



การประมาณกำลังและแรงดันของระบบโฟโตโวลตาอิก โดยใช้โครงข่ายประสาทแพร่กลับ Power and Voltage Estimation of Photovoltaic System Using Back-Propagation Neural Network

ดำรงศักดิ์ วงศ์ตา¹ เซวศักดิ์ รักเป็นไทย^{1*} สุรพล ดำรงกิตติกุล¹ และ เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์²

Dumrongsak Wongta¹, Chawasak Rakpenthai^{1*},
Surapol Dumronggittigule¹ and Sermsak Uatrongjit²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Department of Electrical Engineering, School of Engineering,
University of Phayao, Phayao, 56000, Thailand

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

*E-mail: chawasak@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อประมาณจุดทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิก ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาอาคาร เนื่องจากในการศึกษามีระบบโฟโตโวลตาอิก จำนวน 2 ระบบ จึงได้พัฒนาโครงข่ายประสาทแพร่กลับจำนวน 2 โครงข่าย เพื่อประมาณจุดทำงานของแต่ละระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ โครงข่ายประสาทแพร่กลับมีอินพุตเป็นการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม ค่าที่ประมาณได้จะเป็นกำลังและแรงดันที่ได้จากระบบโฟโตโวลตาอิก ข้อมูลการวัดประกอบด้วย การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม กำลังผลิต และแรงดันได้ถูกบันทึกและใช้สำหรับการฝึกสอนและการทดสอบโครงข่ายประสาทแพร่กลับ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า โครงข่ายประสาทแพร่กลับที่นำเสนอสามารถให้ค่าประมาณที่ดีภายใต้เงื่อนไขทดสอบ

ABSTRACT

This paper applies the artificial neural network to estimate the operating point of photovoltaic (PV) system installed on the building's roof. Since two PV systems are studied in this work, two back-propagation (BP) neural networks have been developed for estimating their operating points under weather variations. The solar radiation and the ambient temperature are considered as the input of the BP neural network while power and voltage obtained from the PV system are the estimated values. The measured data, i.e. the solar radiation, the ambient temperature, the PV power generation, and the PV voltage, have been recorded and used for training and testing the BP neural networks. Results indicate that the proposed BP neural networks can provide the good estimated values under the test conditions.

1. บทนำ

ระบบโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic system) เป็นระบบผลิตกำลังไฟที่มีการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ แผง ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (inverter) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นกับการติดตั้งระบบ สภาพแวดล้อม ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และการควบคุมการทำงานของระบบ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานมาเป็นระยะเวลานานจะมีประสิทธิภาพลดลง การควบคุมให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดกำลังสูงสุดจะช่วยให้ระบบโฟโตโวลตาอิกได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

การประมาณกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิกสามารถกระทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ แผงมาสร้างเป็นระบบโฟโตโวลตาอิก ความแม่นยำของกำลังที่ประมาณได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับความแม่นยำของพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจะมีการเปลี่ยนแปลงตามจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่อาจทำให้แต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดกำลังสูงสุดแตกต่างกัน เพราะตำแหน่งและมุมในการติดตั้งอาจจะแตกต่างกัน ดังนั้น ในทางปฏิบัติการประมาณกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิกโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงอาจจะไม่เหมาะสม การประมาณกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิกมีความสำคัญต่อการตรวจสอบสถานะในการทำงานของระบบ หากกำลังผลิตที่ประมาณได้มีความแตกต่างอย่างมากกับกำลังผลิตที่วัดได้จริงก็แสดงว่า อุปกรณ์บางอย่างในระบบโฟโตโวลตาอิกอาจจะมีความผิดปกติ หรืออาจจะมีเงาจากเมฆมาบดบังการรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในบางส่วน ทำให้ระบบไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ตามที่ควรจะเป็น

เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) สามารถประยุกต์ใช้ประมาณสถานะในการทำงานของระบบได้โดยไม่ต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ในหลายงานวิจัยที่ผ่านมาจึงมีการศึกษาการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการประมาณกำลังผลิตสูงสุดที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์และทำนายกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิก

บทความ [1] ได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ประมาณกำลังสูงสุดที่จะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินพุตประกอบด้วยรังสีอาทิตย์บนผิวโลก (insolation) อุณหภูมิโดยรอบ ความเร็วลม และข้อมูลเวลา สำหรับเอาต์พุตคือกำลังสูงสุดที่ประมาณได้ โครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอมีชั้นซ่อนเดียว โดยในชั้นซ่อนจะมี 5 นิวรอน ผลการทดสอบพบว่า การใช้ข้อมูลเวลาเป็นอินพุตสามารถช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการประมาณกำลังสูงสุด นอกจากนี้ ถ้าป้อนอินพุตเป็นข้อมูลสภาพแวดล้อมที่ทำนายได้แล้ว โครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอจะสามารถทำนายกำลังสูงสุดที่คาดว่าจะได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ด้วย

บทความ [2] ได้เปรียบเทียบผลการประมาณกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างโครงข่ายประสาทแพร่กลับ (back-propagation neural network) และโครงข่ายประสาทฟังก์ชันฐานหลักกรัสมิ (radial basis function neural network) โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองชนิดมีชั้นซ่อนเดียว อินพุตและเอาต์พุตเหมือนกัน อินพุตประกอบด้วยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิโดยรอบ เอาต์พุตคือกำลังสูงสุดที่ประมาณได้ ในการศึกษา มีการปรับจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสอง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนสามารถลดความผิดพลาดของเอาต์พุต นอกจากนี้ยังพบว่าโครงข่ายประสาทฟังก์ชันฐานหลักกรัสมิสามารถประมาณกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แม่นยำกว่าและยังให้ผลการประมาณรวดเร็วกว่าโครงข่ายประสาทแพร่กลับ ภายใต้สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

บทความ [3] ได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมจำนวน 2 แบบจำลอง เพื่อใช้ประมาณกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในวันที่มีเมฆและในวันที่มีแดด อินพุตประกอบด้วยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิโดยรอบ การศึกษาได้เปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ คือ พหุนามถดถอย (polynomial regression) พหุคูณเชิงเส้นถดถอย (multiple linear regression) และแบบจำลองไดโอดตัวเดียว (single-diode model) ผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอมีสมรรถนะในการประมาณกำลังสูงสุดได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ

บทความ [4] ได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับใช้ประมาณแรงดันและกำลังผลิต ณ จุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ อินพุตประกอบด้วยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม เอาต์พุตประกอบด้วยแรงดันและกำลังสูงสุดที่ผลิตได้ การศึกษาได้จำลองลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองไดโอดตัวเดียว ข้อมูลจากแบบจำลองไดโอดตัวเดียวถูกใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอ ผลการจำลองพบว่า โครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้ประมาณค่าได้ดี แม้จะใช้สภาวะในการฝึกสอนไม่มาก

บทความ [5] ได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิกทุกครึ่งชั่วโมง ในช่วงเวลาตั้งแต่ 6 โมงเช้า ถึง 1 ทุ่ม อินพุตมีจำนวน 33 ข้อมูล คือ กำลังผลิตทุกครึ่งชั่วโมงในวันที่เหมือนกัน (27 ข้อมูล) อุณหภูมิสูง ต่ำ และเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมในวันที่เหมือนกัน (3 ข้อมูล) และอุณหภูมิสูง ต่ำ และเฉลี่ยของวันที่ทำนาย (3 ข้อมูล) ส่วนเอาต์พุตคือ กำลังผลิตทุกครึ่งชั่วโมงของวันที่ทำนาย (27 ข้อมูล) ผลการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากระบบโฟโตโวลตาอิกพิค 15 กิโลวัตต์ พบว่า โครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอสามารถให้ผลการทำนายสำหรับวันที่มีแดดได้แม่นยำกว่าผลการทำนายในวันที่มีฝน

สังเกตว่า บทความ [1]-[4] เป็นการประมาณกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เดี่ยว โครงข่ายประสาท

เทียมที่เสนอจึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประมาณกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิกที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากถูกติดตั้งอยู่ในระบบ เพราะแต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะมีจุดทำงานแตกต่างกันอันเนื่องมาจากตำแหน่งและมุมในการติดตั้ง ในบทความ [5] เป็นการทำนายกำลังผลิตของระบบโฟโตโวลตาอิกล่วงหน้า 1 วัน โครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอมีอินพุตจำนวนมาก โดยอินพุตประกอบด้วยข้อมูลที่เก็บบันทึกไว้ในวันที่เหมือนกันและข้อมูลการทำนายสภาพแวดล้อมล่วงหน้าตลอดทั้งวันของวันที่ต้องการทำนายกำลังผลิต

ในบทความนี้ นำเสนอโครงข่ายประสาทแพร่กลับสำหรับประมาณจุดทำงานจริง (กำลังผลิตและแรงดันไฟฟ้า) ในเวลาจริงของระบบโฟโตโวลตาอิกซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของอาคาร ปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อินพุตของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร) และอุณหภูมิแวดล้อม (องศาเซลเซียส) ส่วนเอาต์พุตประกอบด้วยกำลังกระแสตรง (กิโลวัตต์) และแรงดันกระแสตรง (โวลต์) ของระบบโฟโตโวลตาอิก

2. แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในรูปที่ 1 แสดงแบบจำลองวงจรสมมูลไดโอดตัวเดียวสำหรับใช้ในการจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [4] แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณกระแสและแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนได้เป็น

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nN_s k T_c} \right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

โดยที่

I คือ กระแสที่ผลิตได้ หน่วย แอมแปร์

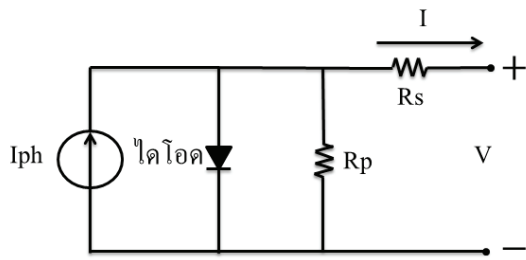
I_{ph} คือ กระแสโฟโต หน่วย แอมแปร์

I_s คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด หน่วย แอมแปร์

n คือ แฟกเตอร์ความเป็นอุดมคติของไดโอด

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม หน่วย โอห์ม

R_p คือ ความต้านทานขนาน หน่วย โอห์ม



รูปที่ 1 วงจรสมมูลไดโอดตัวเดียวสำหรับ
จำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์

N_s คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรม

V คือ แรงดันที่ได้จากแผงเซลล์ หน่วย โวลต์

q มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

k คือ ค่าคงที่ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.3×10^{-23}
จูลต่อเคลวิน

T_c คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ หน่วย เคลวิน

ปริมาณของกระแสโฟโตจะขึ้นกับระดับการแผ่รังสี
ดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ความ
ต้านทานอนุกรมเกิดจากความต้านทานของซิลิกอนที่เรียง
กันเป็นชั้นและขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังของแผง
เซลล์แสงอาทิตย์ ความต้านทานขนานเกิดจากการรั่วไหล
ของกระแสระหว่างรอยต่อ สำหรับอุณหภูมิเซลล์ของแผง
เซลล์แสงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีดวง
อาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อม อุณหภูมิเซลล์ของแผงเซลล์
แสงอาทิตย์อาจคำนวณได้จาก [6]

$$T_c = T_a + k_T G_T \quad (2)$$

ในที่นี้

$$k_T = \frac{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{NOCT}} \quad (3)$$

โดยที่

T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม หน่วย องศาเซลเซียส

G_T คือ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ หน่วย วัตต์ต่อตาราง
เมตร

$T_{a,NOCT}$ คือ อุณหภูมิแวดล้อมอ้างอิง

T_{NOCT} คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

G_{NOCT} คือ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์อ้างอิง

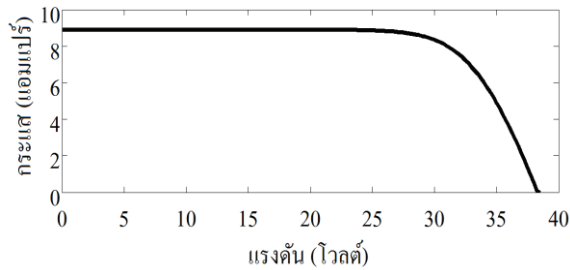
อุณหภูมิเซลล์ทำงานปกติ (nominal operating
cell temperature หรือ NOCT) คือ การทดสอบแผง
เซลล์แสงอาทิตย์ที่การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ 800 วัตต์ต่อ
เมตร² ภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส
และความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ในขณะที่แผงเซลล์
แสงอาทิตย์ไม่มีภาระทางไฟฟ้า

ในตารางที่ 1 แสดงข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ
SHARP รุ่น ND-250QCS [7] ซึ่งเป็นแผงเซลล์
แสงอาทิตย์ของระบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้ศึกษาใน
บทความนี้ จากข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์เราจะได้
 $k_T = 0.0343$ (องศาเซลเซียส-เมตร²) ต่อวัตต์

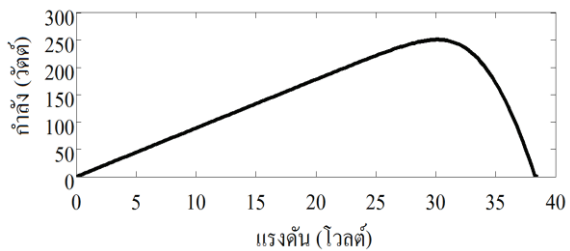
รูปที่ 2 แสดงลักษณะเฉพาะแรงดัน-กระแสของแผง
เซลล์แสงอาทิตย์ ยี่ห้อ SHARP รุ่น ND-250QCS
ลักษณะเฉพาะแรงดัน-กำลังของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3 สังเกตว่า ลักษณะเฉพาะเหล่านี้
ได้มาจากการคำนวณทางทฤษฎี ในทางปฏิบัติกำลังผลิต
จริงที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับจุดทำงานของ
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการ
เปลี่ยนแปลง โดยจุดกำลังสูงสุดที่ได้จะขึ้นกับการทำงาน
ของฟังก์ชันการติดตามกำลังสูงสุด การติดตั้งแผงเซลล์
แสงอาทิตย์ทางกายภาพ และสภาพแวดล้อมในขณะนั้น

ตารางที่ 1 ข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น ND-250QCS

รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย
กำลังสูงสุด	250	วัตต์
แรงดัน ณ จุดกำลังสูงสุด	29.8	โวลต์
กระแส ณ จุดกำลังสูงสุด	8.40	แอมแปร์
กระแสลัดวงจร	8.90	แอมแปร์
แรงดันเปิดวงจร	38.3	โวลต์
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อ อนุกรมกัน	60	เซลล์
อุณหภูมิเซลล์ทำงานปกติ	47.5 ± 2	เซลเซียส
แฟกเตอร์ความเป็นอุดมคติ ของไดโอด	1.2	



รูปที่ 2 ลักษณะเฉพาะแรงดัน-กระแส



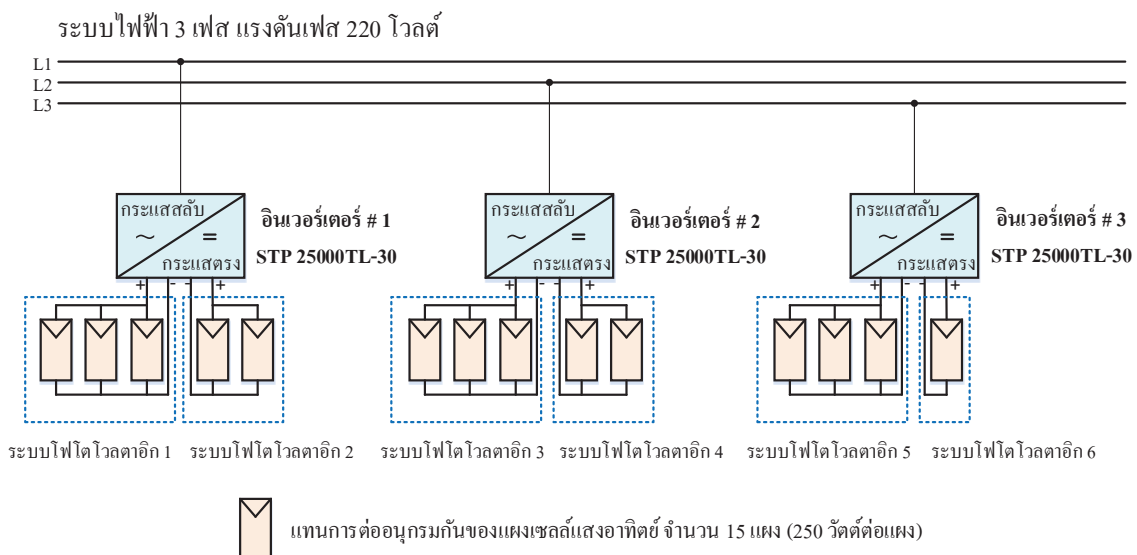
รูปที่ 3 ลักษณะเฉพาะแรงดัน-กำลัง

3. ระบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้ศึกษา

ระบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้ศึกษาถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของอาคารปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงแผนภาพเส้นเดียวของระบบโฟโตโวลตาอิก และแผงเซลล์แสงอาทิตย์บางส่วนที่ติดตั้งบนหลังคาของอาคารปฏิบัติการ ตามลำดับ ระบบประกอบด้วยแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ ขนาดพิกัด 250 วัตต์ แรงดัน 29.8 โวลต์ จำนวน 210 แผง จึงมีขนาดพิกัดรวมกันเป็น 52.5 กิโลวัตต์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกต่ออนุกรมกันแถวละ 15 แผง เป็นจำนวน 14 แถว สังเกตว่า ในที่นี้เราจะแบ่งระบบออกเป็นระบบโฟโตโวลตาอิก จำนวน 6 ระบบย่อยดังในรูปที่ 4 โดยแต่ละอินเวอร์เตอร์สามารถรองรับระบบโฟโตโวลตาอิกได้ไม่เกิน 2 ระบบ (ระบบละไม่เกิน 3 แถว) และสามารถควบคุมให้แต่ละระบบโฟโตโวลตาอิกทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้อย่างอิสระจากกัน

เนื่องจากระบบที่ติดตั้งมีการแสดงผลในเวลาจริงเฉพาะปริมาณทางไฟฟ้าของระบบโฟโตโวลตาอิกจากอินเวอร์เตอร์ 1 เท่านั้น ดังนั้น ในบทความนี้จึงทำการศึกษาเฉพาะระบบโฟโตโวลตาอิก 1 และ 2 สังเกตว่า ระบบโฟโตโวลตาอิก 1 มีพิกัด 11.25 กิโลวัตต์ ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 3 แถว แต่ละแถวมีการต่ออนุกรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 15 แผง ขณะที่ระบบโฟโตโวลตาอิก 2 มีพิกัด 7.50 กิโลวัตต์ ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 2 แถว แต่ละแถวมีการต่ออนุกรมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 15 แผง



รูปที่ 4 แผนภาพเส้นเดียวของระบบโฟโตโวลตาอิก

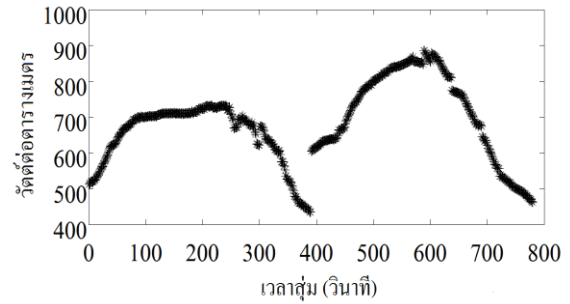


รูปที่ 5 ระบบโฟโตโวลตาอิกติดตั้งบนหลังคา

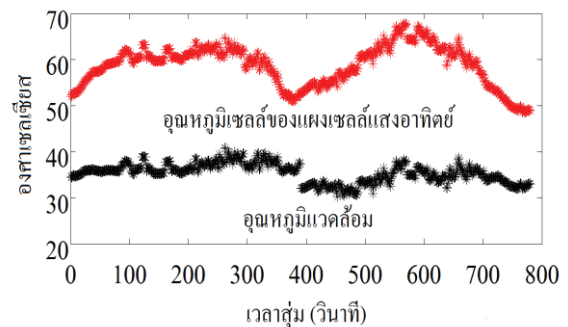
ข้อมูลของระบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้ศึกษามีการบันทึกค่าการวัดเป็นเวลา 2 วัน คือ ในวันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2559 และวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 ตั้งแต่เวลา 10.00 น. ถึง 16.30 น. ข้อมูลการบันทึกประกอบด้วย การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม กำลังผลิตไฟฟ้า กระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแต่ละระบบโฟโตโวลตาอิก ในการบันทึกค่าจะเก็บข้อมูลทุก 1 วินาที รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมจากการวัดทั้ง 2 วัน ตามลำดับ ในที่นี้อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์จะคำนวณจากสมการที่ (2) ในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและกำลังผลิตที่ได้จากการวัดในทั้ง 2 วัน

4. โครงข่ายประสาทแพร่กลับที่นำเสนอ

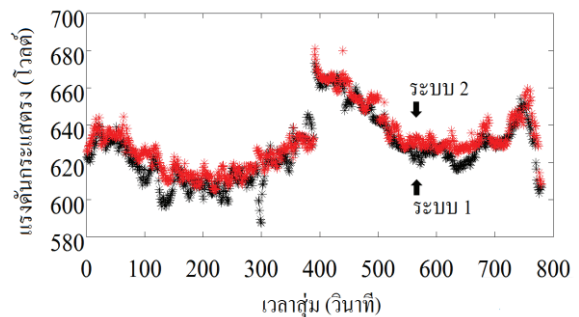
ระบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้ศึกษามี 2 ระบบ ดังนั้น การออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมจึงได้ออกแบบโครงข่ายประสาทแพร่กลับ จำนวน 2 โครงข่าย เพื่อใช้ประมาณกำลังผลิตของแต่ละระบบอย่างอิสระ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบและการใช้งานจริง กล่าวคือ หากมีระบบโฟโตโวลตาอิกใดถูกปลดออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบโฟโตโวลตาอิกที่เหลือก็ยังจะสามารถประมาณจุดทำงานของระบบโฟโตโวลตาอิกที่เหลือได้ ในแต่ละโครงข่ายประสาทเทียมจะมีอินพุต คือ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม



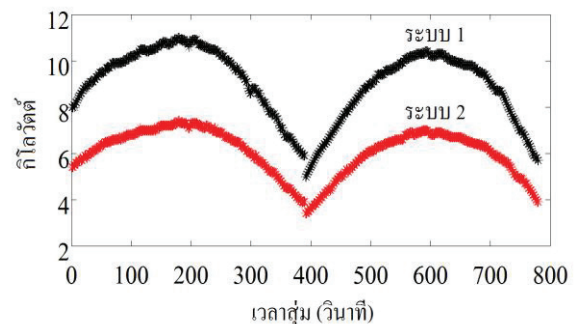
รูปที่ 6 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์



รูปที่ 7 อุณหภูมิเซลล์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิแวดล้อม



รูปที่ 8 แรงดันของระบบโฟโตโวลตาอิก



รูปที่ 9 กำลังของระบบโฟโตโวลตาอิก

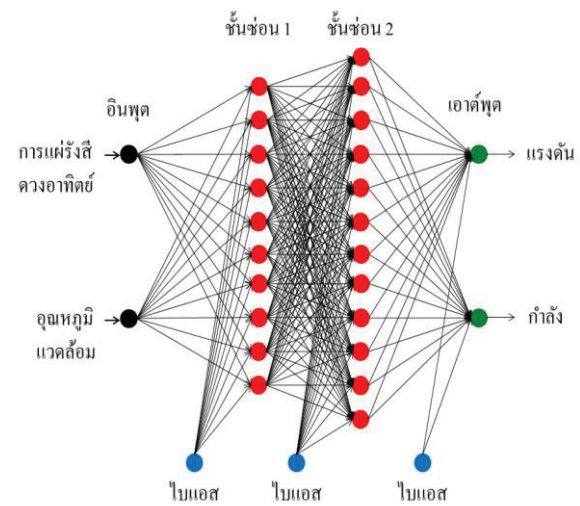
สังเกตว่า เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 2 ระบบโฟโตโวลตาอิกถูกติดตั้งอยู่บนหลังคาของอาคารเดียวกันจึงมีสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกัน ดังนั้น ในการฝึกสอนแต่ละโครงข่ายจึงเลือกใช้ข้อมูลอินพุตเหมือนกัน ในงานวิจัยนี้เอาต์พุตของแต่ละโครงข่ายประสาทเทียม คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและแรงดัน ณ จุดทำงานจริงของแต่ละระบบโฟโตโวลตาอิก สังเกตว่า แต่ละระบบโฟโตโวลตาอิกมีพิกัดกำลังแตกต่างกัน การฝึกสอนจึงได้เอาต์พุตแตกต่างกัน ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะใช้ข้อมูลที่บันทึกมาจากการวัดจริง โดยนำข้อมูลการวัดทุก 5 วินาทีมาใช้ฝึกสอน ในแต่ละโครงข่ายประสาทเทียมจะมีข้อมูลฝึกสอน จำนวน 156 ข้อมูล การฝึกสอนจะมีการปรับโครงสร้างและฟังก์ชันในแต่ละชั้นภายในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อหาโครงข่ายประสาทเทียมที่ให้สมรรถนะการเรียนรู้ที่ดีที่สุด

รูปที่ 10 แสดงโครงข่ายประสาทเทียม 1 ที่ได้จากการฝึกสอนสำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก 1 สังเกตว่า โครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ชั้นซ่อน คือ ชั้นซ่อน 1 และ 2 โดยมีนิวรอนเป็น 10 และ 12 นิวรอน ตามลำดับ สำหรับฟังก์ชันในชั้นซ่อน 1 ชั้นซ่อน 2 และเอาต์พุต คือ tansig, tansig และ purelin ตามลำดับ

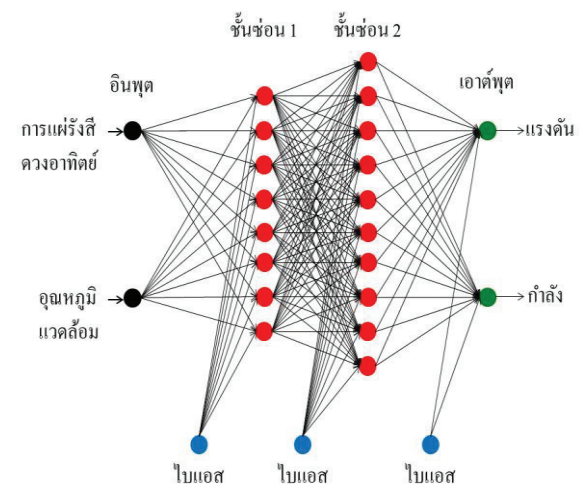
รูปที่ 11 แสดงโครงข่ายประสาทเทียม 2 สำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก 2 สังเกตว่า โครงข่ายประสาทเทียมมี 2 ชั้นซ่อน คือ ชั้นซ่อน 1 และ 2 โดยมีนิวรอนเป็น 8 และ 10 นิวรอน ตามลำดับ แต่ละนิวรอนในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม 2 จะใช้ฟังก์ชันเหมือนกับโครงข่ายประสาทเทียม 1

5. ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของโครงข่ายประสาทเทียม 1 และ 2 สำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก 1 และ 2 ตามลำดับ ในการทดสอบใช้ข้อมูลจากการวัดจริงทุก 7 วินาที ของวันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ข้อมูลการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ



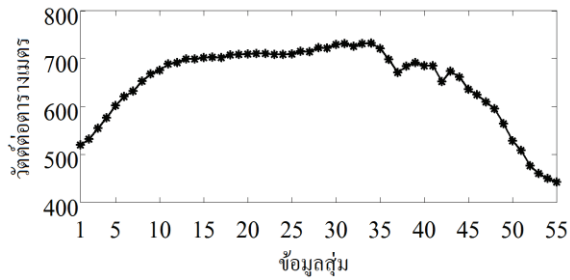
รูปที่ 10 โครงข่ายประสาทเทียม 1



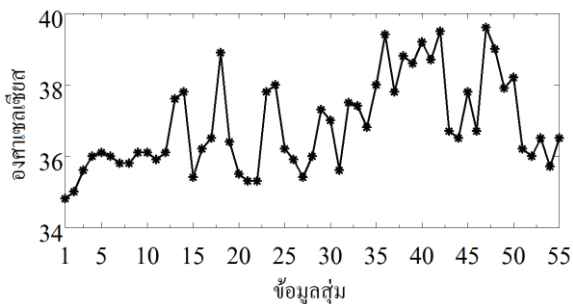
รูปที่ 11 โครงข่ายประสาทเทียม 2

เอาต์พุตจากแต่ละโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จริง ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (absolute of percentage error: APE) ถูกใช้เป็นดัชนีสมรรถนะสำหรับแสดงความผิดพลาดในการประมาณกำลังผลิตไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของระบบโฟโตโวลตาอิก

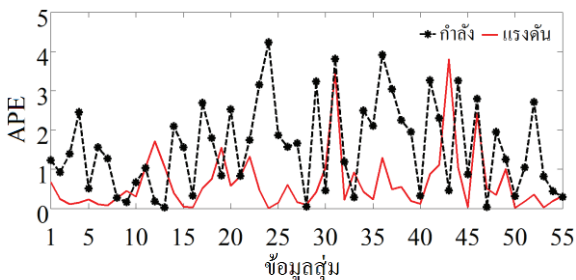
รูปที่ 14 แสดง APE ของกำลังผลิตและแรงดันที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก 1 จะเห็นได้ว่า APE ของกำลังผลิตและแรงดันจะมีค่าไม่เกิน 5 และ 4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



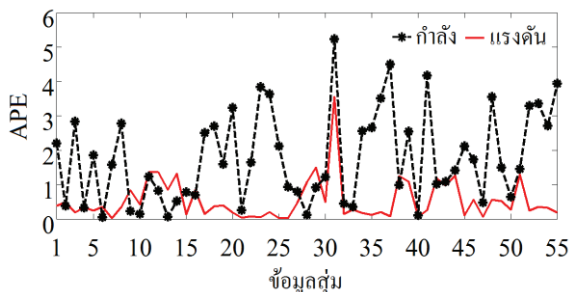
รูปที่ 12 การแปรผันของอัตราความผิดพลาดที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 13 อุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 14 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังและแรงดันจากโครงข่ายประสาทเทียม 1



รูปที่ 15 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังและแรงดันจากโครงข่ายประสาทเทียม 2

รูปที่ 15 แสดง APE ของกำลังผลิตและแรงดันที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับระบบโฟโตโวลตาอิก 2 จะเห็นได้ว่า APE ของกำลังผลิตและแรงดันจะมีค่าไม่เกิน 6 และ 4 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

จากผลการทดสอบโดยรวมจะเห็นได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียมทั้งสองมีความแม่นยำในการประมาณแรงดันได้ดีกว่าการประมาณกำลังผลิต และค่าที่ประมาณได้มีความผิดพลาดน้อย ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับผลลัพธ์จากการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม เพราะสมรรถนะการเรียนรู้ที่ดีที่สุดของโครงข่ายประสาทเทียม 1 และ 2 จะมีความผิดพลาดไม่เกิน 5 และ 6 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการฝึกสอนที่ใช้ข้อมูลจำนวนน้อย โดยความผิดพลาดในการประมาณแรงดันจะมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าความผิดพลาดในการประมาณกำลังผลิต

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการประมาณกำลังผลิตและแรงดันที่ได้จากระบบโฟโตโวลตาอิกซึ่งติดตั้งบนหลังคาอาคาร โครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอมีอินพุตเป็นการแปรผันของอุณหภูมิและอุณหภูมิแวดล้อมรอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการศึกษาพบว่า แต่ละระบบโฟโตโวลตาอิกจะได้โครงข่ายประสาทเทียมที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่นำเสนอจะถูกฝึกสอนโดยใช้ข้อมูลจำนวนน้อย แต่ผลการประมาณกำลังผลิตและแรงดัน ณ จุดทำงานจริงของระบบโฟโตโวลตาอิกภายใต้สภาวะแวดล้อมจริงจะมีความผิดพลาดน้อย โดยค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังผลิตและแรงดันมีค่าไม่เกิน 6 และ 4 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการทดสอบ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา คณะผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hiyama, T., and Kitabayashi, K. Neural network based estimation of maximum power generation from PV module using environmental information. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1997; 12(3): 241-247.
- [2] Taherbaneh, M., and Faez, K. Maximum power point estimation for photovoltaic systems using neural networks. *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Control and Automation*, 2007: 1614-1619.
- [3] Mellit, A., Saglam, S., and Kalogirou, S. A. Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module. *Renewable Energy*, 2013; 60: 71-78.
- [4] ดำรงค์ศักดิ์ วงศ์ตา, เชวศักดิ์ รักเป็นไทย, และ จงลักษณ์ พาหะชา. การประมาณการผลิตกำลังสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39, 2-4 พฤศจิกายน 2559; หน้า 065-068, จังหวัดเพชรบุรี.
- [5] Ding, M., Wang, L., and Bi, R. An ANN-based approach for forecasting the power output of photovoltaic system. *Procedia Environmental Sciences*, 2011; 11: 1318-1315.
- [6] Skoplaki, E., Boudouvis, A. G., and Palyvos, J. A. A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting. *Solar Energy Materials & Solar Cell*, 2008; 92(11): 1393-1402.
- [7] Sharp ND-250QCS (250W) Solar Panel, www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Sharp/2260/ND-250QCS/specification-data-sheet.html.Pdf



อิทธิพลความขรุขระของผนังที่มีต่อประสิทธิภาพการเติมอากาศ ของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้

การไหลหมุนควงปะทะผนัง

Wall Roughness Effect on Aeration Performance of Microbubble Generator using Swirl Flow Impinging on Wall

ศิริชัช สังขพันธ์ สมชาย แซ่อึ้ง และ ชยุต นันทดุษิต*

Sirachut Sangkapun, Somchai Sae-ung and Chayut Nuntadusit
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Hatyai, Songkhla, 90110, Thailand

*E-mail: chayut@me.psu.ac.th, Telephone Number: 6674-287035

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้หลักการสร้างการไหลหมุนควงของน้ำด้วยความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง โดยศึกษาผลของความขรุขระของผนังฟุ้งชนที่วางขวางการไหลของเจ็ทหมุนควงโดยใช้กระดาษทรายติดบนผนัง เพื่อช่วยลดขนาดของฟองอากาศที่ได้จากเครื่องกำเนิดฟองอากาศ โดยประสิทธิภาพการเติมอากาศสามารถวัดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำตามเวลาในถังเติมอากาศ พบว่าความขรุขระของผนังฟุ้งชนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติมอากาศของเครื่องกำเนิดฟองอากาศได้ เนื่องจากฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลงโดยกรณีผนังฟุ้งชนแบบเรียบจะมีประสิทธิภาพการเติมอากาศใกล้เคียงกับกรณีไม่ติดผนังฟุ้งชนและกรณีผนังฟุ้งชนติดกระดาษทรายเบอร์ 800 จะมีประสิทธิภาพการเติมอากาศสูงสุดซึ่งเพิ่มขึ้น 13.12% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ติดผนังฟุ้งชน

คำสำคัญ: ฟองอากาศขนาดเล็ก, ประสิทธิภาพการเติมอากาศ, การไหลหมุนควง, ความขรุขระ, ผนังฟุ้งชน

ABSTRACT

The purpose of this research is to improve the aeration performance of microbubble generator using swirl flow to shear the air to small bubbles. In this study, the wall roughness was applied to interrupt flow for decrease the size of bubbles from the generator. The effects of wall roughness were studied experimentally using sand paper. The aeration performance was evaluated from the concentration of oxygen adding to water in tank at different times. The result is found that the impingement wall with roughness can increase the aeration performance due to the generation of small bubble size, in case of smooth surface gave aeration performance be similar to case with no impingement wall and case of surface roughness which placed a sandpaper No. 800 gave the highest aeration performance with increasing 13.12% when compared to case with no impingement wall.

Keywords: Microbubble, Aeration performance, Swirling flow, Roughness pipe, Impingement wall

1. บทนำ

โรงบำบัดน้ำเสียเป็นสถานที่รวบรวมน้ำเสียจากกระบวนการในอุตสาหกรรม เข้าสู่กระบวนการกำจัดมลสารที่อยู่ในน้ำเสีย ให้มีคุณภาพดีขึ้นและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกระบายลงสู่แม่น้ำสาธารณะ หรือบางส่วนยังสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกครั้งโดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่หลายระบบ เช่น ระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกันที่ แบบบ่อปรับเสถียร แบบบ่อเติมอากาศ แบบบึงประดิษฐ์ แบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ แบบแผ่นจานหมุนชีวภาพ และแบบคลองวนเวียน เป็นต้น

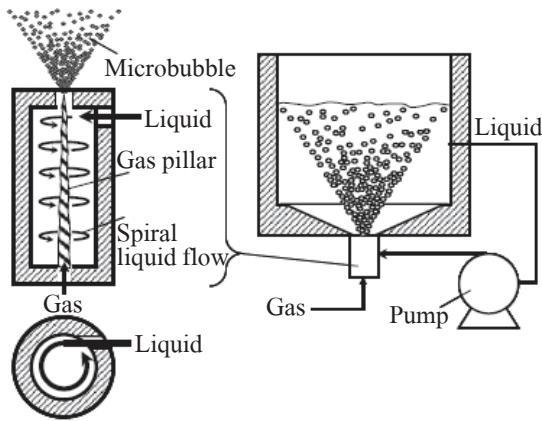
ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีค่าลงทุนก่อสร้างต่ำและมีประสิทธิภาพของระบบสูง สามารถรับการเพิ่มภาระมลพิษอย่างกระทันหัน (Shock Load) ได้ดี มีภาคตะกอนและกลิ่นเหม็นเกิดขึ้นน้อย การดำเนินการและการบำรุงรักษาง่าย สามารถบำบัดได้ทั้งน้ำเสียชุมชนและน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้อาศัยการเติมออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศ (Aerator) เพื่อเพิ่มออกซิเจนในน้ำให้มีปริมาณเพียงพอสำหรับจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เร็วขึ้นกว่าการปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียในรูปของค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ได้ร้อยละ 80-95 โดยอาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) โดยเครื่องเติมอากาศนอกจากจะทำหน้าที่เพิ่มออกซิเจนในน้ำแล้วยังทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำในบ่อ ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง แต่ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อเติมอากาศจะมีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่ายในส่วนของการใช้กระแสไฟฟ้าสำหรับเครื่องเติมอากาศที่ค่อนข้างสูง [1]

เครื่องเติมอากาศที่ใช้ในปัจจุบันมี 4 แบบคือ เครื่องเติมอากาศที่ผิวหน้า เครื่องเติมอากาศแบบเทอร์ไบน์ เครื่อง

เติมอากาศใต้น้ำ และเครื่องเติมอากาศแบบเจ็ท โดยเครื่องเติมอากาศแบบเจ็ทที่มีการเติมฟองอากาศในน้ำ ใช้ใบพัดหมุนตีอากาศที่ไหลออกจากท่อใต้น้ำ ซึ่งทำให้ฟองอากาศมีขนาดเล็กและมีปริมาณฟองอากาศมาก เป็นผลให้มีประสิทธิภาพในการเติมอากาศแก่น้ำสูงกว่าเครื่องเติมอากาศแบบอื่น อย่างไรก็ตามฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ลอยสู่ผิวน้ำอย่างรวดเร็วทำให้ไม่สามารถถ่ายโอนออกซิเจนสู่น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยปกติอัตราการถ่ายโอนออกซิเจนในน้ำจะขึ้นอยู่กับพื้นที่สัมผัสระหว่างฟองอากาศกับน้ำโดย คุณสมบัติของฟองอากาศขนาดเล็กจะดับไครอนจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สกับของเหลวที่มาก มีความเร็วในการลอยตัวของฟองสู่ผิวน้ำที่ต่ำ ทำให้สามารถลอยตัวอยู่ในของเหลวได้นาน และมีอัตราการละลายตัวของอากาศในของเหลวที่สูง เมื่อเทียบกับฟองอากาศขนาดใหญ่ หากสามารถลดขนาดฟองอากาศที่ได้จากเครื่องเติมอากาศและเพิ่มจำนวนฟองอากาศให้มากขึ้นได้ จะทำให้อัตราการถ่ายโอนออกซิเจนสูงขึ้น มีผลให้ประสิทธิภาพการเติมอากาศในน้ำสูงขึ้น สามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องเติมอากาศลงได้

การเติมอากาศลงในน้ำโดยใช้ฟองอากาศขนาดเล็กระดับไมครอนได้มีการพัฒนารูปแบบหัวฉีดและหลักการในการสร้างฟองอากาศในหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น วิธีการใช้การไหลหมุนควงของน้ำตัดย่อยฟองอากาศ [2] วิธีนี้น้ำจากปั๊มถูกบังคับไหลผ่านท่อที่ต่อเข้ากับท่อทรงกระบอกในแนวสัมผัส เพื่อสร้างกระแสให้น้ำไหลวนภายในท่อทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 1 อากาศภายนอกจะถูกดึงเข้าผ่านกลางกระแสไหลวน มาเนื่องจากความดันภายในท่อทรงกระบอกต่ำกว่าความดันภายนอก ที่ปากทางออกของท่อทรงกระบอก ฟองอากาศจะถูกคัดเนื่องด้วยกระแสไหลวนของน้ำที่หมุนวนด้วยความเร็วสูง เกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก วิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถสร้างฟองแก๊สที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากได้ และสามารถควบคุมขนาดของฟองแก๊สได้ง่าย เพียงควบคุมความเร็วของของเหลวและอัตราการไหลเข้าของอากาศ



รูปที่ 1 โครงสร้างการไหลที่เกิดขึ้นภายในตัวกำเนิด
ฟองอากาศแบบใช้การไหลหมุนควงของของเหลว [2]

วิธีการใช้การไหลของน้ำผ่านแบบท่อเวนทูรี [3,4] วิธีนี้เป็นการเร่งความเร็วการไหลของกระแสน้ำโดยการลดพื้นที่หน้าตัดของช่องการไหลให้มีขนาดเล็กลง โดยที่ตำแหน่งคอขวดที่ท่อมีพื้นที่หน้าตัดเล็กที่สุด อากาศจากภายนอกจะถูกดูดเข้ามา ในขณะที่น้ำไหลผ่านท่อเวนทูรีในส่วนขยายหน้าตัด ฟองอากาศที่ผสมอยู่ในน้ำจะถูกกระแสน้ำที่มีความเร็วสูงไหลเนียนัดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กไม่ครอน วิธีการใช้ท่ออีเจกเตอร์ [5] วิธีการนี้เป็นการใช้เจ็ทหรือลำน้ำไหลผ่านท่อที่มีการลดและขยายหน้าตัด โดยที่ลำน้ำจะดึงอากาศเข้าไปผสมไหลผ่านในส่วนท่อคอขวด ระหว่างที่ไหลผ่านท่อคอขวดจะเกิดปรากฏการณ์โพรงอากาศขึ้น ทำให้ฟองอากาศเกิดการแตกตัวเป็นฟองระดับไมครอนได้ วิธีอัดอากาศด้วยความดันสูงและลดความดันกะทันหัน [6] วิธีนี้อากาศจะถูกอัดด้วยความดันสูงภายในถังอัดจนอากาศละลายในน้ำถึงสภาวะอิ่มตัว ฟองอากาศระดับไมครอนจะเกิดขึ้นเมื่อปล่อยน้ำที่ความดันอิ่มตัวผ่านวาล์วลดความดัน สุดท้ายเป็นวิธีการอัดน้ำผ่านวัสดุพรุน [6] ทำได้โดยการอัดอากาศผ่านวัสดุที่มีรูพรุนจะทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กขึ้นได้ โดย Tarasaka และคณะ [7] ได้ทดสอบใช้เครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กทุกรูปแบบที่กล่าวมาเติมอากาศลงในน้ำ และเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่เงื่อนไขอัตราการไหลของอากาศเดียวกัน พบว่าเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก

แบบสร้างการไหลหมุนควงของน้ำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนและอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสูงกว่าวิธีการทั้งหมดที่ได้ทดสอบ

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่สนใจศึกษาเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบสร้างการไหลหมุนควง เนื่องจากเป็นวิธีที่อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กด้วยวิธีนี้ เช่น Ohnari และคณะ [8] ได้ทดสอบรูปแบบของท่อหลักที่ใช้ในเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบสร้างการไหลหมุนควงของน้ำซึ่งเป็นแบบท่อทรงกรวยที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดตลอดความยาว เปรียบเทียบกับท่อแบบทรงกระบอกซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันตลอดความยาว โดยท่อทั้งสองรูปแบบจะให้น้ำขนาดและปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กที่ใกล้เคียงกัน แต่ท่อแบบทรงกระบอกมีความซับซ้อนในการผลิตน้อยกว่าท่อแบบทรงกรวย ต่อมา Ohanari และคณะ [9] ได้คิดค้นวิธีการเพิ่มปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กที่ได้จากเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กแบบสร้างการไหลหมุนควงที่มีลักษณะท่อหลักเป็นแบบทรงกระบอก และลดพื้นที่หน้าตัดทางออกด้วยการนำแผ่นกั้นมาปิดบริเวณปากทางออกครึ่งหนึ่ง และทดสอบนำแผ่นผนังมาวางไว้หน้าปากทางออกของน้ำโดยมีระยะห่างจากปากทางออกของท่อน้ำเพียงเล็กน้อย พบว่าวิธีนี้สามารถเพิ่มปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กได้

Tabei และคณะ [10] ได้ศึกษาผลของขนาดปากทางออกของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กชนิดสร้างการไหลหมุนควงของน้ำโดยการลดขนาดปากทางออกลงซึ่งเดิมจะมีขนาดปากทางออกที่เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหลัก พบว่าเมื่อช่องทางออกของน้ำจากเครื่องกำเนิดฟองอากาศมีขนาดเล็กลงจะทำให้ความเร็วในการไหลหมุนควงของน้ำภายในท่อหลักมีความเร็วที่สูงขึ้นซึ่งจะมีผลให้แรงเฉือนในการตัดย่อยฟองอากาศของน้ำที่มากขึ้นตามไปด้วย

Matsuzaki และคณะ [11] ได้ศึกษาผลของการติดตั้งท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับปากทางออก

ของเครื่องกำเนิดฟองอากาศให้มีความยาวขึ้นเข้าไปภายในท่อหลักพบว่าสามารถเพิ่มความเร็วในการไหลหมุนวนของกระแสในภายในท่อที่ขึ้นเข้าไป จะเป็นผลให้น้ำมีแรงเฉือนในการตัดย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลงได้

Sangkapun และคณะ [12, 13] ได้ศึกษาผลของการติดตั้งท่อบังคับการไหลในท่อหลักของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กชนิดสร้างการไหลหมุนวนของน้ำ โดยศึกษาผลของขนาดท่อบังคับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าหรือเท่ากับปากทางออกของท่อหลัก และมีความยาวต่างกัน ท่อบังคับนี้ติดตั้งซ่อนภายในท่อหลักสวมทับกับปากทางออก จากการศึกษาพบว่าท่อบังคับการไหลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับปากทางออก และมีความยาว 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อบังคับ จะให้ขนาดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กลงและให้ปริมาณฟองอากาศที่มาก เป็นผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนลงในน้ำสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้งท่อบังคับการไหล

อย่างไรก็ตามวิธีใช้การไหลหมุนวนตัดย่อยฟองอากาศนั้น จำเป็นต้องใช้ปั๊มที่มีกำลังสูงเพื่อสร้างการไหลหมุนวนที่มีความเร็วสูงตัดย่อยฟองอากาศขนาดเล็ก เนื่องจากมีการสูญเสียความดันในระบบค่อนข้างสูง ทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานเติมออกซิเจนในบ่อเดิมอากาศเพื่อบำบัดน้ำเสีย จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพของการเติมออกซิเจนให้สูงขึ้นจนสามารถนำไปใช้งานแทนเครื่องเติมอากาศแบบเดิมที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความขรุขระของผนังฟุ้งชนที่วางขวางการไหลของเจ็ทหมุนวนที่ตัดย่อยฟองอากาศ เนื่องจากการไหลหมุนวนจะปะทะพื้นผิวที่มีความขรุขระ ทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างน้ำผสมฟองอากาศและผนังฟุ้งชนที่มีความขรุขระ มีผลให้ฟองอากาศที่ได้มีขนาดเล็กลงและมีผลให้ประสิทธิภาพในการเติมออกซิเจนในน้ำเพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเติมอากาศที่ใช้หลักการสร้างการไหลหมุนวนด้วยความเร็ว

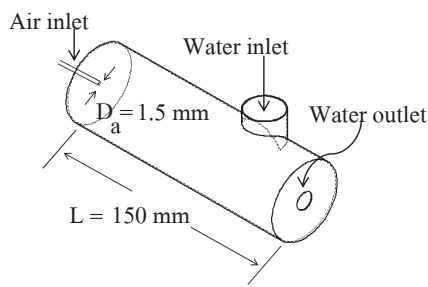
สูงตัดย่อยฟองอากาศให้มีขนาดเล็กลง โดยการศึกษาผลของความขรุขระของผนังฟุ้งชน

2. ชุดหัวฉีดสร้างฟองอากาศและชุดทดลอง

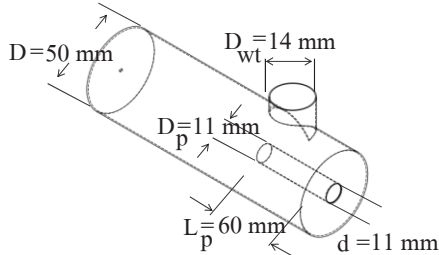
2.1 รายละเอียดหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก

รูปที่ 2 แสดงรูปแบบท่อหัวฉีดที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ แบบท่อหลักเป็นท่อทรงกระบอก แบบท่อหลักเป็นท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลด้านใน และท่อหลักเป็นท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับการไหลด้านในและติดตั้งผนังฟุ้งชนด้านหน้าทางออกการไหลหมุนวน โดยชุดหัวฉีดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กทุกรูปแบบมีท่อหลักเป็นทรงกระบอก ทำจากท่ออะคริลิกใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D=50\text{ mm}$ ยาว $L=150\text{ mm}$ เพื่อให้เห็นการไหลของอากาศภายในท่อหลัก และมีท่อทางน้ำเข้าเป็นท่ออะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D_w=14\text{ mm}$ ประกอบในแนวสัมผัสกับท่อหลัก เพื่อให้เกิดการไหลหมุนวนของน้ำในท่อหลัก สำหรับทางเข้าอากาศได้เจาะรูขนาดเล็กและต่อกับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D_a=1.5\text{ mm}$ ที่ตำแหน่งศูนย์กลางบนฝาปิดท้ายของท่อหลัก และทางออกของท่อหลักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $d=11\text{ mm}$ อยู่กลางฝาปิดทางด้านหน้าของท่อหลัก โดยฝาปิดด้านหน้าและด้านหลังทำจากแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 10 mm

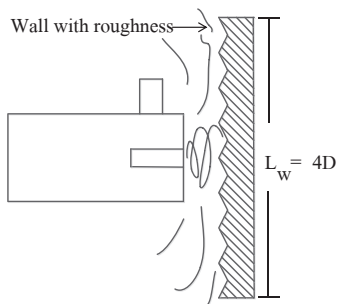
สำหรับในกรณีติดตั้งท่อบังคับการไหลในท่อหลักใช้ท่อทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน $D_p=11\text{ mm}$ ความยาว $L_p=60\text{ mm}$ ติดที่ด้านในของฝาหน้าด้านทางออกของการไหล เพื่อเพิ่มความเร็วในการไหลหมุนวนของน้ำให้เพิ่มขึ้น อีกทั้งในกรณีวางผนังฟุ้งชนขวางการไหลวนที่ไหลออกจากท่อหลักโดยมีระยะห่างจากปากทางออก 3 cm (ซึ่งเป็นระยะที่ให้ขนาดฟองอากาศที่เล็กที่สุดและปริมาณฟองอากาศมากที่สุดจากการศึกษาที่ระยะห่าง 2, 3, 5, 7, และ 9 cm [13]) ในกรณีศึกษาผลของความขรุขระบนผนังฟุ้งชน ได้ใช้กระดาษทรายเบอร์ที่มีความขรุขระแตกต่างกันติดบนผนังฟุ้งชนที่การไหลหมุนวนปะทะ



(ก) ท่อหลักเป็นท่อทรงกระบอก



(ข) ท่อหลักเป็นท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับ
การไหลด้านใน



(ค) ท่อหลักเป็นท่อทรงกระบอกติดตั้งท่อบังคับ
การไหลด้านในและติดตั้งผนังพุงชนด้านหน้าทางออก
การไหลหมุนควง

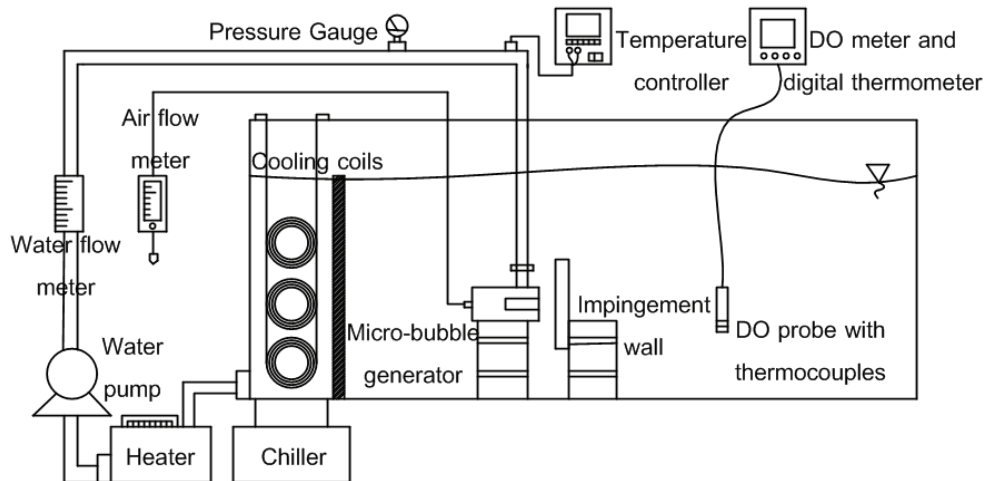
รูปที่ 2 รูปแบบท่อหัวฉีดที่ใช้ในการศึกษา

2.2 รายละเอียดของชุดทดลอง

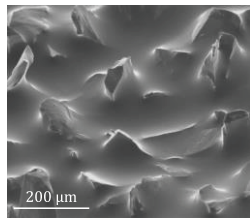
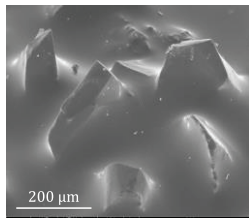
รูปที่ 3 แสดงแผนภาพชุดทดลองและการติดตั้งเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำของตัวสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก จากรูปตู้ที่ใช้ศึกษาทำจากกระจกใส มีขนาดกว้าง 46 cm ยาว 92 cm และสูง 46 cm ในการทดลองเติมน้ำที่ระดับความสูง 40 cm คิดเป็นปริมาตรน้ำในตู้เท่ากับ 190 ลิตร ในการทดลองใช้ปั๊มน้ำขนาด 2 แรงม้า สำหรับหมุนเวียนน้ำในตู้ไปยังตัวสร้าง

ฟองอากาศ โดยน้ำที่ออกจากปั๊มน้ำจะไหลผ่านวาล์วและโรตารีเพื่อควบคุมและวัดอัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าท่อหลัก ภายในตู้จะใช้หลักการนำเส้นเพื่อแบ่งน้ำบางส่วนไว้สำหรับเป็นส่วนลดอุณหภูมิน้ำด้วยคอยล์ทองแดงที่มีน้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็น ไหลวนภายใน หลังจากนั้นน้ำจะถูกดูดผ่านท่อไปยังถังควบคุมอุณหภูมิที่ติดตั้งฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ก่อนไหลเข้าสู่ปั๊มน้ำ

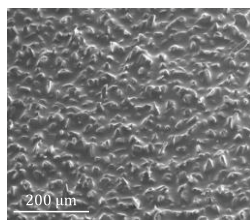
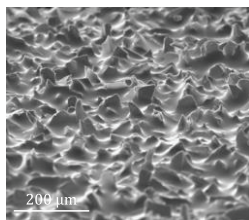
สำหรับอากาศที่ไหลเข้าสู่ท่อหลักโดยอาศัยผลต่างความดันภายในและภายนอกของท่อหลักซึ่งอากาศภายนอกจะไหลผ่านวาล์วและโรตารีสำหรับควบคุมและวัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าท่อหลัก และผนังพุงชนที่เจ็ทหมุนควงไหลปะทะทำจากแผ่นอะคริลิกใส มีขนาดกว้างและยาว 200 mmหนา 10 mm สำหรับการศึกษาผลของระดับความขรุขระบนผนังพุงชนในการศึกษาใช้กระดาดทรายเบอร์ 80 220 400 800 และ 1,200 คิดบนผิวของผนังพุงชน โดยรูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวผนังพุงชนแบบขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ต่างๆ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM-Quanta 01) กระดาดทรายเบอร์ 80 มีขรุขระหรือหยาบมากที่สุด และกระดาดทราย เบอร์ 220 400 800 และ 1,200 มีความละเอียดเพิ่มขึ้นตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองสามารถสรุปได้แสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายขณะเดินเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก



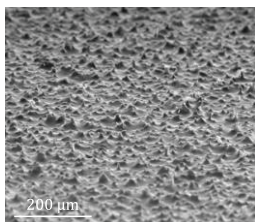
รูปที่ 3 แผนภาพชุดทดลองและลักษณะการติดตั้งเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก
ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจนในน้ำ



(ก) กระดาษทรายเบอร์ 80 (ข) กระดาษทรายเบอร์ 220

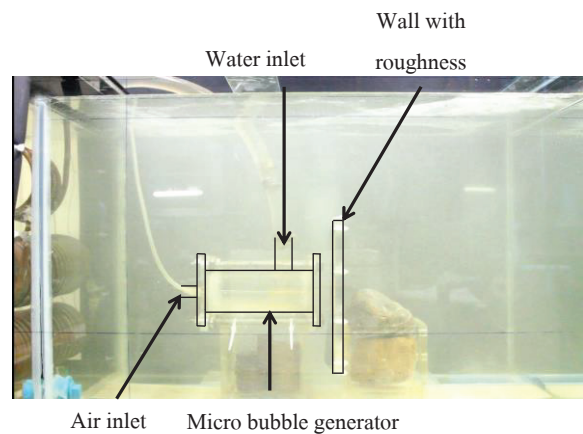


(ค) กระดาษทรายเบอร์ 400 (ง) กระดาษทรายเบอร์ 800



(จ) กระดาษทรายเบอร์ 1,200

รูปที่ 4 ภาพถ่ายพื้นผิวผนังฟุ้งชนแบบขรุขระของกระดาษ
ทรายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด



รูปที่ 5 ภาพถ่ายชุดทดลองขณะเดินเครื่องกำเนิด
ฟองอากาศขนาดเล็ก

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

อัตราการไหลน้ำ	35 ลิตรต่อนาที
อัตราการไหลอากาศ	0.1 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิน้ำขณะทดลอง	29.5 ± 0.5 °C
เบอร์ผนังฟุ้งชนติดกระดาษ ทราย	ไม่มีผนัง ผนังแบบเรียบ ผนังติดกระดาษทรายเบอร์ 80 ผนังติดกระดาษทรายเบอร์ 220 ผนังติดกระดาษทรายเบอร์ 400 ผนังติดกระดาษทรายเบอร์ 800 ผนังติดกระดาษทรายเบอร์ 1,200

3. การศึกษาอัตราการเติมออกซิเจนในน้ำ

การศึกษ้อัตราการเติมออกซิเจนในน้ำ เริ่มต้นจากการลดปริมาณออกซิเจนในน้ำโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี หลังจากนั้นจะใช้ตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กเติมออกซิเจนลงในน้ำ และวัดปริมาณออกซิเจนในน้ำที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยเครื่อง Dissolver Oxygen Meter (DO meter) ของบริษัท EXTECHZ รุ่น DO700 มีความแม่นยำ ± 0.10 mg/l เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำขึ้นอยู่กับค่าความดัน อุณหภูมิและความเข้มข้นของเกลือในน้ำ [14] ดังนั้นในระหว่างการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ที่ 29.5 ± 0.5 °C

สำหรับการลดออกซิเจนในน้ำก่อนเริ่มการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมตัวแปรออกซิเจนในน้ำให้มีค่าใกล้เคียง 0 mg/l ทุกการทดลองก่อนการเพิ่มออกซิเจนด้วยตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก ในการลดค่าออกซิเจนในน้ำสามารถทำได้โดยการเติมสาร Sodium Sulfite (Na_2SO_4) และ Cobalt Chloride (CoCl_2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองเริ่มจากกรองน้ำประปาใส่ตู้น้ำให้ได้ปริมาตร 190 ลิตร แล้วจึงลดออกซิเจนโดยการเติมสารเคมีและเดินเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่อัตราการไหลของน้ำและอากาศตามที่กำหนด บันทึกค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำทุก 10 นาที โดยจุ่มหัววัดออกซิเจนลงไปใต้น้ำที่ความลึก 30 cm จากผิวน้ำ (ระดับเดียวกับตัวกำเนิด) นำค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำจากการบันทึก คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนในน้ำต่อไป

4. สมการที่ใช้ในการคำนวณ

ในการประเมินความสามารถในการเติมออกซิเจนโดยเครื่องกำเนิดฟองอากาศ ในงานวิจัยนี้ใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนซึ่งคำนวณจาก

$$K_L a = 2.303 \left(\frac{\log(C_s - C_t)_1 - \log(C_s - C_t)_2}{t_2 - t_1} \right) \quad (1)$$

ในที่นี้ t คือเวลา หน่วยเป็น S และ C_t คือค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำเวลาต่างๆ หน่วยเป็น mg/l สำหรับ C_s คือค่าออกซิเจนที่ละลายในอิมิต์ที่อุณหภูมิน้ำระหว่างการทดลอง หน่วยเป็น mg/l คำนวณได้โดยใช้สมการ

$$C_s(T) = 14.652 + 10.53(e^{-0.03896T} - 1) \quad (2)$$

โดยที่ T คืออุณหภูมิที่อยู่ในช่วงทดลอง มีหน่วยเป็น °C โดยทั่วไปแล้วจะทำการเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำ 20 °C โดยใช้สมการ

$$K_L a_{20^\circ C} = \frac{K_L a}{1.024^{(T-20)}} \quad (3)$$

ความสามารถการเติมออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องเติมอากาศ ในกรณีที่ใช้เครื่องเติมอากาศแบบเติมอากาศได้ผิวน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$OC = K_L a_{20^\circ C} \left(C_s(20^\circ C) \frac{P + 73.53h - p}{760 - p} \right) V \quad (4)$$

โดยที่ P คือความดันบรรยากาศบริเวณที่เติมอากาศมีหน่วยเป็น $mmHg$, h คือความลึกจากผิวน้ำจนถึงหัวเติมอากาศ หน่วยเป็น m , p คือ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 20 °C หน่วยเป็น $mmHg$ และ V คือ ปริมาตรของถังเติมอากาศหน่วยเป็น l

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากความสามารถในการเติมออกซิเจนหารด้วยกำลังงานที่ใช้กับเครื่องเติมอากาศ ดังสมการ

$$R_0 = \frac{OC}{P} \quad (5)$$

โดยที่ P คือ กำลังงานที่ใช้ในการเติมออกซิเจน หน่วยเป็น kW ในการทดลองที่สภาวะเงื่อนไขข้างต้น สามารถคำนวณหาลำกำลังงานของของไหลที่ไหลผ่านตัวกำเนิดฟองอากาศ ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \Delta E &= \dot{E}_1 - \dot{E}_2 \\
 &= \dot{m}(e_1 - e_2) \\
 &= \dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho_w} - \frac{P_2}{\rho_w} + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right)
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

ในที่นี้ $\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหน่วยเป็น kg/s , $P_1 - P_2$ คือผลต่างความดันที่ปากทางน้ำเข้า หน่วยเป็น N/m^2 , ρ คือความหนาแน่นของน้ำหน่วยเป็น kg/m^3 , V_1 และ V_2 คือความเร็วที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องสร้างฟองอากาศตามลำดับหน่วยเป็น m/s

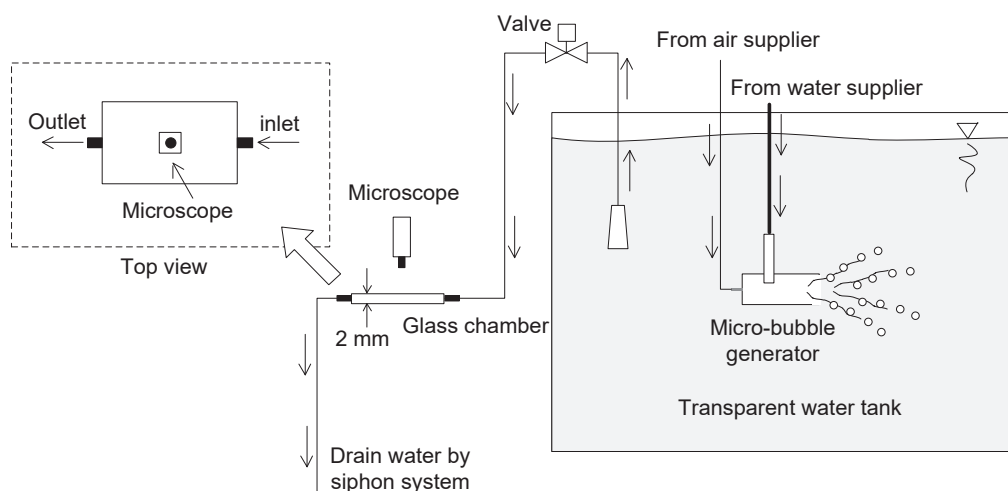
สุดท้ายประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องสร้างฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = \frac{OC}{A} \times 100 \quad (7)$$

โดย A คือ ปริมาณออกซิเจนที่เติมลงไปใต้น้ำ ณ สภาวะมาตรฐานหน่วยเป็น $mg - O_2 / hr$ โดยทั่วไปปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในอากาศต่อ 1 หน่วยลูกบาศก์เมตรมีค่า $282,900 \text{ } mg - O_2 / m^3$

