$\text{Proportion (Y1)} = 0.0010 - 0.4160 A - 0.1231 B - 0.1231 C + 0.1704 A^2 + 0.1704 B^2 + 0.1704 C^2$$

(6)

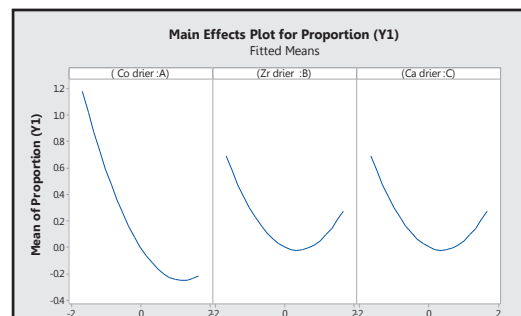
Regression Analysis: Proportion (Y1) versus A, B, C					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	3.82513	0.63752	11.43	0.000
A	1	2.36385	2.36385	42.39	0.000
B	1	0.20711	0.20711	3.71	0.076
C	1	0.20711	0.20711	3.71	0.076
A*A	1	0.41833	0.41833	7.50	0.017
B*B	1	0.41833	0.41833	7.50	0.017
C*C	1	0.41833	0.41833	7.50	0.017
Error	13	0.72487	0.05576		
Lack-of-Fit	8	0.72487	0.09061	*	*
Pure Error	5	0.00000	0.00000		
Total	19	4.55000			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0.236134	84.07%	76.72%	26.21%

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.0010	0.0963	0.01	0.992	
A	-0.4160	0.0639	-6.51	0.000	1.00
B	-0.1231	0.0639	-1.93	0.076	1.00
C	-0.1231	0.0639	-1.93	0.076	1.00
A*A	0.1704	0.0622	2.74	0.017	1.02
B*B	0.1704	0.0622	2.74	0.017	1.02
C*C	0.1704	0.0622	2.74	0.017	1.02

Regression Equation
 Proportion (Y1) = 0.0010 - 0.4160 A - 0.1231 B - 0.1231 C + 0.1704 A^2 + 0.1704 B^2 + 0.1704 C^2

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณสารเร่งแห้งและตัวแปรตอบสนอง Y_1



รูปที่ 8 กราฟผลกระทบของปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง Y_1

ผลกระทบของปัจจัยปริมาณโคบอลต์ (A) ต่อสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอธิบายได้คือ ที่ปริมาณโคบอลต์ระดับต่ำส่งผลให้พบสัดส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีสูง แต่เมื่อปริมาณโคบอลต์มากขึ้นทำให้พบสัดส่วนปัญหาลดลง โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น สิริรับออกซิเจนในอากาศ

ที่ผิวหน้าได้มากทำให้เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลคิดเรซินในสีเกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์และเร่งการสลายตัวเป็นฟรีเรดิคัลซึ่งปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นฟรีเรดิคัลเกิดเร็วขึ้น นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเร็วขึ้น สีจะแห้งตัวเกิดฟิล์มสีได้เร็ว สักส่วนปัญหาจึงลดลงอย่างรวดเร็ว และระดับ 0 ถึง 2 ปริมาณโคบอลต์มีเกินพอที่จะรับออกซิเจน ปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นจากระดับ 0 หรือมากกว่านั้นการแห้งสัมผัสของสีก็อยู่ในเวลาที่กำหนดเช่นเดิม สักส่วนปัญหาจึงไม่เปลี่ยนแปลง

ผลกระทบของปัจจัยปริมาณเซอร์โคเนียม (B) ต่อสักส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอธิบายได้คือ ที่ปริมาณเซอร์โคเนียมระดับต่ำส่งผลให้พบสักส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีสูง แต่เมื่อปริมาณเซอร์โคเนียมมากขึ้นทำให้พบสักส่วนปัญหาลดลง โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ปริมาณเซอร์โคเนียมที่เพิ่มขึ้นจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของฟรีเรดิคัลจำนวนมากเข้าเชื่อมโยงกันเป็นสายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่เร็วขึ้น สีจะแห้งตัวเกิดฟิล์มสีได้เร็ว สักส่วนปัญหาจึงลดลง และระดับ 0 ถึง 2 พบเส้นโค้งมีจุดวกกลับนั้นคือมีสักส่วนปัญหาเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเซอร์โคเนียมที่มากเกินไปทำให้ฟรีเรดิคัลในแอลคิดเรซินเกิดการเคลื่อนย้ายองค์ประกอบภายในทำให้การเชื่อมกันเป็นสายพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ช้า การแห้งตัวของสีจะช้าลง

ผลกระทบหลักปัจจัยปริมาณแคลเซียม (C) ต่อสักส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดอธิบายได้คือ ที่ปริมาณแคลเซียมระดับต่ำส่งผลให้พบสักส่วนปัญหาการแห้งสัมผัสของสีสูง แต่เมื่อปริมาณแคลเซียมมากขึ้นทำให้พบสักส่วนปัญหาลดลง โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้นจะเร่งการเปิดช่องนำออกซิเจนในอากาศที่ผิวหน้าสีเข้าสู่ชั้นล่างสุดของฟิล์มสีไปเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันคล้ายกับโคบอลต์และเป็นช่องทางทำให้ตัวทำละลายระเหยออกได้ง่าย ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มขึ้น ฟรีเรดิคัลเกิดเร็วขึ้น ตัวทำละลายระเหยออกได้มากขึ้น สีแห้งตัวเกิดฟิล์มสีได้เร็ว

สักส่วนปัญหาจึงลดลง และระดับ 0 ถึง 2 พบเส้นโค้งมีจุดวกกลับนั้นคือมีสักส่วนปัญหาเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณแคลเซียมที่มากเกินไปได้นำน้ำจากอากาศเข้ามาด้วย ตามสมการเคมี $\text{Ca} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้ฟิล์มสีมีน้ำเข้ามาในระบบ การแห้งสัมผัสของสีจึงช้าลง

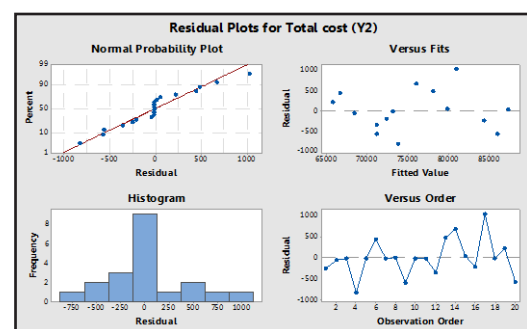
ข. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง กรณีตัวแปรตอบสนองเป็นต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้ง (Y_2) โดยการตรวจสอบสมมติฐาน 3 ข้อดังนี้

1. การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ ค่า p-Value จากการทดสอบเท่ากับ 0.084 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการที่ค่าส่วนตกค้างจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรงใน Normal Probability Plot ในรูปที่ 9

2. การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับของการทดลองในรูปที่ 9 พบว่า ไม่แสดงสัญญาณของการเกิดแนวโน้ม สรุปว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระ

3. การทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าพิตของข้อมูลพบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่มไม่มีรูปแบบที่เป็นแนวโน้มเพิ่มตามค่าพิต สรุปว่าความแปรปรวนส่วนตกค้างมีค่าคงที่

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐานเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon = \text{NID} (0, \sigma^2)$ จึงสามารถนำสมการถดถอยไปใช้ในการพยากรณ์ได้



รูปที่ 9 การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างของตัวแปรตอบสนอง Y_2 ของสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปัจจัยปริมาณสาร
เร่งแห้งที่ส่งผลต่อต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่ง
แห้ง พบว่า สมการถดถอยมีเทอมของผลกระทบหลักของ
ปัจจัยเทอมกำลังสองของทั้งสามปัจจัยและผลกระทบร่วม
ระหว่างสองปัจจัยคือ A, B, C, AA, BB, CC, AB และ
AC สมการมีค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (s) เท่ากับ
572.652 และมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่ปรับ
แล้ว (R-Sq (adj)) เท่ากับ 99.11% ดังแสดงในรูปที่ 10

$$\text{Total cost (Y2)} = 73113 + 6178 A + 1086 B + 2920 C + 1392 A^2 + 400 B^2 + 1054 C^2 - 240 A^2 B + 206 A^2 C \quad (7)$$

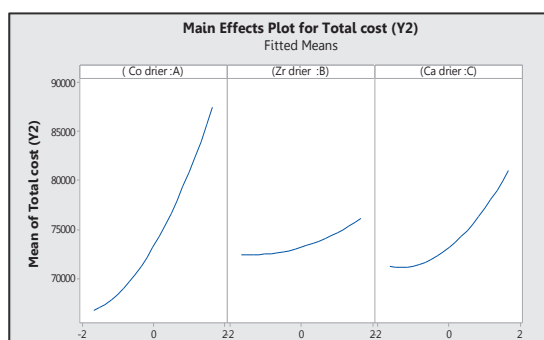
Regression Analysis: Total cost (Y2) versus A, B, C						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	8	695241950	86905244	265.01	0.000	
A	1	521242421	521242421	1589.49	0.000	
B	1	16101741	16101741	49.10	0.000	
C	1	116483239	116483239	355.21	0.000	
A*A	1	27925488	27925488	85.16	0.000	
B*B	1	2309426	2309426	7.04	0.022	
C*C	1	16021511	16021511	48.86	0.000	
A*B	1	460800	460800	1.41	0.261	
A*C	1	339554	339554	1.04	0.331	
Error	11	3607231	327930			
Lack-of-Fit	6	3607231	601205	*	*	
Pure Error	5	0	0			
Total	19	698849181				

Model Summary			
S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
572.652	99.48%	99.11%	97.01%

Coefficients					
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	73113	234	313.04	0.000	
A	6178	155	39.87	0.000	1.00
B	1086	155	7.01	0.000	1.00
C	2920	155	18.85	0.000	1.00
A*A	1392	151	9.23	0.000	1.02
B*B	400	151	2.65	0.022	1.02
C*C	1054	151	6.99	0.000	1.02
A*B	-240	202	-1.19	0.261	1.00
A*C	206	202	1.02	0.331	1.00

Regression Equation
Total cost (Y2) = 73113 + 6178 A + 1086 B + 2920 C + 1392 A² + 400 B² + 1054 C² - 240 A²B + 206 A²C

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณสารเร่งแห้ง
และตัวแปรตอบสนอง Y₂



รูปที่ 11 กราฟผลกระทบของปัจจัยปริมาณสารเร่งแห้งที่มี
ต่อตัวแปรตอบสนอง Y₂

ผลกระทบของปัจจัยปริมาณโคบอลต์ (A) ต่อต้นทุน
รวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งอธิบายได้คือ ที่
ปริมาณโคบอลต์ระดับต่ำ ต้นทุนรวมจะต่ำ แต่เมื่อปริมาณ
โคบอลต์มากขึ้นทำให้ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้น โดยที่ช่วง
ระดับ -2 ถึง 0 ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณโคบอลต์
ที่เพิ่มขึ้น แต่ช่วงระดับ 0 ถึง 2 ต้นทุนรวมสูงขึ้นมาก
เนื่องจากโคบอลต์มีสีม่วงเข้มถ้าเติมปริมาณมากจะทำให้
เจดสีเพี้ยนไปจากเจดสีมาตรฐานต้องมีการปรับเจดสีด้วย
การเติมแม่สีเพิ่มทำให้มีต้นทุนการแก้ไขงานใหม่กรณีแต่ง
เจดสีใหม่รวมอยู่ด้วย

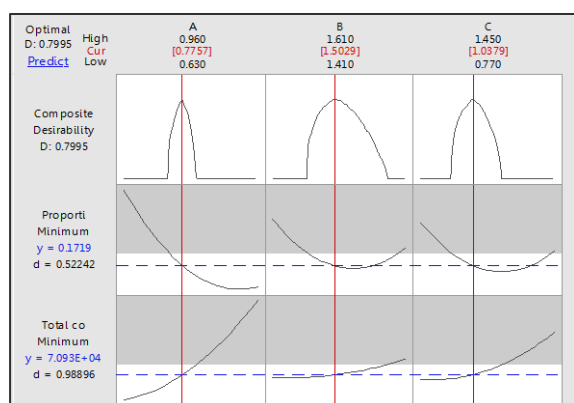
ผลกระทบหลักปัจจัยปริมาณเซอร์โคเนียม (B) ต่อ
ต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งอธิบายได้คือ
ที่ปริมาณเซอร์โคเนียมระดับต่ำ ต้นทุนรวมจะต่ำ แต่เมื่อ
ปริมาณเซอร์โคเนียมมากขึ้นทำให้ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้น
โดยที่ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ
เซอร์โคเนียมที่เพิ่มขึ้น สำหรับเซอร์โคเนียมมีสีใสการเติม
ปริมาณมากไม่ได้มีผลทำให้เจดสีเพี้ยนไปจากเจดสี
มาตรฐานจึงไม่มีต้นทุนการแก้ไขงานใหม่

ผลกระทบหลักปัจจัยปริมาณแคลเซียม (C) ต่อ
ต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งอธิบายได้คือ
ที่ปริมาณแคลเซียมระดับต่ำ ต้นทุนรวมจะต่ำ แต่เมื่อ
ปริมาณแคลเซียมมากขึ้นทำให้ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นโดยที่
ช่วงระดับ -2 ถึง 0 ต้นทุนรวมมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ
แคลเซียมที่เพิ่มขึ้น แต่ช่วงระดับ 0 ถึง 2 ต้นทุนรวมสูงขึ้น
มาก เนื่องจากแคลเซียมมีสีเหลืองเข้มถ้าเติมปริมาณมากจะ
ทำให้เจดสีเพี้ยนไปจากเจดสีมาตรฐานต้องมีการปรับเจด
สีด้วยการเติมแม่สีเพิ่มทำให้เกิดต้นทุนการแก้ไขงานใหม่
กรณีแต่งเจดสีใหม่รวมอยู่ด้วย

4.9 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยด้วย
โปรแกรมมินิแทปฟังก์ชัน Response Optimization
งานวิจัยกำหนดเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนปัญหาจาก 0.72
เป็น 0.36 แต่ต้องการทราบค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ไม่
พบปัญหานั้นคือ สัดส่วนปัญหาเท่ากับศูนย์ จึงกำหนด
จุดประสงค์ตัวแปร Y₁ เป็นแบบค่าต่ำสุด (Minimum)

กำหนดค่า Upper เท่ากับ 0.36 เป็นสัดส่วนมากที่สุดที่ยอมรับได้ และสำหรับตัวแปรตอบสนองต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายไว้ให้มีค่าต่ำที่สุด จากผลการทดลองพบว่ามีการทดลองที่มีค่า Y_1 เท่ากับ 0.00 ได้และมีต้นทุนรวม (Y_2) เป็น 73,100 บาท ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่น ๆ แต่ผู้วิจัยต้องหาปริมาณสารเร่งแห้งที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนอง Y_1 และ Y_2 ที่ดีกว่าค่าที่ระดับการทดลองนี้ จึงกำหนดจุดประสงค์ของตัวแปร Y_2 เป็นแบบค่าต่ำสุด (Minimum) และกำหนดค่า Upper ของ Y_2 เท่ากับ 73,100 บาท ให้เป็นต้นทุนรวมมากที่สุดที่ยอมรับได้และกำหนดค่าเป้าหมาย (Target) ลดลงอีก 3% จาก 73,100 บาท ได้ซึ่งเท่ากับ 69,445 บาท ผลการหาค่าที่เหมาะสมได้ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผลการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

จากการหาค่าที่เหมาะสมพบว่า การพยากรณ์ทำให้ได้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีกินเวลาที่กำหนดเท่ากับ 17% และต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งเท่ากับ 70,931 บาท ต่อ 8 รอบการผลิต สามารถหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือปริมาณโคบอลต์ 0.7757% เซอร์โคเนียม 1.5029% และแคลเซียม 1.0379% ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณต้นทุนระดับการผลิตจริงจะเป็นต้นทุนจากวัตถุดิบสารเร่งแห้งเท่านั้นได้เท่ากับ 71,464 บาท ผู้วิจัยเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมและสัดส่วนใหม่ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมและสัดส่วนใหม่

หัวข้อ	สัดส่วนเดิม	สัดส่วนใหม่	สัดส่วนใหม่
Co (%)	0.630	0.7757	0.7950
Zr (%)	1.410	1.5029	1.5110
Ca (%)	0.770	1.0379	1.1100
ต้นทุนสารเร่งแห้ง 8 รอบการผลิต (บาท)	61,100	71,464	73,100
ต้นทุนสารเร่งแห้ง 1 รอบการผลิต (บาท)	7,638	10,364	12,000
ต้นทุนสารเร่งแห้งที่เพิ่มขึ้นจากสัดส่วนเดิม 1 รอบการผลิต (บาท)	-	+1,295	+1,500
ต้นทุนค่าแรงงานและค่าไฟฟ้า 1 รอบการผลิต (บาท)	-	+50.74	+50.74
ต้นทุนรวมต่อ 1 รอบการผลิต (บาท)	-	1,345.74	1,550.74
สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีการแห้งสัมผัสของสีกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพ	30% (จริง)	17% (ผลจาก Response Optimization)	0% (ผลการทดลอง)

ก่อนการปรับปรุงพบว่า มีเพียง 30% ของจำนวนรอบการผลิตทั้งหมดที่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีกินเวลาที่กำหนดเท่านั้นเป็นเพราะแต่ละรอบการผลิตได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน แสดงว่า ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมมีความเหมาะสมกับสูตรอยู่ในระดับหนึ่ง หากใช้ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนใหม่ตามการทดลองที่ให้ผลสัดส่วนปัญหาเป็นศูนย์ทำให้ต้นทุนรวมจะเพิ่มสูงมาก จึงตัดสินใจให้ใช้

ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมในการผลิตสปีกิตแต่จะใช้สัดส่วนใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพเมื่อพบปัญหาหลังจากการใช้ปริมาณสารเร่งแห้งสัดส่วนเดิมแล้วเพื่อลดจำนวนรอบการปรับปรุงคุณภาพจาก 3-4 รอบให้เหลือ 1-2 รอบ

ผู้วิจัยมีแนวคิดจะทำให้ต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งต่ำที่สุด โดยแนวคิดในการกำหนดปริมาณสารเร่งแห้งที่จะใช้มี 2 แนวทางดังนี้คือ

แบบที่ 1 ใช้สัดส่วนใหม่ตามการทดลองที่ให้ผลสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเหลือเป็นศูนย์ แสดงว่าจะมีการปรับปรุงคุณภาพเพียง 1 รอบต่อรอบการผลิตโดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 เลย ซึ่งมีต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ 1,550.74 บาทต่อรอบการผลิต

แบบที่ 2 ใช้สัดส่วนใหม่ที่ได้จากค่าที่เหมาะสมด้วย Response Optimization ในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 โดยยอมให้มีการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 อีก 17% แต่จะสามารถลดต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลงจากแบบที่ 1 เท่ากับ 205 บาทต่อรอบการผลิตพิจารณาผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 อีก 17% ซึ่งน้อยกว่าเป้าหมายที่กำหนด ผู้บริหารยอมเสียเวลาในการแก้ไขงานใหม่เพราะเวลาที่เหลือทันตามเวลาในการส่งมอบผลิตภัณฑ์ที่กำหนดไว้ 2 วัน แต่ยังสามารถประหยัดต้นทุนรวมเพิ่มได้อีกด้วย ซึ่งมีต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ 1,345.74 บาทต่อรอบการผลิตในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 และเมื่อปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 ตามปริมาณที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมแล้วยังพบปัญหาอยู่ต้องปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 โดยเติมสารเร่งแห้งเพิ่มอีกให้เป็นไปตามสัดส่วนของการทดลองที่ให้ผลสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเหลือเป็นศูนย์ ซึ่งต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ 255.74 บาทต่อรอบการผลิตในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2

ผู้วิจัยคำนวณต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแบบที่ 1 และ 2 โดยอ้างอิงจากข้อมูล 30% หรือ 641 รอบการผลิตที่มีการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่

ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพในปี พ.ศ. 2560 ดังนั้นต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแบบที่ 1 เท่ากับ 994,024.3 บาท และแบบที่ 2 เท่ากับ 890,495 บาท โรงงานกรณีศึกษาจึงตัดสินใจที่จะใช้ปริมาณสารเร่งแห้งในการปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิดแบบที่ 2 คือ ยอมให้มีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 2 อีก 17% สามารถประหยัดต้นทุนจากแบบที่ 1 ได้ 103,529.3 บาทต่อปีสรุปปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพ แสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพ

สารเร่งแห้ง	สัดส่วนเดิม	ปริมาณสารเร่งแห้งที่ดัดแปลงในการปรับปรุงคุณภาพ	
		รอบที่ 1	รอบที่ 2
Co (%)	0.630	+0.1457	+0.0193
Zr (%)	1.410	+0.0929	+0.0072
Ca (%)	0.770	+0.2678	+0.0722

5. การติดตามควบคุมกระบวนการ

5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบยืนยันผลหลังการปรับปรุงจำนวน 81 รอบการผลิตที่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนด โดยใช้ปริมาณสารเร่งแห้งที่ใช้ในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 และ 2 ตามตารางที่ 9 จากนั้นคำนวณหาขนาดตัวอย่างเพื่อทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าสัดส่วนแบบ Two Proportions ก่อนและหลังปรับปรุง ดังแสดงในสมการที่ 8 โดยจะเป็นสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเฉพาะที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตเท่านั้น

$$n = \frac{(z_{1-\alpha/2} \sqrt{2pq} + z_{1-\beta} \sqrt{p_1q_1 + p_0q_0})^2}{(p_1 - p_0)^2} \quad (8)$$

โดยที่

n คือ ขนาดตัวอย่างที่ต้องจัดเก็บก่อนและหลังปรับปรุง

p_0 คือ สัดส่วนปัญหาปัจจุบันก่อนปรับปรุงกระบวนการ โดย $p_0 = 0.72$ และ $q_0 = 1 - p_0$

p_1 คือ สัดส่วนปัญหาเป้าหมายที่จะลดลงหลังปรับปรุงกระบวนการ โดย $p_1 = 0.36$ และ $q_1 = 1 - p_1$

$\bar{p}$ คือ ค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัจจุบันก่อนปรับปรุงกระบวนการ และสัดส่วนปัญหาเป้าหมายที่จะลดลงหลังปรับปรุงกระบวนการ $[(p_0 + p_1)/2]$ โดยที่ $\bar{q} = 1 - \bar{p}$

$1-\alpha/2$ คือ ระดับความเชื่อมั่นกำหนดให้เป็น 95%

$1-\beta$ คือ กำลังการทดสอบ กำหนดเป็น 0.9

จากการคำนวณพบว่า ขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้เท่ากับ 39 ตัวอย่าง ก่อนปรับปรุงมี 641 รอบการผลิตและหลังปรับปรุงมี 81 รอบการผลิต พบว่าจำนวนข้อมูลมีเพียงพอแล้ว ใน 81 รอบการผลิตพบปัญหาการแห้งสัฟซ์ของสีเกินเวลาที่กำหนดอยู่จำนวน 17 รอบการผลิตที่ต้องปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 ดังนั้นหลังปรับปรุงสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัฟซ์ของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบจะเท่ากับ 0.21 ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายที่ต้องการคือ 0.36

5.2 การทดสอบสมมติฐานของการเปรียบเทียบค่าสัดส่วน

การทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนปัญหาที่ว่าหลังปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าก่อนปรับปรุง ทำการทดสอบโดยใช้ Two Proportions Z-Test ซึ่งมีสมมติฐานที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 > p_2$$

โดยที่

p_1 คือ สัดส่วนปัญหาก่อนปรับปรุงกระบวนการ

p_2 คือ สัดส่วนปัญหาหลังปรับปรุงกระบวนการ

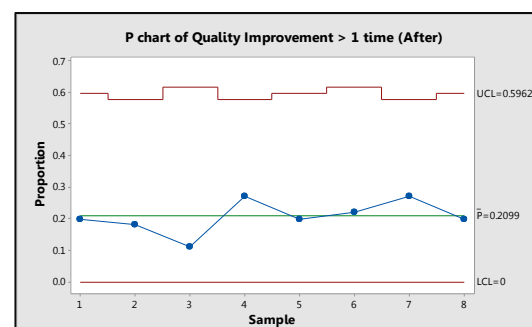
Test and CI for Two Proportions				
Sample	X	N	Sample p	
1	459	641	0.716069	
2	17	81	0.209877	
Difference = p (1) - p (2)				
Estimate for difference: 0.506192				
95% lower bound for difference: 0.426210				
Test for difference = 0 (vs > 0): Z = 10.41 P-Value = 0.000				

รูปที่ 13 ผลการทดสอบความแตกต่างสัดส่วนปัญหาก่อนและหลังปรับปรุงกระบวนการ

ค่า p-Value จากการทดสอบมีค่า < 0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่า สัดส่วนหลังการปรับปรุงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.3 การกำหนดแผนภูมิควบคุม

ผู้วิจัยจัดทำแผนภูมิควบคุม p หลังปรับปรุงกระบวนการเพื่อติดตามความเสถียรของสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัฟซ์ของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 แผนภูมิควบคุม p ของสัดส่วนปัญหากหลังปรับปรุงกระบวนการ

จากแผนภูมิควบคุม p พบว่า หลังปรับปรุงกระบวนการไม่มีจุดใดออกนอก LCL และ UCL หมายถึงกระบวนการอยู่ในสภาวะการควบคุมหรือมีความเสถียร ก่อนปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัญหาเท่ากับ 0.7159 และหลังปรับปรุงมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนปัญหาเท่ากับ 0.2099 ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.4 สรุปผลการปรับปรุงกระบวนการ

การปรับปรุงกระบวนการทำให้สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัฟซ์ของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิตจาก 0.72 ลดลงเหลือ 0.21 น้อยกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 0.36 และเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพต่อ 1 รอบการผลิต ก่อนปรับปรุงกระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,576 บาทต่อรอบการผลิต และหลังปรับปรุงกระบวนการมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,307 บาทต่อรอบการผลิต สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 269 บาท

ต่อรอบการผลิต ทั้งนี้ในแต่ละเดือนจะพบปัญหาที่ต้องปรับปรุงคุณภาพเฉลี่ย 53 รอบการผลิตต่อเดือน ซึ่งสามารถประหยัดต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลงได้ 171,084 บาทต่อปี

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยตาม 5 ขั้นตอนหลัก เริ่มจากการกำหนดปัญหา การประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัด การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและการทดสอบสมมติฐานความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยนำเข้า การปรับปรุงแก้ไขปัญหา และการติดตามควบคุมกระบวนการผลิตสัณฐานเพื่อลดสัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบต่อรอบการผลิต โดยมีแนวทางการปรับปรุงหลักคือ ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) แบบพื้นผิวผลตอบชนิตส่วนประสมกลางในการหาสัดส่วนปริมาณสารเร่งแห้งที่เหมาะสม ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการปรับปรุงคือ การปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 1 โดยเติมสารเร่งแห้งในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากสัดส่วนเดิมให้เป็นตามสัดส่วนที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนรวมที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสารเร่งแห้งต่ำที่สุด ซึ่งจะทำให้ยังพบจำนวนรอบการผลิตที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 อีก 21% ในการปรับปรุงคุณภาพรอบที่ 2 จะเติมสารเร่งแห้งเพิ่มอีกให้เป็นไปตามสัดส่วนที่เคยทำการทดลองแล้วพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มี

ปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเหลือเป็นศูนย์ เมื่อได้ใช้แนวทางในการปรับปรุงนี้แล้วพบว่า สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพมากกว่า 1 รอบลดลงจากก่อนปรับปรุง 72% เป็น 21% หลังจากปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 2 แล้วไม่พบปัญหาการแห้งสัมผัสของสีเกินเวลาที่กำหนดเลยแสดงว่าไม่มีการปรับปรุงคุณภาพในรอบถัดไป ซึ่งลดลงจากที่ก่อนปรับปรุงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 2 เท่ากับ 50% มีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 3 เท่ากับ 16% และมีการปรับปรุงคุณภาพในรอบที่ 4 เท่ากับ 6% จึงจะทำให้การแห้งสัมผัสของสีอยู่ในเวลาที่กำหนดได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 10 และหลังปรับปรุงกระบวนการสามารถประหยัดต้นทุนรวมที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพลงได้จากก่อนปรับปรุงเท่ากับ 171,084 บาทต่อปี

ตารางที่ 10 สัดส่วนจำนวนรอบการผลิตที่มีจำนวนรอบในการปรับปรุงคุณภาพต่าง ๆ แล้วการแห้งสัมผัสของสีอยู่ในเวลาที่กำหนด ก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ

จำนวนรอบการปรับปรุง คุณภาพแล้วการแห้งตัว ของสีอยู่ในเวลาที่กำหนด	สัดส่วนจำนวนรอบการผลิต	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1	0.28	0.79
2	0.50	0.21
3	0.16	0.00
4	0.06	0.00
รวม	1.00	1.00

เอกสารอ้างอิง

- [1] Allen, T. T. Introduction to Engineering Statistic and Lean Sigma. 2rd ed. London: Springer Publications, 2010.
- [2] Pyzdek, T. and Keller, P. A. The Six Sigma Handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [3] Montgomery, D. C. and Runger, G. C. Applied Statistic and Probability for Engineers. 6th ed. John Wiley & Sons, 2014.
- [4] Rojanarowan, N. and Senprom, T. Glass-mold defective reduction in plastic lenses manufacturing process using six sigma approach. *Advanced Materials Research*, 2011; 156-157: 451-458.
- [5] พิชญ์พันธ์ อุ่นชื่น และ นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์. การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบของชิ้นงานหล่อ, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2561; 25(1): 95-108.

- [6] อรุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [7] Calbo, L. J. Handbook of Coatings Additives. New York: Marcel Dekker, 1987.
- [8] Bielman, J. H. Surface Coating. Chapman & Hall, 1993.
- [9] Fasser, Y. and Brettner, D. Quality and Reliability Engineering International. NY: John Wiley & Sons, 1992.
- [10] AIAG, A. Measurement systems analysis (MSA). 3rd ed. The Automotive Industries Action Group, 2002.
- [11] Bisgaard, S. and Fuller, H. T. Sample Size Estimate for Two-Level Factorial Designs with Binary Response. *Journal of Quality Engineering*, 1994.

Effect of pH on Acidification of Whey, Yeast and Yolk Wastewaters

Pacharawan Hanjai^{*1}, Somjai Karnchanawong¹ and Seni Karnchanawong¹

^{*1}Department of Environmental Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

^{*}Corresponding author E-mail: parrot062@gmail.com, Tel. 053-944192

ABSTRACT

The acidification of protein wastewaters was investigated under different operational pH values (4.14 – 7.09) at ambient temperature. Synthetic whey, yeast and yolk wastewaters were used as the substrates. Three lab-scale continuously stirred tank reactors (CSTRs), each with a working volume of 2 L, were employed as acidogenic reactors. They were operated at a hydraulic retention time (HRT) of 4 h with a substrate concentration around 2 gCOD/L, corresponding to organic loading rates (OLRs) of 12.9 – 14.7 gCOD/L · d. Whey wastewater was the most sensitive to pH with the maximum acidification efficiency of 30.9% and acidification rate of 3.88 gCOD/L · d at pH 4.14. The highest acidification efficiency and acidification rate of yeast wastewater were found in neutral pH range (7.09) at 4.6% and 0.52 gCOD/L · d, respectively. Yolk wastewater was better acidified in slightly acidic condition (pH 5.52) with the maximum efficiency and rate at 4.6% and 0.38 gCOD/L · d, respectively. When comparing the system performance with no pH control condition of each wastewater, pH adjustment is not necessary. The results of this study confirmed that pH adjustment cost could be saved in the acidogenic CSTR of the two-phase anaerobic treatment of the protein wastewaters.

Keywords: Acidification efficiency, Acidification rate, CSTR, pH, Whey, Yeast, Yolk

1. Introduction

The imbalances of acid-forming bacteria and methane-forming bacteria caused the accumulation of intermediary acid products which provided the inhibition of methanogenic bacteria. This rationale led to the separation of the acidogenic and methanogenic phase into two-phase systems [1-2]. The anaerobic two-phase reactor needs a significant amount of a high total chemical oxygen demand (TCOD) content in the influent substrate for the fermentation process. The acidification converts organic matter in the influent wastewater into volatile fatty acids (VFAs) by acidogenic microorganisms. VFAs are the intermediate products from the fermentation process which were further converted to methane in the successive methanogenic reactor [3-4].

Acidification process is mainly influenced by a series of operational parameters, such as HRT, OLR, pH and temperature [5]. The pH affected the bacterial growth rate while pH changes may cause a drastic variation in the relative number of different species in the heterogeneous population in the acidogenic

reactor [6]. Many studies found the influence of pH on the acidogenic process inferring that a slightly acidic pH near 6.00 improved the reactor performance for acidogenesis bacterium [7-8]. Wang et al., [9] found that high VFA production could be obtained by fermenting food waste seeded with anaerobic sludge at pH 6.00.

The process of anaerobic digestion undergoing a high OLR could be tended to deterioration even failure due to direct inhibition and VFAs overload. More often, process instability could be affected by rapid changes in feedstock composition or OLR and unsuitable pH range [10-11]. Han et al. [12] operated multistep sequential batch two-phase anaerobic treatment for the food waste and found a suitable pH range between 6.50 – 7.00 during the acidogenic step. The favourable pH conditions in acidogenesis were 5.20 – 6.50, while they were 6.60 – 8.50 for acetogenic/methanogenic bacteria in dairy manure treatment [13]. Nevertheless, the information on the effect of the acidification

process under various pHs is rather limited in protein wastewater.