5. การวัดขนาดฟองอากาศจากตัวกำเนิด

เนื่องจากขนาดฟองอากาศที่ออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กจะมีผลต่อประสิทธิภาพการเติมออกซิเจนในน้ำ จึงเป็นที่มาของการเปรียบเทียบขนาดฟองในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง รูปที่ 11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดขนาดฟองอากาศ โดยน้ำในตู้ น้ำเดิมอากาศจะถูกดูดไหลผ่านวาล์วและไหลเข้าห้องกักที่ทำการกระเจกมีรูทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 120 mm ยาว 160 mm และสูง 2 mm โดยด้านบนของห้องกักได้ติดตั้งกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1,000 เท่า เพื่อถ่ายภาพฟองอากาศ สำหรับน้ำที่ไหลออกจากห้องกักจะปล่อยกลับสู่ตู้ น้ำเดิมอากาศในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างจะดูดน้ำที่กำลังเติมฟองอากาศให้ไหลผ่านอุปกรณ์โดยใช้วิธีกลักน้ำ หลังจากทีน้ำและฟองอากาศไหลผ่านอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องก็จะปิดวาล์วแล้วถ่ายภาพตัวอย่างฟองอากาศที่ติดค้างอยู่ในห้องกักโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital USB Microscope Aopute H1000X 5.0 Mega Pixel) และนำภาพไปหาขนาดของฟองอากาศเฉลี่ยโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ภาพ (Image processing method) ต่อไป



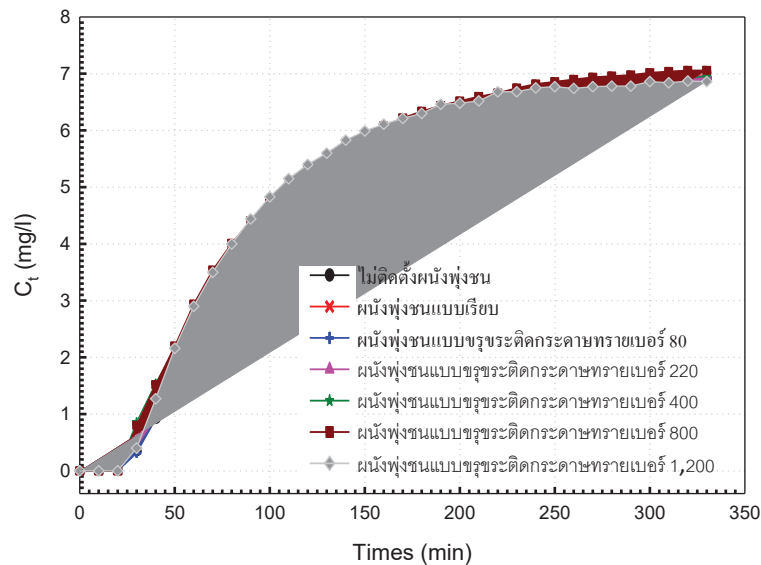
รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้วัดขนาดฟองอากาศ

6. ผลการทดลอง

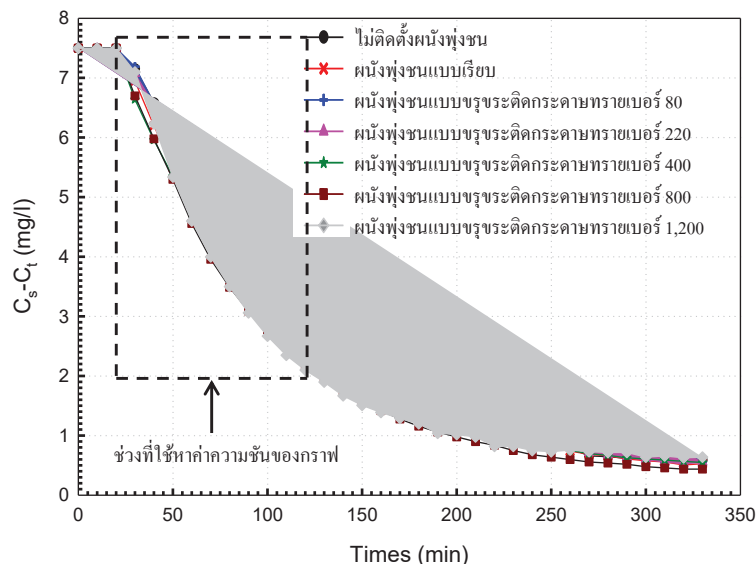
6.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน (K_La)

รูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำที่เติมออกซิเจนด้วยเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีระดับความขรุขระต่างกัน โดยใช้เครื่องวัดความเข้มข้นออกซิเจนวัดที่เวลาต่าง ๆ

โดยทุกเงื่อนไขการทดลองความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำเริ่มต้นที่ประมาณ 0 mg/l ในช่วงแรกระดับความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 200 นาที อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำเริ่มลดลง จนสุดท้ายความเข้มข้นของออกซิเจนจะเริ่มคงที่ที่ประมาณ 7 mg/l



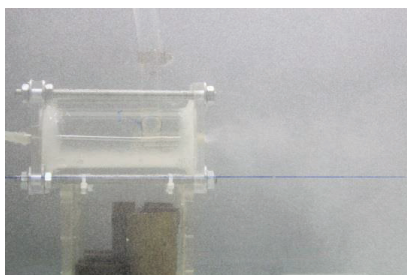
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำที่เติมออกซิเจนด้วยเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีระดับความขรุขระต่างกัน (อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ $29.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$)



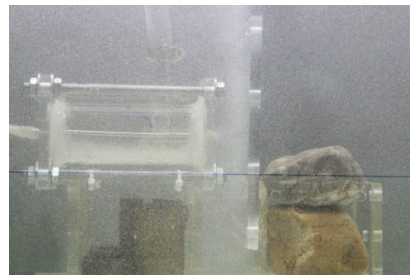
รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของผลต่างความเข้มข้นอิ่มตัวกับความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำที่เติมออกซิเจนด้วยเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีระดับความขรุขระต่างกัน (อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ $29.5 \pm 0.5^\circ\text{C}$)

จากรูปที่ 7 พบว่าค่าความเข้มข้นของออกซิเจนในกรณีของผนังฟุ้งชนที่มีความขรุขระน้อยที่เงื่อนไขผนังฟุ้งชนติดกระดาษทรายเบอร์ 800, 1,200 และ 400 เทียบที่เวลาเดียวกันจะมีค่าความเข้มข้นออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำสูงกว่ากรณีผนังฟุ้งชนแบบเรียบและแบบไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน และพบว่าค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงเมื่อผนังฟุ้งชนมีความขรุขระมากในกรณีที่ติดกระดาษทรายเบอร์ 220 และ 80 เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน เนื่องจากเมื่อฟองอากาศไหลออกจากตัวกำเนิดฟองอากาศแล้วปะทะกับผนังฟุ้งชนทำให้เกิดแรงเฉือนทำกับฟองอากาศ ซึ่งขนาดของแรงเฉือนตัดฟองอากาศจะขึ้นอยู่กับความขรุขระบนพื้นผิวของกระดาษทรายที่ติดบนผนังฟุ้งชน โดยสังเกตได้ว่าพื้นผิวผนังฟุ้งชนที่มีความขรุขระ

น้อยกว่าจะทำให้ฟองอากาศที่เข้ามาปะทะพื้นผิวเกิดการแตกย่อยอย่างรวดเร็วและกระจายออกทันที ต่างจากพื้นผิวผนังฟุ้งชนที่มีความหยาบมากจะมีช่องว่างระหว่างผิวขรุขระมากทำให้ฟองอากาศเข้าไปกระจุกตัวเกิดการรวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของผลต่างความเข้มข้นอิมิตัวกับความเข้มข้นออกซิเจนในน้ำที่เดิมออกซิเจนด้วยเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีระดับความขรุขระต่างกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนคำนวณจากตามสมการที่ (1) และ (2) โดยรูปที่ 9 แสดงลักษณะการเกิดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองอากาศที่ไม่ติดตั้งผนังฟุ้งชนและติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีระดับความหยาบต่างกัน



(ก) กรณีไม่ติดตั้งผนังฟุ้งชน

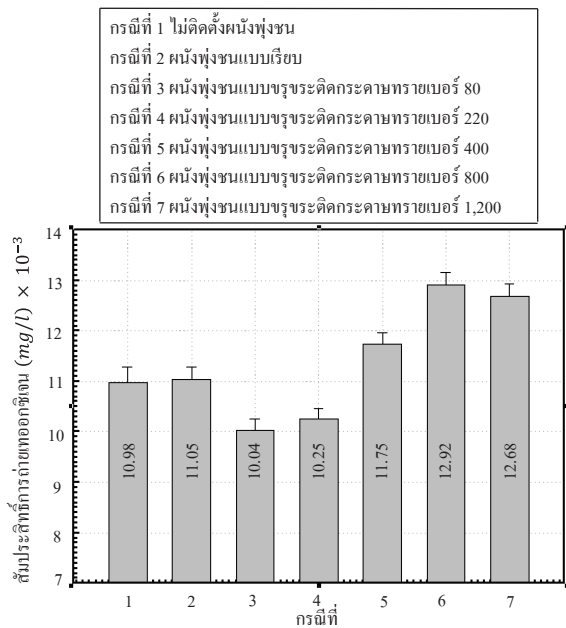


(ข) กรณีติดตั้งผนังฟุ้งชน

รูปที่ 9 ลักษณะการเกิดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองอากาศที่ไม่ติดตั้งผนังฟุ้งชนและติดตั้งผนังฟุ้งชน

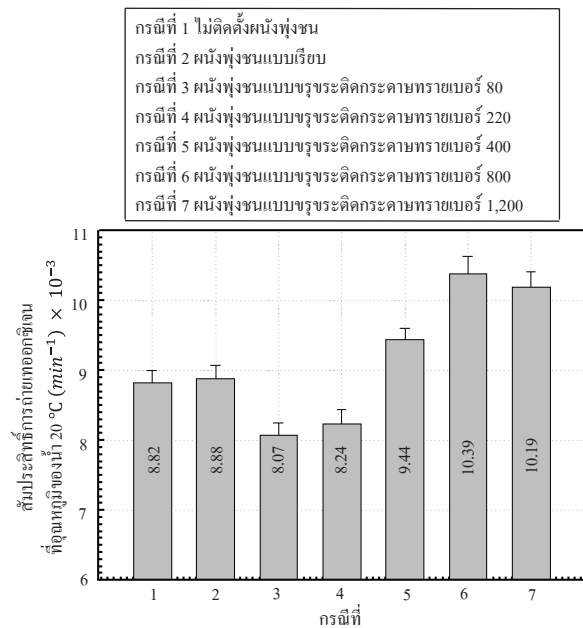
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละกรณี จำนวนที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 29.5°C และในรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิของน้ำมาตรฐานที่ 20°C โดยใช้สมการที่ (3) ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนต่อไป จากรูปที่ 11 พบว่าการติดตั้งผนังฟุ้งชนแบบผิวเรียบให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ติดตั้งผนังฟุ้งชน และพบว่ากระดาษทรายเบอร์ 400, 800 และ 1,200 สามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนให้สูงขึ้นตามลำดับ (สูงกว่ากรณีไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน) โดยที่กระดาษทรายเบอร์ 1,200 จะมีความหยาบของผิวละเอียดกว่ากระดาษทรายเบอร์ 400

และ 800 ในขณะที่กรณีของผนังฟุ้งชนที่กระดาษทรายเบอร์ 80 และ 220 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน แต่ต่ำกว่ากรณีไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละกรณี (อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 29.5±0.5 °C)

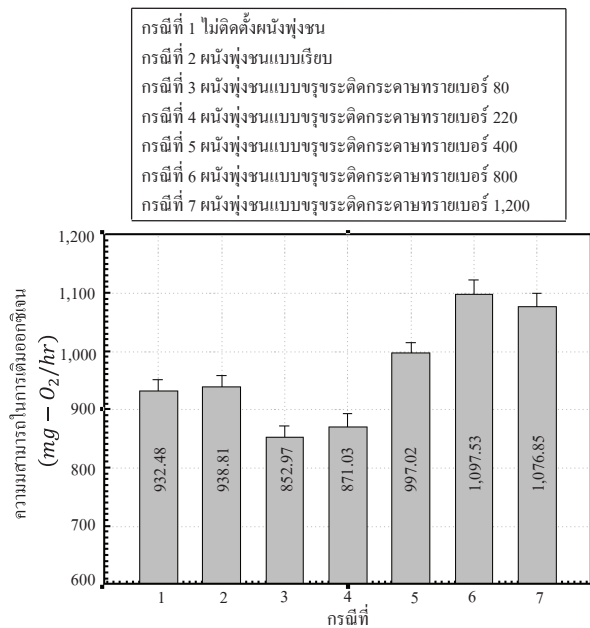
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละกรณี ค่าเวลาที่อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ 29.5 °C และในรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่อุณหภูมิมาตรฐานของน้ำที่ 20 °C โดยใช้สมการที่ (3) ซึ่งจะนำไปใช้คำนวณความสามารถในการเติมออกซิเจนต่อไป จากรูปที่ 11 พบว่าการติดตั้งพ่นฟุ้งชนแบบผิวเรียบให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่ติดตั้งพ่นฟุ้งชน และพบว่าการติดกระดาดทรายเบอร์ 400, 800 และ 1,200 สามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนให้สูงขึ้นตามลำดับ (สูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งพ่นฟุ้งชน) โดยที่กระดาดทรายเบอร์ 1,200 จะมีความหยาบของผิวละเอียดกว่ากระดาดทรายเบอร์ 400 และ 800 ในขณะที่กรณีของพ่นฟุ้งชนที่กระดาดทรายเบอร์ 80 และ 220 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน แต่ต่ำกว่ากรณีไม่ติดตั้งพ่นฟุ้งชน



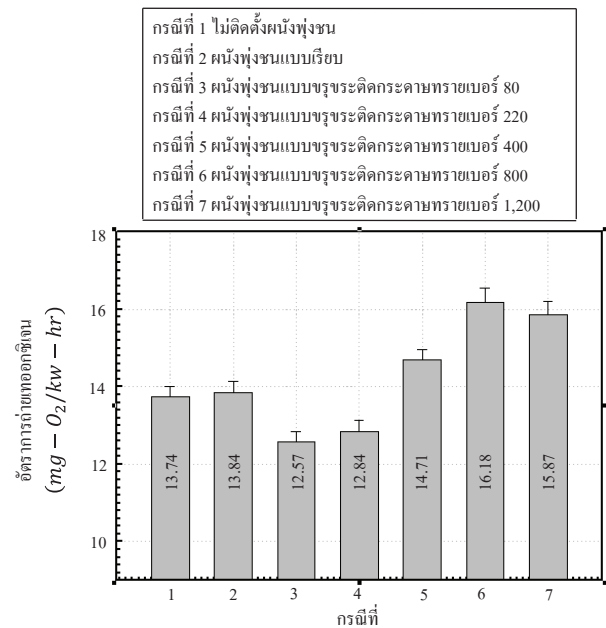
รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละกรณีที่เงื่อนไขอุณหภูมิของน้ำ 20 °C

6.2 ความสามารถในการเติมออกซิเจน (°C)

ความสามารถในการเติมออกซิเจนขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดฟองอากาศ ในกรณีที่ใช้เครื่องกำเนิดฟองอากาศแบบเติมอากาศใต้ผิวน้ำจะใช้สมการ (4) ในการคำนวณ ซึ่งความดันบรรยากาศบริเวณที่ใช้ในการทดลอง $P = 760 \text{ mmHg}$ คิดตั้งที่ระดับความลึกจากผิวน้ำจนถึงเครื่องกำเนิดฟองอากาศ $h = 0.3 \text{ m}$ และความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 20 °C มีค่า $p = 17.5 \text{ mmHg}$ และปริมาตรของน้ำในตู้ที่ใช้ในการเติมอากาศมีปริมาตรของน้ำเท่ากับ $V = 1901$ สำหรับค่าออกซิเจนอิ่มตัวที่อุณหภูมิของน้ำ 20 °C สามารถคำนวณได้จากสมการ (2) จะได้ $C_{S(20)} = 8.9529 \text{ mg/l}$ โดยรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการเติมออกซิเจนของแต่ละกรณี ซึ่งได้จากการคำนวณตามสมการ (4) ตามเงื่อนไขการติดตั้งเครื่องกำเนิดฟองอากาศ



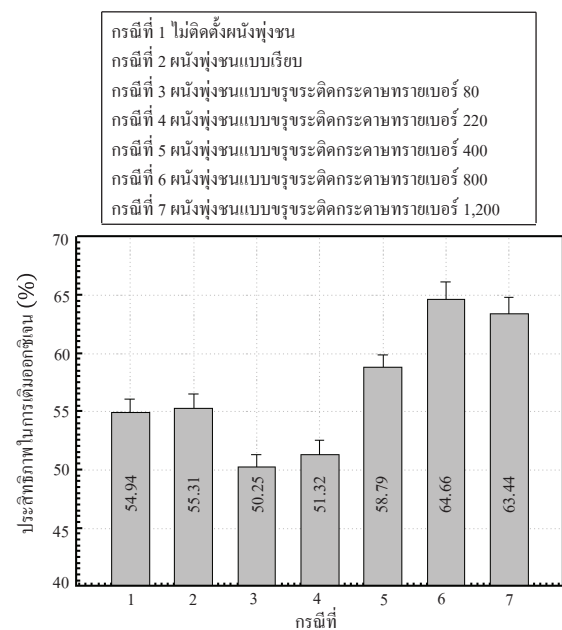
รูปที่ 12 การเปรียบเทียบความสามารถในการเติมออกซิเจนของแต่ละกรณี



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละกรณี

6.3 อัตราการถ่ายเทออกซิเจน (R_0) และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน (E)

อัตราการถ่ายเทออกซิเจนสามารถคำนวณได้จากค่าความสามารถในการเติมออกซิเจนและพลังงานที่ใส่ให้กับเครื่องกำเนิดฟองอากาศ โดยคำนวณจากสมการที่ (5) ในการทดลองที่สภาวะเงื่อนไขข้างต้นสามารถคำนวณหา กำลังงานจากของไหลที่ไหลผ่านตัวกำเนิดฟองอากาศได้จากสมการที่ (6) โดยพลังงานของของไหลที่ไหลผ่านคิดเป็น 67.85 Watt และประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของเครื่องกำเนิดฟองอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) สำหรับในเงื่อนไขนี้ อัตราการไหลของอากาศคือ $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$ หรือ $6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (7) จะได้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจนของแต่ละกรณี

จากนิยามสมรรถนะการเติมออกซิเจนทั้ง 4 ค่าที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า การติดตั้งผนังพุงชนที่มีความขรุขระของพื้นผิวที่กระดาดทรายเบอร์ 400 800 1,200 และผนังพุงชนแบบผิวเรียบ สามารถเพิ่มค่าสมรรถนะให้สูงขึ้น

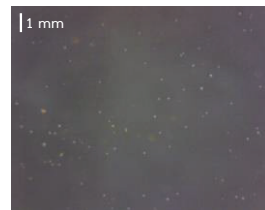
ได้ เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชน แต่เมื่อใช้กระดาดทรายเบอร์ 80 และ 220 หรือกรณีที่มีความขรุขระมากขึ้น จะมีค่าสมรรถนะลดลงกว่ากรณีไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชน นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีผนังพุงชนมีค่าความขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ 800 จะให้ค่าสมรรถนะสูงสุด คือจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 0.0137 mg/l ความสามารถในการเติมออกซิเจน $1161.61 \text{ mg-O}_2/\text{hr}$ อัตราการถ่ายเทออกซิเจน $17.12 \text{ kg-O}_2/\text{kW-hr}$ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน 68.43% ซึ่งค่าสมรรถนะเหล่านี้มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นจากรูปแบบที่ไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชนที่ 23.42% , 23.73% , 23.70% และ 13.12% ตามลำดับ และกรณีผนังพุงชนมีความขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ 400 1,200 และผนังพุงชนแบบเรียบ และไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชนจะให้ค่าสมรรถนะรองลงมา ตามลำดับ

6.4 ขนาดฟองอากาศจากตัวกำเนิดฟองอากาศ

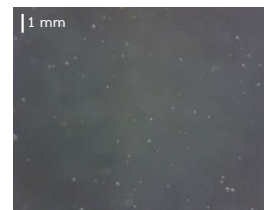
รูปที่ 15 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายฟองอากาศจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลของแต่ละกรณีและรูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศโดยเฉลี่ยของแต่ละกรณี โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ภาพ (Image processing method) ภาพถ่ายฟองอากาศจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลหลายภาพ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ

จากภาพถ่ายฟองอากาศ พบว่าในทุกกรณีสามารถให้ฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีขนาดของฟองที่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชน กรณีกระดาดทรายเบอร์ 80 และ 220 ความขรุขระของผนังพุงชนมาก สังเกตได้ว่าฟองอากาศที่ได้มีขนาดใหญ่ เนื่องจากพื้นผิวของกระดาดทรายที่มีความขรุขระมากจะมีช่องว่างให้ฟองอากาศเข้าไปฝังตัวและรวมตัวกันเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามกรณีกระดาดทรายขนาดเบอร์ 400, 800, 1,200 และผนังพุงชนแบบเรียบ พบว่าเกิดฟองอากาศ ที่มีขนาดเล็กกว่ากรณีไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชน เนื่องจากเมื่อฟองอากาศพุงชนผนัง ฟองอากาศจะเกิดการแตกตัวแล้วกระจายออกในทันที

จึงเป็นผลให้ขนาดฟองอากาศมีขนาดเล็กและจะเล็กที่สุด เมื่อผนังพุงชนมีค่าความขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ 800 และเมื่อใช้กระดาดทรายเบอร์ 1,200 ซึ่งมีความขรุขระน้อยกว่าเบอร์ 800 ขนาดฟองที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับกรณีผนังพุงชนแบบผิวเรียบที่มีขนาดฟองอากาศที่เล็กลงจากกรณีไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชน



(ก) ไม่ได้ติดตั้งผนังพุงชน



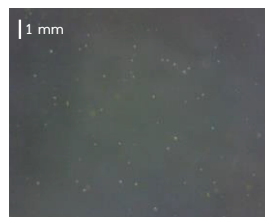
(ข) ผนังพุงชนแบบเรียบ



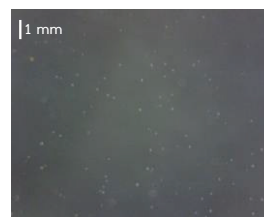
(ค) กระดาดทรายเบอร์ 80



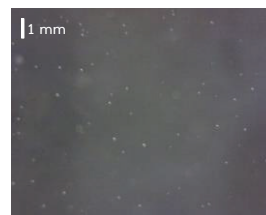
(ง) กระดาดทรายเบอร์ 220



(จ) กระดาดทรายเบอร์ 400

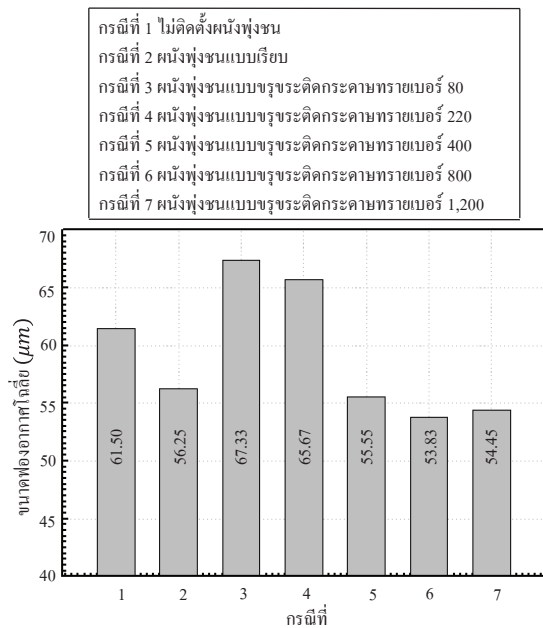


(ฉ) กระดาดทรายเบอร์ 800



(ซ) กระดาดทรายเบอร์ 1,200

รูปที่ 15 ภาพถ่ายฟองอากาศจากกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลของแต่ละกรณี



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฟองอากาศโดยเฉลี่ยของแต่ละกรณี

7. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของความขรุขระของผนังฟุ้งชนที่มีผลต่อขนาดฟองอากาศและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็ก สามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ขนาดฟองอากาศและค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีความขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ 80 และ 220 จะให้ขนาดฟองที่มีขนาดใหญ่และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน

(2) ขนาดฟองอากาศและค่าประสิทธิภาพที่ได้จากกรณีติดตั้งผนังฟุ้งชนที่มีความขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ 400 800 1,200 และผนังฟุ้งชนแบบเรียบ สามารถให้ขนาดฟองอากาศที่เล็กลงและมีประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฟองอากาศที่เพิ่มขึ้นจากกรณีไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน ในขณะที่ผนังฟุ้งชนที่มีความขรุขระของกระดาดทรายเบอร์ 800 จะให้ขนาดฟองอากาศที่เล็กที่สุดและมีค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดฟองอากาศขนาดเล็กที่สุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทออกซิเจน 0.0137 mg/l ความสามารถในการเติมออกซิเจน 1161.61 mg-O₂/hr อัตราการถ่ายเทออกซิเจน 17.12 kg-O₂/kW-hr ประสิทธิภาพในการถ่ายเทออกซิเจน 68.43% ซึ่งค่าสมรรถนะเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นจากรูปแบบที่ไม่ได้ติดตั้งผนังฟุ้งชน 23.42%, 23.73%, 23.70% และ 13.12% ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กองจัดการคุณภาพน้ำ, กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์, 2545; 70-76: 21-29.
- [2] Ohnari, H., Saga, T., Watanabe, K., Maeda, K., Maeda, K. High functional characteristics of micro-bubbles and water purification. *Resources Processing*, 1999; 46 (4): 238–244.
- [3] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K. and Ohtomo, A. Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005; 29: 615-623.
- [4] Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H. and Shikatani, S. Micro-bubble generation rate and bubble dissolution rate into water by a simple multi-fluid mixer with orifice and porous tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012; 41: 23–30.
- [5] Mori, Y. Micro-Bubble Generator. United States Patent No. 9,061,256 B2, 2015.
- [6] Iwaki, C., Aoki, K., Komita, H. Microbubble generating apparatus and method. United States Patent No. 8,678,356B2, 2010.
- [7] Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S., Kobayashi, D. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge. *Chemical Engineering Science*, 2011; 66: 3172-3179.
- [8] Ohnari, H. Swing type fine air bubble generating device. United States Patent No. 7,261,283B1, 2007.

- [9] Ohnari, H. Swing type Micro-bubble generating System. United States Patent No. 7,472,893B2, 2009.
- [10] Tabei, K., Haruyama, S., Yamaguchi, S., Shirai, H., Takakusagi, F. Study of micro bubble generation by a swirl jet (Measurement of bubble distribution by light transmission and characteristics of generation bubbles). *Journal of Environment and Engineering*, 2007; 2(1): 172–182.
- [11] Matsuzaki, K., Kudo, Y., Munekata, M., Ohba, H., 2007. A study of swirling flows in a cyclone separator using a large eddy simulation. *Journal of Environment and Engineering*, 2007; 2(3): 632–642.
- [12] ศิรชัช สังขพันธ์, ศุภวิชญ์ พงษ์รัชญะวิริยา, มัถดาร์ แวหะฮิ, ชยุด นันทฤต. การศึกษาลักษณะการไหลในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็กโดยใช้วิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. การประชุมวิชาการการถ่ายทอดผลงานความรู้และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15, วันที่ 30-31 มีนาคม 2559, โรงแรม แอลริสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- [13] ศิรชัช สังขพันธ์, ศุภวิชญ์ พงษ์รัชญะวิริยา, มัถดาร์ แวหะฮิ, ชยุด นันทฤต. ผลของรูปแบบท่อบังคับการไหลที่มีต่อลักษณะการไหลภายในชุดสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, วันที่ 6-8 กรกฎาคม 2559, โรงแรม บีพี สมิหลา บีช โฮเต็ล แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา
- [14] Kawahara, A., Sadatomi, M., Matsuyama, F., Matsuura, H., Tominaga, M., Noguchi, M. Prediction of micro-bubble dissolution characteristics in water and seawater. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2009; 33: 883–894.
- [15] อุดมพล พิษไพบูลย์. คู่มือปฏิบัติการ 224-323 ปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, ปฏิบัติการที่ 4 Aeration. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2555.



การประเมินปรากฏการณ์ประธานวัดอรุณราชวราราม

ในการต้านทานแผ่นดินไหว

Assessment of the Main Prang in Temple of Dawn on Seismic Resistance

ปฐมพงษ์ จอมทอง^{*1}, ชยานนท์ หรรษภิญโญ² และ ชินพัฒน์ บัวชาติ³

Pathompong Jomthong^{*1}, Chayanon Hansapinyo² and Chinnapat Buachart³

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 50200, Thailand

E-mail: ¹thompong6@gmail.com, ²chayanon@eng.cmu.ac.th, ³chinapat@eng.cmu.ac.th

Telephone Number: 053-944156, Fax: 053-892376

บทคัดย่อ

โบราณสถานมีอายุยาวนานนั้นมักจะอ่อนแอและเสียหายได้ง่ายโดยเฉพาะกับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งเมื่อได้รับความเสียหายแล้วการบูรณะให้เหมือนเดิมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ดังนั้นจึงควรมีการเตรียมการป้องกันความเสียหายไว้ก่อน บทความนี้นำเสนอผลกระทบของแรงแผ่นดินไหวที่มีต่อองค์พระปรางค์ประธานวัดอรุณราชวราราม โดยวิธีทางพลศาสตร์ โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาได้จำลองโครงสร้างพระปรางค์ประธานวัดอรุณราชวรารามเพื่อรับแรงจากคลื่นแผ่นดินไหวในอดีตจำนวน 9 รูปแบบที่แตกต่างกันสามกลุ่มคือ 1. แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ตามทิศทางไปข้างหน้า (near-fault ground motions with forward directivity) 2. แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้แบบพุ่ง (near-fault ground motions with fling) และ 3. แผ่นดินไหวระยะไกล (far-fault ground motions) ที่ได้รับการปรับค่าให้มีความรุนแรงตรงกับสเปกตรัมแผ่นดินไหวในพื้นที่ ผลการวิเคราะห์พบว่าองค์พระปรางค์มีความถี่ธรรมชาติพื้นฐานจากเท่ากับ 1.208 s ผลของคลื่นแผ่นดินไหวทำให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงสุดที่รอยต่อระหว่างลานประทักษิณกับซุ้มทิศเท่ากับ 14.7 MPa และหน่วยแรงดึงสูงสุดที่ลานประทักษิณเท่ากับ 4.13 MPa ซึ่งมากกว่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ซึ่งมีค่า 2.68 MPa และ 0.27 MPa ตามลำดับ ดังนั้นควรมีการวางแผนการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างขององค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเพื่อให้มีความสามารถในการรับแรงที่มากยิ่งขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหายขององค์พระปรางค์จากแรงแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ABSTRACT

A historic building having long age is vulnerable and easily damaged especially by seismic force. The restoration of the damaged building to the original one difficult. Hence, preparedness for the damage becomes crucial. This paper presents a study on the effect of earthquake on the main prang in Temple of Dawn using dynamic analysis option in finite element program. The structural model of the building was subjected to nine modified past earthquakes waves which were divided into three groups as (1) near-fault ground motions with forward directivity, (2) near-fault ground motions with fling and (3) far-fault ground motions. The wave modification was performed based on the earthquake spectrum in the area. The results showed that the fundamental natural period was 1.208 s. Under earthquake excitations, the maximum compressive stress occurred at joint between Pa Thaksin ground and facade was 14.7 MPa and the maximum tensile stress occurred at Pa Thaksin ground was 4.13 MPa. They were respectively higher than 2.68 MPa and 0.27 MPa of the allowable values. Therefore, the strengthening of the main

prang should be considered to prevent the damage of main prang under the forthcoming earthquake situation.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากและยังมีการเกิดภัยพิบัติต่างๆ มากมายโดยภัยพิบัติที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาคือ แผ่นดินไหวที่สร้างความเสียหายได้อย่างมากแก่สิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น อาคารบ้านเรือน อาคารเพื่อการพาณิชย์ รวมไปถึงสถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์อย่าง โบราณสถาน ซึ่งโบราณสถานนั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากทำให้วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างนั้นเสื่อมสภาพและไม่แข็งแรง เมื่อได้รับความเสียหายจะทำให้เกิดความเสียหายหนักกว่าสิ่งก่อสร้างอื่นๆ

พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเป็นพระเจดีย์ทรงปรางค์ซึ่งดัดแปลงมาจากพระปรางค์ดั้งเดิมเป็นสถาปัตยกรรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้สักการะบูชาของศาสนาพราหมณ์และฮินดู แต่สำหรับพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเป็นสถาปัตยกรรมที่ผสมผสานระหว่างพุทธศาสนาและฮินดู วัตถุประสงค์หลักนั้นสร้างด้วยความศรัทธาในคตินิยมของพุทธศาสนา ซึ่งในปัจจุบันพระปรางค์วัดอรุณมีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาที่ใช้งานอย่างยาวนานและได้มีภัยธรรมชาติเกิดขึ้นกับพระปรางค์ทำให้เกิดความเสียหายกับพระปรางค์หลายครั้ง เช่น การเกิดฟ้าผ่าที่องค์พระปรางค์ การทรุดตัวของดินที่พื้นลานหน้าพระปรางค์ ปัญหาน้ำกัดเซาะ และเหตุการณ์แผ่นดินไหวในปัจจุบันก็เป็นปัญหาใหญ่เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะตรวจสอบและประเมินสมรรถนะของพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเพื่อให้ทราบถึงความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นกับพระปรางค์ในอนาคตและสามารถหาวิธีการแก้ไขปัญหานั้นได้

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับโบราณสถานสำคัญต่างๆ ภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวมากมายทั้งงานวิจัยในประเทศ เช่น โบราณสถานทางภาคเหนือของประเทศไทย [1, 2] ซึ่งผลการวิจัยพบว่าเกิดค่าหน่วยแรงดึงในวัสดุที่ใช้ออกสร้างมากกว่าหน่วยแรงที่

ยอมให้แต่หากมีการเสริมกำลังดึงก็จะช่วยให้ค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงได้ โบราณสถานทางภาคกลาง [3-5] งานวิจัยบอกได้ว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีค่าไม่มากนักแต่วัสดุค่อนข้างมีการเสื่อมโทรม หน่วยแรงที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลต่อในอนาคตข้างหน้าได้ และมีงานวิจัยทางโบราณสถานหรือสถานที่ทางประวัติศาสตร์ที่สำคัญในต่างประเทศ เช่น โบสถ์ขนาดใหญ่อายุกว่า 1200 ปีในประเทศเยอรมัน [6] หอคอยอิฐก่อในประเทศอิตาลี [7] และโบราณสถานต่างๆ ในประเทศเนปาล [8] พบว่าค่าหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างส่งผลต่อเสถียรภาพของโบราณสถานและมีค่าเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่าแผ่นดินไหวนั้นมีผลกระทบต่อโบราณสถานมากดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 [9] โดยยังพบว่าโครงสร้างเจดีย์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวมักจะเกิดหน่วยแรงอัดและหน่วยแรงดึงสูงสุดในวัสดุที่ใช้สร้างองค์พระเจดีย์เกินกว่าค่ากำลังที่จะรับได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญในการศึกษาสมรรถนะในองค์พระปรางค์วัดอรุณราชวราราม ซึ่งเป็นพระปรางค์องค์สำคัญองค์หนึ่งในประเทศไทยและเป็นโบราณสถานที่เก่าแก่อายุมาช้านานเป็นหนึ่งในมรดกทางวัฒนธรรมของประเทศไทยโดยอยู่ภายใต้สภาวะจำลองของการเกิดแผ่นดินไหวในแบบต่างๆ เพื่อหาทางป้องกันการเสียหายขององค์พระปรางค์เนื่องจากแผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น

ตารางที่ 1 ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทย [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2088	ยอดเจดีย์หลวง จ.เชียงใหม่หักจากความสูง 86 เมตร เหลือเพียง 60 เมตร
พ.ศ. 2217	ยอดเจดีย์หักพังทลายหลายแห่งที่เชียงใหม่

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทย [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2088	ยอดเจดีย์หลวง จ.เชียงใหม่หักจากความสูง 86 เมตร เหลือเพียง 60 เมตร
พ.ศ. 2217	ยอดเจดีย์หักพังหลายแห่งที่เชียงใหม่
พ.ศ. 2258	แผ่นดินไหวหนัก พระเจดีย์วิหารหักพัง 4 ตำบล
พ.ศ. 2532	ยอดเจดีย์วัดพระธาตุคอกยสุเทพหัก
พ.ศ. 2550	ยอดฉัตรพระธาตุจอมกิติหักและเกิดรอยร้าวในตัวพระธาตุ
พ.ศ. 2554	พระธาตุเจดีย์หลวงที่เชียงใหม่หักโค่น
พ.ศ. 2555	บ้านเรือนประชาชนเกิดรอยร้าวและเสียหายเล็กน้อย จ.ภูเก็ต
พ.ศ. 2557	- ยอดฉัตร ศาลาจัตุรมุข วัดร่องขุน มีสภาพเอียง - โรงเรียนพานพิทยาคม จ.เชียงราย พังทลายลง - บ้านเรือนประชาชนใน จ.เชียงราย พังเสียหาย - ถนนได้รับความเสียหาย มีการยกตัวออกจากกัน

ตารางที่ 2 ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในต่างประเทศ [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2111	พระเจดีย์ เมืองย่างกุ้ง พังทลายลงมาถึงชั้นกลาง
พ.ศ. 2172	ฉัตรยอดพระเจดีย์ย่างกุ้งหัก
พ.ศ. 2300	ฉัตรยอดพระเจดีย์มูตางในเมืองหงสาวดีหัก

ตารางที่ 2 (ต่อ) ความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในต่างประเทศ [9]

ปีที่เกิดเหตุการณ์	ความเสียหายที่เกิดขึ้น
พ.ศ. 2553	แผ่นดินไหวที่เฮติ บ้านเมืองพังเสียหาย และมีผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมาก
พ.ศ. 2556	เกิดแผ่นดินไหวที่ปากีสถาน บ้านเรือนประชาชนชนพังเสียหาย 90% ของทั้งหมดมีผู้บาดเจ็บและล้มตายเป็นจำนวนมาก
พ.ศ. 2558	แผ่นดินไหวที่เนปาล สร้างความเสียหายแก่โบราณสถานต่างๆ และอาคารเก่าแก่จนเสียหายไม่เหลือเดิม
พ.ศ. 2558	แผ่นดินไหวที่อัฟกานิสถาน อาคารบ้านเรือน โรงเรียน พังเสียหาย
พ.ศ. 2559	เกิดแผ่นดินไหวในเมืองคумаโมโตะ มีบ้านเรือนเสียหายและสถานที่สำคัญเช่น โบราณสถานเก่าแก่ปราสาทคумаโมโตะ ศาลเจ้าอะโอะโสะ
พ.ศ. 2559	แผ่นดินไหวที่เอกวาดอร์ ส่งผลให้บ้านเรือนเสียหาย ถนนและทางยกระดับพังเสียหาย

2. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษามีขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

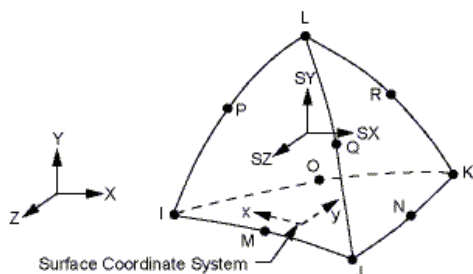
2.1 ข้อมูลทางรูปทรงเรขาคณิตขององค์เจดีย์

ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลต่างๆ ของพระปรางค์วัดอรุณราชวราราม เช่น ประวัติความเป็นมา ลักษณะต่าง ๆ ขององค์พระปรางค์ แบบสถาปัตยกรรมขององค์พระปรางค์ เพื่อใช้ในการจำลองโมเดลโครงสร้างขององค์พระปรางค์ โดยองค์พระปรางค์ที่ทำการจำลองจะมีความสูงจากฐานถึงปลายยอดประมาณ 74.50 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานประมาณ 44.50 เมตร

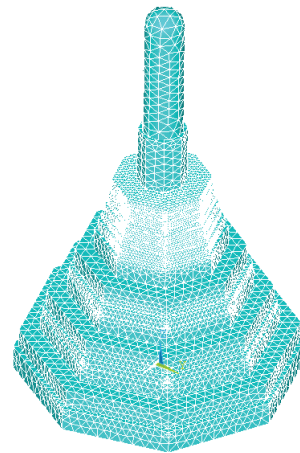
2.2 จำลองโมเดลโครงสร้างขององค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการจำลองโครงสร้างขององค์พระปรางค์จากข้อมูลที่รวบรวมมาโดยใช้ solid element แบบ เอลิเมนต์สามมิติรูปกรวยที่มี 10 จุดต่อ (second-order tetrahedral element) ในการจำลองโมเดลดังรูปที่ 1 และโมเดลมีจำนวนชิ้นส่วนเท่ากับ 105,667 ชิ้นส่วน และจำนวนจุดต่อเท่ากับ 151,260 จุดต่อ ดังรูปที่ 2 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองโมเดลโดยใช้ค่ากำลังปรีซึมของอิฐก่อของโบราณสถาน [10] เนื่องจากไม่สามารถนำอิฐก่อของจริงมาทำการทดสอบได้และมีสมมติฐานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- สมมติให้ภายในองค์พระปรางค์ตันและวัสดุมีสภาพที่เป็นเนื้อเดียวกัน
- ทำการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างหลักขององค์พระปรางค์เท่านั้น (แบบเชิงเส้น)
- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 1,000 MPa
- ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.15
- มวลต่อปริมาตรเท่ากับ 1,800 kg/m³
- จุดรองรับที่บริเวณฐานเป็นแบบยึดแน่นทั้งสามทิศทาง
- ค่ากำลังอัดประลัยของวัสดุก่อ (fm') เท่ากับ 2.68 MPa
- ค่ากำลังดึงประลัยของวัสดุก่อ (fm') เท่ากับ 0.27 MPa ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 10 ของกำลังอัดประลัยของวัสดุก่อ



รูปที่ 1 solid element tetrahedral 10 node



รูปที่ 2 แบบจำลองโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

2.3 จำลองคลื่นแผ่นดินไหวที่จะใช้ในการวิเคราะห์

เลือกใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะคลื่นต่างกัน ทั้งหมด 3 กลุ่ม [11] ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีคลื่นแผ่นดินไหวแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้ [12]

กลุ่มที่ 1 แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้ตามทิศทางไปข้างหน้า (near-fault ground motions with forward directivity) คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะทางน้อยกว่า 30 กม. ระหว่างพื้นที่ศึกษากับแหล่งกำเนิด และมีแหล่งกำเนิดอยู่ทิศทางข้างหน้าของพื้นที่ศึกษาและจะแผ่ขยายไปยังพื้นที่ศึกษา รูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 (ก-ค) ซึ่งจะมีคลื่นที่ใช้ดังนี้

- Loma prieta (P0736), 1989 (t=40.0 s)
- Kobe (P1057), 1995 (t = 40.9 s)
- Northridge (P1005), 1994 (t = 15.0 s)

กลุ่มที่ 2 แผ่นดินไหวเกิดในระยะใกล้แบบพุ่ง (near-fault ground motions with fling) คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะทางน้อยกว่า 30 กม. ระหว่างพื้นที่ศึกษาแหล่งกำเนิด และมีค่าความเร็วสะท้อนเพียงระนาบเดียว ซึ่งจะมีคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้คือ คลื่น Chi Chi, 1999 โดยคลื่นจะแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ รูปแบบการเคลื่อนไหวคลื่นแบบเป็นจังหวะ (pulse-like ground motion) และรูปแบบการเคลื่อนไหวแบบไม่เป็นจังหวะ (non-pulse-like ground motion) รูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 (ง-ฉ) โดยใช้ค่าดังต่อไปนี้

- Chi Chi (TCU068), 1999 (t = 102.0 s)

(Pulse-like ground motion)

- Chi Chi (TCU072), 1999 ($t = 76.0$ s)

(Non-pulse-like ground motion)

- Chi Chi (TCU074), 1999 ($t = 63.0$ s)

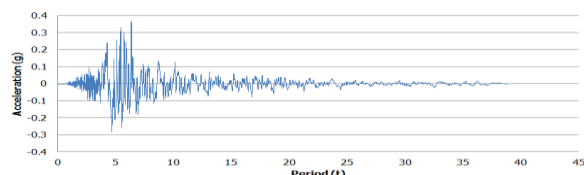
(Non-pulse-like ground motion)

กลุ่มที่ 3 แผ่นดินไหวระยะไกล (far-fault ground motions) คือคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในระยะทางมากกว่า 30 กม. ระหว่างพื้นที่ศึกษากับแหล่งกำเนิดรูปแบบของคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3 (ข-ฉ) ซึ่งจะมีคลื่นที่ใช้ดังนี้

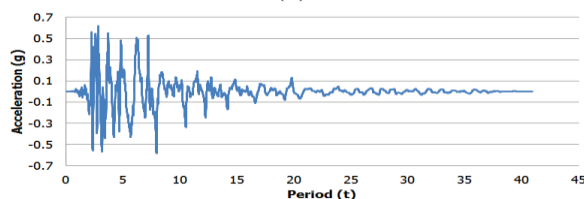
- Landers (P0864), 1992 ($t = 80.0$ s)

- San Fernando (P0056), 1971 ($t = 48.0$ s)

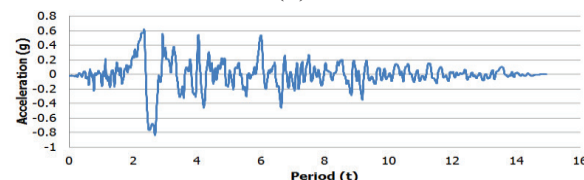
- Northridge (P0936), 1994 ($t = 50.0$ s)



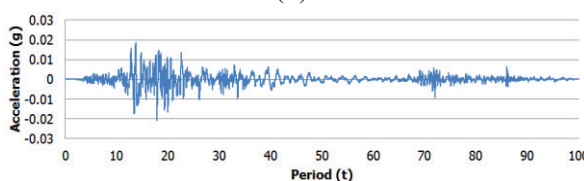
(ก)



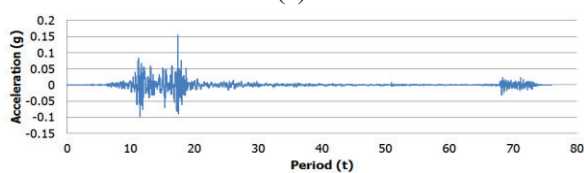
(ข)



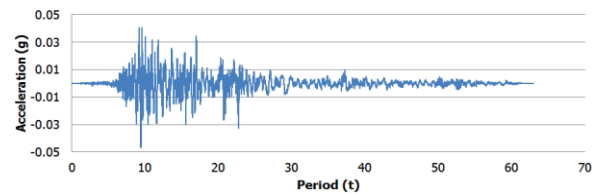
(ค)



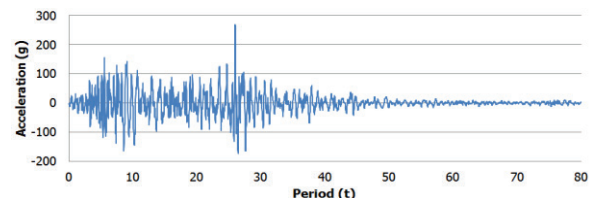
(ง)



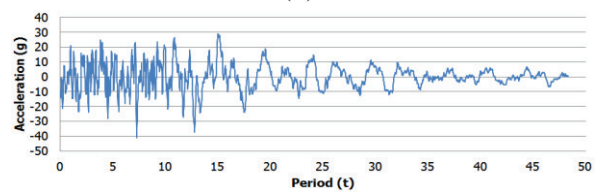
(จ)



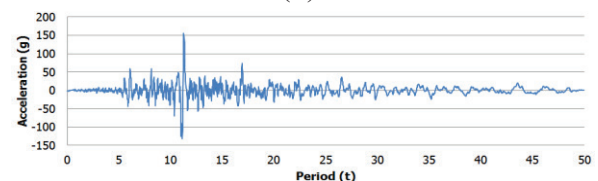
(ฉ)



(ช)



(ฅ)



(ฉ)

รูปที่ 3 ค่าความเร่งในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหว

(ก) คลื่น Loma prieta (P0736), 1989

(ข) คลื่น Kobe (P1057), 1995

(ค) คลื่น Northridge (P1005), 1994

(ง) คลื่น Chi Chi (TCU068), 1999

(จ) คลื่น Chi Chi (TCU072), 1999

(ฉ) คลื่น Chi Chi (TCU074), 1999

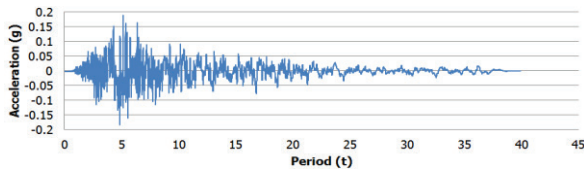
(ช) คลื่น Landers (P0864), 1992

(ฅ) คลื่น San Fernando (P0056), 1971

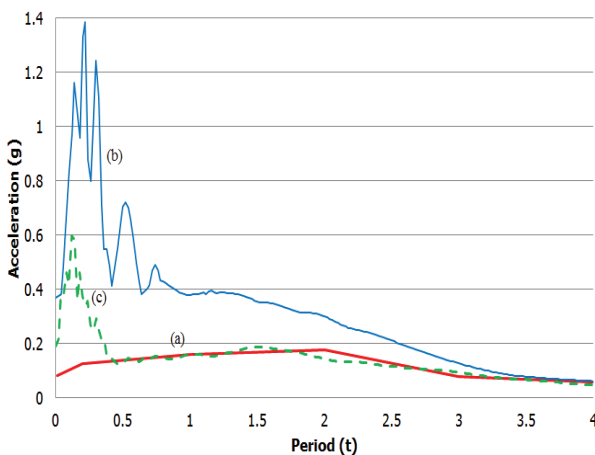
(ฉ) คลื่น Northridge (P0936), 1994

เมื่อได้ทำการรวบรวมข้อมูลของคลื่นแผ่นดินไหวทุกประเภทดังที่กล่าวในข้างต้นแล้ว จึงได้ทำการปรับค่า (matching) คลื่นแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Seismomatch [13] เพื่อจะทำการปรับค่าคลื่นที่ได้มาจากสเปกตรัมตอบสนองในโซนที่ 5 จาก มยพ. 1302 [14]

ให้ได้คลื่นที่ตรงกับความรุนแรงของประเทศไทย
ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 คลื่น Loma prieta (P0736), 1989 ที่ทำการ
ปรับค่า (matching) แล้ว



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองจาก
โปรแกรม Seismomatch (a) เส้นกราฟสเปกตรัม
ผลตอบสนองในโซนที่ 5 จาก มยพ. 1302 [14] (b)
เส้นกราฟจากคลื่นแผ่นดินไหวจริง (c) เส้นกราฟคลื่น
แผ่นดินไหวที่ได้ทำการปรับค่า Matching กับ
เส้นกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองจาก มยพ. 1302 [14]

2.4 ทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวที่กำหนดไว้กับโมเดล จำลอง

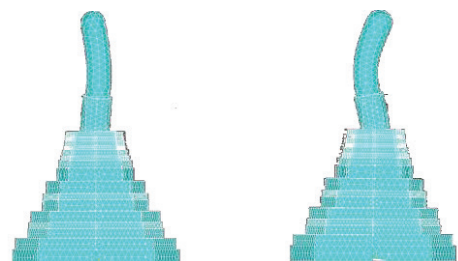
โดยจำลองแผ่นดินไหวในรูปของความเร่งใน
แนวราบที่ฐานขององค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามใน
โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาหน่วยแรงสูงสุดที่เกิด
ขึ้นกับองค์พระปรางค์ จากนั้นจึงทำการสรุปผลการ
วิเคราะห์และข้อเสนอแนะจากผลวิเคราะห์ที่ได้

3. ผลการวิเคราะห์

จากผลการศึกษาการตรวจสอบและประเมิน
พฤติกรรมของพระปรางค์วัดอรุณราชวรารามสามารถ
แบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

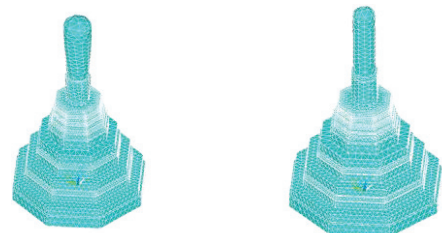
3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์แบบจำลองของพระปรางค์วัดอรุณ
ราชวรารามเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้โปรแกรม
ไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีค่าความถี่ธรรมชาติในโหมด
พื้นฐานอยู่ที่ 1.208 s และมีรูปแบบการสั่นไหว
(fundamental mode shape) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6



(ก) 1.208 s

(ข) 1.208 s



(ค) 1.236 s

(ง) 1.466 s



(จ) 1.946 s

รูปที่ 6 รูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานทั้ง 5 รูปแบบแรก

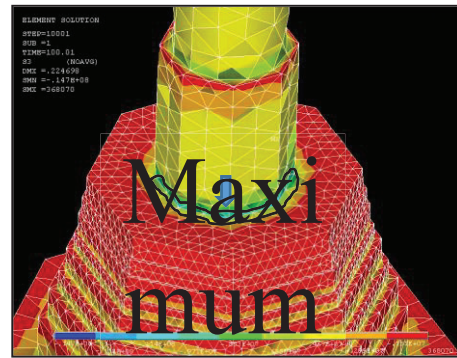
3.2 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในโครงสร้างของพระปรางค์เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมขององค์พระปรางค์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 สรุปได้ว่า

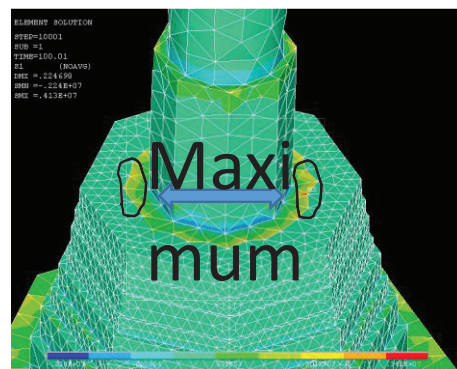
ตารางที่ 3 หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว

ชื่อคลื่น แผ่นดินไหว	แรงดึง สูงสุด (MPa)	แรงอัด สูงสุด (MPa)	การ เคลื่อนตัว (m)
คลื่นกลุ่มที่ 1			
Loma prieta	3.86	13.00	0.215
Kobe	3.86	13.00	0.213
Northridge	3.73	13.90	0.214
คลื่นกลุ่มที่ 2			
Chi Chi 068	4.13	14.70	0.225
Chi Chi 072	4.11	14.30	0.220
Chi Chi 074	4.12	14.50	0.220
คลื่นกลุ่มที่ 3			
Landers	3.84	13.10	0.214
San Fernando	3.74	13.80	0.215
Northridge	3.85	13.10	0.212

จากตารางที่ 3 แผ่นดินไหวกลุ่มที่ 2 ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของยอดพระปรางค์ หน่วยแรงอัด และหน่วยแรงดึงมากที่สุด โดยค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ปลายยอดประมาณ 22.5 เซนติเมตร หน่วยแรงอัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างลานประทักษิณและซุ้มทิศ (รูปที่ 7) มีค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 14.7 MPa ซึ่งมากกว่าหน่วยแรงอัดที่รับได้ประมาณ 5 เท่า และค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณลานประทักษิณ (รูปที่ 8) มีค่าเท่ากับ 4.13 MPa มากกว่าหน่วยแรงดึงที่รับได้ประมาณ 15 เท่า ซึ่งหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณนี้เป็นผลเนื่องมาจากการแปรเปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดอย่างฉับพลันส่งผลให้เกิดแรงกระทำที่บริเวณนี้มากที่สุด และผลการศึกษาข้อควรคำนึงกับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานในรูปที่ 6 (ก)



รูปที่ 7 หน่วยแรงอัดประธานสูงสุดที่เกิดขึ้นกับพระปรางค์ที่บริเวณรอยต่อระหว่างลานประทักษิณและซุ้มทิศ



รูปที่ 8 หน่วยแรงดึงประธานสูงสุดที่เกิดขึ้นกับพระปรางค์ที่บริเวณลานประทักษิณ

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้เสนอผลการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในองค์พระปรางค์วัดอรุณราชวรารามเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวและน้ำหนักขององค์พระปรางค์ จากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า

องค์พระปรางค์มีค่าความถี่ธรรมชาติพื้นฐานจากการวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ที่ 1.208 s

คลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดในระยะใกล้แบบพุ่ง (near-fault ground motions with fling) จะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ปลายยอดขององค์พระปรางค์มากที่สุดประมาณ 22.5 เซนติเมตร อีกทั้งยังทำให้เกิดหน่วยแรงสูงสุดในองค์พระปรางค์

หน่วยแรงอัดสูงสุดจะมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดที่รับได้ประมาณ 5 เท่า และค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าหน่วยแรงดึงที่รับได้ประมาณ 15 เท่า

ตำแหน่งของหน่วยแรงอัดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณลานประทักษิณและซุ้มทิศ และหน่วยแรงดึงสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณลานประทักษิณ ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกันและเกิดการเสียรูปมากที่สุดเมื่อพิจารณาจากรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (fundamental mode shape)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมา ควรมีการพิจารณาบูรณะหรือเสริมกำลังให้โครงสร้างในบริเวณซุ้มทิศและบริเวณลานประทักษิณให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภวัฒน์ วิชาดสงเคราะห์. การประเมินการไหวสะเทือนจากแผ่นดินไหวของเจดีย์พระธาตุคอกยสุเทพ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2554.
- [2] กนกวรรณ ขานะถนอม. พฤติกรรมเชิงสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวของเจดีย์ในเขตเมืองเชียงใหม่ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2553.
- [3] ชนาฉัตร อภิชาติยะกุล. การวิเคราะห์และทวนสอบแบบจำลองของโบราณสถานอิฐก่อ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2549.
- [4] วรศักดิ์ กนกกุลชัย. การวิเคราะห์โครงสร้างเจดีย์ภูเขาทองเพื่อการบูรณะ. *โยธาสาร* 2540; 09(12).
- [5] สุดชาย พานสุวรรณ. การวิเคราะห์โบราณสถานการก่ออิฐเชิงวิศวกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ; 2543.
- [6] Kuhlmann, W. Historic Building under earthquake load, Institute of Structural Statics and Dynamics, Aachen University, 2003.
- [7] Capinieri, A., Invernizzi, S. and Lacidogna, G. In situ damage assessment and nonlinear modeling of a historical masonry tower. *Engineering Structures*, 2005; 27: 387-395.
- [8] Jaishi, B., Ren, W.X., Zong, Z.H. and Maskey, P.N. Dynamic and seismic performance of old multi-tiered temples in Nepal. *Engineering structures*, 2003; 25: 1827-1839.
- [9] Statistic Data. Meteorological Department, Ministry of Digital Economy and Society, Thailand, 2016, [online] available: <http://www.earthquake.tmd.go.th/home.php>
- [10] สุภวิทย์ พรเจริญโรจน์. ผลของความหนาของชั้นปูนตอกำลังรับน้ำหนักของปริซึมอิฐมอญ. โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [11] Statistic Data. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California and Berkeley, 2012, [online] available: <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
- [12] Dabaghi, M. and Kiureghian, A.D. Stochastic Modeling and Simulation of Near-Fault Ground Motions for Performance-Based Earthquake Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2014.
- [13] SeismoMatch. Seismosoft (Ltd), 2012, [online] available: <http://www.seismosoft.com/home>
- [14] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยผ. 1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว, กระทรวงมหาดไทย, 2552.



อิทธิพลของประเภทไม้ธรรมชาติและปริมาณผงสีต่อสมบัติของ วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

Influence of Natural Wood Types and Pigment Contents on Properties of Wood-Plastic Composites

ชาตรี หอมเขียว^{1,2*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}, วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2} และ ธเนศ รัตนวิไล³
Chatree Homkhiew^{1,2*}, Surasit Rawangwong^{1,2}, Worapong Boonchouytan^{1,2}
and Thanate Ratanawilai³

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา 90000

³ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา 90112

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000, Thailand

²Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla 90000, Thailand

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Songkhla 90112, Thailand

*Corresponding author: chatree.h@rmutsv.ac.th

Telephone Number: 074-317100 # 3110

บทคัดย่อ

ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ประเภทไม้ธรรมชาติเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เนื่องจากไม้ธรรมชาติแต่ละชนิดมีโครงสร้างและความแข็งแรงที่แตกต่างกัน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาผลกระทบของประเภทไม้ธรรมชาติ เช่น ไม้ยางพารา ไม้ปาล์มน้ำมัน และ ไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน ตลอดจนผลกระทบของปริมาณผงสีต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่า ในวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมผงสี วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง และค่าความแข็งแรง สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน เช่นเดียวกันวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีทุกสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้การเติมผงสีปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ในวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ทุกประเภทสามารถปรับปรุงให้ค่าความแข็งแรงดัด ค่ามอดูลัสการดัด และค่าความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการเติมผงสีปริมาณ 5 wt% กลับส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้มีค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงลดลง และพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีสีน้ำตาลคล้ายคลึงไม้ธรรมชาติ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมันมีสีน้ำตาลเข้ม และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีสีดำ

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, ไม้ยางพารา, ไม้ปาล์มน้ำมัน, ทางใบปาล์มน้ำมัน, พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

ABSTRACT

In production of wood-plastic composites (WPCs), types of natural wood is a factor affecting the properties of WPCs. Because each type of wood has the different structure and strength, therefore, the objectives of this research were to study the effect of natural wood types, such as rubberwood flour (RW), oil palm wood flour (OW) and oil palm frond flour (OF), as well as effect of pigment contents on mechanical and physical properties of composites from high-density polyethylene (HDPE) and wood flour. From testing the composites without pigment, the HDPE composites reinforced with RW had higher modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), tensile strength (TS), tensile modulus (TM) and hardness than the composites reinforced with OW and reinforced with OF. Likewise, the HDPE composites reinforced with OF showed greater all mechanical properties than the composites reinforced with OW. Furthermore, addition of pigment 1 wt% clearly improved the MOR, MOE and hardness of all the composites. However, addition of pigment 5 wt% reduced the TS and hardness of the WPCs. Lastly, the composites reinforced with RW exhibited brown texture, while the composites reinforced with OW appeared dark brown texture, and texture of the composites with OF is black.

Keywords: Wood-Plastic Composites, Rubberwood, Oil Palm Trunk, Oil Palm Frond, High-Density Polyethylene

1. บทนำ

ประเทศไทยถือได้ว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม และพืชเศรษฐกิจที่สำคัญทางภาคใต้ของประเทศไทย ได้แก่ ยางพารา ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรรายงานว่า ในปี 2558 พื้นที่ปลูกยางพาราที่กรีดยังชีพของประเทศไทย มี 18.85 ล้านไร่ [1] อย่างไรก็ตามการตัดต้นยางพาราเหล่านี้จะเกิดขึ้นเมื่อต้นยางพารามีอายุประมาณ 25 ปี เพราะให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่าต่อการปลูกต่อไป [2, 3] จากนั้นจะขนส่งไม้ยางพาราไปแปรรูปต่อในโรงเลื่อย และทำการตัดซอยให้ได้ขนาดตามต้องการ [4] จากกระบวนการตัดและแปรรูปไม้ยางพาราจะเกิดผงไม้ ขี้เลื่อยไม้ และเศษไม้ เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรมีการรายงานด้วยว่า ในปี 2558 เนื้อที่ปลูกปาล์มน้ำมันที่ให้ผลผลิตได้ของประเทศไทย มี 4.28 ล้านไร่ [1] ในขณะเดียวกันการดูแลต้นปาล์มน้ำมัน เกษตรกรจะต้องตัดใบล่างที่รองรับทะลายปาล์มน้ำมันก่อนการเก็บเกี่ยว ซึ่งโดยทั่วไปเกษตรกรจะเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันทุก ๆ 15-20 วัน เลื่อยแล้วทุกเดือนมีการตัดทางใบปาล์มน้ำมันออกอย่างน้อย 2 ทางใบต่อต้น หรือคิดเป็น 44 ทางใบต่อไร่ (อัตราปลูก 22 ต้นต่อไร่) โดยหนึ่งทางใบปาล์มน้ำมันจะมีน้ำหนักประมาณ 5 กิโลกรัม [5] จากข้อมูลเหล่านี้ ทั้งปริมาณไม้ยางพารา ทางใบปาล์มน้ำมัน และต้นปาล์มน้ำมัน เมื่อหมดอายุให้

ผลผลิต จะเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในภาคอุตสาหกรรมและการเกษตรของภาคใต้ ดังนั้นวัสดุเหล่านี้จะเป็นประโยชน์และสามารถเพิ่มมูลค่าได้อย่างมากหากมีการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือส่วนผสมเพื่อผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs)

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ ก่อสร้าง เรือ และการบิน เนื่องจากมีข้อดี คือ มีความต้านทานเชื้อราสูง ความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง ความสามารถในการดูดซับน้ำน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [6] วัสดุเชิงประกอบเหล่านี้สามารถผลิตได้โดยการนำผงไม้หรือขี้เลื่อยไม้และสารเติมแต่งต่าง ๆ ผสมในพลาสติกที่หลอมเหลว จากนั้นขึ้นรูปวัสดุเหล่านี้ด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การอัดร้อน (Hot compression) การอัดรีด (Extrusion) หรือการฉีดเข้าเบ้า (Injection molding) เป็นต้น [6, 7] ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบชนิดนี้ ประเภทหรือชนิดของไม้ธรรมชาติที่ใช้เป็นส่วนผสมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เพราะไม้ธรรมชาติแต่ละชนิดมีโครงสร้าง ผิวรูพรุนภายใน และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน [6, 8-10] ดังแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบบทบาทของแต่ละส่วนประกอบทางเคมีเป็น

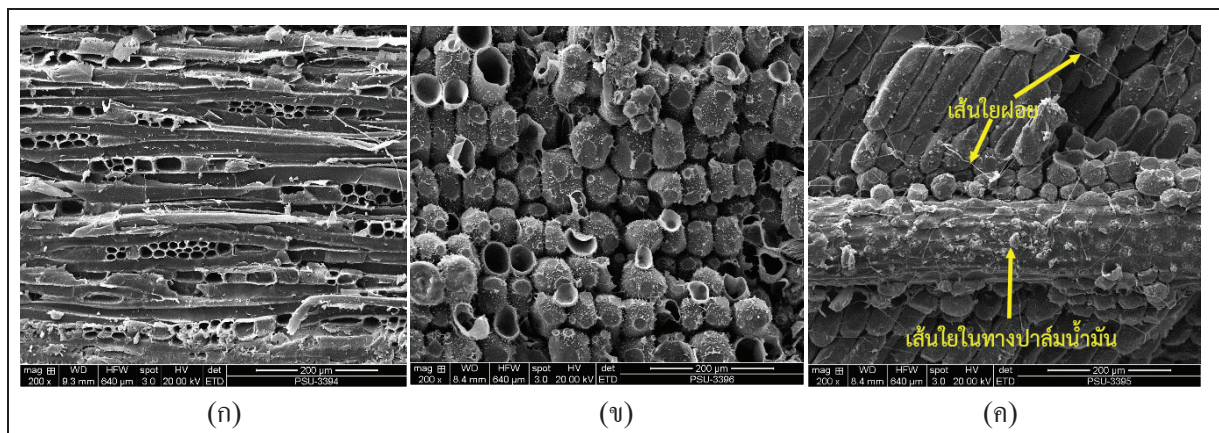
วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สามารถเทียบสมบัติเชิงกลได้เป็นเมทริกซ์พลาสติก เซลลูโลสได้เป็นเส้นใยธรรมชาติ และลิกนินเทียบได้เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) [6, 11]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้แต่ละประเภท

Wood type	Chemical composition (wt%)			
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	Others
Rubberwood [12]	39.0	29.0	28.0	4.0
Oil palm trunk [13]	39.9	21.2	22.6	16.3
Oil palm frond [13]	31.0	17.1	22.9	29.0

จากงานวิจัยในอดีตมีการรายงานว่า ความแข็งแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยไม้สนมีค่าต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยไม้เมเปิ้ล เนื่องจากชนิดของไม้ที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อการประสานยึดเกาะในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ [14] และมีการค้นพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยฟางข้าวสาลีมีสมบัติการดึงและการดัด (ทั้งค่าความแข็งแรงและค่ามอดูลัส) สูงกว่าวัสดุเชิง

ประกอบที่เสริมแรงด้วยซังข้าวโพด และที่เสริมแรงด้วยต้นข้าวโพด [15] ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเปลือกไม้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยแกนกลางของไม้ [16] และวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยต้นบีจมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย [17] เช่นเดียวกันมีการเปิดเผยด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีสมบัติทางกลและทางความร้อนดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงเส้นใยผลปาล์มน้ำมัน [10] ถึงแม้ในอดีตมีการวิจัยเกี่ยวกับการใช้เส้นใยหรือไม้ธรรมชาติเสริมแรงในพลาสติกกันอย่างกว้างขวาง แต่การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสายพันธุ์หรือประเภทไม้ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ยังมีอยู่เพียงเล็กน้อย และยังไม่พบการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา ที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์ม น้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงทางใบปาล์มน้ำมัน ที่งานวิจัยนี้สนใจจะเปิดเผย



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของไม้แต่ละประเภท (ก) ไม้ยางพารา (ข) ไม้ปาล์มน้ำมัน และ (ค) ทางใบปาล์มน้ำมัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

สารเติมแต่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ โดยเฉพาะผงสี ซึ่งเป็นวัสดุที่มักมีการเติม เพื่อให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีสีตามที่ต้องการ ดังนั้นนักวิจัยและพัฒนาวัสดุ

เชิงประกอบพลาสติกและไม้ต้องมีความรู้และความเข้าใจในผลกระทบของสารเติมแต่งชนิดนี้ เพื่อให้สมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตรงตามวัตถุประสงค์ของการประยุกต์ใช้งาน

ประเภทไม้ธรรมชาติและปริมาณผงสีเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ทำให้นักวิจัยและพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ต้องมีความรู้และเข้าใจในผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้ทราบว่า ในการประยุกต์ใช้งานแต่ละประเภทควรใช้ไม้ชนิดใดเป็นวัสดุเสริมแรงและปริมาณผงสีเท่าไร เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลกระทบของประเภทไม้ธรรมชาติในเชิงเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา ที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์ม น้ำมัน ตลอดจนผลกระทบของปริมาณผงสีต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้จะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย นักพัฒนา และผู้ผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

2. วัสดุและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เกรด HDPE V1160 ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) วัสดุเสริมแรงเป็นไม้ธรรมชาติ 3 ประเภท คือ 1) ขี้เลื่อยไม้ยางพาราได้รับมาจากโรงงานแปรรูปเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา 2) ขี้เลื่อยไม้ปาล์มน้ำมันได้รับมาจากอุตสาหกรรมครัวเรือนแปรรูปต้นปาล์มน้ำมันเป็นของใช้ในครัวเรือนในจังหวัดสตูล และ 3) ทางใบปาล์มน้ำมันได้รับมาจากสวนปาล์มน้ำมันในจังหวัดสตูล นอกจากนี้ผงสี จัดซื้อจากบริษัท เซ็นทรัลฟักมันท์ จำกัด (กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย) ซึ่งเป็นผงสีเกรดปลอดสารพิษ

2.2 การเตรียมวัสดุเสริมแรง

การเตรียมผงไม้ยางพาราและผงไม้ปาล์มน้ำมันสามารถทำได้โดยการนำขี้เลื่อยไม้ยางพาราและขี้เลื่อยไม้ปาล์มน้ำมันมาคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช สำหรับผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันกระทำโดยการนำทางใบปาล์มน้ำมันที่แห้งมาขยอลดขนาด จากนั้นนำไปบด

เพื่อให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้เครื่องบดแบบค้อน (Hammer mill) และนำไปร่อนให้ผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช ซึ่งลักษณะของผงไม้ทั้ง 3 ประเภท แสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ก่อนนำไปผสมกับเม็ดพลาสติก นำผงไม้เหล่านี้ไปอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 2 ผงไม้ (ก) ยางพารา (ข) ปาล์มน้ำมัน และ (ค) ทางใบปาล์มน้ำมัน

2.3 การขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง

กรรมวิธีการผลิตแผ่นขึ้นงานตัวอย่างมีขั้นตอนดังนี้ 1) การผสมส่วนผสมต่าง ๆ เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ กระทำโดยการนำเม็ดพลาสติกผสมกับผงไม้และผงสี ตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 2 ใส่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รุ่น CTE-D25L40 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิการผสมอยู่ในช่วง 155-185 °C และความเร็วหมุนของเกลียว 60 rpm จากนั้นนำเส้นวัสดุเชิงประกอบที่อัดรีดออกจากเครื่องอัดรีดระบายความร้อนในอากาศและนำไปตัดให้เป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 2) การขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานตัวอย่างสามารถกระทำได้โดยการนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ใส่ในแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิ 190 °C และอัดด้วยเครื่องอัดรีดโดยใช้แรงดัน 1.72 MPa (250 psi) เป็นเวลา 5 min จากนั้นอัดซ้ำด้วยแรงดัน 6.89 MPa (1000 psi) เป็นเวลา 10 min เมื่อครบเวลาที่กำหนด

นำแผ่นชิ้นงานตัวอย่างและชุดแม่พิมพ์เคลื่อนย้ายเข้าสู่ระบบหล่อเย็นที่มีน้ำไหลวน และอัดซ้ำอีกครั้งด้วยแรงดัน 6.89 MPa เป็นเวลา 10 min จากนั้นจึงถอดแผ่นชิ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ และนำไปตัดเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่าง ๆ

ตารางที่ 2 สูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; wt%)

Sample code	HDPE	RW	OW	OF	Pigment
H50RW50	50	50			
H50RW49C1	50	49			1
H50RW47C3	50	47			3
H50RW45C5	50	45			5
H50OW50	50		50		
H50OW49C1	50		49		1
H50OW47C3	50		47		3
H50OW45C5	50		45		5
H50OF50	50			50	
H50OF49C1	50			49	1
H50OF47C3	50			47	3
H50OF45C5	50			45	5

หมายเหตุ: HDPE คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง RW คือ ผงไม้ยางพารา OW คือ ผงไม้ปาล์มน้ำมัน และ OF คือ ผงทังไบปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 3 เม็ดวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและ (ก) ผงไม้ยางพารา (ข) ผงไม้ปาล์มน้ำมัน และ (ค) ผงไม้ทังไบปาล์มน้ำมัน

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบดัด (Flexural test) การทดสอบดึง (Tensile test) และการทดสอบความแข็ง (Hardness test) เป็นการทดสอบที่ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D790-92, ASTM D638-99 และ ASTM D2240-91 ตามลำดับ ในการทดสอบดัดเป็นการทดสอบดัดแบบ 3 จุด ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $4.8 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ บารองรับชิ้นงาน (Span distance) มีระยะห่าง 80 mm และความเร็วที่ใช้ในการทดสอบดัด คือ 2 mm/min โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 บริษัท นรินทร์ อินสตรูเมนต์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) สำหรับการทดสอบดึงเป็นการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 4 ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด $115 \text{ mm} \times 19 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ และความเร็วที่ใช้ทดสอบดึง คือ 5 mm/min โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลเนกประสงค์เช่นเดียวกัน และในการทดสอบความแข็ง ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ และวัดความแข็งโดยใช้ Durometer แบบ Shore D scales (รุ่น GS-702G บริษัท Teclock corporation จำกัด Nagano, Japan) เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีพลาสติกเป็นเนื้อหลัก ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบความแข็งแบบ Shore D scales นอกจากนี้ในแต่ละการทดสอบกระทำที่อุณหภูมิห้อง 25°C และทดลองแบบสุ่ม 5 ตัวอย่าง ของแต่ละสูตรการทดลอง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแต่ละสมบัติ

2.5 การวัดสี

การวัดสีของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ก่อนและหลังการผสมผงสีที่ปริมาณต่าง ๆ เป็นการวัดตามระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยใช้เครื่อง Hunterlab color standard (Hunter Associates Laboratory, Inc., Virginia, USA) ซึ่ง L^* จะอธิบายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ a^* หมายถึง สีแดง-เขียว และ b^* หมายถึง สีเหลือง-น้ำเงิน นอกจากนี้ในการทดสอบของแต่ละสูตรมีการทดสอบแบบสุ่ม 5 ตัวอย่าง นอกจากนั้นการคำนวณค่า

การเปลี่ยนสี (Discoloration; ΔE) ของชิ้นงานทดสอบ ก่อนและหลังผสมผงสี ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

เครื่องหมายข้างใต้ (Subscript) 1 และ 2 หมายถึง ค่าของ วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ก่อนและหลังการผสมผงสีที่ปริมาณต่าง ๆ ตามลำดับ

2.6 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

การวิเคราะห์โครงสร้างของไม้ยางพารา ไม้ปาล์ม น้ำมัน และทางใบปาล์ม น้ำมัน ตลอดจนการวิเคราะห์ รูพรุนภายในโครงสร้าง และการยึดเกาะระหว่างผงไม้และ เมทริกซ์พลาสติกของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ดำเนินการโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM, รุ่น Quanta 400, FEI company, Oregon, USA) อย่างไรก็ตามก่อนการส่องด้วย SEM ชิ้นงาน ทั้งหมดต้องเคลือบด้วยทองคำบริเวณผิวหน้าที่แตกหัก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของไม้ธรรมชาติ

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของไม้ทั้ง 3 ประเภท คือ ไม้ยางพารา ไม้ปาล์ม น้ำมัน และทางใบปาล์ม น้ำมัน ซึ่งเห็นได้ว่า ไม้ยางพารามีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นท่อยาว ๆ และมีการประสานเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างท่อต่าง ๆ ในขณะที่ไม้ปาล์ม น้ำมันมีลักษณะของโครงสร้างเป็นเม็ดกลม ๆ และมีความกลวงภายในเม็ดกลม เช่นเดียวกันมีการยึดเกาะกันแบบหลวม ๆ ภายในโครงสร้างของเนื้อไม้ นอกจากนี้ในโครงสร้างของทางใบปาล์ม น้ำมันพบว่า มีลักษณะเป็นเม็ดกลมรีคล้ายเม็ดข้าว จัดเรียงตัวกันเป็นแนวอย่างแนบชิด และมีการยึดเกาะกันค่อนข้างแนบแน่นกว่าไม้ปาล์ม น้ำมัน เช่นเดียวกันยังเห็นด้วยว่า ทางใบปาล์ม น้ำมันมีเส้นใยยาวและเส้นใยเป็นฝอยเล็ก ๆ เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย จากโครงสร้างของไม้ทั้ง 3 ประเภท นี้ สามารถประเมินได้ว่า ไม้ยางพารามีความแข็งแรงมาก

ที่สุด รองลงมาเป็นทางใบปาล์ม น้ำมัน และ ไม้ปาล์ม น้ำมัน มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกลของไม้ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า ไม้ยางพารามีสมบัติทางกล คือ ความแข็งแรงดัด มอดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงสูงกว่าไม้ปาล์ม น้ำมันอย่างชัดเจน

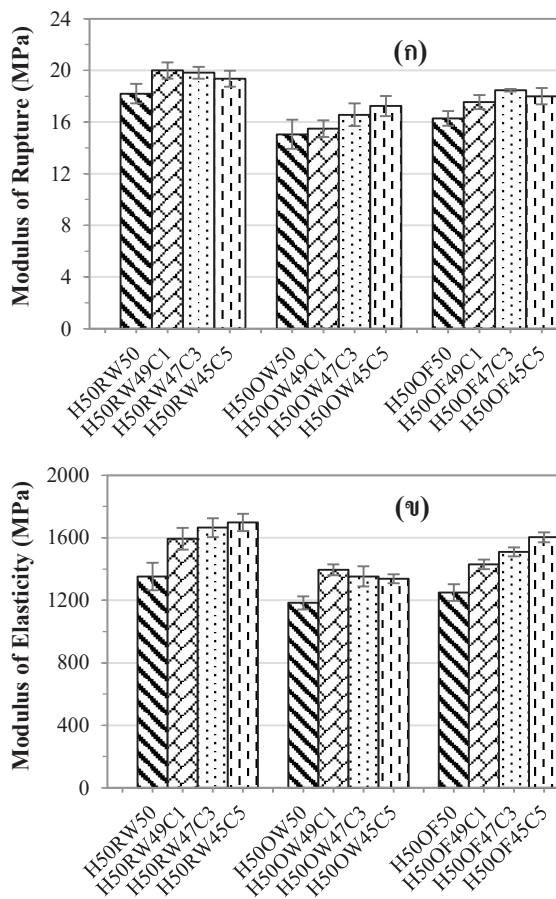
ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของไม้แต่ละประเภท

Wood type	Mechanical property			
	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Tensile stress (MPa)	Hardness (kg)
Rubberwood [18]	95.41	9414	2.74	532
Oil palm trunk [19]	46.62	2843	1.03	198

3.2 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อสมบัติการดัด

สมบัติการดัดเป็นสมบัติที่สำคัญและมักนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อการประยุกต์ใช้งานวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ [10] รูปที่ 4 (ก) และ 4 (ข) แสดงค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัด ตามลำดับของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา ที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์ม น้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์ม น้ำมัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์ม น้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์ม น้ำมัน เนื่องจากไม้ยางพารามีความแข็งแรงมากกว่าไม้ปาล์ม น้ำมันและทางใบปาล์ม น้ำมัน ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของไม้ ดังแสดงในรูปที่ 1 และสมบัติทางกลของไม้ ดังตารางที่ 3 ดังนั้นเมื่อเติมไม้ที่มีความแข็งแรงสูงกว่าเข้าไปในวัสดุเชิงประกอบ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นตามความแข็งแรงของวัสดุเสริมแรงที่เดิมเป็นส่วนผสม เช่นเดียวกันยังพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์ม น้ำมันมีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์ม น้ำมันจาก

โครงสร้างฐานวิชาของไม้ยืนต้นได้ว่า ทางใบปาล์ม น้ำมันมีความแข็งแรงและแกร่งกว่าไม้ปาล์มน้ำมัน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ค่อนข้างแนบแน่นกว่าและมีเส้นใย เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างจำนวนมาก ส่งผลให้ วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน ต้องการความเค้นที่สูงกว่าเพื่อให้เกิดการเสียรูปเท่ากับ วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน สอดคล้องกับ Ratanawilai et al. [10] ซึ่งรายงาน ว่า สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ขึ้นอยู่กับ ความแกร่งของวัสดุที่เป็นตัวเสริมแรง



รูปที่ 4 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงไม้ต่อ
(ก) ความแข็งแรงดัด และ (ข) โมดูลัสการดัดของวัสดุเชิง
ประกอบพลาสติกและไม้

ผลกระทบของปริมาณผงไม้ในรูปที่ 4 ซึ่งให้เห็นด้วย ว่า การเติมผงไม้ในวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ทุกประเภท สามารถปรับปรุงให้ค่าความแข็งแรงดัดและค่าโมดูลัสการดัดมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งแรงดัดลดลง เมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 3-5 wt% ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งแรงดัดลดลง เมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสม 5 wt% พฤติกรรมเหล่านี้เป็นไปได้อย่างไร การเติมผงไม้ที่มากเกินไปจะส่งผลให้ผงไม้เกิดการจับตัวเป็นก้อนกลม ๆ ภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เพราะผงไม้มีขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดการรวมตัวกันเมื่อผสมกับเมทริกซ์พลาสติก สอดคล้องกับ Salemane and Luyt [20] กล่าวว่า อนุภาคของสารตัวเติมที่มีความละเอียดมาก ๆ จะสามารถกระจายตัวได้ยากขึ้น จากนั้นพฤติกรรมการจับตัวเป็นก้อนอนุภาคใหญ่จะเกิดขึ้น ดังนั้นความสามารถการถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างจึงลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง

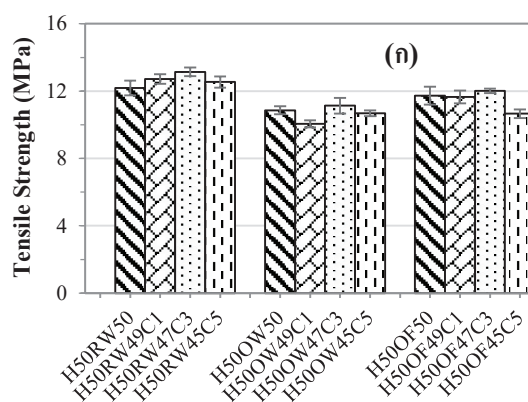
การวิเคราะห์ค่าโมดูลัสการดัดพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่าโมดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงไม้ที่เติมเป็นส่วนผสม เนื่องจากการกระจายตัวของผงไม้เข้าสู่เมทริกซ์พลาสติกเกิดขึ้นได้ดีและสม่ำเสมอกว่าผงไม้ ตลอดจนความสามารถการยึดเกาะระหว่างผงไม้กับเมทริกซ์พลาสติกมีมากกว่าผงไม้ ส่งผลให้ผิวของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่โดยปกติเป็นชั้นของพลาสติกมีความแข็งแรงและแข็งแกร่งขึ้น (สามารถพิสูจน์ได้ในสมบัติความแข็ง ความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงไม้เป็นส่วนผสม) ส่งผลให้ความสามารถด้านทานต่อแรงดัดดงมีมากขึ้น ในทางทฤษฎีของการทดสอบดัด บริเวณที่รับแรงดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบนอกสุด ดังนั้นการต้านทานของแรงดัดที่กระทำต่อชิ้นงาน จึงขึ้นอยู่กับความแข็งแรงที่ขอบนอกเป็นหลัก [21]

3.3 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อสมบัติการดึง

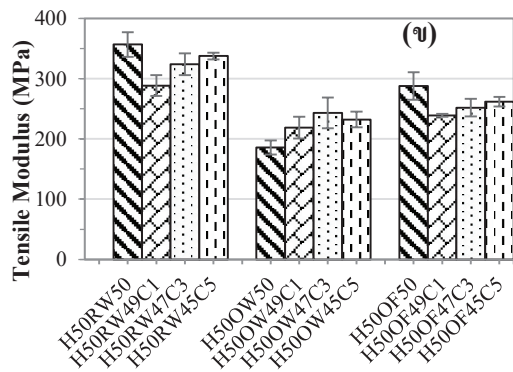
ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึง ของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ แสดงในรูปที่ 5 (ก) และ 5 (ข) ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า สมบัติการดึงมีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับสมบัติการคด โดยวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน เนื่องจากไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีคือ ลิกนิน (Lignin) ในปริมาณที่มากกว่าไม้ปาล์มน้ำมันและทางใบปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ของลิกนิน คือ ตัวประสานกับไฮโดรเจนอะตอม ณ ตำแหน่งแอลฟารวมเทริกซ์พลาสติก [6, 22] สอดคล้องกับ Nygård et al. [23] ซึ่งสรุปว่า เส้นใยที่อุดมด้วยลิกนินจะมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์พลาสติกมากขึ้น เช่นเดียวกันพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน

พฤติกรรมเหล่านี้สามารถพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาในรูปที่ 6 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การยึดเกาะระหว่างผงไม้ยางพารากับเมทริกซ์พลาสติกมีความแข็งแรงมากที่สุด ดังรูปที่ 6 (ก) นั่นคือ ช่องว่างระหว่างผงไม้ยางพาราและเมทริกซ์พลาสติกเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมันมีการยึดเกาะกันแบบหลวม ๆ ระหว่างผงไม้ปาล์มน้ำมันและเมทริกซ์พลาสติก ดังรูปที่ 6 (ข) นั่นคือ มีช่องว่างขนาดใหญ่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากบริเวณรอยต่อระหว่างผงไม้ปาล์มน้ำมันและเมทริกซ์พลาสติก เช่นเดียวกันในรูปที่ 6 (จ) แสดงการยึดเกาะระหว่างผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันและเมทริกซ์พลาสติกภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งพบว่ามีช่องว่างเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อเช่นกัน แต่ช่องว่างที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและน้อยกว่า

วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา การถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงไม้ประเภทอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Panthapulakkal and Sain [15] ที่พบว่า การเติมฟางข้าวสาลีในพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงให้ค่าความแข็งแรงดึงและคดสูงกว่าการเติมขี้ข้าวโพดหรือต้นข้าวโพดเป็นส่วนผสม เนื่องจากการยึดเกาะที่ดีกว่าระหว่างฟางข้าวสาลีและเมทริกซ์พลาสติก จนนำไปสู่การถ่ายทอดความเค้นจากพลาสติกสู่เส้นใยที่ดีกว่า เช่นเดียวกัน Ashori and Nourbakhsh [24] รายงานว่า โดยทั่วไปค่าความแข็งแรงและค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ขึ้นอยู่กับความสามารถการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของผงไม้และเมทริกซ์พลาสติก

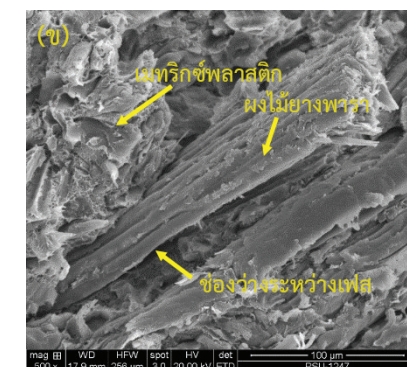
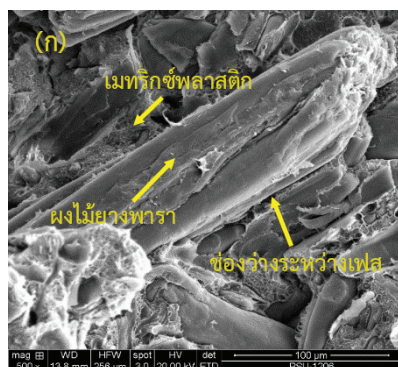


รูปที่ 5 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่า (ก) ความแข็งแรงดึง และ (ข) มอดูลัสการดึงของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้



รูปที่ 5 (ต่อ) ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสี
ต่อค่า (ก) ความแข็งแรงดึง และ (ข) โมดูลัสการดึงของ
วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

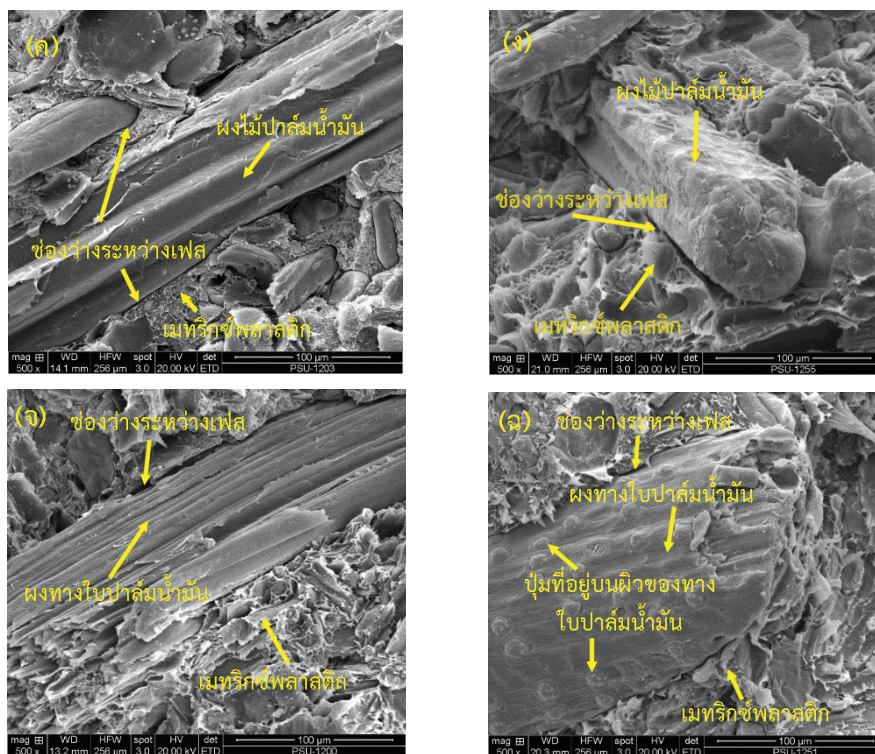
เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 1 wt% พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง อย่างไรก็ตามพบด้วยว่า เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 3 wt% วัสดุเชิงประกอบจากไม้ทั้ง 3 ประเภท มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมผงสี ผลการทดลองนี้สามารถพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาในรูปที่ 6 ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่เติมผงสี 3 wt% มีการยึดเกาะระหว่างผงไม้และเมทริกซ์พลาสติกที่แข็งแรงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ปราศจากการเติมผงสี กล่าวคือ วัสดุเชิงประกอบที่เติมผงสีมีรูพรุนภายในโครงสร้างและช่องว่างบริเวณรอยต่อของเฟส



รูปที่ 6 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ในสูตร (ก) H50RW50 (ข) H50RW47C3
(ค) H50OW50 (ง) H50OW47C3 (จ) H50OF50 และ (ฉ) H50OF47C3 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เกิดขึ้นน้อยกว่า (เปรียบเทียบที่ผงไม้ประเภทเดียวกัน) กระนั้นก็ตามค่าความแข็งแรงดึงลดลงอีกครั้ง เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 5 wt% ในวัสดุเชิงประกอบจากไม้ทั้ง 3 ประเภท จึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมผงสีในปริมาณมากจนเกินไป จะส่งผลในทางลบต่อความแข็งแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

สำหรับค่ามอดูลัสการดึงพบว่า มีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเติมผงสีปริมาณ 1 wt% เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมันมีค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 1 wt% หลังจากนั้นเมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นปริมาณ 3 wt% และ 5 wt% พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพาราและที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงสีที่เติมเป็นส่วนผสม อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบจากไม้ทั้ง 2 ประเภทนี้ เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสมมีค่ามอดูลัสการดึงต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ปราศจากการเติมผงสี สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า ผงสีที่ใช้เป็นส่วนผสมมีขนาดที่เล็กกว่าผงไม้และความแข็งแรงน้อยกว่าไม้ยางพาราและทางใบปาล์มน้ำมัน ทำให้เมื่อเติมเป็นส่วนผสมส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีค่ามอดูลัสการดึงลดลง

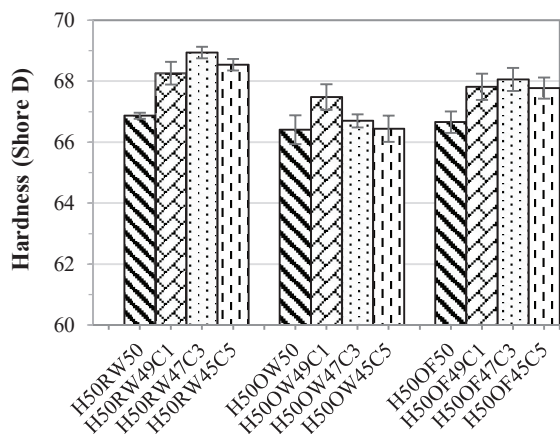


รูปที่ 6 (ต่อ) โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ในสูตร (ก) H50RW50 (ข) H50RW47C3 (ค) H50OW50 (ง) H50OW47C3 (จ) H50OF50 และ (ฉ) H50OF47C3 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

3.4 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่าความแข็ง

รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีค่าความแข็งสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน สิ่งนี้เป็นเพราะไม้ยางพารามีความแข็งมากกว่าไม้ปาล์มน้ำมัน ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 3 เมื่อเติมไม้ที่มีความแข็งสูงกว่าเข้าไปในเมทริกซ์พลาสติก จะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีความแข็งมากขึ้นตามความแข็งของผงไม้ที่เดิมเป็นส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Ratanawilai et al. [10] ที่พบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนเสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีความแข็งมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่

เสริมแรงด้วยผงเส้นใยผลปาล์มน้ำมัน เนื่องจากไม้ยางพารามีความแข็งมากกว่าเส้นใยผลปาล์มน้ำมัน เช่นเดียวกันยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมเท่ากัน เนื่องจากโครงสร้างของไม้ปาล์มน้ำมันมีช่องว่างและรูพรุนมากกว่าของทางใบปาล์มน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าทางปาล์มน้ำมันมีความแข็งมากกว่าไม้ปาล์มน้ำมัน จากผลการทดลองเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่า ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ขึ้นอยู่กับความแข็งของไม้ที่เดิมเป็นส่วนผสม



รูปที่ 7 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

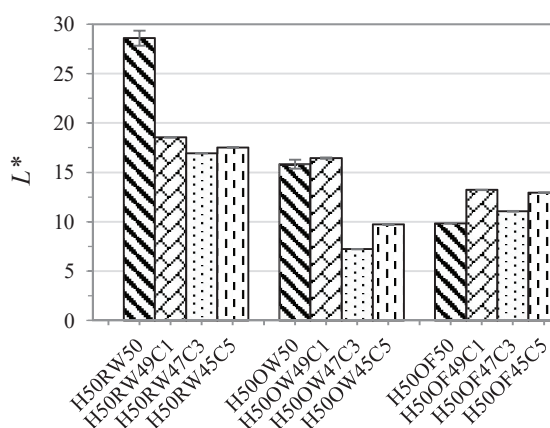
วัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารา และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงสีที่เติมเป็นส่วนผสม เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสมปริมาณ 1-3 wt% เพราะผงสีมีความสามารถการยึดเกาะกับเมทริกซ์พลาสติกดีกว่าผงไม้ แต่การเติมผงสีเป็นส่วนผสมปริมาณ 5 wt% กลับส่งผลให้ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเล็กน้อย เหตุผลของพฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับสมบัติการตัด เพราะผงสีเกิดการจับตัวเป็นก้อน ภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เช่นเดียวกันวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 1 wt% อย่างไรก็ตามค่าความแข็งลดลง เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 3-5 wt% พฤติกรรมเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่า การเติมผงสีในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลในทางลบต่อค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้

3.5 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่าความสว่างและค่าการเปลี่ยนสี

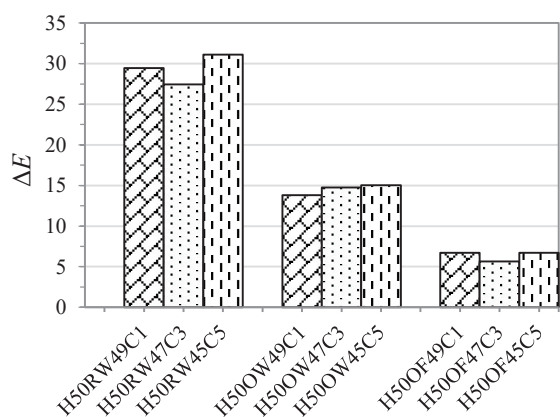
การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและค่าการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้แสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยางพารามีค่าความสว่าง

ลดลงอย่างชัดเจน (หมายถึง สีขาวลดลงแต่สีดำเพิ่มขึ้น) เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 1 wt% (H50RW49C1) และค่าความสว่างลดลงอีก เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 3 wt% (H50RW47C3) ทว่าค่าความสว่างกลับเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 5 wt% (H50RW45C5) ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบผสมผงไม้ปาล์มน้ำมัน และวัสดุเชิงประกอบผสมผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 1 wt% ค่าความสว่างของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสว่างลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบผสมผงไม้ปาล์มน้ำมัน เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 3 wt% (H50OW47C3) จากนั้นค่าความสว่างกลับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนอีกครั้ง เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 5 wt% (H50OW45C5)

การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยางพารา และวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับค่าความสว่าง โดยค่าการเปลี่ยนสีลดลง เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 3 wt% แต่ค่าการเปลี่ยนสีกลับเพิ่มขึ้น เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 5 wt% อย่างไรก็ตามพฤติกรรมที่น่าสนใจสามารถค้นพบได้ในวัสดุเชิงประกอบผสมผงไม้ปาล์มน้ำมัน โดยค่าการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงสีที่เติมเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อค่าความสว่าง



รูปที่ 9 ผลกระทบของประเภทไม้และปริมาณผงสีต่อการเปลี่ยนสี

ผลการทดลองข้างต้นสามารถพิสูจน์ได้จากตารางที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่า วัสดุเชิงประกอบผสมผงไม้ยางพารามีสีน้ำตาลคล้ำยกลึงไม้ธรรมชาติ ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบผสมผงไม้ปาล์มน้ำมันมีสีน้ำตาลเข้ม และวัสดุเชิงประกอบ

ผสมผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีสีค่อนข้างดำ ซึ่งสีของวัสดุเชิงประกอบเหล่านี้มีการผันแปรตามสีของผงไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สีของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ขึ้นอยู่กับสีของไม้ธรรมชาติแต่ละประเภท นอกจากนี้ภาพถ่ายดิจิทัลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยังแสดงด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบมีความเป็นสีเขียวเข้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 1-3 wt% ทว่าเมื่อเติมผงสีเป็นส่วนผสม 5 wt% กลับส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสีเขียวอ่อนลง ซึ่งมีผลสอดคล้องกับค่าความสว่างของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ จากผลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่า หากต้องการให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีสีเขียวเข้มที่สุด ปริมาณผงสี 3 wt% ถือว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสม เพราะการเติมผงสีในปริมาณที่มากกว่านี้ ไม่สามารถทำให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้มีสีเขียวที่เข้มขึ้นได้อีก

ตารางที่ 4 ภาพถ่ายดิจิทัลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ที่มีส่วนผสมของไม้ประเภทต่าง ๆ และผงสีปริมาณต่าง ๆ

Pigment (wt%)	H50RW50	H50OW50	H50OF50
None			
1			
3			

ตารางที่ 4 (ต่อ) ภาพถ่ายดิจิทัลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ที่มีส่วนผสมของไม้ประเภทต่าง ๆ และผงสีปริมาณต่าง ๆ

Pigment (wt%)	H50RW50	H50OW50	H50OF50
5			

4. สรุปผล

ประเภทไม้ธรรมชาติและปริมาณผงสีมีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไม้ โดยเมื่อเปรียบเทียบในวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมผงสี พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีสมบัติการดัด การคืบ (ทั้งความแข็งแรงและมอดูลัส) และความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมัน และที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมัน ในขณะที่เดียวกัน พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ทางใบปาล์มน้ำมันมีสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมันเช่นเดียวกัน จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า สมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของไม้แต่ละประเภท และขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของไม้ที่เติมเป็นส่วนผสม ซึ่งเมื่อเติมไม้ที่มีความแข็งแรงกว่าเป็นส่วนผสม จะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีสมบัติที่

ดีกว่าตามไปด้วย นอกจากนี้การเติมผงสีในปริมาณที่เล็กน้อยสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ได้ อย่างไรก็ตามการเติมผงสีในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลในทางลบต่อสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบเช่นกัน และวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ยางพารามีสีน้ำตาลคล้ำคลึงกับไม้ธรรมชาติมากที่สุด ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยผงไม้ปาล์มน้ำมันมีสีน้ำตาลเข้ม (สีน้ำตาลไม่โอ๊ค) ดังนั้นหากต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ไม้เทียมให้มีสีน้ำตาลไม่โอ๊ค สามารถใช้ผงไม้ปาล์มเป็นส่วนผสม โดยไม่จำเป็นต้องเติมผงสีเป็นส่วนผสม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก งบประมาณเงินแผ่นดิน (รหัสข้อเสนอการวิจัย 2560A17102140) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2560 และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. โรงพิมพ์สำนักงานพระพุทธศาสนาแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, 2558.
- [2] Rimdusit, S., Smittakorn, W., Jittarom, S. and Tiptipakorn, S. Highly filled polypropylene rubber wood flour composites. *Engineering Journal*, 2011; 15: 17-30.
- [3] ชาตรี หอมเขียว และธนศ รัตนวิไล. ส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและผงไม้ยางพาราหลังการแช่น้ำโดยใช้การออกแบบการทดลอง. *วารสารวิจัย มช.*, 2557; 19: 780-793.

- [4] พิระพงษ์ ชูแก้ว, สมชาย ชูโหม และธนศ รัตนวิไล. ผลของพันธุ์ยางพารา เส้นผ่านศูนย์กลางไม้ท่อนและทักษะแรงงานที่มีต่ออัตราผลผลิตไม้ยางพาราแปรรูป. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2561; 25(2): 135 – 141.
- [5] ทางปาล์มน้ำมันใช้เลี้ยงสัตว์, 2555, 2012, [online] available: <http://www.farmkaset.org/contentsNET/default.aspx?content=00849#>, 14 กุมภาพันธ์ 2555.
- [6] ชาตรี หอมเขียว. การพัฒนาและการประยุกต์ใช้วัสดุเชิงประกอบเทอร์โมพลาสติกและเส้นใยธรรมชาติเชิงอุตสาหกรรม. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, 2557; 10: 97-110.
- [7] Adhikary, K. B. Development of wood flour-recycled polymer composite panels as building materials. PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2008.
- [8] Li, B., Jiang, H., Guo, L. and Shi, H. Comparative study on the effect of manchurian ash and larch wood flour on mechanical property, morphology, and rheology of HDPE/wood flour composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008; 107: 2520-2530.
- [9] Gacitúa, W. and Wolcott, M. Morphology of wood species affecting wood-thermoplastic interaction: microstructure and mechanical adhesion. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2009; 11(3): 217-231.
- [10] Ratanawilai, T., Nakawiro, K., Deachsrijan, A. and Homkhiew, C. Influence of wood species and particle size on mechanical and thermal properties of wood polypropylene composites. *Fibers and Polymers*, 2014; 15: 2160-2168.
- [11] Hon, D.N.S. and Shiraishi, N. Wood and Cellulosic Chemistry (2nded). Marcel Dekker Inc., 2001.
- [12] Petchpradab, P., Yoshida, T., Charinpanitkul, T. and Matsumura, Y. Hydrothermal pretreatment of rubber wood for the Saccharification process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009; 48: 4587-4591.
- [13] Yuliansyah, A. T. and Hirajima, T. Efficacy of hydrothermal treatment for production of solid fuel from oil palm wastes. Resource Management for Sustainable Agriculture, Book edited by Abrol, V and Sharma, P, 2012.
- [14] Slaughter, A. E. Design and fatigue of a structural wood-plastic composite. Master Thesis, Washington State University, United States, 2004.
- [15] Panthapulakkal, S. and Sain, M. Agro-residue reinforced high-density polyethylene composites: fiber characterization and analysis of composite properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007; 38: 1445-1454.
- [16] Bouafif, H., Koubaa, A., Perre, P. and Cloutier, A. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009; 40: 1975-1981.
- [17] Nourbakhsh, A. and Kouhpayehzadeh, M. Mechanical properties and water absorption of fiber-reinforced polypropylene composites prepared by bagasse and beech fiber. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009; 114: 653-657.
- [18] Tepaya, T. Identification of good practice in sawn rubberwood drying process. The Thailand Research Fund, Thailand, 1998.
- [19] Ratanawilai, T., Chumthong, T. and Kirdkong, S. An investigation on the mechanical properties of trunks of palm oil trees for the furniture industry. *Journal of Oil Palm Research*, 2006; 114-121.
- [20] Salemane, M. G. and Luyt, A. S. Thermal and mechanical properties of polypropylene-wood powder composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006; 100: 4173-4180.
- [21] ชาตรี หอมเขียว, สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์ และวรงค์ บุญช่วยแทน. อิทธิพลของสายพันธุ์ไม้และขนาดความหนาต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของแผ่นใยไม้อัดที่ไม่มีตัวประสาน. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 2559; 33: 18-23.
- [22] Ge, X. C., Li, X. H. and Meng, Y. Z. Tensile properties, morphology, and thermal behavior of PVC composites containing pine flour and bamboo flour. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004; 93: 1804-1811.

- [23] Nygård, P., Tanem, B. S., Karlsen, T., Brachet, P. and Leinsvang, B. Extrusion-based wood fibre-PP composites: Wood powder and pelletized wood fibres - a comparative study. *Composites Science and Technology*, 2008; 68: 3418-3424.
- [24] Ashori, A., and Nourbakhsh, A. Mechanical behavior of agro-residue-reinforced polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009; 111: 2616-20.



แบบจำลองสถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย ที่ปนเปื้อนฟอสเฟต ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า Optimization Modeling for Treatment of Wastewater Containing Phosphate by Electrochemical Process

ศตวรรษ ทวงชน^{1*} วัชรวิญญ์ ดาวสว่าง²

Sattawat Thuangchon^{1*} and Wacharawish Daosawang²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม อ.ศรีสงคราม จ.นครพนม 48150

¹Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
A. Kantarawichai, Mahasarakham, Thailand 44150

²Department of Electrical Engineering, Technology Srisongkram college, Nakhonphanom University
A. Srisongkram, Nakhonphanom, Thailand 48150

* E-mail: sattawat.t@msu.ac.th, sattawat.th@gmail.com, Tel. 0918628896

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองสำหรับสถานะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า ออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง หาสถานะที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ ศึกษาปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย เวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) ทดลองด้วยถึงปฏิกิริยาแบบเบทซ์ที่เติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใช้แผ่นอะลูมิเนียมสองแผ่น ที่มีพื้นที่ประสิทธิผลแผ่นละ 10 ตารางเซนติเมตร เป็นขั้วอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ทุกปัจจัยที่ใช้ศึกษามีอิทธิพลต่อการบำบัดฟอสเฟตอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สถานะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดฟอสเฟตคำนวณได้จากแบบจำลองถดถอยกำลังสอง ทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยการเลือกสถานะที่เหมาะสมมาทดลองซ้ำ 1 สถานะ พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสียเท่ากับ 13.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตที่ต้องการร้อยละ 80 สถานะที่เหมาะสมคือ เวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า เท่ากับ 10.82 นาที่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 9.19 มิลลิแอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เท่ากับ 7.73 ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตจากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81.78 แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการเท่ากับร้อยละ 1.77 แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมในการทำนายประสิทธิภาพการบำบัดเมื่ออยู่ในสถานะที่จำเพาะ คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 10 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า 5 – 35 นาที่ กระแสไฟฟ้า 5 – 12.5 มิลลิแอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 6 – 9 โดยประสิทธิภาพจากการทำนายจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70 - 90

คำสำคัญ: ฟอสฟอรัส บำบัด อิเล็กโทรไลต์ แอโนด

ABSTRACT

This research studied the mathematical modeling for optimization of the operating conditions and investigation of factors affecting on treatment of wastewater containing phosphate by electrochemical process. A central composite experimental design (CCD) combining with response surface method (RSM) and multiple regression analysis was employed to establish the model and to study effects of four independent variables on phosphate removal. These variables included initial concentration of phosphate in wastewater, electrical discharging time, applied current and initial pH of wastewater. Levels of significance for the operating conditions were tested by means of the analysis of variance (ANOVA) with 95 % confidence limits ($\alpha = 0.05$). All tests were conducted with batch experiments using reactors of working volume of 200 ml filled with synthetic wastewater. Two Aluminium plates with effective areas of 10 cm² were used as electrodes with a separation distance of 2 cm. Results indicated that all operating conditions were at the significance level of 0.05 ($P < 0.05$). The optimum conditions were obtained by solving the quadratic regression model. The model validation was conducted using one of the experimental trials, which had the initial phosphate concentration of 13.34 mg/l and required a 80% removal efficiency. The model optimization provided an electrical discharging time of 10.82 minutes, applied current of 9.19 mA and initial pH of wastewater of 7.73. An average experimental value for phosphate removal was 81.78%, which was slightly 1.77% different from the modeled value. However, the application of this optimization model was limited to the certain conditions including, a 10 - 35 mg/l initial phosphate concentration range, a 5 - 35 minute electrical discharging range, a 5 - 12.5 mA applied current range, and an initial pH range of 6 – 9. The predicted phosphate removals were expected to be 70 - 90%.

Keywords : phosphorus, removal, electrocoagulation

1. บทนำ

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) เป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่มีความจำเป็นและเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตขั้นต้น (primary producer) ในห่วงโซ่อาหาร (food chain) ด้วยแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นของจำนวนประชากร ส่งผลให้ความต้องการด้านอาหารมีมากขึ้น และความต้องการใช้ฟอสฟอรัสในกิจกรรมต่างๆจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ในปัจจุบัน ฟอสฟอรัสได้ถูกนำมาใช้ในกิจกรรมของมนุษย์อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการผลิตปุ๋ย ใช้เป็นส่วนประกอบในสารกำจัดศัตรูพืช (pesticide) เช่น สารกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต (Organophosphate) หรือใช้เป็นส่วนประกอบของสารซักล้างหรือทำความสะอาดต่างๆ เป็นต้น สารประกอบฟอสฟอรัสที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆเหล่านี้ของมนุษย์หากเกิดการปนเปื้อนออกสู่ธรรมชาติในปริมาณมาก ก็มักจะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการ

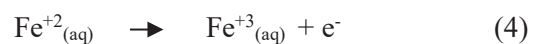
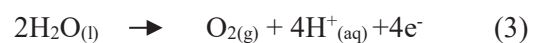
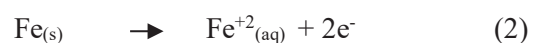
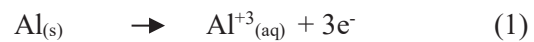
ปนเปื้อนของน้ำเสียชุมชนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากในน้ำเสียชุมชนมักจะปนเปื้อนไปด้วยสารประกอบฟอสเฟต-ฟอสฟอรัส ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) ทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ หากน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการบำบัดก่อน ก็อาจจะทำให้พืชน้ำต่างๆ แพลงค์ตอนพืช และสาหร่ายเซลล์เดียว เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนมีจำนวนมากผิดปกติ เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า สาหร่ายเบ่งบาน (algal bloom) [1] และหากปล่อยทิ้งไว้ ไม่รีบทำการแก้ไข ก็จะส่งผลให้ระบบนิเวศน์ในแหล่งน้ำนั้นเสียสมดุล ขาดความหลากหลายทางชีวภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมในการดำรงชีวิต เกิดการตายและทับถมกันของสัตว์น้ำ แพลงค์ตอนและพืชน้ำต่างๆ จนก่อให้เกิดการเน่าเสียของน้ำในแหล่งน้ำนั้นตามมา ทำให้มนุษย์ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นได้ตามปกติอีกต่อไป โดยเรียกปรากฏการณ์ที่น้ำเน่าเสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของแพลงค์ตอนพืชสาหร่ายเซลล์เดียวและพืชน้ำที่มี

มากกว่าปกตินี้ว่า ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) [2] ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการบำบัดหรือกำจัด ฟอสเฟต - ฟอสฟอรัส ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ

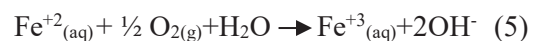
การกำจัดหรือบำบัดฟอสเฟต - ฟอสฟอรัส ที่ปนเปื้อนในน้ำนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การย่อยสลายทางชีวภาพ วิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้อย แต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างต่ำและในการควบคุมหรือเดินระบบมีความยุ่งยากซับซ้อน ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญโดยเฉพาะ หรืออาจจะทำการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมี (chemical precipitation) เช่น ปูนขาว (lime) สารส้ม (Alum) หรือสารประกอบเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้สารเคมีและเกิดตะกอนจากปฏิกิริยาเป็นจำนวนมาก ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นตามมา การบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า (electrochemical process) เป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ควบคุมระบบได้ง่ายและใช้ได้กับน้ำเสียหลากหลายชนิด ทั้งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม [3-5] และน้ำเสียชุมชน [6-7] กระบวนการนี้จะอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า (electrochemical reaction) ที่มีกลไกที่ซับซ้อนในการบำบัดมลสารในน้ำ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ที่เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าผ่านตัวนำลงไปในสารละลาย จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (electrode) และสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลติกส์ (electrolytic cell) เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นที่บริเวณขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยที่ขั้วบวก (anode) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้โลหะที่ใช้ทำขั้วบวกเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนและปล่อยไอออนบวกของโลหะ ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยมใช้ อะลูมิเนียม หรือเหล็ก ปล่อยอะลูมิเนียมไอออน (Al^{+3}) หรือเหล็กไอออน (Fe^{+2})

ออกมาในสารละลาย ไอออนบวกเหล่านี้จะไปรวมกับมลสารที่มีประจุลบในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากและตกตะกอนผลึก (precipitation) แยกตัวออกมาจากสารละลายได้ ขณะเดียวกันที่บริเวณขั้วลบ (cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ของโมเลกุลน้ำ (H_2O) เกิดเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งสามารถไปรวมกับไอออนบวกของโลหะที่ใช้ทำขั้วบวก (Al^{+3} , Fe^{+2}) เกิดเป็นตะกอน (floc) ไฮดรอกไซด์ของโลหะนั้นๆ [7] โดยตะกอนผลึกของสารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทั้งหมดนี้ ยังสามารถดูดซับ (adsorption) มลสารบางชนิดเอาไว้ที่ผิวได้ด้วย [8-10] เมื่อตะกอนเหล่านี้ถูกแยกตัวออกมาจากสารละลายจึงสามารถกำจัดมลสารเหล่านี้ออกไปได้พร้อมๆกัน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อะลูมิเนียมหรือเหล็ก เป็นขั้วอิเล็กโทรดแสดงดังสมการที่ (1) – (8) ดังต่อไปนี้ [8, 11-12]

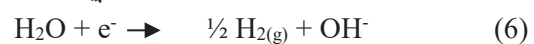
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (Anode) :



เมื่อมีออกซิเจนอยู่ในสารละลาย Fe^{+2} จะถูกเปลี่ยนไปเป็น Fe^{+3} จากปฏิกิริยาออกซิเดชันดังสมการ (5)



ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด (Cathode) :



ปฏิกิริยารวมในสารละลาย (bulk solution) เมื่อมีการปนเปื้อนด้วยฟอสเฟต [12]



ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาทดลองบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า พบว่า

สามารถบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถบำบัดได้ถึงร้อยละ 80 – 99 [6, 10, 13-14] แต่เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้านี้ จะอาศัยการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักในการบำบัด ประกอบกับการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดในขณะบำบัด ทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและการซ่อมบำรุงระบบสูง ระบบนี้จึงไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายเท่าที่ควร แต่ในช่วง ทศวรรษที่ผ่านมา ได้เกิดการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานทดแทนเป็นอย่างมาก ทั้งการผลิตไฟฟ้าจาก พลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ได้ จากการบำบัดน้ำเสีย หรือการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซไฮโดรเจน ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า จึงมีความ คุ่มค่าและน่าสนใจในการนำมาใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าจะมีแนวโน้มลดลง การออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมและมี ประสิทธิภาพในการใช้งานก็ยังเป็นสิ่งที่มีความจำเป ็นอย่างมาก ซึ่งในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วย กระบวนการเคมีไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมและมี ประสิทธิภาพในการใช้งานนั้น จำเป็นต้องทราบค่ากำหนด หรือค่าแนะนำในการออกแบบ (design criteria) ที่ เหมาะสมสำหรับน้ำเสียแต่ละชนิด แต่ในปัจจุบันยังมี รายงานเกี่ยวกับเรื่องนี้น้อยมาก ทำให้การนำไปขยายการ ทดลองเป็นระดับต้นแบบ (pilot scale) หรือการนำไป ประยุกต์ใช้งานจริงเกิดข้อจำกัด ดังนั้นเพื่อเติมเต็มความร ู้ ความเข้าใจและลดข้อจำกัดการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว มา งานวิจัยในครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลและ ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการ บำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า เพื่อ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาสภาวะที่ เหมาะสมในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย ซึ่งจะสามารถ พัฒนาไปเป็นค่ากำหนดหรือค่าแนะนำในการออกแบบ ระบบได้ต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการทดลอง

2.1 ระเบียบวิธีวิจัยและขอบเขตการทดลอง

การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองในระดับ ห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) ทำการทดลองแบบ แบตช์ (batch) ที่อุณหภูมิห้อง (กำหนดอุณหภูมิด้วย เครื่องปรับอากาศที่ 25 องศาเซลเซียส) ออกแบบการ ทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง (central composite design) กำหนดให้มีการทำซ้ำ (replication) ที่จุดกลาง (center point) 6 ครั้ง วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยการ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอย เชิงพหุ (multiple regression analysis) หาสภาวะที่ เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) ทำการทดลองตัวอย่างละ 1 ซ้ำ และ เปลี่ยนแผ่นขั้วอิเล็กโทรดใหม่ทุกการทดลอง

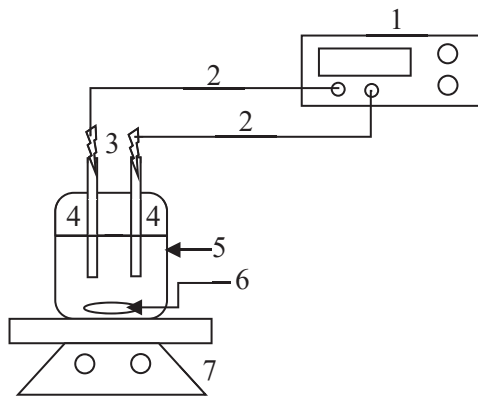
2.2 วัสดุและสารเคมี

สารละลายทั้งหมดในการทดลองครั้งนี้จะเตรียมโดย ใช้น้ำกลั่น (distilled water) สารเคมีทั้งหมดใช้ ยี่ห้อ UNILAB เกรดปฏิบัติการ (laboratory grade) น้ำเสีย สังกะเรห์เตรียมจาก ไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธ ฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ปรับค่าพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสียสังกะเรห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริก (HCl) น้ำตัวอย่างที่สิ้นสุดการทดลองแล้วจะถูกกรองผ่าน กระดาษกรองใยแก้ว ยี่ห้อ Whatman GF/C ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้บีกเกอร์ (beaker) ขนาด 300 มิลลิลิตรเป็นถังปฏิกรณ์ วัดค่าพีเอชของสารละลาย ด้วยเครื่องวัดพีเอช (Mettler Toledo pH meter model seven easy™) กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ขั้วอิเล็กโทรดทำจากแผ่นอะลูมิเนียม

เกรดการค้า (commercial grade) ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไป ความหนา 1 มิลลิเมตร ตัดให้มีความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการจุ่มในสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริก (5% โดยน้ำหนัก) ล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ อบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปลอ่ยให้เย็นและเก็บรักษาไว้ในโถสุญญากาศความชื้นก่อนนำไปทดลอง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (direct current power supply) สามารถปรับค่ากระแสได้ในช่วง 0 – 3 แอมแปร์ ปรับความต่างศักย์ได้ในช่วง 0 – 30 โวลต์ ต่อเข้ากับขั้วอิเล็กโทรดด้วยที่หนีบปากจระเข้ แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (2) สายไฟ (3) ที่หนีบปากจระเข้ (4) แผ่นอิเล็กโทรด (5) บีกเกอร์ (6) แท่งแม่เหล็ก (7) เครื่องกวนแม่เหล็ก

2.4 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์และผลการทดลอง

การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่คงเหลืออยู่ จะวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน [15] ด้วยวิธีแวนาโดโมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ยี่ห้อ PG Instrument รุ่น T60 UV Vis นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่

และคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตจากสมการที่ (9) ดังนี้

$$R = 100 \times (C_i - C_f) / C_i \quad (9)$$

เมื่อ R คือประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต (ร้อยละ)

C_i คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตเริ่มต้น (มก./ล.)

C_f คือ ความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลือ (มก./ล.)

3. วิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัด จะออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง กำหนดให้ประสิทธิภาพการบำบัดเป็นผลตอบสนอง (response) และกำหนดปัจจัยที่ใช้ศึกษา 4 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มิลลิกรัมต่อลิตร) ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาติ) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมแปร์) และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ทดลอง 5 ระดับ ค่าแอลฟา (axial point; α) เท่ากับ 2 จำนวนการทำซ้ำ (replication) ที่จุดกลาง (center point) เท่ากับ 6 ปัจจัยและค่าระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยและค่าระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

parameters	level				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
X_1	2.7	10.7	18.7	26.7	34.7
X_2	5	20	35	50	65
X_3	2.5	5	7.5	10	12.5
X_4	5	6	7	8	9

หมายเหตุ :

X_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มก./ล.)

X_2 คือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาติ)

X_3 คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมแปร์)

X_4 คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

3.2 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐานโดยการชั่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ที่อบแห้ง 219.5 มิลลิกรัม เติมน้ำกลั่นเพื่อปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l as PO_4^{3-}) จากนั้นนำไปเจือจางให้มีความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ได้ปริมาตรอย่างน้อย 35 มิลลิลิตร แล้วนำไปเติมสารเคมีตามวิธีแวนาโดมอลิบโดฟอสฟอริกแอซิด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำค่าความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตพล็อตกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ จะได้กราฟที่มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง สามารถนำสมการเส้นตรงที่ได้มาคำนวณย้อนกลับหาค่าความเข้มข้นของฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างได้

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และขั้นตอนการทดลอง

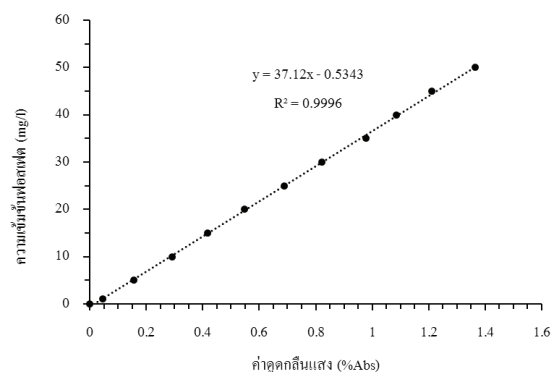
เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยชั่งไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 100 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรด้วยขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ให้เป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายตั้งต้นที่มีไดโซเดียมไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟตไดไฮเดรต เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ($\text{mg/l as Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากนั้นปิเปต (pipet) สารละลายตั้งต้นไปเจือจางในขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตรให้มีความเข้มข้น 5, 20, 35, 50 และ 65 มิลลิกรัมต่อลิตร ($\text{mg/l as Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) คิดเป็นความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 2.7, 10.7, 18.7, 26.7 และ 34.7 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l as PO_4^{3-}) ตามลำดับ ตวงน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับความเข้มข้นแล้วด้วยกระบอกตวงให้ได้ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ซึ่งใช้เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร ปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือสารละลายเจือจางกรดไฮโดรคลอริก จุ่มขั้วอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ ให้แต่ละขั้วจุ่มลงไปนในสารละลายเป็นระยะ 5 เซนติเมตร

(พื้นที่ประสิทธิผลของขั้วแอโนด เท่ากับ 10 ตารางเซนติเมตร) ติดตั้งให้ขั้วห่างกันเป็นระยะ 2 เซนติเมตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นต่อขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงด้วยที่คิปปากจิ้งจก เปิดสวิตช์เครื่องจ่ายไฟฟ้าแล้วจับเวลา เมื่อสิ้นสุดการทดลอง กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรองโดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ นำน้ำส่วนที่ผ่านกระดาษกรองไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองไปคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด แล้ววิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลและสร้างสมการความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

4. ผลการทดลอง

4.1 กราฟมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

เมื่อนำความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตพล็อตกับค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ จะได้แผนผังความสัมพันธ์ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับร้อยละ 99.96 แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังความสัมพันธ์ของความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง

โดยความเข้มข้นมาตรฐานของฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร จะมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ดังสมการที่ (10)

$$Y = 37.12X - 0.5343 \quad (10)$$

เมื่อ

Y คือ ความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสีย (มก./ล.)

X คือ ค่าการดูดกลืนแสง (ร้อยละ)

4.2 การทดสอบความเหมาะสมทางสถิติของชุดข้อมูล

เมื่อทำการกำหนดปัจจัยและค่าระดับที่ใช้ในการออกแบบการทดลองด้วยวิธีส่วนประสมกลาง จะได้จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 30 ชุดการทดลอง สภาวะที่ใช้ในการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการทดลองและประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตที่ได้จากการทดลอง

Run no.	parameters				response
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y _{obs}
1	2.7	35	7.5	7	68.22
2	10.7	20	5	6	82.59
3	10.7	50	10	6	93.89
4	10.7	50	5	6	99.15
5	10.7	20	10	6	98.48
6	10.7	50	10	8	89.37
7	10.7	20	10	8	81.40
8	10.7	50	5	8	87.47
9	10.7	20	5	8	81.33
10	18.7	35	7.5	9	82.56
11	18.7	65	7.5	7	86.57
12	18.7	35	7.5	7	83.10
13	18.7	35	7.5	7	80.95
14	18.7	35	7.5	7	80.68
15	18.7	35	7.5	7	81.50
16	18.7	35	7.5	7	81.46
17	18.7	35	7.5	7	81.33
18	18.7	35	12.5	7	83.62
19	18.7	35	7.5	5	77.26
20	18.7	5	7.5	7	81.52
21	18.7	35	2.5	7	78.14
22	26.7	20	10	8	82.19
23	26.7	50	5	8	81.71
24	26.7	50	10	6	79.33
25	26.7	50	10	8	86.67
26	26.7	20	10	6	83.70
27	26.7	50	5	6	72.29
28	26.7	20	5	8	80.92
29	26.7	20	5	6	77.42
30	34.7	35	7.5	7	78.52

หมายเหตุ :

X₁ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มก./ล.)

X₂ คือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาท)

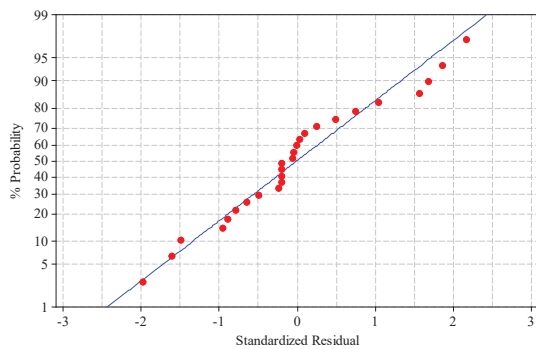
X₃ คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมป์)

X₄ คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

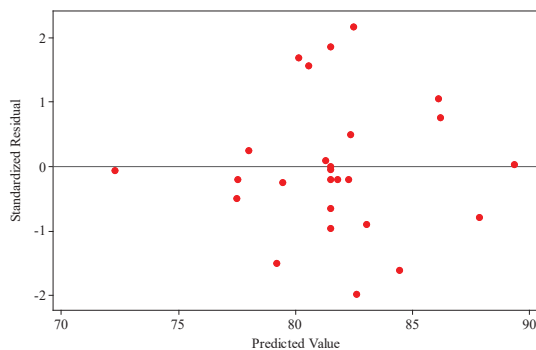
Y_{obs} คือ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต (ร้อยละ)

เมื่อนำข้อมูลทั้ง 30 ชุดการทดลอง มาทดสอบข้อกำหนดทางสถิติ พบว่า มีชุดข้อมูลบางชุดที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) มีความผิดปกติสูง เป็นไปได้ว่าชุดข้อมูลเหล่านั้นอาจเกิดความผิดปกติจากปัจจัยภายนอกหรือการทดลอง ซึ่งจะส่งผลให้สมการหรือแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละปัจจัยกับผลตอบสนอง (Y_{obs}) ดังนั้นเพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยกับผลตอบสนองได้อย่างเหมาะสมและมีความแม่นยำ จึงพิจารณาตัดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติ ได้แก่ ข้อมูลจากชุดการทดลองที่ 1, 3, 4 และ 5 ออกจากการวิเคราะห์ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติอีกครั้ง ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อทำการพล็อตค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal % probability) กับ ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน ความสัมพันธ์จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงทำมุมใกล้เคียง 45 องศา (รูปที่ 3) ดังนั้นข้อมูลที่นำเข้าวิเคราะห์เป็นข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าทำนายผลตอบสนอง (Predicted Value) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่มีรูปแบบแน่นอน (รูปที่ 4) ดังนั้นข้อมูลที่นำเข้าวิเคราะห์ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ (constant error) เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง (run number) พบว่าไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติและข้อมูลมีการกระจายตัวไม่มีรูปแบบแน่นอน (รูปที่ 5) ดังนั้นข้อมูลที่นำเข้าวิเคราะห์เป็นข้อมูลแบบสุ่ม มีความ

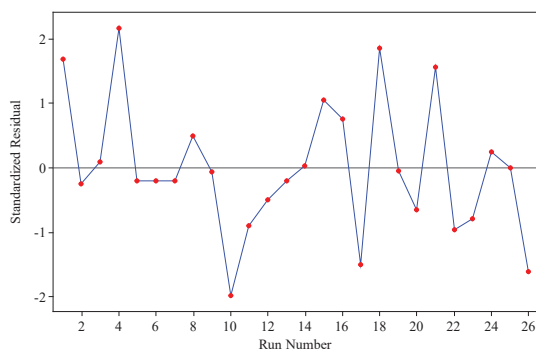
เป็นอิสระต่อกันและเหมาะสมที่จะใช้สร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3 แผนภาพการกระจายตัวร้อยละความน่าจะเป็นปกติกับส่วนเหลือมาตรฐาน



รูปที่ 4 แผนภาพการกระจายตัวส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าทำนายผลตอบสนอง



รูปที่ 5 แผนภาพการกระจายตัวส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง

4.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

หลังจากทดสอบความเหมาะสมทางสถิติของชุดข้อมูลแล้ว จะทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการตัวแบบที่สร้างขึ้นโดยการวิเคราะห์ ANOVA ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่ใช้ทดลองทั้ง 4 ปัจจัย คือความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต ($P=0.0001$) ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า ($P=0.0024$) กระแสไฟฟ้าที่ใช้ ($P<0.0001$) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ($P=0.0002$) มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยมีสมการความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดดังสมการที่ (11) ดังนี้

$$Y_{\text{obs}} = 90.3507 - 1.2224X_1 - 0.8831X_2 + 1.6258X_3 + 1.7048X_4 - 0.0103X_1X_2 + 0.0354X_1X_3 + 0.1154X_1X_4 + 0.0144X_2X_3 + 0.1144X_2X_4 - 0.2836X_3X_4 + 0.0069X_1^2 + 0.0032X_2^2 - 0.0109X_3^2 - 0.3107X_4^2 \quad (11)$$

โดย

Y_{obs} คือ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต (ร้อยละ)

X_1 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (มก./ล.)