Many studies have been carried out on acidification of wastewater such as dairy, cheese whey, starch, lactose and gelatin. A few full-scale reactors have been applied to treat wastewater [7], [14 – 19]. The information on acidification of protein wastewater is rather limited although many industrial and agricultural wastewaters contain appreciable quantities of protein. Protein is degraded slower than carbohydrate but faster than fat. Type of protein in wastewater, HRT, substrate concentration and pH were essential factors which affected the acidogenic process. The slowly biodegradable matters were found in the protein and fat-containing wastewaters which decreased the performance of the reactor [20]. Treating protein - rich wastewater often results in the formation of scum which accumulates inside the reactor and causes sludge to wash out [21].

Proteins are composed of carbon, nitrogen, and oxygen. Each protein had a polypeptide backbone and associated with each peptide. In which a peptide and its associated side group are called an amino acid. There are 20 amino acids, and the variations in lengths and arrangement determine the different protein. The type of acidogenic fermentation was different for each kind of protein, so it was probable that the conversion pathways to VFAs from proteins would be different. Soluble protein can be hydrolyzed to amino acid then to $\text{NH}_4^+\text{-N}$, pyruvates, and other products. Pyruvates can be transformed directly into VFAs or lactate, which can also be converted to VFAs [22]. Three types of synthetic protein wastewaters which generally found in industrial processing were investigated in this study, i.e., whey (dairy, cheese, bakery), yeast (beer, fermentation process), yolk (animal feed, bakery, ice cream). The objective of this study was to investigate the effect of pH on the acidogenesis of the above mentioned three types of protein wastewaters in CSTRs under ambient temperature.

2. Material and methods

Synthetic protein wastewater was daily prepared from a mixture of tap water (90% by volume), protein substrates for carbon source and domestic wastewater from Chiang Mai

University (CMU) wastewater treatment plant (10% by volume) for micronutrients and trace elements. The domestic wastewater was weekly collected from equalizing tank and stored in 4 °C room before utilization. Tap water was stored overnight to reduce residual chlorine. Three types of protein substrates, i.e., whey powder (Cottage farm ®, USA), yeast extract (Marmite ®, UK) and yolk powder (Yok Intertrade, Thailand) were mixed with tap water and domestic wastewater to the required Chemical Oxygen Demand (COD) concentrations. Total Kjeldahl nitrogen (TKN) and total phosphorus in synthetic wastewaters were analyzed and the COD: N: P ratios were 100: 2: 1.2, 100: 6: 1.8 and 100: 4: 1.2 for whey, yeast and yolk wastewaters, respectively. It indicated a sufficient macronutrient ratio for the bacterial grow at 100: 2: 0.2 [3]. The characteristics of protein substrates were analyzed by the Bureau of Nutrition, Department of Health, Thailand as presented in **Table 1**.

Table 1: The characteristics of protein substrates based on 100 g of wet weight (n = 3)

Parameter	Unit	Type of substrates		
		Whey	Yeast	Yolk
Carbohydrate	g	75.9	25	2.3
Protein	g	10.6	39	29.9
Fat	g	1.9	< 1	61
Water	g	4.8	31.9	3.7
Other ash	g	6.8	3.1	3.1

The digested sludge from an anaerobic sludge digester of CMU wastewater treatment plant, (20.5 gVSS/L) was used as the seed sludge in CSTRs. The seed volume (1.08 – 1.25 L) was mixed with protein wastewaters at ambient temperature for two weeks before loading. Three CSTRs, made from 15.24 cm PVC pipe with 20 cm height which giving a working volume of 2 L, were used. The influent stored in a 20 L plastic tank equipped with a circulating pump was introduced into each CSTRs by a metering pump. A centrifugal pump was used to circulate the liquid content in a CSTR to provide the complete- mix condition. The effluent flowed from each reactor to a 20 L plastic effluent tank. Each CSTR was coupled with 350 mL water replacement plastic bottle submerged in 500 mL beaker to collect the biogas. After the system reached the steady

state, i.e. effluent VFA fluctuations within 15%, data during steady state conditions were investigated.

The experiment was conducted from February to July 2016. The CSTRs were started up at 24 h HRT before stepwise decreased to 20, 16, 12, 8 and eventually 4 h which was maintained throughout the study. Three parallel experiments for whey, yeast and yolk wastewaters were operated under the influent substrate concentration of 2 gCOD/L. The influent in each reactor was adjusted by 4 N HCl, 4 N NaOH or 4 N NaHCO₃ to the required pH condition. The reactor's pH (similar to effluent pH) in each CSTR was adjusted as follows: reactor 1 (whey wastewater) 4.18, 5.49 and 6.50; reactor 2 (yeast wastewater) 4.50, 5.57 and 7.09; reactor 3 (yolk wastewater) 4.55, 5.52 and 6.56. For comparison, data from the similar experiment of three wastewaters without pH control at 4 h HRT during January – February 2016 are included. They are parts of the study on the effect of HRT on acidification without pH control and results are presented elsewhere [23].

The influent and effluent samples were collected from the influent and effluent tanks, respectively. All essential parameters, i.e., COD, pH, suspended solids (SS), volatile suspended solids (VSS) and VFA were analyzed according to Standard Methods [24]. VFA compositions (acetate, propionate, butyrate, *i*-butyrate, valerate, and *i*-valerate) were also analyzed as follows; firstly, a 5 mL of the filtered sample was acidified with 4 N phosphoric acid to a pH less than 3 to convert the fatty acids to their undissociated forms (i.e., acetic acid, propionic acid, butyric acid, etc.). A 1 µL of the acidified sample was analyzed for acetic acid, propionic acid, *i*- and *n*-butyric acid, *i*- and *n*-valerate by Agilent 680 Gas Chromatograph (GC) with HP – FFAP column of 25 mm × 0.32 mm × 0.5 µm and a Flame Ionization Detector (FID). The temperature of the column, injection, and detector were 80°C, 200°C and 250°C, respectively.

To assess the acidification efficiency (AE) and volumetric acidification rate (AR), a mass balance on COD of influent and effluent VFA concentration and VFA converted to biogas were done at steady state condition using Equation 1 - 3 [3, 25] as follows:

$$\text{COD}_{\text{acid}} = \text{effluentCOD}_{\text{VFA}} - \text{influentCOD}_{\text{VFA}} + \text{COD}_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

$$\text{AE} = \frac{\text{COD}_{\text{acid}}}{\text{influentCOD}_{\text{non-VFA}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{AR} = \frac{\text{COD}_{\text{acid}} \times \text{flow rate}}{\text{Volume of reactor}} \quad (3)$$

COD_{VFA} is the fraction of COD presented as VFAs (mgHAc/L) and calculated from theoretical COD equivalent of 1.066 gCOD/gVFA. COD_{non-VFA} is the total COD minus COD_{VFA}. COD_{CH₄} is the fraction of COD converted into methane gas in which it was neglected in this study due to very low and no methane production at 4 h HRT.

The overall performances of the system under the varied operational conditions were evaluated for the statistical significance analysis by using Minitab®. The significant test as *p*-value was examined at a confidence level of 95% [26].

3. Results and discussion

The results of the study including data without pH control [23] are summarised in **Table 2**. The acidogenic CSTRs were operated at 4 h HRT, corresponding to OLRs 12.9 – 14.7 gCOD/L · d. The substrate composition presented in **Table 1**, resulted in various influent characteristics. Yolk powder had a much higher SS and VSS values while whey wastewater gave the distinctly highest VFA concentration. Although the target influent COD was 2 g/L, deviations during the experiment led to slightly different values. The influent temperatures were in the range of 25.1 – 35.2°C. The effluent temperature which was the same as the reactor's temperature was measured instantly in the effluent pipe and found to be lower than the influent and be within mesophilic range (20 - 40°C). Due to the seasonal change in Chiang Mai, Thailand, the ambient temperature usually dropped during winter (November to February). The effect of temperature at the study range was not much, possibly due to rather high operating temperature, i.e., 25.1 – 31.8°C. Yu et al. [7] reported that the effect of HRT on the acidogenesis was more significant than the effect of temperature. The CSTR treating whey wastewater had been operated at OLR 13.2 – 13.9 gCOD/L · d with influent COD 2,199 –

2,321 mg/L while the pH values in the system were varied at 4.18, 5.49 and 6.50. The typical variations of influent and effluent concentration are shown in **Figure 1**.

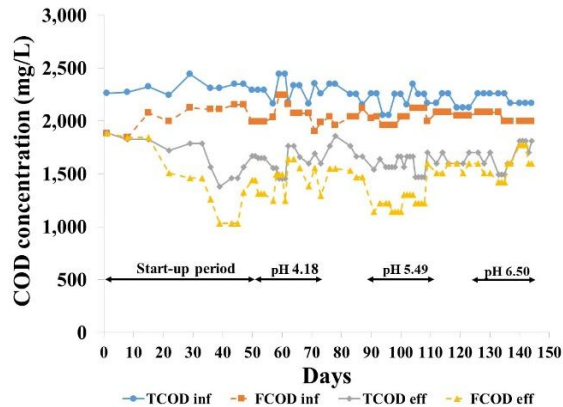


Figure 1. COD concentration variations of whey wastewater during the study

Alkali was added to the influent to raise pH values. However, the effluent pHs were always

lower than the influent. The effluent pH 4.18 was initially planned for 4.50, but it suddenly dropped during the last period of investigation. The influent Filtrated Chemical Oxygen Demand (FCOD)/COD ratios of whey wastewater were in the range of 0.87 to 0.92 which were not much different from the effluent FCOD/COD ratios (0.78 – 0.96). The high FCOD/COD ratio indicated the high proportion of soluble organic matter. The effluent COD was not much different at each operating pH, i.e. 1,556 – 1,685 mg/L. The COD removals of whey wastewater in each operational pH condition were not much different, in the range of 23.6 to 33.0%. In the acidogenic reactor, major COD removal was not expected but the transformation of complex organics and VSS to solubilized VFAs and other intermediates [3].

Table 2: Performance comparison of whey, yeast and yolk wastewaters in the acidogenic CSTRs at various pH values

Parameter	Feed / pH	Whey				Yeast				Yolk			
		4.14 ⁽¹⁾	4.18	5.49	6.50	4.50	5.57	6.30 ⁽¹⁾	7.09	4.55	5.52	6.25 ⁽¹⁾	6.56
OLR	gCOD/L·d	13.8	13.9	13.3	13.2	13.0	12.9	14.2	14.2	13.5	13.1	13.2	14.7
Temp. (°C)	Influent	25.5±1.5	34.1±0.3	31.5±0.7	31.5±0.23	32.2±0.29	31.5±1.7	25.1±0.6	35.2±0.6	29.7±2.72	31.6±0.6	25.9±0.2	34.6±0.0
	Effluent	25.5±3.1	31.4±0.5	29.2±0.5	28.5±0.03	29.0±0.28	29.2±1.7	25.1±0.4	31.8±0.4	27.8±0.49	29.2±0.5	24.9±0.5	31.3±0.1
pH	Influent	6.62±0.1	4.46±0.05	6.83±0.08	6.91±0.07	4.56±0.12	5.35±0.1	6.45±0.04	7.52±0.08	5.08±0.05	5.77±0.05	6.64±0.14	7.59±90
	Effluent	4.14±0.1	4.18±0.12	5.49±0.07	6.50±0.03	4.50±0.08	5.57±0.1	6.30±0.06	7.09±0.08	4.55±0.03	5.52±0.08	6.25±0.28	6.56±99
COD (mg/L)	Influent	2,299±28	2,321±97	2,224±86	2,199±38	2,163±9	2,150±95	2,377±42	2,375±88	2,257±80	2,188±23	2,203±51	2,451±90
	Effluent	1,685±52	1,556±84	1,574±81	1,681±131	1,803±39	1,147±149	1,429±36	1,429±234	1,545±51	1,590±23	1,920±121	1,521±99
	% removal	26.7	33.0	29.2	23.6	16.6	46.7	39.9	39.8	31.5	27.3	12.8	37.9
FCOD (mg/L)	Influent	2,000±109	2,101±117	2,052±68	2,011±30	2,021±32	2,018±71	1,893±91	2,054±80	2,054±76	2,026±50	1,985±135	2,133±46
	Effluent	1,562±78	1,364±105	1,224±64	1,618±131	1,440±41	1,108±36	1,214±38	1,144±86	1,465±42	1,437±37	1,775±102	1,242±90
SS (mg/L)	Influent	363±20	411±34	238±43	336±21	73±11	60±92	326±7	203±11	788±52	1345±74	1903±52	1,262±96
	Effluent	201±35	401±115	235±21	206±28	42±6	54±19	150±8	ND	351±56	985±107	872±189	978±172
	% removal	44.6	2.4	1.3	38.7	42.5	10.1	54.0	ND	55.5	26.8	54.2	22.5
VSS (mg/L)	Influent	341±27	389±31	ND	305±21	64±9	58±74	288±7	193±3	742±47	1339±78	1718±73	1164±76
	Effluent	184±34	376±109	ND	200±37	38±6	51±18	136±7	ND	334±61	949±105	814±225	876±138
	% removal	46.0	3.3	ND	34.4	40.6	12.1	52.8	ND	55.0	29.1	52.6	24.7
VFA (mgHAc/L)	Influent	193±23	213±30	113±4	223±2	60±1	57±5	40±4	53±36	50±2	49±4	22±4	48±1
	Effluent	800±52	787±232	304±7	286±6	76±2	74±13	106±2	139±8	87±4	112±2	79±5	82±3
	% increase	314.5	269.5	169.0	28.3	26.7	29.8	165.0	162.3	74.0	128.6	128.6	70.8

Remark: NA = No data available, (1) = Results without pH adjustment [23]

Yeast wastewater (**Table 2**), with 2,150 – 2,377 mg/L of the influent COD and the FCOD/COD ratios of 0.80 – 0.94 were treated at the operational pHs of 4.50, 5.57, 6.30 and 7.09. The COD removal was rather similar (39.8

– 46.7%) at pH 5.57, 6.30 and 7.09 whereas, it dropped to 16.6% at the low pH (4.50).

The influent COD of yolk wastewater were in the range of 2,188 to 2,451 mg/L with FCOD/COD ratios of 0.87 – 0.93. The operating

pHs of the system were adjusted at 4.55, 5.52 and 6.56, including 6.25 from the non-pH control condition. The COD removal varied without a distinct pattern at 12.8 – 37.9% with the maximum value of 37.9% at pH 6.56. The influent and effluent FCOD/COD ratios were higher than 0.90 except at the pH 6.56. Besides methanogenesis which was minimal in this study, it was still unknown on which reactions or mechanism be responsible for COD removal.

In whey wastewater, the influent SS concentrations were 238 – 411 mg/L with high VSS/SS ratios of 0.91 – 0.95 representing the high proportion of biodegradable solids. The SS and VSS removal of whey wastewater greatly fluctuated at 1.3 – 44.6% and 3.3 – 46.0%, respectively, with effluent VSS/SS ratios of 0.92 – 0.97. The influent SS concentrations of yeast wastewater were lower (60 – 326 mg/L) with the influent VSS/SS ratios of 0.88 – 0.97. The SS and VSS removal varied a lot at 10.0 – 54.0% and 12.1 – 52.8%, respectively with the effluent VSS/SS ratios of 0.90 – 0.94. Yolk wastewater had highest influent SS concentrations of 788 – 1,903 mg/L with the VSS/SS ratios of 0.90 – 0.99 which indicated the less soluble of yolk powder than whey powder and yeast extract. The SS and VSS removal of yolk wastewater fluctuated at 22.5 – 55.5% and 24.7 – 55.0%, respectively, with the effluent VSS/SS ratios of 0.90 – 0.96. The effluent VSS removal indicated that the organic matter in influent VSS was solubilized in the acidogenic reactor by the acidogenic microorganisms [27]. However, new cells of acidogenic bacteria also added up to effluent VSS concentration.

The biogas production of whey wastewater was found in small quantities at pH 4.18 and 5.49 as 6 and 3 mL/d, respectively, and none of the biogas production at pH 4.14 and 6.50. Yeast wastewater at pH 4.50 and 5.57 produced 1 and 3 mL/d of biogas whereas, at pH 6.30 and 7.09 gave no biogas. For yolk wastewater, the highest of biogas production was 5 mL/L at pH 6.25. The others pH had 1 – 3 mL/d of the biogas production. According to Hanjai et al. [23], methanogenesis was suppressed at HRT of 8 h or lower in the CSTRs treating whey, yeast and yolk wastewaters. In general, the acidification had a better performance with the less biogas production at the low HRT.

The variations of influent and effluent VFA concentrations of three substrates are shown in

Figure 2. The effluent VFA was the result of the net value of VFA produced and consumed while the influent itself also contained VFA from protein substrate production. The average influent VFA concentrations of whey wastewater (**Figure 2(a)**) were the highest of the three substrates (113 – 223 mgHAc/L). The effluent VFA extremely increased to 800 and 787 mgHAc/L at pH 4.14 and 4.18, respectively whereas at pH 5.49 and 6.50 it slightly increased to 304 and 286 mgHAc/L, respectively.

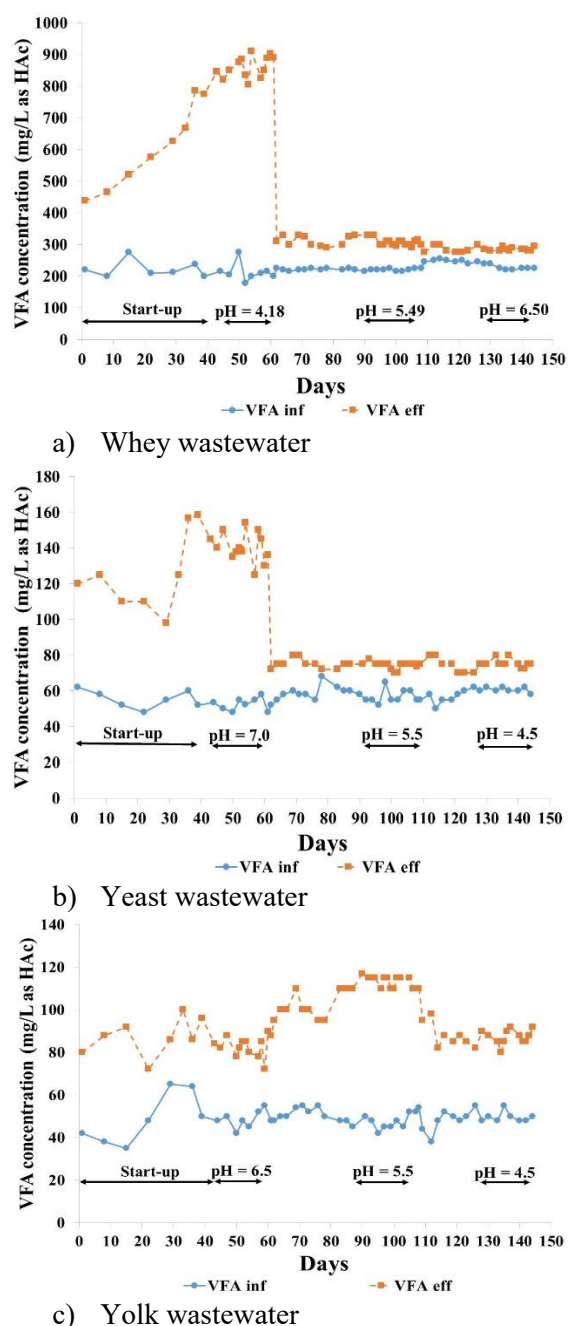


Figure 2. VFA concentration profiles of all protein wastewaters during the study

The average influent VFA of yeast wastewater was 40 – 60 mgHAc/L while the average effluent increased to 74 – 139 mgHAc/L as presented in **Figure 2 (b)**. Yolk wastewater had the lowest VFA concentrations (22 – 50 mgHAc/L) whereas the average effluent VFA increased to 79 – 112 mgHAc/L (**Figure 2 (c)**).

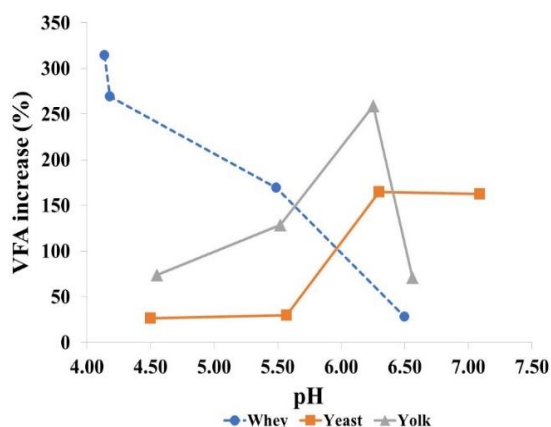


Figure 3. VFA increase of whey, yeast and yolk wastewaters in the acidogenic CSTRs at various pH values

The percentage of VFA increase during the study is shown in **Figure 3**. Low pH was found to be favourable for whey wastewater acidification with a distinct pattern of an increasing percentage of VFA production towards lower pH. The maximum percentage of VFA increase was 314.5% at pH 4.14, a condition without pH adjustment of the influent. The percentage decreased to 169.0% and 28.3% while the pH of the system was reached to 5.49 and 6.50, respectively. The acidic pH range enhanced the increasing of VFA production more than the neutral pH range in whey wastewater. Bengtsson et al. [17] found the optimum pH at 5.25 – 5.50 for VFA production in the acidogenic reactor of dairy and cheese-whey wastewater.

The percentage of VFA increase of yeast wastewater sharply rose as pH approaching neutral range, i.e. 165.0 and 162.3% at pH 6.30 and 7.09, respectively. Yu and Fang, [5] found the high VFA production at pH 6.00 – 6.50 and 12 h HRT in the acidification of the gelatinous wastewater. On the contrary, the study of pharmaceutical wastewater which had a high protein similar to yeast, using the acidogenic CSTR at OLR 14 gCOD/L · d of Oktem et al. [28], the highest acidification efficiency was

found at the operational pH 5.50. At acidic pH range (4.50 and 5.57) of yeast wastewater, the percentage of VFA increase was rather stable at 26.7 – 29.8%.

The percentage of VFA increase of yolk wastewater rose up at higher pH to a maximum of 259.1% at pH 6.30. It was then dropped to 70.8% at pH 6.56. The acidic condition was suitable for the acidogenesis of whey and yolk wastewaters whereas the neutral condition was worthy for yeast wastewater. Elefsiniotis and Oldham [29] reported that the variation of pH between 4.30 and 5.20 did not affect VFA production and COD solubilization of primary sludge, but higher pH level (5.90 – 6.20) affected both parameters in acidogenesis. In additional, Demirel and Yenigun [16] found the higher pH levels from 6.00 to 8.00 affected the dominant microbial populations in an acid reactor treating dairy wastewater. According to the results obtained as presented in **Table 2**, the highest percentage of VFA increase in all wastewater occurred under influent without pH adjustment. It can be concluded that pH adjustment is not necessary for whey, yeast and yolk wastewaters.

The VFA compositions were calculated from individual acids, analyzed by GC over total VFA which was analyzed by titration. The essential VFA products produced in the acidogenic phase are critical because they affect methanogenesis efficiency [30]. The total VFA composition in this study were less than 100% which revealed that other intermediates were also present in the experiment. The main VFA compositions of the influent whey wastewater were 31 – 53% butyrate, 22 – 30% acetate and 11 – 17% propionate at all pH conditions except at pH 6.50 which had no acetate. For yeast wastewater, VFA consisted mainly of 29 – 63% propionate, 15 – 46% butyrate and 8 – 11% *i*-butyrate and *i*-valerate. In the meantime, the VFA composition of the influent yolk wastewater fluctuated with various VFAs such as *i*-valerate, *i*-butyrate, acetate and propionate. The effluent VFA compositions of whey, yeast and yolk wastewaters are shown in **Figure 4**. The complex substrate was broken down into the fermentation products modified to the consecutive methanogenic reactor. Short-chain acids such as acetate, propionate, butyrate and valerate were found to be the main product under fermentation.

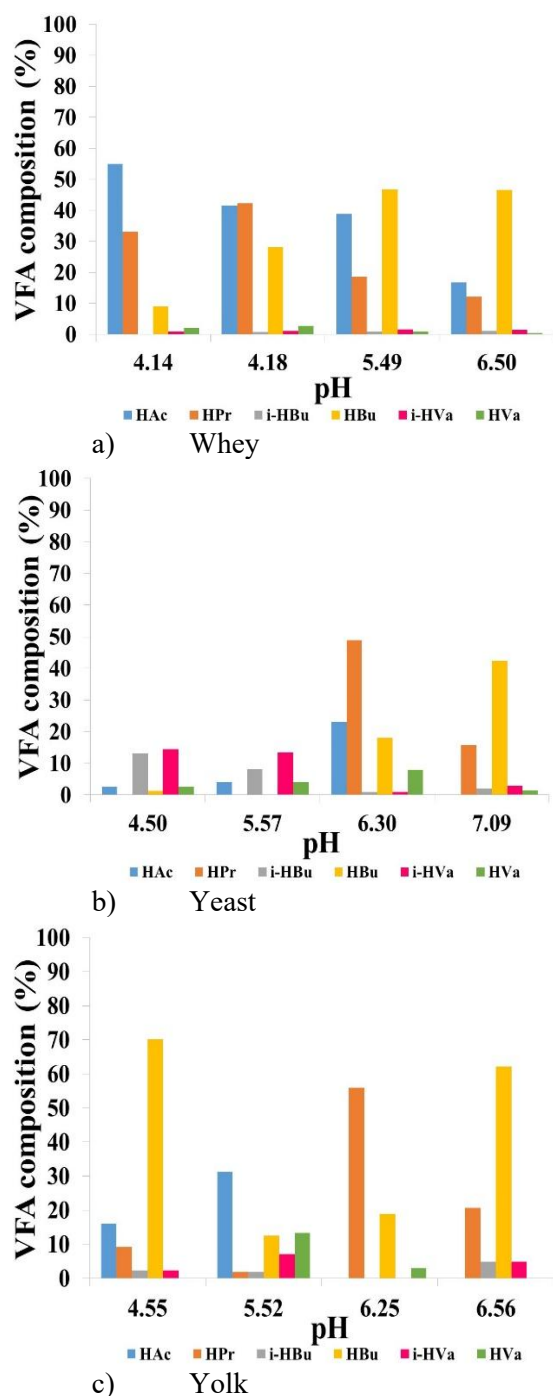


Figure 4. VFA composition in the effluent of whey, yeast and yolk wastewaters at various pH values

In the effluent of whey wastewater, acetate and propionate were found as the predominate with butyrate as the inferior at the acidic pH (4.14 and 4.18). At increasing pH (5.49 and 6.50) butyrate was the main VFA composition with acetate and propionate as the inferior. At all pH conditions of whey wastewater the small

quantities of *i*-butyrate, *i*-valerate and valerate were found except at pH 4.14. In general, the acidic pH favoured the production of alcohols whereas the neutral pH favoured VFA in the acidification of lactose [31]. Zoetemeyer et al. [32] investigated glucose acidification and found that the VFA distribution was not influenced by the pH change. Acetate, butyrate, and *i*-butyrate were the main VFA products at pH 6.00 - 6.50 but at pH 4.50, they were propionate and ethanol. The distribution of product distribution was possibly due to the shift of the microbial population in the reactor [33].

Yeast wastewater had an extreme shift of VFA composition in the effluent with *i*-valerate and *i*-butyrate as the main VFA products with the small quantities of acetate, butyrate, and valerate at acidic pH (4.50 and 5.57). At the neutral pH (7.09) butyrate and propionate were predominant with fewer quantities of *i*-butyrate, *i*-valerate and, valerate. At pH 6.30 propionate was the main VFA composition with acetate and butyrate as inferior.

Meanwhile, The predominant VFA compositions of the effluent yolk wastewater varied in each pH conditions which was butyrate at pH 4.55 and 6.56, acetate at pH 5.52 and propionate at pH 6.25. Butyrate and propionate were found in all pH conditions whereas acetate was found only at the acidic pH condition (4.55 and 5.52). The composition of wastewater was the fundamental characteristic which affected the VFA product and needs to be taken into account when VFAs were produced [34]. Carbohydrate is the main organic matter in the fermentation substrate which found in whey powder. The polysaccharides were firstly degraded to glucose, then pyruvate which was an important intermediate product before utilized to produce acetate and butyrate by the enzyme actions [35]. Protein has been found to be degraded faster than lipids during the hydrolytic-acidogenic stage but slower than carbohydrate [36].

The acidification efficiency and acidification rate obtained during the steady state of all protein wastewaters under various pH values are shown in **Figure 5**. Whey wastewater was the most sensitive to operational pH than yeast and yolk wastewaters with the performance sharply dropped at higher pH condition. The maximum acidification efficiency and acidification rate were found at

pH 4.14 to be 30.9% and 3.88 gCOD/L·d, respectively. The values steadily decreased to 13.2% and 0.4 gCOD/L·d at pH 6.50.

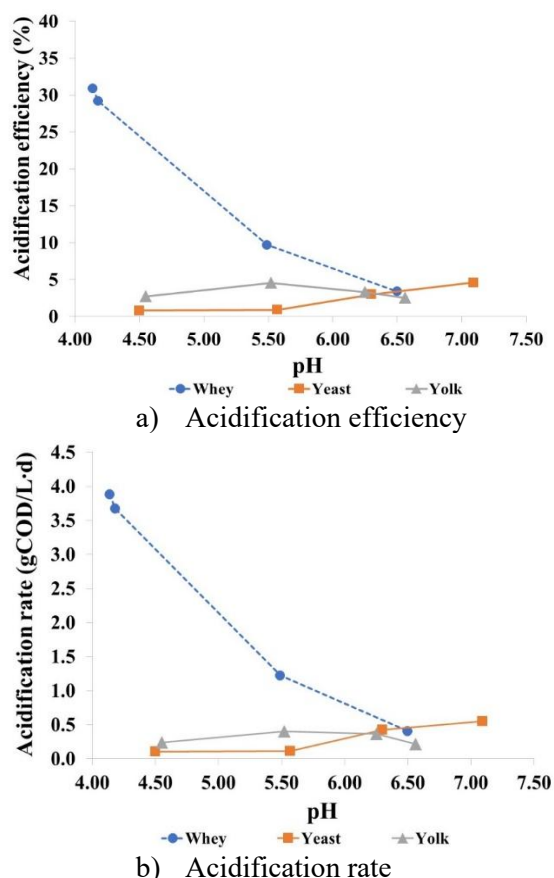


Figure 5. Acidification efficiency and acidification rate of whey, yeast and yolk wastewaters at various pH values

It is hypothesized that a high proportion of carbohydrate (75.9%) in whey powder plays an important role in acidification. The higher acidification efficiency found in dairy effluent or synthetic dairy wastewater was realized as the results of carbohydrate and other easily degradable contents which found to be hydrolysed faster. However, yeast wastewater had an opposite trend with slightly increasing values at higher pH.

The acidification efficiencies and acidification rates in acidic conditions (pH 4.50 and 5.57) were not much different, but they increased to 4.6% and 0.52 gCOD/L·d at pH 7.09, respectively. The slightly acidic pH was suitable for the acidification of yolk wastewater. The maximum acidification efficiency (4.6%) and acidification rate (0.38 gCOD/L·d) were found at pH 5.52 while pH 6.25 also gave a

slightly lower performance. The acidification efficiencies at pH 4.55 and 6.56 dropped to 2.7% and 2.5%, respectively. Comparison of three protein wastewaters indicated that the acidification efficiency was significantly higher for whey wastewater at the acidic pH. The neutral pH was favourable for yeast wastewater whereas the slightly acidic pH benefited to the yolk wastewater. According to, ANOVA at individual confidence level = 98.93% the performance of the study without pH adjustment, i.e. pH values for whey, yeast and yolk wastewaters at 4.14, 6.30 and 6.25, respectively, were better than the conditions with adjusted pH in the system. The pH adjustment is therefore not necessary for protein wastewaters as recommended by some research work [5, 28]. In the protein wastewater treatment, there is a naturally high buffer incapacity to resist pH change and pH adjustment is not beneficial in terms of the economic aspect. The acidogenic CSTR is an important part of the two-phase anaerobic treatment. This study confirmed the effect of pH on acidification of protein wastewater. The result obtained can help to optimize the design and operation of full - scale CSTR.

4. Conclusions

Based on the results obtained, the following conclusions can be drawn. At the same range of COD concentration, whey wastewater had high VFA while yeast wastewater had high SS concentrations. Whey wastewater was the most sensitive to operational pH with decreasing acidification efficiency and acidification rate at higher pH. Yolk wastewater preferred slightly acidic condition while yeast wastewater was better acidified at neutral pH range.

5. Acknowledgement

The research supports from the National Research Council of Thailand (NRCT), and the Graduate School of Chiang Mai University are gratefully appreciated. The authors are thankful to colleagues from the Department of Environmental Engineering, Chiang Mai University for their assistance and recommendations.