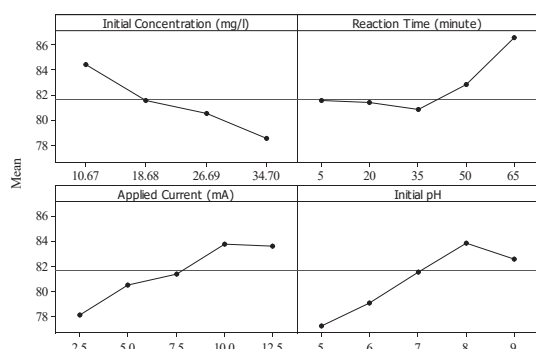
X_2 คือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (นาที)

X_3 คือ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (มิลลิแอมป์)

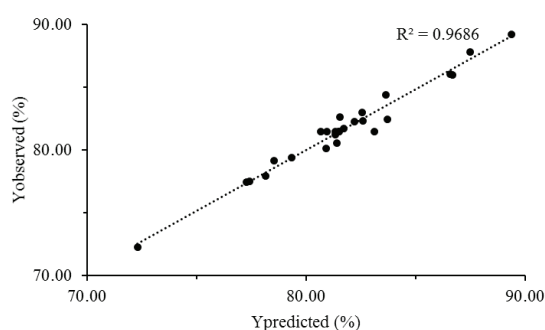
X_4 คือ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแต่ละปัจจัย เมื่อกำหนดประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ระหว่างร้อยละ 70 – 90 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะแปรผันตามระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (ช่วงพีเอช 5 – 8) แต่จะแปรผกผันกับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต แผนภาพความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อนำประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลอง (Y_{observed}) กับประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนาย ($Y_{\text{predicted}}$) มาสร้างแผนภาพความสัมพันธ์พบว่า มีแนวโน้มสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง โดยมีค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับร้อยละ 96.86 แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แผนภาพความสัมพันธ์ของของแต่ละปัจจัยกับประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟต



รูปที่ 7 แผนภาพความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทดลองกับประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้จากการทำนาย

เมื่อทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการตัวแบบที่สร้างขึ้น พบว่า สมการตัวแบบมีความเหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.0001$) และเมื่อทดสอบการขาดความสมบูรณ์ของสมการ (lack of fit) ที่สร้างขึ้นพบว่า การขาดความสมบูรณ์ของสมการไม่มีนัยสำคัญ ($P = 0.3546$) (ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงดังตารางที่ 3) ดังนั้น สมการตัวแบบที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมในการนำมาอธิบายอิทธิพลของปัจจัยแต่ละปัจจัยที่ใช้ทดลองและสามารถนำมาใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียได้เมื่อทราบค่าของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย

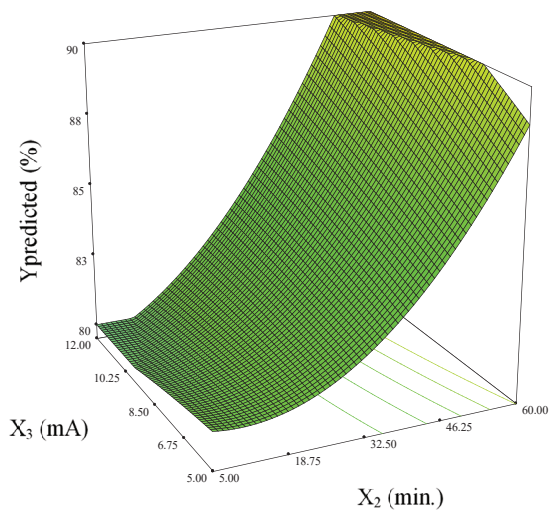
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยที่ศึกษาและตัวแบบสมการที่สร้างขึ้น

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	299.93	14	21.42	24.29	< 0.0001
X ₁	30.60	1	30.60	34.70	0.0001
X ₂	13.49	1	13.49	15.30	0.0024
X ₃	44.16	1	44.16	50.07	< 0.0001
X ₄	27.12	1	27.12	30.75	0.0002
X ₁ X ₂	15.05	1	15.05	17.07	0.0017
X ₁ X ₃	4.98	1	4.98	5.64	0.0368
X ₁ X ₄	6.64	1	6.64	7.53	0.0191
X ₂ X ₃	3.59	1	3.59	4.08	0.0686
X ₂ X ₄	29.10	1	29.10	33.00	0.0001
X ₃ X ₄	4.96	1	4.96	5.63	0.0370
X ₁ ²	2.11	1	2.11	2.39	0.1503
X ₂ ²	13.83	1	13.83	15.68	0.0022
X ₃ ²	0.12	1	0.12	0.14	0.7157
X ₄ ²	2.55	1	2.55	2.90	0.1168
Residual	9.70	11	0.88		
Lack of Fit	6.14	6	1.02	1.43	0.3546
Pure Error	3.56	5	0.71		
Cor. Total	309.63	25			

4.3 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและการทดสอบความแม่นยำของสมการ

ทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสเฟต ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยกำหนดประสิทธิภาพการบำบัดที่ต้องการ (Y_{obs}) ให้มีค่าระหว่างร้อยละ 70 - 90 ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต (X_1) เท่ากับ 13.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า (X_2) มีค่าระหว่าง 5 - 60 นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (X_3) มีค่าระหว่าง 2.5 - 15 มิลลิแอมแปร์ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (X_4) มีค่าระหว่าง 5 - 9 ผลการวิเคราะห์พบว่า หากต้องการประสิทธิภาพการบำบัดประมาณร้อยละ 80 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับข้อกำหนดที่ต้องการคือ ระยะเวลาการปล่อยประจุไฟฟ้า เท่ากับ 10.82 นาที กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 9.19 มิลลิแอมแปร์ ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7.73 จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดจากการทำนายเท่ากับร้อยละ 80.33 ทำการ

ทดลองซ้ำด้วยสภาวะดังกล่าวจำนวน 3 ซ้ำ แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทำนายผลการทดลองซ้ำพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81.78 แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนาย (ร้อยละ 80.33) เท่ากับร้อยละ 1.77 ดังนั้น สมการที่สร้างขึ้นจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและสามารถใช้ทำนายประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าได้ แผนผังความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 8 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการตัวแบบแสดงดังตารางที่ 4



รูปที่ 7 แผนผังความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะที่เหมาะสม (ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย 13.34 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย 7.73)

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของสมการตัวแบบ

parameters				% removal		ΔY (%)
X_1	X_2	X_3	X_4	Y_{obs}	Y_{Pred}	
13.34	10.82	9.19	7.73	82.33	80.33	
13.34	10.82	9.19	7.73	82.41	80.33	
13.34	10.82	9.19	7.73	80.59	80.33	
average				81.78	80.33	1.77

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสีย ระยะเวลาในการปล่อยประจุ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ และค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอสเฟตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11) โดยประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายด้วยสมการมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 1.77 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ ทำการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการนำสมการไปใช้กับน้ำเสียจริงหรือปัจจัยที่มีค่านอกเหนือจากค่าที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ สมการที่ได้จากการทดลองครั้งนี้มีความเหมาะสมเฉพาะค่าปัจจัยที่อยู่ในช่วงที่นำมาทำการทดลองเท่านั้น คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 10 – 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการปล่อยประจุไฟฟ้า 5 – 35 นาที กระแสไฟฟ้า 5 – 12.5 มิลลิแอมแปร์ และพีเอช เริ่มต้นของน้ำเสีย อยู่ระหว่าง 6 – 9 โดยประสิทธิภาพการบำบัดจากการทำนายด้วยสมการจะมีค่าระหว่างร้อยละ 70 – 90 ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการศึกษาทดลองกับน้ำเสียจริงและปรับแก้สมการให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ครอบคลุมทุกสภาวะต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ได้รับความอนุเคราะห์สถานที่ทดลอง เครื่องมือวิเคราะห์และวัสดุสิ้นเปลืองจากห้องวิจัยแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. ศัพท์บัญญัติและนิยามสิ่งแวดล้อม. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 2548, ISBN : 974-93212-9-4.
- [2] พงศ์ศักดิ์ หนูพันธ์ และ รัชชา ชัยชนะ. ผลกระทบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสต่อการเกิดยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำและการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัส. *วิศวกรรมสาร มก.*, 2557; 88: 57 – 67.
- [3] Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç., Yalçın, M. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 2008; 87: 420–428.
- [4] Ghanbari, F. and Moradi, M. A comparative of electrocoagulation, electrochemical Fenton, electro-Fenton and peroxi-coagulation for decolorization of real textile wastewater: Electrical energy consumption and biodegradability improvement. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015; 3: 499–506.
- [5] Thirugnanasambandham, K., Sivakumar, V., Maran, J. P. Optimization of process parameters in electrocoagulation treating chicken industry wastewater to recover hydrogen gas with pollutant reduction. *Renewable Energy*, 2015; 80: 101–108.
- [6] Nguyen, D.D., Ngo, H.H., Guo, W., Nguyen, T.T., Chang, S.W., Jang, A., Yoon, Y.S. Can electrocoagulation process be an appropriate technology for phosphorus removal from municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, 2016; 563–564: 549–556.
- [7] Barişçi, S. and Turkay, O. Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations. *Journal of Water Process Engineering*, 2016; 10: 56–65.
- [8] Chen, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 2004; 38: 11–41.
- [9] Karhu, M., Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J. Bench scale electrocoagulation studies of bio oil-in-water and synthetic oil-in-water emulsions. *Separation and Purification Technology*, 2012; 96: 296–305.
- [10] Attour, A., Touati, M., Tlili, M., Amor, M.B., Lapique, F. and Leclerc, J.-P. Influent of operating parameters on phosphate removal from water by electrocoagulation using aluminum electrode. *Separation and Purification Technology*, 2014; 123: 124–129.
- [11] Zodi, S., Potier, O., Lapique, F. and Leclerc, J. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. *Separation and Purification Technology*, 2009; 69: 29–36.
- [12] Bektaş, N., Akbulut, H., Inan, H. and Dimoglo, A. Removal of phosphate from aqueous solutions by electro-coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2004; 106B: 101–105.
- [13] İrdemez, Ş., Yildiz, Y.Ş. and Tosunoğlu, V. Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminium plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 2006; 52: 394–401.
- [14] Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Rämö, J., Lassi, U. and Roininen, J. Removal of phosphate from wastewater for further utilization using electrocoagulation with hybrid electrode-Techno-economic studies. *Journal of Water Process Engineering*, 2015; 8: e50–e57.
- [15] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ, 2545; ISBN: 974-90400-9-0.



การประเมินความถูกต้องของวิธีการรังวัดเพื่อหาปริมาตร งานขุดหน้าดินและถ่านหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่ Accuracy Assessment of Survey Methods for Volume Determination of Overburden and Coal Excavations in Large Open Pit Mines

บุญฤทธิ์ เขียวอร่าม^{1,2*} และ พุทธิพล ดำรงชัย¹

Boonyarit Keawaram^{1,2*} and Puttipol Dumrongchai¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

² การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220

Chiang Mai University, 52000, Thailand

Electricity Generator Authority of Thailand (Mae Moh Mine), Lampang, 52220

¹E-mail: boonyarit.k@egat.co.th, Telephone: 0817425112, Fax: 054254323

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องของการใช้ดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกแบบจลน์อย่างทันทีทันใดและเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ในการรังวัดหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่ โดยการเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมคือการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม โดยทำการทดสอบที่เหมืองสองแห่งคือ เหมืองแม่เมาะ ประเทศไทย และเหมืองหงสา สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ผลการทดสอบแบบควบคุมบนหมุดอ้างอิงที่ทราบค่า พบว่า การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม มีความแม่นยำ 0.2 มม. ทั้งทางราบและทางตั้ง การรังวัดดาวเทียมแบบจลน์อย่างทันทีทันใดมีความแม่นยำ ทางราบ 0.25 มม. ทางตั้ง 0.39 มม. และการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมีความแม่นยำ ทางราบ 4.93 ซม. ทางตั้ง 0.63 ซม. และการทดสอบรังวัดหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินในบ่อเหมืองพบว่า การรังวัดดาวเทียมแบบจลน์อย่างทันทีทันใด และการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมีความแตกต่างจากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมร้อยละ 0.4 และ 1.0 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลก, จลน์อย่างทันทีทันใด, เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน, กล้องประมวลผลรวม

ABSTRACT

This study aims to evaluate the accuracy of real time kinematic (RTK) GNSS and terrestrial laser scanner (TLS) for measuring the volume of excavated overburden and coal in large open-pit mines, in comparison with a conventional method using a total station. The studies were conducted in two large open-pit mines which included Mae Moh mine, Thailand, and Hongsa mine, Lao People's Democratic Republic. The results from measuring the reference points revealed that a total station exhibited 0.2 mm precision for both horizontal and vertical coordinates, whereas RTK demonstrated 2.5 mm and 3.9 mm precision for horizontal and vertical coordinates, respectively. When using TLS on the same points, the value was 4.93 cm for horizontal coordinate and 0.63 cm for vertical coordinate. In conclusion, measuring the volume by RTK and TLS generated differences about 0.4 and 1.0 percent of the total volume measured by a total station, respectively.

Keyword: GNSS, RTK, Terrestrial Laser Scanner, Total station

1. บทนำ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมืองแม่เมะ มีหน้าที่ในการดำเนินการขุดถนนหินลิกไนต์เพื่อส่งให้โรงไฟฟ้าแม่เมะ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าปีละ 2,400 เมกะวัตต์ รวมปริมาตรการเปิดหน้าดินและถ่านหินที่ขุดเฉลี่ยปีละประมาณ 100 ล้านตัน ซึ่งในปัจจุบัน กฟผ. เมืองแม่เมะ ได้ทำสัญญาให้บริษัทผู้รับจ้าง เข้ามาดำเนินการขุดเปิดหน้าดินและถ่านหิน โดย กฟผ. ใช้วิธีการสำรวจรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station หรือ TS) รังวัดหาปริมาณงานขุดหน้าดินและถ่านหินภายในบ่อเหมืองขนาดใหญ่ ที่มีความกว้าง 4 กิโลเมตร ยาว 7 กิโลเมตร และมีความลึกประมาณ 300 เมตร โดยประมาณ จากพื้นผิวดินขอบบ่อเหมืองเพื่อจ่ายค่าดำเนินการให้กับบริษัทผู้รับจ้าง แต่ในอนาคตเหมืองแม่เมะมีแผนการทำเหมืองที่เปิดหน้างานกว้างและลึกขึ้น ทำให้การสำรวจรังวัดโดยวิธีการเดิม คือการใช้กล้องประมวลผลรวมในการรังวัดเพื่อหาปริมาณนั้น เป็นไปด้วยความยากลำบาก ในขณะเดียวกันหน่วยงานที่ทำหน้าที่ในการรังวัดหาปริมาณจะมีจำนวนบุคลากรลดลงเนื่องจากการเกษียณอายุและไม่มีการทดแทน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัย การปรับเปลี่ยนวิธีการสำรวจรังวัดให้สอดคล้องกับสภาพปัจจุบัน และรองรับการทำงานในอนาคตให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการนำเอาเทคโนโลยีดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลก (Global Navigation Satellite System หรือ GNSS) แบบจลน์อย่างทันทีทันใด (Real Time Kinematic หรือ RTK) และเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner หรือ TLS) มาใช้ในการรังวัดหาปริมาณงานขุดหน้าดินและถ่านหิน โดยทำการวิเคราะห์ผลที่ได้เปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมและศึกษาผลกระทบต่างๆที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงเครื่องมือและวิธีการ จนหาข้อสรุปได้ว่า เครื่องมือและวิธีการใหม่ที่ได้กล่าวมานั้นสามารถทดแทนการทำงานด้วยวิธีการรังวัดแบบเดิมได้หรือไม่ โดยคุณภาพของงานไม่ลดลงและมีความน่าเชื่อถือ

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้นำเอาทฤษฎีการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม การรังวัดดาวเทียม GNSS แบบ RTK และการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมาใช้ในการรังวัดเพื่อหาปริมาณงานขุดหน้าดินและถ่านหิน ซึ่งจะกล่าวดังต่อไปนี้

2.1 การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม

การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมจะได้ทั้งค่ามุมราบ มุมตั้ง และระยะทาง ซึ่งสามารถคำนวณออกมาเป็นค่าพิกัด (พิกัดเหนือ, พิกัดตะวันออก, ค่าระดับ) [1] ซึ่งการสำรวจโดยใช้กล้องประมวลผลรวมนั้นเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานสำรวจรังวัดเพื่อหาปริมาณและถือว่าข้อมูลที่ได้จากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องสูง [2]

2.2 การรังวัดดาวเทียม GNSS แบบ RTK

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาความก้าวหน้าทางด้านการรังวัดดาวเทียมได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก โดยในหลายๆ หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน มีการนำเอาการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมมาใช้ในการกิจของหน่วยงาน เช่น กรมแผนที่ทหาร กรมที่ดิน เป็นต้น [3] การรังวัดดาวเทียมมีหลายวิธี เช่น การรังวัดแบบสถิตย์ (Static) การรังวัดแบบสถิตย์อย่างรวดเร็ว (Fast static หรือ Rapid static) และการรังวัดแบบจลน์อย่างทันทีทันใด (Real Time Kinematic หรือ RTK) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์อย่างทันทีทันใด หรือ RTK

การรังวัดดาวเทียมแบบ RTK นั้น ต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหนึ่งวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัด ส่วนอีกเครื่องหนึ่งนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดและรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง โดยที่เครื่องรังวัดดาวเทียมจะต้องสามารถรับและส่งคลื่นวิทยุหรือสัญญาณอินเทอร์เน็ตได้ เพื่อรับค่าปรับแก้ซึ่งจะได้ค่าพิกัด ที่มีความถูกต้องประมาณ 1-3 ซม. (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 5 กิโลเมตร) [4]

2.3 การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกน

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินแบบพัลส์ (pulse-based) ซึ่งการสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินแบบพัลส์นี้ เป็นการสแกนพื้นผิววัตถุด้วยลำแสงเลเซอร์พัลส์ จากจุดหนึ่งที่อยู่นิ่งและสามารถมองเห็นวัตถุเป้าหมายได้ โดยจะส่งสัญญาณแบบลำแสง (beam) เป็นจังหวะไปยังวัตถุเป้าหมายแล้วจับเวลาการสะท้อนกลับมาของลำแสง เวลาการเดินทางของลำแสงก็จะถูกแปลงเป็นระยะทาง ดังนั้นเมื่อทราบมุมราบ มุมตั้ง และระยะทางจะสามารถคำนวณออกมาเป็นกลุ่มของจุดสามมิติ (พิกัดเหนือ, พิกัดตะวันออก, ค่าระดับ) ที่เรียกว่าพอยต์คลาวด์ (point cloud) เครื่องเลเซอร์สแกนแบบพัลส์นิยมใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมเนื่องจากให้ระยะของการสแกนได้ไกลถึง 2,000 เมตร ด้วยอัตราในการวัด (measurement rate) หรือความถี่ในการวัดไม่ต่ำกว่า 50,000 จุดต่อวินาที (50 kHz) [5]

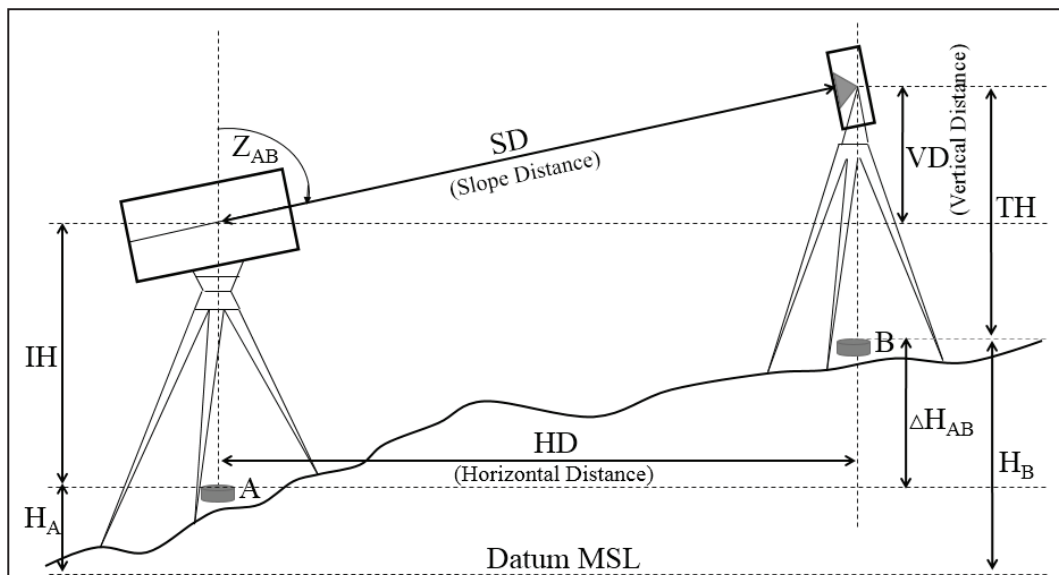
2.4 ผิวジオอยด์

ผิวジオอยด์ คือพื้นผิวระดับอ้างอิงมูลฐานหรือผิวศักยภาพความถ่วงของโลก (level surface หรือ equipotential surface on geoid, $W = W_0$) ที่มีความสำคัญต่อการกำหนดค่าระดับความสูงต่ำของภูมิประเทศ

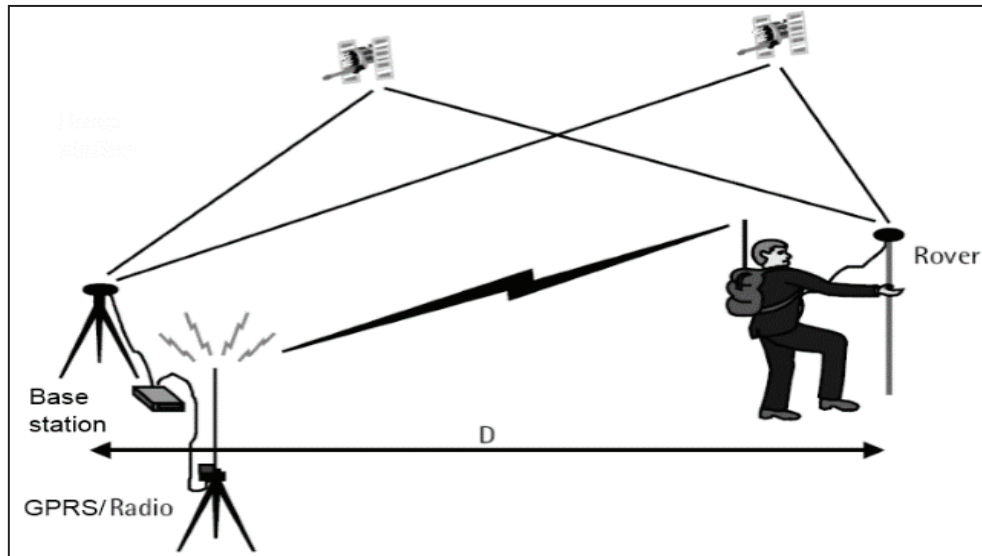
การที่มีแบบจำลองジオอยด์ที่มีความถูกต้องสูงนั้นจะทำให้สามารถหาความสูงออร์โทเมตริก (orthometric height) หรือค่าระดับความสูงของภูมิประเทศได้ (H_p) โดยการแปลงระหว่างค่าความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง World Geodetic System 1984 หรือ WGS84 (h_p) ที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS กับジオอยด์ N_p ดังรูปที่ 4 โดยใช้ความสัมพันธ์ร่วม ระหว่างผิวโลกจริง จีโออยด์ และผิวทรงรีอ้างอิง ดังสมการ (1)

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

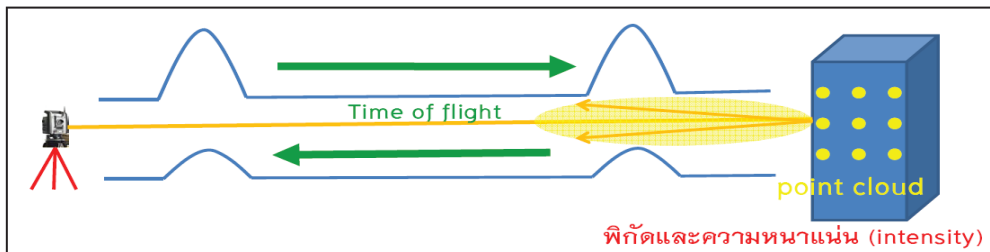
ดังนั้นเมื่อทำการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS โดยอาศัยแบบจำลองジオอยด์ในการคำนวณปรับแก้ จะทำให้สามารถหาค่าความสูง H_p ของภูมิประเทศได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยที่เหมืองแม่เมาะจะใช้แบบจำลองジオอยด์ท้องถิ่นบริเวณประเทศไทย THAI12H ที่ได้รับการปรับปรุงความถูกต้องเฉพาะบริเวณเหมืองแม่เมาะ [6] ร่วมกับการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ที่มีความถูกต้องทางดิ่งประมาณ 2-3 เซนติเมตร ในรัศมีไม่เกิน 5 กิโลเมตรจากสถานีฐาน ส่วนการวิจัยที่เหมืองหงสาจะใช้แบบจำลองジオอยด์ EGM96 ซึ่งเป็นแบบจำลองジオอยด์สากล



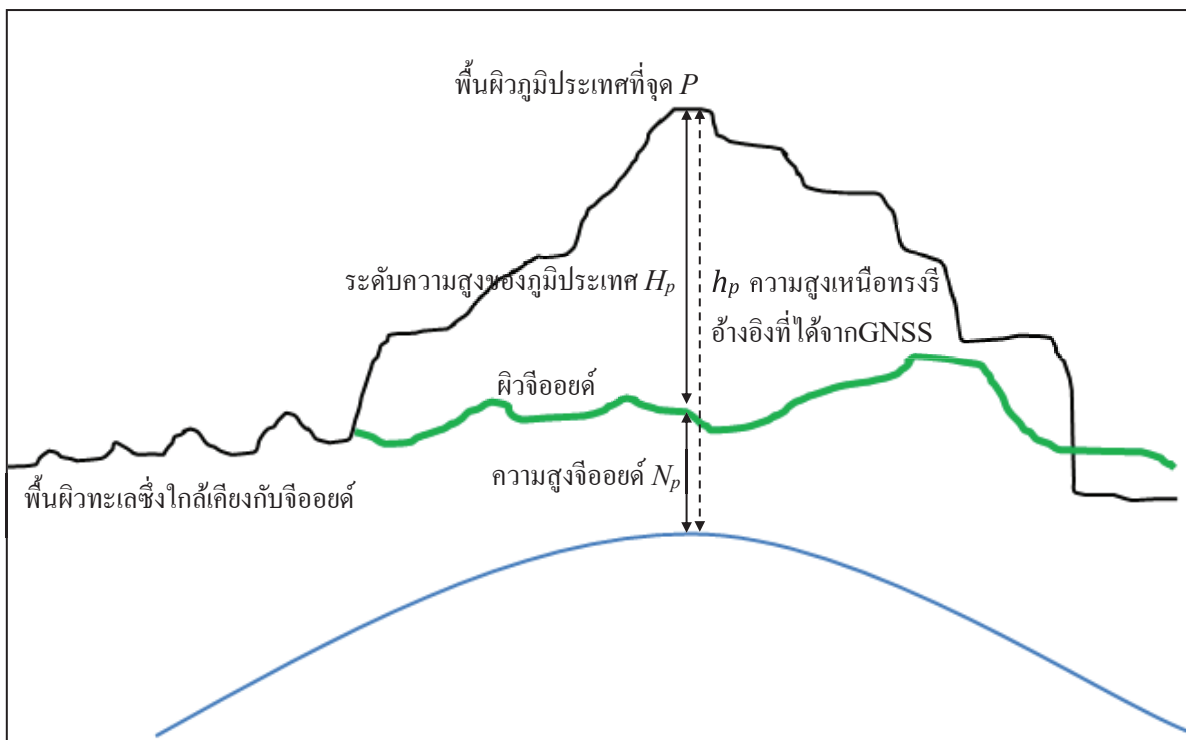
รูปที่ 1 การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม [1]



รูปที่ 2 การรังวัดดาวเทียม GNSS แบบ RTK [4]



รูปที่ 3 การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนแบบพัลส์ [5]

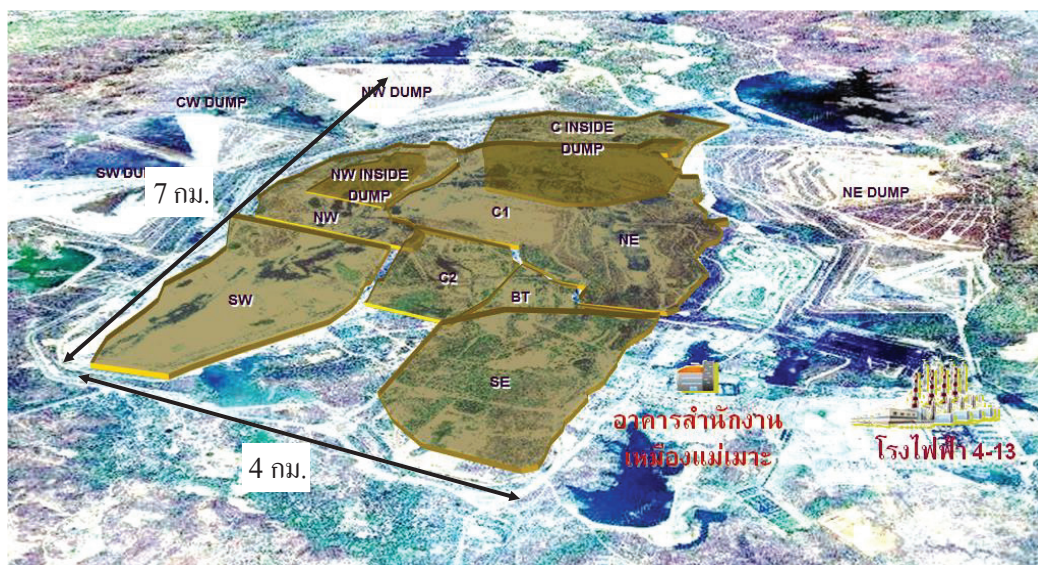


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของผิวจีโอซด์ ความสูงเหนือทรรีและระดับความสูงของภูมิประเทศ [6]

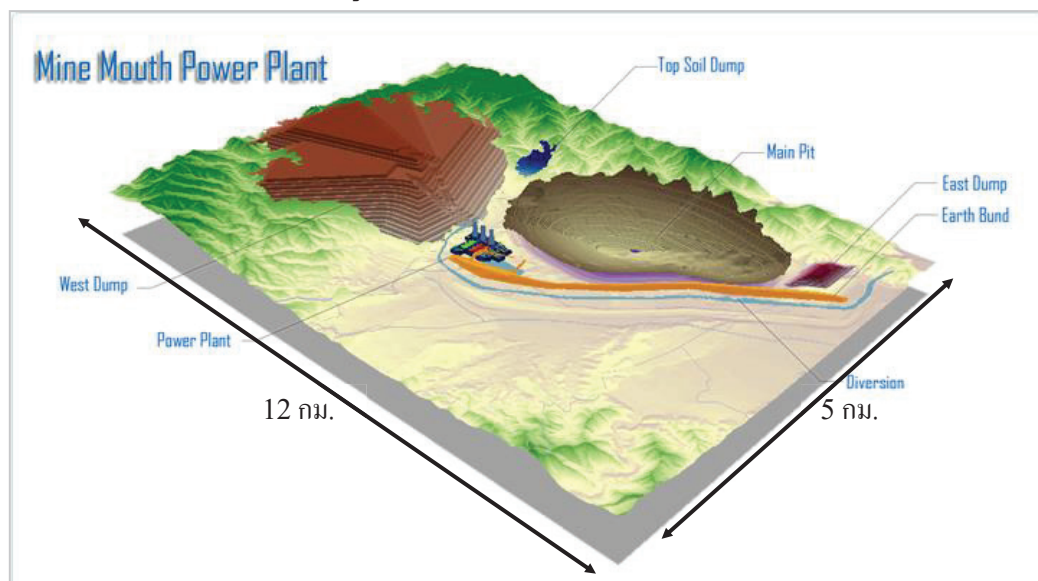
3. วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นการวิจัยที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย ซึ่งมีขนาดประมาณ กว้าง 4 กิโลเมตร ยาว 7 กิโลเมตร ลึก 300 เมตร จากขอบบ่อเหมือง ดังรูปที่ 5 และการวิจัยที่เหมืองหงสา จังหวัดไชยบุรี ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว มีขนาดประมาณ กว้าง 5 กิโลเมตร ยาว 12 กิโลเมตร ลึก 100 เมตร จากขอบบ่อเหมือง ดังรูปที่ 6 โดยในการวิจัยที่เหมืองแม่เมาะจะทำการรังวัดเพื่อหาปริมาณงานขุด

หน้าดินและถ่านหินด้วยการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมเปรียบเทียบกับวิธีการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ส่วนการวิจัยที่เหมืองหงสาจะทำการรังวัดเพื่อหาปริมาณด้วยกล้องประมวลผลรวม เปรียบเทียบกับการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกน สาเหตุที่ต้องมีการทำวิจัยที่เหมืองหงสา สปป.ลาว เนื่องจากทางเหมืองแม่เมาะยังไม่มีอุปกรณ์ประเภทนี้ใช้งาน โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทหงสาพาวเวอร์ (Hongsa Power Company หรือ HPC) ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

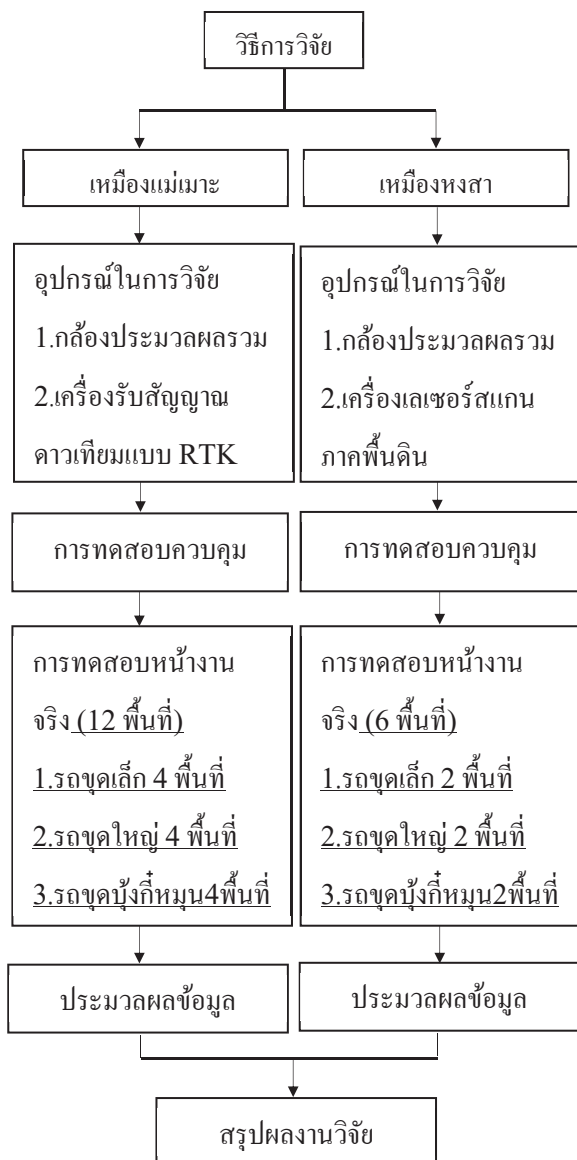


รูปที่ 5 เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



รูปที่ 6 เหมืองหงสา สปป.ลาว

ในการวิจัยที่เหมืองแม่เมาะและเหมืองหงสา จะประกอบด้วยการทดสอบควบคุม และการทดสอบหน้างานจริง โดยการทดสอบควบคุมมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการรังวัดด้วยเครื่องมือแต่ละประเภท ส่วนการทดสอบหน้างานจริงภายในบ่อเหมือง มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบและประเมินผลของการรังวัดเพื่อหาปริมาณงานขุดหน้าดินและถ่านหินด้วยเครื่องมือแต่ละประเภท ดังมีกระบวนการในการวิจัยดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระบวนการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในการวิจัยที่เหมืองแม่เมาะ จะใช้กล้องประมวลผลรวม Leica TCRA1203 [7] และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 [8] ส่วนการวิจัยที่เหมืองหงสา จะใช้กล้องประมวลผลรวม Leica TCRA1205 [7] (ซึ่งมีลักษณะตัวเครื่องแบบเดียวกับ Leica TCRA1203) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R8 [9] และเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน Maptek I-site 8820 [10] ดังแสดงในรูปที่ 8 และมีสมรรถนะของเครื่องมือ ดังตารางที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยที่เหมืองแม่เมาะ
(ก) กล้องประมวลผลรวม Leica TCRA 1203/1205
(ข) เครื่องเลเซอร์สแกน Maptek I site 8820
(ค) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10
(ง) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R8

ตารางที่ 1 สมรรถนะของกล้องประมวลผลรวม [7]

Performance	TPS 1203	TPS1205
Accuracy H & V	3 seconds	5 seconds
Distance measurement	1,800 meters	1,800 meters
Distance accuracy	1mm+1.5ppm	1mm+1.5ppm
Measure time	2.4s / point	2.4s / point

ตารางที่ 2 สมรรถนะของเครื่องรังวัดดาวเทียม [8,9]

Performance	R10	R8
Static Accuracy of H	±3mm +0.5 ppm	±5mm +0.5 ppm
Static Accuracy of V	±5mm +0.5 ppm	±5mm +1 ppm
RTK Accuracy of H	±8mm +1 ppm	±10mm +1 ppm
RTK Accuracy of V	±15mm +1 ppm	±20mm +1 ppm

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเครื่องเลเซอร์สแกน [10]

Performance	Maptek I site 8820
Integrate digital camera	70 mega pixel
Maximum range	2000 m
Minimum range	2.5m
Range accuracy	6 mm
Acquisition rate	40 kHz

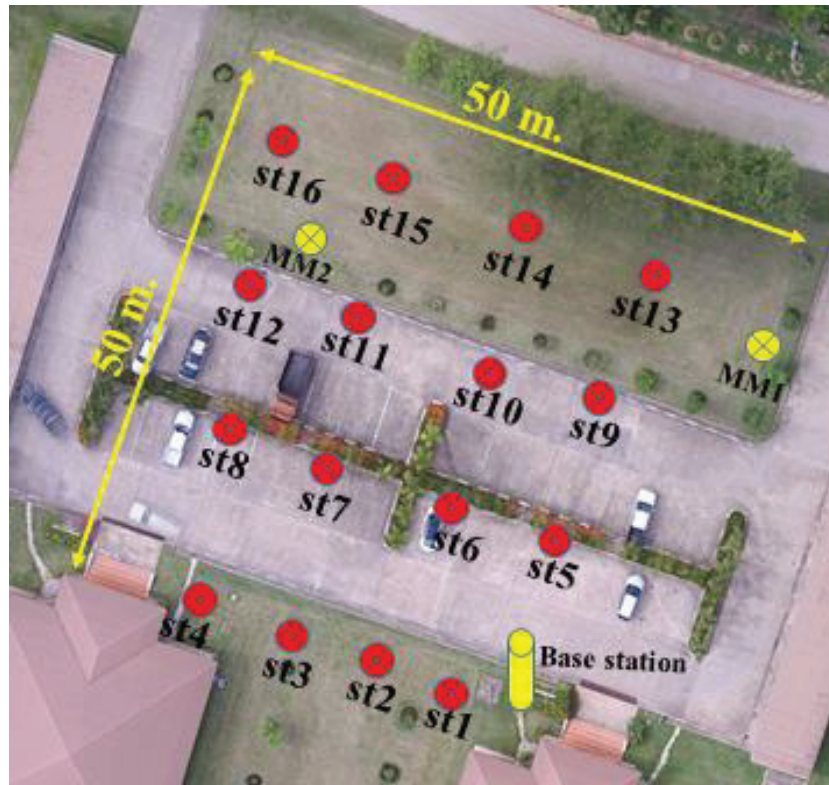
3.2 การวิจัยที่เหมืองแม่เมาะ

3.2.1 การทดสอบควบคุมบริเวณเหมืองแม่เมาะ

การทดสอบควบคุมเป็นการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพสูงสุดของการรังวัดด้วยเครื่องมือแต่ละประเภท ได้เลือกพื้นที่บริเวณหน้าอาคารแผนกรังวัดเหมือง ซึ่งเป็นพื้นที่โล่งขนาด กว้าง 50 เมตร ยาว 50 เมตร โดยประมาณ ไม่มีสิ่งใดบดบังเพื่อเป็นการขจัดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอุปสรรคในการรับสัญญาณดาวเทียม เช่น ความคลาดเคลื่อนหลายวิถี (multipath) เป็นต้น ตลอดจนได้ทำการวัดสอบ (calibration) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมืออยู่ในสภาพที่ดี ทำให้การรังวัดได้ค่าที่

ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ และได้ทำการกำหนดหมุดอ้างอิง (reference point) จำนวน 2 หมุด (MM1 และ MM2) เพื่อใช้สำหรับตั้งกล้องประมวลผลรวมและตั้งเป้าหลัง (back sight) และกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบจำนวน 16 หมุด (ST01-ST16) แต่ละหมุดห่างกันประมาณ 10 เมตร สำหรับใช้ในการทดสอบควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 9

จากนั้นทำการรังวัดหาค่าพิกัดของหมุดทั้งหมด ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบสถิตย์ (static) โดย ณ ตำแหน่งหมุดอ้างอิงใช้เวลาตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 หมุดละ 1 ชั่วโมง ส่วนหมุดที่ใช้ในการทดสอบใช้เวลาตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมหมุดละ 30 นาที โดยใช้สถานีฐาน (base station) MMEG และแบบจำลองจีโอซิด์ THAI12H ในการหาค่าระดับความสูง ซึ่งระยะของสถานีฐาน MMEG อยู่ห่างจากพื้นที่ทดสอบไม่เกิน 100 เมตร และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลในโปรแกรมสำเร็จรูป Trimble Business Center (TBC) [11] ค่าพิกัดของหมุดทั้งหมด มีความถูกต้องประมาณ 3 มิลลิเมตร (จาก TBC) เมื่อได้ค่าพิกัดที่ทราบค่าของหมุดอ้างอิงและหมุดทดสอบแล้ว ซึ่งในที่นี้จะถือว่าเป็นค่าที่แท้จริง จากนั้นจะทำการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม โดยตั้งกล้องประมวลผลรวมที่หมุด MM1 และตั้งเป้าหลังที่หมุด MM2 เพื่อกำหนดภาคทิศ และทำการรังวัดหมุดทดสอบทั้ง 16 หมุด จำนวนหมุดละ 10 ครั้ง และรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK ร่วมกับการใช้แบบจำลองจีโอซิด์ THAI12H หมุดละ 10 ครั้ง เช่นกัน ในการประเมินผลการทดสอบควบคุม จะใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อประเมินความแม่นยำ ที่กำหนดดังสมการ (2) และใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสอง เพื่อประเมินความถูกต้องของการทดสอบควบคุม ดังสมการ (3) [12]



รูปที่ 9 พื้นที่ทดสอบและตำแหน่งจุดทดสอบควบคุมเหมือนแม่เมาะ

$$SD(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{P} - P_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$RMS(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{P} - P_i)^2}{n}} \quad (3)$$

โดยที่ $\bar{P}$ คือค่าพิสัยเฉลี่ยของค่าที่วัดได้, $\hat{P}$ คือค่าพิสัยจริงที่ถูกต้อง, P_i คือ ค่าพิสัยที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง ตั้งแต่ครั้งที่ i ถึง n , n คือ จำนวนค่าที่วัดได้

3.2.2 การทดสอบหน้างานจริงบริเวณเหมือนแม่เมาะ

การทดสอบหน้างานจริงในบ่อเหมือง มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบและประเมินผลการรังวัดหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหิน ด้วยเครื่องมือแต่ละประเภทโดยในการทดสอบจะเลือกพื้นที่หน้างานในการทดสอบที่ใช้เครื่องจักรในการขุดแตกต่างกัน 3 ประเภท ซึ่งเป็นเครื่องจักรหลักที่ใช้ในการขุดหน้าดินและถ่านหินที่เหมืองแม่เมาะ ประกอบด้วย หน้างานรถขุดเล็ก (backhoe

excavator) ดังรูปที่ 10(ก) หน้างานรถขุดใหญ่ (shovel excavator) ดังรูปที่ 10(ข) และหน้างานรถขุดบั้งก็หมุน (bucket wheel excavator) ดังรูปที่ 10(ค) ซึ่งลักษณะหน้างานของเครื่องจักรแต่ละประเภทจะแตกต่างกัน และผนังหน้างานขุด ของเครื่องจักรแต่ละประเภทจะมีความสูงประมาณ 4 เมตร 7 เมตร และ 12 เมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 11

โดยทำการรังวัดประเภทหน้างานละ 4 แปลง รวมทั้งหมด 12 แปลง แต่ละแปลงต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า 10,000 ตารางเมตร (ซึ่งเป็นขนาดของหน้างานส่วนใหญ่ที่มีการรังวัดหาปริมาตรการขุดขนจริงภายในเหมืองแม่เมาะ)



(ก)

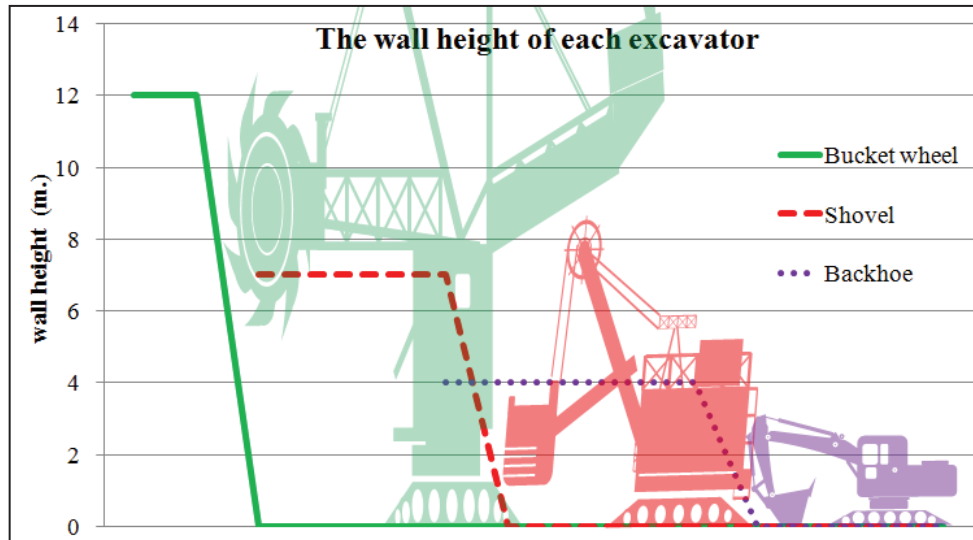


(ข)



(ค)

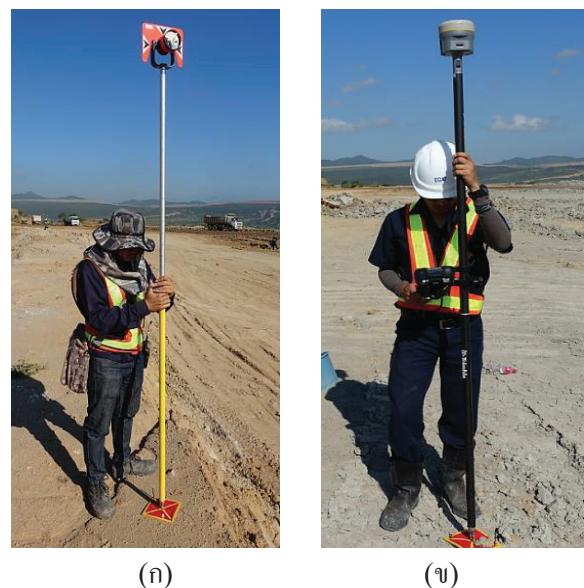
รูปที่ 10 (ก) หน้างานรถขุดเล็ก (backhoe excavator) (ข) หน้างานรถขุดใหญ่ (shovel excavator)
(ค) หน้างานรถขุดนึ่งก็่หมุน (bucket wheel excavator)



รูปที่ 11 ความสูงของผนังงานขุดที่มีขนาดแตกต่างกันตามลักษณะเครื่องจักรแต่ละประเภทที่ใช้ในการขุด

ในการทดสอบหน้างานจริง จะใช้แผ่นเป้าทดสอบ ทำจากแผ่นพลาสติกแข็ง ขนาด 16x16 ซม. ที่ไม่เกิดการยุบตัวในระหว่างการรื้อวัด วางแผ่นเป้าทดสอบให้ทั่วพื้นที่ทดสอบ และใช้ตะปูตอกยึดแผ่นเป้าทดสอบให้ติดกับพื้นผิวภูมิประเทศ เป็นการกำหนดตำแหน่งในการรื้อวัดทดสอบ เพื่อให้การรื้อวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมและการรื้อวัดดาวเทียมแบบ RTK มีตำแหน่งเดียวกันและมีจำนวนจุดที่รื้อวัดเท่ากัน จากนั้นจะทำการกำหนดตำแหน่งหมุดอ้างอิง สำหรับตั้งกล้องประมวลผลรวมและเป้าหลังของแต่ละพื้นที่ โดยใช้การรื้อวัดดาวเทียมแบบสถิตย์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าพิกัดของหมุดทั้งหมด มีความถูกต้องประมาณ 3 มิลลิเมตร (จาก TBC) จากนั้นทำการรื้อวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม โดยจะส่งไปที่เป้าสะท้อนที่ตั้งบนตำแหน่งเป้าทดสอบดังแสดงในรูปที่ 12(ก) ในขณะเดียวกันจะรื้อวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK ที่ตำแหน่งเป้าทดสอบเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 12(ข) โดยในการรื้อวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมจะใช้ผู้เก็บข้อมูลวิจัยจำนวน 8 คน (คนส่องกล้อง 1 คน คนถือเป้า 7 คน) และการรื้อวัดดาวเทียมแบบ RTK จะใช้ผู้เก็บข้อมูลวิจัยจำนวน 2 คน เมื่อรื้อวัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลที่ได้จากการรื้อวัดทั้งสองวิธีไปคำนวณหาปริมาตรด้วยโปรแกรม MineSight [13] ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินที่ได้รับการ

ยอมรับและมีความน่าเชื่อถือในทางวิศวกรรมเหมืองแร่ และ กฟผ. เหมืองแม่เมาะได้ใช้โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมมาตรฐานในการคำนวณหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินเพื่อจ่ายค่าดำเนินการให้แก่บริษัทผู้รับจ้าง



รูปที่ 12 (ก) การตั้งเป้าสะท้อนสำหรับรื้อวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม (ข) การรื้อวัดดาวเทียมแบบ RTK

จากนั้นนำผลการคำนวณปริมาตรที่ได้ไปประเมินผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติ ซึ่งในการประเมินผลการทดสอบหน้างานจริง จะเปรียบเทียบโดยการหาความแตกต่างปริมาตรเป็นร้อยละ ($\Delta\%$) ดังสมการ (4) และหา

ความแตกต่างทางระดับเฉลี่ย (ΔH) ดังสมการ (5) และ หาค่าขอบเขตความคลาดเคลื่อน (margin of error หรือ E) ที่เกิดขึ้นจากการรังวัดทั้งสองวิธี ดังสมการ (6) [14]

$$\frac{\Delta V}{V} \times 100 = \Delta\% \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V}{A} = \Delta H \quad (5)$$

เมื่อ ΔV คือ ปริมาตรที่แตกต่างของสองเครื่องมือ (ม), V คือปริมาตรที่รังวัดได้จากกล้องประมวลผลรวม(ม), A คือขนาดพื้นที่ที่รังวัด (ม²)

$$E = t_{\alpha/2,df} \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

เมื่อ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n คือ จำนวนค่าที่วัดได้, $t_{\alpha/2,df}$ คือค่าวิกฤต (Critical value) เมื่อค่าของตัวแปรที่เป็นอิสระ (degree of freedom หรือ df) มีค่าเท่ากับ $n-1$ โดยค่า t สามารถหาได้จากตารางแจกแจง t [14]

3.2 การวิจัยที่เมืองหงสา

3.2.1 การทดสอบควบคุมบริเวณเมืองหงสา

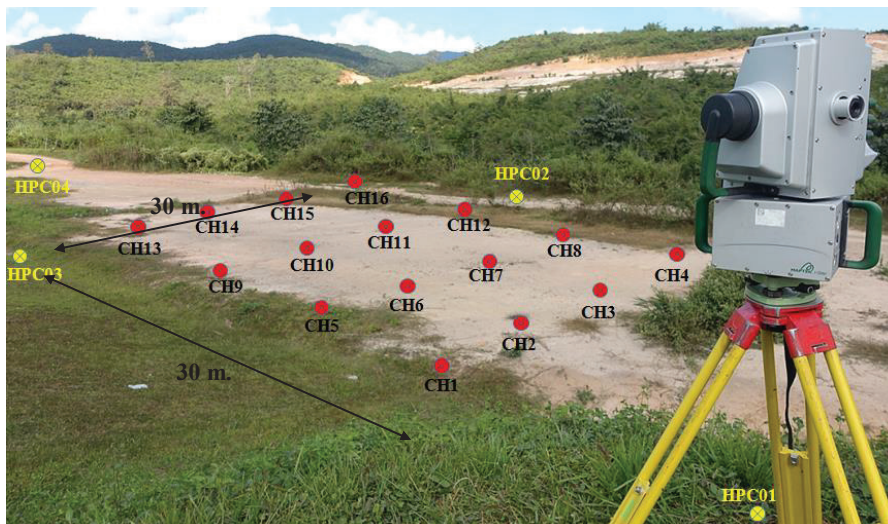
การทดสอบควบคุมที่เมืองหงสามีวิถีอุปสงค์ และวิธีการเหมือนกับการทดสอบควบคุมที่เมืองแม่เมะ โดยได้เลือกพื้นที่บริเวณลานดิน ซึ่งเป็นพื้นที่โล่งขนาด กว้าง 30 เมตร ยาว 30 เมตรโดยประมาณและได้ทำการ กำหนดตำแหน่งหมุดอ้างอิง (reference point) จำนวน 4 หมุด (HPC01-HPC04) เพื่อใช้สำหรับตั้งกล้องประมวลผลรวม ตั้งเป้าหลัง (BS) และตั้งเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน โดยกำหนดหมุดทดสอบจำนวน 16 หมุด (CH01-CH16) แต่ละหมุดห่างกันประมาณ 10 เมตร ดังแสดงในรูป 13 จากนั้นทำการรังวัดหาค่าพิกัดของหมุดทั้งหมดด้วยการรังวัดดาวเทียมแบบสถิตย์ โดย ณ ตำแหน่งหมุดอ้างอิงใช้เวลาตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R8 หมุดละ 1 ชั่วโมง ส่วนหมุดทดสอบ ใช้เวลาตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมหมุดละ 30 นาที โดย

ใช้สถานีฐาน (base station) HPC และแบบจำลอง จีออิดส์สากล EGM96 [15] ในการหาค่าระดับความสูง ซึ่งตำแหน่งของสถานีฐาน HPC อยู่ห่างจากพื้นที่ทดสอบ ไม่เกิน 100 เมตร จากการประมวลผลค่าพิกัดของหมุด ทั้งหมด มีความถูกต้องประมาณ 3 มิลลิเมตร (จาก TBC) จากนั้นทำการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม โดยตั้ง กล้องที่หมุด HPC01 ตั้งเป้าหลังที่หมุด HPC04 เพื่อ กำหนดภาคทิศ และทำการรังวัดหมุดทดสอบทั้ง 16 หมุด จำนวนหมุดละ 10 ครั้ง ส่วนในการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์ สแกน จะตั้งเครื่องเลเซอร์สแกนที่หมุด HPC01 และย้าย ไปตั้งที่หมุด HPC02 และ HPC03 ตามลำดับและสแกน พื้นที่ตำแหน่งละ 10 ครั้งเช่นกัน

ในการประเมินผลการทดสอบควบคุม ผลจากการ รังวัดด้วยกล้องประมวลผลจะเทียบเท่ากับการทดสอบที่ เหมือนแม่เมะ ส่วนผลจากการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์ สแกน จะเลือกเอาเฉพาะพอยต์คลาวด์ที่ตกบนเป้าทดสอบ มาใช้ในการวิเคราะห์ ส่วนในการหาความแม่นยำและ ความถูกต้อง จะใช้สมการ (2) และสมการ (3)

3.2.2 การทดสอบหน้างานจริงบริเวณเมืองหงสา

การทดสอบหน้างานจริงในบ่อเมืองหงสาจะ ทดสอบจำนวน 3 ลักษณะหน้างานเช่นเดียวกันกับการ ทดสอบที่เมืองแม่เมะ โดยหมุดอ้างอิงที่จะใช้ตั้งกล้อง ตั้งเป้าหลัง และตั้งเครื่องเลเซอร์สแกนฯ จะรังวัดดาวเทียม แบบสถิตย์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลจากการประมวลผลค่า พิกัดของหมุดทั้งหมด มีความถูกต้องประมาณ 5 มิลลิเมตร (จาก TBC) จากนั้นรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมตาม ตำแหน่งที่วางเป้าทดสอบ ส่วนการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์ สแกน จะสแกนให้ครอบคลุมพื้นที่ ซึ่งในการรังวัดด้วย กล้องประมวลผลรวมจะใช้ผู้เก็บข้อมูลวิจัย 8 คน และการ รังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนใช้ผู้เก็บข้อมูลวิจัย 3 คน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการรังวัดทั้งสองเครื่องมือ ไป คำนวณหาปริมาตรและนำผลการคำนวณที่ได้ไป ประเมินผลและวิเคราะห์ผลด้วยสมการ (4) (5) และ (6)



รูปที่ 13 พื้นที่ทดสอบและตำแหน่งหมุดทดสอบควบคุมเมืองแม่เมาะ

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบควบคุม

จากการทดสอบควบคุม ที่เมืองแม่เมาะและเมืองหงสา เมื่อนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติ หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เพื่อประเมินความแม่นยำ และหาค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) เพื่อประเมินความถูกต้อง ได้ผลการทดสอบที่เมืองแม่เมาะแสดงในตาราง 4 และรูปที่ 14 และผลการทดสอบที่เมืองหงสาแสดงในตาราง 5 และรูปที่ 15

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบควบคุมเมืองแม่เมาะ

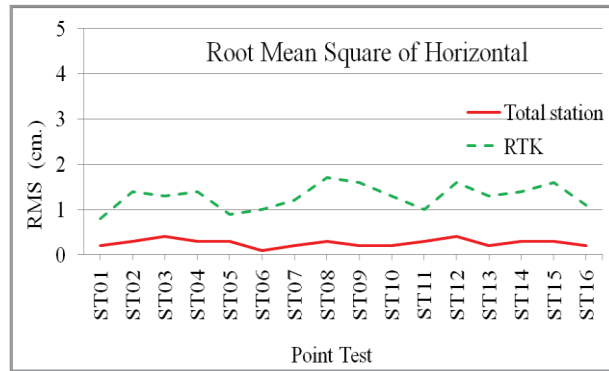
Instrument	SD (cm.)		RMS (cm.)	
	H	V	H	V
TS	0.03	0.01	0.26	0.17
RTK	0.25	0.39	1.29	1.43

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบควบคุมเมืองหงสา

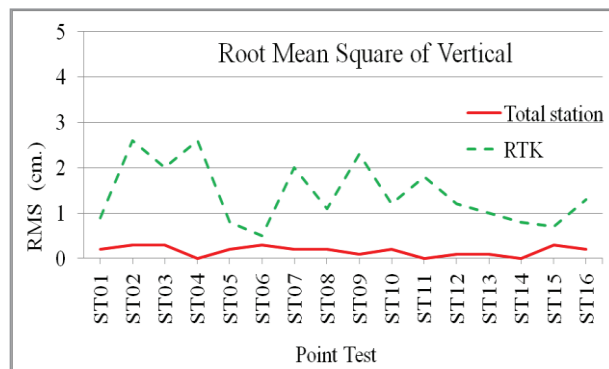
Instrument	SD (cm.)		RMS (cm.)	
	H	V	H	V
TS	0.02	0.01	0.02	0.03
TLS	4.93	0.63	5.75	2.10

เมื่อ TS คือ กล้องประมวลผลรวม,
RTK คือ การรังวัดดาวเทียมแบบ RTK,
TLS คือ เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน

จากการทดสอบควบคุมเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4 และรูปที่ 14 พบว่า การรังวัดดาวเทียมแบบ RTK มีความแม่นยำและความถูกต้องน้อยกว่าการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมทั้งทางราบ (H) และทางตั้ง (V) ซึ่งสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK และจากตารางที่ 5 และรูปที่ 15 พบว่าการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกน มีความแม่นยำและถูกต้องน้อยกว่าการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมทั้งทางราบและทางตั้งเช่นกัน ซึ่งสาเหตุที่การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนมีความถูกต้องและแม่นยำน้อยกว่ากล้องประมวลผลทั้งทางราบ (H) และทางตั้ง (V) เนื่องจากการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนจะใช้การกำหนดขอบเขตการรังวัดและเลือกความละเอียดเชิงพื้นที่ในการสแกน ไม่ใช่เป็นการเลือกตำแหน่งในการรังวัดเหมือนกับการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม ที่ผู้ส่องกล้องสามารถเลือกส่องตามตำแหน่งของเป้าทดสอบที่ต้องการได้ จึงทำให้การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนมีความถูกต้องและแม่นยำน้อยกว่า ดังนั้นจากการทดสอบควบคุมพบว่า การรังวัดดาวเทียมแบบ RTK และการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน มีความแม่นยำและความถูกต้องน้อยกว่าการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม ซึ่งถือว่าเป็นไปตามคุณสมบัติของเครื่องมือแต่ละประเภท ในตาราง 1, 2 และ 3

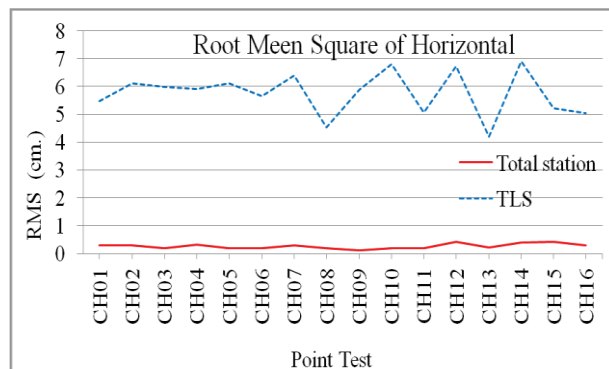


(ก)

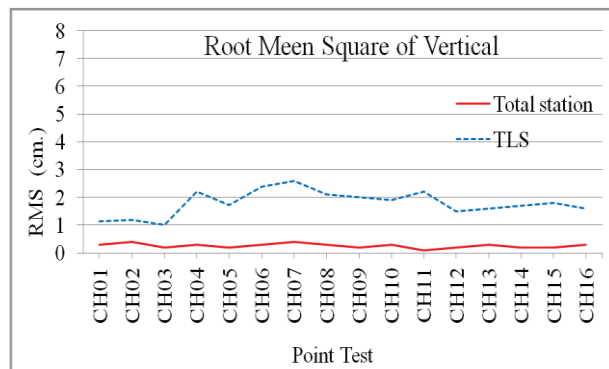


(ข)

รูปที่ 14 ผลการทดสอบควบคุมเหมืองแม่เมาะ (ก) ค่า RMS ทางราบ (ข) ค่า RMS ทางตั้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 15 ผลการทดสอบควบคุมเหมืองหงสา (ก) ค่า RMS ทางราบ (ข) ค่า RMS ทางตั้ง

4.2 ผลการทดสอบหน้างานจริง

4.2.1 การทดสอบที่เหมืองแม่เมาะ

จากการทดสอบหน้างานจริงที่เหมืองแม่เมาะ จำนวน 12 แปลงคิดเป็นพื้นที่ 198,185 ตารางเมตร ได้ผลดังตารางที่ 6 สามารถสรุปได้ว่าการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK และการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม มีความแตกต่างกันร้อยละ 0.75 ถึง 1.47 เฉลี่ยร้อยละ 0.44 และมีความแตกต่างทางระดับ -0.025 ม.ถึง +0.065 ม. เฉลี่ยเท่ากับ +0.017 ม. และการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ใช้เวลารวมนานกว่า 217 นาที

จากข้อมูลในตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาความแตกต่างทางระดับ (ΔH) จากการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK และกล้องประมวลผลรวม พบว่ามีความแตกต่างทางระดับ +0.017 ม. โดยเฉลี่ย ซึ่งมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนในการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK แสดงให้เห็นว่า

ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยังพบว่าลักษณะหน้างานของเครื่องจักรแต่ละประเภท มีผลต่อการรังวัดดาวเทียม RTK กล่าวคือ หน้างานของเครื่องจักรที่มีผนังของพื้นที่ขุดสูง เช่น หน้างานรถขุดบั้งก็หุมุนซึ่งมีผนังสูง 12 เมตร ในขณะที่ขุดตั้งจานรับสัญญาณดาวเทียมสูง 2 เมตร เป็นผลให้ตำแหน่งที่ติดตั้งกับผนังจะบดบังความสามารถในการรังวัดดาวเทียม ทำให้รับสัญญาณดาวเทียมได้น้อยลง ส่งผลให้การรังวัดดาวเทียมแบบ RTK มีความคลาดเคลื่อนมาก จึงทำให้ผลการรังวัดมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นในการรังวัดพื้นที่ซึ่งมีผนังสูง เช่น หน้างานรถขุดบั้งก็หุมุน หรือหน้างานรถขุดใหญ่ จะต้องเพิ่มระยะเวลาในการรังวัดนานขึ้น เพื่อให้รับสัญญาณดาวเทียมได้มากขึ้น ค่าที่ได้จึงจะมีความถูกต้องมากขึ้นแต่ในหน้างานรถขุดเล็ก ซึ่งมีผนังไม่สูงนัก สามารถรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ได้ตามปกติ

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบหน้างานจริง เหมืองแม่เมาะ ระหว่างการรังวัดหาปริมาตรการขุดขนด้วยดาวเทียม RTK เปรียบเทียบกับกล้องประมวลผลรวม (แปลงทดสอบ 1, 2, 5, 6, 9 และ 10 เป็นการทดสอบครั้งที่ 1 ช่วง พ.ย.58 และแปลงทดสอบ 3, 4, 7, 8, 11 และ 12 เป็นการทดสอบครั้งที่ 2 ช่วง พ.ย.59)

พื้นที่ทดสอบ	ขนาดพื้นที่ (ม ² .)	ปริมาตร (ม ³ .)		ผลต่าง RTK-TS			เวลาในการทำงาน (นาที)	
		TS	RTK	ปริมาตร (ม ³ .)	%	ค่าระดับ (ม.)	TS	RTK
1.BHE1	12,332	27,207	27,528	321	1.18	0.026	30	35
2.BHE2	18,406	30,771	30,943	172	0.56	0.009	42	52
3.BHE3	12,419	34,359	34,572	213	0.62	0.017	25	40
4.BHE4	13,227	30,732	30,501	-231	-0.75	-0.017	33	45
5.SVE1	18,714	53,348	54,095	747	1.40	0.040	60	76
6.SVE2	11,096	66,040	65,760	-280	-0.42	-0.025	50	62
7.SVE3	28,550	171,996	172,216	220	0.13	0.008	95	115
8.SVE4	11,103	40,477	40,368	-109	-0.27	-0.010	31	51
9.BWE1	12,901	82,699	83,380	681	0.82	0.053	45	69
10.BWE2	13,394	58,827	59,693	866	1.47	0.065	54	78
11.BWE3	22,283	185,539	185,946	407	0.22	0.032	97	125
12.BWE4	23,760	150,022	150,468	446	0.30	0.018	95	126
ผลรวม	198,185	932,017	935,470	3,653	0.39	0.019	657	874
ค่าเฉลี่ย	16,515	77,668	77,956		0.44	0.017		
SD						0.027		

จากที่กล่าวในย่อหน้าที่ผ่านมา ข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ในการทดสอบหน้างานจริงที่เหมืองแม่เมาะ ช่วงที่ 1 แปลงทดสอบที่ 5-6 (หน้างานรถขุดใหญ่) (และแปลงทดสอบที่ 9-10) หน้างานรถขุดบั้งก็หมุน (ใช้เวลาในการรังวัดดาวเทียม RTK จุดละ 5 วินาที พบว่ามีความแตกต่างทางระดับ 0.04 ม. -0.025 ม. 0.053 ม. และ 0.065 ม. ตามลำดับ แต่ในการทดสอบช่วงที่ 2 ได้ทดลองเพิ่มเวลาในการรังวัดดาวเทียม RTK เป็นจุดละ 10 วินาที พบว่าหน้างานรถขุดใหญ่และรถขุดบั้งก็หมุน ในแปลงทดสอบที่ 7, 8, 10 และ 11 มีความแตกต่างทางระดับ -0.013 ม. -0.010 ม. 0.000 ม. และ -0.002 ม. ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เวลาในการรังวัดที่นานขึ้นจะช่วยให้ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ลดลง อย่างมีนัยสำคัญ แต่ในแปลงทดสอบหน้างานรถขุดเล็ก แปลงทดสอบที่ 1 ถึง 4 ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากผนังของหน้างานมีความสูง 2 เมตร ซึ่งไม่บังคับการรับสัญญาณดาวเทียมเพราะความสูงข้างต้นของงานรับสัญญาณดาวเทียมมีความสูง 2 เมตร

ส่วนขนาดของพื้นที่ทดสอบนั้น ไม่มีผลต่อความแตกต่างของการรังวัดทั้งสองวิธี จากข้อมูลในตารางที่ 6 พื้นที่ทดสอบแปลงที่ 3 มีขนาดพื้นที่ 12,419 ม.² มีความแตกต่างทางระดับ 0.017 ม. และพื้นที่ทดสอบแปลงที่ 12 มีขนาดพื้นที่ 23,760 ม.² มีความแตกต่างทางระดับ 0.018 ม. ซึ่งพื้นที่ทดสอบทั้ง 2 แปลง มีขนาดของพื้นที่ต่างกันเกือบ 2 เท่า แต่มีความแตกต่างทางระดับเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นของการรังวัดทั้งสองวิธีไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ เนื่องจากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม และการรังวัดดาวเทียม RTK เป็นการรังวัด ณ ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งจากผลการทดสอบควบคุม พบว่าทุกตำแหน่งที่รังวัดจะแตกต่างกันประมาณ 0.014 ม. ดังนั้นไม่ว่าขนาดของพื้นที่หน้างานจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ ความแตกต่างทางระดับของพื้นที่ทดสอบของการรังวัดทั้งสองวิธีจะแตกต่างกันประมาณ 1.4 ซม. โดยเฉลี่ย

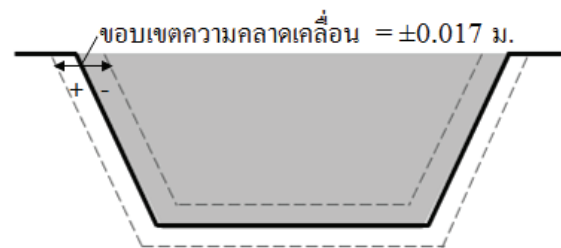
นอกจากนั้น ยังสามารถหาขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ได้ดังสมการ (7)

$$E = \pm 2.201 \times \frac{0.027}{\sqrt{12}} = \pm 0.017 \text{ ม.} \quad (7)$$

เมื่อ $t_{\alpha/2, df}$ เท่ากับ 2.201 จากตารางแจกแจงความถี่ t เมื่อ Degree of freedom เท่ากับ 11 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95, σ เท่ากับ 0.027 ม. และจำนวนข้อมูลเท่ากับ 12

ขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้ (± 0.017 ม.) สามารถนำไปใช้ในการประมาณความคลาดเคลื่อนของการรังวัดหาปริมาตรด้วยดาวเทียมแบบ RTK ของหน้างานต่างๆ ภายในบ่อเหมืองได้ โดยการเอาขนาดของพื้นที่ที่รังวัด คูณด้วยค่าขอบเขตความคลาดเคลื่อน (E) ดังสมการ (8) เมื่อขนาดพื้นที่ทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 198,185 ตารางเมตร (จากตารางที่ 6)

$$198,185 \times (\pm 0.017) = \pm 3,378 \text{ ลูกบาศก์เมตร} \quad (8)$$



รูปที่ 16 ขอบเขตความคลาดเคลื่อน (margin of error) ของการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK [16]

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการประมาณจึงเท่ากับ $\pm 3,378$ ลูกบาศก์เมตร ดังสมการ (8) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความแตกต่างของปริมาตรที่เกิดขึ้นจริงจากการรังวัดทั้งสองวิธีเท่ากับ 3,653 ม.³ (จากตารางที่ 6) พบว่าการประมาณขอบเขตความคลาดเคลื่อนมีความแตกต่างจากความแตกต่างที่เกิดขึ้นจริงอยู่ 57 ม.³ ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถนำเอาไปใช้ในการประมาณความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียม RTK ในหน้างานในบ่อเหมืองถ่านหินได้

4.2.2 การทดสอบที่เหมืองหงสา

ในการทดสอบหน้างานจริงที่เหมืองหงสา ระหว่างการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและกล้องประมวลผลรวม เมื่อนำข้อมูลจากการรังวัดทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกัน โดยที่การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมจะใช้ค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดที่จุดกึ่งกลางเป้าทดสอบ ส่วนการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน จะนำเอาเฉพาะพอยต์คลาวด์ที่ตกบนเป้าทดสอบแต่ละเป้ามาหาค่าเฉลี่ย เพื่อเป็นตัวแทนของพอยต์คลาวด์ในแต่ละเป้าทดสอบนั้น ดังรูปที่ 17 รวมทั้งหมดทุกหน้างานจำนวน 734 เป้า และนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งได้ผลดังรูปที่ 18

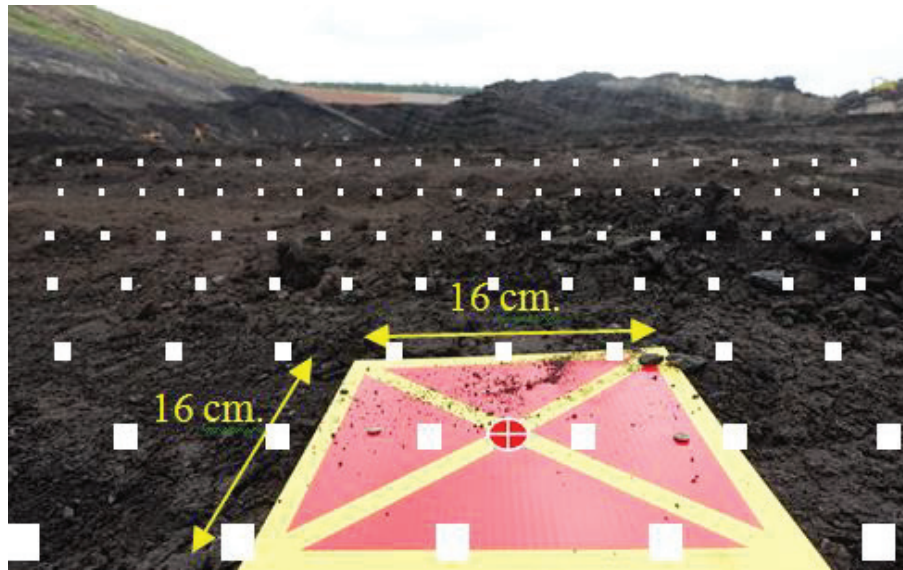
จากรูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่าการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนและกล้องประมวลผลรวม มีความแตกต่างทางราบอยู่ระหว่าง -0.01 ซม. ถึง 29 ซม. เฉลี่ย 9.4 ซม. ความแตกต่างทางตั้งอยู่ระหว่าง 0 ถึง 9.5 ซม. เฉลี่ย 1.8 ซม. ซึ่งสาเหตุของความแตกต่างเชิงตำแหน่ง เกิดจากวิธีการรังวัดที่ต่างกัน กล่าวคือการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมสามารถเลือกจุดในการรังวัดได้ตามตำแหน่งเป้าสะท้อน แต่การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนจะเป็นการเลือกขอบเขตการรังวัด ไม่ใช่การเลือกตำแหน่งในการรังวัดดังนั้นพอยต์คลาวด์ที่ได้จากเครื่องเลเซอร์สแกนจึงไม่ตรงกับข้อมูลจากกล้องประมวลผลรวม

โดยในงานวิจัยนี้ ได้เลือกระดับความละเอียดในการสแกนระดับ 3 จาก ความละเอียด 5 ระดับ ทำให้พอยต์คลาวด์ที่ได้มีระยะห่างระหว่างแต่ละจุด 8.7 ซม. ดังแสดงในตารางที่ 7 ทำให้พอยต์คลาวด์มีโอกาสอยู่ห่างจากข้อมูลจุดพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม แต่หากต้องการให้พอยต์คลาวด์มีความใกล้เคียงกันมากกว่านี้ ต้องเลือกการสแกนที่ละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะได้พอยต์คลาวด์ที่หนาแน่นขึ้น และมีระยะห่างของแต่ละจุดน้อยลง จะทำให้พอยต์คลาวด์ที่ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจุดพิกัดจากกล้องประมวลผลรวมมากขึ้น แต่จะต้องใช้เวลาในการสแกนนานขึ้นด้วย ดังแสดงใน ตารางที่ 7 ซึ่งพิจารณาแล้วอาจไม่

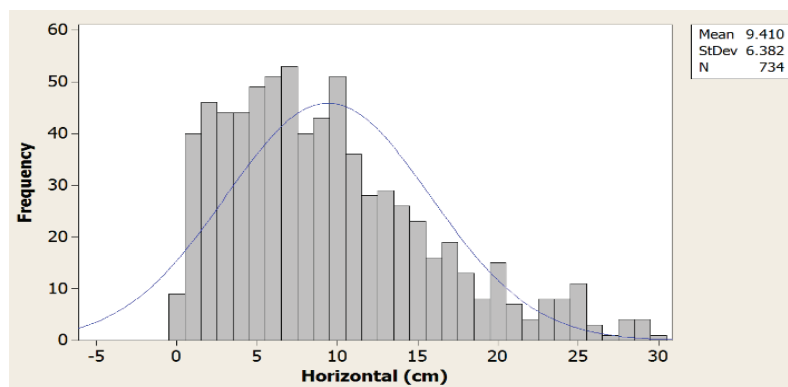
เหมาะสมสำหรับงานสำรวจรังวัดเพื่อหาปริมาตรการขุดภายในบ่อเหมือง เนื่องจากเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ การเลือกความละเอียดในระดับปานกลาง (ระดับ 3) จึงน่าจะเหมาะสมที่สุด เพราะใช้เวลาในการทำงานใกล้เคียงกับการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม

ตารางที่ 7 ระดับความละเอียดและเวลาของการสแกนในหนึ่งครั้ง

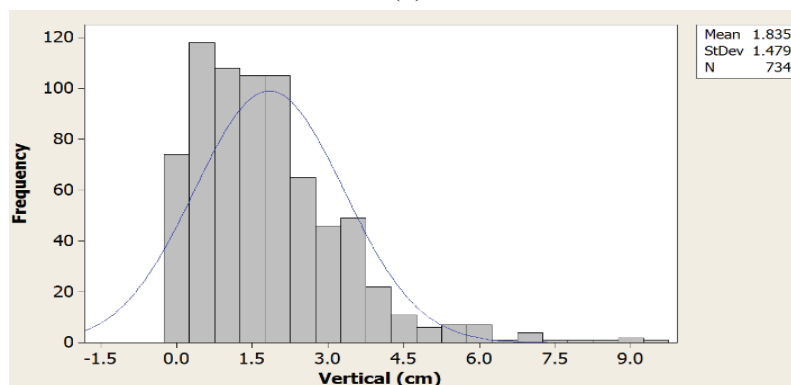
ระดับการสแกน	1	2	3	4	5
เวลา (นาท)	2.07	3.28	11.34	34.58	183.00
ระยะห่างระหว่างจุด (ซม.) ที่ระยะ 100 ม.	2.1	4.3	8.7	17.4	34.9



รูปที่ 17 ข้อมูลจุดที่ได้จากการรังวัดทั้งสองเครื่องมือ
(จุดสี่เหลี่ยม คือ พอยต์คลาวด์ทั้งหมดที่ได้จากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ซึ่งจะเลือกเฉพาะที่ตกบนเป้าทดสอบ
จุดวงกลมกากบาทกึ่งกลางเป้าทดสอบคือจุดที่รังวัดด้วยกล้องประมวลผล)



(ก)



(ข)

รูปที่ 18 ความแตกต่างของการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินกับกล้องประมวลผลรวม
(ก) ความแตกต่างทางราบ (ข) ความแตกต่างทางตั้ง

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบหน้างานจริงเหมืองหงสาระหว่างการรังวัดหาปริมาตรการขุดขนเครื่องเลเซอร์สแกน เปรียบเทียบกับกล้องประมวลผลรวม (แปลงทดสอบ 1, 3 และ 5 เป็นการทดสอบครั้งที่ 1 ช่วง พ.ย.58 และ แปลงทดสอบ 2, 4, และ 6 เป็นการทดสอบครั้งที่ 2 ช่วง พ.ย.59)

พื้นที่ ทดสอบ	ขนาด พื้นที่	พื้นที่ราบ	พื้นที่ ผนัง	ปริมาตร (ม. ³)		ผลต่าง TLS-TS			เวลาในการทำงาน (นาที)	
	(ม. ²)			TS	TLS	ปริมาตร (ม. ³)	%	ค่าระดับ (ม.)	TS	TLS
1.BHE	12,999	12,381	618	55,304	55,614	310	0.56	0.024	33	35
2.BHE	14,268	13,777	491	51,608	51,728	120	0.23	0.008	46	35
3.SVE	13,826	12,233	1,593	90,170	90,664	494	0.55	0.036	41	35
4.SVE	12,940	11,605	1,335	83,552	84,293	741	0.89	0.057	30	35
5.BWE	13,105	11,446	1,659	104,77	106,44	1,670	1.59	0.127	35	35
6.BWE	12,706	11,534	1,172	107,03	108,79	1,758	1.64	0.138	32	35
ผลรวม	79,844	72,976	6,868	492,44	497,54	5,093	1.03	0.064	217	210
ค่าเฉลี่ย	13,307			82,075	82,923		0.91	0.065		
SD								0.055		

ได้ผลการคำนวณปริมาตรดังตารางที่ 8 สามารถสรุปได้ว่าการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม มีความแตกต่างกันร้อยละ 0.23 ถึง 1.64 และเฉลี่ยร้อยละ 0.91 มีความแตกต่างทางระดับ +0.008 ม. ถึง +0.138 ม. เฉลี่ย +0.065 ม.

สาเหตุของความแตกต่างในการรังวัดหาปริมาตรของทั้งสองเครื่องมือ มาจากความละเอียดของข้อมูลที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมจะมีจุดในการรังวัดห่างกันประมาณ 10 ม. แต่การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกน พอยต์คลาวด์ แต่ละจุดห่างกันประมาณ 8.7 ซม. แสดงให้เห็นว่าการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน มีความละเอียดมากกว่าการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวมมาก ทำให้พื้นที่ผิวสามเหลี่ยม) Triangulated Irregular Network หรือ TINs) ที่ได้มีความแตกต่างกัน ดังรูปที่ 19 ส่งผลให้ปริมาตรที่คำนวณได้แตกต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณที่ไม่สามารถรังวัดด้วยกล้องประมวลผลได้ เช่น บริเวณผนังของบ่อเหมือง จะมีความแตกต่างกันมากเนื่องจากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม ไม่สามารถรังวัดที่ผิวของผนังได้ แต่เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินสามารถสแกนได้ ทำให้สามารถเก็บรายละเอียดของสภาพภูมิประเทศได้

สะท้อนความเป็นจริงมากกว่าการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม

ส่วนขนาดของพื้นที่ทดสอบนั้นไม่มีผลต่อความแตกต่างของทั้งสองวิธี จากข้อมูลในตารางที่ 8 แปลงที่ 2 มีขนาดพื้นที่ 14,268 ม.² ซึ่งเป็นแปลงทดสอบที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่ที่สุด มีความแตกต่างทางระดับ 0.008 เมตร และแปลงที่ 6 มีขนาดพื้นที่ 12,706 ม.² ซึ่งเป็นแปลงทดสอบที่มีขนาดพื้นที่เล็กที่สุด มีความแตกต่างทางระดับ 0.138 เมตร แสดงให้เห็นว่า ความคลาดเคลื่อนไม่ได้เพิ่มมากขึ้นตามขนาดของพื้นที่แสดงให้เห็นว่าถึงแม้พื้นที่จะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของการรังวัดทั้งสองวิธี แต่สิ่งที่จะส่งผลต่อความแตกต่างคือลักษณะของพื้นที่ภูมิประเทศ โดยเฉพาะหน้างานที่มีพื้นที่ภูมิประเทศไม่ราบเรียบ มีลักษณะเป็นกองดินหรือหลุมจำนวนมาก จะทำให้ปริมาตรที่รังวัดได้มีโอกาสแตกต่างกันมาก เนื่องจากเครื่องเลเซอร์สแกนสามารถรังวัดกองดินหรือหลุมได้ทั้งหมด ในขณะที่การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม ไม่สามารถรังวัดได้ทุกตำแหน่งบนภูมิประเทศ แต่เป็นการสุ่มรังวัด จึงทำให้เกิดความแตกต่างกัน แต่หากสภาพพื้นที่ภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบ การรังวัดทั้งสองวิธีจะไม่มี ความแตกต่างกันมากนัก

นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะหน้างานของแต่ละเครื่องจักรที่ใช้ชุด มีผลต่อความแตกต่างของการรังวัดทั้งสองวิธี จากตารางที่ 8 พบว่าหน้างานรถขุดบั้งก็หุมจะมี ความแตกต่างมากที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ของผนังมากที่สุด รองลงมาคือหน้างานรถขุดใหญ่ และหน้างานรถขุดเล็ก ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน้างานที่มีพื้นที่บริเวณผนังมากจะมีความแตกต่างกันมาก นอกจากนั้นการรังวัดด้วย เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ยังใช้จำนวนคนในการปฏิบัติงานน้อยกว่า โดยที่ใช้เวลาในการทำงานใกล้เคียงกับ การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม

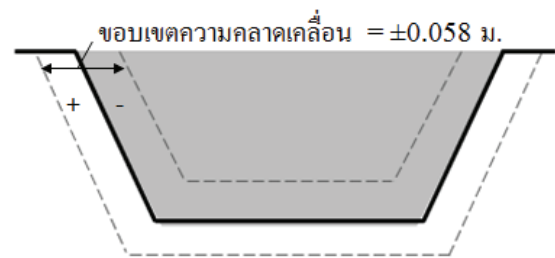
ผลจากการทดสอบยังสามารถหาขอบเขตความคลาดเคลื่อนของการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินได้ดังสมการ (9)

$$E = \pm 2.571 \times \frac{0.055}{\sqrt{6}} = \pm 0.058 \text{ ม.} \quad (9)$$

เมื่อ $t_{\alpha/2, df}$ เท่ากับ 2.571 จากตารางแจกแจงความถี่ t เมื่อ Degree of freedom เท่ากับ 5 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95, σ เท่ากับ 0.055 ม. และจำนวนข้อมูลเท่ากับ 6

จากนั้นทำการทดสอบว่าขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้ (± 0.058 ม.) สามารถนำไปใช้ในการประมาณความคลาดเคลื่อนของการรังวัดหาปริมาตรด้วย เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินได้หรือไม่ โดยการเอาขนาดของพื้นที่ที่รังวัด คูณด้วยค่าขอบเขตความคลาดเคลื่อน (E) ดังสมการ (10) เมื่อขนาดพื้นที่ทดสอบทั้งหมดเท่ากับ 79,844 ม.²

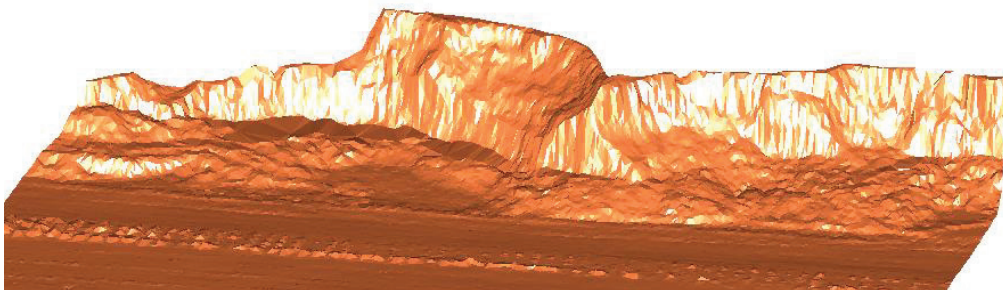
$$79,844 \times (\pm 0.058) = \pm 4,604 \text{ ม}^3 \quad (10)$$



รูปที่ 20 ขอบเขตความคลาดเคลื่อน (margin of error) ของการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน [16]



(ก)



(ข)

รูปที่ 19 (ก) TINs จากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม (ข) TINs จากการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการประมาณจึงเท่ากับ $\pm 4,604$ ม.³ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความแตกต่างของปริมาตรที่เกิดขึ้นจริงจากการรังวัดทั้งสองวิธีเท่ากับ 5,093 ม.³ (จากตารางที่ 8) พบว่าการประมาณขอบเขตความคลาดเคลื่อนมีความแตกต่างกันอยู่ 489 ม.³ ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันมาก ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการประมาณความคลาดเคลื่อนของการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ณ พื้นที่ใดๆ ได้ หากต้องการหาขอบเขตความคลาดเคลื่อนในการรังวัดหาปริมาตรด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ที่สามารถนำไปใช้ในการประมาณความคลาดเคลื่อนในการรังวัดหาปริมาตรได้ จะต้องมีการศึกษาและเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อให้มีจำนวนข้อมูลมากขึ้น จะช่วยให้การคำนวณหาขอบเขตความคลาดเคลื่อนมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้

4.3 ปัจจัยด้านฤดูกาลส่งผลต่อความถูกต้องของการรังวัด

การรังวัดหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินในฤดูที่แตกต่างกันและสภาพอากาศที่แตกต่างกันมีผลต่อความถูกต้องของการรังวัดแต่ละวิธี เช่น ฤดูฝน พื้นผิวภูมิประเทศจะมีลักษณะอ่อน เป็นโคลนเลน การรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม และการรังวัดดาวเทียม RTK อาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากเป้าสะท้อนสำหรับส่องกล้องประมวลผลรวม และขาตั้งจานดาวเทียม RTK อาจจมทะลุลงไปในพื้นที่ผิวภูมิประเทศที่มีลักษณะอ่อน ทำให้ค่าระดับคลาดเคลื่อนต่ำกว่าความเป็นจริง ส่งผลให้การคำนวณปริมาตรเกิดความคลาดเคลื่อน นอกจากนั้นการรังวัดดาวเทียม RTK ในช่วงฤดูฝนอาจพบปัญหาเรื่องการรับสัญญาณดาวเทียม เนื่องจากสภาพอากาศปิด ท้องฟ้ามีเมฆมาก อาจส่งผลต่อการรับสัญญาณดาวเทียม ในบางครั้งไม่สามารถทำการรังวัดดาวเทียมได้ ส่วนการสแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินจะไม่สามารถทำได้ในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขัง เนื่องจากลำแสงเลเซอร์พัลส์ที่ปล่อยออกไปไม่สามารถสะท้อนพื้นผิวภูมิประเทศกลับมาได้ หรือหากมีน้ำขังเพียงเล็กน้อย อาจจะสะท้อนกลับมาแต่อาจเกิดความ

คลาดเคลื่อนได้ ทำให้การสร้างพื้นผิวสามเหลี่ยม (TINs) เกิดการผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง

ในขณะที่การรังวัดในฤดูกาลอื่น พื้นผิวภูมิประเทศจะมีลักษณะแข็ง การตั้งเป้าสะท้อนสำหรับส่องกล้องประมวลผลรวม และการตั้งขาตั้งจานดาวเทียม RTK จะวางอยู่บนพื้นผิวภูมิประเทศที่แข็ง ทำให้ได้ค่าระดับที่ถูกต้องและการสแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนจะสแกนที่พื้นผิวของภูมิประเทศได้ทั้งหมด ทำให้ได้ค่าระดับตามสภาพความเป็นจริง ส่งผลให้การคำนวณปริมาตรมีความถูกต้อง แต่ในช่วงฤดูร้อน ที่มีอากาศร้อนจัด การส่องกล้องประมวลผลรวมไปยังเป้าสะท้อน จะทำได้ยาก เนื่องจากเปลวแดดจะรบกวน ทำให้สายใยกล้องสั่น และจับตำแหน่งที่กึ่งกลางเป้าได้ยาก ทำให้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนในการรังวัดได้ ต้องอาศัยความระมัดระวังในการทำงานเป็นอย่างมากเพื่อป้องกันการส่องเป้าคลาดเคลื่อน

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงผลกระทบจากฤดูกาลดังที่ได้กล่าวไป จึงได้เลือกช่วงเวลาในการทดสอบในช่วงเดือนพฤศจิกายน ซึ่งเป็นฤดูหนาว เพื่อจัดการความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากฤดูกาลออกไป

5. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าการรังวัดปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหิน ด้วยดาวเทียม GNSS แบบ RTK และเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมีความแตกต่างจากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม ร้อยละ 0.37 โดยเฉลี่ย และ 0.91 โดยเฉลี่ย ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือและลักษณะหน้างานแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน ตลอดจนสภาพอากาศก็อาจส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน แต่ก็ถือว่าการรังวัดด้วยเครื่องมือและวิธีการใหม่มีความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับวิธีการเดิม อีกทั้งยังมีความคล่องตัวกว่า ใช้จำนวนคนน้อยกว่า ใช้เวลาในการทำงานใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินจะช่วยให้การรังวัดมีความ

ถูกต้องตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น จึงสรุปว่า มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำเอาการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS แบบ RTK และเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมาใช้ทดแทนหรือนำมาใช้ร่วมกับกล้องประมวลผลรวม ในการรังวัดเพื่อหาปริมาณงานขุดหน้าดินและถ่านหินบริเวณเหมืองเปิดขนาดใหญ่ได้ โดยที่คุณภาพของงานไม่ลดลงและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับผู้บริหารของ กฟผ. ในการตัดสินใจ เนื่องจากการเปลี่ยนเครื่องมือและวิธีการในการรังวัดหาปริมาณ อาจจะมีผลต่อการจ่ายค่าดำเนินการขุดขนให้กับบริษัทผู้รับจ้าง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการความร่วมมือทางการศึกษา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (โครงการ กฟผ.-มช.) และขอขอบคุณ บริษัท หงสาพาเวอร์ จำกัด (HPC) ที่ให้การสนับสนุนทั้งเครื่องมือและบุคลากรในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชัย เยี่ยงวีรชน และ วิชัย เยี่ยงวีรชน. การสำรวจรังวัด ทฤษฎีการประยุกต์ใช้, 2549;155-180.
- [2] Barbarella, M. and Fiani, M. and Lugli, A. Multitemporal Terrestrial Laser Scanning Survey of a Landslide. Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction, University of Bologna, Italy, 2015; 89-121.
- [3] มาตรฐานการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส. สภาวิศวกร, 2558; 1, 11-13
- [4] Rabbany, A.E. Introduction to the global positioning System. Boston, 2002,77-78.
- [5] Pfeifer, N. and Briese, C. LASER SCANNING – PRINCIPLES AND APPLICATIONS, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. Vienna University of Technology, Austria, 2007.
- [6] Dumrongchai, P. and Wichienchaeron, C. and Promtong, C. Local Geoid Modeling for Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 2012; 8(4): 15-26.
- [7] Leica Geosystems. Leica TPS1200+ Series Technic Data, 2006. [Online] Available: <http://www.leica-geosystems.com>
- [8] Trimble Navigation Limited. Trimble R10 GNSS SYSTEM datasheet, 2013. [Online] Available: <http://www.trimble.com/survey/trimbler10.aspx>
- [9] Trimble Navigation Limited. Trimble R8 GNSS SYSTEM datasheet, 2006. [Online] Available: <http://www.trimble.com/survey/trimble-r8s.aspx>
- [10] Maptek I-site 8820. Technical Specifications, 2016. [Online] Available: http://www.maptek.com/pdf/i-site/Maptek_I-Site_8820_spec_sheet.pdf
- [11] Trimble Navigation Limited. Technical Notes, Trimble Business Center Office Software, 2015. [Online] Available: <http://www.trimble.com/survey/trimble-business-center.aspx>
- [12] Chekole, S.D. Surveying with GPS, total station and terrestrial laser scanner, a comparative study. Master of Science Thesis in Geodesy No.3131, School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology, Sweden, 2014.
- [13] Hexagon Mining, Minesight overview. 2015. [Online] Available: <http://hexagonmining.com/products/all-products/minesight-3d>
- [14] ธาณินทร์ ศิลป์จารุ. การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS. 2553; 411-414.
- [15] Smith, D.A. and Milbert, D.G. Evaluation of the EGM96 Model of the Geopotential in the United States National Geodetic Survey, NOAA. [Online] Available: https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/egm96.html
- [16] Draeyer, B. and Strecha, C. How accurate are UAV surveying methods, Pix4D White. [Online] Available: https://support.pix4d.com/hc/en-us/article_attachments/200932859/Pix4D_White_paper_How_accurate_are_UAV_surveying_methods.pdf



การศึกษา และพัฒนาขั้นตอนวิธีการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้โดย ใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นสำหรับภาพคิวอาร์โค้ด

Study and Development of a Reversible Data Hiding Algorithm Using Linear Weighting for QR Code images

ชัยพร ปานยินดี*, ชีรนัย ลีลาวิวัฒน์ 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

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอหนึ่งกลยุทธ์ใหม่ของการฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ (Reversible Data Hiding: RDH) สำหรับภาพคิวอาร์โค้ด การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น (Weight Linear) ถูกใช้ร่วมกับ RDH หลายเทคนิคที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้สามารถฝังข้อมูลจำนวนมากลงในภาพคิวอาร์โค้ด (QR Code) ได้ โดยหลังการฝังข้อมูลภาพยังคงความบิดเบือนต่ำ หลายค่าการถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นถูกใช้ประโยชน์อย่างมีนัยยะสำคัญต่อความจุที่เป็นไปได้ ผลการทดลองทดสอบกับภาพคิวอาร์โค้ดหลายเวอร์ชันที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ถูกเปรียบเทียบกับงานในอดีตก่อนหน้านี้เร็ว ๆ นี้ วิธีการที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าทั้งในแง่ของความจุของการฝังที่สูง และความบิดเบือนที่ต่ำ

คำสำคัญ: การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น การฝังข้อมูลแบบกู้คืนกลับได้ คิวอาร์โค้ด

ABSTRACT

This paper presented a novel strategy for a reversible data-hiding (RDH) algorithm used in QR Code imaging. The linear weighting was used with many effective RDH techniques to embed large amounts of data into QR Code images with low distortion. Many linear weighting values were exploited significantly for the possible capacity. Experimental tests with several QR Code versions were carried out and the results have been compared to previous work in term of higher embedding capacity, the approach utilized in this paper provided better results with lower distortion.

Keywords: Linear weighting; Reversible data hiding; QR Code

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคนิคการฝังข้อมูลถูกประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น ภาพ เสียง และวิดีโอ เป็นต้น คิวอาร์โค้ดเป็นหนึ่งในข้อมูลมัลติมีเดียที่มีบทบาทสำคัญ และถูกใช้อย่างแพร่หลาย คิวอาร์โค้ดสามารถเก็บข้อมูล

ดิจิทัลได้หลายรูปแบบ เช่น ตัวอักษร อักษรแฉก แสดง URL ของเว็บไซต์ ข้อความ หรือ ข้อมูลส่วนตัว เป็นต้น การส่งข้อมูลผ่านทางคิวอาร์โค้ดส่วนใหญ่สามารถเข้าถึงได้ แต่มีข้อมูลบางประเภทถูกสงวนไว้สำหรับผู้รับ เช่น เลขบัญชีธนาคาร เลขบัตรประจำตัวประชาชน เป็นต้น ข้อมูล

เหล่านี้ต้องการเทคนิคสำหรับการฝังที่สามารถอำพรางข้อมูลไปพร้อมกับคีย์เวิร์ดได้ หลายเทคนิคสำหรับการฝังข้อมูลจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยทั่วไปเทคนิคการฝังข้อมูลมีทั้งแบบที่สามารถกู้คืนข้อมูลกลับได้ (Reversible Data Hiding : RDH) และแบบที่ไม่สามารถกู้คืนภาพต้นฉบับได้ (Watermarking) โดยขึ้นอยู่กับ การประยุกต์ใช้งาน

RDH ถูกพัฒนาอย่างยาวนาน มีหลายงานวิจัยต้องการพัฒนาประสิทธิภาพ ปัญหาใหญ่สุดในกระบวนการดั้งเดิมของเทคนิค Difference Expansion (DE) [1-3] พบว่าขนาดของพื้นที่แมป (location map) มีขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าจะถูกบีบอัดแล้ว พื้นที่แมปเหล่านี้ยังคงต้องถูกฝังลงเป็นส่วนหนึ่งไปพร้อมกับเพย์โหลด ดังนั้นการลดขนาดของพื้นที่แมปจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องถูกปรับปรุง มีหลายการปรับปรุง เช่น [4-6] มุ่งเน้นไปที่การลดขนาดของพื้นที่แมปโดยมีพื้นฐานมาจากวิธีการของ Tian เดิม Kamstra และ Heijmans [2] ได้ปรับปรุงวิธีการของ DE โดยการเรียงลำดับคู่พิกเซล ตามความสัมพันธ์ที่ถูกกำหนดโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากพิกเซลข้างเคียง พื้นที่แมปมักจะครอบคลุมเฉพาะส่วนที่มีการเรียงลำดับเท่านั้น ซึ่งทำให้พื้นที่ในการฝังข้อมูลสูงขึ้น Kim และคณะ [3] ได้ลดขนาดของพื้นที่แมป โดยการกำจัดพิกเซลที่คลุมเครือออกจากการฝัง วิธีของพวกเขาให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธีของ Kamstra และ Heijmans [2] อย่างไรก็ตามวิธีการที่ได้กล่าวมาเพิ่มได้เพียงพื้นที่ของการฝังข้อมูล แต่ไม่สามารถลดความบิดเบือนของภาพได้

Ni และคณะ [15] นำเสนอเทคนิค Histogram Shift (HS) ในโดเมนเชิงพื้นที่ Thodi และ Rodriguez [8] นำเทคนิค HS ไปใช้งานร่วมกับเทคนิค Prediction Error (PE) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความบิดเบือน Sachnev และคณะ [13] ได้ปรับปรุงประสิทธิภาพของ Prediction Error Expansion (PEE) โดยใช้การเรียงลำดับข้อมูล (Sorting Data) เมื่อใช้ประโยชน์จาก HS สำหรับการฝังร่วมกับรูปแบบการทำนายที่สามารถจัดเรียงลำดับค่า PE ได้ งานของพวกเขา

ให้ผลลัพธ์ที่ยืดหยุ่น โดยเฉพาะการลดขนาดของพื้นที่แมปได้อย่างมีนัยยะสำคัญ ในบางครั้งสามารถกำจัดการใช้พื้นที่แมปได้อีกด้วย

เมื่อเร็ว ๆ นี้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฝังข้อมูลลงในภาพคีย์เวิร์ดหลายรูปแบบ สุพัต รุ่งเรืองศิลป์ [9] นำเสนอการพัฒนาคีย์เวิร์ดร่วมกับลายน้ำดิจิทัลเพื่อซ่อนข้อมูลลับ พวกเขาใช้การทรานฟอร์ม 3 แบบ ได้แก่ Discrete Cosine Transform, Discrete Fourier Transform และ Discrete Wavelet Transform งานของเขาแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการทรานฟอร์มในแต่ละแบบสำหรับการฝังข้อมูล อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวไม่สามารถกู้ภาพต้นฉบับหลังการฝังได้ทั้งหมด ชานน สภาวัฒน์นันท์ [10] นำเสนอวิธีปรับปรุงการฝังรูปลงในภาพคีย์เวิร์ดโดยใช้การแปลง Pad Character เพื่อเพิ่มขนาดพื้นที่ว่างสำหรับใส่รูปที่ต้องการฝัง ปรีญาทิพย์ แดงมี [11] นำเสนอการอำพรางข้อมูลลับบนภาพคีย์เวิร์ดโดยแยกเพนสี R, G และ B ออกเพื่อซ่อนข้อมูลลงในบิตสุดท้าย (LSB) ของทุกพิกเซล เทคนิคที่ผู้เขียนนำเสนอช่วยให้ข้อมูลต้นฉบับไม่เสียหาย แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวนี้ให้ปริมาณการฝังที่ต่ำ เมื่อเทียบกับจำนวนพิกเซลในภาพ และการกู้คืนข้อมูลกลับในบางการฝังไม่สามารถทำได้

หนึ่งในปัญหาสำคัญสำหรับการฝังข้อมูลลงในภาพคีย์เวิร์ด พบว่า พิกเซลส่วนใหญ่ของคีย์เวิร์ดมีลักษณะเหมือนสัญญาณรบกวน (ค่าเฉลี่ยของพิกเซลเข้าใกล้ค่าสูงสุด และต่ำสุด คือ 0 และ 255) ลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลกระทบต่อกรฝังข้อมูลลงในบิตสุดท้าย เพราะจะก่อให้เกิดปัญหา Overflow/Underflow ซึ่งทำให้ไม่สามารถฝังข้อมูลลงในพิกเซลเหล่านั้นได้ ดังนั้น ในงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอหนึ่งกลยุทธ์ใหม่เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว เทคนิคการถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นถูกใช้ร่วมกับ RDH หลายเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ อาทิเช่น PEE, HS, Sorting, DMT เป็นต้น เพื่อให้สามารถฝังข้อมูลได้มากขึ้น และยังคงสามารถกู้คืนกลับได้ทั้งหมด

รายละเอียดส่วนอื่น ๆ ของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้ ส่วนที่ 2 อธิบายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 อธิบายขั้นตอนวิธีที่นำเสนอประยุกต์ใช้กับ RDH ส่วนที่ 4 อธิบายผลการทดลอง และส่วนที่ 5 สรุปผลการทดลอง

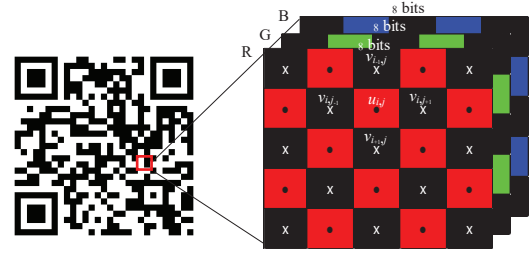
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 Reversible Data Hiding [12], [13]

หนึ่งเทคนิคที่สำคัญของ RDH สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการฝัง คือ Double Embedding [13] การฝังข้อมูลโดยแบ่งภาพออกเป็น 2 เลเยอร์ ช่วยให้สามารถฝังข้อมูลได้มากขึ้นเกือบสองเท่า และลดความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบ Single Embedding [1], [2] และ [8] การฝังข้อมูลแบบ Double Embedding ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในทุกแง่มุม อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของกระบวนการฝังยังคงมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญ หนึ่งในนั้น คือ รูปแบบการทำนาย เพื่อให้สามารถฝังข้อมูลแบบ Double Embedding ได้ ตัวทำนาย Rhombus ถูกใช้รายละเอียดจะอธิบายต่อไปในหัวข้อ 2.1.1

2.1.1 การทำนายโดยใช้รูปแบบ Rhombus [13]

สำหรับการทำนายโดยใช้รูปแบบ Rhombus ซึ่งประกอบด้วยพิกเซลข้างเคียง 4 ตำแหน่งจากสี่ทิศทาง คือ $v_{i,j-1}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$ และ $v_{i-1,j}$ ถูกใช้สำหรับการทำนาย และเมื่อรวมกับพิกเซลศูนย์กลาง ($u_{i,j}$) จะเป็นหนึ่งเซลล์ที่ใช้สำหรับซ่อนข้อมูล 1 บิต ในหนึ่งภาพจะถูกแบ่งออกเป็น 2 เซต คือ เซตครอส และคอต ดังรูปที่ 1 สังเกตว่า เมื่อเซตของครอสถูกใช้สำหรับการฝังข้อมูล เซตของคอตจะถูกใช้สำหรับการทำนาย ซึ่งการฝังในลักษณะนี้ถูกเรียกว่า การฝังครอส (Cross Embedding) และในทางกลับกันเมื่อค่าพิกเซลในเซตของคอตถูกใช้เพื่อฝังข้อมูล ในเซตของครอสจะถูกใช้สำหรับการทำนาย การฝังข้อมูลแบบนี้เรียกว่า การฝังคอต (Dot Embedding) หมายเหตุ ขนาดของข้อมูลสำหรับการฝังในครอสเซต และคอตเซตควรมีขนาดที่เท่ากันเพื่อให้ได้ความบิดเบือนต่ำ ค่าที่ถูกทำนายกำหนดให้เป็น $u'_{i,j}$ สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้



รูปที่ 1 การแบ่งครอสเซต และคอตเซตในภาพสีควาร์โค้ด

$$u'_{i,j} = \left\lfloor \frac{v_{i,j-1} + v_{i+1,j} + v_{i,j+1} + v_{i-1,j}}{4} \right\rfloor \quad (1)$$

เมื่อได้ค่า $u'_{i,j}$ ผู้วิจัยสามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทำนาย (PE) $d_{i,j}$ ได้ดังต่อไปนี้

$$d_{i,j} = u_{i,j} - u'_{i,j} \quad (2)$$

2.1.2 Histogram Shifting (HS) [7], [8]

เทคนิคการเลื่อนฮิสโตแกรมถูกใช้ในหลายงาน เช่น [7], [8], [13] และ [15] เป็นต้น HS เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดขนาดของพื้นที่แมป (พื้นที่แมปคือพิกเซลที่มีปัญหาไม่สามารถฝังข้อมูลได้) โดยการแก้ปัญหาการซ้อนทับของพิกเซลเดิมของเทคนิค DE กระบวนการฝังข้อมูลของ HS สามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$D_{i,j} = \begin{cases} 2d_{i,j} + b, & \text{if } d_{i,j} \in [T_n; T_p] \\ d_{i,j} + T_p + 1, & \text{if } d_{i,j} > T_p \text{ and } T_p \geq 0 \\ d_{i,j} + T_n, & \text{if } d_{i,j} < T_n \text{ and } T_n < 0 \end{cases} \quad (3)$$

การกู้คืนข้อมูลต้นฉบับของค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ และบิตข้อมูลที่ถูกฝัง b จาก $D_{i,j}$ ได้ ตามสมการดังนี้

$$d_{i,j} = \begin{cases} \lfloor D_{i,j} / 2 \rfloor, & \text{if } D_{i,j} \in [2T_n; 2T_p + 1] \\ D_{i,j} - T_p - 1, & \text{if } D_{i,j} > 2T_p + 1 \text{ and } T_p \geq 0 \\ D_{i,j} - T_n, & \text{if } D_{i,j} < 2T_n \text{ and } T_n < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$b = D_{i,j} \bmod 2, \quad D_{i,j} \in [2T_n; 2T_p + 1] \quad (5)$$

2.1.3 Sorting Data [2]

การเรียงลำดับข้อมูลก่อนการฝัง คือ หนึ่งกลยุทธ์ที่ช่วยลดความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง การเรียงค่า PE ที่สอดคล้องตามค่าความแปรปรวน μ เป็นข้อได้เปรียบทำให้การฝังข้อมูลยังคงสามารถกู้คืนต้นฉบับกลับได้ ค่าความแปรปรวนคำนวณได้ดังนี้

$$\mu_{i,j} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (\Delta v_k - \Delta \bar{v}_k)^2 \quad (6)$$

โดยที่ $\Delta v_1 = |v_{i,j-1} - v_{i-1,j}|$, $\Delta v_2 = |v_{i-1,j} - v_{i,j+1}|$,

$\Delta v_3 = |v_{i,j+1} - v_{i+1,j}|$, $\Delta v_4 = |v_{i+1,j} - v_{i,j-1}|$,

$\Delta \bar{v}_k = (\Delta v_1 + \Delta v_2 + \Delta v_3 + \Delta v_4) / 4$

สังเกตว่า ลำดับค่าของการคำนวณค่าความแปรปรวนจะไม่กระทบกับตำแหน่งที่ใช้ในการฝัง เช่น เมื่อฝังข้อมูลในกรอบสี่ตำแหน่งของคอตจะถูกใช้ อย่างไรก็ตามเทคนิคการเรียงลำดับข้อมูลจะไม่มีประสิทธิภาพเมื่อต้องฝังข้อมูลขนาดใหญ่

2.1.4 Double Modification Testing: DMT

การใช้เทคนิค HS สำหรับการฝังข้อมูล พบว่าในบางพิกเซลมักก่อปัญหา Overflow และ Underflow ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ พิกเซลที่เกิดปัญหา Overflow หรือ Underflow ต้องถูกทำเครื่องหมาย และเก็บแมปสำหรับการกู้คืนข้อมูล DMT [13] คือ หนึ่งวิธีการที่สำคัญสำหรับการลดขนาดของพื้นที่แมป ซึ่งถูกกล่าวขานอย่างยาวนานในหมู่นักวิจัย RDH 7 เซตถูกออกแบบไว้สำหรับขั้นตอนการเข้ารหัส และอีก 7 เซต สำหรับขั้นตอนการกู้คืนข้อมูล ดังนี้ EE (Expand-Expand), ES (Expand-Shift), SS (Shift-Shift), E (Expand), S (Shift), NE (None-Expand) และ NS (None-

Shift) พิกเซลที่อยู่ในเซต EE และ ES จะถูกเก็บไว้สำหรับการฝังข้อมูล พิกเซลในเซต SS จะถูกเลื่อนพิกเซลในเซต E และ S จะต้องกำหนดแมปเป็น “0” และในเซต NE และ NS กำหนดแมปเป็น “1” เพื่อให้สามารถกู้คืนต้นฉบับได้

3. วิธีการนำเสนอ

หนึ่งในปัญหาสำคัญสำหรับการฝังข้อมูลลงในภาพคิวอาร์โค้ดพบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของพิกเซลมีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด กล่าวคือ 0 และ 255 (สำหรับเพน 8 บิต) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) เมื่อทำการฝังข้อมูลโดยใช้ HS พิกเซลส่วนใหญ่มักเกิดปัญหา Overflow ดังรูปที่ 2 (ข) ซึ่งจำเป็นต้องเก็บพื้นที่แมป และจะไม่สามารถฝังข้อมูลลงในพิกเซลเหล่านั้นได้ ค่าถ่วงน้ำหนักถูกประยุกต์ใช้กับกลุ่มข้อมูลในหลายรูปแบบที่ได้รับ ความสำคัญไม่เท่ากัน คำนวณได้โดยการคูณแต่ละข้อมูลด้วยปัจจัยการถ่วงน้ำหนัก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่พึงต้องการ ผู้เขียนประยุกต์ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับภาพคิวอาร์โค้ด เพราะว่าค่าที่ได้รับหลังจากการถ่วงน้ำหนักมีระดับที่ลดลงตรงตามความต้องการสำหรับค่าเฉลี่ย 255 ในทางเดียวกันยังพบอีกว่า ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ไม่กระทบต่อค่าเฉลี่ยเดิมที่เป็น 0 ดังนั้น หนึ่งกลยุทธ์สำหรับการปรับระดับของค่าเฉลี่ยตามขนาดของการฝังข้อมูลจึงถูกนำเสนอ เพื่อให้สามารถฝังข้อมูลขนาดใหญ่ได้ ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นถูกใช้เพื่อให้เกิดพื้นที่ว่างสำหรับการซ่อนข้อมูล ค่าถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$w = \frac{255 - C}{u_{MAX}} ; \quad C \in \{1, 2, 3, K, 255\} \quad (7)$$

โดยที่ w คือค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับเพน 8 บิตของภาพคิวอาร์โค้ด C คือพารามิเตอร์สำหรับควบคุมค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับภาพ 8 บิต u_{MAX} คือค่าเฉลี่ยสูงสุดสำหรับภาพ 8 บิต ค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้รับจะถูกนำไปคูณกับ u_{ij} ของภาพก่อนเข้าสู่กระบวนการฝัง (ดูรูปที่ 4) ระดับของการถ่วงน้ำหนักขึ้นอยู่กับปริมาณของข้อมูลที่

ต้องการฝัง และพื้นที่ภายในภาพ อย่างไรก็ตามการถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น การปรับที่ระดับช่วยให้เข้าใกล้ปริมาณการฝังสูงสุดที่เป็นไปได้ ในความบิดเบือนต่ำสุด สำหรับขั้นตอนวิธี RDH หลายเทคนิคที่ถูกใช้ร่วมกับการถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นแสดงบล็อกไดอะแกรมไว้ดังรูปที่ 3 โดยขั้นตอนการฝังข้อมูลและกู้คืนข้อมูลสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 ขั้นตอนการฝังข้อมูล

- 1) นำภาพคิวอาร์โค้ดสีมาแยกเลเยอร์ทั้ง 3 ออกจากกัน (R, G, B)
- 2) นำแต่ละเลเยอร์เข้าสู่กระบวนการประมวลผลเบื้องต้น (pre-processing) โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น w ตามสมการที่ (7) เพื่อลดระดับของค่าเฉลี่ยสีตามชนิดของภาพ และขนาดของการฝัง
- 3) แบ่งพิกเซลในแต่ละเลเยอร์ออกเป็น 2 เซต (ครอสเซต และคอตเซต)
- 4) หาค่าการทำนาย u' จากสมการที่ (1), ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ จากสมการที่ (2) และค่าความแปรปรวน μ จากสมการที่ (6)
- 5) เรียงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ โดยเรียงตามค่าความแปรปรวน μ

6) ใช้เทคนิค DMT เพื่อตรวจสอบสถานะของทุกพิกเซลก่อนการฝัง

7) หาช่วงค่าขีดแบ่ง (T_n และ T_p) ที่เหมาะสมสำหรับการฝังข้อมูล

8) ฝังข้อมูลโดยใช้เทคนิค HS ตามสมการที่ (3)

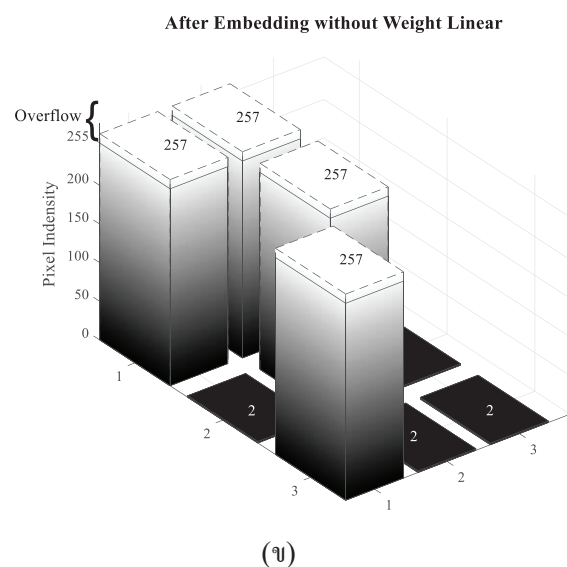
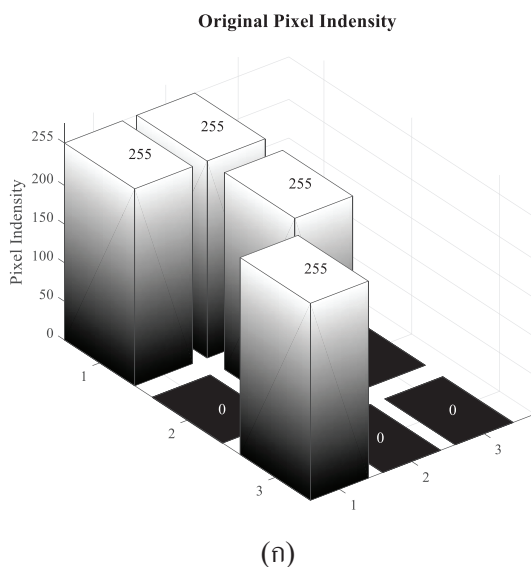
9) ใส่ค่าแฮดเดอร์ขนาด 208 บิตสำหรับผู้รับเพื่อให้สามารถกู้คืนต้นฉบับ และข้อมูลที่ฝังได้ ซึ่งประกอบไปด้วยเพย์โหลด 56 บิต, ค่าขีดแบ่ง (T_n และ T_p) 16 บิต และค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น 136 บิต

10) รวมเลเยอร์สีทั้ง 3 เฟรม (R, G, B) เข้าด้วยกันเสร็จสิ้นขั้นตอนการฝังข้อมูลสำหรับครอสเซต ในคอตเซตทำเหมือนกันกับครอสเซตตามลำดับ

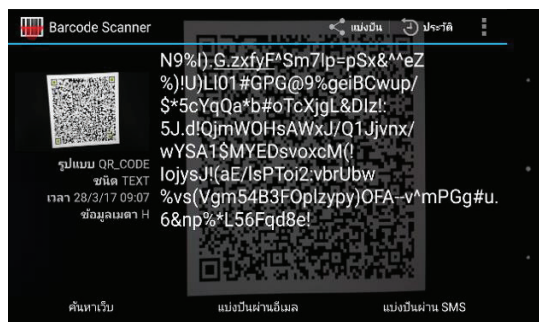
3.2 ขั้นตอนการกู้คืนข้อมูล และภาพต้นฉบับ

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

2) แยกค่าแฮดเดอร์ขนาด 208 บิตที่กันไว้ก่อนหน้าสำหรับผู้รับของแต่ละเลเยอร์ออกมา ซึ่งประกอบด้วยเพย์โหลดขนาด 56 บิต, ช่วงค่าขีดแบ่งขนาด (T_n และ T_p) 16 บิต และค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นที่ได้จากการประมวลผลเบื้องต้นขนาด 136 บิต



รูปที่ 2 (ก) ตัวอย่างภาพคิวอาร์โค้ดต้นฉบับขนาด 3×3 พิกเซล (ข) ฝังข้อมูลลงในภาพ (ก) โดยใช้ HS



รูปที่ 3 ข้อมูลที่ถูกเก็บภายในคิวอาร์โค้ด

3) แบ่งพิกเซลของแต่ละเลขหรือออกเป็น 2 เขตตาม ขั้นตอนการฝัง คำนวณหาค่าการทำนาย u' จากสมการที่ (1) และค่าความแปรปรวน μ จากสมการที่ (6) เรียงลำดับค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย $d_{i,j}$ ใหม่ตามค่าความแปรปรวน μ

4) ตรวจสอบสถานะของพิกเซลโดยใช้ DMT และกู้คืนข้อมูลโดยใช้สมการที่ (5), กู้คืนค่าการทำนายคลาดเคลื่อนโดยใช้สมการที่ (4) ตามลำดับ

5) นำภาพคิวอาร์โค้ดที่ได้กู้คืนเข้าสู่กระบวนการประมวลผลสุดท้าย (post-processing) เพื่อปรับค่าเฉลี่ยให้กลับเป็นค่าดั้งเดิมด้วยค่าถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้น

4. ผลการทดลอง

ในการทดลอง ผู้วิจัยใช้ภาพคิวอาร์โค้ดทั้งหมด 40 เวอร์ชัน ครอบคลุมทุกความเป็นไปได้ ในชุดแรกสำหรับการทดสอบ ได้แก่ 1, 2, 14, 22, 31 และ 40 ตามลำดับความแตกต่าง (ดูในรูปที่ 5) โดยภาพคิวอาร์โค้ดทั้งหมดถูกสร้างผ่านระบบออนไลน์ [14] ผู้วิจัยตั้งค่ามาตรฐานสำหรับการทดสอบ ดังนี้

1. มีข้อมูลบิตที่ผสมกันจากตัวอักษรภาษาอังกฤษ อักขระพิเศษ และตัวเลขมากที่สุดได้ลงในแต่ละเวอร์ชัน คือ 72, 128, 1,576, 3,536, 6,344 และ 10,208 บิตตามลำดับ (ดูจากรูปที่ 3)

2. ตั้งค่าตัวช่วยแก้ไขความผิดพลาดเป็น High
3. ตั้งค่ารูปแบบหน้ากากคิวอาร์โค้ดเป็น 0
4. แต่ละโมดูลมีขนาด 8 พิกเซล
5. มีขอบภาพขนาด 4 โมดูล

กระบวนการทั้งหมดทดสอบโดยคอมพิวเตอร์ PC CPU Core I7-7700 HQ 2.8 GHz, RAM 4 GB, HDD 256 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 10 Pro 64 bit ประมวลผลโดยใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2015b สังเกตว่า ในแต่ละเวอร์ชันของภาพคิวอาร์โค้ดมีจำนวนโมดูลที่แตกต่างกัน จึงทำให้ภาพคิวอาร์โค้ดในแต่ละเวอร์ชันมีขนาด (จำนวนพิกเซล) ที่ไม่เท่ากัน การวัดประสิทธิภาพของการทดลอง ผู้วิจัยใช้ค่า PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) ดังสมการที่ (8)

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (8)$$

โดยที่ค่า MSE คือผลรวมของผลต่างระหว่างพิกเซลต้นฉบับกับพิกเซลที่มีการฝังข้อมูลสามารถหาได้ ดังนี้ (9)

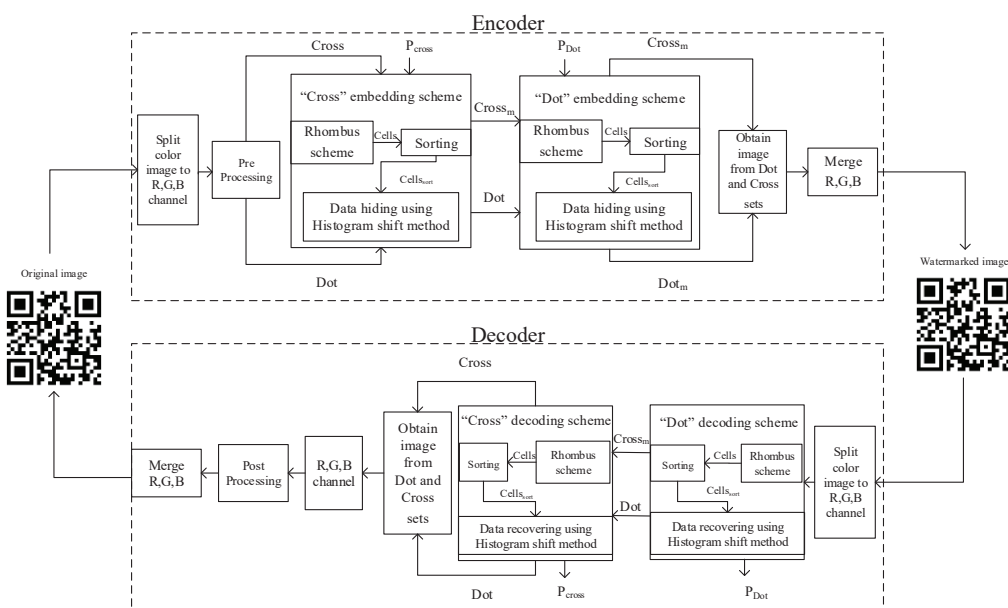
$$MSE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{|u_{i,j} - U_{i,j}|^2}{N \times M} \quad (9)$$

ข้อมูลบิตที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบสุ่มผลลัพธ์จากการทดลองใช้ค่าถ่วงน้ำหนักตั้งแต่ 0.99215, 0.98431, 0.98823, 0.98039, 0.97647 และ 0.97254 ร่วมกับ RDH หลายเทคนิคช่วยให้การฝังข้อมูลทำได้มากขึ้นโดยที่มีการบิดเบือนของภาพหลังการฝังต่ำ แสดงในตารางที่ 1-6 และรูปที่ 6 สังเกตเวอร์ชันที่ 1 ฝังข้อมูลได้ขนาดเล็กสุด ถึงแม้ว่าจะสามารถฝังข้อมูลได้สูงสุดเพียง 20 กิโลบิต ซึ่งต่ำสุดในทั้ง 6 เวอร์ชัน แต่ยังคงเป็นจำนวนที่มากพอสำหรับการใช้งานทั่วไป ข้อเท็จจริงพบว่า ค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละระดับมีผลต่อขนาดในการฝังข้อมูล

ซึ่งในทางอุดมคติดำถ่วงน้ำหนักที่มีค่าสูงควรจะให้ช่องว่างเพื่อซ่อนข้อมูลได้มากขึ้น ในทำนองเดียวกัน พื้นที่ในการฝังควรเพิ่มสูงขึ้นตามระดับของค่าถ่วงน้ำหนักนั้น แต่ในการทดลองพบว่า ในบางค่าถ่วงน้ำหนัก เช่น 0.97647 ที่การฝังเพย์โหลดขนาด 367.20 กิโลบิต ในภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 40 ซึ่งค่าอยู่ระดับกลางให้ผลลัพธ์สำหรับการฝังที่ดีกว่า (ค่า PSNR ที่สูงกว่าในขนาดการฝังที่เท่ากัน) ค่าที่สูง สังเกตการฝังเพย์โหลดที่ 20 กิโลบิต สำหรับภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 1 ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุด คือ 0.99215 ที่เพย์โหลด 218.40 กิโลบิต สำหรับคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 14 ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุด คือ 0.98431 และที่เพย์โหลดที่ 367.20 กิโลบิต สำหรับคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 40 ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุด คือ 0.97647

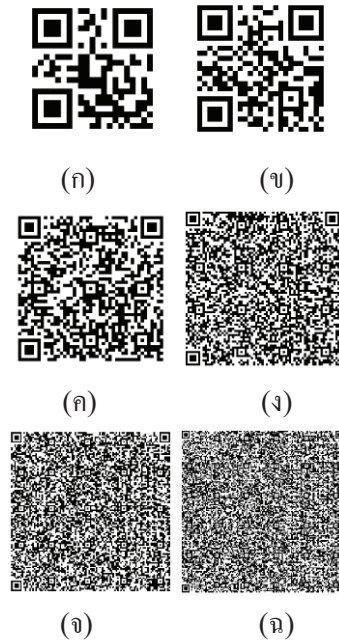
ในตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบวิธีการที่ผู้วิจัยนำเสนอกับวิธีการของปริญาทิพย์ และคณะ [11] ซึ่งทดสอบกับภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 2 ขนาด 264×264 พิกเซล โดยทดสอบฝังเพย์โหลดหลายขนาดที่แตกต่างกัน สถานะ “ผ่าน” หมายถึงข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบฝังสามารถฝังได้ทั้งหมด ในทางตรงกันข้าม สถานะ “ไม่ผ่าน” หมายถึงการทดสอบฝังข้อมูลนั้นไม่สามารถฝังได้ สังเกตการฝังเพย์โหลดที่ 19 กิโลบิต เป็นต้นไป งานของ