References

- [1] Pohland, F. G. and Ghosh, S. Developments in Anaerobic Stabilization of Organic Wastes, The Two-Phase Concept. *Environmental Technology Letters*, 1971; 1: 255 – 266.
- [2] Yu, Y. Research on Soybean Protein Wastewater Treatment by the Integrated Two-Phase Anaerobic Reactor. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2015; 22: 526 – 531.
- [3] Chernicharo, C.A.L. Anaerobic reactors. Biological Wastewater Treatment Series Volume 4, IWA Publishing, London, UK, 2007.
- [4] Shi, X., Leong, K.Y., and Ng, H.Y. Anaerobic Treatment of Pharmaceutical Wastewater: A Critical Review. *Bioresource Technology*, 2017; 245: 1238 – 1244.
- [5] Yu, H.Q. and Fang, H.H.P. Acidogenesis of Gelatin-Rich Wastewater in an Up flow Anaerobic Reactor: Influent of Ph and Temperature. *Water Research*, 2003; 37: 55 – 66.
- [6] Horiuchi, J. I., Van Den Heuvel, J. C., and Cohen, A. pH Influence on Acidogenic Dissimilation of Glucose in an Anaerobic Digester. *Water Research*, 2002; 82: 209 -213.
- [7] Yu, H.Q., Fang, H.H.P., and Gu, G. W. Comparative Performance of Mesophilic and Thermophilic Acidogenic Upflow Reactor. *Process Biochemistry*, 2002; 38(3): 447 – 454.
- [8] Ponsá, S., Ferrer, I., Vázquez, F., and Font, X. Optimization of the Hydrolytic-Acidogenic Anaerobic Digestion Stage (55°C) of Sewage Sludge: Influence of Ph and Solid Content. *Water Research*, 2008; 42: 3972 – 3980.
- [9] Wang, K., Yin, J., Shen, D. and Li, N. Anaerobic Digestion of Food Waste for Volatile Fatty Acids (Vfas) Production with Different Types of Inoculum: Effect of pH. *Bioresource Technology*, 2014; 161: 395 – 401.
- [10] Forster-Carneiro, T., Pérez, M., Romero, L. I. and Sales, D. Dry-Thermophilic Anaerobic Digestion of Organic Fraction of the Municipal Solid Waste; Focusing on the Inoculum Sources. *Bioresource and Technology*, 2007; 98(17): 3195-3203.
- [11] Ferguson, R. M. W., Coulon, F. and Villa, R. Organic Loading Rate: A Promising Microbial Management Tool in Anaerobic Digestion. *Water Research*, 2016; 100: 3195-3203.
- [12] Han, S. K., Shin, S. H., Song, Y. C., Lee, C. Y. and Kim, S. H. Novel Anaerobic Process for the Recovery of Methane and Compost from Food Waste. *Water Science Technology*, 2002; 45: 313.
- [13] Demirer, G.N. and Chen, S. Effect of Retention Time and Organic Loading Rate on Anaerobic Acidification and Biogasification of Dairy Manure. *Journal of Chemistry and Technology Biotechnology*, 2004; 79: 1381 – 1387.
- [14] Ince, O. Performance of a Two-Phase Anaerobic Digestion System when Treating Dairy Wastewater. *Water Research*, 1998; 32(9): 2707 – 2713.
- [15] Yu, H.Q. and Fang, H.H.P. Acidification of Mid- and High- Strength Dairy Wastewater. *Water Research*, 2001; 35(15): 3697 – 3705.
- [16] Demirel, B. and Yenigun, O. (2004). Anaerobic acidogenesis of dairy wastewater: the effect of variations in hydraulic retention time with no pH control. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2004; 79(7): 755 – 760.
- [17] Bengtsson, S., Hallquist, J., Werker, A. and Welander, T. Acidogenic Fermentation of Industrial Wastewater: Effect of Chemostat Retention Time and pH on Volatile Fatty Acids Production. *Biochemical Engineering Journal*, 2008; 40(3): 492 – 499.
- [18] Diamantis, V. I., Kapagiannidia, A. G., Ntougias, S., Tataki, V. and Aivasidis, A. Two-Stage CSTR-UASB Digestion Enables Superior and Alkali Addition-Free Cheese Whey Treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 2014; 84: 45-52.
- [19] Yazar, E., Cirik, K., Ozdemir, S., Akman, D., Cuci, Y. and Cinar, O. Optimization of Two Stage and Single-Stage Anaerobic Reactor Treating Cheese Whey. *Journal of Engineering Sciences*, 2016; 19(1): 25 – 36.
- [20] Chipasa, K.B. and Medrzycka, K. Behaviour of Lipids in Biological Wastewater Treatment Processes. *Journal of Microbiol Biotechnology*, 2006; 33: 635-645.
- [21] Lettinga, G. and Hulshoff Pol, L. W. UASB-Process Design for Various Types of Wastewater. *Water Science & Technology*, 1991; 24. pp. 87 – 107.

- [22] Shen, D., Yin, J., Yu, X., Wang, M., Long, Y., Shentu, J. and Chen, T. Acidogenic Fermentation Characteristics of Different Types of Protein-Rich Substrates in Food Waste to Produce Volatile Fatty Acids. *Bioresource Technology*, 2017; 227: 125 – 132.
- [23] Hanjai, P., Karnchanawong, S. and, Karnchanawong, S. Effect of Hydraulic Retention Time and Substrate Concentration on Acidification of Synthetic Whey, Yeast and Yolk Wastewater. *Transylvanian Review*, 2019.
- [24] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 22nd ed., Washington, DC, USA, 2012.
- [25] Dinopoulou, G., Rudd, T. and Lester, J.N. Anaerobic Acidogenesis of Complex Wastewater: I. The Influence of Operational Parameters on Reactor Performance. *Biotechnology and Bioengineering*, 1988; 31: 958 – 986.
- [26] Getting started with Minitab 17. Minitab Inc, 2016.
- [27] Ghosh, S., Conrad, J. R. and Tanaka, T. Anaerobic Acidogenesis of Sewage Sludge. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1975.
- [28] Oktem, Y. A., Ince, O., Donnelly, T., Sallis, O. and Ince, B. K. Determination of optimum operating conditions of an acidification reactor treating a chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater. *Process Biochemistry*. 2006; 41: 2258 – 2263.
- [29] Elefsiniotis, P., and Oldham, W. K. Effect of HRT on Acidogenic Digestion of Primary Sludge. *Journal of Environment Engineering*, 1994; 120: 645 – 660.
- [30] Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J., and Meng, L. Effect of Volatile Fatty Acid Concentration on Methane Yield and Methanogenic Bacteria. *Biomass and Bioenergy*, 2009; 33: 848 – 853.
- [31] Fang, H.H.P. and Yu, H.Q. Acidification of Lactose Wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 2001; 127(9): 825 – 831.
- [32] Zoetemeyer, R. J., Matthijsen, A. J. C. M., Cohen, A., and Boelhouwer, C. Product Inhibition in the Acid-Forming Stage of the Anaerobic Digestion Process. *Water Research*, 1982; 16: 633 – 639.
- [33] Fang, H.H.P. and Yu, H.Q. Effect of HRT on Mesophilic Acidogenesis of Dairy Wastewater. *Journal of Environment Engineering*, 2000; 126(12): 1145 – 1148.
- [34] Yin, J., Yu, X., Wang, K., and Shen, D. Acidogenic Fermentation of the Main Substrates of Food Waste to Produce Volatile Fatty Acids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016; 41: 21713 – 21720.
- [35] Chen, H., Meng, H. J., Nie, Z. C., Zhang, M. M. Polyhydroxyalkanoate Production from Fermented Volatile Fatty Acid: Effect of Ph and Feeding Regimes. *Bioresource Technology*, 2013; 128: 533- 538.
- [36] Lee, J., Koo, T., Han, G., Shin, S.G. and Hwang, S. Anaerobic Digestion of Cattle Offal: Protein and Lipid-Rich Substrate Degradation and Population Dynamics of Acidogenesis and Methanogens. *Bioprocess Biosystem Engineering*, 2015; 38: 2349 – 2360.



การเปรียบเทียบเทคนิคการแบ่งส่วนภาพ สำหรับตรวจสอบคุณภาพแผ่นวงจรพิมพ์

Comparison of Image Segmentation Techniques for PCB Quality Inspection

จักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร*

Jakkrit Onshaunjit and Jakkree Srinonchat*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

39 Moo 1, Rangsit-Nakhornnayok Rd., Thanyaburi, Pathum Thani, 12110

*E-mail: jakkree.s@en.rmutt.ac.th, Telephone Number: +6689-777-5038

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมการผลิตจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพในทุกขั้นตอนรวมทั้งอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นกัน การสร้างแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) เป็นขั้นตอนแรกๆ ในการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต้องทำการตรวจสอบคุณภาพอย่างละเอียดทำให้สามารถคัดแยกชิ้นงานที่เสียออกแต่เนิ่นๆ ไม่ต้องปล่อยให้เสร็จสิ้นกระบวนการถึงจะมีการตรวจเช็ค เพราะถึงเวลานั้นชิ้นงานจะมีมูลค่าที่สูงทำให้สูญเสียต้นทุนการผลิตมาก การตรวจสอบคุณภาพแผ่นวงจรพิมพ์อัตโนมัติโดยใช้การประมวลผลภาพแบบดิจิทัลเป็นวิธีการที่นำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์เพราะสามารถช่วยให้ประเมินได้อย่างละเอียด เทียบตรง และรวดเร็วกว่า ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลที่ใช้คือการแบ่งส่วนภาพ ซึ่งหากกระบวนการนี้มีความผิดพลาดจะทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจสอบลดลงด้วย งานวิจัยนี้นำเสนอการเปรียบเทียบเทคนิคการแบ่งส่วนภาพสำหรับงานตรวจสอบคุณภาพแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีทั้งหมด 4 วิธีการดังนี้ 1) Global Thresholding 2) Adaptive Thresholding 3) K-means Clustering และ 4) Fuzzy C-means Clustering โดยภาพแผ่นวงจรพิมพ์จำนวน 500 ภาพ ถูกนำมาใช้ในการทดลองและใช้ตัวชี้วัด Intersection over Union, Accuracy, Precision, Recall และ Elapse Time ในการประเมินหาประสิทธิภาพของ 4 วิธีการข้างต้น ผลการทดลองพบว่าวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means มีค่าความถูกต้องมากที่สุดคือ 98.54% รองลงมาคือวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means คือ 97.43% ถึงแม้ว่าวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means จะมีค่าความถูกต้องมากที่สุด แต่ก็ต้องใช้เวลาในการประมวลผลมากเช่นกัน คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means ซึ่งมีความถูกต้องรองลงมาแต่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า โดยทำการแบ่งกลุ่มย่อยด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means จำนวน 2 รอบ ผลการวิจัยที่ได้จากการปรับปรุงวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means ดังกล่าว จะได้ค่าความถูกต้องมากขึ้นอยู่ที่ 98.38% แต่ก็ใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นอีกเล็กน้อย และเลือกใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means ที่ปรับปรุงขึ้นนี้เป็นวิธีการแบ่งส่วนภาพที่เหมาะสมกับการตรวจสอบคุณภาพของแผ่นวงจรพิมพ์ในงานวิจัยต่อไป

คำสำคัญ: การแบ่งส่วนภาพ, การประมวลผลภาพ, การตรวจสอบคุณภาพแผ่นวงจรพิมพ์, เทรชโฮลด์, การจัดกลุ่ม

ABSTRACT

Quality processes control plays an important role not only in Electronics industry but also in the electronics piece parts manufacturing. Printed Circuit Board (PCB) fabrication is one of the beginning processes to produce the electronics piece parts that is required a sophisticated quality control inspection technique. This is to ensure that defective PCBs can be rejected in early stages which it is resulting in higher manufacturing cost than that beginning rejected PCB screening out. An automation of Printed Circuit Board's quality control inspection with a digital image processing technique is one of the introduced methods that it is not only solving that mentioned higher cost but also eliminating an inspection error from human eyes inspection method because it provides higher efficiency, accuracy and less time. One of steps in Digital Image Processing that plays an important role, and also determines the accuracy of PCB quality inspection is Image Segmentation. This research presents a comparison of different image segmentation techniques for PCB quality inspection, in which there are 4 methods as follows 1) Global Thresholding, 2) the Adaptive Thresholding, 3) K-means Clustering and 4) the Fuzzy C-means Clustering. There are a total of 500 images of PCB's that used as the input of this experiment. In this study, the Intersection over Union, Accuracy, Precision, Recall and Elapse Time parameters are used to evaluate the performance of those 4 methods mentioned above. The results show that the Fuzzy C-means Clustering and K-means Clustering methods provide the accuracy of 98.57 % and 97.43% respectively, in which they are better than other methods. Even though the Fuzzy C-means Clustering method gives the best accuracy but it takes much longer processing time than others. Therefore, an improving of K-means Clustering method that provides the second best in accuracy is initiated. In order to improve the accuracy of K-means Clustering method, a dividing of cluster with two iterations under K-means Clustering method is evaluated. The results show that mentioned improving method provides better accuracy of 98.38%, while processing time is slightly increased. Hence, Improve K-means clustering method is considered as an appropriated method for further study and analysis as well as to use for PCB's quality inspection in piece part electronics manufacturing.

Keywords: Image segmentation, Image processing, PCB Inspection, Threshold, Clustering

1. บทนำ

การประมวลผลภาพแบบดิจิทัล (Digital Image Processing) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการแยกแยะและจดจำวัตถุต่างๆ โดยเฉพาะในระบบแมชชีนวิชัน (Machine Vision) ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม แมชชีนวิชันหรืออาจเรียกว่าระบบวิชัน (Vision System) คือระบบที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อที่จะใช้ในการตรวจสอบคุณภาพการผลิต เนื่องจากระบบนี้สามารถตรวจเช็คได้เที่ยงตรงและแม่นยำกว่าการใช้คนตรวจสอบความผิดพลาดของผลิตภัณฑ์ และมีความละเอียดแม่นยำกว่าสายตามนุษย์ สามารถควบคุมคุณภาพได้สม่ำเสมอต่างจากสายตามนุษย์ที่อาจมีความเหนื่อยล้า เป็นสาเหตุทำให้เกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้ระบบนี้ยังสามารถตรวจเช็คคุณภาพชิ้นงานได้ตั้งแต่ช่วงแรกๆ ของกระบวนการผลิต ซึ่งบางกระบวนการคนไม่สามารถเข้าไปในพื้นที่นั้นๆ ได้

ทำให้สามารถคัดแยกชิ้นงานที่เสียออกแต่เนิ่นๆ ไม่ต้องปล่อยให้เสร็จสิ้นกระบวนการถึงจะมีการตรวจเช็ค เพราะถึงเวลานั้นชิ้นงานมีมูลค่าที่สูงทำให้สูญเสียต้นทุนการผลิต และขั้นตอนแรกๆ ที่สำคัญในการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลก็คือการแบ่งส่วนภาพ (Image Segmentation)

การแบ่งส่วนภาพเป็นกระบวนการที่ใช้แยกภาพออกเป็นหลายๆ ส่วน จุดมุ่งหมายของการจำแนกภาพก็เพื่อนำเสนอรูปภาพที่เห็นรายละเอียดชัดเจนขึ้น หรือเพื่อกำหนดขอบเขตบริเวณบนภาพที่สนใจ (Region of interest: ROI) นำไปวิเคราะห์ใช้งานอื่นๆ ทางด้านการประมวลผลภาพแบบดิจิทัลต่อไป ในขั้นตอนการแบ่งส่วนอาจจะเลือกเจาะจงภาพวัตถุเลย หรือเลือกส่วนของภาพที่มีคุณสมบัติบางอย่างเหมือนกัน เช่น รูปร่าง สี หรือพื้นผิว ขึ้นอยู่กับว่าจะนำภาพไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบไหน เทคนิคการแบ่งส่วนภาพมีอยู่หลากหลาย

เทคนิค ในการดำเนินการวิจัยต้องเลือกเทคนิคให้เหมาะสมกับงานวิจัยนั้นๆ โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านั้นสามารถจำแนกประเภทได้พอสังเขปดังนี้ [1]

- Pixel (Threshold) - Based Segmentation เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพโดยดูจากความเหมือนกันของคุณสมบัติของพิกเซลภายในพื้นที่เพียงอย่างเดียว

- Edge (Boundary) - Based Segmentation เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพโดยอาศัยความไม่ต่อเนื่องของคุณสมบัติของพิกเซลบริเวณรอยต่อระหว่างวัตถุกับฉากหลัง วิธีการนี้มุ่งที่ขอบของวัตถุเป็นหลัก ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการนี้จะอยู่ในรูปเส้นพรมแดนระหว่างพื้นที่ต่างๆ

- Area (Region) - Based Segmentation เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพโดยดูจากตำแหน่งของพิกเซลและความเหมือนกันของคุณสมบัติของพิกเซลภายในพื้นที่ โดยถ้าพิกเซลที่อยู่ติดกันและมีคุณสมบัติเหมือนกันจะถูกจัดให้เข้ากลุ่มเดียวกัน ข้อดีของการทำเช่นนี้จะได้พื้นที่ที่ต่อเนื่อง

- Physics - Based Segmentation เป็นวิธีการแยกองค์ประกอบของภาพโดยดูจากลักษณะทางกายภาพของภาพ เช่น สัญญาณรบกวน, สี, พื้นผิว หรือไฮไลต์ของภาพ เป็นต้น

จากเทคนิคประเภทต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้มีการนำเทคนิคเหล่านั้นไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ มากมาย มีทั้งงานวิจัยที่นำเทคนิคไปวิเคราะห์และใช้งานเฉพาะด้าน [2], [3] และงานวิจัยที่นำเทคนิคไปประยุกต์ดัดแปลงเป็นวิธีการใหม่เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการประมวลผลภาพต่อไป [4]

ตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้การแบ่งส่วนภาพ แสดงดังต่อไปนี้

Chatklaw Jareanpon นำเสนอระบบการรู้จำวัตถุด้วยกล้องแบบ depth camera โดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ K-Nearest Neighbors และ Naïve Bayes สำหรับการตัดสินใจของหุ่นยนต์ ในงานวิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้

กล้อง RGB และเซนเซอร์ Microsoft Kinect และพิจารณาเปรียบเทียบผลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบ [5]

Hong Yaoa และคณะ ได้ใช้วิธีการใหม่สำหรับการแบ่งส่วนภาพของภาพปลาออกจากภาพพื้นหลังที่ซับซ้อนกันเพื่อปรับปรุงความถูกต้องและความเสถียรของการแบ่งส่วนภาพ โดยใช้วิธีการของการแบ่งส่วนภาพแบบจัดกลุ่ม K-means และทำงานร่วมกับวิธีการ Mathematical Morphology เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองวิธีการนี้กับวิธีการ Canny edge detection, Otsu's method, level set segmentation, EM clustering segmentation และ K-means เดิม วิธีการใหม่นี้จะมีความถูกต้องและเสถียรภาพมากกว่า [6]

I. Kiruba Raji และ K. K. Thyagarajan ทำการวิเคราะห์เทคนิคการแบ่งส่วนภาพในการแยกใบสมุนไพรรอกจากพื้นหลังที่ซับซ้อนเพื่อการระบุสายพันธุ์ของใบไม้ ในงานวิจัยได้ทำการแบ่งส่วนของใบออกจากพื้นหลังโดยใช้ทั้งในส่วนของสี รูปร่าง และพื้นผิว จากการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ลักษณะรูปร่างมีสมรรถภาพในการแบ่งส่วนภาพใบไม้มากที่สุด และวิธีการ Chan-Vese ให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น โดยไม่มีผลกระทบกับ สี รูปร่าง และลักษณะอื่นๆ [7]

Phaichayon Kongchai และคณะ เสนอแนวคิดในการเตรียมความสมดุลของข้อมูลก่อนทำการประมวลผลในระบบปฏิบัติการแบบขนาน เพื่อหารูปแบบการแบ่งจำนวนข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means แบบขนาน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมรรถนะเวลาของรูปแบบการแยกเท่าเทียมกันจะดีกว่ารูปแบบอื่น [10]

Pichet Wayalun, Natthariya Laopracha และ Saiyan Saiyod ทำการตัดแยกภาพโครโมโซม G-band ซึ่งอยู่ในพื้นฐานของวิธีการ Histogram Equalization, Adaptive Threshold, Flood-Fill, Canny Edge Detection และวิธีการ Axis-Aligned Bounding Boxes โดยเทคนิค HAFCA ซึ่งจะสามารถเพิ่มคุณภาพ

ภาพ และใช้วิธีการการเติมข้อมูลที่ขาดหายภายในภาพโครโมโซมได้ [11]

Preeti Panwar, Girdhar Gopal และ Rakesh Kumar ทำการเปรียบเทียบการแบ่งส่วนภาพของภาพสีด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means และวิธีการของ thresholding โดยดูผลการเปรียบเทียบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของการแบ่งส่วนภาพ เช่น Mean Square Error (MSE), Peak Signal-to-noise Ratio (PSNR) และ Signal-to-noise Ratio (SNR) จากการทดลองกับภาพสีจำนวน 4 ภาพ [13]

Put Panuwannitchakorn และ Janjira Payakpate แสดงผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแบ่งส่วนภาพกับภาพกล้วยไม้ โดยได้นำเทคนิคการแบ่งส่วนภาพทั้งหมด 6 เทคนิคมาทดสอบผ่านโปรแกรม MATLAB R2008B ผลลัพธ์ที่ได้คือ เทคนิคการแบ่งส่วนภาพด้วยการขีดแบ่ง (Threshold-based Image Segmentation) และเทคนิคการแบ่งส่วนภาพด้วยเส้นขอบ (Laplacian of Gaussian Image Segmentation) สามารถแสดงการแยกพื้นหลังของภาพออกจากส่วนตัวดอกกล้วยไม้ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเทคนิคการแบ่งส่วนภาพทั้งสองเทคนิคจะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาต่อไป [14]

Saravanan M, Kalaivani B และ Geethamani R ใช้การแบ่งส่วนภาพของภาพถ่ายเอกซเรย์เต้านมด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means และวิธีการ thresholding เปรียบเทียบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของการแบ่งส่วนภาพ เช่น Mean Square Error (MSE), Peak Signal-to-noise Ratio (PSNR) [15]

Shiv Ram Dubey และคณะ เสนองานวิจัยที่ทำการตรวจจับส่วนของผลไม้ที่เน่าเสีย โดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means จากคุณลักษณะทางสีและพื้นที่ ในการทดลองได้ใช้กรณีศึกษาเป็นแอปเปิ้ลและประเมินผลจากการตรวจจับแอปเปิ้ลที่เน่าเสีย จากผลการทดลองทำให้เห็นการพัฒนาประสิทธิภาพของวิธีการแบ่งส่วนภาพผลไม้ส่วนที่เน่าเสีย ทั้งในส่วนของความแม่นยำและเวลาที่ใช้ในการประมวลผล [18]

Sittichok Aunkaew, Thanate Khaorapapong และ Montri Karnjanadecha ได้ออกแบบเครื่องมือตรวจสอบราชวบนผิวเนื้อยางแผ่น ซึ่งได้จำแนกยางแผ่นที่มีราชวออกจากราชวจากยางแผ่นดี โดยใช้การประยุกต์หลักการทางด้านการประมวลผลภาพดิจิทัลมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพสินค้าทางการเกษตรที่มีปริมาณมากๆ และยากต่อการจำแนกแทนการใช้สายตามนุษย์ที่มีความจำกัดในการทำงานนานๆ ผลจากการพัฒนาต้นแบบเครื่องมือตรวจสอบราชวบนผิวเนื้อยางแผ่น สามารถจำแนกยางแผ่นได้ถูกต้องดีมากประมาณ 97.50% และความเร็วในการตรวจสอบได้เร็วมากใกล้เคียงกับการตรวจสอบด้วยสายตามนุษย์ จึงทำให้สามารถนำเทคนิควิธีนี้ไปใช้ในการสร้างและพัฒนาเครื่องตรวจสอบและคัดแยกยางแผ่นอัตโนมัติต่อไปได้ [19]

Zeynel Cebeci และ Figen Yildiz ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ของอัลกอริทึม K-means และอัลกอริทึม Fuzzy C-means ในการหากลุ่มย่อยของข้อมูลที่มีรูปร่างโครงสร้างของกลุ่มย่อย ที่แตกต่างกันออกไป [21]

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยในการตรวจสอบคุณภาพแผ่นวงจรพิมพ์ ได้รวบรวมไว้ดังต่อไปนี้

Jithendra P R Nayak และคณะ ได้คิดค้นอัลกอริทึมสำหรับระบบตรวจสอบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) โดยทำการตรวจจับข้อบกพร่องโดยใช้ภาพที่เป็นธรรมชาติ วิธีการนี้จะระบุข้อบกพร่องก่อนที่จะถึงขั้นตอนการกัดแผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นแผ่นวงจรพิมพ์จะได้รับการแก้ไขใหม่อีกครั้ง และถ้าปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบเพิ่มอีก จะทำให้สามารถตรวจจับข้อบกพร่องของแผ่นวงจรพิมพ์ได้แม้กระทั่งจากภาพที่มีคุณภาพต่ำ [8]

M. Moganti และ F. Ercal ทำการสำรวจอัลกอริทึมสำหรับตรวจสอบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) อัตโนมัติ โดยในการสำรวจครั้งนี้จะมุ่งเน้นกลยุทธ์ในการวิเคราะห์ภาพและตรวจจับความผิดพลาดเป็นหลัก นอกจากนี้ยังรวมไปถึงเทคนิคใหม่ๆ ที่เพิ่งเกิดขึ้นด้วย [9]

Pratiksha R. Masalkar และ Prabha S. Kasliwal ได้เสนอแนะวิธีการระบุข้อบกพร่องบนแผ่นวงจรพิมพ์เปล่า (bare PCB) จำนวน 3 วิธีการ ได้แก่ 1) วิธีการ template matching จะทำการเปรียบเทียบภาพต้นฉบับกับภาพเทมเพลตโดยตรง 2) วิธีการ image subtraction จะสนใจในการตรวจสอบเฉพาะภาพแผ่นวงจรพิมพ์ที่หน้าจะบกพร่องเมื่อเทียบกับภาพอ้างอิง และ 3) วิธีการ image morphology ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างภาพที่ทำการตรวจสอบกับภาพเทมเพลต [12]

Sharat Chandra Bhardwaj ได้ใช้อัลกอริทึม AOI สำหรับระบบตรวจสอบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) โดยทำการตรวจจับข้อบกพร่องของรูเจาะที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการกัดแผ่นวงจรพิมพ์ในกระบวนการผลิต มีเป้าหมายหลักเพื่อพัฒนาอัลกอริทึมให้ระบบตรวจสอบน่าเชื่อถือและรวดเร็วยิ่งขึ้น ในกระบวนการตรวจสอบประกอบด้วย 2 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการวัดและขั้นตอนการตรวจจับ [17]

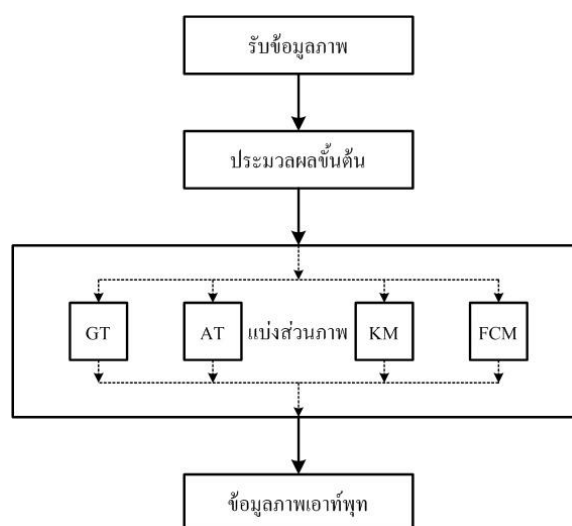
Snehal Rane, Vartika Rai และ Sukeshna Awate ได้จัดหาเทคนิคการตรวจจับข้อบกพร่องที่มีราคาถูกและครอบคลุมทุกเงื่อนไข ด้วยวิธีการเปรียบเทียบภาพ PCB มาตรฐานกับภาพ PCB ที่ต้องการตรวจสอบ โดยใช้อัลกอริทึมความแตกต่างอย่างง่ายที่สามารถตรวจจับพื้นที่ที่เป็นข้อบกพร่องได้ [20]

สำหรับงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจะทำการศึกษาวิธีการต่างๆ ในการแบ่งส่วนภาพ จากนั้นจะทำการทดลองแบ่งส่วนภาพของแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) แบบด้านเดียวที่มีหลายสีหลายขนาด โดยทำการแบ่งส่วนของ PCB ที่เป็นลายวงจรออกจากส่วนของ PCB ที่เป็นพื้นหลังด้วยวิธีการ Global Thresholding (GT), Adaptive Thresholding (AT), K-means Clustering (KM) และ Fuzzy C-means Clustering (FCM) จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาตัวชี้วัดต่างๆ ในการแบ่งส่วนภาพ ได้แก่ค่า Intersection over Union (IoU), Accuracy, Precision, Recall และ Elapse

Time เพื่อเลือกวิธีการที่เหมาะสมนำไปใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบคุณภาพของแผ่นวงจรพิมพ์ต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

สำหรับกระบวนการในการดำเนินงานจะเป็นการเขียนโปรแกรมประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในแวดวงของนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรในปัจจุบัน บนเครื่องคอมพิวเตอร์ Laptop Acer Swift 3 ซึ่งมีชิปประมวลผลเป็น Intel Core i5-7200U ที่มีความเร็วในการประมวลผลอยู่ที่ 2.5 GHz หน่วยความจำขนาด 8GB และใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 โดยมีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 1 สามารถอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้ ในส่วนรับข้อมูลภาพ (Input Image) เป็นการนำข้อมูลภาพที่ต้องการเข้าสู่โปรแกรม โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ภาพของแผ่นวงจรพิมพ์แบบด้านเดียวจำนวน 500 ภาพ โดยเป็นภาพแบบ JPEG 24 Bit depth ภาพของแผ่น PCB จะมีหลายสีหลายขนาด ในส่วนประมวลผลขั้นต้น (Pre-processing) จะทำการเลือกข้อมูลภาพเฉพาะในส่วนที่ต้องการและปรับขนาดของภาพให้เป็น 500x500 พิกเซล ปรับปรุงคุณภาพของ

ภาพที่รับเข้ามาให้ชัดเจนขึ้น ลดสัญญาณรบกวน รวมไปถึงการแปลงภาพสี RGB ให้เป็นภาพระดับสีเทา (Gray scale) โดยให้ $Gray = 0.299R + 0.587G + 0.114B$ และในส่วนการแบ่งส่วนภาพ (Image Segmentation) จะทำการแยกข้อมูลภาพที่ต้องการและข้อมูลภาพที่ไม่ต้องการออกจากกัน สุดท้ายจะได้ข้อมูลภาพเอาต์พุต (Output Image) ในส่วนที่เป็นลายวงจรและในส่วนของพื้นหลังแยกออกจากกันเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

โดยในส่วนของการแบ่งส่วนภาพ คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการแบ่งส่วนภาพทั้งหมด 4 วิธีการ ซึ่งทั้ง 4 วิธีการนี้เป็นการแบ่งส่วนภาพแบบ Pixel - Based Segmentation ที่นิยมใช้ในหมู่นักวิจัยเริ่มต้น เป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และเหมาะกับภาพวิจัยที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก ได้แก่วิธีการ Global Thresholding (GT), Adaptive Thresholding (AT), K-means Clustering (KM) และวิธีการ Fuzzy C-means Clustering (FCM) เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยรายละเอียดขั้นตอนของแต่ละวิธีการแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1 Global Thresholding Segmentation

วิธีการ Global Thresholding เป็นเทคนิคที่ใช้ค่าเทรชโวลด์ (Threshold) เพียงค่าเดียวเพื่อแบ่งส่วนของภาพให้ออกเป็น 2 กลุ่ม โดยใช้สมการที่ 1

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(x,y) > T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ $g(x,y)$ คือ ข้อมูลภาพ ณ ตำแหน่งที่ x,y

T คือ ค่าเทรชโวลด์

ค่าเทรชโวลด์ควรเลือกค่าที่อยู่จุดต่ำสุดที่อยู่ระหว่างจุดสูงสุด (Peaks) 2 จุดจากฮิสโตแกรมของภาพ ถ้าค่าระดับเทา (Gray level) ของพิกเซลนั้นมีค่ามากกว่าค่าเทรชโวลด์จะกำหนดให้เป็น 1 แต่ถ้าค่าระดับเทาของพิกเซลนั้นน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเทรชโวลด์จะกำหนดให้เป็น 0 ทำเช่นนี้จนครบทุกพิกเซลจะได้ผลลัพธ์เป็นภาพ Binary

ขั้นตอนของ Global Thresholding แสดงได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเทรชโวลด์แบบอัตโนมัติด้วย Otsu's Threshold [16]

2. กำหนดให้ข้อมูลที่มีมากกว่าค่า T ให้มีค่าเป็น 1 นอกเหนือจากนั้นให้มีค่าเป็น 0

ขั้นตอนของการกำหนดค่าเทรชโวลด์แบบอัตโนมัติแสดงได้ดังนี้

1. กำหนดค่าเทรชโวลด์เริ่มต้น (T_0) นิยมใช้ค่าเฉลี่ย หรือค่ากลางระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด

2. แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มโดยใช้เทรชโวลด์ T_0 กำหนดให้เป็น G_1 และ G_2