พวกเขาไม่สามารถฝังข้อมูลได้ เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ในบิตสุดท้ายที่ใช้ในการฝังมีค่าสูงสุด ดังนั้น การฝังจะไม่สามารถทำได้เพราะเกิดปัญหา Overflow งานของผู้วิจัยให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าทั้งขนาดของการฝัง และประสิทธิภาพของการกู้คืนข้อมูลกลับ การใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมร่วมกับ RDH หลายเทคนิคที่มีประสิทธิภาพช่วยให้สามารถเพิ่มขีดจำกัดของการฝัง ในขณะที่ภาพคิวอาร์โค้ดยังคงสามารถสแกนได้ปกติ อย่างไรก็ตาม หลังจากการทดสอบการฝังโดยใช้กระบวนการ RDH พบว่า การเรียงลำดับโดยใช้เพียงสี่ตำแหน่งข้างเคียงสำหรับการทำนายค่าความแปรปรวนมีการทำนายที่ผิดพลาด ซึ่งส่งผลกระทบต่อความบิดเบือนของภาพหลังการฝัง เพราะค่าความผิดพลาดจากการทำนายที่มีค่าสูงถูกใช้ค่าเหล่านี้มักก่อให้เกิดปัญหา Overflow หลังการฝัง และต้องเก็บแมปสำหรับการกู้คืนกลับ สังเกตว่าปริมาณการฝังเฉลี่ยประมาณ 0.35 บิตต่อพิกเซล ของทั้ง 6 เวอร์ชัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากพื้นที่ในภาพคิวอาร์โค้ดส่วนใหญ่เหมือนกับสัญญาณรบกวน หรือในอีกความหมายหนึ่ง คือ ค่าเฉลี่ยของพิกเซลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้สี่ตำแหน่งไม่เพียงพอสำหรับการคำนวณค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4 ไดอะแกรมกระบวนการฝังข้อมูล และกู้คืนข้อมูล

ในตารางที่ 8 แสดงการทดสอบ ประสิทธิภาพเพิ่มเติมของวิธีการที่นำเสนอเกี่ยวกับภาพคิวอาร์โค้ด 40 เวอร์ชัน โดยใช้เพย์โหลดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ



รูปที่ 5

- (ก) ภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 1 ขนาด 232×232 พิกเซล
 (ข) ภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 2 ขนาด 264×264 พิกเซล
 (ค) ภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 14 ขนาด 648×648 พิกเซล
 (ง) ภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 22 ขนาด 904×904 พิกเซล
 (จ) ภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 31 ขนาด 1192×1192 พิกเซล
 (ฉ) ภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชัน 40 ขนาด 1480×1480 พิกเซล

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.99215

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
20.00	43.359	44.479	52.279	55.171	57.576	59.451
44.80	-	44.067	51.955	54.843	57.256	59.123
69.60	-	-	51.674	54.563	56.959	58.843
94.40	-	-	51.382	54.270	56.681	58.558
119.20	-	-	51.115	54.000	56.404	58.286
144.00	-	-	50.875	53.749	56.161	58.038
168.80	-	-	50.635	53.523	55.918	57.799
193.60	-	-	50.409	53.305	55.701	57.582
218.40	-	-	50.190	53.079	55.493	57.358
243.20	-	-	-	52.882	55.284	57.170
268.00	-	-	-	52.700	55.102	56.982

ตารางที่ 1 (ต่อ) ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.99215

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
292.80	-	-	-	52.520	54.915	56.806
317.60	-	-	-	52.320	54.734	56.606
342.40	-	-	-	52.157	54.557	56.444
367.20	-	-	-	51.996	54.395	56.284

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.98823

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
20.00	43.187	44.312	52.105	55.003	57.403	59.283
44.80	-	43.906	51.797	54.683	57.091	58.968
69.60	-	-	51.521	54.418	56.819	58.703
94.40	-	-	51.245	54.143	56.539	58.421
119.20	-	-	50.977	53.873	56.275	58.155
144.00	-	-	50.745	53.648	56.029	57.908
168.80	-	-	50.522	53.403	55.805	57.686
193.60	-	-	50.294	53.194	55.590	57.467
218.40	-	-	50.077	52.985	55.380	57.262
243.20	-	-	-	52.778	55.185	57.056
268.00	-	-	-	52.601	55.005	56.875
292.80	-	-	-	52.419	54.819	56.703
317.60	-	-	-	52.247	54.648	56.521
342.40	-	-	-	52.075	54.480	56.355
367.20	-	-	-	51.919	54.311	56.206

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.98431

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
20.00	43.356	44.478	52.279	55.167	57.573	59.452
44.80	-	44.071	51.951	54.846	57.250	59.128
69.60	-	-	51.666	54.564	56.965	58.852
94.40	-	-	51.385	54.285	56.674	58.558
119.20	-	-	51.113	53.995	56.397	58.291
144.00	-	-	50.874	53.758	56.159	58.046
168.80	-	-	50.633	53.517	55.926	57.803
193.60	-	-	50.405	53.296	55.703	57.583
218.40	-	-	50.204	53.082	55.481	57.358
243.20	-	-	-	52.877	55.292	57.166
268.00	-	-	-	52.691	55.102	56.977
292.80	-	-	-	52.503	54.917	56.801
317.60	-	-	-	52.315	54.734	56.607

ตารางที่ 3 (ต่อ) ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.98431

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
342.40	-	-	-	52.163	54.557	56.435
367.20	-	-	-	51.997	54.398	56.275

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.98039

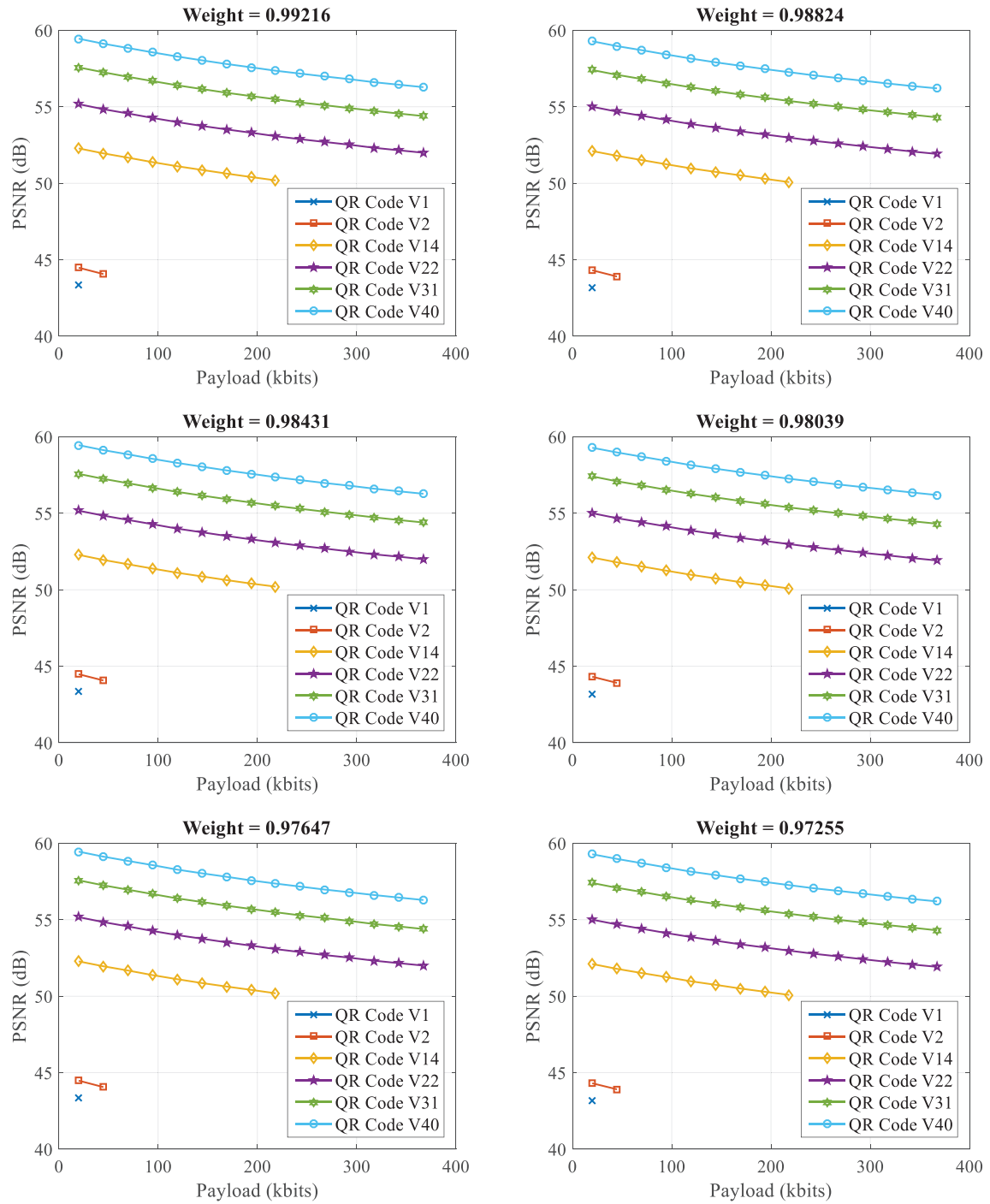
Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
20.00	43.185	44.314	52.106	55.001	57.410	59.282
44.80	-	43.912	51.794	54.679	57.091	58.977
69.60	-	-	51.526	54.412	56.821	58.701
94.40	-	-	51.249	54.141	56.537	58.425
119.20	-	-	50.981	53.870	56.275	58.147
144.00	-	-	50.745	53.632	56.037	57.914
168.80	-	-	50.503	53.396	55.807	57.689
193.60	-	-	50.299	53.191	55.595	57.474
218.40	-	-	50.084	52.982	55.380	57.256
243.20	-	-	-	52.778	55.184	57.065
268.00	-	-	-	52.600	55.004	56.881
292.80	-	-	-	52.420	54.832	56.707
317.60	-	-	-	52.246	54.643	56.531
342.40	-	-	-	52.072	54.478	56.355
367.20	-	-	-	51.915	54.318	56.192

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.97647

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
20.00	43.356	44.481	52.277	55.171	57.575	59.451
44.80	-	44.061	51.958	54.845	57.250	59.125
69.60	-	-	51.681	54.563	56.964	58.844
94.40	-	-	51.380	54.265	56.678	58.570
119.20	-	-	51.114	53.995	56.394	58.277
144.00	-	-	50.862	53.761	56.162	58.035
168.80	-	-	50.633	53.523	55.917	57.809
193.60	-	-	50.417	53.308	55.704	57.573
218.40	-	-	50.191	53.081	55.490	57.363
243.20	-	-	-	52.886	55.286	57.166
268.00	-	-	-	52.690	55.107	56.971
292.80	-	-	-	52.519	54.922	56.797
317.60	-	-	-	52.324	54.720	56.615
342.40	-	-	-	52.161	54.561	56.450
367.20	-	-	-	52.004	54.394	56.290

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์การฝังข้อมูลสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก 0.97254

Payload (kbits)	PSNR (dB)					
	QR Code V1	QR Code V2	QR Code V14	QR Code V22	QR Code V31	QR Code V40
20.00	43.186	44.309	52.105	55.003	57.403	59.281
44.80	-	43.915	51.789	54.691	57.087	58.976
69.60	-	-	51.518	54.413	56.819	58.700
94.40	-	-	51.254	54.131	56.535	58.420
119.20	-	-	50.979	53.872	56.267	58.145
144.00	-	-	50.747	53.633	56.040	57.921
168.80	-	-	50.506	53.397	55.814	57.687
193.60	-	-	50.294	53.186	55.594	57.473
218.40	-	-	50.086	52.979	55.389	57.261
243.20	-	-	-	52.776	55.186	57.056
268.00	-	-	-	52.600	54.993	56.887
292.80	-	-	-	52.419	54.818	56.704
317.60	-	-	-	52.241	54.648	56.522
342.40	-	-	-	52.073	54.482	56.354
367.20	-	-	-	51.922	54.308	56.199



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลลัพธ์ค่า PSNR และจำนวนเพย์โหลดในแต่ละขนาดของการฝังโดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกัน
สำหรับภาพคิวอาร์โค้ดเวอร์ชันต่าง ๆ

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแต่ละขนาดของการฝังระหว่างวิธีการของ [11] กับวิธีการที่นำเสนอ

Payload (kbits)	QR Code V2			
	วิธีการของ [11]		วิธีการที่นำเสนอ	
	ฝังข้อมูล	กู้คืนข้อมูล	ฝังข้อมูล	กู้คืนข้อมูล
3.2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
6.4	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
12.8	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
19.2	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
25.6	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
32.0	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
38.4	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน
44.8	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้แนะนำให้เสนอหนึ่งกลยุทธ์สำหรับการปรับปรุงภาพโดยใช้การถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นที่เหมาะสมร่วมกับหลายเทคนิค RDH ที่มีประสิทธิภาพ โดยประยุกต์ใช้งานกับภาพคิวอาร์โค้ดหลายเวอร์ชัน ระดับของการถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันมีผลต่อขนาดของการฝัง งานของผู้วิจัยแสดงให้เห็นระดับของค่าถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมในแต่ละภาพคิวอาร์โค้ด และแต่ละขนาดของการฝัง ผลลัพธ์ที่ได้ถูกเปรียบเทียบกับงานในอดีตเมื่อไม่นานนี้ วิธีการที่นำเสนอสามารถให้ปริมาณการฝังข้อมูลที่สูงกว่า และมีการบิดเบือนต่ำ ซึ่งหลังการฝังภาพคิวอาร์โค้ดยังสามารถกู้คืนข้อมูลกลับได้ ทั้งข้อมูลที่เป็นความลับ และภาพคิวอาร์โค้ดต้นฉบับ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สำหรับทุนสนับสนุนการทำวิจัย

ตารางที่ 8 ผลลัพธ์ค่า PSNR และค่าถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดสำหรับภาพคิวอาร์โค้ด 40 เวอร์ชัน

QR Code Image	Payload (20 kbits)		Payload (193.60 kbits)		Payload (367.20 kbits)	
	PSNR (dB)	Weight	PSNR (dB)	Weight	PSNR (dB)	Weight
Version 1	43.359	0.99216	-	-	-	-
Version 2	44.481	0.97647	-	-	-	-
Version 3	45.474	0.97647	-	-	-	-
Version 4	46.363	0.99216	-	-	-	-
Version 5	47.177	0.97647	-	-	-	-
Version 6	47.913	0.97647	-	-	-	-
Version 7	48.596	0.98431	-	-	-	-
Version 8	49.229	0.97647	-	-	-	-
Version 9	49.818	0.99216	-	-	-	-
Version 10	50.368	0.99216	-	-	-	-
Version 11	50.888	0.98431	-	-	-	-
Version 12	51.376	0.98431	49.065	0.98039	-	-
Version 13	51.840	0.97647	49.975	0.99216	-	-
Version 14	52.279	0.98431	50.417	0.97647	-	-

ตารางที่ 8 (ต่อ) ผลลัพธ์ค่า PSNR และค่าถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดสำหรับภาพควอาร์โค้ด 40 เวอร์ชัน

QR Code Image	Payload (20 kbits)		Payload (193.60 kbits)		Payload (367.20 kbits)	
	PSNR (dB)	Weight	PSNR (dB)	Weight	PSNR (dB)	Weight
Version 15	52.697	0.98431	50.830	0.98431	-	-
Version 16	53.102	0.99216	51.234	0.98431	-	-
Version 17	53.480	0.99216	51.611	0.98431	-	-
Version 18	53.847	0.97647	51.986	0.98431	-	-
Version 19	54.196	0.97647	52.322	0.99216	-	-
Version 20	54.536	0.98431	52.662	0.98431	51.292	0.97255
Version 21	54.860	0.98431	52.988	0.98431	51.685	0.97647
Version 22	55.171	0.99216	53.308	0.97647	52.004	0.97647
Version 23	55.472	0.98431	53.601	0.98431	52.303	0.98431
Version 24	55.767	0.99216	53.893	0.97647	52.592	0.97647
Version 25	56.050	0.99216	54.178	0.99216	52.882	0.99216
Version 26	56.323	0.99216	54.456	0.97647	53.144	0.97647
Version 27	56.591	0.99216	54.726	0.97647	53.409	0.98431
Version 28	56.846	0.98431	54.983	0.98431	53.668	0.99216
Version 29	57.096	0.97647	55.223	0.98431	53.930	0.98431
Version 30	57.335	0.97647	55.468	0.98431	54.164	0.97647
Version 31	57.576	0.99216	55.704	0.97647	54.398	0.98431
Version 32	57.807	0.97647	55.941	0.97647	54.639	0.98431
Version 33	58.026	0.98431	56.158	0.98431	54.861	0.99216
Version 34	58.250	0.98431	56.377	0.98431	55.077	0.97647
Version 35	58.465	0.99216	56.594	0.97647	55.294	0.99216
Version 36	58.667	0.97647	56.795	0.99216	55.501	0.99216
Version 37	58.874	0.98431	56.999	0.98431	55.695	0.97647
Version 38	59.068	0.99216	57.197	0.97647	55.896	0.97647
Version 39	59.265	0.99216	57.401	0.98431	56.101	0.97647
Version 40	59.452	0.98431	57.583	0.98431	56.290	0.97647

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] 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.
- [3] 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.
- [4] Alattar, A. M. Reversible Watermark using Difference Expansion of Triplets. International Conference on Image Process, Barcelona, Spain, vol. 1, pp. 501-504.
- [5] Alattar, A. M. Reversible Watermark using Difference Expansion of Qads. International Conference on Image Process, May 2004, III377-III380.

- [6] Alattar, A. M. Reversible Watermark Using the Difference Expansion of a Generalized Integer Transform. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004; 13(8): 1147-1156.
- [7] Thodi, D.M. and Rodriguez, J.J. Reversible Watermarking by Prediction-Error Expansion. in Proc. IEEE Southwest Symp. Image Anal. Interpretation, Lake Tahoe, CA, 2004; 21-25.
- [8] Thodi, D. M. and Rodriguez, J. J. Expansion Embedding Techniques for Reversible Watermarking. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007; 16(3): 721-730.
- [9] สุพัต รุ่งเรืองศิลป์. การพัฒนาคิวอาร์โค้ดร่วมกับลายน้ำดิจิทัลเพื่อซ่อนข้อมูล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [10] Chanon Skawattananon. An Improved Method to Embed Larger Image in QR Code. IEEE International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering, 2013; 64-69.
- [11] ปรีญาทิพย์ แดงมี. การอำพรางข้อมูลลับด้วย Steganography บน QR Code. *Journal of Information Science and Technology*, 2015; 5(1).
- [12] Xuan, G., Yang, C., Zhen, Y., Shi, Y.Q. and Ni, Z. Reversible Data Hiding Based on Wavelet Spread Spectrum. IEEE 6th Workshop on Multimedia Signal Processing, Siena, Italy, 2004; 211-213.
- [13] 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.
- [14] Nayuki Project. QR Code generator library. 2560, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.nayuki.io/page/qr-code-generator-library>.
- [15] Ni, Z., Shi, Y.Q., Ansari, N., Su, W., Sun, Q. and Lin, X. Robust Lossless Image Data Hiding. IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2004; 3: 2199-2202.



แบบจำลอง EPANET ระบบโครงข่ายท่อประปา

การประปาส่วนภูมิภาคสาขาพิจิตร

Water Distribution Network Model of EPANET, Provincial Waterworks Authority, Phichit Branch Office

ลิปพนนท์ กิ่งคำ^{*1}, อดิชัย พรพรหมินทร์² และ สุรัชชัย ลิปิวัฒนาการ³
Sippanon Kingkum^{*1}, Adichai Pornprommin² and Surachai Lipiwattanakarn³

¹ สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม กรมชลประทาน

811 ถนนสามเสน แขวงถนนนครไชยศรี เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

^{2,3} ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*Royal Irrigation Department (Engineering and Architectural Design)

811 Samsen road Nakhon chaisi, Dusit, Bangkok 10300

*E-mail Naysib@hotmail.com

บทคัดย่อ

การประปาส่วนภูมิภาคสาขาพิจิตร (แม่ข่าย) เป็นอีกสาขาหนึ่งที่ประสบกับปัญหาแรงดันน้ำที่ให้บริการต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด กล่าวคือมีแรงดันน้ำต่ำในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำสูงสุด (On Peak : 07.00 น.) ต่ำกว่า 7 เมตร แต่กลับมีแรงดันน้ำสูงเกินในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำต่ำสุด (Off Peak : 03.00 น.) จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำสูญเสียสูงตามมา เนื่องจากแรงดันน้ำจ่ายจากต้นทางในปัจจุบันไม่สอดคล้องกับรูปแบบความต้องการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำ และขนาดของเส้นท่อในบางพื้นที่มีขนาดเล็กไม่เหมาะสม ดังนั้นการบริหารจัดการแรงดันน้ำในพื้นที่จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว การศึกษานี้ได้เลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ EPANET 2.0 เพื่อจำลองโครงข่ายระบบท่อประปา เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีจำนวนผู้ใช้น้ำมากและมีโครงข่ายท่อประปาขนาดใหญ่ ทำให้การวิเคราะห์ด้วยประสบการณ์อาจไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ทั้งหมด มีขั้นตอนการศึกษาโดยทำการรวบรวมข้อมูลแรงดันน้ำจากภาคสนามทั้งหมด 11 จุด และปริมาณน้ำจ่ายทั้งหมด 12 จุด ซึ่งผลการสอบเทียบที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลจากภาคสนามนั้นมีความแตกต่างของแรงดันน้ำเฉลี่ย 0.16 เมตร คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อน 1.19 เปอร์เซ็นต์ การศึกษามีวัตถุประสงค์ให้ทั้งพื้นที่ศึกษาได้รับแรงดันน้ำไม่น้อยกว่า 7 เมตร ทุกช่วงเวลา และในขณะเดียวกันก็สามารถลดแรงดันส่วนเกินในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำต่ำ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถลดแรงดันน้ำเฉลี่ยต้นทางจากเดิม 16.80 เมตร เหลือ 13.79 เมตร และส่งผลให้ปริมาณน้ำจ่ายเฉลี่ยต้นทางจากเดิม 552.88 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เหลือ 505.71 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ลดลง 47.17 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 5.59 % โดยที่แรงดันน้ำทั้งพื้นที่ศึกษายังคงไม่น้อยกว่า 7 เมตร ทุกช่วงเวลา และจากการศึกษาความเชื่อถือได้ทางชลศาสตร์ (Reliability) ของระบบโครงข่ายท่อพบว่าเมื่อนำเอาทฤษฎีค่าดัชนีความยืดหยุ่น (Resilience Index, I_r) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบระบบโครงข่ายท่อนั้น ค่า I_r ซึ่งควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 แต่ในการศึกษานี้กลับได้ค่าติดลบในบางช่วงเวลาเนื่องจากปัจจุบันในพื้นที่เฝ้าระวัง

(DMA) บางพื้นที่ผู้ใช้น้ำได้รับแรงดันน้ำต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้จำนวนมากยิ่งไปกว่านั้นใน DMAs 04 และ 06 ที่อยู่ไกลที่สุด พบว่า ค่า I_r ในบางช่วงเวลามีค่ามากกว่า 1 ซึ่งแสดงว่ากำลังน้ำทั้งหมดที่จุดน้ำเข้า DMA นั้นไม่เพียงพออย่างรุนแรง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงทำการเลือกใช้วิธีค่าการปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5) ซึ่งได้ผลจากการวิจัยพบว่าค่า I_5 ต่ำสุดที่ผู้ใช้น้ำได้รับในกรณีหลังทำการศึกษามีค่าสูงกว่าในกรณีก่อนทำการศึกษา โดยที่ในกรณีก่อนทำการศึกษามีค่า I_5 ต่ำกว่า 1 และในกรณีหลังทำการศึกษานั้นให้ค่าสูงกว่า 1 ทุก DMA ตลอดทุกช่วงเวลา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับนั้นมีค่าสูงกว่ากำลังที่ผู้ใช้น้ำควรจะได้รับ ($P_{ext} > P_{min, ext}$) ซึ่งสื่อถึงปริมาณและแรงดันน้ำที่ผู้ใช้น้ำได้รับจากระบบโครงข่ายท่อนั้นมีความเพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำ

ABSTRACT

Provincial Waterworks Authority, Phichit Branch Office (PWAP), is undergoing supplied water pressure problem, where water pressure is lower than the specified criteria. Water pressure is lower than 7 m when water demand is highest (at 07.00 am). However, when water demand is lowest (at 03.00 am), water pressure is too high, and that causes high water losses. The reasons are that water pressure at the source does not relate to water demand, and pipe sizes used in some locations are too small. Therefore, a new water pressure management is proposed to solve the problem. This study uses the mathematical model, called EPANET 2.0, to simulate the PWAP network. We collect water pressure data from 11 locations and supplied water quantities from 12 locations. Assessed data from the model are compared with the field data. It is found that there is 0.16 m difference in average water pressure all the time (1.19% variation). The objective of this study is to maintain at least 7-meter water pressure all the time in the studied area while excess water pressure can be reduced when water demand is low. The result shows that water pressure can be reduced from 16.80 m to 13.79 m. Therefore, the average supplied water is reduced from 552.88 cu.m/hr to 505.71 cu.m/hr, in which water losses reduce 47.17 cu.m/hr or 5.59% reduction. At the same time, water pressure in the study area can maintain at 7 meter for all time. To study the hydraulic reliability of pipe networks, first we applied the Resilience Index I_r , of which the value should range between 0 and 1, but it turns out to have negative values at some time intervals in this study because at present many customers in some district metered areas (DMAs) receive water pressure lower than the minimum required level. Moreover, in DMAs 04 and 06 locate farthest, the value of I_r is higher than 1, meaning that the total water power at inlets of DMAs is severely insufficient. Thus, in this study, the Standards Compliance (I_5) is selected. The results of this research show that the lowest value of I_5 for water users increases when our new water pressure management is applied. The values of I_5 for the present management are lower than 1 in some DMAs, but they are higher than 1 for all DMAs after applying the new management. In conclusion, by using our new management, water powers received by water users are higher than the threshold ($P_{ext} > P_{min, ext}$). This implies that water users receive both sufficient flow and pressure that meet their demand.

1. บทนำ

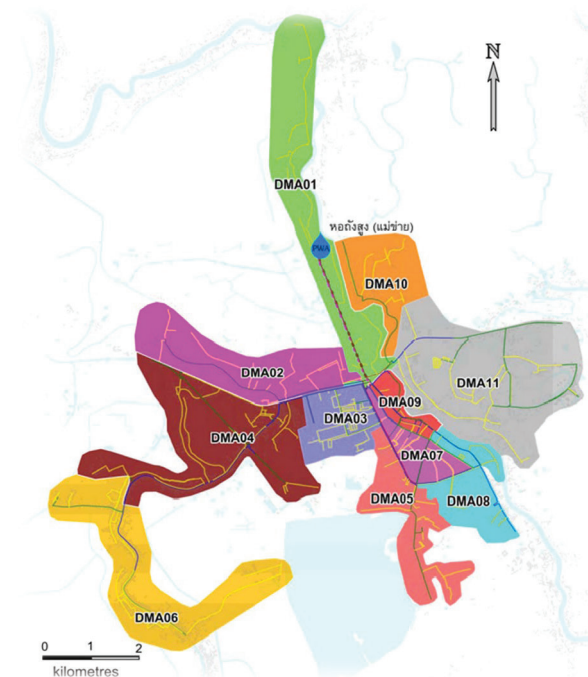
ปัจจุบัน การประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) ได้นำเอา ระบบพื้นที่เผื่อระวัง (District Metering Area, DMA) มาใช้กันอย่างแพร่หลายรวมทั้ง กปภ. สาขาพิจิตร ในพื้นที่ให้บริการแม่ข่าย ซึ่งถือเป็นสาขาลำดับต้นๆ ที่ได้เลือกเอา ระบบ DMA มาออกแบบและติดตั้ง เนื่องจากเป็นสาขาที่มี จำนวนผู้ใช้น้ำมากและมีโครงข่ายท่อประปาขนาดใหญ่ จึง มีการสูบน้ำในปริมาณสูงตามมา ดังนั้นการนำเอาระบบ DMA มาใช้ย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ

ในพื้นที่ไปจากเดิม โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความต้องการ ใช้น้ำสูง เนื่องจากการออกแบบระบบ DMA ของ กปภ. สาขาพิจิตรนั้น ทุก DMA ให้มีน้ำเข้าโซน (Inlet) ได้เพียง ทางเดียว หากเส้นท่อที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งน้ำเข้าโซนนั้นมี ขนาดท่อหรือตำแหน่งติดตั้งที่ไม่เหมาะสม หรือมีแรงดัน น้ำที่ไม่สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำย่อมส่งผลต่อ แรงดันน้ำในพื้นที่ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงระบบจ่าย น้ำประปาในพื้นที่ให้มีประสิทธิภาพ เหมาะสม และ สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำ ตลอดจนเป็นการควบคุม

น้ำสูญเสียอีกทางหนึ่ง การวิเคราะห์ระบบท่อเพื่อปรับปรุงการจ่ายน้ำโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ EPANET 2.0 [1] จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการดังกล่าว [2-3]

2. พื้นที่ศึกษา

กปภ. สาขาพิจิตร มีพื้นที่ให้บริการทั้งสิ้น 39.07 ตารางกิโลเมตร แบ่งพื้นที่ที่จ่ายน้ำออกเป็น 1 แม่ข่าย และอีก 6 หน่วยบริการ ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแสดงพื้นที่ที่จ่ายน้ำทั้งหมด 11 DMA (แม่ข่าย)

โดยการศึกษาได้เลือกเฉพาะพื้นที่แม่ข่ายเท่านั้น ซึ่งมีพื้นที่รับผิดชอบทั้งหมด 12.02 ตารางกิโลเมตร ภูมิประเทศมีลักษณะเป็นที่ราบ จำนวนผู้ใช้น้ำรวมทั้งสิ้น 12,913 ราย โดยแยกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) ที่อยู่อาศัยและอื่นๆ จำนวน 10,079 ราย 2) ประเภทราชการ และธุรกิจขนาดเล็ก จำนวน 2,278 ราย และ 3) ประเภทรัฐวิสาหกิจ อุตสาหกรรมและธุรกิจขนาดใหญ่ จำนวน 556 ราย ท่อประปามีตั้งแต่ 100-500 มิลลิเมตร ประกอบด้วย 1) ท่อประธานยาว 3 กิโลเมตร 2) ท่อจ่าย

น้ำยาว 180 กิโลเมตร และ 3) ท่อบริการยาว 26 กิโลเมตร มีปริมาณการสูญเสีย 13,269 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือเฉลี่ย 552.88 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยใช้แหล่งน้ำดิบในการผลิตน้ำประปาจากแม่น้ำน่าน จ่ายโดยใช้ระบบแรงโน้มถ่วง (Gravity) มีถึงสูงสุดความจุ 500 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 1 ลูก และแบ่งพื้นที่ออกเป็นโซนจ่ายน้ำทั้งหมดจำนวน 11 DMA

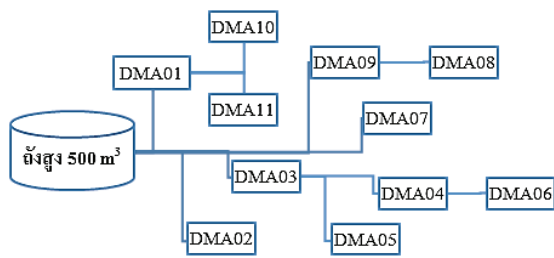
3. ขั้นตอนและวิธีการศึกษา

3.1 วิเคราะห์สมดุลน้ำ (Water Balance)

โดยทำการรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและออกจากพื้นที่แต่ละโซนเพื่อทำการวิเคราะห์หาสมดุลน้ำตามตารางที่ 1 ซึ่งพื้นที่แต่ละ DMA นั้นมีความสัมพันธ์กัน ตามรูปที่ 2

ตารางที่ 1 จำนวนผู้ใช้น้ำและปริมาณน้ำเข้าเฉลี่ย (Inlet) ข้อมูลเดือนกันยายน 2558

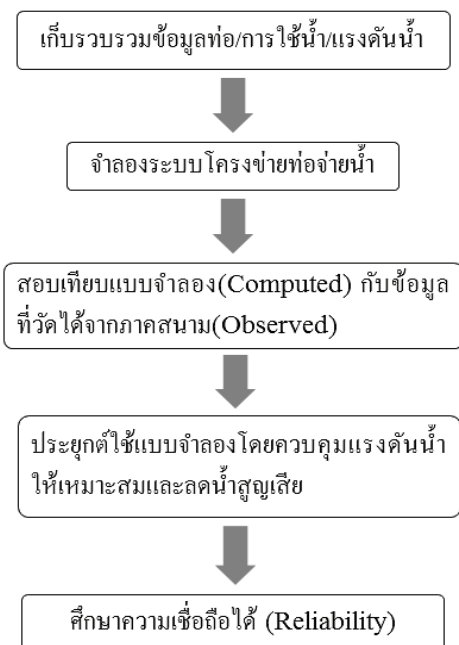
DMA	ผู้ใช้น้ำ	ปริมาณน้ำเข้าเฉลี่ย (Inlet)
	(ราย)	(ลบ.ม./ชม.)
DMA01	920	36.45
DMA02	906	42.62
DMA03	1,734	76.29
DMA04	1,056	30.04
DMA05	1,254	45.98
DMA06	499	11.08
DMA07	2,659	111.53
DMA08	1,092	57.69
DMA09	1,282	61.49
DMA10	327	11.13
DMA11	1,184	63.68
ท่อ	-	4.89
ประธาน	-	-
รวม	12,913	552.87



รูปที่ 2 โค้ดแอมระบบสูบน้ำเข้าแต่ละ DMA

3.2 จัดทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ EPANET 2.0

ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการสร้างแบบจำลอง

3.3 ความเชื่อถือได้ทางชลศาสตร์ (Reliability)

ความเชื่อถือได้ (Reliability) ของระบบสูบน้ำในระบบโครงข่ายท่อเป็นหนึ่งในเป้าหมายสำคัญที่สุดของระบบประปา Walski (2000a) ได้กล่าวว่า วิธีการเพิ่มความเชื่อถือได้ในการดำเนินการของระบบวิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มปริมาณน้ำเก็บกักสำรองสำหรับกรณีฉุกเฉิน เช่น เหตุการณ์ท่อหลักแตกรั่ว ไฟไหม้ เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญ เช่นเดียวกับการดำเนินการเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

และการดำเนินการเพื่อกระจายน้ำให้ได้คุณภาพน้ำที่ดี การตรวจสอบความเชื่อถือได้ของโครงข่ายท่อนั้นมีวิธีหนึ่งที่มีความนิยมคือ การใช้ค่าดัชนีความยืดหยุ่น Resilience index, I_r เสนอโดย Todini (2000) เป็นตัวแทนในการตรวจสอบ โดยโครงข่ายท่อนั้นมักออกแบบเป็นระบบลูป (Loop) เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ทางชลศาสตร์และมีน้ำพร้อมตลอดเวลา แม้ในช่วงเกิดเหตุการณ์ท่อแตก โครงข่ายท่อถูกออกแบบให้ส่งน้ำไปยังผู้ใช้น้ำ ตามความต้องการใช้น้ำและได้รับแรงดันที่ไม่น้อยกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ออกแบบไว้ กรณีมีการเปลี่ยนความต้องการใช้น้ำเนื่องจากท่อแตกรั่ว อัตราการไหลจะเปลี่ยนไปจากเดิมและการสูญเสียพลังงานภายในโครงข่ายจะเพิ่มขึ้น สิ่งนี้อาจทำให้ไม่สามารถส่งน้ำที่อัตราการไหลที่ต้องการภายใต้เงื่อนไขแรงดันขั้นต่ำที่สุดได้ การเพิ่มพลังงานให้แก่แต่ละ node หรือบัพ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหา โดยพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะค่อยๆ สลายภายในโครงข่ายท่อ เมื่อเกิดท่อแตกรั่ว ซึ่งแนวคิดดังกล่าวนี้ Todini (2000) ได้นำเสนอเพื่อแสดงความยืดหยุ่น (I_r) ของโครงข่ายท่อแบบลูป แม้ว่าแนวคิดดังกล่าวไม่ได้พิจารณาค่าทางสถิติของการแตกรั่ว แต่ค่าดัชนีที่สูงขึ้นจะแสดงถึงความเชื่อถือได้ของโครงข่ายที่มากขึ้น เมื่อกำหนดให้ กำลังที่เข้าระบบทั้งหมด (P_{tot}) ณ จุดจ่ายน้ำเข้าระบบ โดยให้ Q_k และ H_k คือ อัตราการไหลและ Head พลังงานตามลำดับ ณ จุดจ่ายน้ำที่ k โดย n_k คือ จำนวนจุดจ่ายน้ำ [4-5] โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (1)

$$P_{tot} = \gamma \sum_{k=1}^{n_k} Q_k H_k \quad (1)$$

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

กำลังในระบบทั้งหมดมาจากกำลัง 2 ส่วน ตามสมการ (2)

$$P_{tot} = P_{int} + P_{ext} \quad (2)$$

P_{int} คือ กำลังที่สลายภายในระบบท่อ

P_{ext} คือ กำลังที่ส่งไปถึงผู้ใช้น้ำซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหล q_i และเสดพลังงาน h_i ณ จุดผู้ใช้น้ำที่ i โดยสามารถ P_{ext} ตามสมการ (3)

$$P_{ext} = \gamma \sum_{i=1}^{n_i} q_i h_i \quad (3)$$

โดยทั่วไปเสดพลังงานที่ผู้ใช้น้ำได้รับ h_i มักจะสูงกว่าเสดขั้นต่ำสุดตามมาตรฐาน $h_{min,i}$ โดยสมมติให้อัตราการไหลยังคงได้ตามเดิม q_i ดังนั้นเราจะสามารถหาค่าสูงสุดที่สามารถสลายภายในระบบท่อได้โดยผู้ใช้น้ำยังคงได้รับเสดขั้นต่ำ $P_{max,int}$ ดังนี้ ตามสมการ (4)

$$P_{max,int} = P_{tot} - \gamma \sum_{i=1}^{n_i} q_i h_{min,i} \quad (4)$$

ดัชนีความยืดหยุ่น I_r เป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐานของค่าที่สลายภายในระบบท่อ สามารถเขียนสมการตาม (5)

$$I_r = 1 - \left(\frac{P_{int}}{P_{max,int}} \right) \quad (5)$$

จากสมการ (5) แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่า I_r สูงจะหมายถึงค่าที่สลายภายในระบบท่อสัมพัทธ์น้อยและสื่อว่ามีความเชื่อถือได้ทางชลศาสตร์สูง

4. ผลการศึกษา

4.1 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายระบบท่อประปา

แบบจำลองโครงข่าย ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้ คือ 1) บัพ (Node) มีจำนวนทั้งหมด 25,782 บัพ 2) เส้นท่อ (Pipe) มีจำนวนทั้งหมด 12,963 เส้นท่อ และ 3) แหล่งน้ำ (Reservoir) มีจำนวนทั้งหมด 1 แห่ง

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง ณ จุดน้ำเข้าระบบได้ใช้แรงดันน้ำจากค่าตรวจวัด และใช้ค่าอัตราการไหลที่ตรวจวัดได้เป็นค่าใช้สอบเทียบ ขณะที่จุดอื่นๆ รวมทั้งจุดผู้ใช้น้ำได้กำหนดด้วยความต้องการใช้น้ำ เนื่องจากแบบจำลองระบบท่อนั้นเป็นแบบ steady extended period simulation เงื่อนไขตั้งต้นจึงไม่จำเป็นเพราะผลลัพธ์ที่ได้แต่ละช่วงเวลาเป็นค่าที่เข้าสู่ quasi-steady state

4.2 การสอบเทียบแบบจำลองโครงข่ายระบบท่อ

การศึกษานี้ได้สอบเทียบแบบจำลองเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ทำการสอบเทียบอัตราการไหลเพื่อหปริมาณน้ำจ่ายในแบบจำลอง (Computed) กับข้อมูลจากภาคสนาม

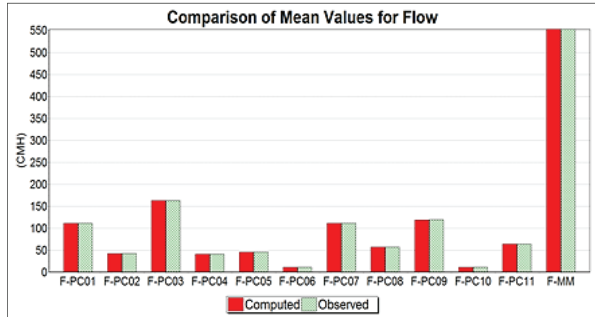
(Observed) มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยพิจารณาจากปริมาณน้ำจ่ายรวมกับปริมาณน้ำสูญเสียของแต่ละโซน DMA ได้ผลตามรูปที่ 4 โดยน้ำสูญเสียในแบบจำลองนี้ประยุกต์ ดังสมการที่ (6)

$$Q_{leak} = CP^N \quad (6)$$

กำหนดให้ Q_{leak} หมายถึง อัตราน้ำรั่ว, C หมายถึง Emitter Coefficient, P หมายถึง Pressure ที่ Junction นั้นๆ, และ N หมายถึง Emitter Exponent

การศึกษานี้ สมมติให้น้ำสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นน้ำสูญเสียจริง (Real losses) เนื่องจากท่อรั่วและแปรผันกับแรงดันตามสมการ (1) โดยใช้ค่ายกกำลัง $N = 1$

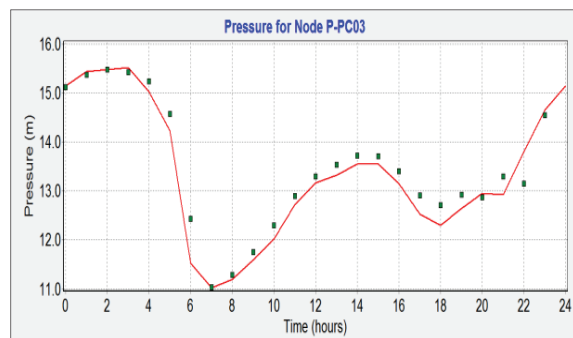
ส่วนที่สอง ทำการสอบเทียบแรงดันน้ำ โดยการปรับแก้รูปแบบการใช้น้ำ (Demand Pattern) เพื่อให้แรงดันน้ำในแบบจำลอง (Computed) มีความสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับข้อมูลแรงดันน้ำจากภาคสนาม (Observed) ตามรูปที่ 5 ผลที่ได้ คือ ค่าแรงดันน้ำเฉลี่ยรายชั่วโมงทั้งหมด 11 จุด จากแบบจำลองเท่ากับ 13.26 เมตร และแรงดันเฉลี่ยรายชั่วโมงจากภาคสนามเท่ากับ 13.42 เมตร ดังนั้นค่าความแตกต่างของแรงดันเฉลี่ยเท่ากับ 0.16 เมตร คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อน 1.19 %



Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
P-PC01	24	17.65	16.59	1.053	1.074
P-PC02	24	13.60	13.14	0.470	0.525
P-PC03	24	13.46	13.31	0.233	0.309
P-PC04	24	10.79	10.80	0.316	0.413
P-PC05	24	11.75	10.94	0.815	0.895
P-PC06	24	10.04	9.64	0.451	0.601
P-PC07	24	14.09	13.29	0.804	0.863
P-PC08	24	10.13	11.52	1.391	1.421
P-PC09	24	14.79	13.28	1.512	1.561
P-PC10	24	14.72	15.14	0.471	0.588
P-PC11	24	13.25	14.65	1.401	1.620
P-MM	24	16.80	16.77	0.027	0.028
Network	288	13.42	13.26	0.745	0.959

Correlation Between Means: 0.930

รูปที่ 4 สอบเทียบปริมาณน้ำจ่ายแบบจำลอง (Computed) กับข้อมูลจากภาคสนาม (Observed)



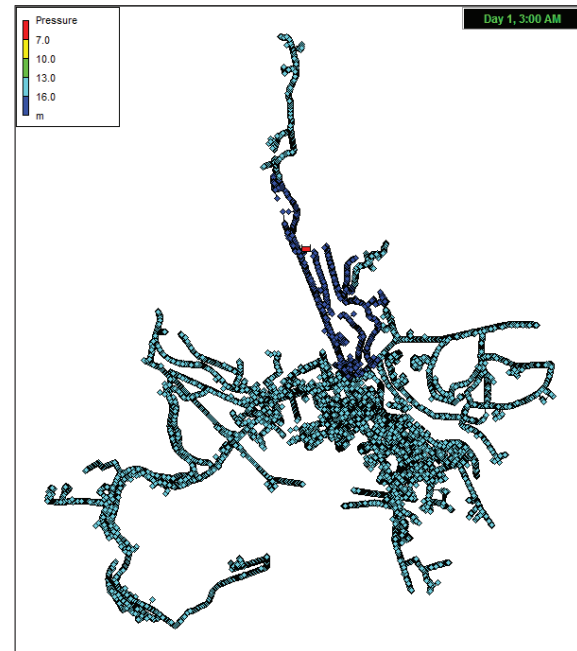
รูปที่ 5 สอบเทียบแรงดันน้ำสถานี P-PC03 ของ DMA03 ในแบบจำลองกับข้อมูลจากภาคสนาม

4.3 ปัญหาและสรุปปัญหาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการบริหารจัดการ

4.3.1 ปัญหาและสรุปปัญหา

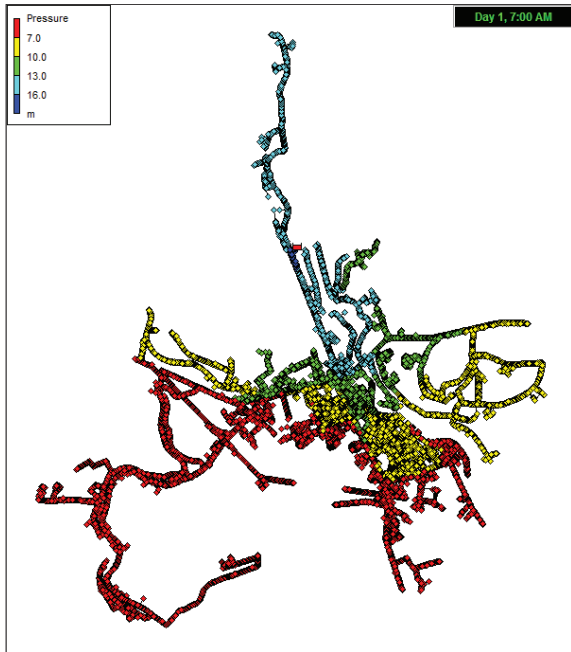
กปภ. สาขาพิจิตร ประสบกับปัญหาแรงดันน้ำต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำสูงสุด (On Peak) มีแรงดันน้ำต่ำกว่า 7 เมตร สาเหตุจากท่อที่ใช้ในปัจจุบันมีขนาดเล็กเกินไป และตำแหน่งน้ำเข้าโซน (Inlet) อยู่ในตำแหน่งที่มีแรงดันน้ำต่ำ ประกอบกับ

แรงดันน้ำไม่สอดคล้องกับรูปแบบความต้องการใช้น้ำ โดยที่ต้นทางจ่ายน้ำด้วยแรงดันเฉลี่ยคงที่เท่ากับ 16.80 เมตร โดยไม่มีการควบคุมแรงดันน้ำเป็นช่วงเวลา ทำให้ในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำต่ำสุด (Off Peak) ที่เวลา 03.00 น. แรงดันน้ำในพื้นที่มีค่าสูงเกินซึ่งมีแรงดันน้ำเฉลี่ยทั้งพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 14.72 เมตร ตามรูปที่ 6 จึงส่งผลให้มีปริมาณน้ำจ่ายสูงและเกิดน้ำสูญเสียสูงตามมา



รูปที่ 6 แรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลา Off Peak (03.00 น.)

การสูญเสียแรงดัน (head loss) เป็นอีกปัญหาที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ซึ่งอยู่ห่างไกลจากแหล่งจ่ายน้ำต้นทาง ประกอบกับท่อเดิมมีขนาดเล็กไม่เหมาะสม ส่งผลให้แรงดันน้ำในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำสูงสุด (On Peak) ที่เวลา 07.00 น. มีค่าแรงน้ำเฉลี่ยทั้งพื้นที่ศึกษาเท่ากับ 8.54 เมตร แต่หากพิจารณาในส่วนของพื้นที่ 5 DMA ที่รับผลกระทบประกอบไปด้วย DMA03, DMA04, DMA05, DMA06 และ DMA08 นั้น ในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำสูงสุดมีค่าแรงดันเฉลี่ยเพียง 5.62 เมตร ซึ่งต่ำกว่าแรงดันน้ำที่กำหนดไว้ที่ 7 เมตร ตามรูปที่ 7 (สมมติให้เป็นแรงดันขั้นต่ำที่เหมาะสมสำหรับบ้านพักอาศัย 2 ชั้น)



รูปที่ 7 แรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลา On Peak (07.00 น.)

4.3.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการศึกษา

- เปลี่ยนขนาดท่อเดิม PVC 200 มิลลิเมตร เป็นท่อใหม่ PVC 250 มิลลิเมตร ระยะความยาวรวม 1,200 เมตร ทำให้แรงดันน้ำในพื้นที่ DMA06 แรงดันน้ำเฉลี่ยสูงขึ้น จากเดิม 9.64 เมตร เพิ่มขึ้น 11.03 เมตร ตำแหน่ง (1) ตามรูปที่ 8

- เปลี่ยนขนาดท่อเดิม PVC 200 มิลลิเมตร เป็นท่อใหม่ PVC 300 มิลลิเมตร ระยะความยาวรวม 100 เมตร เพื่อลดการสูญเสียแรงดัน Unit Head loss ในช่วงเวลา On Peak จากเดิม 8.75 เมตรต่อกิโลเมตร ลดลงเหลือ 1.05 เมตรต่อกิโลเมตร เนื่องจากเส้นท่อดังกล่าวนี้อมีลักษณะเป็นคอขวดและยังใช้เป็นท่อส่งน้ำเข้า (Inlet) ให้กับพื้นที่ทั้งสอง คือ DMA08 และ DMA09 ตำแหน่ง (2) ตามรูปที่ 8

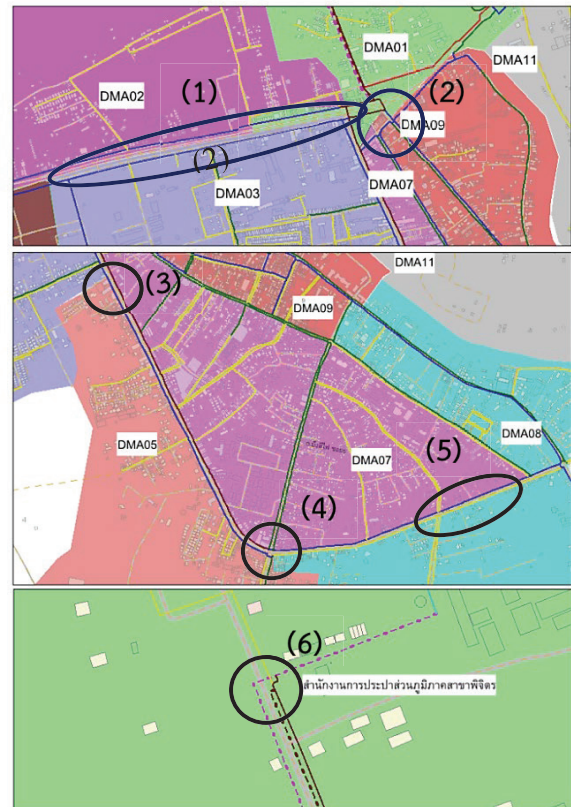
- ย้ายตำแหน่งทางน้ำเข้า (Inlet) ของพื้นที่ DMA05 จากตำแหน่งเดิม (3) ไปยังตำแหน่งใหม่ (4) ตามรูปที่ 8 โดยการวางท่อใหม่ PVC 300 มิลลิเมตร ประสานออกจากท่อเดิม PVC 300 มิลลิเมตร ของพื้นที่ DMA07 เนื่องจากเส้นท่อดังกล่าวนี้อมีแรงดันน้ำสูง (12.55 เมตร)

กว่าตำแหน่งทางน้ำเข้า (Inlet) เดิม (11.05 เมตร)

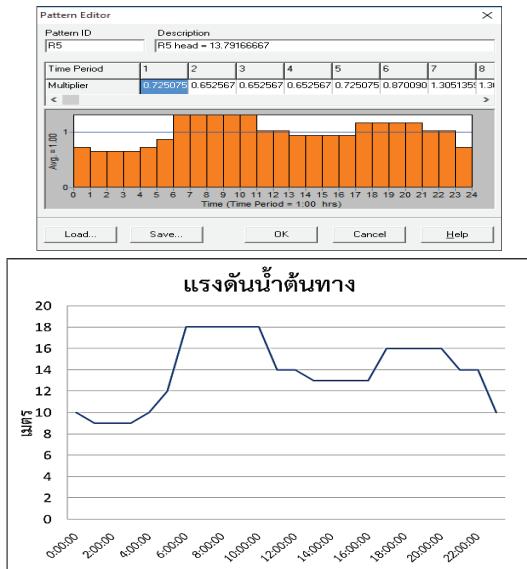
- เปลี่ยนท่อขนาดเดิม PVC 100 มิลลิเมตร เป็นท่อใหม่ PVC 200 มิลลิเมตร ระยะความยาวรวม 600 เมตร ทำให้แรงดันน้ำของผู้ใช้น้ำจากเส้นท่อดังกล่าวนี้อของพื้นที่ DMA08 มีแรงเพิ่มขึ้นจาก 6.94 เมตร เพิ่มขึ้น 7.41 เมตร ในช่วงเวลา On Peak ตำแหน่ง (5) ตามรูปที่ 8

- ติดตั้งอุปกรณ์วาล์วควบคุมแรงดันน้ำ (Pressure Reducing Valve, PRV) เพื่อควบคุมแรงดันน้ำในพื้นที่ทั้ง 3 DMA ประกอบด้วย DMA01, DMA10 และ DMA11 ไม่ให้สูงจนเกินไปในช่วงเวลา Off Peak ตามตำแหน่ง (6) รูปที่ 8

- ควบคุมแรงดันน้ำต้นทางตามช่วงเวลา ตามรูปที่ 9 โดยควบคุมแรงดันให้สอดคล้องตามความต้องการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำ ส่งผลให้แรงดันน้ำต้นทางลดลงจากเดิมจ่ายด้วยแรงดันเฉลี่ยเท่ากับ 16.80 เมตร ลดลงเหลือ 13.79 เมตร



รูปที่ 8 ตำแหน่งเปลี่ยนท่อ ณ จุดต่างๆ และติดตั้งอุปกรณ์ Pressure Reducing Valve (PRV)



รูปที่ 9 ควบคุมแรงดันต้นทางตามช่วงเวลา

4.3.3 ความเชื่อถือได้ทางชลศาสตร์ (Reliability)

ความเชื่อถือได้ทางชลศาสตร์ (Reliability) หมายถึง ความสามารถของโครงข่ายท่อในการส่งน้ำไปถึงยังผู้ใช้น้ำโดยมีปริมาณที่พอเพียงภายใต้สภาวะปกติและไม่ปกติ การศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความเชื่อถือได้ทางทั้งก่อนและหลังการศึกษา เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง EPANET 2.0 กับพื้นที่ศึกษาโดยทฤษฎีที่นิยมนำมาใช้วิธีหนึ่งในการตรวจสอบความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่าย คือ การใช้ค่าดัชนีความยืดหยุ่น (Resilience Index, I_r) นำเสนอโดย Todoni (2000) เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ ซึ่งค่าดัชนี I_r ที่เหมาะสม เพื่อให้แรงดันน้ำมีแรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาไม่น้อยกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้ควรมีค่าดัชนีอยู่ในช่วง 0-1 เมื่อ I_r คือความสัมพัทธ์ตามสมการ(5) กำหนดให้แรงดันน้ำขั้นต่ำเท่ากับ 7 เมตร ($h_{min,ext} = 7$ เมตร)

การศึกษานี้ทำการหาค่าดัชนี I_r โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) แม่ข่าย (Master Meter, MM) และ (2) พื้นที่จ่ายน้ำย่อยในระดับ DMA โดยจะพิจารณาเป็นรายชั่วโมง สามารถแบ่งการศึกษาออกได้เป็น 2 กรณี คือ 1) กรณีก่อนทำการศึกษา (ก่อนการประยุกต์ใช้แบบจำลองกับระบบโครงข่าย) และ 2) กรณีหลังจากทำการศึกษา (หลังจากประยุกต์ใช้แบบจำลองกับระบบโครงข่ายท่อ)

1) กรณีก่อนทำการศึกษา

ในกรณีก่อนทำการศึกษาหรือสภาพปัจจุบันของโครงข่ายท่อ กปภ. สาขาพิจิตร พบว่ามีค่า I_r ตามตารางที่ 2 โดยดัชนี I_r ที่มีค่าน้อยกว่า 0.00 ($I_r < 0$) เกิดในพื้นที่ DMA04, DMA05, DMA06 และ DMA08 มีค่าเท่ากับ -0.85, -1.79, -2.48, และ -2.14 ตามลำดับสาเหตุที่ I_r มีค่าติดลบ เนื่องจากกำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับ (P_{ext}) มีค่าน้อยกว่ากำลังขั้นต่ำที่ผู้ใช้น้ำควรจะได้รับ ($P_{min, ext}$) ทำให้กำลังมากที่สุดที่สลายภายในระบบท่อ ($P_{max,int}$) มีค่าต่ำกว่ากำลังที่สลายภายในระบบท่อ (P_{int}) จึงทำให้ค่าของ $P_{int} / P_{max,int} > 1$ ส่งผลให้ค่า $I_r < 0$ (ติดลบ)

ตารางที่ 2 แสดงค่าดัชนีความยืดหยุ่น (I_r) ในกรณีก่อนทำการศึกษา

พื้นที่	ดัชนีค่าความยืดหยุ่น (I_r)		
	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
DMA01	0.14	0.28	0.20
DMA02	0.16	0.34	0.28
DMA03	0.00	0.22	0.15
DMA04	-0.85	3.53	0.80
DMA05	-1.79	0.43	0.09
DMA06	-2.48	2.26	0.26
DMA07	0.16	0.41	0.32
DMA08	-2.14	0.45	0.18
DMA09	0.08	0.20	0.15
DMA10	0.39	0.98	0.63
DMA11	0.10	0.31	0.20
MM	0.10	0.25	0.19

ค่าดัชนี I_r ที่มีค่ามากกว่า 1 ($I_r > 1$) เกิดในพื้นที่ DMA04 และ DMA06 มีค่าเท่ากับ 3.53 และ 2.26 ตามลำดับ สาเหตุที่ I_r มีค่ามากกว่า 1 นั้นเนื่องจากกำลังรวมที่เข้าระบบทั้งหมด (P_{tot}) ของ DMA04 และ DMA06 ณ เวลานั้น มีค่าน้อยกว่า $P_{min, ext}$ ในช่วงเวลา

เดียวกัน ทำให้ค่า $P_{\max, \text{int}}$ มีค่าติดลบ จึงส่งผลให้สัดส่วนของ $P_{\text{int}}/P_{\max, \text{int}}$ ติดลบตามมา ดังนั้น เมื่อค่า I_r อยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 พบว่าแรงดันน้ำที่ผู้ใช้น้ำได้รับ (P_{ext}) นั้นมีค่าไม่น้อยกว่าแรงดันขั้นต่ำที่กำหนด ($h_{\min, \text{ext}} = 7$ เมตร) และหากพื้นที่ใดมีค่า I_r สูงกว่าย่อมหมายถึงกำลังที่สลายภายในระบบท่อ (P_{int}) น้อยกว่าและสื่อว่ามีความเชื่อถือทางศาสตร์สูงกว่า แต่หากค่า I_r อยู่ในช่วง 0 - 1 จะพบว่าแรงดันน้ำที่ผู้ใช้น้ำได้รับมีค่าต่ำกว่าแรงดันขั้นต่ำที่กำหนดไว้ซึ่งสื่อถึงกำลังที่สลายไปกับระบบท่อนั้นมากเกินไปหรือกำลังที่ให้กับระบบมีค่าไปไม่เพียงพอ

2) กรณีหลังทำการศึกษา

เมื่อทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองกับโครงข่ายท่อเพื่อบริหารจัดการแรงดันในพื้นที่พบว่า ค่าดัชนี I_r มีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ทุกพื้นที่ DMA จึงแสดงให้เห็นว่าหลังจากการปรับปรุงระบบโครงข่ายท่อและควบคุมแรงดันน้ำต้นทางโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง EPANET 2.0 ในการแก้ไขปัญหา เพื่อให้แรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาสอดคล้องกับความต้องการการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำแล้วนั้น จึงส่งผลทำให้แรงดันน้ำในพื้นที่ทั้งหมดมีแรงดันน้ำไม่ต่ำกว่า 7 เมตรทุกช่วงเวลา

ตารางที่ 3 แสดงค่าดัชนีความยืดหยุ่น (I_r) ในกรณีหลังทำการศึกษา

ดัชนีค่าความยืดหยุ่น (I_r)			
พื้นที่	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
DMA01	0.11	0.32	0.25
DMA02	0.07	0.40	0.27
DMA03	0.07	0.33	0.23
DMA04	0.26	0.56	0.43
DMA05	0.12	0.50	0.33
DMA06	0.13	0.54	0.37
DMA07	0.07	0.30	0.20
DMA08	0.06	0.34	0.22
DMA09	0.05	0.27	0.19
DMA10	0.29	0.63	0.53

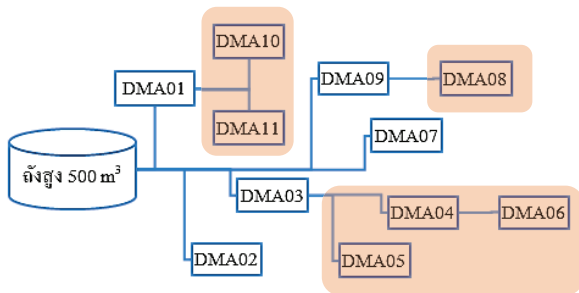
ตารางที่ 3 (ต่อ) แสดงค่าดัชนีความยืดหยุ่น (I_r) ในกรณีหลังทำการศึกษา

ดัชนีค่าความยืดหยุ่น (I_r)			
พื้นที่	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
DMA11	0.03	0.16	0.12
MM	0.07	0.21	0.15

การศึกษานี้ผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญไปยังการบริหารจัดการแรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษา โดยการควบคุมแรงดันน้ำให้สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำตามช่วงเวลา (Demand Pattern) ดังนั้นเมื่อนำเอาทฤษฎีดัชนีความยืดหยุ่น (Resilience Index, I_r) มาประยุกต์ใช้กับโครงข่ายท่อพบว่าผลที่ได้ออกมานั้นจะสื่อถึงความเชื่อถือได้ของโครงข่ายท่อ โดยมุ่งศึกษาไปยังประสิทธิภาพของท่อเพื่อรองรับกับอุบัติเหตุ หรือภัยพิบัติต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นกับท่อในโครงข่าย เช่น บั้มหยุดทำงานกะทันหัน ท่อแตก หรือท่อระเบิด เป็นต้น การพิจารณา I_r ตามทฤษฎีของ Todoni ค่าที่ได้ควรอยู่ในช่วง 0-1 แต่จากการศึกษาตามที่ได้กล่าวแล้วนั้น ในหัวข้อก่อนหน้าพบว่า ค่าดัชนี I_r ที่ได้มีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าว โดยเกิดขึ้นได้ใน 2 กรณี คือ กรณีแรก ค่าดัชนีน้อยกว่า 1 (ติดลบ) และกรณีที่สอง ค่าดัชนีมากกว่า 1 โดยในกรณีแรกนั้นเกิดขึ้นเมื่อกำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับ (P_{ext}) มีค่าน้อยกว่ากำลังขั้นต่ำที่ผู้ใช้น้ำควรจะได้รับ ($P_{\min, \text{ext}}$) และกรณีที่สองเกิดขึ้นเมื่อ กำลังรวมที่เข้าระบบทั้งหมด (P_{tot}) มีค่าน้อยกว่า $P_{\min, \text{ext}}$ หรือกล่าวได้จะเกิดกับระบบโครงข่ายท่อที่มีการขาดน้ำเกิดขึ้น (Demand > Supply) จากทั้งสองกรณีที่กล่าวมาแล้วนั้นพบว่า การวิเคราะห์โดยวิธี I_r ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับระบบโครงข่ายท่อที่มีปัญหาแรงดันน้ำในพื้นที่ที่แรงดันน้ำบางช่วงเวลามีค่าต่ำกว่าแรงดันน้ำขั้นต่ำที่ผู้ใช้น้ำควรจะได้รับ

วิธีวิเคราะห์แบบ I_r นี้เหมาะกับการนำไปใช้กับโครงข่ายท่อที่ไม่มีการแบ่งพื้นที่จ่ายน้ำแบบ DMA หรือหากแบ่งพื้นที่จ่ายน้ำเป็น DMA แต่ละโซนต้องเป็นอิสระออกจากกัน แต่หากนำมาใช้กับโครงข่ายท่อที่ DMA ไม่แยกอิสระต่อกันแล้วจะเกิดความคลาดเคลื่อนในการ

วิเคราะห์ค่าดัชนี เช่น หากท่อแตกหรือท่อระเบิดเกิดขึ้นในพื้นที่ DMA10 หรือ DAM11 ซึ่งอยู่ท้าย ย่อมทำให้ปริมาณน้ำจ่ายและแรงดันน้ำของพื้นที่ DMA01 ที่อยู่ต้นทางมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จึงส่งผลให้ดัชนี I_r ของพื้นที่ DMA01 มีการเปลี่ยนแปลงไปตาม DMA10 ดังนั้นการใช้ดัชนี I_r ของแต่ละ DMA นั้นจึงเหมาะกับพื้นที่ที่มี DMA แยกอิสระออกจากกัน ซึ่งโครงข่ายท่อของ กปภ. สาขาพิจิตร มีบาง DMA ที่มีลักษณะเป็น DMA ที่รับน้ำต่อจาก DMA ต้นทาง หรือเรียกว่า Cascading DMA เช่น DMA10 และ DMA11 โดยรับน้ำมาจากพื้นที่ DMA01 ซึ่งเป็น DMA ต้นทาง และ DMA08 รับน้ำจาก DMA09 เป็นต้น ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงโครงข่ายท่อที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง DMA แบบ Cascading DMA

หากพิจารณาในแง่ของแรงดันน้ำที่ผู้ใช้น้ำควรได้รับนั้น การมองไปยังกำลังที่ผู้ใช้น้ำควรได้รับ ($P_{\min, \text{ext}}$) จากโครงข่ายท่อว่าได้รับเพียงพอหรือไม่นั้น จะสื่อความหมายออกมาได้ดีกว่าการใช้วิธีดัชนี I_r เนื่องจากการนำกำลังที่จุดผู้ใช้น้ำ (P_{ext}) มาพิจารณาโดยตรงซึ่งสะดวกต่อการวิเคราะห์ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้งานต่อ ดังนั้นเพื่อให้ค่าที่ได้สื่อไปในด้านของแรงดันน้ำที่ผู้ใช้น้ำควรได้รับและสะดวกต่อการนำไปวิเคราะห์หรือไปใช้งาน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ค่า Standards Compliance (I_5) เป็น 1 ใน 5 ค่าที่ใช้แสดงถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบโครงข่ายท่อ ซึ่งนำเสนอโดย Enrique Cabrera (2010) หรือเรียกว่า

การปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ [6] โดยเป็นค่าสัดส่วนระหว่าง $P_{\text{ext}}/P_{\min, \text{ext}}$ กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับ (P_{ext}) ต่อกำลังต่ำสุดที่ผู้ใช้น้ำควรได้รับ ($P_{\min, \text{ext}}$) เมื่อกำหนดให้เฮดขั้นต่ำเท่ากับ $h_{\min, \text{ext}} = 7$ เมตร

1) กรณีก่อนทำการศึกษา

พบว่าค่าการปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5) ในกรณีก่อนทำการศึกษาก่อนการประยุกต์ใช้แบบจำลองนั้นมีในบาง DMA ที่ค่าต่ำสุดยังคงมีค่าต่ำกว่า 1 ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าการปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5) ในกรณีก่อนทำการศึกษา

การปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5)			
พื้นที่	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
DMA01	2.11	2.36	2.24
DMA02	1.43	2.15	1.80
DMA03	0.99	2.05	1.54
DMA04	0.74	2.05	1.43
DMA05	0.69	1.99	1.38
DMA06	0.61	2.03	1.37
DMA07	1.38	2.16	1.78
DMA08	0.94	2.00	1.48
DMA09	1.41	2.15	1.78
DMA10	1.81	2.29	2.10
DMA11	1.49	2.02	1.78
MM	1.21	2.10	1.67

ค่า I_5 ในมีบางพื้นที่ที่ยังคงมีค่าต่ำสุดน้อยกว่า 1 ได้แก่ พื้นที่ DMA03, DMA04, DMA05, DMA06 และ DMA08 มีค่า 0.99, 0.74, 0.69, 0.61 และ 0.94 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถสื่อถึงกำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับ (P_{ext}) มีค่าต่ำกว่ากำลังที่ผู้ใช้น้ำควรจะได้รับ ($P_{\min, \text{ext}}$) และค่า I_5 ต่ำสุดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่มีความ

ต้องการใช้น้ำสูงซึ่งหมายถึงในช่วงเวลาดังกล่าวนี้ กำลังรวมที่ให้กับระบบ (P_{tot}) นั้นมีค่าน้อยเกินไป จึงจำเป็นต้องเพิ่มกำลังในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อให้กำลังรวมมีค่าสูงขึ้น(P_{tot}) จึงจะส่งผลให้ I_5 มีค่าต่ำสุดมีค่ามากกว่า 1

2) กรณีหลังทำการศึกษา

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองแก้ไขโครงข่ายท่อและบริหารจัดการแรงดันน้ำ พบว่าได้ค่า I_5 มีค่า ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่าการปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5) ในกรณีหลังทำการศึกษา

การปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5)			
พื้นที่	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
DMA01	1.24	1.77	1.63
DMA02	1.13	1.73	1.43
DMA03	1.12	1.64	1.37
DMA04	1.12	1.54	1.3
DMA05	1.07	1.41	1.21
DMA06	1.09	1.43	1.24
DMA07	1.11	1.51	1.29
DMA08	1.07	1.43	1.22
DMA09	1.14	1.75	1.44
DMA10	1.2	1.67	1.51
DMA11	1.09	1.46	1.28
MM	1.12	1.54	1.33

หลังจากทำการประยุกต์ใช้แบบจำลอง พบว่าทุก DMA มีค่า I_5 ต่ำสุดมากกว่า 1 สืบเนื่องมาจากผู้ใช้ได้รับกำลังที่เพียงพอต่อความต้องการ

โดยที่หากพิจารณา I_5 ที่ค่าสูงสุดหรือค่าเฉลี่ย พบว่าค่าที่ได้ในกรณีก่อนการศึกษามีค่าสูงกว่ากรณีหลังทำการศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากกรณีหลังทำการศึกษาได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วาล์วควบคุมแรงดันน้ำ (PRV) และทำการปรับลดแรงดันน้ำต้นทางให้สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำ (Demand Pattern) จึงทำให้ค่า I_5 ในช่วงดังกล่าว

มีค่าลดลง (ค่า I_5 ยังคงมีค่ามากกว่า 1 ทุกช่วงเวลา)

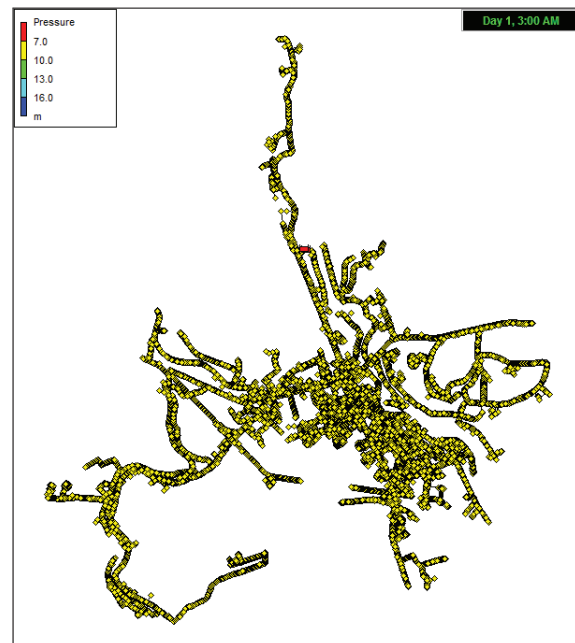
ทั้งนี้หากในอนาคตโครงข่ายท่อประสบอุบัติเหตุหรือภัยพิบัติ เช่น ท่อแตก ท่อระเบิด เพลิงไหม้ ฯลฯ อันจะส่งผลทำให้แรงดันน้ำในพื้นที่จ่ายน้ำลดต่ำลง ก็สามารถทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ โดยการปรับเพิ่มแรงดันน้ำต้นทางให้สูงขึ้น หรือถอดอุปกรณ์ PRV เพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันน้ำในพื้นที่และเป็นการเพิ่มค่า I_5 ให้ดีขึ้นได้ดังเดิม

5. สรุปผลการศึกษา

ผลจากการศึกษาวิจัย สามารถสรุป 2 หัวข้อ คือ

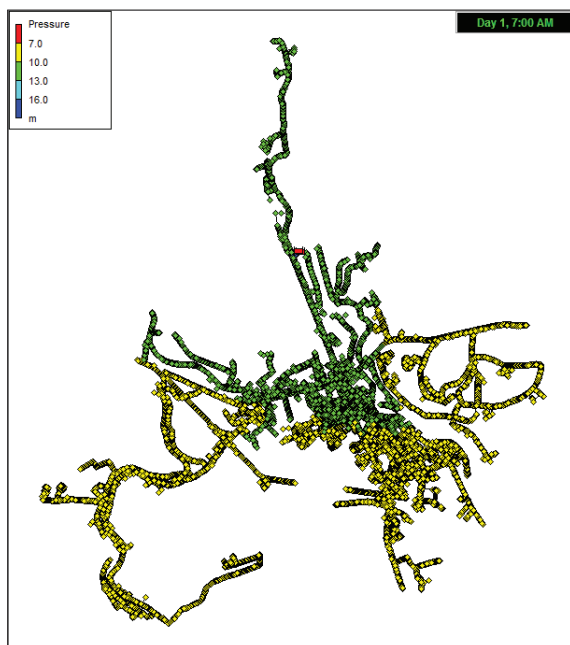
5.1 การปรับปรุงระบบจ่ายเพื่อให้แรงดันน้ำสอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำของผู้ใช้น้ำ

จากการเปลี่ยนขนาดท่อเดิมและติดตั้งวาล์วควบคุมแรงดัน (PRV) ตลอดจนการควบคุมแรงดันน้ำต้นทางตามหัวข้อ 4.3.2 แล้วนั้น ทำให้แรงดันน้ำทั้งหมดในพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำต่ำสุด (Off Peak) ที่เวลา 03.00 น. มีค่าแรงดันน้ำเฉลี่ยลดลงจาก 14.72 เมตร เหลือ 7.90 เมตร ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 แรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลา Off Peak (03.00 น.)

แรงดันน้ำในช่วงที่มีความใช้น้ำสูงสุด (On Peak) ที่เวลา 07.00 น. มีค่าแรงดันน้ำเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 8.54 เมตร เป็น 9.64 เมตร ตามรูปที่ 12 แรงดันน้ำคั่นทางก่อนที่ไม่มีการควบคุมแรงดันจ่ายด้วยแรงดันคงที่ 16.80 เมตร แต่ภายหลังจากมีการควบคุมแรงดันโดยจ่ายน้ำเป็นช่วงเวลาตามรูปที่ 9 ทำให้แรงดันน้ำเฉลี่ยลดลงเหลือ 13.79 เมตร ส่งผลให้ปริมาณน้ำจ่ายต้นทางลดลงจากเดิมจ่ายอยู่ที่เท่ากับ 552.88 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ลดต่ำลงเหลือ 505.71 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ตามรูปที่ 13 หรือสามารถลดน้ำสูญเสียลงได้ 5.59 %

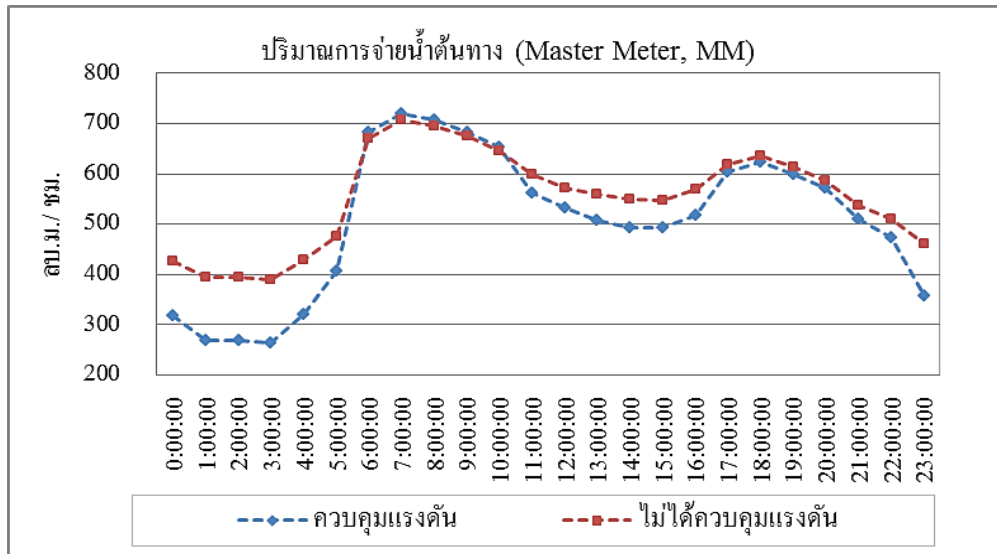


รูปที่ 12 แรงดันน้ำในพื้นที่ศึกษาในช่วงเวลา On Peak (07.00 น.)

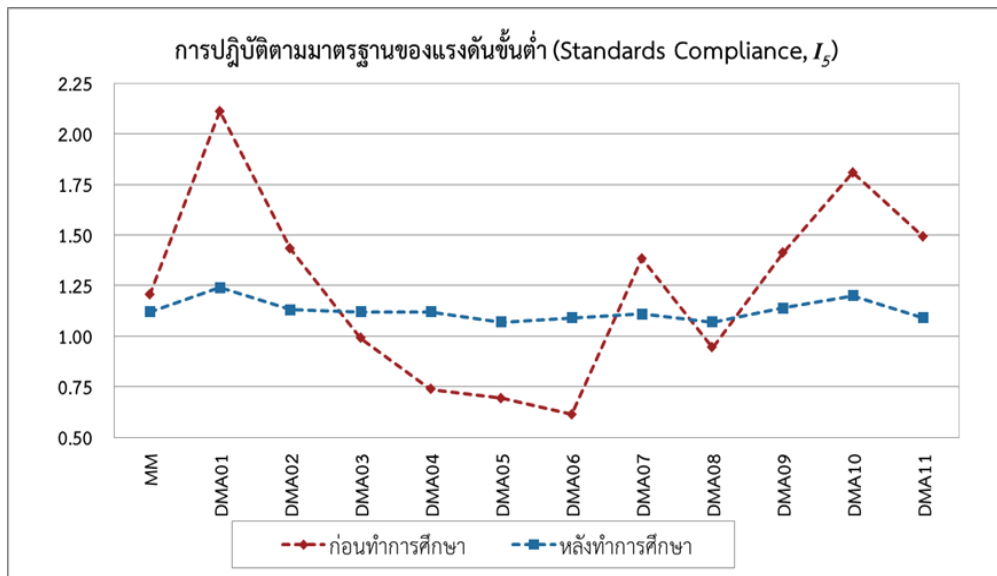
5.2 ความเชื่อถือได้ทางศาสตร์ (Reliability) ของระบบโครงข่ายท่อ

จากผลการศึกษาได้ค่าการปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_5) เพื่อเป็นตัวแทนของกำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับ โดยเทียบกับกำลังขั้นต่ำที่ผู้ใช้น้ำควรได้รับ ($P_{ext} / P_{min, ext}$) โดยผลที่ได้ทั้งก่อนและหลังทำการศึกษพบว่า การประยุกต์ใช้แบบจำลอง EPANET เพื่อการบริหารจัดการแรงดันน้ำนั้น สามารถเพิ่มค่า I_5 ในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้น้ำสูงได้ ตามรูปที่ 14 โดยพิจารณาที่ค่า I_5 ต่ำสุดที่ผู้ใช้น้ำได้รับจะพบว่า กรณีหลังทำการศึกษแล้วนั้นมีค่า I_5 ของระบบจ่ายน้ำเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีก่อนทำการศึกษา และให้ค่า I_5 สูงกว่า 1 ทุกพื้นที่ DMA

ดังนั้น ในกรณีหลังทำการศึกษแล้วนั้น จึงสรุปได้ว่ากำลังที่ผู้ใช้น้ำได้รับนั้นมีค่ามากกว่ากำลังที่ผู้ใช้น้ำควรจะได้รับ ($P_{ext} > P_{min, ext}$) ซึ่งสามารถสื่อถึงปริมาณและแรงดันน้ำที่ผู้ใช้น้ำได้รับจากระบบโครงข่ายท่อมมีค่าเพียงพอต่อความต้องการของการใช้น้ำตลอดทุกช่วงเวลา



รูปที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณการจ่ายน้ำต้นทาง (Master Meter, MM) ก่อนและหลังควบคุมแรงดันน้ำ



รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าการปฏิบัติตามมาตรฐานของแรงดันขั้นต่ำ (I_s) ในกรณีก่อนและหลังทำการศึกษา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำหรับข้อมูลต่างๆ จากกองระบบ
 จำหน่าย การประปาส่วนภูมิภาคเขต 10 และผู้จัดการ
 รวมถึงพนักงานทุกท่านของการประปาส่วนภูมิภาคสาขา
 พิจิตร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rossman, L.A. EPANET 2 Users manual. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, 2000.
- [2] สายันห์ น้าเงิน. การศึกษาโครงข่ายส่งน้ำประปาของการประปานครหลวงโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET 2.0. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [3] สุทธิศักดิ์ ลาภประเสริฐ. การจำลองระบบสูบน้ำในพื้นที่สำนักงานประปาสาขาทุ่งมหาเมฆของการประปานครหลวงโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ EPANET 2.0. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [4] Todini, E. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2000; 2(3): 115–122.
- [5] Walski, T.M. A Water Quality Aspects of Construction and Operation. *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2000; 8.1–8.11.
- [6] Cabrera, E., Pard, M.A., Cobach, R. and Cabrera Jr, E. Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, 136(6): 669-677.



สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์ม

ด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน:

วิธีพื้นผิวตอบสนอง

Optimization of Ethyl Ester Production from Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) Using Double-Step Esterification Process: A Response Surface Methodology Approach

ดุณยวัชร พันธ์ยูโย¹, กฤษ สมนึก^{1*} และ กำพล ประทีปชัยกุล¹

Dunyawat Phanyusoh¹, Krit Somnuk^{1*} and Gumpon Prateepchaikul¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ถนนกาญจนาภิเษย ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Karnjanavanit Road, Kho Hong, Hat Yai, Songkhla, 90110, Thailand

*E-mail: krit.s@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันสองขั้นตอนแบบกะ ซึ่งกรดไขมันปาล์มเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล การศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันสองขั้นตอนแบบกะ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบประสมกลาง (central composite design, CCD) และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้ศึกษาค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ เมื่อช่วงของตัวแปรอิสระของเอสเทอริฟิเคชันทั้งสองขั้นตอน คือ ปริมาณเอทานอล (4.77-55.23 wt.%) ปริมาณกรดซัลฟิวริก (0.95-11.05 wt.%) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา (6-74 min) ควบคุมอุณหภูมิทำปฏิกิริยาและความเร็วรอบของใบกวน เท่ากับ 75°C และ 300 rpm ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนที่ 1 คือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 29.42 wt.% กรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5.28 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 40 min สามารถผลิตน้ำมันลดกรดไขมันอิสระได้เอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 74.22 wt.% และเมื่อนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 ไปผลิตไบโอดีเซลในขั้นตอนที่ 2 ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 37.96 wt.% กรดซัลฟิวริก เท่ากับ 6.91 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 55 min สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้มากที่สุด เท่ากับ 99.323 wt.%

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล, กรดไขมันปาล์ม, เอทานอล, เอสเทอริฟิเคชัน, พื้นผิวตอบสนอง

ABSTRACT

In this study, a batch ethyl ester production process from palm fatty acid distillate (PFAD) was studied using a double-step esterification. The by-product from the refined palm oil (RPO) production process, PFAD was used as a raw material for ethyl ester production. The central composite design (CCD) was used to design the experiments to determine the predicted models of ethyl ester purities of each step. Results of ester purities were analyzed using a response surface methodology (RSM). Three parameters of both first-step and second-step processes were ethanol (4.77-55.23 wt.%), sulfuric acid (0.95-11.05 wt.%), and reaction time (6-74 min), were investigated to obtain the highest purity of ethyl ester under 75°C of reaction temperature and 300 rpm of stirrer. Results showed that 74.22 wt.% ester purity was achieved under the recommended condition was 29.42 wt.% ethanol, 5.28 wt.% sulfuric acid, and 40 min reaction time for the first-step esterification. In the second-step esterification, 99.323 wt.% highest purity of ethyl ester was achieved under the optimal condition was 37.96 wt.% ethanol, 6.91 wt.% sulfuric acid, and 55.7 min reaction time.

Keywords: biodiesel; palm fatty acid distillate; ethanol; esterification; response surface methodology

1. บทนำ

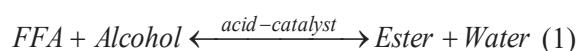
การใช้พลังงานในสถานการณ์โลกทุกวันนี้กำลังเปลี่ยนจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลไปเป็นการใช้พลังงานหมุนเวียนมากยิ่งขึ้น จึงได้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ไบโอดีเซลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน ที่มีอยู่ในประเทศไทย ซึ่งไบโอดีเซลมีคุณสมบัติการเผาไหม้ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล สามารถใช้ทดแทนกันได้โดยไม่ต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ [1] และลดการปล่อยก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม [2,3] ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยนิยมน้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบหลัก ซึ่งปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นการนำน้ำมันปาล์มดิบมาผลิตเป็นไบโอดีเซลมากเกินไป จะทำให้ปริมาณน้ำมันปาล์มในตลาดการค้ามีปริมาณลดลงจนถึงขาดแคลนดังที่เคยเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (refined palm oil, RPO) คือ กรดไขมันปาล์ม (palm fatty acid distillate, PFAD) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ นิยมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมโอเลโอเคมี [4,5] ผลิตสบู่และจารบี เป็นต้น จากข้อมูลของปริมาณ PFAD จะมีปริมาณ 4 wt.% ของปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ [6] โดยได้แสดงปริมาณ PFAD ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาด้านราคาวัตถุดิบ กรดไขมันปาล์มเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกกว่าน้ำมันปาล์มดิบที่สามารถผลิต

เป็นไบโอดีเซลได้ แต่กรดไขมันปาล์มมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก [5] จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นเอสเทอร์ด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้แอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาและใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [3,7] ดังแสดงในสมการที่ 1

ตารางที่ 1 การผลิตน้ำมันปาล์มดิบและการผลิตกรดไขมันปาล์มภายในประเทศไทย [8]

ปี พ.ศ.	น้ำมันปาล์มดิบ (tonnes)	ปริมาณกรดไขมันปาล์มโดยประมาณ (tonnes)
2554	1,892,000	75,680
2555	2,135,000	85,400
2556	2,000,000	80,000
2557	2,068,000	82,720
2558	2,100,000	84,000
2559	2,300,000	92,000

หมายเหตุ: กรดไขมันปาล์มมีปริมาณ 4 wt.% เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันปาล์มดิบ [6]



งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อทานอลในการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์ม ถึงแม้ปัจจุบันราคาเอทานอลภายในประเทศจะมีราคาแพงกว่าเมทานอล และความสามารถในการทำปฏิกิริยาของเอทานอลดีกว่า

เมทานอล [9,10] ทำให้เมื่อใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซลทำได้ยากกว่าเมทานอล แต่เอทานอลเป็นทรัพยากรหมุนเวียน และเป็นแอลกอฮอล์ที่ไม่เป็นพิษเมื่อเปรียบเทียบกับเมทานอล สามารถผลิตได้ภายในประเทศซึ่งในปี พ.ศ. 2559 ปริมาณการผลิตเอทานอลของประเทศไทยมีปริมาณโดยเฉลี่ย เท่ากับ 3.7 ล้านลิตรต่อวัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [11] การใช้เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์สำหรับทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นการเพิ่มทางเลือกในการผลิตไบโอดีเซลจากทรัพยากรที่มีภายในประเทศไทย นอกจากนี้ในด้านคุณภาพการนำไปทำเป็นเชื้อเพลิง เอทิลเอสเทอร์มีเลขซีเทนสูงกว่าเมทิลเอสเทอร์ [10]

สำหรับวัตถุดิบหรือน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูงสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 คือ ลดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และขั้นตอนที่ 2 คือ ผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [12] โดยในขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระจะต้องลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันให้มีค่าน้อยกว่า 1 wt.% เนื่องจากกรดไขมันอิสระจะทำให้ปฏิกิริยากับสารละลายเบสเกิดเป็นสบู่ ส่งผลให้ ปริมาณผลได้ (yield) ของเอสเทอร์ลดลง หลังจากลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันแล้วนำน้ำมันมาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เพื่อเปลี่ยนกลีเซอไรด์ในน้ำมันลดกรดไขมันอิสระจากขั้นตอนที่ 1 คือ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ให้เป็นเอสเทอร์ เช่น จากงานวิจัยของ Srilatha และคณะ (2012) [12] ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้ว (used cooking oil, UCO) ด้วยกระบวนการแบบสองขั้นตอน ซึ่งน้ำมัน UCO มีค่ากรดไขมันอิสระ เท่ากับ 12 wt.% ใช้เมทานอลเป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยา โดยกระบวนการที่ 1 ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และใช้ $\text{TPA/Nb}_2\text{O}_5$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรด ส่วนกระบวนการที่ 2 ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และใช้ ZnO/Na-Y zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ซึ่งได้สรุปว่าสถานะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ yield มากที่สุด คือ สถานะของกระบวนการที่ 1 คือ

$\text{TPA/Nb}_2\text{O}_5$ เท่ากับ 25 wt.% อัตราส่วนโดยโมลของ MeOH:UCO เท่ากับ 14:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 65°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5 h สถานะของกระบวนการที่ 2 คือ ZnO/Na-Y zeolite เท่ากับ 20 wt.% อัตราส่วนโดย โมลของ MeOH:oil เท่ากับ 24:1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 65°C และเวลาในการทำปฏิกิริยา 12 h

จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (สมการที่ 1) จะเห็นว่า มีน้ำเกิดขึ้น น้ำจะเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการลดกรดไขมันอิสระ โดยน้ำที่เกิดขึ้นจะไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากความเข้มข้นของสารเคมีเจือจางลง ทำให้เปลี่ยนจากกรดไขมันอิสระไปเป็นไบโอดีเซลทำได้ช้าลง และใช้สารเคมีมากขึ้นอีกด้วย โดยมีตัวอย่างเช่น ทีมวิจัยของ Lucena และคณะ (2011) [9] ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิกกับเอทานอลภายใต้สถานะการกักตุนน้ำออกอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ระบบการดูดซับในการดูดซับน้ำออกจากเอทิลเอสเทอร์ และน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เอทิลเอสเทอร์จะเกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดโอเลอิกกับเอทานอลโดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขสถานะที่เหมาะสม คือ กรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1 wt.% อัตราส่วนของกรดโอเลอิกกับเอทานอล เท่ากับ 1:3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 110°C จะได้เอทิลเอสเทอร์ได้เท่ากับ 99.9% แสดงว่าการกักตุนน้ำออกช่วยเพิ่มผลผลิตเอทิลเอสเทอร์มากขึ้น [9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้กักตุนน้ำออกภายหลังกระบวนการปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 1 ก่อนทำปฏิกิริยาขั้นตอนที่ 2

และนอกจากนี้ Pisarello และคณะ (2010) [13] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีค่าความเป็นกรดสูงด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัตถุดิบคือ น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันมะพร้าว แอลกอฮอล์ที่ใช้คือ เอทานอล และเมทานอล ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาพบว่า เมทานอลสามารถทำปฏิกิริยาลดค่าความเป็นกรดได้ดีกว่าเอทานอล และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา

ของเอทานอลที่อุณหภูมิ 70°C ทำปฏิกิริยาลดค่าความเป็นกรดได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 60°C แสดงว่าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เอทานอลในการทำปฏิกิริยา [13]

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณเอทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ส่งผลต่อปริมาณความบริสุทธิ์ของเอทิล-เอสเทอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสองขั้นตอนแบบกะ เพื่อลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ และลดต้นทุนของการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยเอทานอล

2. วัสดุและสารเคมี

กรดไขมันปาล์ม (PFAD) มีกรดไขมันอิสระเป็นองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ ซึ่งมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 กรดไขมันปาล์มมีลักษณะทางกายภาพเป็นไขที่อุณหภูมิ 30°C และมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 43°C สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง คือ กรดซัลฟิวริก (98 wt.% commercial grade) และเอทานอล (99.9 vol.% anhydrous commercial grade) และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันด้วยเทคนิค thin layer chromatography with flame ionization detector (TLC/FID) คือ เฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์ กรดฟอร์มิก และเบนซีน

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของกรดไขมันปาล์ม [14]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (wt.%)
Free fatty acid (FFA)	90.417
Monoglyceride (MG)	5.041
Diglyceride (DG)	2.437
Triglyceride (TG)	1.231
Ester	0.874

3. วิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบและการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ในการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์ม (PFAD) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอนด้วยวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ได้ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (central composite design, CCD) ที่ 5 ระดับ และตัวแปรอิสระ 3 ตัว คือ ปริมาณเอทานอล (ethanol, wt.%) ปริมาณกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, wt.%) และเวลาในการทำปฏิกิริยา (reaction time, min) ดังแสดงในตารางที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองทั้ง 2 ขั้นตอน ใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยในรูปของฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง (full quadratic regression) ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น 95% ผลตอบสนองหรือตัวแปรตาม คือ ค่าความบริสุทธิ์เอทิล-เอสเทอร์ (purity of ethylester, wt.%) ซึ่งสมการทำนายค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์อยู่ในรูปแบบทั่วไปของสมการพหุนามกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 2 [15]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

โดยที่ Y คือ ผลตอบสนอง, x คือ ตัวแปรอิสระ, β คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่, k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ และ ε คือ ค่าความผิดพลาด (error)

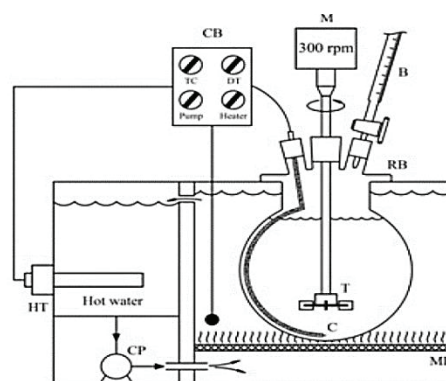
ตารางที่ 3 ระดับของตัวแปรอิสระ

Variable	Coded level				
	-1.682	-1	0	+1	+1.682
Ethanol (wt.%)	4.77	-115	30	45	55.23
Sulfuric acid (wt.%)	0.95	3	6	9	11.05
Reaction time (min)	6	20	40	60	74

3.2 ขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระสองขั้นตอนด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

สำหรับการผลิตเอทิลเอสเทอร์ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสองขั้นตอน ทั้งสองขั้นตอนเป็นกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยเปลี่ยนกรดไขมันอิสระของกรดไขมันปาล์ม (PFAD) ให้เป็นเอทิลเอสเทอร์ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะมีวิธีการทดลอง โดยเริ่มจากการชั่งกรดไขมันปาล์ม 500 g ใส่ลงในโถแก้ว (neck round bottom flask) หลังจากนั้นอุ่น PFAD ด้วยน้ำร้อนภายในอ่างน้ำร้อน (hot water bath) ซึ่งติดตั้งฮีตเตอร์ ขนาด 1000W ให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิของสารผสมภายในโถแก้ว เท่ากับ 75°C ติดตั้งอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อกรดไขมันปาล์มละลาย เติมนีทานอลลงไปโถแก้ว เอทานอลจะถูกผสมกับกรดไขมันปาล์มด้วยใบกวนชนิด 6-blade disk turbine ซึ่งควบคุมความเร็วรอบ เท่ากับ 300 rpm หลังจากนั้นผสมกรดซัลฟิวริก โดยใช้บิวเรตในการเติมกรดซัลฟิวริก จับเวลาทันทีที่เริ่มเติมกรดซัลฟิวริกลงไปผสม ปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากันจนครบเวลาตามเวลาที่กำหนด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างประมาณ 20 mL และนำไปหยุดการเกิดปฏิกิริยาดำเนินการที่อุณหภูมิ 0°C จากนั้นนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 (first esterified oil) ไปล้างด้วยน้ำ เพื่อล้างสารเคมีที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ เช่น เอทานอล กรดซัลฟิวริก และสิ่งเจือปนอื่นๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 ด้วยเทคนิค TLC/FID โดยช่วงของตัวแปรอิสระที่แปรค่า คือ ปริมาณเอทานอล คือ 4.77-55.23 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก คือ 0.95-11.05 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 6-74 min

ภายหลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 จึงนำกรดไขมันปาล์มมาลดกรดไขมันอิสระด้วยสภาวะดังกล่าว และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (ขั้นตอนที่ 2) โดยเริ่มจากนำน้ำมันลดกรดไขมันอิสระของขั้นตอนที่ 1 ปริมาณ 500 g ใส่ในโถแก้ว โดยติดตั้งอุปกรณ์ ขั้นตอนการใส่สารเคมีและขั้นตอนในการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 โดยขั้นตอนที่ 2 มีช่วงของตัวแปรอิสระที่ศึกษา คือ ปริมาณเอทานอล คือ 4.77-55.23 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก คือ 0.95-11.05 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 6-74 min



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีแบบกะ [14] (HT: เครื่องทำความร้อน, CP: เครื่องปั้มน้ำระบบหมุนเวียน, CB: ถังควบคุม, M: มอเตอร์, TC: ที่ควบคุมอุณหภูมิ, DT: digital temperature, C: เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ, B: บิวเรตต์, RB: ขวดกั้นกลม, MF: ตาข่ายกรอง, และ T: ใบกวนแบบ 6-blade disk turbine)

3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันจะใช้เทคนิค TLC/FID โดยใช้เครื่อง Itronscan MK-6 และ Chromarods type S-III quartz rod (Mitsubishi Kagaku Iatron) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ คือ จะต้องนำน้ำมันตัวอย่างมาทำการละลายกับเฮกเซนก่อนและหยดสารผสมลงบน chromarod หลังจากนั้นนำ chromarod ไปแช่ในภาชนะที่ผสมสารเฮกเซน ไดเอทิลอีเทอร์และกรดฟอร์มิกในอัตราส่วน 50:20:0.3 vol.% รอจนสารเคลื่อนที่ไปประมาณ 8 cm จึงนำ chromarod ไปแช่ในภาชนะที่ 2 ซึ่งผสมสารเฮกเซนกับเบนซีน ในอัตราส่วน 1:1 vol.% [14] รอจนสารเคลื่อนที่ไปประมาณ 10 cm จากนั้นนำ chromarod ไปอบด้วยเครื่อง rod dryer TK-8 ที่อุณหภูมิ 110°C ประมาณ 10 min แล้วจึงนำ chromarod ไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และเอสเทอร์ ด้วยวิธี flame ionization detection โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหล 165 mL.min⁻¹ และอากาศที่อัตราการไหล 2 L.min⁻¹ ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

4. ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลองเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 1

การทดลองปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสองขั้นตอนแบบกะใช้การวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ โดยใช้เทคนิค TLC/FID ได้ผลการทดลองในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4 มีทั้งหมด 18 การทดลอง พบว่าได้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วง 36.797 wt.% ถึง 88.007 wt.%

จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเอทิลเอสเทอร์ และตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร (เอทานอล, กรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา) ในรูปแบบสมการ full quadratic polynomial จะได้สมการทำนายค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในสมการที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการ ค่า p -value ค่าสัมประสิทธิ์แสดงตัดสินใจเชิงซ้อน (R^2) และค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์แสดงตัดสินใจเชิงซ้อน ($R^2_{adjusted}$) แสดงในตารางที่ 5 พบว่า ในการพิจารณาความมีนัยสำคัญของตัวแปรในสมการ ตัวแปรที่มีนัยสำคัญน้อยจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งตัวแปรดังกล่าวมีค่า p -value มากกว่า 0.05 และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณเอทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของปริมาณเอทานอลจากสมการคือพจน์ มีค่า p -value น้อยที่สุด แสดงว่าปริมาณของเอทานอลมีอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นเอทิลเอสเทอร์มากที่สุด

$$EE = \beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 S + \beta_3 T + \beta_4 ES + \beta_5 ET + \beta_6 ST + \beta_7 E^2 + \beta_8 S^2 + \beta_9 T^2 \quad (3)$$

โดยที่ EE คือ ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์, (wt.%), E คือ ปริมาณของเอทานอล, (wt.%), S คือ ปริมาณของกรดซัลฟิวริก, (wt.%), T คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, (min) และ β คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่

ตารางที่ 4 การออกแบบและผลการทดลองในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอน

Run	Ethanol (wt.%)	Sulfuric acid (wt.%)	Reaction Time (min)	EE ₁ (wt.%)	EE ₂ (wt.%)
1	30.00	6.00	40	75.884	98.960
2	30.00	6.00	40	75.854	99.190
3	30.00	6.00	40	76.014	98.939
4	30.00	6.00	40	75.964	99.024
5	30.00	6.00	74	81.625	98.944
6	30.00	6.00	6	54.082	97.540
7	30.00	0.95	40	62.152	97.319
8	30.00	11.05	40	79.469	98.896
9	45.00	3.00	60	86.155	99.203
10	45.00	3.00	20	77.772	98.596
11	45.00	9.00	20	80.475	98.541
12	45.00	9.00	60	88.007	98.793
13	15.00	9.00	60	66.231	98.763
14	15.00	3.00	20	36.797	97.346
15	15.00	3.00	60	51.836	97.567
16	15.00	9.00	20	46.195	98.208
17	4.77	6.00	40	25.917	96.640
18	55.23	6.00	40	85.216	98.760

หมายเหตุ: EE₁ คือ ค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 1

EE₂ คือ ค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 2

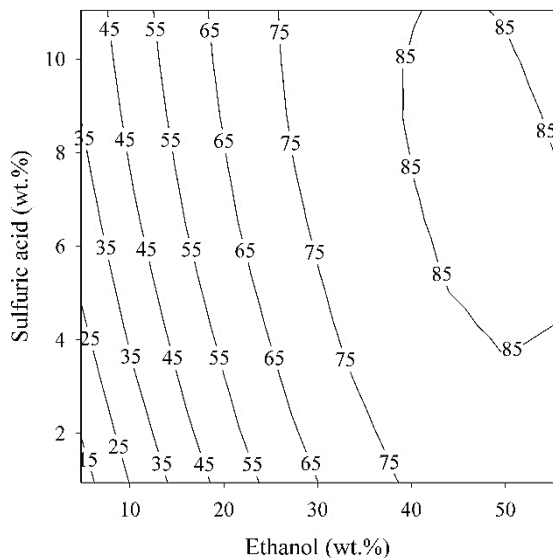
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการที่ 3

Coefficient	First-step esterification		Second-step esterification	
	Value	<i>p</i> -value	Value	<i>p</i> -value
β_0	-40.49000	0.000239	92.34000	0.00000
β_1	3.54000	0.00000	0.17700	0.00222
β_2	4.68000	0.00182	0.62800	0.00253
β_3	1.04700	0.00010	0.05176	0.02573
β_4	-0.05344	0.01868	-0.00701	0.02806
β_5	-0.00798	0.01904	-	-
β_6	-	-	-	-
β_7	-0.02954	0.00000	-0.00169	0.00305
β_8	-0.14000	0.09259	-0.02615	0.03670
β_9	-0.00566	0.00730	-0.00046	0.08187

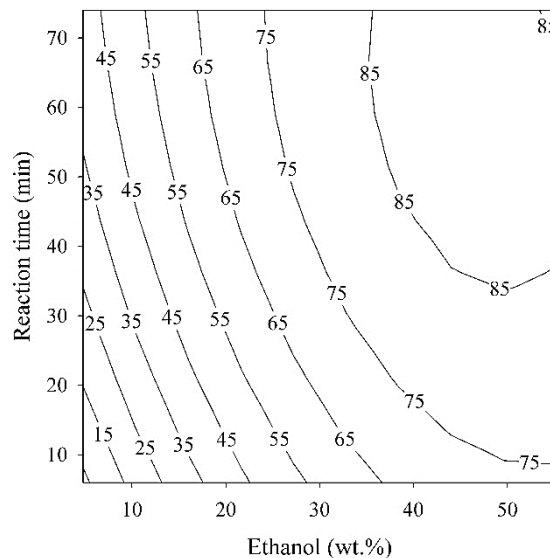
(R² เท่ากับ 0.991, R²_{adjusted} เท่ากับ 0.983 และ R² for prediction เท่ากับ 0.943 ของขั้นตอนที่ 1 และ R² เท่ากับ 0.881, R²_{adjusted} เท่ากับ 0.797 และ R² for prediction เท่ากับ 0.421 ของขั้นตอนที่ 2)

ได้แสดง contour plot ของขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์ของเอทิล-เอสเทอร์

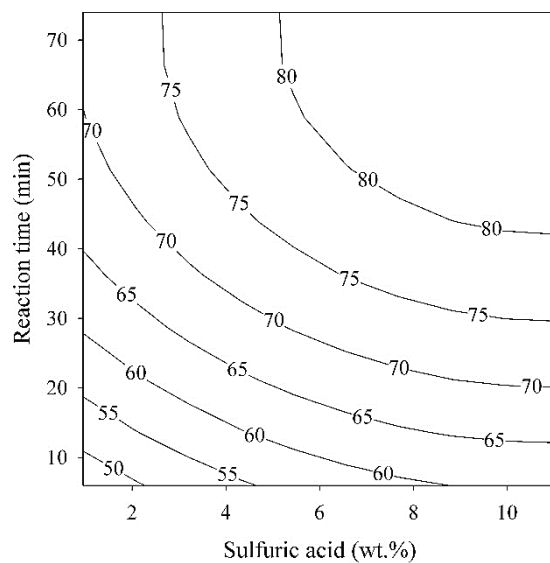
กับตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณเอทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา



(ก)



(ข)

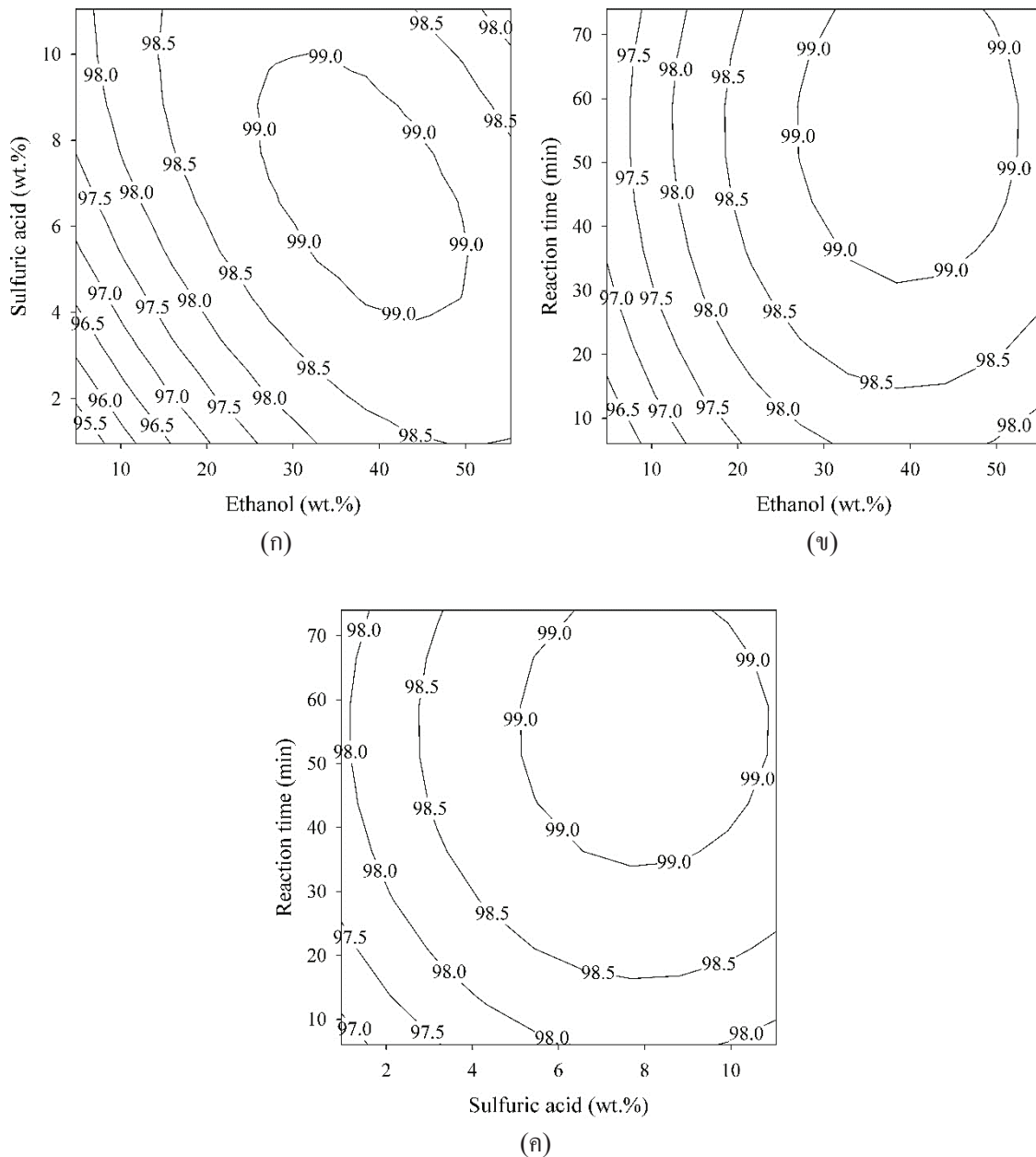


(ค)

รูปที่ 3 กราฟ contour plot ของเอทิลเอสเทอร์ที่ค่าตัวแปรอิสระต่าง ๆ ในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนที่ 1

(ก) ปริมาณเอทานอลและกรดซัลฟิวริก (ข) ปริมาณเอทานอลและเวลาในการทำปฏิกิริยา

(ค) ปริมาณกรดซัลฟิวริกและเวลาในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4 กราฟ contour plot ของเอทิลเอสเทอร์ที่ค่าตัวแปรอิสระต่าง ๆ ในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันขั้นตอนที่ 2

(ก) ปริมาณเอทานอลและกรดซัลฟิวริก (ข) ปริมาณเอทานอลและเวลาในการทำปฏิกิริยา

(ค) ปริมาณกรดซัลฟิวริกและเวลาในการทำปฏิกิริยา

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน ในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 จะใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (รูปที่ 3) ในการวิเคราะห์ จากนั้นใช้ฟังก์ชัน solver ของ Microsoft Excel และสมการทำนายค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์ (สมการที่ 3)

และได้หาสภาวะที่เหมาะสม ผลที่ได้คือค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์สูงสุด เท่ากับ 89.201 wt.% ที่สภาวะคือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 44.10 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 8.32 wt.% และเวลาการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 61 min ที่อุณหภูมิ 75°C หลังจากนั้นนำสภาวะ

ดังกล่าวมาทดสอบด้วยการทดลองเพื่อตรวจสอบและยืนยันผลจากการทำนายค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ที่สภาวะเหมาะสม พบว่าได้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 89.753 wt.% และมีค่าความผิดพลาด เท่ากับ 0.615% ดังนั้นสมการทำนายค่าเอทิลเอสเทอร์สามารถนำมาใช้เพื่อทำนายค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ ในช่วงการแปรค่าของตัวแปรอิสระที่ได้จากการทดลอง จากการศึกษาและสังเกตลักษณะน้ำมันลดกรดไขมันอิสระ พบว่าที่ปริมาณค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ที่สูงกว่า 74 wt.% มีลักษณะเป็นของเหลว เนื่องจากเมื่อต้องนำไปใช้งานจริง เช่น กวนผสมในถังปฏิกรณ์ หากเอทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์มมีลักษณะเป็นไข (wax) อาจทำให้อุดตันในระบบของขั้นตอนที่ 1 ได้ ดังนั้นจึงได้แทนค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 74 wt.% ในสมการความสัมพันธ์ (สมการที่ 3) เพื่อทำนายหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ พบว่าปริมาณเอทานอล เท่ากับ 29.42 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5.28 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 40 min สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์ เท่ากับ 74.222 wt.% โดยน้ำมันลดกรดไขมันอิสระที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 นำไปใช้เป็นสารเริ่มต้นในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

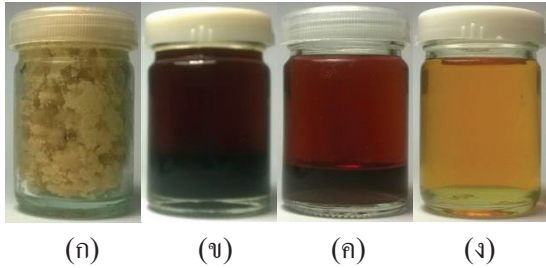
4.2 ผลการทดลองเอสเตอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 2

การทดลองปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันแบบกะในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 2 ใช้การวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์โดยใช้เทคนิค TLC/FID ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4 มีทั้งหมด 18 การทดลอง พบว่า ได้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์อยู่ในช่วง 96.640 wt.% และ 99.203 wt.% จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี RSM ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเอทิลเอสเทอร์ และตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร (เอทานอล, กรดซัลฟิวริก และเวลาการทำปฏิกิริยา) มีรูปแบบสมการ คือ full quadratic polynomial ดังแสดงในสมการที่ 3 เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 1 และค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของสมการ ค่า p -value ค่า

สัมประสิทธิ์แสดงตัดสนใจเชิงซ้อน (R^2) และค่าปรับแก้สัมประสิทธิ์แสดงตัดสนใจเชิงซ้อน ($R^2_{adjusted}$) ดังแสดงในตาราง (ตารางที่ 5) พบว่า เมื่อพิจารณาตัวแปรที่มีนัยสำคัญน้อยออกจากสมการ และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของตัวแปรอิสระ คือ ปริมาณเอทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของปริมาณเอทานอลจากสมการคือพจน์ที่มีค่า p -value น้อยที่สุด แสดงว่าปริมาณของเอทานอลมีอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 2 มากที่สุด

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันในกระบวนการลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 2 จะใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในรูป (รูปที่ 4) ในการวิเคราะห์ จากนั้นใช้ฟังก์ชัน solver ของ Microsoft Excel และสมการทำนายค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์ (สมการที่ 3) และได้หาสภาวะที่เหมาะสมผลที่ได้คือค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์สูงสุด เท่ากับ 99.305 wt.% ที่สภาวะ คือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 37.96 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 6.91 wt.% และเวลาการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 55 min เมื่อนำสภาวะดังกล่าวมาทำการตรวจสอบ พบว่า ได้ค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 99.323 wt.% ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการทำนายเทียบกับผลการทดลอง เท่ากับ 0.695% ซึ่งวัดดูดิบและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอสเตอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 5

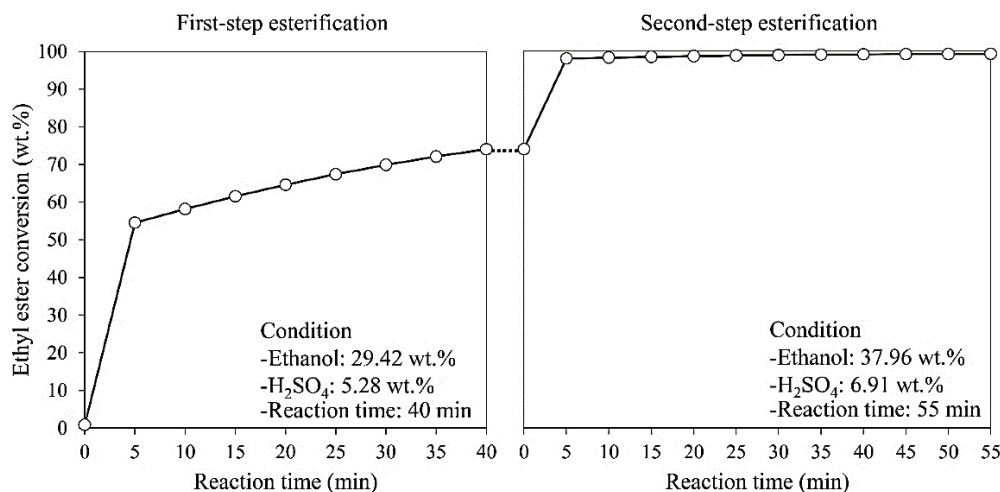
รูปที่ 6 คือ การผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการเอสเตอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอน แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ในระหว่างกระบวนการขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 โดยที่กระบวนการขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 มีการเปลี่ยนเป็นเอทิลเอสเทอร์อย่างรวดเร็วที่ช่วงเวลา 5 min และในกระบวนการขั้นตอนที่ 2 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 35 min ก็เพียงพอสำหรับผลิตเอทิลเอสเทอร์แล้ว เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 35 min ถึง 55 min ค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 0.1 wt.%



รูปที่ 5 แสดงวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน (ก) กรดไขมันปาล์มที่อุณหภูมิ 30°C (ข) น้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1 [ชั้นบน คือน้ำมันลดกรดไขมันอิสระขั้นตอนที่ 1, ชั้นล่าง คือน้ำ] (ค) ไบโอดีเซลดิบ [ชั้นบน คือน้ำมันเอทิลเอสเทอร์, ชั้นล่าง คือน้ำ] และ (ง) ไบโอดีเซลบริสุทธิ์จากกรดไขมันปาล์ม

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบขั้นตอนเดียวกับกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า การผลิตเอทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอนสามารถลดปริมาณเอทานอลลง เท่ากับ 39.44% เมื่อเทียบกับกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจาก

ในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอนได้กำจัดน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการออกหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการของขั้นตอนที่ 1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้จึงลดลง นอกจากนี้สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ได้ความบริสุทธิ์มากกว่ากระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบขั้นตอนเดียว คือสามารถผลิตได้ค่าความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 98.380 wt.% และ 99.323 wt.% เมื่อใช้กระบวนการแบบ single-step esterification และ double-step esterification ตามลำดับ เมื่อคำนวณต้นทุนการผลิต โดยราคาเอทานอล เท่ากับ 25.04 THB/L [11] และราคากรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1.06 THB/kg [16] พบว่า ราคาต้นทุนสารเคมีเทียบกับกรดไขมันปาล์ม 1 kg เท่ากับ 21.51 THB/kg เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซลจาก PFAD ให้ได้ปริมาณเท่ากับ 1.24 kg ดังแสดงในตารางที่ 7 และได้ นำไบโอดีเซลจาก PFAD ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน ไปวิเคราะห์ค่า high heating value (HHV) พบว่ามีค่าเท่ากับ 35.359 MJ/kg ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐานของไบโอดีเซลที่กำหนดให้มีค่า HHV ไม่น้อยกว่า 35 MJ/kg [18]



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเอทิลเอสเทอร์กับเวลาในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณสารเคมี เวลาในการทำปฏิกิริยาและคุณสมบัติของไบโอดีเซลของกระบวนการ single-step esterification กับ double-step esterification

เงื่อนไข	Single-step esterification ⁽¹⁾	Double-step esterification
ขั้นตอนที่ 1: Esterification		
เอทานอล (wt.%)	111.26	29.42
กรดซัลฟิวริก (wt.%)	11.06	5.28
เวลาในการทำปฏิกิริยา (min)	147	40
ขั้นตอนที่ 2: Esterification		
เอทานอล (wt.%)	-	37.96
กรดซัลฟิวริก (wt.%)	-	6.91
เวลาในการทำปฏิกิริยา (min)	-	55
รวมปริมาณสารเคมีและเวลาในการทำปฏิกิริยา		
เอทานอล (wt.%)	111.26	67.38
กรดซัลฟิวริก (wt.%)	11.06	12.19
เวลาในการทำปฏิกิริยา (min)	147	95
คุณสมบัติของของไบโอดีเซล		
เอทิลเอสเทอร์ (wt.%)	98.380	99.323
กรดไขมันอิสระ (wt.%)	1.426	0.000
ไตรกลีเซอไรด์ (wt.%)	0.000	0.000
ไดกลีเซอไรด์ (wt.%)	0.132	0.246
โมนอกลิเซอไรด์ (wt.%)	0.062	0.431

⁽¹⁾ อ้างอิง [17]

ตารางที่ 7 ราคาสารเคมีสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์ม

รายการ	ราคาต่อหน่วย (THB/kg)	ปริมาณการใช้ ⁽³⁾ (kg/PFAD)	ราคาสารเคมี (THB/PFAD)
เอทานอล	31.73 ⁽¹⁾	0.6738	21.38
กรดซัลฟิวริก	1.06 ⁽²⁾	0.1219	0.13
รวม			21.51

⁽¹⁾ อ้างอิง [11] และ ⁽²⁾ อ้างอิง [16] และ ⁽³⁾ ปริมาณการใช้สารเคมีรวมทั้งสองขั้นตอน

5. สรุป

การผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันสองขั้นตอนแบบกะ โดยแปรค่าปริมาณเอทานอล ปริมาณกรดซัลฟิวริก และเวลาในการทำปฏิกิริยาควบคุมอุณหภูมิที่ 75°C และใช้ความเร็วรอบในการกวน

ผสม เท่ากับ 300 rpm พบว่า สามารถผลิตให้ได้เอทิลเอสเทอร์มีค่าความบริสุทธิ์สูงสุด เท่ากับ 99.323 wt.% เมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนที่ 1 คือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 29.42 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 5.28 wt.% และเวลาในการ

ทำปฏิกิริยา เท่ากับ 40 min ได้ค่าความบริสุทธิ์เอทิลเอสเทอร์ เท่ากับ 74.222 wt.% ในปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชัน ขั้นตอนที่ 2 คือ ปริมาณเอทานอล เท่ากับ 37.96 wt.% ปริมาณกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 6.91 wt.% และเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 55 min และการผลิตเอทิลเอสเทอร์ ด้วยกระบวนการเอสเตอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอนสามารถลดปริมาณเอทานอลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาได้ เท่ากับ 39.44% และได้ค่าความบริสุทธิ์เอทิล-เอสเทอร์เพิ่มขึ้น อีกทั้งราคาต้นทุนของการผลิตไบโอดีเซลจากกรดไขมันปาล์มด้วยวิธีเอสเตอร์ฟิเคชันแบบสองขั้นตอนจะลดลงประมาณ 39.27% เมื่อเทียบกับการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียว

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการการพัฒนาพลังงานทดแทน และการประยุกต์ใช้ ในชุมชนสีเขียว ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Boffito, D.C., Mansi, S., Leveque, J.M., Pirola, C., Bianchi, C.L. and Patience, G.S. Ultrafast Biodiesel Production Using Ultrasound in Batch and Continuous Reactors. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2013; 1: 1432–1439.
- [2] Liu, W., Yin, P., Liu, X., Zhang, S., Qu, R. Biodiesel production from the esterification of fatty acid over organophosphonic acid. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015; 21: 893–899.
- [3] Andrade-Tacca, C.A., Chang, C.C., Chen, Y.H., Ji, D.R., Wang, Y.Y., Yen, Y.Q. and Chang, C.Y. Reduction of FFA in jatropha curcas oil via sequential direct-ultrasonic irradiation and dosage of methanol/sulfuric acid catalyst mixture on esterification process. *Energy Conversion and Management*, 2014; 88: 1078–1085.
- [4] Kantama, A., Narataruksa, P., Hunpinoy, P., Prapainainar, C. Techno-economic assessment of a heat-integrated process for hydrogenated renewable diesel production from palm fatty acid distillate. *Biomass and Bioenergy*, 2015; 83: 448–459.
- [5] Lokman, I.M., Rashid, U. and Taufiq-Yap, Y.H. Production of biodiesel from palm fatty acid distillate using sulfonated-glucose solid acid catalyst: Characterization and optimization. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015; 23: 1857–1864.
- [6] Top, A.G.M. Production and utilization of palm fatty acid distillate (PFAD). *Lipid Technology*, 2010; 22(1): 11–13.
- [7] Hykkerud, A. and Marchetti, J. M. Esterification of oleic acid with ethanol in the presence of Amberlyst 15. *Biomass and Bioenergy*, 2016; 95: 340–343.
- [8] United States Department of Agriculture. *Crop Explorer*, [online] available: <https://www.pecad.fas.usda.gov>, 2017.
- [9] Lucena, I.L., Saboya, R.M.A., Oliveira, J.F.G., Rodrigues, M.L., Torres, A.E.B., Cavalcante Jr., C.L., Parente Jr., E.J.S., Silva, G.F. and Fernandes, F.A.N. Oleic acid esterification with ethanol under continuous water removal conditions. *Fuel*, 2011; 90: 902–904.
- [10] Zanuttini, M.S., Pisarello, M.L., Querini, C.A. Butia Yatay coconut oil: Process development for biodiesel production and kinetics of esterification with ethanol. *Energy Conversion and Management*, 2014; 85: 407–416.

- [11] ธนาคารแห่งประเทศไทย. รายงานสถานการณ์ราคาเอทานอลของไทยไตรมาส 2/2560, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา:https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/NorthEastern/Doclib_CommodityQuater/Q1_60_Ethanal.pdf, 2560.
- [12] Srilatha, K., Devi, P.B.L.A., Lingaiah, N., Prasad, R.B.N., Prasad, S.P.S. Biodiesel production from used cooking oil by two-step heterogeneous catalyzed process. *Bioresource Technology*, 2012; 119: 306–311.
- [13] Pisarello, M.L., Dalla Costa, B., Mendow, G., & Querini, C.A. Esterification with ethanol to produce biodiesel from high acidity raw materials Kinetic studies and analysis of secondary reactions. *Fuel Processing Technology*, 2010; 91: 1005–1014.
- [14] Soysuwan, N. and Somnuk K. Optimization of methyl ester production from palm fatty acid distillate using single-step esterification: a response surface methodology approach. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015; 10: 16.
- [15] Montoro, S.R., Medeiros, S.D.F., Santos, A.M., Silva, M.B., Tebaldi, M.L. Application of 2K Experimental Design and Response Surface Methodology in the Optimization of the Molar Mass Reduction of Poly. *Design of Experiments - Applications*, 2013.
- [16] ICIS. ราคาของกรดซัลฟิวริก, 2560. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.icis.com/fertilizerssulphuric-acid/>
- [17] คุณยวัชร พันธุ์โยชิ และ กฤษ สมนึก. สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากกรดไขมันปาล์มด้วยกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันขั้นตอนเดียว: วิธีพื้นผิวตอบสนอง. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, โรงแรมดิเอ็มเพลส เชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่, 2560.
- [18] Montero, G. and Stoytcheva, M. Biodiesel - Quality, Emissions and By-Products. InTech. Croatia, 2011.



การประเมินประสิทธิภาพการให้บริการจำหน่ายตั๋วโดยสาร รถไฟฟ้ามหานครโดยใช้แบบจำลองการจราจรคนเดิน Evaluation of Mass Rapid Transit Ticket Service Efficiency Using Pedestrian Traffic Simulation

กิตติ ขติยะสุนทร* และ นพดล กรประเสริฐ

Kitti Khatiyasoontron* and Nopadon Kronprasert

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239, Tambon Huay Kaew, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

*E-mail : kittikub2014@hotmail.com, Telephone: 082-6914337

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการให้บริการของระบบจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้ามหานคร จุดให้บริการจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้านับเป็นจุดที่เกิดการติดขัดหรือจุดคอขวดในการเดินทางสัญจรภายในสถานีรถไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการให้บริการด้วยช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติ และช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารพนักงาน งานวิจัยนี้ทำการประเมินระบบการให้บริการภายในสถานีสุภูมิวิทซึ่งเป็นสถานีรถไฟฟ้าที่มีผู้โดยสารใช้บริการมากที่สุดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาเร่งด่วนสร้างปัญหาการจราจรคนเดินที่ติดขัด จุดให้บริการจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้างี้ได้รับการปรับปรุงรูปแบบการให้บริการ ช่องทางจำหน่ายตั๋ว จากรูปแบบการให้บริการแบบหลายช่องบริการและหลายแถวคอย มาเป็นรูปแบบการให้บริการแบบหลายช่องบริการขนาน (หรือหลายช่องบริการหนึ่งแถวคอย) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการจราจรคนเดินระดับจุลภาคเพื่อจำลองสถานการณ์ของรูปแบบการให้บริการจำหน่ายตั๋วโดยสารและวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้บริการรูปแบบการให้บริการก่อนและหลังการปรับปรุง ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนรูปแบบการให้บริการแบบหลายช่องบริการขนาน สามารถช่วยจัดสรรพื้นที่ที่จำกัดให้เกิดประสิทธิภาพมีความหนาแน่นขึ้นร้อยละ 28 และสามารถลดระยะเวลาการรอคอยได้เมื่อจำนวนผู้โดยสารมีจำนวนสูงประมาณ 2,000 คนต่อชั่วโมง แต่หากจำนวนผู้โดยสารมีจำนวนไม่สูงระยะเวลาการรอคอยและความยาวแถวคอยจะใกล้เคียงกับรูปแบบแถวคอย ก่อนการปรับปรุง

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the ticket service efficiency of Mass Rapid Transit stations. The ticketing point within the MRT station is a junction or bottleneck point of travel within the stations. The services include the automatic ticketing and ticketing by employees. The study evaluates the ticket service system at Sukhumvit station, which is the busiest MRT station especially during rush hours. Since last year, the ticket service queuing systems have been modified from the multi-channel service with multiple queues to multi-channel service with single queue. This study develops a microscopic traffic simulation to model two scenarios (before-and-after) of ticket service systems and to compare the service efficiency between two models. The results show that changing the ticket service queuing system from multiple queues to single queue can increase the space utilization of the waiting

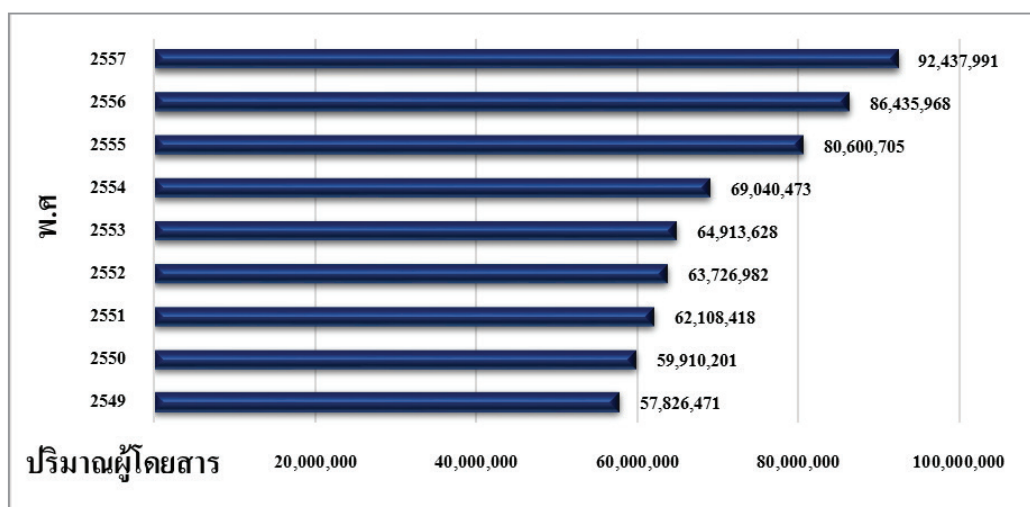
area by 28 percent, and reduce the passenger waiting time if the passenger demand is high (about 2,000 passengers per hour). However, if the passenger demand is low, then the waiting time of two scenarios is about the same.