3. หาค่าเฉลี่ยของ G_1 กำหนดให้เป็น u_1 และหาค่าเฉลี่ยของ G_2 กำหนดให้เป็น u_2

4. คำนวณหาค่าเทรชโวลด์ใหม่ $T = (u_1 + u_2) / 2$

5. ทำซ้ำข้อ 2-4 จนค่า T มีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่า T ก่อนหน้านี้น้อยมากตามที่ต้องการ

2.2 Adaptive Thresholding Segmentation

วิธีการ Adaptive Threshold เป็นเทคนิคการหาค่าเทรชโวลด์ที่ปรับค่าตามข้อมูลที่อยู่ในวินโดว (window) เทคนิคนี้เหมาะกับภาพที่มีความสว่างไม่สม่ำเสมอ โดยแต่ละบริเวณจะใช้เทรชโวลด์ที่ต่างกัน ค่าเทรชโวลด์ที่ได้เกิดจากการหาค่าเฉลี่ยของทุกพิกเซลภายใต้ Moving window ที่มีขนาด $M \times N$ และหาค่าเทรชโวลด์เช่นนี้กับบริเวณที่ไม่ซ้ำกัน จนกระทั่งได้กำหนดค่าเทรชโวลด์ครบในทุกวินโดวส์ ถ้าค่าระดับเทาของพิกเซลนั้นมีค่ามากกว่าค่าเทรชโวลด์ของวินโดวส์นั้นจะกำหนดให้เป็น 1 แต่ถ้าค่าระดับเทาของพิกเซลนั้นน้อยกว่าค่าเทรชโวลด์ของวินโดวส์นั้นจะกำหนดให้เป็น 0 ทำเช่นนี้จนครบทุกวินโดวส์ จะได้ผลลัพธ์เป็นภาพ Binary

ขั้นตอนของ Adaptive Thresholding [14] แสดงได้ดังนี้

1. กำหนดขนาดของวินโดวส์ตามที่ต้องการ แบ่งข้อมูลภาพออกเป็นภาพย่อยตามขนาดของวินโดวส์

2. กำหนดค่าเทรชโวลด์ของภาพย่อยด้วย Otsu's Threshold

3. กำหนดให้ข้อมูลที่มีมากกว่าค่า T ให้มีค่าเป็น 1 นอกเหนือจากนั้นให้มีค่าเป็น 0

4. ทำซ้ำข้อ 2-3 ไปจนครบทุกภาพย่อย

2.3 K-means Clustering Segmentation

วิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เป็นเทคนิคการจำแนกข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อย (Cluster) โดยจัดให้ข้อมูลที่เหมือนกันอยู่ด้วยกัน ผู้ใช้จะต้องกำหนดจำนวนกลุ่ม หรือจำนวนกลุ่มย่อยที่ต้องการด้วยตัวเอง พร้อมทั้งกำหนดค่าเซนทรอยด์ (Centroid) เริ่มต้นของแต่ละกลุ่มย่อย และนำแต่ละข้อมูลจัดเข้ากลุ่มย่อยโดยดูระยะห่างจากค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มย่อย จากนั้นใช้การหาค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มย่อยใหม่ เพื่อกำหนดค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มย่อยใหม่ ทำซ้ำแบบนี้ไปจนข้อมูลไม่มีการเปลี่ยนกลุ่มย่อยอีก การกำหนดค่าเซนทรอยด์เริ่มต้นของแต่ละกลุ่มจะมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากค่าเซนทรอยด์จะเป็นตัวกำหนดว่าข้อมูลควรจะอยู่ในกลุ่มย่อยใด ถ้าการกำหนดค่าเซนทรอยด์ออกมาต่างกันผลลัพธ์ที่ได้จากการแบ่งกลุ่มข้อมูลก็จะต่างกันด้วย และในการแบ่งกลุ่มด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means จะใช้ค่าระยะห่างรวมซึ่งเป็น Loss function ที่ต้องการ Minimize ในการทำ Clustering ซึ่งสามารถหาได้ด้วยสมการ Euclidean distance ดังแสดงในสมการที่ 2

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (2)$$

โดยที่ J คือ ค่าระยะห่างรวมซึ่งเป็น Loss function ที่ต้องการ Minimize ในการทำ Clustering

k คือ จำนวนกลุ่มย่อย

$x_i^{(j)}$ คือ ข้อมูลที่ตำแหน่งที่ i ในกลุ่มที่ j

c_j คือ ค่าเซนทรอยด์ของกลุ่มที่ j

n คือ จำนวนข้อมูล

ขั้นตอนของวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เป็นดังนี้

1. กำหนดจำนวนกลุ่มย่อยให้เป็น K กลุ่ม
2. กำหนดค่าเซนทรอยด์เริ่มต้นของแต่ละกลุ่มย่อยด้วยวิธีที่เหมาะสม เพราะตำแหน่งเซนทรอยด์เริ่มต้นที่แตกต่างกันทำให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายแตกต่างกันด้วย

3. นำข้อมูลจัดเข้ากลุ่มย่อย โดยดูระยะห่างจากค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มย่อย

4. หาค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มย่อย และกำหนดให้เป็นค่าเซนทรอยด์ใหม่ของกลุ่มย่อยนั้น

5. ทำซ้ำข้อ 2-3 จนทุกข้อมูลไม่มีการเปลี่ยนกลุ่มย่อยอีก

2.4 Fuzzy C-means Clustering Segmentation

วิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means เป็นเทคนิคการจำแนกข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อย เช่นเดียวกับวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เพียงแต่ข้อมูลของวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means จะต้องสังกัดกลุ่มย่อยใดกลุ่มย่อยหนึ่งเท่านั้น จึงไม่เหมาะสมกับข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กัน (Correlation) ในส่วนของวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means ข้อมูลจะมีโอกาสเป็นสมาชิกของหลายกลุ่มย่อย แต่จะมีค่าการเป็นสมาชิกด้วยน้ำหนักที่แตกต่างกันไป โดยค่าการเป็นสมาชิกหาได้ตามสมการที่ 3

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{q=1}^k \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_q\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (3)$$

ค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มย่อย สามารถหาได้ตามสมการที่ 4

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i u_{ij}^m)}{\sum_{i=1}^n (u_{ij}^m)} \quad (4)$$

ค่าระยะห่างรวมซึ่งเป็น Loss function ที่ต้องการ Minimize ในการทำ Clustering ซึ่งสามารถหาได้ด้วยสมการที่ 5

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n u_{ij}^m \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (5)$$

โดยที่ J คือ ค่าระยะห่างรวมซึ่งเป็น Loss function ที่ต้องการ Minimize ในการทำ Clustering

u_{ij} คือ ค่าการเป็นสมาชิกของข้อมูล

k คือ จำนวนกลุ่มย่อย

$x_i^{(j)}$ คือ ข้อมูลที่ตำแหน่งที่ i ในกลุ่มที่ j

c_j คือ ค่าเซนทรอยด์ของกลุ่มที่ j

n คือ จำนวนข้อมูล

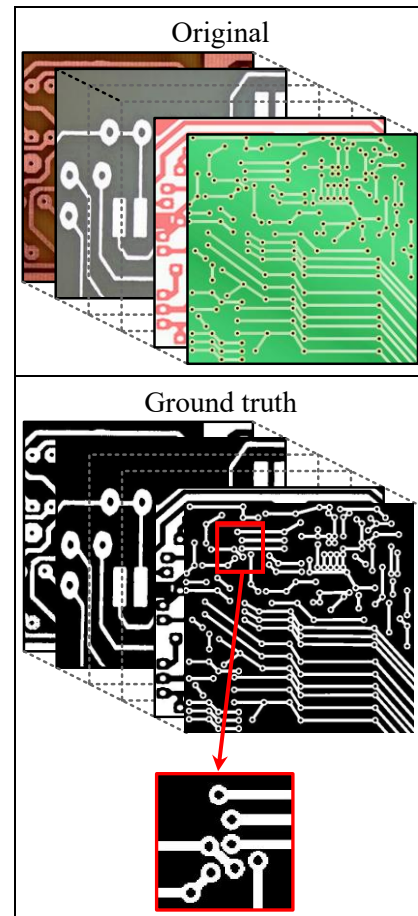
m คือ จำนวนจริงใดๆ ที่มากกว่า 1

ขั้นตอนของวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means แสดงได้ดังนี้

1. กำหนดจำนวนกลุ่มย่อยให้เป็น K กลุ่ม
2. กำหนดค่าเซนทรอยด์เริ่มต้นของแต่ละกลุ่มย่อย ด้วยวิธีที่เหมาะสม
3. นำข้อมูลจัดเข้ากลุ่มย่อย โดยดูระยะห่างจากค่าเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่มย่อย
4. หาค่าการเป็นสมาชิกของแต่ละข้อมูลในทุกกลุ่มย่อย
5. หาค่าเซนทรอยด์ใหม่ของแต่ละกลุ่มย่อย
6. นำข้อมูลจัดเข้ากลุ่มย่อยใหม่
7. ทำซ้ำข้อ 3-5 จนค่าการเป็นสมาชิกของแต่ละข้อมูลสัมฤทธิ์ผลตามที่ต้องการ

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการศึกษาและทดลองด้วยวิธีการต่างๆ ที่ผ่านมามาทดลองกับภาพของ PCB แบบด้านเดียวจำนวน 500 ภาพ ทำให้ได้ภาพเอ็ดจ์พุตจากแต่ละวิธีการแตกต่างกันออกไป โดยตัวอย่างผลการทดลอง แสดงให้เห็นในรูปที่ 2 และตารางที่ 1



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการทดลอง

	Ground truth	GT	AT	KM	FCM
E.g. 01					
E.g. 02					
E.g. 03					
E.g. 04					

จากรูปที่ 2 และตารางที่ 1 แสดงให้เห็นทั้งภาพที่เป็นภาพต้นฉบับ (Original), ภาพที่แบ่งส่วนด้วยสายตา หรือเรียกว่า Ground truth โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

mspaint ของ Windows 10, ภาพที่แบ่งส่วนด้วยวิธีการ Global Thresholding โดยใช้ค่าเทรชโฮลด์จาก Otsu's method, ภาพที่แบ่งส่วนด้วยวิธีการ Adaptive Thresholding ภายใต้ Moving window ที่มีขนาด 100x100 และใช้ค่าเทรชโฮลด์จาก Otsu's method เช่นกัน, ภาพที่แบ่งส่วนภาพด้วยวิธีการ K-means Clustering โดยกำหนดค่าเซนทรอยด์เริ่มต้นทั้งสองเป็นกึ่งกลางของค่าต่ำสุดกับค่าเฉลี่ยและกึ่งกลางของค่าเฉลี่ยกับค่าสูงสุด และรูปสุดท้ายเป็นภาพที่แบ่งส่วนภาพด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means โดยใช้สัมประสิทธิ์ $m = 2$ ทำการกำหนดค่าเซนทรอยด์เริ่มต้นทั้งสองเป็นกึ่งกลางของค่าต่ำสุดกับค่าเฉลี่ยและกึ่งกลางของค่าเฉลี่ยกับค่าสูงสุดเช่นเดียวกับวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means และกำหนดให้สมาชิกของแต่ละข้อมูลสัมฤทธิ์ผลเมื่อค่าเซนทรอยด์เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 10^{-3}

ใน ส่วนของตัวชี้วัดที่จะใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคในการแบ่งส่วนภาพทั้ง 4 วิธีการที่ได้ทำการทดลอง ได้แก่

1. ค่า Intersection over Union ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ที่ทับซ้อน (Area of Overlap) ระหว่างบริเวณที่ทำนาย (Prediction Area) กับบริเวณค่าความจริง (Ground truth Area)หารด้วยพื้นที่รวมทั้งหมด (Area of Union) ระหว่างบริเวณที่ทำนายกับบริเวณค่าความจริง ดังแสดงในสมการที่ 6

$$IoU = \frac{\text{Ground Thruth} \cap \text{Prediction}}{\text{Ground Thruth} \cup \text{Prediction}} \quad (6)$$

2. ความถูกต้อง (Accuracy) คือความใกล้เคียงของค่าจริงที่ตรวจพบกับค่าที่ตรวจพบทั้งหมด สามารถหาได้ตามสมการที่ 7

$$\text{Accuracy} = \frac{(TP) + (TN)}{(TP) + (FP) + (TN) + (FN)} \quad (7)$$

เมื่อ TP คือค่าจริงเป็นบวก แสดงว่าส่วนที่เป็นลายวงจรถูกตรวจพบว่าเป็นลายวงจร, TN คือค่าจริงเป็นลบ

แสดงว่าส่วนที่ไม่ได้เป็นลายวงจรถูกตรวจพบว่าเป็นลายวงจร, FP คือค่าเท็จเป็นบวก แสดงว่าส่วนที่ไม่ได้เป็นลายวงจรถูกตรวจพบว่าเป็นลายวงจร และ FN คือค่าเท็จเป็นลบ แสดงว่าส่วนที่เป็นลายวงจรถูกตรวจพบว่าเป็นลายวงจร

3. ความแม่นยำ (Precision) คือความใกล้เคียงของภาพวัตถุที่ตรวจพบจริงกับภาพวัตถุจริงทั้งหมด สามารถหาได้ตามสมการที่ 8

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (8)$$

4. ความไว (Sensitivity หรือ Recall) คือสัดส่วนของภาพวัตถุที่ตรวจพบจริงกับภาพวัตถุที่ตรวจพบทั้งหมด สามารถหาได้ตามสมการที่ 9

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

5. เวลาที่ใช้ (Elapse Time) ในการประมวลผลทั้งหมด

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการแบ่งส่วนภาพทั้ง 4 วิธีการกับค่าที่ได้จาก Ground truth นำไปสู่ผลการประเมินประสิทธิภาพในการแบ่งส่วนภาพ โดยทำการทดลองกับภาพตัวอย่างจำนวน 500 ภาพ และทำการหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวชี้วัด แสดงในตารางที่ 2 และคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของแต่ละตัวชี้วัด แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การประเมินเทคนิคในการแบ่งส่วนภาพ

Methods	IoU	Pre. (%)	Rec. (%)	Acc. (%)	Elapse Time (S)
GT	0.9561	97.65	93.60	95.61	1.26
AT	0.9456	97.10	92.78	94.46	1.02
KM	0.9743	98.80	96.36	97.43	2.05
FCM	0.9854	99.22	97.72	98.54	10.46

ตารางที่ 3 ค่า SD ของแต่ละตัวชี้วัดในตารางที่ 2

Methods	IoU	Pre.	Rec.	Acc.	Elapse Time
GT	1.1042	0.4031	5.2612	1.1042	2.245
AT	0.9808	0.2728	4.4746	0.9808	3.246
KM	1.0398	0.0125	4.5880	1.0398	2.873
FCM	1.2814	0.076	1.9225	1.2814	4.562

จากตารางที่ 2 พบว่าวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means มีค่า Intersection over Union เฉลี่ยมากกว่าวิธีการอื่นๆ คือ 0.9854 และค่าเฉลี่ยของตัวชี้วัดอื่นๆ ก็มากที่สุดเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการแบ่งส่วนภาพด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means มีค่าความถูกต้องมากที่สุด คือ 98.54% รองลงมาคือวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means คือ 97.43% แต่ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล วิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means ใช้เวลามากกว่าวิธีการอื่นๆ อยู่หลายเท่า สาเหตุเนื่องจากความยุ่งยากและการกระทำซ้ำหลายรอบตามขั้นตอนของวิธีการ

จากผลการวิจัยที่ได้ ถึงแม้ว่าวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means จะมีค่าความถูกต้องมากที่สุด แต่ใช้เวลาในการประมวลผลมากเช่นกัน คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means ซึ่งมีความถูกต้องรองลงมาแต่ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่า โดยทำการแบ่งกลุ่มย่อยด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means จำนวน 2 รอบ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทำการแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็น 3 กลุ่มย่อย กำหนดค่าเซนทรอยด์เริ่มต้นของแต่ละกลุ่มย่อยด้วยการแบ่งข้อมูลจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดออกเป็น 4 ส่วน ให้กลุ่มย่อยที่มีค่าของข้อมูลต่ำเป็น K1, กลุ่มย่อยที่มีค่าของข้อมูลกลางๆ เป็น K2 และกลุ่มย่อยที่มีค่าของข้อมูลสูงเป็น K3

2. ทำการแบ่งข้อมูล K2 ซึ่งเป็นกลุ่มย่อยที่มีค่าของข้อมูลกลางๆ ออกเป็น 2 กลุ่มย่อย และกำหนดให้กลุ่มย่อย

ที่มีค่าของข้อมูลต่ำกว่าเป็น K2a และกลุ่มย่อยที่มีค่าของข้อมูลสูงกว่าเป็น K2b

3. นำข้อมูลในกลุ่มย่อย K2a ไปรวมกับกลุ่มย่อย K1 และนำข้อมูลในกลุ่มย่อย k2b ไปรวมกับกลุ่มย่อย K3

4. ข้อมูลทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ตามที่ต้องการ

ผลการวิจัยที่ได้จากการปรับปรุงวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means ดังกล่าว จะได้ค่าความถูกต้องมากขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นอีกเล็กน้อย เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เดิม และวิธีการจัดกลุ่มแบบ Fuzzy C-means จะเห็นผลลัพธ์ที่ความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการในการแบ่งส่วนภาพด้วยตัวชี้วัด ได้แก่ Intersection over Union, Precision, Recall, Accuracy และ Elapse Time โดยใช้ตัวอย่างของภาพแผ่นวงจรพิมพ์ และใช้วิธีการทั้งหมด 4 วิธีการ ได้แก่ วิธีการ Global Thresholding, Adaptive Thresholding, K-means Clustering และ Fuzzy C-means Clustering

แต่จากผลการวิจัยพบว่าค่าความถูกต้องของแต่ละวิธีการจะแปรผันผกผันกับเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องมากขึ้นแต่ใช้เวลาในการประมวลผลไม่มากนัก และเลือกใช้เป็นการแบ่งส่วนภาพที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ต่อไป ผลการวิจัยที่ได้จากวิธีการที่ปรับปรุงเมื่อเทียบกับวิธีการ K-means Clustering และวิธีการ Fuzzy C-means Clustering แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการปรับปรุงวิธีการ

Methods	KM	Improve	FCM
Results			
IoU	0.9743	0.9838	0.9854
Pre. (%)	98.80	99.04	99.22
Rec. (%)	96.36	97.31	97.72
Acc. (%)	97.43	98.38	98.54
Time (s)	2.05	3.12	10.46

ในส่วนของงานวิจัยต่อจากนี้จะเป็นการนำภาพเฉพาะที่เป็นส่วนของลายวงจรที่ได้จากขั้นตอนการแบ่ง

ส่วนภาพในงานวิจัยนี้ ไปทำการวิเคราะห์และตรวจสอบคุณภาพของแผ่นวงจรพิมพ์ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ในการร่วมสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ โดยมีรหัสโครงการ NRMS: 256101A1650018 และขอขอบคุณทีมงานนักวิจัยห้องปฏิบัติการและวิจัยด้านการประมวลผลสัญญาณ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เอกสารอ้างอิง

- [1] McAndrew, A., Wang, J-H. and Tseng, C-S. Introduction to Digital Image Processing with MATLAB. Asia Edition: Taiwan, Cengage Learning Asia Pte Ltd (Taiwan Branch), 2010.
- [2] Chansri, C. and Srinonchat, J. Hand Gesture Recognition for Thai Sign Language in Complex Background Using Fusion of Depth and Color Video. *Procedia Computer Science*, 2016; 86: 257-260.
- [3] Sopasap, S. and Srinonchat, J. Facial Space Detection and Eyes Surrounded Object Detective Technique on Color Image YCbCr and HSV. 5th International Electrical Engineering Congress, March 8-10, Pattaya, Thailand, 2017; 671-674.
- [4] Mohammed, H. R., Alnoamani, H. H. and Jalil, A. A. Z. Improve Fuzzy C-Means Algorithm for Image Segmentation. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, 2016; 5(6): 7-10.
- [5] Jareanpon, C. Object Recognition System by Depth Camera Using K-Nearest Neighbors and Naïve Bayes Classification for Robot. *Naresuan Phayao Journal*, 2016; 9(1): 22-24.
- [6] Yaoa, H., Duana, Q., Li, D. and Wang, J. An Improved K-Means Clustering Algorithm for Fish Image Segmentation. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013; 58(3-4): 790-798.
- [7] Kiruba, Raji, I. and Thyagarajan, K. K. An Analysis of Segmentation Techniques to Identify Herbal Leaves from Complex Background. *Procedia Computer Science*. 2015; 48: 589-599.
- [8] Nayak, J. P. R., Anitha, K., Parameshachari, B. D., Banu, R. and Rashmi, P. PCB Fault Detection Using Image Processing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017; 225: 1-7.
- [9] Moganti, M. and Ercal, F. Automatic PCB inspection Algorithms: A Survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 1996; 63(2): 287-313.
- [10] Kongchai, P., Chujai, P., Hiranrat, W., Kerdprasop, N. and Kerdprasop, K. Data Pre-Processing for Parallel K-Means Clustering. *Naresuan Phayao Journal*, 2013; 6(3): 227-230.
- [11] Wayalun, P., Laopracha, N. and Saiyod, S. Automatic Chromosome G-band Segmentation from Background Images. *KKU Research Journal*, 2014; 9(4): 526-538.
- [12] Masalkar, P. R. and Kasliwal, P. S. Study of the Image Processing algorithms for defect detection of PCBs. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 2017; 4(6): 606-612.
- [13] Panwar, P., Gopal, G. and Kumar, R. Image Segmentation using K-means clustering and Thresholding. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016; 3(5): 1787-1793.

- [14] Panuwantichakorn, P. and Payakpate, J. Using Image Segmentation Technique on the Image of Orchids Paphiopedilum Native Species of Thailand. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University. Special Issue*, 2014; 277-284.
- [15] Saravanan, M., Kalaivani, B. and Geethamani, R. Image Segmentation Using K-means clustering Based Thresholding Algorithm. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 2017; 5(2): 173-183.
- [16] Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979; 9(1): 62-66.
- [17] Bhardwaj, S. C. Machine Vision Algorithm for PCB Parameters Inspection. National Conference on Future Aspects of Artificial intelligence in Industrial Automation, 2012; 2: 20-24.
- [18] Dubey, S.R., Dixit, P., Singh, N. and Gupta, J.P. Infected Fruit Part Detection using K-Means Clustering Segmentation Technique. *International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*, 2013; 2(2): 65-72.
- [19] Aunkaew, S., Khaorapapong, T. and Karnjanadecha, M. A Study of Inspection of White Mould on Surface Rubber Sheets Using Image Processing. *Thaksin University Journal*, 2007; 10(2): 50-61.
- [20] Rane, S., Rai, V. and Awate, S. PCB Fault Detection using Embedded Image Processing. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2016; 5(3): 559-563.
- [21] Cebeci, Z. and Yildiz, F. Comparison of K-Means and Fuzzy C-Means Algorithms on Different Cluster Structures. *Journal of Agricultural Informatics*, 2015; 6(3): 13-23.



การดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส ของไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ สำหรับการกำจัดสีมาลาไคท์กรีน

Adsorption and Photocatalysis Process of Titanium Dioxide Immobilized Montmorillonite for Malachite Green Decolorization

จुरีพร วงศ์จันดา และ จักรกฤษณ์ อัมพูช*

Jureporn Wongjunda and Chakkrit Umpuch*

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Environmental Engineering program, Department of Chemical Engineering,
Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190
E-mail: chakkrit.u@ubu.ac.th* and jureporn.wo.57@ubu.ac.th Tel: 045-3533342

บทคัดย่อ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO₂-MMt) ถูกเตรียมและใช้เพื่อกำจัดสีมาลาไคท์กรีน (MG) จากสารละลาย นำ TiO₂-MMt ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของ BET และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธีของ BJH ศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยภาพถ่าย SEM ศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญด้วยเทคนิค FTIR และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาการกำจัดสี MG ด้วยกระบวนการดูดซับ พบว่า TiO₂-MMt มีประสิทธิภาพการกำจัดสี MG สูงสุด เท่ากับ 97 % ภายใต้สภาวะ pH 5.0 เวลาสัมผัส 240 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 mg/L และอุณหภูมิ 55°C ไอโซเทอมการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ ผลการทดลองเชิงจลนพลศาสตร์สอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ส่วนที่ 2 ศึกษาการกำจัดสี MG ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส โดยการฉายรังสียูวีซีให้ตัวดูดซับที่อิ่มตัวด้วยสีข้อมแล้ว ที่ความเข้มแสง 2.752 mW/cm² ความยาวคลื่น 254 nm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อมเพิ่มขึ้น 16% เมื่อเทียบกับการดูดซับอย่างเดียว จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า TiO₂-MMt สามารถใช้เป็นตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพในการกำจัดสี MG จากน้ำเสีย

ABSTRACT

Titanium dioxide immobilized on montmorillonite (TiO₂-MMt) was prepared and used for removal of malachite green dye (MG) from aqueous solution. The TiO₂-MMt was characterized by various techniques such as specific surface area and average pore size by BET method and BJH method, respectively, morphology by SEM images, active functional groups by FTIR, and crystalline structure by XRD. The experiment was divided into 2 parts. First, the adsorption of MG was studied.

It was found that the highest MG removal of 97.0% was obtained under a certain condition, pH of 5.0, contact time of 240 min, initial dye concentration of 300 mg/L and temperature of 55°C. Adsorption isotherm was better fitted by Langmuir's equation. Kinetic data followed the pseudo-second order equation. The thermodynamic study noticed that the adsorption is endothermic process. Second, the photocatalysis of MG was carried out. The saturated MG loaded TiO₂-MMt was radiated by a UVC light with intensity of 2.752 mW/cm² at 254 nm for 24 hours. It was found that the percent MG removal was 16 % higher than that of the adsorption only. From the above results, TiO₂-MMt was used effectively as adsorbent and photo-catalyst for MG removal from wastewater.

1. บทนำ

ในปัจจุบันสีข้อมถูกใช้เป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่ สิ่งทอ กระดาษ เครื่องสำอาง อาหาร และการพิมพ์ เป็นต้น [1] จึงก่อให้เกิดน้ำเสียสีข้อมปริมาณมากตามมา เมื่อเกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติส่งผลให้สภาวะของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ถ้ามีการปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายเนื่องจากสีข้อมบางชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีข้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [2] วิธีการบำบัดสีข้อมในปัจจุบัน ได้แก่ วิธีการใช้โอโซน การกรองด้วยเยื่อกรอง การแลกเปลี่ยนไอออน และการตกตะกอน ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถกำจัดสีข้อมจริงและสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการเลือกในการบำบัดสีข้อมที่มีประสิทธิภาพสูง รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการสะสมโมเลกุลสีข้อมไว้บนพื้นผิวของสารดูดซับ สารดูดซับที่ดีควรเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง มีรูพรุน เช่น ถ่านกัมมันต์ แต่อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์มีราคาแพง เนื่องจากต้องใช้พลังงานสูงในขั้นตอนการเตรียม จึงได้มีการพัฒนาสารดูดซับทางเลือก เช่น แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite: MMt) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกและพบมากในประเทศมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ที่พื้นผิวมีประจุลบ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลสีข้อมที่มีประจุบวกสูง [3] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า MMt ในการดูดซับสีข้อมเมทิลีนบลู มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมเท่ากับ

61% [4] และการกำจัดสีข้อมมาลาไคท์กรีน ด้วย MMt มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม 97% [5] และงานวิจัยของ Ponchami Sharma et al., [2015] การกำจัดสีข้อมเมทิลกรีนด้วย MMt มีประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมเท่ากับ 68.35% และการกำจัดสีข้อมเบสิกเยลโล 2 ด้วย MMt มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 97.32% [7] อย่างไรก็ตาม การดูดซับเป็นเพียงการถ่ายโอนมวลของสีข้อมไปยังพื้นผิวของสารดูดซับเท่านั้น จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนในการกำจัดสีข้อมออกจากผิวของสารดูดซับเพิ่มเติม เช่น การใช้เอนไซม์ และการชะละลายด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในพัฒนาวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับและสามารถย่อยสลายสีข้อมได้ เช่น การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ครึ่งบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (TiO₂-MMt) เพื่อใช้เป็นทั้งสารดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสง โดยใช้คุณสมบัติของแร่ดิน MMt ในการดูดซับสีข้อมและใช้คุณสมบัติของ TiO₂ ในการย่อยสลายสีข้อมหลังเกิดการดูดซับ

TiO₂ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกและไม่เป็นพิษ มีความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และยังเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว TiO₂ ประกอบด้วย วาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์โดยมีช่องว่างแบนด์แกป (Band gap) อยู่ระหว่างแบนด์ทั้งสอง เมื่อได้รับพลังงานแสงอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ไปยังรีดักชันแบนด์ ทำให้เกิดเป็นโฮลซึ่งที่วาเลนซ์แบนด์ หรือคู่อิเล็กตรอน-โฮล (e⁻/h⁺ pairs) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดสองแบบ คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลาย (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) หรือ

อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังโพลีโนวาเลนส์แบนด์ (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน) การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิสจะทำให้สารอินทรีย์เกิดการย่อยสลายไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ แกลื่อนินทรีย์ และน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม TiO_2 มีลักษณะเป็นผงเมื่อนำไปใช้งาน TiO_2 อาจเกิดการรวมกันเป็นก้อนในขณะที่เกิดปฏิกิริยาส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลง [8] และการนำกลับมาใช้ใหม่ค่อนข้างลำบากเนื่องจากมีลักษณะเป็นผง ดังนั้นการตรึงอนุภาค TiO_2 ไว้บนพื้นผิวแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สามารถลดข้อจำกัดดังกล่าวได้

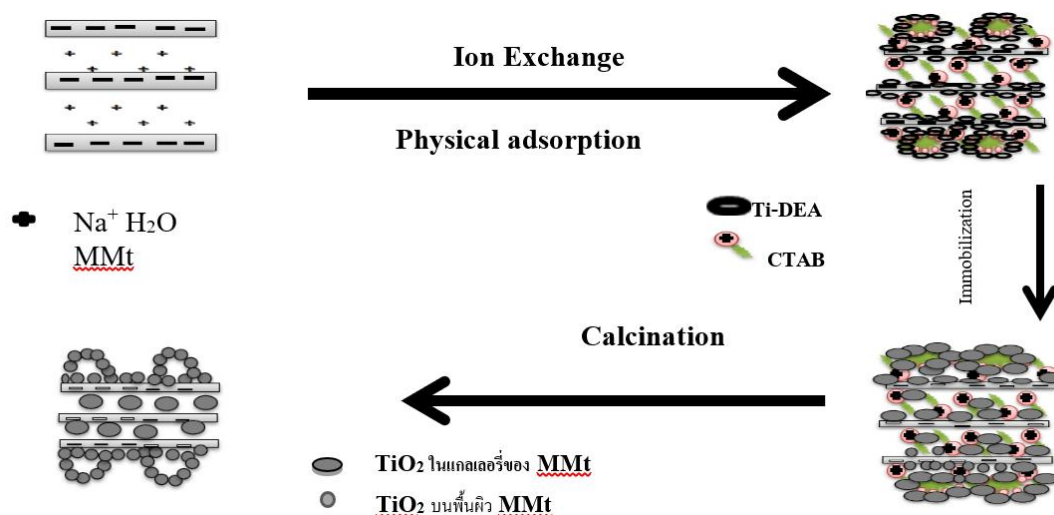
การเตรียม TiO_2 -MMt จะไม่นิยมผสม TiO_2 กับแร่ดิน MMt โดยตรง เนื่องจาก TiO_2 มีความเสถียรสูง แต่จะเตรียมจากการนำสารลดแรงตึงผิวมาผสมกับโมเลกุลไทเทเนียมเพื่อให้เกิดเป็นโมเลกุลแขวนลอยแล้วนำไปดูดซับบนแร่ดิน MMt จากนั้น ทำการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อเปลี่ยน Ti ไปเป็น TiO_2 [3,9] ในขั้นตอนของการเตรียม TiO_2 บน MMt พบว่าปริมาณของสารลดแรงตึงผิวประเภทควอเตอรารีเอมีน แคลโอออน (Quaternary amine cations: QACs) มีอิทธิพลต่อการตรึง TiO_2 บนแร่ดิน MMt และส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสาร 2,4-ไดคลอโรฟีนอล นั่นคือปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม (0.5 g) ทำให้เกิดการกระจายตัวของ TiO_2 อย่างสม่ำเสมอบนผิวของแร่ดิน MMt และส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงถึง 94.7% [10]

TiO_2 -MMt สามารถนำมาพัฒนาเป็นได้ทั้งเป็นสารดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้ TiO_2 -MMt ในการดูดซับสีอะครีลิก 28 และสีอะครีลิก 41 โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับสีอะครีลิก 28 เท่ากับ 52.50% และ 66.74% ตามลำดับ [11] และใช้ TiO_2 -MMt ในการดูดซับสีอะครีลิก 31 มีประสิทธิภาพดูดซับสูงสุดเท่ากับ 80% [12] และการใช้

TiO_2 -MMt เพื่อกำจัดสีอะครีลิก 31 ด้วยการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 67.6% [13]

ในส่วนของการพัฒนา TiO_2 -MMt เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ ได้มีการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมาก งานวิจัยของ R. Djellabi et al., [2017] รายงานการใช้ TiO_2 -MMt เพื่อกำจัดสีอะครีลิกด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีอะครีลิก 28 เท่ากับ 97.1%, 93.20%, 79.8%, 36.1%, 22.6% ตามลำดับงานวิจัยของ B. Otsukarci and Y. Kalpakli. [2015] ทำการเตรียม TiO_2 -MMt ซึ่งนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสโดยประสิทธิภาพการกำจัดสีอะครีลิก 28 เท่ากับ 86.30% และสีอะครีลิก 41 เท่ากับ 92.39% งานวิจัยของ Nadjia K.B. et al., [2013] ศึกษาการเตรียม TiO_2 -MMt และ TiO_2 -Mt/PTP20%-SDS มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีอะครีลิก 6G ได้สูงถึง 74.3% และ 85% ตามลำดับ และการเตรียม TiO_2 -MMT เพื่อใช้กำจัดสีอะครีลิก 31 โดยอัตราส่วน Ti/MMt (120 80 60 mmol/g) พบว่า TiO_2 -MMt/120 TiO_2 -MMt/80 TiO_2 -MMt/60 มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสีอะครีลิก 31 เท่ากับ 58.7%, 56.8%, 67.3% ตามลำดับ [16]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ศึกษาคุณลักษณะของ TiO_2 -MMt และประสิทธิภาพการดูดซับสีอะครีลิก 31 จากสารละลาย ภายใต้สภาวะที่มี ค่า pH ของสารละลาย เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีอะครีลิก และอุณหภูมิแตกต่างกัน และนำสารดูดซับที่อิ่มตัวด้วยสีอะครีลิกไปศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีอะครีลิกด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตะไลซิส และศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ และการนำกลับมาใช้ซ้ำของ TiO_2 -MMt ในการกำจัดสีอะครีลิก



ภาพที่ 1 กระบวนการตรึงไททาเนียมไดออกไซด์บนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมี

สารละลายไททาเนียมบิวทอกไซด์ (Ti(OBu)₄) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (C₃H₈O) กรดไนตริก (HNO₃) อะซีติลอะซีโตน (AcAc) ไดเอทานอลามีน (C₄H₁₁NO₂) แอนไฮดริสเอทานอล สารลดแรงตึงผิวซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ความบริสุทธิ์มากกว่า 96% บริษัท FlukaChemika แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (MMt) จาก บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด

2.2 การเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์

เตรียมสารละลาย ไททาเนียม -ไดเอทานอลามีน (Ti-DEA) โดยเติมสารละลายไททาเนียมบิวทอกไซด์ 5mL ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 5mL และน้ำกลั่น 30 mL ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 mL จากนั้นเติมกรดไนตริก 1 mL และ อะซีติลอะซีโตน 1 mL กวนผสมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็กความเร็วรอบ 600 rpm เป็นเวลา 10 hr ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นเติมไดเอทานอลามีน 5 mL กวนผสมด้วยเครื่องกวนสารละลายแบบแม่เหล็ก ความเร็วรอบ 600 rpm เป็นเวลา 10 hr ที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB

0.15 g กวนผสมด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก ความเร็วรอบ 600 rpm เป็นเวลา 4 hr ได้สารแขวนลอย DEA – Ti- CTAB

นำแร่ดิน MMt มาล้างด้วยแอนไฮดริสเอทานอล ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำแร่ดิน MMt 1 g ไปใส่ในน้ำปราศจากไอออน 20 mL กวนผสมด้วยเครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กความเร็วรอบ 600 rpm เป็นเวลา 4 hr หยดสารแขวนลอย DEA - Ti-CTAB บนแร่ดิน MMt ที่ละลายที่ 70 °C แล้วกวนผสมด้วยเครื่องกวนสารความเร็วรอบ 600 rpm เป็นเวลา 5 hr นำไปปั่นเหวี่ยง ความเร็วรอบ 3,000 rpm เวลา 5 นาที นำส่วนที่เป็นตะกอนมาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 hr นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 4 hr จะได้ตัวดูดซับ TiO₂-MMt (TMMt) ดังภาพที่ 1 ซึ่งการตรึง DEA - Ti-CTAB บน MMt สารแขวนลอย DEA - Ti-CTAB ถ่ายโอนมวลเข้าสู่แกนของ MMt แล้วเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน และกระบวนการดูดซับทางกายภาพ และเมื่อทำการเผาจึงทำให้โมเลกุลของ DEA-Ti-CTAB ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นโมเลกุลของ TiO₂ ตรึงอยู่บนพื้นผิว MMt ซึ่งปริมาณสารลดแรงตึงผิวจะเป็นตัวกำหนดการกระจายอนุภาค TiO₂ ที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของ TMMt จากนั้นนำสารดูดซับ MMt และ TMMt ไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การวิเคราะห์พื้นที่

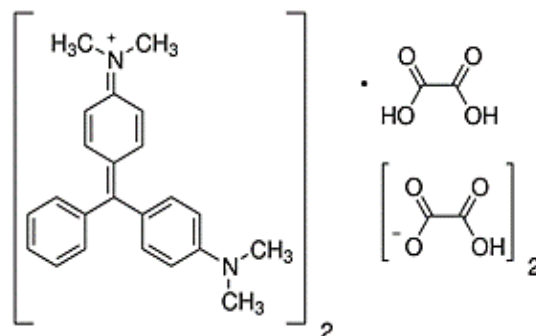
ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนเฉลี่ย ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer) การวิเคราะห์สัณฐาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) วิเคราะห์โครงสร้างผลึก ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier-transform infrared spectroscopy: FTIR)

วิเคราะห์หา Point of zero charge (จุดที่มีประจุสุทธิเป็นศูนย์) ของตัวดูดซับและสีย้อม โดยใช้วิธีโซลิดแอดดิชัน (Solid addition method) นำตัวดูดซับจำนวน 0.1 g เติมนลงในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1 M จำนวน 100 mL ทำการปรับค่า pH₀ (พีเอชเริ่มต้น) ต่าง ๆ กัน ได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 ด้วยสารละลาย HNO₃ และ NaOH ที่ความเข้มข้น 0.1 M นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 60°C หลังจากนั้นนำไปวัดค่า pH_f (พีเอชสุดท้าย) แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่าง pH₀ – pH_f (ของแต่ละ pH ต่าง ๆ) และค่า pH₀ ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลาย NaCl ไปเป็น 0.01 M

2.3 การเตรียมสารละลายสีย้อม

สีย้อมมาลาไคท์กรีน ออกซาเลต คลิสตัล (Malachite green oxalate crystal: MG) มีสูตรทางเคมี [(C₂₃H₂₅N₂)·(C₂H₂O₄)]₂ น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 927.02 g/mol ความยาวคลื่นที่ดูดซับแสงยูวีสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 611 nm โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม MG แสดงไว้ในภาพที่ 2 สารละลายสต็อก (Stock solution) เข้มข้น 1,000 mg/L จะถูกเตรียมโดยทำการชั่งสีย้อม MG จำนวน 1.0 g เติมนลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1 L หลังจากนั้นทำการเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่ต้องการ โดยวิธีการเจือจางวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการสร้างกราฟมาตรฐาน

(Standard curve) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นของสีย้อม วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis-Spectrophotometer) [17]



ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม MG [18]

2.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมโดยกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม MG ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม MG เท่ากับ 200 mg/L ปริมาตรของสีย้อม 100 mL pH=3.67 (pH ของน้ำสีสังเคราะห์เริ่มต้น) ความเร็วรอบของการกวน 200 rpm ระยะเวลาในการดูดซับ 24 hr ที่อุณหภูมิ 35°C ตัวดูดซับ 2 ชนิด ได้แก่ MMt และ TMMt (ที่กำลังศึกษาและพัฒนาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา)

ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้น 3-9 การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส 0-24 hr การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100-500 mg/L และการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 25-55°C นอกจากนี้ ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ และเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ จากนั้นนำตัวดูดซับที่อิ่มตัวด้วยสีย้อมไปศึกษาการกำจัดสีย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสโดยใช้รังสี UVC ที่ความยาวคลื่น 254 nm เป็นเวลา 24 hr หลังจากนั้นนำมาศึกษาการคายซับ โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยา TMMt 0.1 g ที่ดูดซับสีย้อมมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C แล้วนำมาผสมกับสารละลาย 0.1 M HNO₃ ปริมาตร 100 mL ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่า

แนวราบที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 hr ที่อุณหภูมิ 25°C นำไปแยกตัวเร่งปฏิกิริยา TMMt ออก โดยกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาด 47 mm และนำสารละลายส่วนที่ใสมาวัดค่าการดูดกลืนแสงและเปลี่ยนความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นศึกษาการคายซับและการนำกลับมาใช้ซ้ำ

ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใดๆ (q_t ; mg/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%Removal) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{m} \quad (1)$$

$$\%Removal = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100\% \quad (2)$$

โดย C_0 คือความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L) C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาใดๆ (mg/L) m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (g) และ V คือปริมาตรของสารละลาย (L) นอกจากนี้คำนวณปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e , mg/g) ได้โดยเปลี่ยนตัวแปร C_t ในสมการที่ 1 เป็น C_e ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล (mg/L)

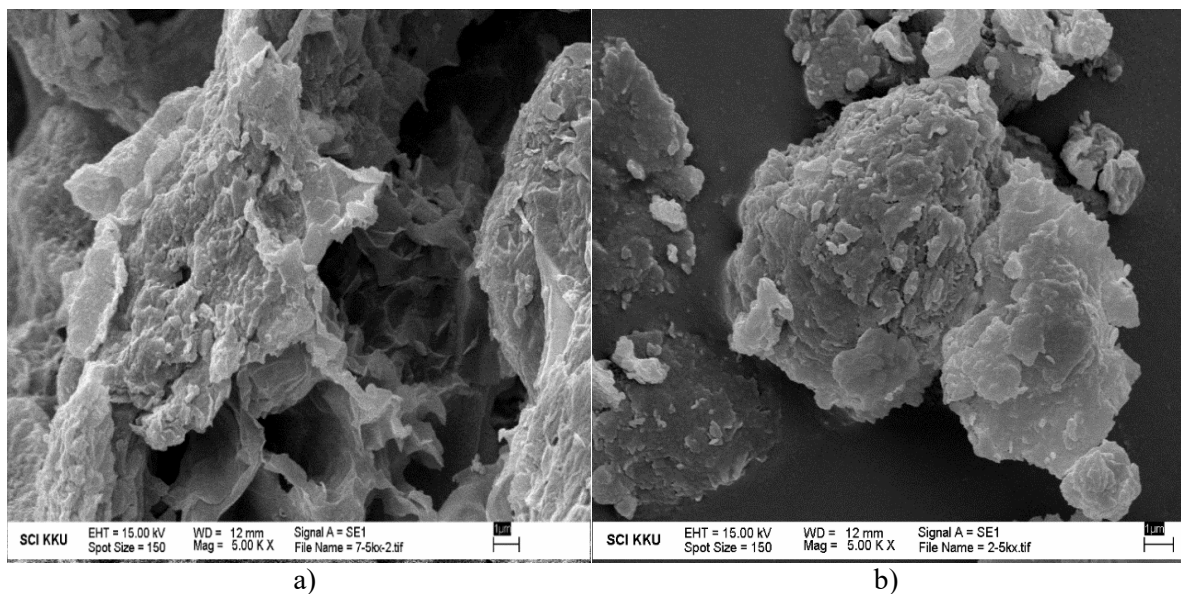
3. ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย และประสิทธิภาพการกำจัดสี MG ของสารดูดซับ

สารดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ ^a (m ² /g)	ปริมาตรของรูพรุน ^b (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ^c (nm)	%Dye removal
MMt	48.80	0.096	16.88	93
TMMt	14.25	0.058	21.45	53

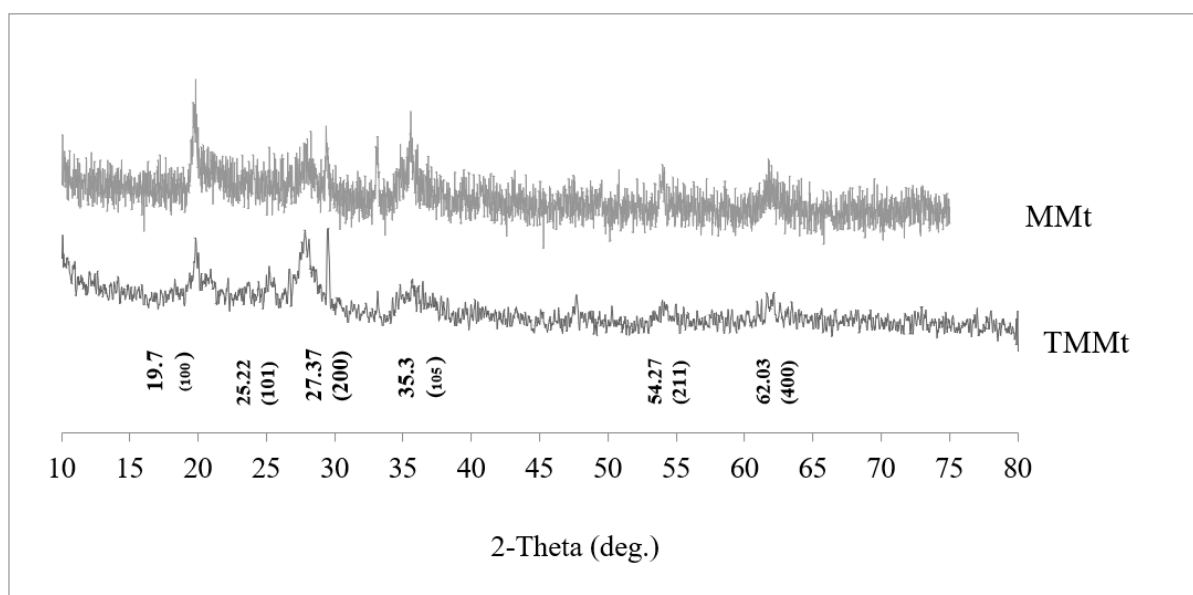
หมายเหตุ: ^a คำนวณจากสมการของ BET และ ^{b,c} คำนวณตามวิธีของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH)



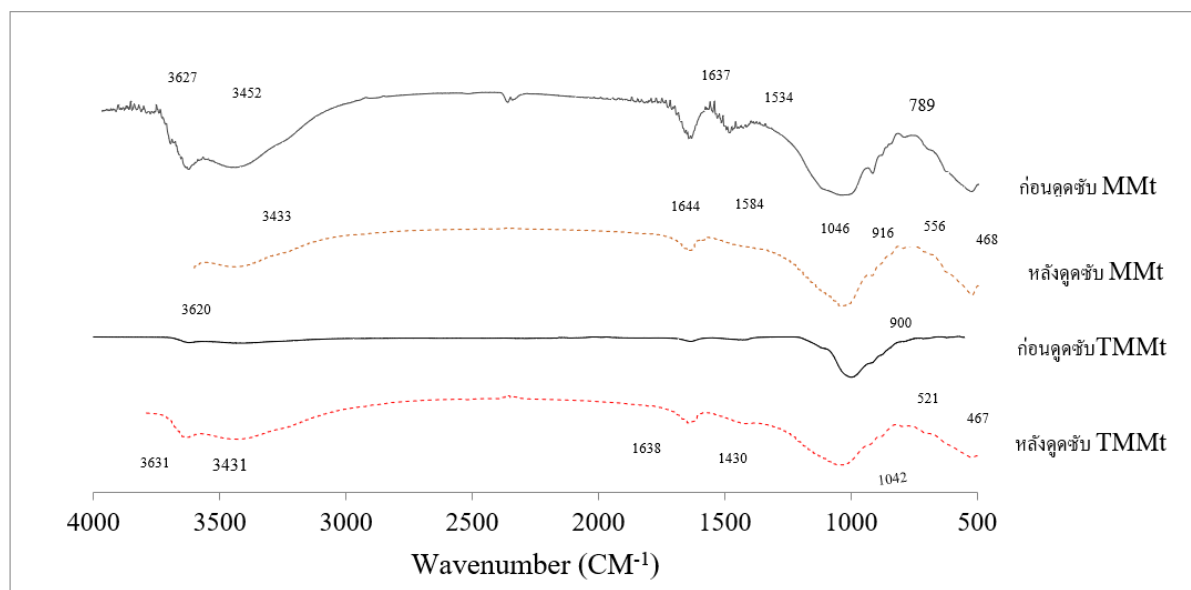
ภาพที่ 3 การศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาตัวดูดซับ a) MMt b) TMMt

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตร และ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า TiO_2 -MMt มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนน้อยกว่าแร่ดิน MMt แต่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากการขึ้นตอนการเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) ส่งผลให้รูพรุนของแร่ดินเกิดการหลอมรวมเป็นกันกลายเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้อนุภาค TiO_2 ที่ยึดติดที่ผิวภายนอกของแร่ดิน MMt อาจเข้าไปปิดกั้นรูพรุนขนาดเล็กไว้ ทำให้สูญเสียพื้นที่จำเพาะภายในโครงสร้างของแร่ดิน MMt ไป ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของ TiO_2 -MMt ลดลง และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ปริมาณการดูดซับสีข้อม MG ลดลง

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเครื่อง SEM ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 3 พบว่า พื้นผิวของแร่ดิน MMt (ดูภาพที่ 3 (a)) มีลักษณะขรุขระไม่เรียบไม่เป็นระเบียบ เรียงเป็นชั้นๆ และมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว [19] เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ของ TMMt (ดูภาพที่ 3 (b)) พบว่า พื้นผิวของ TiO_2 -MMt มีลักษณะเรียบ มีจำนวนรูพรุนขนาดเล็กน้อยกว่าพื้นผิวของแร่ดิน MMt การเผาแร่ดินที่อุณหภูมิสูง (500°C) เป็นสาเหตุให้รูพรุนขนาดเล็กของแร่ดินเกิดการหลอมรวมกันกลายเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ และเกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวจำเพาะภายในรูพรุนขนาดเล็กไป [20]



ภาพที่ 4 XRD pattern ของ MMt และ TMMt



ภาพที่ 5 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ของตัวดูดซับ MMt และ TMMt ก่อนและหลังการดัดซับ

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ XRD ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ผลการวิเคราะห์ XRD pattern ในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับ JCPDS card no. 21-1272 (Anatase TiO_2) ซึ่งได้ระบุว่า ค่า 2θ ที่พิกัด 25.22° และ 54.27° ของ TMMt ขึ้นชั้นการปรากฏอยู่ของโครงสร้างอะนาเทส [21] นอกจากนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thamaphat et al. (2008) ซึ่งระบุในงานวิจัยว่า พิกัดที่ 25° และ 54° มีการปรากฏอยู่ของโครงสร้างอะนาเทสของ TiO_2 [22]

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ของตัวดูดซับ TMMt ก่อนและหลังการดัดซับในภาพที่ 5 พบว่า

IR-Spectra ของ MMt แสดงให้เห็นหมู่ O-H stretching ที่ช่วงพิกัด $3623 - 3452 \text{ cm}^{-1}$ หมู่ H-O-H bending ที่พิกัด $1637-1534 \text{ cm}^{-1}$ หมู่ Fe-O-Si ที่พิกัด 789 cm^{-1} ดังงานวิจัยของ Mansor Bin Ahmad et al., [2010] ซึ่งรายงานว่าหมู่ O-H stretching ปรากฏที่ช่วงพิกัด $3619-3425 \text{ cm}^{-1}$ หมู่ H-O-H bending ปรากฏที่ช่วงพิกัด $1637-1502 \text{ cm}^{-1}$

IR Spectra ของตัวดูดซับ TMMt ปรากฏพิกัดในช่วง $3,000-3,500 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพิกัดที่กว้างที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ O-H stretching ของหมู่ H_2O และ Ti-OH หมู่ C=C stretching ที่พิกัด $1,630 \text{ cm}^{-1}$ ตำแหน่งที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ O-H bending ของหมู่ H_2O พิกัดในช่วงประมาณ $500-900 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพิกัดที่กว้างและมีความความเข้มของพิกัดสูงมากตำแหน่งที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ Ti-O stretching ของหมู่ TiO_2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฟินิจ เอี่ยมสะอาด และคณะ [2559] ซึ่งระบุในงานวิจัยถึงการปรากฏพิกัดในช่วง $3,000-3,500 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพิกัดที่กว้างที่สัมพันธ์กับการสั่นแบบ O-H stretching ของหมู่ H_2O และ Ti-OH และสั่นแบบ O-H bending ที่ 1650 cm^{-1} และพบโครงสร้างของ TiO_2 ที่แสดงการสั่นของพันธะ Ti-O stretching ที่ปรากฏพิกัดในช่วง $500-900 \text{ cm}^{-1}$

IR Spectra ของตัวดูดซับ MMt หลังการดัดซับ พบ หมู่ Al-OH ที่พิกัด 3620 cm^{-1} หมู่ H-OH stretching ที่พิกัด 3433 cm^{-1} หมู่ C-O bending ที่พิกัด $1,046 \text{ cm}^{-1}$

หมู่ Si-O-Al และ Si-O-Mg ปรากฏในช่วง พิก 556-468 cm^{-1} และแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง MG กับ MMT คือ หมู่ C=C stretching กลุ่ม Aromatic rings ของ MG ที่พิก 1644 cm^{-1} หมู่ C-N stretching กลุ่ม Tertiary amines ของ MG ที่พิก 1584 cm^{-1} และ Si-O^{δ-δ+}-MG⁺ จากหมู่ Si-O bond เกิดจากการรวมตัวกันของ MG กับ SiO₂ ของ MMT ที่พิก 916 cm^{-1} เป็นการยืนยันว่า MG ถูกดูดซับบน MMT ดังงานวิจัยของ Qingqing Wang et al., [2012] IR Spectra ของตัวดูดซับ TiO₂- PAN/O-MMT หลังจาก

ดูดซับสีข้อม MB เกิดหมู่ Si-O bond เกิดจากการรวมตัวกันของ MB กับ SiO₂ ที่พิก 912 cm^{-1}

IR Spectra ของตัวดูดซับ TMMt หลังการดูดซับ พบหมู่ OH-bending ที่พิก 3631 cm^{-1} หมู่ H-OH stretching ที่พิก 3431 cm^{-1} หมู่ CH₃ ที่พิก 1,430 cm^{-1} หมู่ C-O bending ที่พิก 1,042 cm^{-1} หมู่ Si-O-Al และ Si-O-Mg ปรากฏในช่วงพิก 521-467 cm^{-1} และแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง MG และTMMt คือหมู่ C=C stretching กลุ่ม Aromatic rings ที่พิก 1,638 cm^{-1} [4]

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ

	Band range (cm^{-1})		Functional groups	Possible constituents	Reference
	MMt	TMMt			
ก่อนดูดซับ	3623 - 3452	3500-3000	O-H stretching	Alcohols, (stretching, Free OH)	Mansor Bin Ahmad et al., (2010). [23]
	1637-1534	1630	H-O-H bending C=C stretching	Alkene, (stretching, non conjugation)	Paul D. and Daniel N. (2013). [25]
	-	500-900	Ti-O stretching	TiO ₂	Wang, G. et al., (2012) [26]
	789	-	Mg-Al-OH stretching	Magnesium	Mansor Bin Ahmaded et al., (2010) [23]
หลังดูดซับ	3620	3631	Al-OH OH-bending	hydroxyl groups	Djelloul Bendaho et al., (2015) [27]
	3433	3431	H-OH stretching	H ₂ O	Djelloul Bendaho et al., (2015) [27]
	1644	1638	C=C stretching	aromatic rings	Qingqing Wang et al., (2012) [14]
	-	1430	CH ₃	CH Bending Vibrations	Paul D. and Daniel N. (2013). [25]
	1584	-	C-N stretching	amide II band tertiary amines	Qingqing Wang et al., (2012) [14]
	1046	1042	C-O bending	carbonyl and carboxyl	V. M. Muinde1 et al., (2017) [28]
	916	-	Si-O bond	silicones	Qingqing Wang et al., (2012) [14]
	556-468	521-467	Si-O-Al Si-O-Mg	Aluminosilicate magnesium silicate	Haithem Hadjltaief et al., (2018) [29]

ดังแสดงในตารางที่ 2 การปรากฏของหมู่การสั่นแบบ Ti-O stretching ของหมู่ TiO₂ ใน IR Spectra ของตัวดูดซับ เป็นการยืนยันได้ว่าโมเลกุลของ TiO₂ ตรึงบนแร่ดิน MMT มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันเพิ่มขึ้นก่อนหน้านี้ได้มีการรายงานผลการวิจัยในลักษณะเดียวกัน นั่นคือ การตรึง TiO₂-MMt [30] มีการปรากฏโมเลกุลของ TiO₂ อยู่บนพื้นผิวภายนอกของ MMT เช่นกัน

3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสีข้อมโดยกระบวนการดูดซับ

3.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม

ผลของตัวดูดซับ MMT และ TMMt ณ สภาวะการทดลองที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg/L เวลาสัมผัส 24 hr ค่า pH=3.67 พบว่า เมื่อศึกษาเปรียบเทียบ

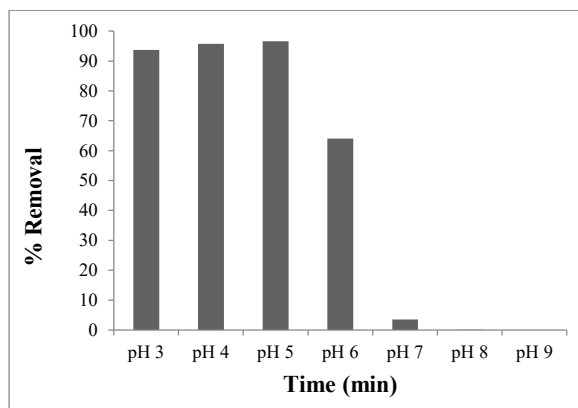
เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีข้อม MG พบว่า MMT และ TMMt มีเปอร์เซ็นต์การกำจัด MG เท่ากับ 93% และ 53% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา TMMt ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม MG ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแร่ดิน MMT แต่อย่างไรก็ตาม TMMt จะถูกนำไปใช้ในการศึกษาการย่อยสลายด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสต่อไป เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีกลไกในการกำจัดสีข้อมแตกต่างกับกระบวนการดูดซับ โดยกระบวนการเป็นการย่อยสลายสีข้อมให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และสารอนินทรีย์ ส่วนกระบวนการดูดซับเป็นการถ่ายโอนมวลสีข้อมจากวัฏภาคของเหลวไปตรึงไว้บนวัฏภาค

ของแข็งเท่านั้น และจำเป็นต้องหาวิธีในการย่อยสลายสี
ย้อมต่อไป

3.2.2 การศึกษาอิทธิพลค่า pH ต่อการกำจัดสีย้อม

เปอร์เซ็นต์การกำจัดสี MG สูงขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น
จาก 3 ไปถึง 5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ pH 5
(97%) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มค่า pH สูงกว่านี้
ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม
กับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม MG
ที่อุณหภูมิ 35°C ของ TMMt

การเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม
ในช่วง pH 3-5 เนื่องมาจากการเพิ่มค่า pH จะทำให้
ปริมาณของโปรตรอน (H^+) ในสารละลายลดลง จึงทำให้
มีโปรตรอนซึ่งจะแข่งขันกับสีประจุบวก MG ในการ
ครอบครอง Active site น้อยลง จึงทำให้ MG
ครอบครอง Active site ได้มากขึ้น เมื่อค่า pH สูงกว่า 5
ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลง และลดลงอย่างมากเมื่อ
ค่า pH อยู่ในช่วง 6-9 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของ
ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะเข้าไปยึดเหนี่ยวกับหมู่
ฟังก์ชันที่มีประจุบวกของสีย้อม MG ทำให้สีย้อมเป็น
โมเลกุลที่ไม่มีประจุ (Neutral solute) จึงไม่สามารถเข้า
ไปครอบครอง Active site ที่มีประจุได้ ลักษณะเช่นนี้ทำ
ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมลดลงและมีค่าเป็น 0% ที่
ค่า pH 9

การวัดศักย์ซีต้าเพื่อหาค่าพีเอชที่ทำให้ประจุที่ผิวของ
ตัวดูดซับเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pzc) ค่า pH
< pH_{pzc} แสดงว่าประจุที่ผิวของตัวดูดซับเป็นประจุบวก
ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่า pH > pH_{pzc} ประจุที่ผิวของตัว
ดูดซับเป็นประจุลบ [14] จากผลการทดลองพบว่า ตัวดูด
ซับ TMMt มีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 8.0 ซึ่งถ้าสารละลายที่ใช้
ในกระบวนการดูดซับมี pH < pH_{pzc} แสดงว่าประจุที่ผิว
ของตัวดูดซับจะมีค่าเป็นบวกเมื่อนำมาใช้ ในการดูดซับ
สีย้อม MG ซึ่งมีประจุบวกควรจะให้ผลประสิทธิภาพการ
ดูดซับต่ำ

โดยทั่วไป ค่า pH_{pzc} ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาแรงยึด
เหนี่ยวอิเล็กโตรสแตติก (Electrostatic interaction)
ระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับว่าเป็นกลไกหลักในการ
ดูดซับหรือไม่ แต่อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองในงานวิจัย
นี้ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าสูงในช่วง pH <
 pH_{pzc} ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กโตรสแตติก
ไม่ได้เป็นกลไกหลักของการดูดซับ แต่อาจจะมีกลไกอื่นๆ
เป็นกลไกหลัก เช่น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน
(Complexation dissolution) การละลาย
(Dissolution) และ การตกตะกอน (Precipitation)
เป็นต้น

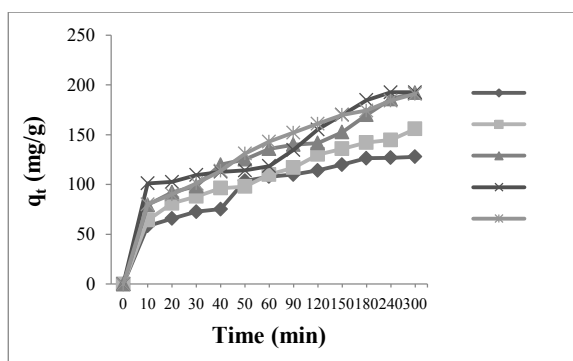
3.2.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการ กำจัดสีย้อม

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อ
ความสามารถในการดูดซับได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 7
พบว่าตัวดูดซับ TMMt มีความสามารถในการดูดซับ
สีย้อม เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นในช่วง
150–300 mg/L หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสูงกว่า
300 mg/L ปริมาณการดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวแล้วเมื่อความเข้มข้น
ของสีย้อมเท่ากับ 300 mg/L ดังนั้น ความเข้มข้นของสี
ย้อมที่เหมาะสมได้แก่ 300 mg/L ดังงานวิจัยของ
Chowdhury and Saha [2010] พบว่าการเพิ่มความ
เข้มข้นของสารละลายทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะเป็น

การเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบนตัวดูดซับกับสารละลาย

3.2.4 การศึกษาอิทธิพลของเวลาต่อการกำจัดสีของ

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมพัทธ์ต่อความสามารถในการดูดซับได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 7 พบว่า ปริมาณการดูดซับสีของเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ในช่วงแรกๆ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกตัวดูดซับยังมีพื้นที่ผิวว่างทำให้โมเลกุลของสีสามารถเข้าไปยึดเกาะได้แต่เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงจุดๆ หนึ่งบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเริ่มเต็มไปด้วยโมเลกุลของสีจึงมีปริมาณการดูดซับที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และจะเข้าสู่สมดุลการดูดซับในเวลา 240 นาที ดังงานวิจัยของ Iqbal and Ashiq [2007] พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกการดูดซับเกิดเร็วมาก เนื่องจากเกรเดียนของความเข้มข้น (Concentration gradient) ในสารละลายสูง และที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับยังคงมีมากทำให้ดูดซับสีได้มาก หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่สภาวะสมดุล เพราะที่ว่างเหล่านั้นดูดซับสีอิ่มตัวแล้ว [2, 33,34]

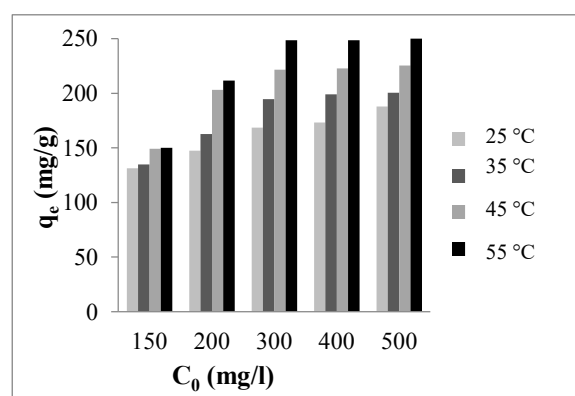


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีของกับความเข้มข้นและเวลาสัมพัทธ์ของน้ำสีของ MG ที่อุณหภูมิ 35°C ของ TMMt

3.2.5 การศึกษาอุณหภูมิต่ออัตราการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการดูดซับดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C- 55°C

มีความสามารถในการดูดซับสีของเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งอาจเนื่องจากสมมติฐานคือ การดูดซับเป็นกระบวนการทางเคมี และการดูดซับเกิดปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้ความสามารถการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของสีของ MG บนผิวของ TMMt อาจสูงขึ้นด้วย ซึ่งการดูดซับสีของที่อุณหภูมิสูงสุดคือ 55°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่ผ่านมาซึ่งมีการศึกษาการดูดซับสีของ MG ด้วยวัสดุนาโนคอมพอสิตและดินเหนียว [35] พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการดูดซับซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสีของกับอุณหภูมิ น้ำสีของ MG ของ TMMt

3.2.6 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เพื่อศึกษากลไกการดูดซับของสีของ MG บน TMMt ผลการทดลองจะถูกนำมาพล็อตกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) [36] แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย [37] โดยมีสมมติฐานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพื้นผิวของตัวดูดซับ ที่ว่างจากตัวถูกดูดซับ ถ้าข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมแสดงว่าขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสีของบนพื้นผิวของสารดูดซับเป็น

ขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 5

$$\frac{dq_e}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (5)$$

ที่ซึ่ง $k_1(\text{min}^{-1})$ คือ ค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งเทียมของ Lagergren q_e คือ ปริมาณสีย้อมในตัวดูดซับที่สถานะสมดุล (mg/g) เมื่อจัดรูปของสมการให้เป็นเส้นตรง จะได้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (6)$$

แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับสองเทียม [38] มีสมมติฐานว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ว่างจากตัวถูกดูดซับถ้าข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียมแสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) ซึ่งมีสมการเป็นไปตามสมการที่ 7

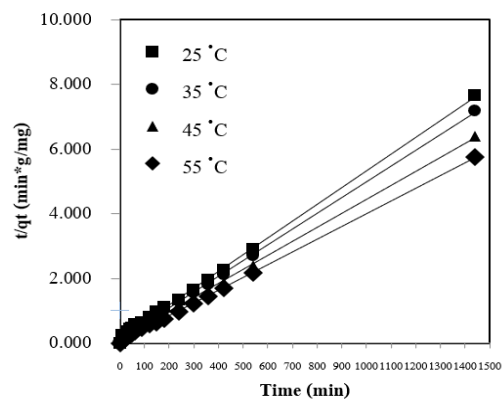
$$\frac{dq_e}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (7)$$

ที่ซึ่ง $k_2 (\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min}))$ คือ ค่าคงที่อัตราอันดับสองเทียม เมื่อจัดรูปของสมการให้เป็นเส้นตรง จะเป็นไปตามสมการที่ 8

$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (8)$$

เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตเชิงเส้นที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันดังภาพที่ 9 และพล็อตกับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม และสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ แสดงในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 จะพบว่าอัตราการดูดซับของ TMMt กับสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมมีค่า R^2 ต่ำกว่า 0.5811 และค่า q_e ที่คำนวณจากแบบจำลองไม่ใกล้เคียง

กับค่า q_e ที่ได้จากการทดลองแต่อัตราการดูดซับมีความสอดคล้องกับสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมโดยมีค่า R^2 ไม่น้อยกว่า 0.9992 และค่า q_e ที่คำนวณจากแบบจำลองใกล้เคียงกับค่า q_e ที่ได้จากการทดลองแสดงว่าอัตราการดูดซับของการดูดซับสีเกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) [39] และจากตารางนี้ยังพบว่า ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี (k_2) ของการดูดซับสีย้อม MG ที่อุณหภูมิ 55°C จะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิ 25°C , 35°C และ 45°C ซึ่งงานวิจัยนี้อุณหภูมิ 55°C มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม MG มากที่สุด โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ $0.26 \text{ g}/\text{mg} \cdot \text{min}$



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $t/q_e (\text{min} \cdot \text{g}/\text{mg})$ และ $t (\text{min})$ แบบจำลองอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) ของการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับลิซซอม MG ของ TMMt

อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first order		
		k_1 (min ⁻¹)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R ²
25	187.89	0.74	91.96	0.9511
35	200.53	0.43	54.99	0.5811
45	225.26	0.64	91.50	0.8808
55	250.00	0.44	41.33	0.4915
อุณหภูมิ (°C)	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-second order		
		k_2 (g/mg*min)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	R ²
25	187.89	0.18	192.31	0.9985
35	200.53	0.21	204.08	0.9992
45	225.26	0.16	232.56	0.9986
55	250.00	0.26	256.41	0.9994

3.2.7 ผลการศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับ

ศึกษาเกี่ยวกับพลังงาน ความร้อน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน $\Delta_{ads}G^\circ$ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี $\Delta_{ads}H^\circ$ และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน $\Delta_{ads}S^\circ$ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard free energy, $\Delta_{ads}G^\circ$) คือเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้มาตรฐานหรือที่สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่สภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm)

สมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard Gibbs' free energy change equation) มีรูปแบบสมการที่ 9

$$(\Delta_{ads}G^\circ) = -RT \ln K_L \quad (9)$$

เมื่อ $\Delta_{ads}G^\circ$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (kJ/mol) R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol * K และ T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K) K_L คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (L/g)

การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads}H^\circ$) คือ การเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากการที่ธาตุองค์ประกอบทำปฏิกิริยากันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบหรือธาตุชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm) และปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบจะเกิดขึ้นในกระบวนการที่ความดันคงที่

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads}S^\circ$) คือ ปริมาณที่บ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบ ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็ยิ่งมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็ยิ่งมีค่าต่ำ โดยค่าเอนโทรปีจะมีค่าขึ้นอยู่กับทั้งเอนทัลปี และ อุณหภูมิ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะมาตรฐาน (25°C และ 1 atm)

การหาค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads}H^\circ$) และเอนโทรปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads}S^\circ$) สามารถหาได้โดยคำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ ดังแสดงในสมการที่ 10 [40]

$$\ln K_L = \frac{\Delta_{ads}S^\circ}{R} - \frac{\Delta_{ads}H^\circ}{RT} \quad (10)$$

เมื่อ $\Delta_{ads}H^\circ$ คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน (kJ/mol) และ $\Delta_{ads}S^\circ$ คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน (kJ/mol * K) R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol * K และ T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K) K_L คือ ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (L/g)

การศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับโดยคำนวณการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน ($\Delta_{ads}G^\circ$) จากสมการการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Standard Gibbs' free energy change equation) เพื่อศึกษาว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้เองหรือไม่ และจะเกิดไปในทิศทางใดคำนวณการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads}H^\circ$) จากสมการที่ 9 เพื่อหาปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าออกจากระบบ และคำนวณการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมาตรฐาน ($\Delta_{ads}S^\circ$) ที่สมการ 10 (Gibbs-Helmholtz equation) เพื่อบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบว่าเกิดไปในทิศทางใด

ตารางที่ 4 พลังงานอิสระมาตรฐานของการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ตัวดูดซับ TMMt ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	$\Delta_{ads}G^\circ$ (kJ/mol)
25	-7.28
35	-10.19
45	-13.57
55	-16.23

ในตารางที่ 4 พบว่า การดูดซับสีย้อม MG ด้วยตัวดูดซับ TMMt ในช่วงอุณหภูมิ 25-55°C มีค่า $\Delta_{ads}G^\circ$ เป็นค่าลบ แสดงว่า ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า (Spontaneous) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่การดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ TiO_2 เป็นตัวดูดซับ [41] และการศึกษาการดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ *Calatropis gigantis bank carbon* เป็นตัวดูดซับ [42]

จากนั้น พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสีย้อม MG ด้วยตัวดูดซับ TMMt แสดงดังภาพที่ 10 ($R^2 = 0.9976$) จากตารางที่ 5 พบว่าช่วงอุณหภูมิ 25-35 °C $\Delta_{ads}H^\circ$ ของตัวดูดซับ TMMt มีค่า $\Delta_{ads}H^\circ$ มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นระบบดูดความร้อน และ $\Delta_{ads}S^\circ$ มีค่าเป็นบวก

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อม MG ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช		
	q_m (mg/g)	k_L (mg/g)	R^2	k_F (L/g)	n	R^2
25	188.68	18.88	0.9960	110.99	11.66	0.9616
35	204.08	53.48	0.9997	126.71	11.83	0.9771
45	227.27	169.50	1	154.49	13.39	0.9011
55	250.00	384.62	1	110.99	5.79	0.8990

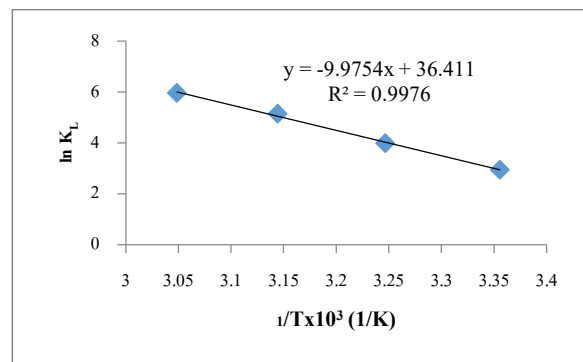
3.2.8 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของกระบวนการดูดซับระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลกับปริมาณตัวดูดซับ สามารถอธิบายกลไกและประสิทธิภาพการดูดซับในเทอมของความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) สมการที่นิยมใช้คือ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir

และมิตาน้อยมาก แสดงว่าหลังเสร็จสิ้นการดูดซับสีย้อมสารดูดซับ TMMt มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ตัวดูดซับ TMMt

อุณหภูมิ (°C)	$\Delta_{ads}H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta_{ads}S^\circ$ (kJ/mol)
25-35	+82.94	+0.30



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_L$ กับ $1/T$ การดูดซับสีย้อม MG โดยใช้ตัวดูดซับ TMMt

adsorption isotherm) ซึ่งการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) พื้นที่ว่างสามารถยึดจับได้หลายโมเลกุล แต่ลักษณะการจัดเรียงตัวของตัวถูกดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว [43] และอีกแบบหนึ่งคือ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) ซึ่งอธิบายกระบวนการดูดซับแบบพื้นผิวหลายชั้น (Heterogeneous surface) เมื่อความเข้มข้นของสาร

เพิ่มขึ้น การดูดซับก็เพิ่มขึ้นแบบไม่จำกัด [44] แสดงได้ดังสมการที่ 11 และ 12

$$q_e = \frac{k_L q_{max} C_e}{1 + k_L C_e} \quad (11)$$

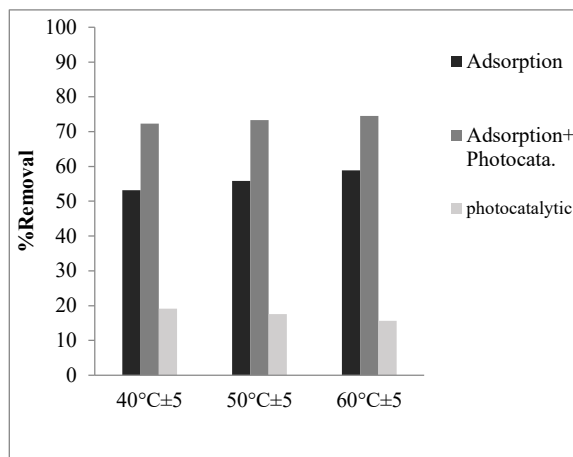
$$q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (12)$$

โดย q_{max} คือ ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (mg/g) และ k_L คือค่าคงที่ของแลงเมียร์ค่าคงที่ k_f คือค่าคงที่ของการดูดซับ $((\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n})/\text{g})$ ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานพันธะและ n เป็นค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยตัวเอง ถ้า $n > 1$ แสดงว่ามีแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยตัวเอง ถ้า n เข้าใกล้ 0 แสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง พิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation, R^2)

จากการศึกษาพบว่า สีย้อม MG เมื่อถูกดูดซับ TMMt พฤติกรรมการดูดซับจะเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และของฟรุนดลิช [45] แต่มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า ทำให้สรุปได้ว่า พฤติกรรมการดูดซับของตัวดูดซับเป็นรูปแบบการดูดซับเป็นแบบพื้นผิวชั้นเดียว (Monolayer adsorbed model) แสดงดังตารางที่ 6

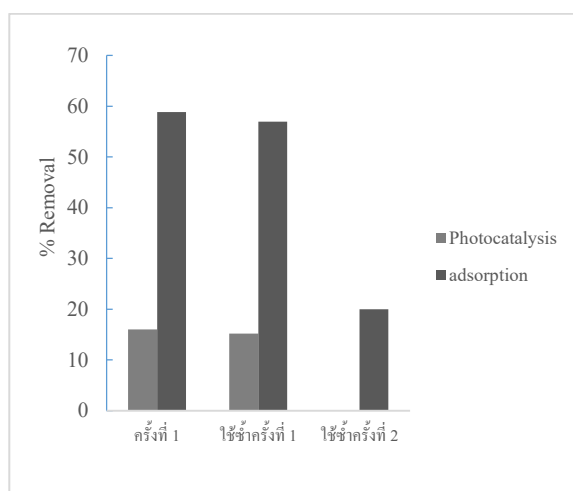
3.3 กระบวนการโฟโตแคตะไลซิส

การศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TMMt ที่สังเคราะห์ได้ภายใต้แสงยูวีซี แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ประสิทธิภาพการกำจัดสี MG ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม MG 400 mg/L เวลา 24 hr

หลังจากที่ศึกษากระบวนการดูดซับแล้วจึงนำตัวดูดซับ TMMt มาศึกษากระบวนการโฟโตแคตะไลซิส พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °C ของ TMMt มีประสิทธิภาพในการดูดซับในที่มีค่าประมาณ 58.85% ซึ่งเหลือความเข้มข้นของสีย้อม MG เพียงพอพอที่จะศึกษาการย่อยสลายสีย้อมซึ่งการกำจัดเพิ่มขึ้น 16% เมื่อเทียบกับการกำจัดด้วยกระบวนการดูดซับเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม MG ในการใช้ซ้ำของ TMMt ด้วยกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม 400 mg/L เวลา 24 hr อุณหภูมิ 60 °C

ผลการศึกษาการคายซับโดยใช้กรดไนตริก (HNO_3) 0.1 M พบว่าประสิทธิภาพการคายซับของ TMMt ครั้งที่ 1 และ 2 เท่ากับ 44% และ 43% ตามลำดับ และการนำกลับมาใช้ซ้ำของ TMMt ทำได้โดยนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสที่สภาวะเวลาในการฉายรังสี 24 hr ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม MG 400 mg/l อุณหภูมิ 60°C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TMMt ให้ประสิทธิภาพการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสเมื่อเปรียบเทียบการใช้ TMMt ในการใช้ซ้ำครั้งที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัด

ด้วยการดูดซับที่เหลือ 57% (ลดลง 2%) และประสิทธิภาพการกำจัดด้วยการโฟโตแคตะไลซิสที่เหลือ 15% (ลดลง 2%) และเมื่อนำมาใช้ซ้ำครั้งที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดด้วยการดูดซับที่เหลือ 20% (ลดลง 37%) และประสิทธิภาพการกำจัดด้วยการโฟโตแคตะไลซิสที่เหลือ 0% (ลดลง 15.2%)

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดสีข้อม MG โดยกระบวนการดูดซับร่วมกับกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสของงานวิจัยอื่นๆ ก่อนหน้านี้

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบการกำจัดสี MG ที่ใช้วัสดุประเภทอื่นๆ ในกระบวนการดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส

ชนิด	Preparation method	Adsorption				Photocatalysis			Reference
		pH	C_0 (mg/L)	contact time (h)	% MG removal	Photocatalysis time (h)	ชนิดแสง UV	% MG removal	
TiO_2	-	-	16.77	0.5	65	0.5	UVC	80	Zeinab M et al., 2015 [46]
TiO_2 nanoparticles	sol-gel	-	50	4	-		UV	99.9	C.C.Chen et al., 2007 [47]
Au/NaNbO_3 nanocomposite	hydrothermal	-	100	-	87	0.67	UV	94	E.S. Baeissa 2016 [48]
Pc/ZSWP nanocomposite	sol-gel	7	14	-	29.55	3	UV	72.87	Vinod Kumar Gupta et al., 2015 [49]
TiO_2 +MMt	sol-gel	5	400	24	59	24	UVC	75	This study

4. สรุปผลการทดลอง

แร่ดิน MMt และ TMMt มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ $48.80 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $24.568 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนรวม 0.096 และ $0.058 \text{ cm}^3/\text{g}$ และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 16.88 และ 21.45 nm ตามลำดับ การวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าพื้นที่ผิวของ TMMt มีลักษณะที่เรียบขึ้น การวิเคราะห์ FT-IR เกิดปรากฏของหมู่ฟังก์ชัน Ti-O stretching ของหมู่ TiO_2 ใน IR Spectra ของ TMMt เป็นการยืนยันได้ว่าโมเลกุลของ TiO_2 ปรากฏอยู่ใน MMt และการวิเคราะห์ XRD พบว่า MMt เกิดเฟสอะนาเทสโดยจะเกิดที่ตำแหน่งประมาณ 25.22° และ 48° ของ TiO_2 (101)

และ (211) (JCPDS No. 21-1272) ตัวดูดซับ TMMt มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมสูงสุด เท่ากับ 97% ที่พีเอช 5 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลคือ 240 นาที ความเข้มข้น 300 mg/l และอุณหภูมิที่ 55°C

นอกจากนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับ ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะแบบชั้นเดียว อัตราการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสีข้อมกับตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นกำหนดอัตรา อีกทั้งผลการทดลองเทอร์โมไดนามิกก็การดูดซับ แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่เกิดขึ้นได้

เอง ส่วนที่ 2 ศึกษาการกำจัดสี MG ด้วยกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสโดยการฉายรังสียูวีซีให้ตัวดูดซับสีที่ย้อมที่อิ่มตัวแล้ว พบว่า ประสิทธิภาพของสีย้อมเพิ่มขึ้น 16% เมื่อเทียบกับการดูดซับอย่างเดียว การนำ TMMt กลับมาใช้ซ้ำครั้งที่ 1 TMMt ยังคงมีประสิทธิภาพการดูดซับและโฟโตแคตะไลซิสได้ใกล้เคียงกับ TMMt ก่อนใช้งาน แต่มีประสิทธิผลลดลงอย่างมากในการใช้ซ้ำครั้งที่ 2

ดังนั้น $\text{TiO}_2\text{-MMt}$ สามารถใช้เป็นตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพในการกำจัดสีย้อม MG จากน้ำเสีย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., Kaur, D. and Gupta, V.K. Adsorption of Hazardous Dye Violet from Wastewater by Waste Materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010; 343 (2-15): 463-473.
- [2] Yanan, D., Yanlei, S., Wenjuan, C., Jinming, P., Yan, Z. and Zhongyi, J. Ultra Filtration Enhanced with Activated Carbon Adsorption for Efficient Dye Removal from Aqueous Solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2011; 19 (5): 863-869.
- [3] Asilturk, M. and Sener, S. TiO_2 -Activated Carbon Photocatalysts: Preparation, Characterization and Photocatalytic Activities. *Chemical Engineering Journal*, 2012; 180: 354-363.
- [4] Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L. and Mello, C.A.D. Removal of Methylene Blue from Colored Effluents by Adsorption on Montmorillonite Clay. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009; 332: 46-53.
- [5] Tahir, H., Hammed, U., Sultan, M. and Jahanzeb, Q. Batch Adsorption Technique for The Removal of Malachite Green and Fast Green Dyes by Using Montmorillonite Clay as Adsorbent. *African Journal of Biotechnology*, 2010; 9(48): 8206-8214.
- [6] Sharma, P., Borah, D. J., Das, P. and Das, M. R. Cationic and Anionic Dye Removal from Aqueous Solution Using Montmorillonite Clay: Evaluation of Adsorption Parameters and Mechanism. *Desalination and Water Treatment*, 2016; (57)18: 8372-8388.
- [7] Hassani, A., Kirans, M., Solotini, R. D. C., Khataee, A. and Karacai, S. Optimization of the Adsorption of a Textile Dye onto Nanoclay Using a Central Composite Design. *Turkish Journal of Chemistry*, 2015; 39: 734 – 749.
- [8] Yasmina, M., Mourad, K., Mohammed, S.H. and Khaoula, C. Treatment Heterogeneous Photocatalysis; Factors Influencing the Photocatalytic Degradation by TiO_2 . *Energy Proceeded*, 2014; 1(50): 559 – 566.
- [9] Arana, J., Dona-Rodriguez, J. M., Rendon E. D. T., Garriga i Cabo, C., Gonzalez-Diaz, O. M., Herrera-Melian, J.A., Perez-Pena, J., Colon, G., and Navio, J. A. TiO_2 Activation by Using Activated Carbon as A Support: Part I. Surface Characterisation and Decantability Study. *Applied Catalysis Environmental*, 2003; 44: 161-172.
- [10] Tingting, Z., Yuan, L., Bing, J., Yan, L., Lingling, Y. and Jiang, Y. Immobilization of Self-Assembled Pre-Dispersed Nano- TiO_2 onto Montmorillonite and Its Photocatalytic Activity. *Journal of environmental Sciences*, 2015; 32: 108-117.
- [11] Otsukarci, B. and Kalpakli, Y. Effect of Dye Type on Montmorillonite-Supported Pr-Doped TiO_2 Composite Photocatalyst. *Acta Physica Polonica A*, 2016; 129: 198-210.
- [12] Khataee, A., Sheydaei, M., Hassani, A., Taseidifar, M. and Karaca, S. Sonocatalytic Removal of an Organic Dye Using TiO_2 /Montmorillonite Nanocomposite. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2015; 22: 404-411.
- [13] Djellabi, R., Ghorab, M. F., Cerrato, G., Morandi, S., Gatto, S. Oldani, V., Di Michele, A. and Bianchi, C.L. Photoactive TiO_2 -Montmorillonite Composite for Degradation of Organic

- Dyes in Water. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2014; 295: 57–63.
- [14] Wang, Q., Gao, D., Gao, C., Wei, Q., Cai, Y., Xu., J., Liu, X., and Xu, Y. Removal of a Cationic Dye by Adsorption/Photodegradation Using Electrospun PAN/O-MMT Composite Nanofibrous Membranes Coated with TiO_2 . *International Journal of Photoenergy*. 2012; doi:10.1155/2012/680419.
- [15] Khalfaoui-Boutoumi, N., Boutoumi, H., Khalaf, H., David, B. Synthesis and Characterization of TiO_2 -Montmorillonite/Polythiophene-SDS Nanocomposites: Application in the Sonophotocatalytic Degradation of Rhodamine 6G. *Applied Clay Science*. 2013; 80 (81): 56–62.
- [16] Chen, K., Li, J., Wang, W., Zhang, Y., Wang, X. and Su, H. The Preparation of Vanadium-Doped TiO_2 -Montmorillonite Nanocomposites and the Photodegradation of Sulforhodamine B Under Visible Light Irradiation. *Applied Surface Science*. 2011; 257: 7276–7285.
- [17] จักรกฤษณ์ อัมพูข. การกำจัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมผ้าในระดับอุตสาหกรรมครัวเรือนโดยใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548.
- [18] Lee, P. W., Ong, S. T., Hung, Y. T. and Lee, S. L. Photodegradation of Malachite Green by Immobilization of Titanium Dioxide on Glass Plates. *Asian Journal of Chemistry*. 2013; 25 (2): 1-5.
- [19] Shirzad-Siboni, M., Khataee, A., Hassani, A. and Karaca, S. Preparation, Characterization and Application of a CTAB-Modified Nanoclay for the Adsorption of an Herbicide from Aqueous Solutions: Kinetic and Equilibrium Studies. *Comptes Rendus Chimie*, 2015; 18 (2): 204–214.
- [20] Qing Qing, W., Lin, P., Guohui, L., Ping, Z., Dawei, L., Fenglin, H. and Qufu, W. Activity of Laccase Immobilized on TiO_2 -Montmorillonite Complexes. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013; 14(6): 12520–12532.
- [21] Ba-Abbad, M., Kadhum, A.H., Mohamad, A., Takriff, M.S. and Sopian, K. Synthesis and Catalytic Activity of TiO_2 Nanoparticle for Photochemical Oxidation of Concentrated Chlorophenols under Direct Solar Radiation. *International Journal of Electrochem Science*, 2012; 7: 4871-4888.
- [22] Thamaphat, K., Limsuwan, P., Ngotawornchai, B. Phase Characterization of TiO_2 Powder by XRD and TEM. *Kasetsart Journal: Natural Science*, 2008; 42: 357-361.
- [23] Ahmad, M. B., Shameli, K., Yunus, W. M. Z. W., Ibrahim, N. A. and Darroudi, M. Synthesis and Characterization of Silver/Clay/Starch Bionanocomposites by Green Method. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2010; 4(7): 2158-2165.
- [24] พินิจ เอี่ยมสะอาด, จิตนภา ศิริรักษ์, สุธิณี เกิดเทพ, ณัฐวรรณ วรวรรโณทัย, พัฒนวิศว์ สว่างลาก, ฉันทนา วัณนิพิฐ, พงษ์พรทิพย์ ชัยมณี, สุพรรณิ ฉายะบุตร และ ชีวิตา สุวรรณชวลิต. การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นสารดูดกลืนรังสียูวีเพื่อเพิ่มความคงทนแสงของผงสีธรรมชาติ. *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*. 2016; 3 (5).
- [25] Djomgoue, P. and Njopwouo, D. FT-IR Spectroscopy Applied for Surface Clays Characterization. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2013; 3: 275-282.
- [26] Wang, G., Xu, L., Zhang, J., Yin, T. and Han, D. Enhanced Photocatalytic Activity of TiO_2 Powders (P25) via Calcination Treatment. *International Journal of Photoenergy*, 2012; 1-9.
- [27] Bendaho, D., Driss, T. A. and Bassou, D. Removal of Cationic Dye Methylene Blue from Aqueous Solution by Adsorption on Algerian Clay. *International Journal of Waste Resources*, 2015; 5(1): 1-6.
- [28] Muinde, V. M., Onyari, J. M., Wamalwa, B., Wabomba, J. and Nthumbi, R. M. Adsorption of Malachite Green from Aqueous Solutions onto Rice Husks: Kinetic and Equilibrium Studies. *Journal of Environmental Protection*, 2017; 8: 215-230.

- [29] Hadjltaief, H., Ameer, S., Da Costa, P., Zina, M., Galvez, M.E. Photocatalytic Decolorization of Cationic and Anionic Dyes Over ZnO Nanoparticle Immobilized on Natural Tunisian Clay. *Applied Clay Science*, 2018; (152):148 - 157.
- [30] Yuan, L.L., Huang, D.D., Guo, W.N., Yang, Q.X. and Yu, J. TiO₂/Montmorillonite Nanocomposite for Removal of Organic Pollutant. *Applied Clay Science*, 2011; 53(2): 272–278.
- [31] Chowdhury, S. and Das, P. Sea Shell Powder as A New Adsorbent to Remove Basic Green 4, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Chemical Engineering Journal*, 2010; 164(1): 168-177.
- [32] Iqbal, M.J. and Ashiq, M.N. Adsorption of Dyes from Aqueous Solutions on Activated Charcoal. *Journal of Hazardous Materials*, 2007; 139, (1): 57-66.
- [33] Fu, D., Zhang, Y., Lu, F., Chu, P.H. and Shang, J. Removal of Organic Materials from TNT Red Water by Bamboo Charcoal Adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 2012; 193–194: 39-49.
- [34] Sartape, A. S., Mandhare, A. M., Jadhav, V. V., Raut, P. D., Anuse, M. A., Kolekar, S. S. Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solution with Adsorption Technique Using Limoniaacidissima (Wood Apple) Shell as Low Cost Adsorbent. *Arabian Journal of Chemistry*, 2017; 10(2): S3229-S3238.
- [35] Venkateswarana, V., Priya, V.T. and Balasubramaniyam, P. Removal of Malachite Green by Stishovite-TiO₂ Nanocomposite and Stishovite Clay -A Comparative Study. *Chemical Science Transactions*. 2013; 2(3): 771-780.
- [36] Junxiong, L. and Lan, W. Comparison Between Linear and Non-Linear Forms of Pseudo-First-Order and Pseudo-Second-Order Adsorption Kinetic Models for the Removal of Methylene Blue by Activated Carbon. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 2009; 3(3): 320-324.
- [37] Ho, Y. S. and McKay, G. Pseudo-Second Order Model for Sorption Processes. *Process Biochemistry*, 1999; 34 (1): 451–465.
- [38] Nesic, A. R., Velickovic, S. J. and Antonovic, D. G. Novel Composite Films Based on Amidated Pectin for Cationic Dye Adsorption. *Colloids and Surfaces B: Biointerface*, 2013; 116: 620-626.
- [39] Ponnusamy, S. K., Abhinaya, V. R., Gayathri Lashmi, K., Arthi, V., Vasanthakumar, S. S. B., Kirupha, S. D. and Sivanesan, S. Adsorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solution by Agricultural Waste: Equilibrium, Thermodynamics, Kinetics, Mechanism and Process Design. *Colloid Journal*, 2011; 73 (5): 651-661.
- [40] Setiabudi, H.D., Jusoh, R., Suhaimi, S. F. R. M. and Masrur, S. F. Adsorption of Methylene Blue onto Oil Palm (*Elaeisguineensis*) Leaves: Process Optimization, Isotherm, Kinetics and Thermodynamic Studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016; 63: 363-370.
- [41] Abou-Gamra, Z. M., Ahmed, M. A. TiO₂ Nanoparticles for Removal of Malachite Green Dye from Waste Water. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2015; 5: 373-388.
- [42] Baskaran, K. Venkatraman, B. R. and Arivoli, S. Adsorption of Malachite Green Dye by Acid Activated Carbon -Kinetic, Thermodynamic and Equilibrium Studies. *Journal of Chemistry*, 2011; 8(1): 9-8.
- [43] Mall, I. D., Srivastava, V. D., Agarwal, N. K. and Mishra, I. M. Adsorptive Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solution by Bagasse Fly Ash and Activated Carbon- Kinetic Study and Equilibrium Isotherm Analyses. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2005; 264, (1–3): 17-28.
- [44] Voudrias, E., Fytianos, K. and Bozani, E. Sorption-Desorption Isotherms of Dyes from Aqueous Solutions and Wastewaters with Difference Sorbent Materials. *Global Nest: The International Journal*. 2002; 4: 75-83.
- [45] Sun, D., Zhang, C., Wub, Y. and Liu, X. Adsorption of Anionic Dyes from Aqueous Solution on Fly Ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 181, (1–3): 335-342.

- [46] Abou-Gamra, Z. M. and Ahmed, M. A. TiO₂ Nanoparticles for Removal of Malachite Green Dye from Waste Water. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2015; 5: 373-388.
- [47] Chen, C. C., Lu, C. S., Chung, Y. C., Jan, J. L. UV Light Induced Photodegradation of Malachite Green on TiO₂ Nanoparticles. *Journal of Hazard Mater.* 2007; 141(3): 520-528.
- [48] Baeissa, E.S. Photocatalytic Degradation of Malachite Green Dye Using Au/NaNbO₃ Nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; 672: 564-570.
- [49] Gupta, V. K., Sharma, G., Pathania. D. and Kothiyal, N.C. Nanocomposite Pectin Zr (IV) Selenotungs to Phosphate for Adsorptional /Photocatalytic Remediation of Methylene Blue and Malachite Green Dyes from Aqueous System. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2014; 21: 957-964.



การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ เพื่อออกแบบ บริการของ กฟผ. ให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ **The Application of QFD for Designing PEA's Service Prior to Meet Customer Requirement**

รัชชนา สินธุาลัย* และ กนกพร วงศ์มณี

Runchana Sinthavalai* and Kanokporn Wongmanee

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

*E-mail: runchana.s@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบบริการให้กับผู้ใช้บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟผ.) ที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้บริการกลุ่มกิจการขนาดใหญ่ กรณีศึกษา การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอสะเตาะ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอหาดใหญ่ และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา นำข้อมูลที่ได้เป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนารูปแบบบริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยภารกิจของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค คือ จัดหา ให้บริการพลังงานไฟฟ้า และดำเนินธุรกิจอื่นที่เกี่ยวข้อง เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้เกิดความพึงพอใจทั้งด้านคุณภาพและบริการ โดยการพัฒนาองค์กรอย่างต่อเนื่อง มีความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อให้ผู้ใช้บริการเกิดความพึงพอใจในการรับบริการจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมากขึ้น และสอดคล้องกับภารกิจขององค์กร จึงต้องมีการออกแบบบริการให้กับผู้ใช้บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่เน้นความสำคัญของผู้ใช้บริการและช่วยออกแบบรูปแบบบริการ ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ ซึ่งผลลัพธ์จากการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ ทำให้ทราบถึงเป้าหมายทางเทคนิคที่ผู้ใช้บริการให้ความสำคัญ 13 ประเด็นแรก ประกอบไปด้วย ด้านฝึกอบรม ด้านการสื่อสาร และด้านเทคนิค จากการประเมินความพึงพอใจ หากการไฟฟ้าส่วนภูมิกำนำเป้าหมายทางเทคนิคดังกล่าว มาสร้างเป็นแผนงานในการออกแบบบริการในอนาคต พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีระดับความพึงพอใจเฉลี่ย 4.08 (คิดเป็นร้อยละ 81.60) อยู่ในระดับความพึงพอใจมากที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงเชื่อว่าจะมีส่วนช่วยปรับปรุงบริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการมากยิ่งขึ้น

ABSTRACT

The main objective of this research was to design the service for large enterprise customer requirements toward Provincial Electricity Authority: a case study of PEA Sadao, PEA Hadyai and PEA Songkla Province. This research was conducted by using finding data as a model and developing the service pattern based on visions of PEA. Therefore, this research was focused on design the service for customer to achieve the highest possible level of service satisfaction in accordance with the visions of PEA by applied Quality Function Deployment Technique which is one of the techniques focusing

on customer and service design to meet the customer requirements. In addition, the findings of Quality Function Deployment (QFD) Technique applied revealed that the 13-technique objectives of customer. According to the satisfactions assessment, a case of using previous technique aspect as a future framework service design, a result showed that an average satisfaction of respondents was highest level at 4.08 (81.60%). Expectantly, the research outcomes would contribute to service design improvement as to further accommodate and support user requirements.

1. บทนำ

เนื่องด้วยในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งคาดว่าในอนาคตความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงต้องมีการจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้มีปริมาณที่เพียงพอ มีราคาที่เหมาะสม และบริการที่ดี มีคุณภาพ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และสามารถตอบสนองความต้องการใช้ในกิจกรรมการผลิตต่างๆ ได้อย่างเพียงพอ และมีประสิทธิภาพ

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ กฟภ. (Provincial Electricity Authority : PEA) เป็นรัฐวิสาหกิจด้านสาธารณูปโภค สาขากำลังงาน เป็นหน่วยงานที่ดำเนินการจัดหาพลังงานไฟฟ้า เพื่อจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้บริการ รับผิดชอบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าในเขตพื้นที่ 74 จังหวัด (ยกเว้น กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง) หรือคิดเป็นร้อยละ 99 ของพื้นที่ประเทศไทย

หากพิจารณารูปแบบการให้บริการของ กฟภ. ที่ดำเนินการอยู่ในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ 3 ด้าน ดังนี้ (1) ด้านระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้า ได้มีการดำเนินการปรับปรุงระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า (2) ด้านการรับแจ้งเมื่อเกิดเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้อง ตลอด 24 ชั่วโมง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องคู่สายโทรศัพท์ของ กฟภ. มีจำนวนจำกัด (3) ด้านการให้บริการตรวจสอบระบบไฟฟ้าและบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่ง กฟภ.มีทีมงาน Modern Quality Care จำนวนเขตละ 1 ทีมงาน ซึ่งมีไม่เพียงพอ กับความต้องการของผู้ใช้บริการ

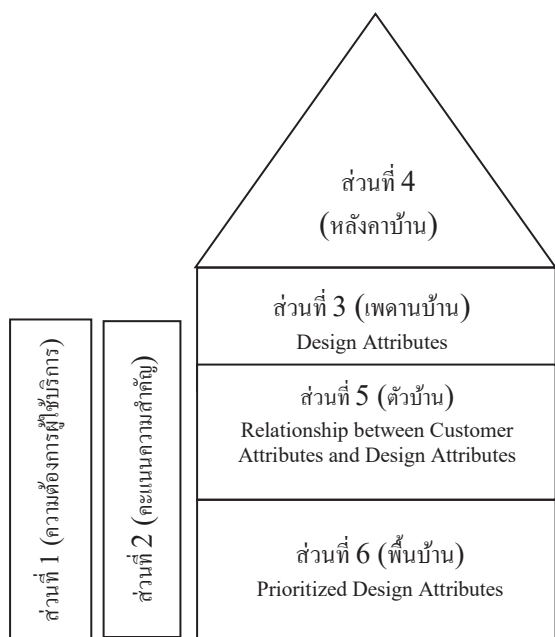
จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยเล็งเห็นว่า บริการของ กฟภ. ที่มีอยู่ในปัจจุบันไม่เพียงพอ และไม่ครอบคลุมความต้องการของผู้ใช้บริการ กอปรกับผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้ใช้บริการประเภทกิจการขนาดใหญ่ สถิติย้อนหลัง 3 ปี มีคะแนนเฉลี่ยคงที่ โดยในปี 2559 มีคะแนนความพึงพอใจที่ 3.96 คะแนน (ระดับความพึงพอใจระดับ 1 น้อยที่สุด 1.00-1.80 คะแนน ระดับ 2 น้อย 1.81-2.60 คะแนน ระดับ 3 ปานกลาง 2.61-3.40 คะแนน ระดับ 4 มาก 3.41-4.20 คะแนน และระดับ 5 มากที่สุด 4.21-5.00 คะแนน) และยังมีบางประเด็นที่เป็นข้อเสนอแนะ เพื่อให้ กฟภ. ทำการปรับปรุง

ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ (QFD) มาทำการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้บริการ และออกแบบบริการของ กฟภ. ในพื้นที่กรณีศึกษา การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอเสเดา อำเภอลาดใหญ่ และอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา โดยเลือกผู้ใช้บริการประเภทกิจการขนาดใหญ่มาทำการวิจัยเพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาารูปแบบบริการของ กฟภ. ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ

การแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดโครงสร้างเพื่อจัดการออกแบบ วางแผนและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ซึ่งเน้นที่การตอบสนองของลูกค้าเป็นหลัก โดยเทคนิคจะช่วยระบุความต้องการของลูกค้าได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 1 โครงสร้างบ้านคุณภาพ

บ้านคุณภาพ (House of Quality:HOQ) เป็นตารางแรกของ QFD เกิดจากการนำผลสำรวจความต้องการของลูกค้า (WHATs) และระดับความสำคัญของความต้องการแต่ละข้อมาพิจารณาข้อกำหนดทางเทคนิคต่างๆ (HOWs) ที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า ข้อมูลในบ้านคุณภาพ ตามรูปที่ 1 ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 คือ ผลความต้องการของผู้ใช้บริการนักศึกษา ที่ได้มาจากแบบสอบถามชุดที่ 1 คำถามปลายเปิด ตารางที่ 1 แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกแบบเป็นแบบสอบถามชุดที่ 2 ต่อไป

ส่วนที่ 2 คือ ผลของค่า IMP ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของระดับความสำคัญจากแบบสอบถามชุดที่ 2 ตารางที่ 2 ส่วนที่ 3 คือ ข้อกำหนดทางเทคนิคเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าในแต่ละด้าน

ส่วนที่ 4 คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) เป็นผลที่ได้จากการให้คะแนนโดยทำการเปรียบเทียบเป็นคู่ ระหว่างความต้องการของลูกค้าและข้อกำหนดทางเทคนิค โดยส่วนที่ 3 และส่วนที่ 4 ได้มาจากการระดมความคิดจากพนักงาน กฟภ. ที่มีความรู้และความชำนาญในด้านต่างๆ จำนวน 5 ท่าน

ส่วนที่ 5 คือ การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ 3 และส่วนที่ 5

ส่วนที่ 6 จะทำให้ทราบถึงการตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการนักศึกษา โดยวิเคราะห์จากผลการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Technical priority) และลำดับความสำคัญ จากนั้นพิจารณาคัดเลือกข้อกำหนด โดยใช้ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Percentage of total)

2.2 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

สูตรของเครซีและมอร์แกน (Krejcie&Morgan) เป็นเทคนิคในการหาขนาดกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็ก (Small Sample Technique) ใช้คำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างกับประชากรที่มีขนาดเล็ก ตั้งแต่ 10 ขึ้นไป

$$n = \frac{X^2 NP(1-P)}{e^2(N-1)+X^2 P(1-P)} \quad (1)$$

โดยที่ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

N = ขนาดของประชากร

e = ระดับความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

X^2 = ค่าไคสแควร์ที่ df เท่ากับ 1 และระดับความเชื่อมั่น 95% ($X^2 = 3.841$)

P = สัดส่วนของลักษณะที่สนใจในประชากร (ถ้าไม่ทราบให้กำหนด $P = 0.5$)

2.3 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

(1) การหาดัชนีความสอดคล้อง (Index of Congruence, IOC) เป็นการหาความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์จากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ จำนวนตั้งแต่ 3-5 ท่าน โดยให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินว่าข้อคำถามแต่ละข้อในแบบสอบถาม สามารถวัดได้ตรงกับเนื้อหาที่กำหนดหรือไม่ โดยให้คะแนนตามเกณฑ์ แล้วนำผลมาพิจารณาคะแนนของผู้เชี่ยวชาญในแต่ละข้อมาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความสอดคล้อง ดังนี้

- แนใจว่ามีความสอดคล้องหรือวัดได้ มีระดับคะแนนเท่ากับ 1

- ไม่แน่ใจว่ามีความสอดคล้องหรือวัดได้ มีระดับคะแนนเท่ากับ 0
- แน่ใจว่าไม่มีความสอดคล้องหรือวัดได้ มีระดับคะแนน เท่ากับ -1

หลังจากนั้นนำมาหาค่าความสอดคล้อง โดยใช้สูตร

$$IOC = \frac{\sum R}{N}$$

โดยที่ $\sum R$ = ผลรวมคะแนนความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ

N = จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

ในการพิจารณาความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ จากการหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Congruence, IOC) ในทุกข้อคำถามนั้น มีค่าเท่ากับ 1.00 หากข้อคำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.50 – 1.00 แสดงว่า ข้อคำถามนั้นมีความเที่ยงตรงกับเนื้อหาส่วนข้อคำถามที่มีค่า IOC ต่ำกว่า 0.50 แสดงว่า ข้อคำถามนั้นใช้ไม่ได้ ควรพิจารณาปรับปรุงข้อคำถามใหม่ หรือตัดทิ้งก็ได้ตามความเหมาะสม

(2) การหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean)

$$\text{Geometric Mean} = \sqrt[n]{N1 * N2 * N3 * ... * Nn}$$

เมื่อ N = ค่าของข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม

1,2,3,...,n = จำนวนข้อมูล

(3) การหาค่า Technical priority เป็นการรวมคะแนนของแต่ละข้อกำหนดเชิงเทคนิค โดยกำหนดให้ A = Technical priority ของแต่ละข้อกำหนดเชิงเทคนิค ดังนั้น $A = \sum$ ระดับความสัมพันธ์ของ Customer attribute และ design attribute x IMP ของ customer attribute นั้น ๆ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

การศึกษานี้เป็นการศึกษาในผู้ใช้บริการประเภทกิจการขนาดใหญ่ พื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอสะเดา อำเภอหาดใหญ่ และอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา จำนวน

144 กิจการ ซึ่งใช้สูตรของเครซีและมอร์แกน (1) ดังนี้ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} n &= \frac{3.841 \times 144 \times 0.5 \times (1-0.5)}{(0.05)^2 (144-1) + 3.841 \times 0.5 \times (1-0.5)} \\ &= 104.9 \end{aligned}$$

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 105 กิจการ

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำเครื่องมือบ้านคุณภาพมาออกแบบบริการของ กฟผ. โดยบ้านคุณภาพที่ทำการวิเคราะห์ มีโครงสร้างหลัก 6 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับการวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้

3.2 การสัมภาษณ์ความต้องการของลูกค้า

โดยใช้แบบสอบถามชุดที่ 1 เป็นลักษณะคำถามปลายเปิด เพื่อระบุถึงความต้องการของผู้ใช้บริการประกอบด้วย 5 ด้าน ได้แก่ ด้านความมั่นคง/คุณภาพของระบบการจ่ายไฟฟ้า ด้านความรวดเร็วในการให้บริการ ด้านความปลอดภัยในการให้บริการ ด้านความสะดวกในการขอใช้บริการ และด้านการให้บริการ เมื่อได้เสียงความต้องการของผู้ใช้บริการแล้ว หลังจากนั้นทำการสร้างแบบสอบถามชุดที่ 2 เพื่อให้ผู้ใช้บริการทำการประเมินเพื่อหาระดับความพึงพอใจ และระดับความสำคัญของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยแบบสอบถามกำหนดระดับคะแนนความสำคัญและความพึงพอใจ ดังนี้

ระดับ 5 หมายถึง สำคัญ/พึงพอใจมากที่สุด

ระดับ 4 หมายถึง สำคัญ/พึงพอใจมาก

ระดับ 3 หมายถึง สำคัญ/พึงพอใจปานกลาง

ระดับ 2 หมายถึง สำคัญ/พึงพอใจน้อย

ระดับ 1 หมายถึง สำคัญ/พึงพอใจน้อยที่สุด

จากนั้นจึงนำแบบสอบถามชุดที่ 2 สำนวกับกลุ่มเป้าหมายผู้ใช้บริการประเภทกิจการขนาดใหญ่ จำนวน 105 ท่าน โดยแบ่งเป็นพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอสะเดา จำนวน 30 ท่าน การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

อำเภอหาดใหญ่ จำนวน 45 ตำบล และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา จำนวน 30 ตำบล แล้วหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของคะแนนความสำคัญและความพึงพอใจ โดยคะแนนความสำคัญ จะเป็นข้อมูลในส่วนที่ 2 ของบ้านคุณภาพ

3.3 การประยุกต์ใช้บ้านคุณภาพกับกรณีศึกษา

บ้านคุณภาพในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 9 หลัง คือ กลุ่มเป้าหมายกรณีศึกษา แยกราชการไฟฟ้า (อำเภอสะเดา อำเภอหาดใหญ่ และอำเภอเมืองสงขลา) แยกตามประเภทอุตสาหกรรม (แปรรูปอาหาร ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางพารา ห้างสรรพสินค้าและโรงแรม อุตสาหกรรมอื่น และแปรรูปไม้ยางพารา) โดยส่วนที่ต้องวิเคราะห์หลักแยกได้ทั้งสิ้น 4 ส่วน ดังนี้

(1) ส่วนที่ 3 เพดานบ้าน เป็นการระดมความคิดจากพนักงาน กฟภ. ที่มีความรู้และความชำนาญในด้านต่างๆ จำนวน 5 ท่าน เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิค (Design Attributes) รวมทั้งกำหนดเป้าหมายทางเทคนิค และค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมาย เพื่อให้เห็นทิศทางในการปรับปรุงของแต่ละประเด็น มีการกำหนดสัญลักษณ์ ดังนี้

การเคลื่อนไหวของข้อกำหนดที่ต้องการเพิ่มขึ้น ใช้สัญลักษณ์ ↑
 การเคลื่อนไหวของข้อกำหนดที่ต้องการลดลง ใช้สัญลักษณ์ ↓
 ไม่ต้องการการเคลื่อนไหวของข้อกำหนด ใช้สัญลักษณ์ ○

(2) ส่วนที่ 4 หลังคาบ้าน เป็นการระดมความคิดจากพนักงาน กฟภ. ที่มีความรู้และความชำนาญในด้านต่างๆ จำนวน 5 ท่าน เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละเทคนิคว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่เล็กน้อยเพียงใด ในการให้คะแนน จะทำการให้คะแนนเป็นคู่ๆ ใช้สัญลักษณ์ ดังนี้

มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก ใช้สัญลักษณ์ ○
 มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย ใช้สัญลักษณ์ ×
 ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ใช้สัญลักษณ์ เว้นว่าง

(3) ส่วนที่ 5 ตัวบ้าน หรือเมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) เป็นการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้บริการและข้อกำหนดทางเทคนิคของเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ ในการให้คะแนนจะทำการเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ โดยใช้การระดมความคิดจากพนักงาน กฟภ. ที่มีความรู้และความชำนาญในด้านต่างๆ จำนวน 5 ท่าน โดยในงานวิจัยนี้กำหนดระดับความสัมพันธ์เป็น 4 ระดับ กำหนดคะแนนและใช้สัญลักษณ์ ดังนี้

ความสัมพันธ์มาก ให้คะแนนเท่ากับ 9 ใช้สัญลักษณ์ ●
 ความสัมพันธ์ปานกลาง ให้คะแนนเท่ากับ 3 ใช้สัญลักษณ์ ■
 ความสัมพันธ์น้อย ให้คะแนนเท่ากับ 1 ใช้สัญลักษณ์ ▲
 ไม่มีความสัมพันธ์ คะแนนเท่ากับ 0 เว้นว่าง

(4) ส่วนที่ 6 พื้นบ้าน ประกอบด้วย 3 ประเด็นย่อย ดังนี้

1) คำนำนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Technical priority) เป็นการรวมคะแนนของแต่ละข้อกำหนดเชิงเทคนิค โดยกำหนดให้ $A = \text{Technical priority}$ ของแต่ละข้อกำหนดเชิงเทคนิค

$A = \sum (\text{ค่าความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางเทคนิค} \times \text{ระดับความสัมพันธ์ในเมทริกซ์})$

2) คำนำนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative technique requirement important) เป็นการแสดงให้เห็นถึงค่านักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์เป็นร้อยละคำนวณโดยการเปรียบเทียบ Technical priority ของแต่ละข้อกำหนดเชิงเทคนิค กับคะแนนรวมของทุกข้อกำหนดทางเทคนิค

3) เป้าหมายทางด้านเทคนิค เป็นการแสดงเป้าหมายที่กำหนดว่าข้อกำหนดทางเทคนิคข้อนั้นๆ จะดำเนินการอย่างไร โดยการพิจารณาจากข้อมูลลำดับความสำคัญ และความเหมาะสมในการออกแบบ

3.3 การจัดลำดับแผนงานดำเนินการ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริการ เมื่อได้ข้อมูลจากบ้านคุณภาพแล้ว

จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบสอบถามชุดที่ 3 เพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามทำการประเมินระดับความพึงพอใจ กรณีที่ กฟภ. จะนำเป้าหมายทางเทคนิคดังกล่าวมาสร้างเป็นแผนงานในการออกแบบบริการของ กฟภ. ในอนาคต โดยผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ ผู้ใช้บริการประเภทกิจการขนาดใหญ่ ในพื้นที่อำเภอสะเดาอำเภอหาดใหญ่ และอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา จำนวน 30 ท่าน โดยแบบสอบถามชุดที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 ประเมินความพึงพอใจในบริการของ กฟภ. โดยแบ่งระดับคะแนนการพิจารณาออกเป็น 5 ระดับ คะแนนความพึงพอใจ ดังนี้

ระดับ 5 หมายถึง มีความพึงพอใจมากที่สุด

ระดับ 4 หมายถึง มีความพึงพอใจมาก

ระดับ 3 หมายถึง มีความพึงพอใจปานกลาง

ระดับ 2 หมายถึง มีความพึงพอใจน้อย

ระดับ 1 หมายถึง มีความพึงพอใจน้อยที่สุด

และส่วนที่ 2 ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

เมื่อได้ผลระดับคะแนนความพึงพอใจในแต่ละความต้องการแล้ว จึงให้ผู้บริหารของ กฟภ. ทำการประเมินความเป็นไปได้ เพื่อนำมาจัดแผนการดำเนินงาน โดยใช้วิธี Factor Rating เป็นการระบุปัจจัยที่สำคัญในการคัดเลือกแผนงานมาดำเนินการ แล้วทำการให้น้ำหนักของแต่ละปัจจัย เพื่อจัดลำดับแผนการดำเนินงานก่อน-หลัง โดยมีปัจจัยการให้คะแนน ดังนี้

ปัจจัย 1 : สามารถดำเนินการได้ทันที

ปัจจัย 2 : งบประมาณน้อย

ปัจจัย 3 : มีความจำเป็นเร่งด่วน

ปัจจัย 4 : มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการ

4. ผลของงานวิจัย

4.1 ข้อมูลก่อนนำเข้าบ้านคุณภาพ จากการสำรวจความต้องการของผู้ใช้บริการกรณีศึกษา โดยใช้แบบสอบถามชุดที่ 1 ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความคิดเห็นของผู้ใช้บริการในด้านการให้บริการของ กฟภ.

ด้านความมั่นคง/คุณภาพของระบบการจ่ายไฟฟ้า
- ควรมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ และมีคุณภาพ
- ควรให้บริการให้คำปรึกษาปัญหาเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าภายในโรงงาน
- ควรมีการแจ้งดับไฟล่วงหน้าอย่างน้อย 3 วันทำการ เพื่อทางโรงงานจะได้วางแผนการผลิต
- การแจ้งขอดับไฟล่วงหน้า มากกว่า 1 ช่องทาง
- พื้นที่ที่เชื่อมต่อไฟฟ้าดับ กฟภ. ควรดูแลเป็นพิเศษ
- พื้นที่ที่มีมลภาวะเยอะ ควรใช้วัสดุอุปกรณ์ชนิดพิเศษ เช่น ใช้สายหุ้มฉนวน/สาย twist
- ไฟฟ้าดับโดยไม่มีสาเหตุบ่อยครั้ง
- ควรส่งข้อความแจ้งผลการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องหรือแจ้งระยะเวลาไฟดับโดยประมาณ
ด้านความรวดเร็วในการให้บริการ
- การแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้องควรใช้เวลารวดเร็ว
- ควรมีการคาดคะเนเวลาไฟดับ เพื่อให้โรงงานได้วางแผนการผลิต
- ควรมีการกำหนดระยะเวลาเป็นมาตรฐานองค์กร ในการแก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องแต่ละเหตุการณ์
ด้านความปลอดภัยในการให้บริการ
- บางครั้งอุปกรณ์ มีสภาพค่อนข้างเก่า เก่งกว่าจะเป็นอันตรายกับพนักงานของ กฟภ.
- พนักงาน กฟภ. สวมใส่อุปกรณ์ความปลอดภัยไม่ครบถ้วน
ด้านความสะดวกในการขอใช้บริการ
- เบอร์โทรศัพท์ในการรับแจ้งกระแสไฟฟ้าขัดข้อง บางครั้งติดต่อไม่ได้
- ระยะเวลาในการแจ้งเหตุกระแสไฟฟ้าขัดข้อง จนกระทั่งเดินทางมาถึงใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน
- การขอรับบริการของ กฟภ. ควรเพิ่มช่องทางออนไลน์ เช่น ผ่านเว็บไซต์ กฟภ. หรือ โทรศัพท์ เพื่อความสะดวกของผู้ที่จะขอรับบริการ

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความคิดเห็นของผู้ใช้บริการในด้านการให้บริการของ กฟภ.

ด้านการให้บริการของพนักงาน
- ในการขอรับบริการด้านบริการเสริมมีความล่าช้า - การจัดทำรายงานผลการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า ควรมีการกำหนดเวลาที่แน่นอนเพื่อจัดส่งให้กับผู้รับบริการ - กรณีมีข้อร้องเรียนเกี่ยวกับการให้บริการ ควรมีการชี้แจงทำความเข้าใจกับผู้ร้องเรียนในระยะเวลาที่เหมาะสม
ความต้องการและข้อเสนอแนะของท่าน นอกเหนือจากบริการของ กฟภ.ที่มีในปัจจุบัน
- ควรมีการชี้แจงอัตราการคิดค่าไฟฟ้าใหม่ ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า FT - ควรมีรูปแบบบริการเสริมต่างๆ ให้กับลูกค้าที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงในแต่ละเดือน - ควรมีบริการตัดต้นไม้ใกล้แนวสายไฟภายในบริษัท โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย - ให้บริการเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แบบรถโมบายเคลื่อนที่ (mobile generator) ฟรี กรณีมีการขอรับไฟฟ้าจาก กฟภ. - การชดเชยความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องของ กฟภ. ด้วยอัตราที่เหมาะสม

เมื่อได้เสียงความต้องการของผู้ใช้บริการแล้ว หลังจากนั้นทำการสร้างแบบสอบถามชุดที่ 2 เพื่อสำรวจระดับความพึงพอใจ และระดับความสำคัญของแต่ละความต้องการต่อบริการของ กฟภ. ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คะแนนความสำคัญและความพึงพอใจของผู้ใช้บริการกรณีศึกษา ต่อบริการของ กฟภ.

Customer attributes	ความสำคัญ	ความพึงพอใจ
1. ด้านการให้บริการ		
1.1 ความมั่นคง/คุณภาพไฟฟ้า		
- ระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีความมั่นคง สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง	4.44	3.47
- ระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีคุณภาพ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ตามมาตรฐาน	4.39	3.58
- การแจ้งขอตัดไฟล่วงหน้า อย่างน้อย 7 วันทำการ	4.08	3.37
- การแจ้งขอตัดไฟล่วงหน้า มากกว่า 1 ช่องทาง	3.56	3.15
- ปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้า ให้สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมปัจจุบันในแต่ละพื้นที่ เช่น ตัดต้นไม้ใกล้แนวสายไฟ เป็นต้น	3.98	3.10
- การชดเชยความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง โดยมีสาเหตุจาก กฟภ.	3.23	2.46
1.2 ด้านการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้อง		
- ช่องทางในการรับแจ้งกระแสไฟฟ้าขัดข้อง เหมาะสม/ติดต่อได้สะดวกตลอด 24 ชั่วโมง	4.13	3.37
- การกำหนดระยะเวลาจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานของ กฟภ. แก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง กรณีที่ทราบสาเหตุ	4.19	3.27
- การคาดคะเนระยะเวลาจ่ายกระแสไฟฟ้า กรณีที่ไม่ทราบสาเหตุ และแจ้งให้ผู้ให้บริการทราบ	4.01	2.89

ตารางที่ 2 (ต่อ) คะแนนความสำคัญและความพึงพอใจ
ของผู้ใช้บริการกรณีศึกษา ต่อบริการของ กฟภ.

Customer attributes	ความ สำคัญ	ความพึง พอใจ
1. ด้านการให้บริการ		
1.3 ด้านการให้บริการอื่นๆ		
- ช่องทางในการชำระค่าไฟฟ้ามีความสะดวก/หลากหลายช่องทาง	3.55	3.82
- การเพิ่มช่องทางผ่านระบบออนไลน์ ในการขอรับบริการจาก กฟภ.	3.67	3.45
- การให้บริการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบรถโมบายเคลื่อนที่ (Mobile Generator)	3.03	2.67
- การกำหนดระยะเวลาเป็นมาตรฐานของ กฟภ. ในการให้บริการเสริมต่างๆ เช่น การบำรุงรักษาหม้อแปลง ฯลฯ ตั้งแต่ผู้ใช้บริการติดต่อขอใช้บริการ จนกระทั่งจัดทำรายงานผลการตรวจวัด	3.95	3.29
- พนักงาน กฟภ. ให้คำแนะนำการใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพด้วยเครื่องมือที่ทันสมัย เพื่อประหยัดต้นทุนทางด้านพลังงานไฟฟ้าและเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้องลดน้อยลง	4.02	3.21
- กรณีมีข้อแนะนำ/เสนอแนะจากผู้ใช้บริการเกี่ยวกับการให้บริการ กฟภ. สามารถดำเนินการแก้ไข ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม	3.56	3.13
- การจัดฝึกอบรมความรู้ทางระบบไฟฟ้า เช่น วิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า เป็นต้น	3.74	2.88

ตารางที่ 2 (ต่อ) คะแนนความสำคัญและความพึงพอใจ
ของผู้ใช้บริการกรณีศึกษา ต่อบริการของ กฟภ.

Customer attributes	ความ สำคัญ	ความพึง พอใจ
1. ด้านการให้บริการ		
1.3 ด้านการให้บริการอื่นๆ		
- การเผยแพร่ข้อมูลข่าวสาร ที่เป็นประโยชน์กับผู้ใช้บริการผ่านทางสื่อที่เหมาะสม	3.30	2.86
2. ด้านผู้ให้บริการ		
- พนักงาน กฟภ. สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันครบถ้วน ทุกครั้งเมื่อปฏิบัติงาน	4.27	3.36
- เครื่องมือ-อุปกรณ์ ในการปฏิบัติงานอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน	4.23	3.57
- พนักงาน กฟภ. มีมารยาทและเอาใจใส่ในการให้บริการ	3.52	3.77
- พนักงาน กฟภ. มีความรอบรู้/ ความชำนาญ สามารถให้คำแนะนำและตอบปัญหาได้อย่างชัดเจน	4.07	3.67

หมายเหตุ ระดับคะแนน 0.00 – 1.00 (น้อยที่สุด), 1.01 – 2.00 (น้อย), 2.01 – 3.00 (ปานกลาง), 3.01 – 4.00 (มาก) และ 4.01 – 5.00 (มากที่สุด)

4.2 การประยุกต์ใช้บ้านคุณภาพ

เริ่มจากส่วนของเพดานบ้าน ซึ่งเป็นการระดมความคิดจากพนักงาน กฟภ. ที่มีความรู้และความชำนาญในด้านต่างๆ จำนวน 5 ท่าน เพื่อหาเทคนิคที่จะสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ จากนั้นกำหนดเป้าหมายทางด้านเทคนิคและค่าเคลื่อนไหวของค่าเป้าหมาย เพื่อให้ทราบถึงทิศทางในการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 3

ยกตัวอย่างการแสดงค่าเป้าหมายของข้อกำหนดทางเทคนิค “บริการตัดกิ่งไม้บริเวณพื้นที่จุดเสี่ยง ที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง” จากการระดมความคิด มีเป้าหมายเบื้องต้นต้องการให้มีการตัดต้นไม้ในพื้นที่จุดเสี่ยงเพิ่มมากขึ้น

ขึ้น จึงให้ค่าเป้าหมายเป็นทิศทางการเพิ่มขึ้น และตั้งเป้าหมาย คือ จัดแผนงาน Patrol ระบบจำหน่าย 100% ตัดกิ่งไม้ในพื้นที่จุดเสี่ยง เดือนละ 1 ครั้ง

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดทางเทคนิค เป้าหมายทางด้านเทคนิค และการเคลื่อนไหวของค่าเป้าหมาย

ลำดับ ที่	ข้อกำหนดทางเทคนิค	เป้าหมายทางด้านเทคนิค	ค่าการ เคลื่อนไหว ของค่า เป้าหมาย
ด้านฝึกอบรม (Training)			
B1	อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความรู้/ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า	จัดแผนอบรมพนักงานให้มีความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า ปีละ 2 ครั้ง	↑
B2	อบรมพนักงาน กฟภ. ในการใช้อุปกรณ์/เครื่องมือ ให้มีความถูกต้องและเหมาะสม	จัดแผนอบรมทบทวนความรู้พนักงานเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์เครื่องมือให้เหมาะสม ปีละ 4 ครั้ง	↑
B3	อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความตระหนักถึงความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน	จัดแผนอบรมทบทวนความรู้พนักงานเกี่ยวกับความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน เดือนละ 1 ครั้ง	↑
ด้านการสื่อสาร (Communication)			
B4	เจ้าหน้าที่ผ่านการอบรมมารยาทในการให้บริการ	พนักงานที่ทำหน้าที่ให้บริการลูกค้าต้องผ่านการอบรม Service mind ทุกคน	○
B5	ส่ง E-newsletter อัปเดตข้อมูลข่าวสารขององค์กรให้กับผู้ใช้บริการอย่างต่อเนื่อง	ส่ง E-newsletter อัปเดตข้อมูลข่าวสารของ กฟภ. ให้กับผู้ใช้บริการ เป็นประจำทุกเดือน	↑
B6	เจ้าหน้าที่อธิบายขั้นตอนการให้บริการชัดเจน	พนักงานที่ทำหน้าที่ให้บริการทุกคนอธิบายขั้นตอนการให้บริการอย่างชัดเจนให้กับลูกค้า	○
B7	สายด่วนบริการตลอด 24 ชั่วโมงในการแก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง	ลูกค้าสามารถติดต่อสายด่วนบริการตลอด 24 ชม. เพื่อสอบถามเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้อง	↑
B8	เพิ่มช่องทางการติดต่อกับผู้ใช้บริการ เช่น Email, Line, PEA Mobile ฯลฯ	ให้บริการข้อมูล/ตอบข้อซักถาม ผ่านช่องทาง Email, Line, PEA Smart Plus	↑
B9	แจ้งข้อดับไฟล่วงหน้าอย่างน้อย 7 วันทำการ	แจ้งข้อดับไฟล่วงหน้าอย่างน้อย 7 วันทำการ	↓
B10	ปรับลดขั้นตอนการให้บริการที่ซ้ำซ้อน	ปรับลดขั้นตอนการให้บริการที่ซ้ำซ้อน ลูกค้าติดต่อขอใช้บริการเบ็ดเสร็จในครั้งเดียว	↓

ตารางที่ 3 (ต่อ) ข้อกำหนดทางเทคนิค เป้าหมายทางด้านเทคนิค และการเคลื่อนไหวของค่าเป้าหมาย

ลำดับ ที่	ข้อกำหนดทางเทคนิค	เป้าหมายทางด้านเทคนิค	ค่าการ เคลื่อนไหวของ ค่าเป้าหมาย
ด้านเทคนิค (Technician) (ต่อ)			
B11	ระบบการขอใช้บริการ ผ่านระบบออนไลน์	จัดทำเว็บไซต์เพื่อให้ลูกค้าสามารถขอใช้บริการจาก กฟภ. ผ่านระบบออนไลน์	○
B12	นำเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพมาใช้ เช่น สั่งการระยะไกล ON/OFF อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อลดระยะเวลาเกิดไฟฟ้าขัดข้อง	เริ่มการจัดซื้อ/จัดจ้างอุปกรณ์การสื่อสาร ที่ทันสมัยและประสิทธิภาพมาใช้งาน	↑
B13	บริการตรวจวัด/วิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า และให้คำแนะนำการใช้ไฟฟ้า	จัดแผนงานให้บริการตรวจวัด/ให้คำแนะนำการใช้ไฟฟ้า กับโรงงานขนาดใหญ่ในพื้นที่ 1 ครั้ง/ปี	↑
B14	ยกระดับงานบริการเสริมด้านต่างๆ เช่น เครื่องมือทันสมัย, พนักงาน กฟภ. มีความเชี่ยวชาญ	พนักงาน กฟภ. สามารถวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขปัญหาคูณภาพไฟฟ้าในโรงงานได้	○
B15	บริการตัดกิ่งไม้บริเวณพื้นที่จุดเสี่ยง ที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง	จัดแผนงาน Patrol ระบบจำหน่าย 100% ตัดกิ่งไม้พื้นที่จุดเสี่ยง เดือนละ 1 ครั้ง	↑
B16	ในการปฏิบัติงานพนักงาน กฟภ. สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยทุกครั้ง	การเกิดอุบัติเหตุจากการปฏิบัติงานต้องเป็น 0 (Zero Accident)	○
B17	ให้บริการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้อง กรณีทราบสาเหตุ ภายในระยะเวลา 20 นาที	ให้บริการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้อง กรณีทราบสาเหตุ ภายในระยะเวลา 20 นาที	↓
B18	คาดคะเนระยะเวลาไฟดับ กรณีที่ไม่ทราบสาเหตุ เพื่อให้ผู้ใช้บริการวางแผนการผลิต	คาดคะเนระยะเวลาไฟดับ กรณีที่ไม่ทราบสาเหตุ เพื่อให้ผู้ใช้บริการวางแผนการผลิตได้	↓
B19	พนักงาน กฟภ.มีจำนวนเพียงพอในการให้บริการเสริม เพื่อไม่ให้ผู้รับบริการรอคอย	เพิ่มจำนวนพนักงานให้เพียงพอในการให้บริการเสริม โดยเพิ่มจาก 1 ทีมงาน เป็น 3 ทีมงาน	↑
B20	บริการเสริมของ กฟภ. ควรมีระยะเวลาตั้งแต่ผู้ใช้บริการติดต่อขอรับบริการ จนกระทั่งทำรายงานตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า ภายใน 15 วัน	กำหนดระยะเวลาให้บริการเสริมตั้งแต่ผู้ใช้บริการติดต่อขอรับบริการ จนกระทั่งทำรายงานตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า ภายใน 15 วัน	↓
B21	บริการ Mobile Generator กรณีมีการขอดับไฟจาก กฟภ.	Mobile Generator มีจำนวนเพียงพอ และสามารถสำรองไฟฟ้าได้อย่างน้อย 4 ชม.	↑

ตารางที่ 3 (ต่อ) ข้อกำหนดทางเทคนิค เป้าหมายทางด้านเทคนิค และการเคลื่อนไหวของค่าเป้าหมาย

ลำดับ ที่	ข้อกำหนดทางเทคนิค	เป้าหมายทางด้านเทคนิค	ค่าการ เคลื่อนไหว ของค่า เป้าหมาย
ด้านการสื่อสารขององค์กร (CSR)			
B22	เข้าเยี่ยมชม/จัดสัมมนาให้ความรู้กับผู้ใช้ไฟฟ้า	เข้าเยี่ยมชมลูกค้าเดือนละ 1 ครั้ง และจัดสัมมนาให้ความรู้กับผู้ใช้ไฟฟ้าปีละ 1 ครั้ง	↑
B23	นำพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) มาใช้มากขึ้น	กฟภ. เปิดรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจำนวนเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 จากปีก่อนหน้า	↑
B24	กล่องแสดงความคิดเห็นขั้นตอนการให้บริการ	ติดตั้งกล่องแสดงความคิดเห็นขั้นตอนการให้บริการ ทุกจุดการให้บริการ	↑
B25	เมื่อเกิดการร้องเรียน ควรวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสม เพื่อลดจำนวนการเกิดเรื่องร้องเรียนซ้ำ	เมื่อเกิดข้อร้องเรียน/ข้อเสนอนะทุกเรื่อง มีการวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสม เพื่อลดจำนวนการเกิดเรื่องร้องเรียนซ้ำ	○
B26	ลดเซชค่าเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง ด้วยอัตราที่เหมาะสม	ลดเซชค่าเสียหายที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าขัดข้องจาก กฟภ. ด้วยอัตราที่เหมาะสม	○

การวิเคราะห์ในส่วนถัดมา คือส่วนของหลังคาบ้าน เป็นการให้คะแนนในส่วนหลังคาบ้านของบ้านคุณภาพ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละเทคนิคว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่มากนักเพียงใด ตัวอย่างการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ เช่น ข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 5 “ส่ง E-newsletter อัปเดตข้อมูลข่าวสารขององค์กรให้กับผู้ใช้บริการอย่างต่อเนื่อง” และข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 8 “เพิ่มช่องทางการติดต่อกับผู้ใช้บริการ เช่น Email Line PEA Mobile ฯลฯ” มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก จึงให้สัญลักษณ์ (●) หรือตัวอย่างข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 13 “บริการตรวจวัด/วิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า และให้คำแนะนำการใช้ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ” และข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 19 “พนักงาน กฟภ. มีจำนวนเพียงพอในการให้บริการเสริม เพื่อไม่ให้ผู้ใช้บริการเกิดการรอคอย” มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย จึงให้สัญลักษณ์ (×)

หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ส่วนของตัวบ้าน เมตริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) เป็นการให้

คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้บริการและข้อกำหนดทางเทคนิคของเมตริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างการให้คะแนน เช่น ความต้องการของผู้ใช้บริการ “ปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมปัจจุบันในแต่ละพื้นที่ เช่น ตัดต้นไม้ใกล้แนวสายไฟ เป็นต้น” ผู้วิจัยมองว่าประเด็นนี้มีความสัมพันธ์กับข้อกำหนดเชิงเทคนิค “บริการตัดกิ่งไม้บริเวณพื้นที่จุดเสี่ยงที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง” ในระดับมาก (คะแนนเท่ากับ 9 สัญลักษณ์ ●) และสัมพันธ์กับ “นำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมาใช้” และ “อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความรู้/ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า” ในระดับปานกลาง (คะแนนเท่ากับ 3 สัญลักษณ์ ■) และสัมพันธ์กับ “ยกระดับงานบริการเสริมด้านต่าง ๆ เช่น เครื่องมือทันสมัย, พนักงาน กฟภ. มีความเชี่ยวชาญ” ในระดับน้อย (คะแนนเท่ากับ 1 สัญลักษณ์ ▲)

การวิเคราะห์ในส่วนสุดท้าย คือส่วนพื้นบ้าน ประกอบด้วย 3 ประเด็นย่อย ดังนี้

1) การคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมรรถนะของแต่ละข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Priority) ยกตัวอย่างการคำนวณ เช่น ข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 21 “บริการ Mobile Generator กรณีมีการขอดับไฟจาก กฟภ.” มีความสัมพันธ์กับความต้องการของผู้ใช้บริการ 2 ประเด็น คือ การชดเชยความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง โดยมีสาเหตุจาก กฟภ. ($IMP = 3.23$) เป็นความสัมพันธ์ในระดับน้อย (คะแนน = 1) และการให้บริการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบรถโมบายเคลื่อนที่ (Mobile Generator) เป็นความสัมพันธ์ในระดับมาก (คะแนน = 9) ดังนั้น ค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมรรถนะของข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 21 “บริการ Mobile Generator กรณีมีการขอดับไฟจาก กฟภ.” เท่ากับ $(3.23 \times 1) + (3.03 \times 9) = 30.51$

2) การคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative technique requirement important) ยกตัวอย่างการคำนวณ เช่น ข้อกำหนดเชิงเทคนิคที่ 21 “บริการ Mobile Generator กรณีมีการขอดับไฟจาก กฟภ.” มีค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมรรถนะ เท่ากับ 30.51 โดยคะแนนรวมของทุกข้อกำหนดทางเทคนิค เท่ากับ 1,670.24 ดังนั้น ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ ในประเด็น “บริการ Mobile Generator กรณีมีการขอดับไฟจาก กฟภ.” = $(30.51 / 1,670.24) \times 100\% = 1.83\%$

3) ส่วนสุดท้ายเป็นการระดมความคิดจากพนักงาน กฟภ. ที่มีความรู้และความชำนาญในด้านต่าง ๆ เพื่อกำหนดเป้าหมายทางด้านเทคนิคของข้อกำหนดทางเทคนิค นั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ประเด็น “อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความรู้/ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า” ที่กำหนดเป้าหมายเบื้องต้นว่าต้องการให้เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ แล้ว จึงกำหนดเป้าหมาย

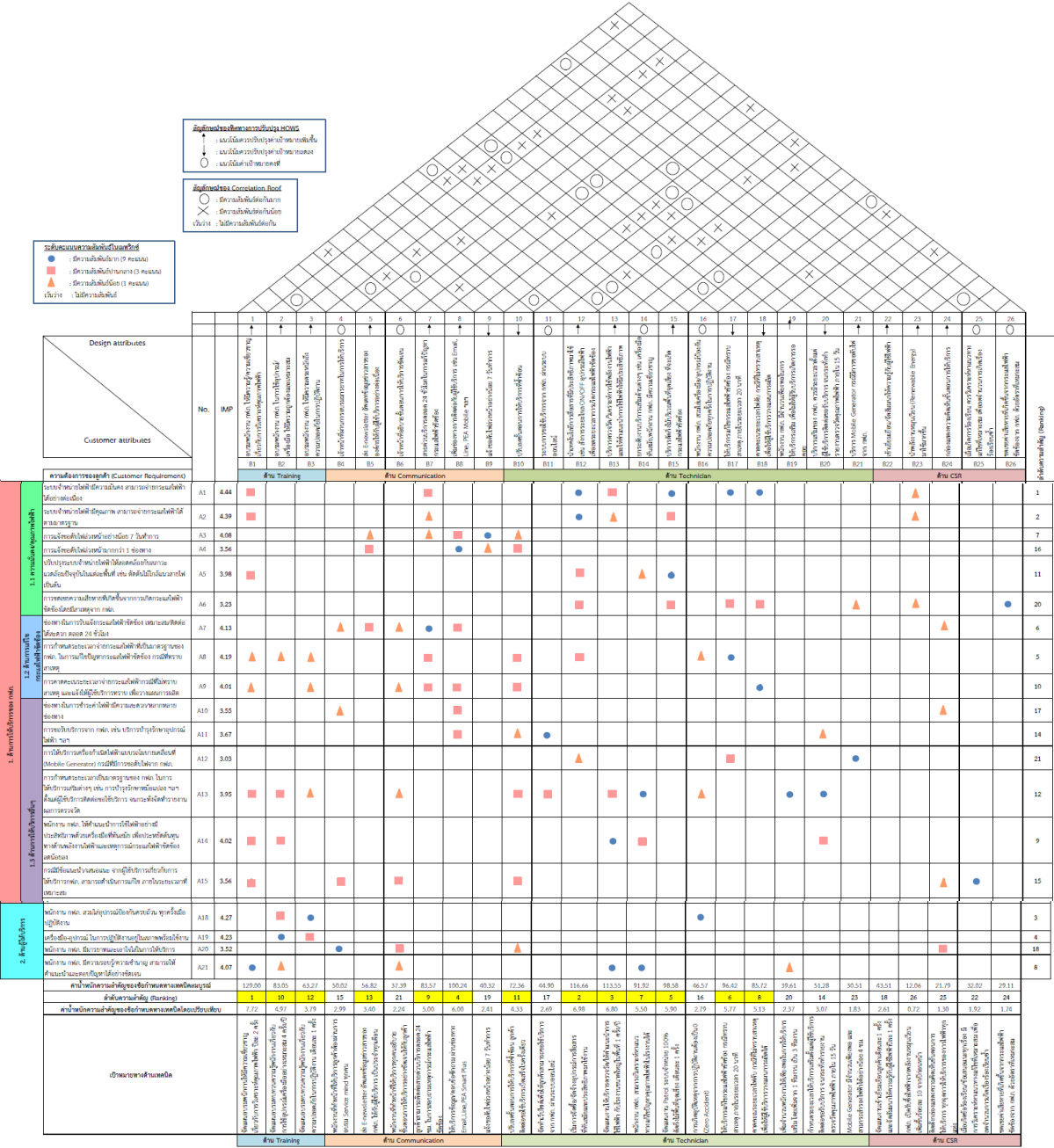
ทางด้านเทคนิคของประเด็นนี้ คือ จัดแผนอบรมพนักงาน ให้มีความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า ปีละ 2 ครั้ง ข้อมูลบ้านคุณภาพแสดงดังรูปที่ 2

4.3 การออกแบบบริการเพื่อตอบสนองความต้องการผู้ใช้บริการนักศึกษา

จากข้อมูลบ้านคุณภาพพบว่า การเรียงลำดับคะแนน Technical priority ของผู้ใช้บริการนักศึกษา คะแนนมากที่สุด คือ ข้อกำหนดทางเทคนิคที่ 1 “อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความรู้/ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า” (7.72%) คะแนนต่ำที่สุด คือ ข้อกำหนดทางเทคนิคที่ 23 “นำพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) มาใช้มากขึ้น” (0.72%) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัย ได้ตั้งเป้าหมายคัดเลือกจำนวนข้อกำหนดทางเทคนิค ที่มีลำดับคะแนน Technical priority ร้อยละ 70 ของ น้ำหนักความสำคัญทั้งหมด เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการสร้างเป้าหมายทางเทคนิค เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการนักศึกษา ต่อไป

จากนั้นผู้วิจัยทำการสร้างบ้านคุณภาพ (House of Quality: HOQ) ด้วยปัจจัยทางด้านพื้นที่การไฟฟ้าที่แตกต่างกันได้แก่ พื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอสะเดา การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอหาดใหญ่ และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอเมือง จังหวัดสงขลา โดยผลการเรียงลำดับคะแนน Technical priority พบว่าทั้ง 3 การไฟฟ้า มีคะแนนข้อกำหนดทางเทคนิคที่ร้อยละสะสม 70 ของ น้ำหนักความสำคัญทั้งหมด คือ ข้อกำหนดทางเทคนิค 13 ประเด็นแรกเช่นเดียวกับพื้นที่ที่นักศึกษา เพียงแต่แตกต่างกันในลำดับบางปัจจัยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาปัจจัยความแตกต่างทางด้านประเภทอุตสาหกรรม จำนวน 5 ประเภทอุตสาหกรรม โดยผลการเรียงลำดับคะแนน Technical priority แยกตามประเภทอุตสาหกรรม พบว่าทั้ง 5 กลุ่มอุตสาหกรรม มีคะแนนข้อกำหนดทางเทคนิคที่ร้อยละสะสม 70 ของน้ำหนักความสำคัญทั้งหมด คือ ข้อกำหนดทางเทคนิค 13 ประเด็นแรกเช่นเดียวกับพื้นที่ที่นักศึกษาเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2 บ้านคุณภาพ พื้นที่กรณศึกษา

ดังนั้นจากข้อมูลทั้งหมดนี้ สรุปได้ว่าลำดับคะแนน Technical priority เมื่อพิจารณาปัจจัยที่แตกต่างกันแล้ว พบว่าข้อกำหนดทางเทคนิคที่ร้อยละสะสม 70 ของน้ำหนักความสำคัญทั้งหมด คือ ข้อกำหนดทางเทคนิค 13 ประเด็นแรกของทุกปัจจัย เพียงแต่แตกต่างกันในลำดับบางปัจจัยเท่านั้น ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลคะแนน Technical priority 13 ประเด็นแรก

ลำดับ	No.	ข้อกำหนดทางเทคนิค	คะแนน Technical Priority	ร้อยละ	ร้อยละ สะสม
1	B1	อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความรู้/ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า	129.00	7.72	7.72
2	B12	นำเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพมาใช้ เช่น สั่งการระยะไกล ON/OFF อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อลดระยะเวลาการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง	116.66	6.98	14.70
3	B13	บริการตรวจวัด/วิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้า และให้คำแนะนำการใช้ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ	113.55	6.80	21.50
4	B8	เพิ่มช่องทางการติดต่อกับผู้ใช้บริการ เช่น Email, Line, PEA Mobile ฯลฯ	100.24	6.00	27.50
5	B15	บริการตัดกิ่งไม้บริเวณพื้นที่จุดเสี่ยง ที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้อง	98.58	5.90	33.40
6	B17	ให้บริการแก้ไขกระแสไฟฟ้าขัดข้อง กรณีทราบสาเหตุ ภายในระยะเวลา 20 นาที	96.42	5.77	39.17
7	B14	ยกระดับงานบริการเสริมด้านต่างๆ เช่น เครื่องมือทันสมัย, พนักงาน กฟภ. มีความเชี่ยวชาญ	91.92	5.50	44.67
8	B18	คาดคะเนระยะเวลาไฟดับ กรณีที่ไม่ทราบสาเหตุ เพื่อให้ผู้ใช้บริการวางแผนการผลิต	85.72	5.13	49.80
9	B7	สายด่วนบริการตลอด 24 ชั่วโมงในการแก้ปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง	83.57	5.00	54.80
10	B2	อบรมพนักงาน กฟภ. ในการใช้อุปกรณ์/เครื่องมือ ให้มีความถูกต้องและเหมาะสม	83.05	4.97	59.77
11	B10	ปรับลดขั้นตอนการให้บริการที่ซ้ำซ้อน	72.36	4.33	64.10
12	B3	อบรมพนักงาน กฟภ. ให้มีความตระหนักถึงความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน	63.27	3.79	67.89
13	B5	ส่ง E-newsletter อัปเดตข้อมูลข่าวสารขององค์กรให้กับผู้ใช้บริการอย่างต่อเนื่อง	56.82	3.40	71.29

เมื่อได้ข้อมูลข้อกำหนดทางเทคนิค และเป้าหมายทางด้านเทคนิค 13 ประเด็นแรก ซึ่งประกอบไปด้วย ด้านการฝึกอบรม (Training) ด้านการสื่อสาร (Communication) และด้านเทคนิค (Technique) จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างแบบสอบถามชุดที่ 3 เพื่อให้ผู้ตอบแบบสอบถามทำการประเมินระดับความพึงพอใจ กรณีที่ กฟภ. จะนำเป้าหมายทางเทคนิคดังกล่าว มาสร้างเป็นแผนงานในการออกแบบบริการของ กฟภ. ในอนาคต ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลความพึงพอใจของแบบสอบถามชุดที่ 3

ลำดับ	เป้าหมายทางด้านเทคนิค (No.)	ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจ
ด้านฝึกอบรม (Training)		
1	B1	3.97
2	B2	3.99
3	B3	4.04
ด้านการสื่อสาร (Communication)		
4	B5	3.91
5	B7	4.37
6	B8	4.25
ด้านเทคนิค (Technician)		
7	B10	4.09
8	B12	4.17
9	B13	3.95
10	B14	4.10
11	B15	4.20
12	B17	4.12
13	B18	3.85
คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย		4.08

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยโดยภาพรวม เท่ากับ 4.08 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 81.60 โดยมีความพึงพอใจแผนงาน: B7 “ผู้ให้บริการสามารถติดต่อสายด่วนบริการตลอด 24 ชั่วโมง ในกรณีที่เกิดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง และพนักงาน กฟภ. สามารถอธิบายถึงสาเหตุการเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องดังกล่าวได้” สูงสุด เท่ากับ 4.37 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 87.40 และมีความพึงพอใจแผนงาน: B18 “ภาคคะเน

ระยะเวลาไฟดับ กรณีที่ไม่ทราบสาเหตุ เพื่อให้ผู้ใช้บริการวางแผนการผลิตได้” น้อยสุด เท่ากับ 3.85 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 77 ซึ่งจะนำไปปรับปรุงรายละเอียดในแผนงานดังกล่าวให้มีความเหมาะสมต่อไป

จากการวิเคราะห์ผลความพึงพอใจของแผนงานทั้ง 13 แผนงาน พบว่า มีผลความพึงพอใจสอดคล้องกับบริการที่ผู้ใช้บริการต้องการในแบบสอบถามชุดที่ 2 เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของแผนงาน B7 มีค่าสูงสุด ซึ่งแผนงาน B7 ตอบสนอง 6 ความต้องการของผู้ใช้บริการ ดังนี้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีความมั่นคง สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง (A1) ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีคุณภาพ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ตามมาตรฐาน (A2) การแจ้งขอตัดไฟล่วงหน้าอย่างน้อย 7 วัน ทำการ (A3) ช่องทางในการรับแจ้งกระแสไฟฟ้าขัดข้อง เหมาะสม/ติดต่อได้สะดวก ตลอด 24 ชั่วโมง (A7) การกำหนดระยะเวลาจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เป็นมาตรฐานของ กฟภ. ในการแก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้อง กรณีที่ทราบสาเหตุ (A8) การคาดคะเนระยะเวลาจ่ายกระแสไฟฟ้ากรณีที่ไม่ทราบสาเหตุ และแจ้งให้ผู้ใช้บริการทราบ เพื่อวางแผนการผลิต (A9) ซึ่งทั้ง 6 ความต้องการนี้ มีค่าความพึงพอใจสูงเป็นอันดับต้นของความต้องการทั้งหมดเช่นกัน

4.4 ผลลัพธ์จากการออกแบบบริการ

หลังจากนั้นจึงให้ผู้บริหารของ กฟภ. ทำการประเมินความเป็นไปได้ เพื่อนำมาจัดแผนการดำเนินงาน โดยใช้วิธี Factor Rating เป็นการระบุปัจจัยที่สำคัญในการคัดเลือกแผนงานมาดำเนินการ แล้วทำการให้น้ำหนักของแต่ละปัจจัย เพื่อจัดลำดับแผนการดำเนินงานก่อน-หลัง โดยมีผลการประเมินให้คะแนนแสดงดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 สามารถกำหนดแผนการดำเนินการในระยะเวลา 3 ปี โดยมีปัจจัยในการให้คะแนน 4 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีค่าน้ำหนักที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงพิจารณาให้คะแนนแต่ละเป้าหมายทางด้านเทคนิค จำนวน 13 แผนงาน แยกแต่ละปัจจัย แล้วนำมาคำนวณคะแนน

รวม คำนวณโดยการหาผลรวมของค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยคูณกับระดับคะแนนในแต่ละปัจจัย

จากนั้นจึงกำหนดแผนดำเนินงานเป้าหมายทางด้านเทคนิค ที่มีผลคะแนนรวมลำดับที่ 1-5 ตั้งเป้าหมายดำเนินการให้แล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2562 ลำดับที่ 6-10 ตั้งเป้าหมายดำเนินการให้แล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2563 และลำดับที่ 11-13 ตั้งเป้าหมายดำเนินการให้แล้วเสร็จภายในปี พ.ศ. 2564 ดังตารางที่ 7

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบบริการของ กฟภ. เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ กลุ่มกิจการขนาดใหญ่ พื้นที่กรณีศึกษา มีเป้าหมายเพื่อให้ผู้ให้บริการมีความพึงพอใจในการรับบริการจาก กฟภ. เพิ่มมากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ คือ 13 แผนงานที่ประกอบไปด้วย ด้านฝึกอบรม (Training) ด้านการสื่อสาร (Communication) และด้านเทคนิค (Technique) ซึ่ง กฟภ. จะใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนา รูปแบบบริการกับผู้ให้บริการประเภทอื่นต่อไป

ตารางที่ 6 การคัดเลือกแผนงานดำเนินการเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการกรณีศึกษา

ปัจจัยการให้คะแนน	น้ำหนัก	เป้าหมายทางด้านเทคนิค												
		B1	B2	B3	B5	B7	B8	B10	B12	B13	B14	B15	B17	B18
1	0.30	2	2	2	4	5	5	3	2	5	3	4	2	3
2	0.25	1	1	3	5	5	4	5	2	3	4	4	4	4
3	0.35	5	4	4	3	3	3	3	4	5	3	5	5	5
4	0.10	2	2	2	4	5	5	5	3	5	4	4	5	5
คะแนนรวม	1.00	2.8	2.45	2.95	3.9	4.3	4.05	3.7	2.8	4.5	3.35	4.35	3.85	4.15

หมายเหตุ: ปัจจัยการให้คะแนน ด้านที่ 1 คือ สามารถดำเนินการได้ทันที ด้านที่ 2 คือ ใช้งบประมาณน้อย ด้านที่ 3 คือ มีความจำเป็นเร่งด่วน และด้านที่ 4 คือ มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการโดยตรง

ตารางที่ 7 แผนงานเพื่อตอบสนองความต้องการ

เป้าหมายทางด้านเทคนิค	ระยะเวลาการดำเนินงาน		
	ภายในปี พ.ศ.2562	ภายในปี พ.ศ.2563	ภายในปี พ.ศ.2564
B1			
B2			
B3			
B5			
B7			
B8			
B10			
B12			
B13			
B14			
B15			
B17			
B18			

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชานา สันขวาลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณแผนกบริหารการขาย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เขต 3 (ภาคใต้) จ.ยะลา สำหรับข้อมูลผู้ให้บริการประเภทต่างๆ และขอขอบคุณผู้ให้บริการประเภทกิจการขนาดใหญ่ พื้นที่กรณีศึกษา ที่ให้ความร่วมมือสละเวลาในการตอบแบบสอบถาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] แผนกบริหารการขาย กองซื้อขายไฟฟ้า. รายงานข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่, 2559.
- [2] ชาคริต ศรีทอง และ อรวิกา ศรีทอง. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์: กรณีศึกษาการออกแบบเก้าอี้สำนักงาน. *วารสารวไลยอลงกรณ์ปริทัศน์(มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์)*, 2559; 6(2):111-124.
- [3] อัญชลี ศรีจันทร์ และ มณฑล ศาสนนันท์. การประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพเพื่อปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจ กรณีศึกษา: ธุรกิจกล้วยพารา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2559; 25(4): 714-722.
- [4] สิทธิชัย ขกถาวร. การออกแบบรูปแบบบริการสำหรับผู้ป่วยนอกของแผนก หูคอจมูก ในโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ โดยใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ. สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553.
- [5] อรุณันต์ หิมชูต. การออกแบบหลักสูตรฝึกอบรมหัวหน้างานระดับต้นด้านการจัดการวิศวกรรม. สำหรับอุตสาหกรรมภาคใต้, สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2555.

ผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 26 (2019)

- | | |
|---|---|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.อาษา ประทีปเสน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรณ เสราภิน | สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ |
| 4. ศาสตราจารย์ ดร.จรงค์ชัย ผลประเสริฐ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ นาทวิชัย | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์ สัมภักตะกุล | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลน เหล่าศิริถาวร | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ สิงห์ใจ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.ชนพร สุปรีศิลป์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 14. รองศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ สิริกุลรัตน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 16. รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 17. รองศาสตราจารย์ ดร.วัสนัย วรรณจรรย์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 18. รองศาสตราจารย์ ดร.วิม เหนือเฟื่อง | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 19. รองศาสตราจารย์ วิไลลักษณ์ กิจจนะพานิช | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 20. รองศาสตราจารย์ ชูโชค อายุพงศ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 21. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ | มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |
| 22. รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรภัทร วาฤทธิ | มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |
| 23. รองศาสตราจารย์ ดร.ดิบุญ เมธากุลชาติ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 24. รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 25. รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วงศ์วัฒนาเสถียร | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 26. รองศาสตราจารย์ ดร.เอนก ศิริพานิชกร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 27. รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ศรีสุรภานนท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 28. รองศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 29. รองศาสตราจารย์ ดร.ประเวทย์ ดุ้ยเต็มวงศ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 30. รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช อินต๊ะ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิทยาเขตภาคพายัพ |
| 31. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 32. รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 33. รองศาสตราจารย์ ดร.อนุสาฐ์ ชนะพิมพ์เมธา | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 34. รองศาสตราจารย์ ดร.สุชิน ไตรรงค์จิตเหมาะ | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 35. รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรรา รู้จักการพานิช | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤษ อักกะรังสี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสุธร นาคเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร อาสนคำ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยะ ทองมณี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ ปทานุคม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรรุติชัย ชิวสุทริศิลป์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ไสยสุข	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ต้นชัยสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชินพัฒน์ บัวชาติ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนสิริ ดีทยาท	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
48. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โพธิ จ้าวไพศาล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
49. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรรา สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
50. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล สมุทรกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
51. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เวชยันต์ รามศรี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
52. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธรักษ์ จรัสพันธุ์กุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
53. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยา วิสิทธิ์พานิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
54. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชพล ไรจน์รัตนางกูร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
55. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสนาหฤท นิตยวรรณะ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
56. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรมศ วิระสันติ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
57. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โคม โพธิกานนท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
58. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
59. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐรัตน์ ธารรัตน์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
60. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
61. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ย้งรักษ์ อรรถเวชกุล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
62. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
64. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร พุ่มจันทร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
65. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรเพชญ์ ชื่อนิธิไพศาล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
66. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
67. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์	มหาวิทยาลัยบูรพา
68. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช หิรัญ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
69. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกานต์ นิตยพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
70. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญวัฒน์ เต็มสมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
71. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสิทธิ์ ธนะพิมพ์เมธา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
72. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติเวช ขันคิวิชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
73. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยั้ง เจริญ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

74. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมวงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
75. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สติชัยเรืองศักดิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
76. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
77. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญญู ทองเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิทยาเขตภาคพายัพ
78. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สนิท พิพิธสมบัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิทยาเขตภาคพายัพ
79. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันยาพร ไชยวงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เขตพื้นที่น่าน
80. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เขตพื้นที่ตาก
81. อาจารย์ ดร.คมสุรีย์ สมประสงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
82. อาจารย์ ดร.นวดนย์ คุณเลิศกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
83. อาจารย์ ดร.วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
84. อาจารย์ ดร.แสนคำ นุเสน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
85. อาจารย์ ดร.นพดล กรประเสริฐ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
86. อาจารย์ ดร.แมน ดุ้ยแพร่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิทยาเขตภาคพายัพ
87. อาจารย์ ดร.รชนิภาส สุแก้ว สมักรธำรงไทย มหาวิทยาลัยทักษิณ
88. อาจารย์ ดร.พงศ์พัฒน์ สันทะมิโน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
89. ดร.เหมือนจิต แจ่มศิลป์ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก
(องค์การมหาชน)
90. ดร.รัชชยุดา กองบุญ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
91. ดร.วาสนา คำโอกาส สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
92. ดร.อดิพงษ์ นันทพันธุ์ ศูนย์ฝึกอบรมแม่เมาะ
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
93. ดร.เอกพร นวภานันท์ ศูนย์ความเป็นเลิศทางการจัดการพลังงานและ
เศรษฐกิจ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (3E)
94. นางสาวเรือนแก้ว ประพฤติ สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐาน
ผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

การออกแบบและสร้างตัวควบคุมสัดส่วนร่วมกับเรโซแนนซ์สำหรับวงจรกรองกำลังแยกกัฟแบบขนานชนิด 1 เฟส บนพื้นฐานเทคนิคการควบคุมกระแสทางอ้อม.....	128-141
(Design and Implementation of Proportional-Resonant Controller for Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique)	
กวีวัชร โพธิ์ดำรงชัย วันจักรี เล่นวารี และ คณาวาณย์ ยอดมณี	
การวิเคราะห์ความถูกต้องความโน้มถ่วงพิพาททางอากาศ โดยการปรับแก้แบบจุดตัดระหว่างแนวนบินบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยา.....	142-155
(Analysis of Airborne Gravity Accuracy Using Cross-over Adjustment in Chao Phraya Basin)	
ณัฐนนท์ ดวงดี พุทธิพล ดำรงชัย และ ชวิศ ศรีมณี	
การประเมินวัฏจักรชีวิตของโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันอินทรีย์ร่วมกับห้องอบแห้งแบบรวมศูนย์จากพลังงานความร้อนใต้พิภพ....	156-170
(Life Cycle Assessment of Organic Rankine Cycle Power Plant Combined with Centralized Drying Room from Geothermal Energy)	
ปาณิสดา อ่อนดอกไม้ และ นัฐพร ไชยญาติ	
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความตรงและแรงตัดในกระบวนการกลึงอะลูมิเนียม.....	171-183
(A Study of Relation Between Straightness and Cutting Force in Aluminium Turning)	
พรรณีภา พ่วงพัด และ สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ	
ฮิวริสติกสำหรับการจัดลำดับการผลิตยาเม็ดเคลือบฟิล์ม.....	184-196
(Heuristic Based Scheduling for Tablets Film Coating Process)	
จุฑามาศ ผลตระกูล และ พิธิษฐ์ จารุมณีโรจน์	
การลดปัญหาการแห้งสับของสีน้ำมัน.....	197-213
(Reduction of Touch Dry Problem of Enamel Paint)	
พลัฏฐ์กร ใจผ่องอัครกุล และ นกัศสวงศ์ ไชยสถิตศิลป์	
Effect of pH on Acidification of Whey, Yeast and Yolk Wastewaters.....	214-223
Pacharawan Hanjai, Somjai Kamchanawong and Seni Kamchanawong	
การเปรียบเทียบเทคนิคการแบ่งส่วนภาพสำหรับตรวจสอบคุณภาพแผ่นวงจรพิมพ์.....	224-235
(Comparison of Image Segmentation Techniques for PCB Quality Inspection)	
จักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร	
การดูดซับและกระบวนการโฟโตแคตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงบนแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับการกำจัดสีมาลาไคท์กรีน	236-255
(Adsorption and Photocatalysis Process of Titanium Dioxide Immobilized Montmorillonite for Malachite Green Decolorization)	
จวีพร วงศ์จินดา และ จักรกฤษณ์ อัมพูช	
การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ เพื่อออกแบบบริการของ กฟภ. ให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการ.....	256-272
(The Application of QFD for Designing PEA's Service Prior to Meet Customer Requirement)	
รัญชนา สีนวลชัย และ กนกพร วงศ์มณี	