1. บทนำ

ระบบขนส่งทางรางเป็นระบบขนส่งมวลชนที่มีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาการจราจรในเมืองขนาดใหญ่ที่เป็นศูนย์กลางการปกครอง การศึกษาและการคมนาคมขนส่ง เนื่องจากแนวโน้มของประชากรที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของพื้นที่ที่ไม่สามารถขยายตัวออกได้ ส่งผลให้ยานพาหนะส่วนบุคคลและระบบขนส่งสาธารณะทางถนนไม่ได้รับการพัฒนาเท่าที่ควร ดังนั้นระบบขนส่งระบบรางจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม

ในปัจจุบันรถไฟฟ้ามหานครเป็นระบบขนส่งมวลชนซึ่งเป็นที่นิยม และมีอัตราการใช้บริการของผู้โดยสารที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 ในช่วงปี 2555 มี

อัตราการให้บริการเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดถึงร้อยละ 16.7 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิทมีผู้โดยสารที่เข้าใช้สถานีสูงสุด เนื่องจากเป็นจุดเชื่อมต่อการเดินทางระบบขนส่งอื่น ๆ และแหล่งดึงดูดการเดินทางที่สำคัญ ส่งผลให้ในปี 2557 มีผู้ให้บริการสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิทมากถึง 13.29 ล้านคน [1] ปริมาณผู้โดยสารที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถได้รับการบริการได้ตามต้องการ โดยเฉพาะการบริการช่องจำหน่ายตั๋วโดยสาร ซึ่งมีรูปแบบการให้บริการด้วยเครื่องจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติ และการจำหน่ายตั๋วโดยสารโดยพนักงานที่ไม่สามารถรองรับปริมาณผู้โดยสารจำนวนมากได้ ทำให้เกิดแถวคอยในการใช้บริการที่ยาว ส่งผลให้เป็นจุดคอขวดของการเดินทางภายในสถานีรถไฟฟ้า



รูปที่ 1 ปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการรถไฟฟ้ามหานคร [1]

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการแก้ไขปัญหาการให้บริการช่องจำหน่ายตั๋วโดยสาร โดยอาศัยทฤษฎีแถวคอยและการสร้างแบบจำลองการจราจรการเดินทางระดับจุลภาค ในขั้นตอนการศึกษาได้จำลองสถานการณ์การเข้าใช้บริการระบบช่องจำหน่ายตั๋วโดยสารที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง และจำลองรูปแบบการเข้าแถวคอยเพื่อใช้บริการในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเปรียบเทียบ

สถานการณ์การจัดระบบแถวคอยในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งแบบจำลองการจราจรการเดินทางสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานีรถไฟฟ้ามหานครในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วนตามส่วนงานของการศึกษา ได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎี

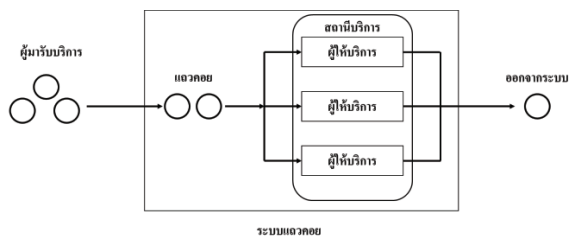
แถวคอย และการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพฤติกรรมการณ์ของคนเดินเท้า ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีแถวคอย (Queuing Theory)

ในระบบงานที่มีทรัพยากรจำกัด ทำให้ลักษณะการดำเนินงานเป็นระบบแบบแถวคอยในการรอคอยเพื่อให้บริการ การบริหารแถวคอย [2,3] คือ การกำหนดนโยบายในการบริหารการมีสิทธิ์ในการใช้ทรัพยากรก่อนหลัง ดังนั้นในการบริหารจัดการของผู้ให้บริการที่เกี่ยวข้องกับระบบแถวคอยนั้น การจัดรูปแบบของระบบแถวคอย เกณฑ์การให้บริการ และจำนวนผู้ให้บริการ เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง

2.1.1 องค์ประกอบพื้นฐานในระบบแถวคอย

ระบบแถวคอยที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปประกอบด้วย ผู้ใช้บริการหรือผู้มารับบริการ ซึ่ง เข้ามาในระบบแถวคอย เมื่อผู้มารับบริการมาถึงและไม่ได้รับการบริการทันที ผู้มารับบริการจะต้องรอในบริเวณรอรับการบริการ เพื่อรอรับการบริการจากผู้ให้บริการ และเมื่อผู้มารับบริการได้รับการบริการจนแล้วเสร็จ จึงออกจากระบบแถวคอย ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบแถวคอย

ในการวิเคราะห์ระบบแถวคอย จำเป็นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบที่มีผลต่อระบบแถวคอย ดังนี้

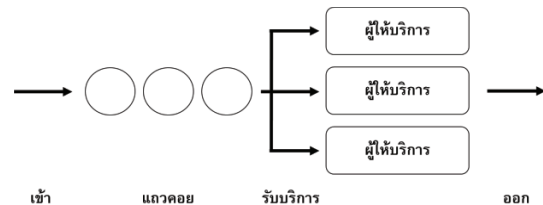
1. ลักษณะการเข้ารับบริการ ได้แก่ จำนวนผู้รับบริการที่เข้ามาใช้บริการในช่วงเวลาหนึ่ง และรูปแบบการเข้ามาหรือระยะเวลาระหว่างการมาของผู้รับบริการ แสดงในรูปแบบการกระจายตัวของจำนวนผู้รับบริการ
2. ลักษณะการให้บริการ ได้แก่ ระยะเวลาในการให้บริการและรูปแบบการให้บริการ แสดงใน

รูปแบบการกระจายตัวของจำนวนผู้รับบริการที่แล้วเสร็จในช่วงเวลาหนึ่ง

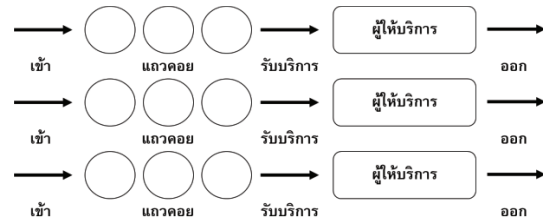
3. การจัดรูปแบบแถวคอย ขึ้นอยู่กับสถานที่ให้บริการ ประเภทและจำนวนของผู้รับบริการ หรือสภาพแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งแบ่งรูปแบบของแถวคอยออกเป็น หน่วยบริการช่องเดียว หน่วยบริการหลายช่องแบบขนาน และหน่วยบริการหลายช่อง ดังแสดงในรูปที่ 3
4. เกณฑ์การให้บริการ ได้แก่ การให้บริการแก่ผู้ที่เข้ามาก่อน การให้บริการแก่ผู้ที่เข้ามาทีหลังก่อน การให้บริการแบบสุ่ม และการให้บริการแก่ผู้มีสิทธิพิเศษ
5. จัดจำกัดจำนวนผู้รับบริการที่มีได้ในระบบแถวคอย มีจำนวนจำกัดหรือไม่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของสถานที่ หรือข้อจำกัดทางด้านอื่นๆ
6. ประชากรหรือกลุ่มผู้รับบริการ มีจำนวนจำกัดหรือไม่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแต่ละระบบแถวคอย



(ก) หน่วยบริการช่องเดียว



(ข) หน่วยบริการหลายช่องแบบขนาน



(ค) หน่วยบริการหลายช่อง

รูปที่ 3 การจัดรูปแบบแถวคอยของหน่วยบริการ

โดยในการจัดรูปแบบแถวคอยนั้นมีการศึกษาของ Larson [4] ที่ศึกษาถึงมุมมองเกี่ยวกับการรอในเรื่อง

ความยุติธรรมทางสังคมและจิตวิทยาการเข้าแถวคอย ซึ่งเชื่อว่าแถวคอยในรูปแบบหน่วยบริการหลายช่องแบบขนานนั้นแสดงให้เห็นถึงความยุติธรรมในการเข้าแถวคอยมากกว่ารูปแบบหน่วยบริการหลายช่อง เนื่องจากการรอคอยในรูปแบบแถวคอยหน่วยบริการหลายช่องคนที่เข้ามาใช้บริการก่อนอาจไม่ได้รับบริการก่อน (เนื่องจากมีแถวคอยมากกว่า 1 แถวคอย) ซึ่งเรียกว่า “slips and skips” โดยเป็นการสร้างความเครียดในการเข้าแถวคอยให้คนที่เข้ามาใช้บริการก่อน แตกต่างจากรูปแบบหน่วยบริการหลายช่องแบบขนานที่มี 1 แถวคอย ซึ่งคนที่มาก่อนนั้นได้รับบริการก่อน ทำให้คนที่ใช้บริการมีความเครียดที่เกิดจากการรอคอยลดลง โดยไม่คำนึงถึงเวลาในการรอคอย

2.2 ทฤษฎีพฤติกรรมของคนเดินเท้า

แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคสามารถวิเคราะห์และออกแบบการจราจร โดยการตรวจสอบสภาพระบบจราจรที่มีความซับซ้อนในบริเวณที่ต้องการทำการประเมินตามช่วงเวลาที่ต้องการ เพื่อเปรียบเทียบหาแบบที่ดีที่สุดในการประยุกต์ใช้

ปัจจุบันแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคมีหลายโปรแกรมที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษากรณีต่างๆ เช่น PTV Vissim, Aimsun และ LEGION Studio เป็นต้น ในส่วนการศึกษาวิจัยนี้ ได้นำแบบจำลองโปรแกรม PTV Viswalk [5] มาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการดำเนินการของการให้บริการจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้ามหานคร

2.2.1 การประยุกต์ใช้แบบจำลองการจราจรสำหรับคนเดิน

แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคสำหรับคนเดิน โปรแกรม PTV Viswalk เป็นที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้จำลองพฤติกรรมสำหรับคนเดินเท้า สามารถจำลองลักษณะการเดินเท้าที่ให้ความสมจริงและมีการประเมินประสิทธิภาพการทำงาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์คนเดินเท้าในสถานการณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

- การวางแผนออกแบบสถานที่และเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นที่ที่มีคนเดินจำนวนมาก

- การวิเคราะห์การอพยพในสถานที่สำคัญ เพื่อวางแผนการรักษาความปลอดภัย
- การวางแผนเสนอมาตรการการจัดการจราจรที่เหมาะสมกับฝูงชนสำหรับเหตุการณ์ที่มีความหนาแน่นสูง
- การวิเคราะห์เส้นทางและการเข้าแถวคอย เพื่อประเมินระยะเวลาการเข้าแถวคอยและรูปแบบการเข้าแถวคอย
- การประเมินทางเลือก สามารถเปรียบเทียบได้จากค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพของทางเลือก
- การวิเคราะห์การจัดสรรเวลาขึ้นและลงของคนเดินเท้าในระบบขนส่งสาธารณะ

แบบจำลองการจราจรคนเดินเท้าสามารถแสดงผลจากการวิเคราะห์ออกมาได้หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นเส้นทางการเลือกเดินของคนเดินเท้าไปยังปลายทางที่สั้นที่สุดและเร็วที่สุด ความจุของบริเวณที่ประเมิน รวมถึงการแสดงผลแบบจำลองการเดินทางออกมาในรูปแบบ 2 และ 3 มิติ เป็นต้น

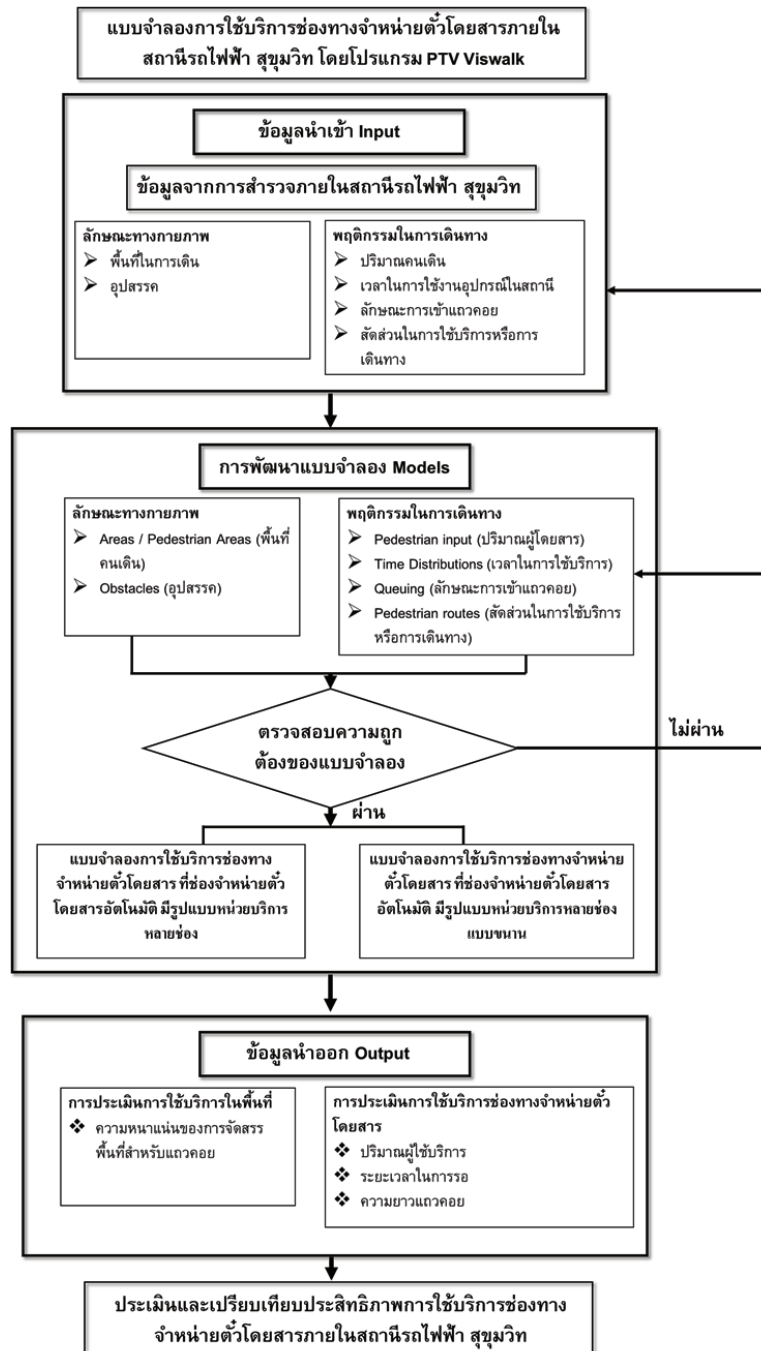
ดังนั้นแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคสำหรับคนเดินเท้า จึงถือเป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการจราจรของคนเดินเท้า

แบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในการประเมินสภาพปัญหาต่างๆ ที่มีขอบเขตในการดำเนินงานขนาดใหญ่และมีปัจจัยในการประเมินที่ไม่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด เช่น งานวิจัยของ Seriani and Fernandez [6] ศึกษาการจัดการการจราจรทางเดินเท้าของการขึ้นลงภายในสถานีรถไฟใต้ดิน ซึ่งตรวจสอบและวิเคราะห์โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองการจัดการการจราจรขึ้นลงของผู้โดยสารบริเวณภายในสถานีรถไฟใต้ดิน ซึ่งได้จำลองการเดินทางบริเวณชานชาลาและประตูทางเข้า-ออกของรถไฟฟ้าใต้ดิน ในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน ผลที่ได้รับจากแบบจำลองสามารถแสดงระดับการให้บริการ (LOS) ความหนาแน่นของผู้โดยสารในแต่ละพื้นที่ และสามารถให้ข้อเสนอแนะในการจัดการการจราจรทางเท้าภายในสถานีรถไฟใต้ดินได้

3. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการให้บริการช่องจำหน่ายตั๋วโดยสารของสถานีรถไฟฟ้ามหานคร โดยสร้างแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคสำหรับคนเดินโปรแกรม PTV

Viswalk เพื่อประเมินและเปรียบเทียบการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารในรูปแบบการให้บริการต่าง ๆ งานวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการศึกษา

งานวิจัยนี้กำหนดพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณพื้นที่ภายใน สถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิทของรถไฟฟ้าฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล โดยศึกษาบริเวณช่องจำหน่ายตั๋วโดยสารประตู 2 (ทางฝั่งทิศใต้) ซึ่งประกอบด้วยช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติ และช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารโดยพนักงาน

3.1 การสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้า (Input)

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการพัฒนาแบบจำลองในงานศึกษานี้รวบรวมจากการสำรวจข้อมูลภาคสนามภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิทบริเวณช่องจำหน่ายตั๋วโดยสาร ซึ่งสามารถแบ่งหัวข้อในการสำรวจข้อมูลเป็น 2 หัวข้อหลัก คือ ข้อมูลลักษณะทางกายภาพและข้อมูลการเดินทาง

3.1.1 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพ

ข้อมูลลักษณะทางกายภาพ สามารถแบ่งการสำรวจออกเป็นได้ 2 ส่วน คือ การสำรวจพื้นที่ในการเดินของคนเดิน และอุปสรรคในการกีดขวางการเดินทาง

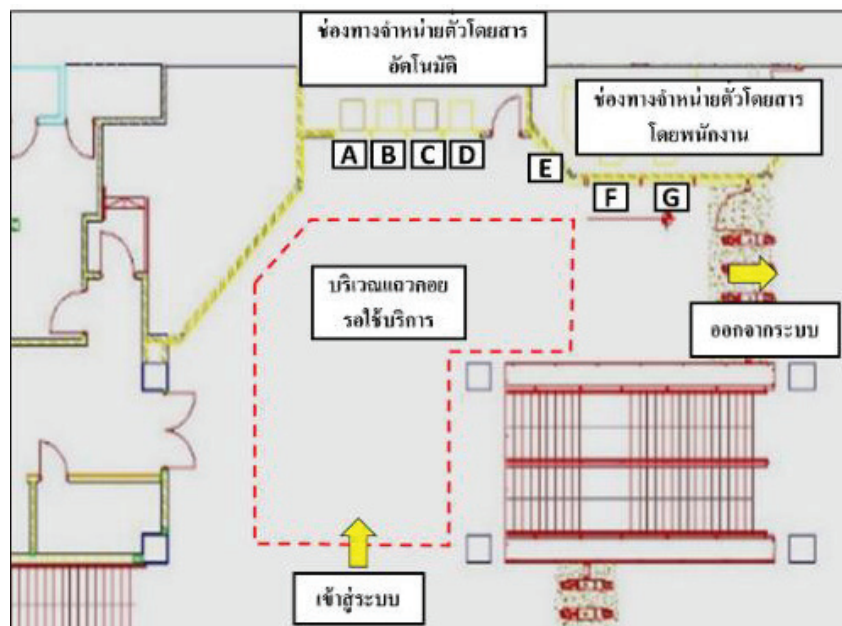
- การสำรวจพื้นที่ในการเดินภายในสถานี คือ การสำรวจพื้นที่ที่คนสามารถเดินได้ ได้แก่ ความ

กว้างช่องทางในการเดิน พื้นที่การขึ้น ความลาดชันของพื้นที่ เป็นต้น

- การสำรวจอุปสรรคในการเดินทาง เช่น เสา คาน้ำดื่ม กำแพง โดยสำรวจขนาดและตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง รวมถึงขนาดและลักษณะเครื่องจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติ และห้องจำหน่ายตั๋วโดยสารที่ออกโดยพนักงาน เป็นต้น

ในการสำรวจข้อมูลลักษณะทางกายภาพ อาจใช้ข้อมูลแบบแปลนก่อสร้างภายในสถานีและรูปถ่ายหรือวิดีโอสำรวจข้อมูลประกอบการพัฒนาแบบจำลอง

รูปที่ 5 แสดงบริเวณพื้นที่ช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิท ซึ่งประกอบด้วยพื้นที่สำหรับจัดรูปแบบแถวคอยเพื่อรอใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร อุปสรรคกีดขวางการเดินทาง รวมถึงแสดงตำแหน่งของช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติที่ให้บริการทั้งหมด 4 เครื่อง (A, B, C, D) และช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารโดยพนักงานทั้งหมด 3 ช่องทาง (E, F, G) ซึ่งพื้นที่ในการรอคอยบริเวณช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารมีพื้นที่ประมาณ 88 ตารางเมตร



รูปที่ 5 แบบแปลนบริเวณพื้นที่ช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิท

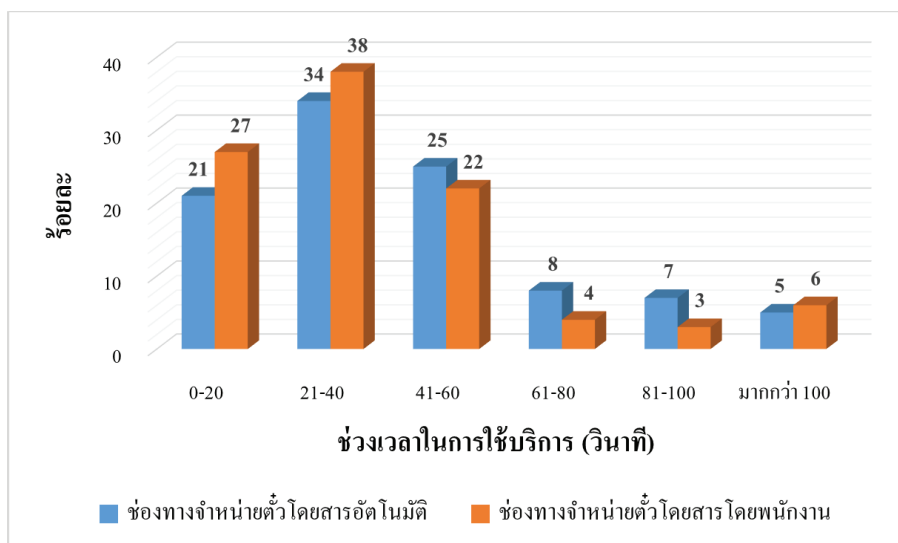
3.1.2 ข้อมูลการเดินทาง

การสำรวจข้อมูลการเดินทางของผู้ใช้บริการ สามารถแบ่งการสำรวจออกเป็นได้ 4 ส่วน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาแบบจำลอง

- จำนวนคนเดินหรือปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิท มีช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า 7.00-10.00 น. และช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น คือ 17.00-20.00 น. (อ้างอิงจากข้อมูลปริมาณผู้โดยสารที่เข้าใช้

บริการภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิท ระหว่างวันที่ 3-7 ตุลาคม พ.ศ 2559 ของบริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน))

- เวลาในการใช้งานอุปกรณ์ในสถานี เป็นการสำรวจเวลาในการใช้ช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร ซึ่งสำรวจตั้งแต่เวลาเริ่มเข้าสู่ระบบให้บริการจนถึงได้รับตั๋วโดยสารหรือเงินทอน เป็นต้น โดยแสดงค่าในหน่วยวินาที ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ข้อมูลเวลาในการใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร แบ่งตามประเภทของรูปแบบการให้บริการ

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า เวลาในการใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารทั้ง 2 รูปแบบ อยู่ในช่วง 21-40 วินาทีต่อคน โดยค่าเฉลี่ยของเวลาในการใช้บริการเท่ากับ 43.45 และ 39.69 วินาที สำหรับช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติและช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารโดยพนักงานตามลำดับ ภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิทนั้นมีปริมาณผู้โดยสารที่เป็นนักท่องเที่ยวและชาวต่างชาติจำนวนมาก ซึ่งไม่มีความชำนาญในการใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วอัตโนมัติ และไม่มีพนักงานในการแนะนำการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วอัตโนมัติ และในบางครั้งมีการซื้อตั๋วโดยสารหลายใบ

- ลักษณะรูปแบบแถวคอยเข้าใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร ประกอบด้วย 2 รูปแบบ ได้แก่

- บริเวณช่องทางจำหน่ายตั๋วอัตโนมัติ เป็นระบบแถวคอย มีการให้บริการ 4 ช่องทาง และ 4 แถวคอยรอรับการบริการ
- บริเวณช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารโดยพนักงาน เป็นระบบแถวคอยแบบที่มีการให้บริการหลายคน มีผู้ให้บริการสูงสุด 3 ช่องทาง และ 1 แถวคอยรอรับการบริการ

ทั้งนี้ระบบแถวคอยไม่มีการแทรกแถวคอยของผู้มารับบริการ และลักษณะแถวคอยมีความเป็นระเบียบ ในการสร้างแบบจำลองคนเดิน

- การสำรวจสัดส่วนในการใช้บริการหรือสัดส่วนในการใช้เส้นทางในการเดิน โดยมีเส้นทางในการเดินทาง 3 เส้นทาง คือ เส้นทางในการใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วอัตโนมัติ เส้นทางในการ

ให้บริการช่องทางนำตัวที่ออกโดยพนักงาน และเส้นทางที่เดินทางไปยังช่องทางตรวจตัวโดยสารอัตโนมัติ (Automatic Gate) สำหรับผู้โดยสารที่มีตัวโดยสารอยู่แล้ว

3.2 การพัฒนาแบบจำลอง

ขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลอง การดำเนินการของการให้บริการช่องทางนำตัวโดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้ามหานคร สถานีสุขุมวิท ได้แบ่งขั้นตอนในการพัฒนาแบบจำลองนำเข้าข้อมูลเป็นขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การพัฒนาลักษณะทางกายภาพในแบบจำลอง

ลักษณะทางกายภาพในการสร้างแบบจำลองคนเดินภายในสถานี สุขุมวิท สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่

- พื้นที่คนเดิน (Areas / Pedestrian Areas) เป็นพื้นที่ที่คนเดินสามารถเดินได้ โดยมีความกว้างของพื้นที่ในการเดินไม่ต่ำกว่า 0.4 เมตร
- อุปสรรค (Obstacles) เป็นสิ่งกีดขวางในการเดินทางของคนเดินในแบบจำลอง ซึ่งไม่สามารถเดินผ่านได้ หรือสามารถใช้ภาพ 3 มิติ เช่น พื้นผิวเครื่องจำหน่ายตั๋วอัตโนมัติ เป็นต้น

3.2.2 การพัฒนาพฤติกรรมในการเดินทางในแบบจำลอง

ลักษณะการเดินทางของผู้ใช้บริการภายในแบบจำลองสามารถสร้างโดยการกำหนดพฤติกรรมที่ได้จากการสำรวจดังนี้

- ปริมาณผู้โดยสาร (Pedestrian input) จำนวนคนเดินหรือผู้โดยสารที่ใช้บริการภายในสถานีรถไฟฟ้า กำหนดในหน่วยคนต่อชั่วโมง
- เวลาในการใช้บริการ (Time Distributions) เป็นเวลาที่คนเดินหยุดรอเพื่อใช้บริการสิ่งอำนวยความสะดวกภายในสถานีบริเวณพื้นที่ที่ต้องการให้คนเดินหยุดรอในแบบจำลอง โดยแสดงค่าในหน่วยวินาที
- ลักษณะการเข้าแถวคอย (Queuing) กำหนดพื้นที่ในการรอคิวเพื่อใช้บริการ
- ส่วนการเดินทางในแต่ละเส้นทาง (Pedestrian routes) เพื่อจำลองการเลือกเส้นทางของคนเดิน

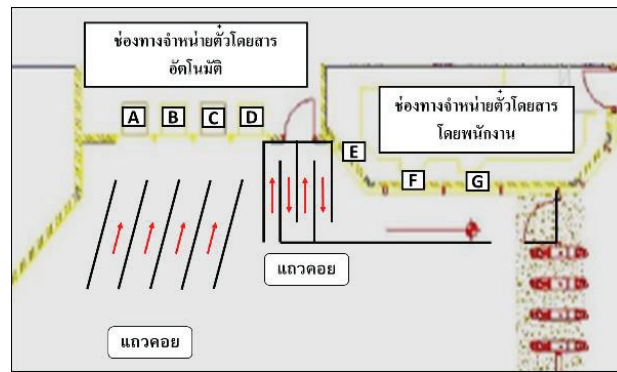
ภายในสถานี ที่มีทางเลือกเส้นทางในการเดิน โดยการประมาณจากความหนาแน่นของพื้นที่หรือความยาวของแถวคอย เป็นต้น

3.2.3 การพัฒนาแบบจำลองรูปแบบทางเลือกต่าง ๆ

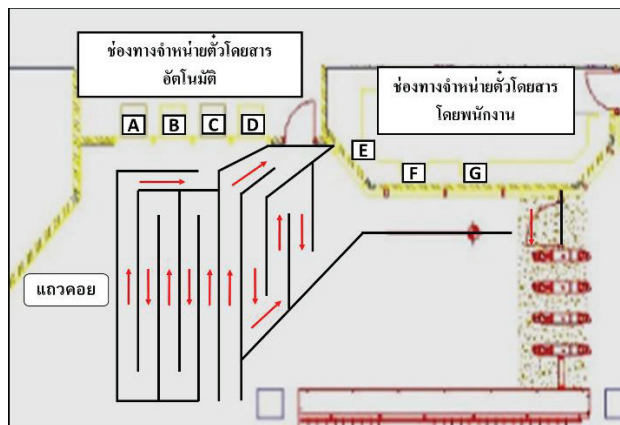
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการใช้บริการช่องทางนำตัวโดยสารของผู้โดยสารภายในสถานีรถไฟฟ้าสุขุมวิท สามารถตรวจสอบโดยทิศทางการเดิน ระยะเวลาในการใช้งานอุปกรณ์ภายในสถานี รวมถึงสัดส่วนในการใช้บริการ ให้ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงที่ได้เก็บข้อมูลจากการสำรวจ เมื่อแบบจำลองมีความใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง สามารถพัฒนาแบบจำลองระบบแถวคอยช่องทางนำตัวโดยสารได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบก่อนและหลังการปรับปรุงรูปแบบแถวคอย

1) แบบจำลองที่ 1 (ก่อนการปรับปรุง): การใช้บริการช่องทางนำตัวโดยสาร ประกอบด้วยช่องทางนำตัวโดยสารอัตโนมัติ มีรูปแบบหน่วยบริการหลายช่อง (และมีแถวคอยหลายแถว) และช่องทางนำตัวโดยสารโดยพนักงาน มีรูปแบบหน่วยบริการหลายช่องแบบขนาน (มีผู้ให้บริการมากกว่าหนึ่ง แต่มีแถวคอยแถวเดียว) ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดแถวคอยที่ใช้มาตลอดก่อนมีการปรับเปลี่ยนหรือปรับปรุงรูปแบบการจัดแถวคอย ดังรูปที่ 7

2) แบบจำลองที่ 2 (หลังการปรับปรุง): การใช้บริการช่องทางนำตัวโดยสาร ประกอบด้วยการจัดแถวคอยของช่องทางนำตัวโดยสารอัตโนมัติและช่องทางนำตัวโดยสารโดยพนักงาน ซึ่งทั้งสองมีรูปแบบหน่วยบริการหลายช่องแบบขนาน (มีผู้ให้บริการมากกว่าหนึ่ง แต่มีแถวคอยแถวเดียว) เนื่องจากปริมาณผู้โดยสารที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่เพียงพอต่อการให้บริการ จึงได้มีการปรับปรุงรูปแบบแถวคอยในการให้บริการตั้งแต่ปี พ.ศ.2560 เป็นต้นมา ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 รูปแบบการให้บริการและจัดแถวคอยสำหรับจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานี ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 8 รูปแบบการให้บริการและจัดแถวคอยสำหรับจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานี หลังการปรับปรุง

3.3 การวิเคราะห์ผลข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการแบบจำลองการจราจรสำหรับคนเดินด้วยโปรแกรม PTV Viswalk สามารถแสดงผลข้อมูลเป็น 2 ส่วนดังนี้

3.3.1 การประเมินการให้บริการในพื้นที่

การประเมินการให้บริการในพื้นที่แสดงจำนวนคนเดินที่อยู่ในพื้นที่ที่ต้องการทำการประเมิน โดยแสดงผลในรูปแบบความหนาแน่นของผู้โดยสารในหน่วยคนต่อตารางเมตรสำหรับแต่ละพื้นที่ทางเดินภายในสถานีและพื้นที่แถวคอย เพื่อใช้วิเคราะห์การจัดสรรพื้นที่ที่มีอย่างจำกัดให้เต็มประสิทธิภาพ

3.3.2 การประเมินการให้บริการระบบการให้บริการ

การประเมินการให้บริการระบบการให้บริการหรือระบบแถวคอยภายในสถานี เช่น ช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร ช่องทางเข้าออกตรวจตั๋วโดยสารอัตโนมัติ บันไดเลื่อน ลิฟท์ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นประเมินการ

ให้บริการระบบช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการประเมินด้วยแบบจำลองสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่

- ปริมาณผู้ใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารที่สามารถแสดงปริมาณผู้โดยสารเข้าและออกจากช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร มีหน่วยคนต่อชั่วโมง
- ระยะเวลาในการรอคอย คือ ระยะเวลาในการรอใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารหรือระยะเวลาในการรอขณะที่อยู่ในแถวคอยแต่ละแถวคอย โดยแสดงค่าในหน่วยวินาที
- ความยาวของแถวคอย คือ ความยาวแถวคอยของผู้โดยสารที่เข้ารอใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารเมื่อมีผู้โดยสารกำลังใช้บริการอยู่ในแต่ละแถวคอย โดยแสดงค่าในหน่วยเมตร

3.4 การประเมินเปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟ

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร โดยประเมินค่าที่ได้จากการประมวลผลแบบจำลองการจราจรสำหรับคนเดิน ซึ่งค่าที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทางเลือกต่าง ๆ จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการให้บริการว่ารูปแบบทางเลือกใดมีความเหมาะสมมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหา รวมถึงสามารถนำไปปรับใช้ภายในสถานีรถไฟมหา นคร

4. ผลการศึกษา

4.1 รูปแบบการให้บริการและการจัดแถวคอยของช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการจราจรคนเดินบริเวณพื้นที่จำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟ สุขุมวิท ประตู 2 (ทางทิศใต้) โดยจำลองสถานการณ์กระแสน้ำจราจรคนเดินของรูปแบบการจัดแถวคอย 2 รูปแบบ ได้แก่

- รูปแบบที่ 1 (ก่อนการปรับปรุง) มีการจัดแถวคอยของช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติรูปแบบหน่วยบริการหลายช่อง และมีแถวคอยหลายแถว ดังแสดงในรูปที่ 9
- รูปแบบที่ 2 (หลังการปรับปรุง) มีการจัดแถวคอยของช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติรูปแบบหน่วยบริการหลายช่องแบบขนาน แต่มีแถวคอยแถวเดียว ดังแสดงในรูปที่ 10



(ก) การให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารที่สถานีรถไฟ สุขุมวิท (ก่อนการปรับปรุง)



(ข) การให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารในการพัฒนาแบบจำลอง (ก่อนการปรับปรุง)

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแบบจำลองในรูปแบบ 3 มิติกับภายในสถานีรถไฟ สุขุมวิท

จากรูป แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารในรูปแบบ 3 มิติ กับภาพถ่ายจากการสำรวจข้อมูลภายในสถานี โดยการพิจารณาแบบจำลองมีความใกล้เคียงความเป็นจริงในการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร การเดินทางของคนเดิน และปริมาณผู้โดยสาร



รูปที่ 10 แบบจำลองการจราจรของช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานี (หลังการปรับปรุง)

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้ทำการตรวจสอบความถูกต้อง โดยการประเมินเวลาในการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารระหว่างแบบจำลองและสภาพความเป็นจริง ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าร้อยละ 80 โดยที่

- เวลาในการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติของสภาพความเป็นจริงนั้นน้อยกว่าแบบจำลอง อยู่ร้อยละ 19.7 และ

- เวลาในการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร โดยพนักงานที่ในสภาพความเป็นจริงนั้น มากกว่าแบบจำลอง อยู่ร้อยละ 11.7

4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

4.2.1 การใช้พื้นที่ให้บริการ

การใช้พื้นที่บริการสามารถวัดได้จากค่าความหนาแน่นของผู้โดยสารในพื้นที่ให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร ซึ่งพื้นที่การให้บริการที่มีอยู่อย่างจำกัดบริเวณหน้าช่องจำหน่ายตั๋วโดยสารในพื้นที่ศึกษา 88 ตารางเมตร

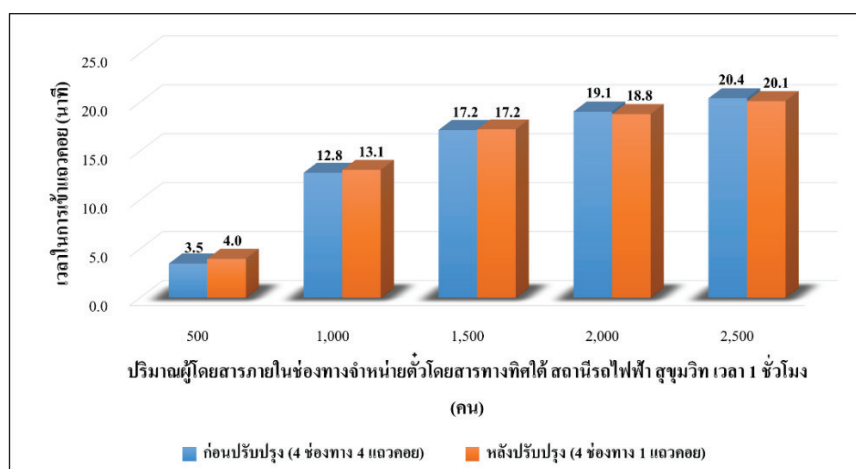
การจัดสรรพื้นที่สำหรับแถวคอยกรณีหลังการปรับปรุง มีความหนาแน่นของผู้โดยสารที่รอใช้บริการอยู่ที่ 1.15 คนต่อตารางเมตร มากกว่าการจัดสรรพื้นที่สำหรับแถวคอยกรณีก่อนการปรับปรุง ที่ 0.90 คนต่อตารางเมตร มีค่าความหนาแน่นมากขึ้นร้อยละ 27.8 เมื่อมีปริมาณผู้ใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารในช่วงเวลาเร่งด่วน ซึ่งสามารถลดการใช้พื้นที่ในการรอคอยในพื้นที่ที่จำกัด เมื่อมีปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการมากขึ้น ส่งผลให้ไม่กระทบต่อเส้นทางการเดินทางของผู้โดยสารในเส้นทางอื่น

4.2 การใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร

ประสิทธิภาพการให้บริการของช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร สามารถวัดได้จากดัชนีชี้วัด 3 ส่วน ได้แก่ ปริมาณ

ผู้ใช้บริการต่อชั่วโมง ระยะเวลารอให้บริการ และความยาวแถวคอยของผู้ใช้บริการ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังนี้

- ปริมาณผู้ใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายใน 1 ชั่วโมง ของรูปแบบแถวคอยทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง มีอัตราการให้บริการที่ใกล้เคียงกัน โดยอัตราการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารสูงสุดก่อนการปรับปรุง 404 คนต่อชั่วโมง และหลังการปรับปรุง 394 คนต่อชั่วโมง อัตราการให้บริการหลังการปรับปรุงต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากรูปแบบแถวคอยหลังการปรับปรุงจัดสรรให้ผู้โดยสารใช้ระยะทางการเดินเข้าใช้บริการที่ไกลขึ้น ทำให้ความล่าช้าของผู้โดยสารคนใดคนหนึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการใช้บริการทั้งระบบแต่ในทางตรงกันข้าม รูปแบบแถวคอยก่อนการปรับปรุง ผู้โดยสารเดินเข้าพื้นที่ในการให้บริการสามารถเดินทางตรงไปยังจุดจำหน่ายตั๋วได้ทันทีหรือมีระยะแถวคอยที่สั้นกว่า
- ระยะเวลาในการรอให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร สามารถเปรียบเทียบระยะเวลาของรูปแบบแถวคอยก่อนและหลังการปรับปรุงในหน่วยนาที ดังแสดงรูปที่ 11

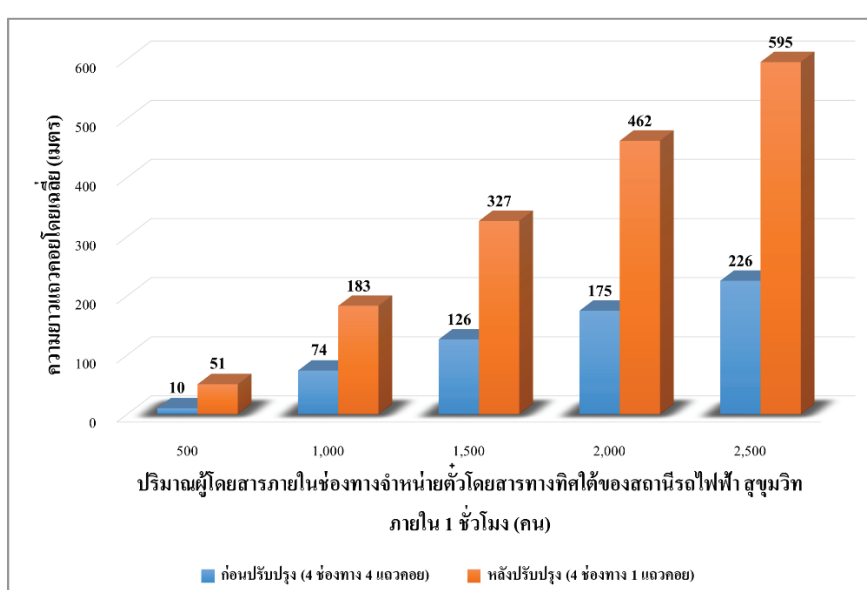


รูปที่ 11 เปรียบเทียบระยะเวลาในการรอให้บริการ ก่อนและหลังการปรับปรุงรูปแบบแถวคอย

จากรูปเมื่อมีการปรับเปลี่ยนการจัดสรรพื้นที่แถวคอย ส่งผลให้เวลาในการรอคอยโดยเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงและ หลังการปรับปรุงไม่แตกต่างกัน โดยระยะเวลาในการรอ ใช้บริการโดยรวมเฉลี่ย 14.59 และ 14.65 ของก่อนการ ปรับปรุงและหลังการปรับปรุงแถวคอย ตามลำดับ เมื่อมี ผู้โดยสาร 500 คนต่อชั่วโมง รูปแบบแถวคอยหลังการ ปรับปรุงใช้เวลาในการรอมากกว่าก่อนการปรับปรุง แต่ เมื่อมีผู้โดยสาร 2,000 คนต่อชั่วโมง รูปแบบแถวคอยหลัง

การปรับปรุงใช้เวลาในการรอคอยน้อยกว่า แสดงถึงก่อน การปรับปรุงแถวคอยเหมาะสมสำหรับปริมาณผู้โดยสาร ไม่มาก และหลังการปรับปรุงแถวคอยเหมาะสมต่อปริมาณ ผู้โดยสารจำนวนมาก

- ความยาวแถวคอยของผู้โดยสารที่เข้าแถวคอย เพื่อรอใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร โดย แสดงค่าในหน่วยเมตร ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 เปรียบเทียบความยาวแถวคอยในการรอใช้บริการ ก่อนและหลังการปรับปรุงรูปแบบแถวคอย

รูปแบบการจัดสรรแถวคอยหลังการปรับปรุง ส่งผล ให้ความยาวของแถวคอยโดยเฉลี่ยนั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการ ให้บริการแถวคอยได้มีการปรับเปลี่ยนจาก 5 แถวคอย เหลือเพียง 2 แถวคอย ส่งผลให้ปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการ ช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารนั้น เข้าแถวคอยเพื่อรอใช้ บริการแถวคอยร้อยละ 50 ของผู้โดยสารทั้งหมด แต่เนื่อง การการจัดสรรพื้นที่แถวคอยหลังการปรับปรุงมีความ

หนาแน่นของคนเดินต่อพื้นที่มากกว่าการจัดสรรแถวคอย ก่อนการปรับปรุง ร้อยละ 27.8 จึงส่งผลให้การจัดสรร พื้นที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารก่อนและหลัง การปรับปรุงการจัดสรรพื้นที่แถวคอยภายในสถานี รถไฟฟ้าสุขุมวิท

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสาร ก่อนและหลังปรับปรุงรูปแบบแถวคอย

ประสิทธิภาพการให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารทางทีได้ สถานีรถไฟ สุขุมวิท	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลอง โดยเฉลี่ย		ร้อยละการ เปลี่ยนแปลง
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	
ความหนาแน่นของผู้โดยสารในพื้นที่	0.90 คน/ตร.ม.	1.15 คน/ตร.ม.	+ 27.8
ปริมาณผู้ให้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายใน 1 ชั่วโมง	404 คน/ชม.	394 คน/ชม.	- 2.5
ระยะเวลาในการรอให้บริการ	14.59 นาที	14.65 นาที	+ 0.4
ความยาวของผู้โดยสารที่เข้าแถวคอย	122 เมตร	324 เมตร	+ 164

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการจราจรการเดินทางของผู้โดยสาร เข้าใช้บริการช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารภายในสถานีรถไฟสุขุมวิท โดยเปรียบเทียบรูปแบบการจัดแถวคอย 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบหน่วยบริการหลายช่องและแถวคอยหลายแถว (ก่อนการปรับปรุง) และรูปแบบหน่วยบริการหลายช่องและแถวคอยแถวเดียว (หลังการปรับปรุง)

การปรับเปลี่ยนรูปแบบแถวคอยช่วยให้สามารถจัดสรรพื้นที่สำหรับการรอคอยเข้าใช้บริการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจัดการพื้นที่ในการใช้สอยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในพื้นที่ที่จำกัด ถึงแม้ว่าความหนาแน่นจะสูงขึ้น (ระดับการให้บริการที่ต่ำ) แต่ประสิทธิภาพของการให้บริการสูงขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อเส้นทางในการเดินทางของผู้โดยสารในเส้นทางอื่น

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการให้บริการของระบบแถวคอยทั้งสองรูปแบบยังคงมีระดับที่ใกล้เคียงกัน เช่น ปริมาณผู้โดยสารที่ผ่านเข้ารับบริการ และระยะเวลาในการรอเข้าใช้บริการ เป็นต้น แต่ในการจัดรูปแบบแถวคอยเดี่ยวส่งผลให้ผู้โดยสารที่มาก่อนนั้นได้รับบริการก่อนสร้างความรู้สึกรอคอยเป็นธรรมเนียมในการเข้าแถวคอยและช่วยลดความเครียดในการรอคอย

แบบจำลองการจราจรคนเดินช่องทางให้บริการจำหน่ายตั๋วโดยสารนี้ ไม่ได้พิจารณาถึงการให้บริการของเจ้าหน้าที่สถานีในการให้บริการคำแนะนำการใช้เครื่องจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติ ตลอดจนการเพิ่มช่องทางจำหน่ายตั๋วโดยสารอัตโนมัติ และเพิ่มช่องทางในการให้บริการตั๋วโดยสารด้วยพนักงานจาก 3 ช่องทางเป็น 4 ช่องทางได้เนื่องจากการออกแบบห้องจำหน่ายตั๋วโดยพนักงานมีช่องบริการได้สูงสุด 4 ช่องทาง ซึ่งจะทำให้เวลาในการรอเพื่อใช้บริการลดลง และ ส่งผลให้ผู้โดยสารมีความพึงพอใจในการใช้บริการมากขึ้น ซึ่งมาตรการเหล่านี้สามารถลดเวลาในการรอคอยและความยาวแถวคอยที่ยั่งยืนได้ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการรถไฟฟ้ามหานครแห่งประเทศไทยที่ให้ความร่วมมือในการสำรวจข้อมูลภายในสถานีรถไฟสุขุมวิท ขอขอบคุณ บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) ที่สนับสนุนข้อมูลในการทำวิจัย และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มงานวิจัยและประเมินผลกองยุทธศาสตร์บริหารจัดการ. สถิติกรุงเทพมหานคร ปี 2557, กรุงเทพมหานคร: สำนักงานพุทธศาสนาแห่งชาติ, 2557.

- [2] ปานวิทย์ ชูระนุติ. ทฤษฎีแถวคอย, 2558. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://academic.udru.ac.th/~banyat/Thesis/Refs/99410-5-1.pdf>.
- [3] ทศนพงศ์ เลิศปัญญานุกูล. การออกแบบและวางผังคลังสินค้าของโรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ 1 อำเภอฟาง จังหวัด เชียงใหม่. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2559; 23(2) : 1 – 14.
- [4] LARSON, R.Q. PERSPECTIVES ON QUEUES: SOCIAL JUSTICE AND THE PSYCHOLOGY OF QUEUEING. 1987.
- [5] Planung Transport Verkehr AG [PTV]. VISSIM 5.40 - User Manual. Karlsruhe, Germany: PTV, 2012.
- [6] Seriani, S., Fernandez, R. Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations. In Transportation research part C: emerging technologies, 2015; 53: 76-92, 2015.



การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการย้ำหมุด ด้วยแรงสั่นโดยวิธีการออกแบบการทดลอง Wobble Riveting Process Parameter Optimization Using Design of Experiment Technique

วสุภรา อุ่นจิตสกุล* และ วิมลน เหล่าศิริถาวร

Wasupara Ounjitsakul* and Wimalin Laosiritaworn

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Graduate School, Chiang Mai University, 50200, Thailand

*E-mail: Wasupara036@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการย้ำหมุดด้วยแรงสั่น ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลอง โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน 2^k เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ได้แก่ ความดันอากาศ (Air Pressure) ความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อ (Rivet Pressure) เวลา (Rivet Time) และความสูง (Height) โดยมีค่าผลตอบ คือ ค่าความสูงของหัวหมุดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ (Wobble High) และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (DCR) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง 16 การทดลอง 2 ซ้ำ ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสูงของหัวหมุดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ ได้แก่ ความดันอากาศ เวลา ความสูง ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความดันอากาศกับเวลาและเวลากับความสูง และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ได้แก่ ความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อ เวลาและความสูง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยมีความพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต ดังนี้ ความดันอากาศ 2.5 บาร์ ความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อที่ระดับ 6 เวลาที่ระดับ 6 ความสูง 10.482 เซนติเมตร และมีค่าความพึงพอใจรวม 0.68313 ทำการทดลองยืนยันผลโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าผลตอบทั้งสองก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยของผลตอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงว่าค่าผลตอบหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์มีความแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์การผลิต ณ ปัจจุบัน และมีค่าอยู่ในช่วงข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

ABSTRACT

The objective of this research is to find the appropriate parameter setting for wobble riveting with design of experiment techniques. By designing experiments of 2^k full factorial model to study factors that affect the production process including air pressure, rivet pressure, time, and height. The response values are Wobble High and DCR. In this study, 16 experiments were conducted and 2 experiments were repeated. The results found that factors affecting the wobble high include air pressure, time, height and interaction effects between air pressure and time, time and height and factors affecting electrical resistance (DCR) are the rivet pressure, time, and height at the significance level of 0.05. With the appropriate parameters to the production process are as follows: 2.5 bar air pressure, rivet pressure at level of 6, time at the level of 6, height of 10.482 cm, and the total desirability function of 0.68313. The

experiment was conducted to confirm the results by using parameter values derived from the analysis. The experiment was repeated 3 times and the analysis of variance (ANOVA) of the response value of both before and after improving parameter values. The results of average variance analysis of response are significantly different. This shows that the response after improving parameter values is different from the parameter values of current production and is within the range of product specification.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีบทบาทและมีความสำคัญอย่างยิ่งกับเศรษฐกิจของประเทศ เพราะถือว่าเป็นสินค้าที่ส่งออกเป็นอันดับต้นๆ โดยมีการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาหลายปี จากการที่ประเทศไทยเป็นฐาน

การผลิตอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของบริษัทข้ามชาติจำนวนมาก และมีการพัฒนาอุตสาหกรรมนี้มาช้านาน ทำให้ประเทศไทยเป็นหนึ่งในฐานการผลิตสินค้าเครื่องใช้ไฟฟ้าและชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญของโลก โดยมีมูลค่าส่งออกเป็นลำดับที่ 13 ของโลก และเป็นอันดับ 3 ของอาเซียน (รองจากสิงคโปร์และมาเลเซีย) [1] ส่งผลให้เกิดการแข่งขันของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ค่อนข้างสูง ทำให้ผู้ผลิตในไทยจะต้องปรับตัว โดยจะต้องเพิ่มประสิทธิภาพและยกระดับเทคโนโลยีเพื่อลดต้นทุนการผลิต รวมทั้งเพิ่มการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างจากสินค้าในตลาด และมีความหลากหลายเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันด้านราคากับสินค้าในตลาดล่างและยังเป็นการสร้างโอกาสใหม่ทางการตลาด

บริษัท ทรินิตี้ศึกษา เป็นหนึ่งในผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีสำนักงานใหญ่ตั้งอยู่ที่ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ได้มาตั้งฐานการผลิตในประเทศไทยที่นิคมอุตสาหกรรมลำพูน หนึ่งในผลิตภัณฑ์สำคัญ ได้แก่ ตัวกรองสัญญาณ Noise Filters หรือตัวกรองกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการป้องกันสัญญาณรบกวนระบบไฟฟ้า ลดปัญหาสัญญาณรบกวนไฟฟ้าจากคลื่น สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI) และ สัญญาณรบกวนความถี่วิทยุต่างๆที่ติดมากับกระแสไฟฟ้า (Radio Frequency Identification: RFID) ซึ่งตัวกรองสัญญาณ

จะอยู่ในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีความต้องการประมาณ 25,000 ตัวต่อเดือน โดยมีกลุ่มลูกค้าหลักของบริษัท คือ ส่งออกให้กับประเทศจีนและยุโรปเนื่องจากการความต้องการในตัวผลิตภัณฑ์และแข่งขันภายในอุตสาหกรรมนี้ค่อนข้างสูง บริษัทจึงให้ความสำคัญต่อการพัฒนาและการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้

จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้นพบปัญหาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการยัดหัวหมุดด้วยแรงดัน คือ กระบวนการยัดหัวหมุดด้วยการใช้แรงดัน ทำให้เกิดการเชื่อมต่อที่บริเวณขาพินของปลั๊ก (PIN) และชิ้นส่วนเชื่อมต่อ (Connection Part) หากชิ้นส่วนทั้ง 2 ชิ้นดังกล่าว เชื่อมต่อกันไม่สนิทหรือไม่แน่นพอ จะส่งผลต่อการทำงานของตัวกรองสัญญาณ ซึ่งบริเวณที่มีการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงบริเวณที่มีการเชื่อมต่อระหว่างขาพินของปลั๊กกับชิ้นส่วนเชื่อมต่อ

ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องยัดหัวหมุดแบบใช้แรงดัน (Wobble Rivet) ในการทำการ โดยมีการปรับค่าต่างๆที่ใช้ในการผลิต ดังนี้ ค่าความดันอากาศ ความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อ เวลาและความสูง ในการปรับค่าต่างๆของเครื่องจักรเหล่านี้มีค่าไม่แน่นอน และในกระบวนการผลิต

ไม่สามารถทราบได้ว่าค่าที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตหรือไม่

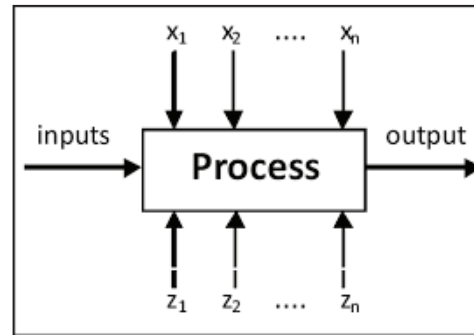
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตตัวกรองสัญญาณ จึงได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้ในเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial) เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถทำการศึกษปัจจัยหลายๆปัจจัย สามารถหาค่าผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย และสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลองได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

เทคนิคการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับวิศวกรเพื่อใช้สำหรับออกแบบพัฒนา และปรับปรุงกระบวนการผลิตกันขึ้น เนื่องจาก “การทดลอง” เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการแก้ปัญหา และมีจุดประสงค์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลและ เรียนรู้เกี่ยวกับการทำงานของระบบที่ศึกษา โดยอาจทำการทดลองแบบเป็นลำดับขั้น คือ แบ่งการทดลองเป็นชุดย่อยหลายชุดและทำการทดลองต่อเนื่องกัน การทดลองแต่ละครั้งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเพื่อใช้สำหรับปรับปรุงวิธีการทำการทดลองครั้งต่อไป

โดยทั่วไปการทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการทำงานของกระบวนการโดยเลือกใช้ตารางออกแบบการทดลองที่เหมาะสมเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำเข้าว่ามีผลต่อผลตอบในกระบวนการอย่างไรบ้าง โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหรือระบบที่ศึกษาแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหรือระบบที่ศึกษา

จากรูปที่ 2 แสดงถึงรูปแบบทั่วไปของกระบวนการหรือระบบที่ทำการศึกษา โดยตัวแปร X แสดงถึงตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factor) ในขณะที่ตัวแปร Z คือ ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factor)

2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k (Full Factorial Designs at Two Levels)

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยทุกปัจจัยพร้อมกันทำให้สามารถประมาณค่าผลกระทบหลัก (Main Effects) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ถึง k ปัจจัย (Interaction Effects) ครบทุกเทอมได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นคัดกรองเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญเพื่อใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลอง (Empirical Model) เพื่อใช้สำหรับทำนายผลการทดลองและกำหนดสภาวะที่เหมาะสม ในการปฏิบัติงาน (Optimum Condition) โดยแบบจำลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือแบบจำลองเชิงเส้นผสมเทอมผลกระทบร่วม (Linear Model with Interaction Terms) เนื่องจากจำนวนระดับของปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาทดลองมีเพียง 2 ระดับจึงสามารถประมาณเฉพาะความสัมพันธ์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วย ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม แม้แบบจำลองที่ประกอบด้วยผลกระทบร่วมจะมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงแบบเส้นโค้ง โดยเฉพาะถ้าประกอบด้วยผลกระทบร่วมอันดับสูงพื้นผิวผลตอบจะมีความเป็นเส้นโค้งมากขึ้น แต่โดยปกติในทาง

ปฏิบัติผลกระทบระหว่าง 3 ปีจึ้นขึ้นไปมกมีผลต่อกระบวนการที่ศึกษาน้อยมก [2]

วิธีการออกแบบการทดลองเป็นวิธีการที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาและหาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำการทดลองที่สนใจ ในส่วนของงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการเข้าหัวหมุดด้วยแรงสั่น จึงได้นำวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนมาใช้ในการศึกษางานวิจัย ซึ่งมีงานวิจัยหลกหลายที่ได้นำเทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มจำนวนมาใช้ในการศึกษางานวิจัย เช่น ในงานวิจัยของ J.Altmeyer et al. [3] ได้ทำการหาผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลในกระบวนการเข้าข้อต่อโลหะ ด้วยแรงเสียดทาน โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน มาใช้ในการศึกษาปัจจัยจำนวน 4 ปัจจัย การทดลองที่ระดับปัจจัย 2 ระดับ มีค่าผลตอบคือ ประสิทธิภาพในการทนต่อแรงดึงของข้อต่อ ในงานวิจัยนี้ทำให้สามารถหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทดลองดังกล่าวได้แก่ปัจจัยดังต่อไปนี้ ความเร็วรอบ เวลาที่เกิดการเสียดทาน ความดันที่ใช้ในการเชื่อม ในส่วนของงานวิจัยของ Yung-Kuang Yang et al. [4] ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องซีเอ็นซี (CNC) ในกระบวนการกัดแกรไฟต์โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง โดยทำการศึกษาและทดลองปัจจัยจำนวน 3 ปัจจัย ที่ระดับปัจจัย 2 ระดับ สามารถหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการและได้สมการความสัมพันธ์อันดับหนึ่ง ในส่วนของงานวิจัยของ Pedro Lopez-Cruz et al. [5] ได้ทำการนำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนมาใช้ในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมการบิน ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวน 5 ปัจจัย ทำการทดลองที่ระดับปัจจัย 2 ระดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนได้ และอีกตัวอย่างงานวิจัยของ ทศพล เกียรติเจริญผล [6] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อน

แลกเปลี่ยนบนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาจำนวน 3 ปัจจัย ทำการทดลองที่ระดับปัจจัย 2 ระดับ จากการทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ทำให้สามารถทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อน

จากการรวบรวมงานวิจัยข้างต้นเป็นเพียงการยกตัวอย่างงานวิจัยที่นำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนมาใช้ในงานวิจัย และจากการยกตัวอย่างงานวิจัยในข้างต้นจะพบว่าในการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนจะถูกนำมาใช้ในการศึกษางานวิจัยที่มีจำนวนปัจจัยไม่เกิน 6 ปัจจัย เนื่องจากจำนวนเงื่อนไขการทดลองจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มขึ้น

2.3 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis: MSA)

การวิเคราะห์ระบบการวัดเป็นสิ่งสำคัญต่อผลของค่าที่วัดได้จากการควบคุมกระบวนการผลิต โดยที่ MSA เหมาะสำหรับระบบการวัดที่สามารถวัดซ้ำได้ เนื่องจากระบบการวัดทุกแบบต้องมีความแปรผันเกิดขึ้นภายใต้สภาวะการควบคุมทางสถิติ ความผันแปรของค่าสังเกตที่เกิดขึ้นจากความผันแปรของตัวผลิตภัณฑ์เอง และเกิดจากความผันแปรของเครื่องมือหรือระบบการวัด ซึ่งแสดงได้ดังสมการ 1

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{product}}^2 + \sigma_{\text{Gage}}^2 \quad (1)$$

กำหนดให้ σ_{Total}^2 คือ ความแปรปรวนของค่าสังเกต $\sigma_{\text{product}}^2$ คือ ความแปรปรวนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ σ_{Gage}^2 คือ ความแปรปรวนที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด

ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนของระบบการวัด สามารถประมาณได้ด้วยสมการ 2

$$\sigma_{\text{Gage}} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (2)$$

ระบบการวัดประกอบด้วย ผู้วัดหรือผู้ทดสอบ (ต้องมีทักษะในการวัดโดยต้องผ่านการฝึกอบรม) เครื่องมือวัด

(ต้องได้รับการสอบเทียบมาตรฐานการวัด และมีความละเอียดเพียงพอ) วิธีการวัด (ต้องมีมาตรฐานมารองรับ เช่น มาตรฐานระดับชาติ หรือมาตรฐานนานาชาติ เป็นต้น) สิ่งแวดล้อมที่ต้องควบคุม (ต้องมีการควบคุม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็ว เป็นต้น) และชิ้นงานที่ต้องการวัด (ต้องควบคุมตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานทดสอบ การเก็บชิ้นงาน และการรวบรวมชิ้นงาน)

ความแปรปรวนจะมากหรือน้อย ต้องตีความเทียบกับขีดจำกัดควบคุมที่ถูกค่ากำหนด กล่าวคือ ความแปรปรวนจะมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนที่ถูกค่ากำหนด

การวิเคราะห์ว่าเครื่องมือวัดมีสมรรถภาพเพียงพอหรือไม่ สำหรับการวัดผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เพื่อให้ผู้วิเคราะห์สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตได้ถูกต้อง ต้องวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วน P/T (Precision-to-Tolerance Ratio) ดังแสดงในสมการ 3

$$\frac{P}{T} = \frac{6\sigma_{\text{Gage}}}{\text{USL-LSL}} \quad (3)$$

ถ้าอัตราส่วน P/T มีค่าไม่เกิน 0.3 หรือคิดเป็นร้อยละ ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 30 จึงจะวิเคราะห์ได้ว่าเครื่องมือวัดมีสมรรถภาพเพียงพอ กล่าวคือ เครื่องมือวัดได้ผ่านการสอบเทียบ

การวิเคราะห์ระบบการวัดในงานวิจัยถือเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการทดสอบระบบของการวัดเพื่อลดความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้นในการวัดค่าผลตอบ ยกตัวอย่างงานวิจัยของ ประภัสสรธรรม สวัสดิ์วงศ์ และไพโรจน์ ลาวิจิตรกุล [7] ได้ทำการวิเคราะห์ระบบการวัดในการผลิตกล่องและเลนส์ซูมตัวอย่าง เพื่อลดความแปรปรวนในระบบการวัด โดยนำเทคนิค GR&R มาทำการประเมินผลในระบบของการวัด ผลที่ได้จากการวิจัยนี้คือ ระบบการวัดในการผลิตมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น

2.4 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)

วิธีการฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) นี้เป็นหนึ่งในวิธีการที่นิยมมากที่สุดในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ของผลตอบหลายผลตอบ

(Multi-response surface) สมมติให้มีผลลัพธ์ p ตัว ในวิธีนี้สำหรับทุกฟังก์ชันแปลง (Transfer Function) $y_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k)$ โดยที่ $i=1, \dots, p$ ฟังก์ชันความพึงพอใจ $d_i = d_i(y_i) = d_i(y_i(x_i))$ จะกำหนดค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ในกับค่าที่เป็นไปได้ของ y_i โดยที่ค่า $d_i(y_i) = 0$ สำหรับ “ค่าที่ไม่ต้องการมากที่สุด” ของ y_i และ ค่า $d_i(y_i) = 1$ สำหรับ “ค่าที่ต้องการมากที่สุด” ของ y_i เมื่อ $d_i(y_i)$ เป็นฟังก์ชันความพึงพอใจของผลลัพธ์ที่ต้องการ y_i ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตจากความพึงพอใจ D ทุกตัว จะถูกใช้แทนความพึงพอใจรวม สำหรับปัญหาหลายผลตอบ (Multi-response problem) [8]

ในกรณีที่ค่าผลตอบในการทำการศึกษาวิจัยที่ต้องการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหาหลายผลตอบในงานวิจัยหลายงานวิจัย นิยมนำฟังก์ชันความพึงพอใจมาใช้ ดังตัวอย่างในงานวิจัยของ กฤษณา บุญทางศิยาและนิวิธ เจริญใจ [9] ได้นำฟังก์ชันความพึงพอใจมาทำการรวบรวมค่าผลตอบจากการทดลองที่มีหลายผลตอบ เพื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าพารามิเตอร์ของเครื่องพันธดลวด เช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Maria Poroch-Seritan et al. [10] ที่ทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการชุบโลหะที่เกิดด้วยไฟฟ้าซึ่งกระบวนการดังกล่าวเป็นปัญหาหลายผลตอบ จึงได้นำฟังก์ชันความพึงพอใจมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการดังกล่าว

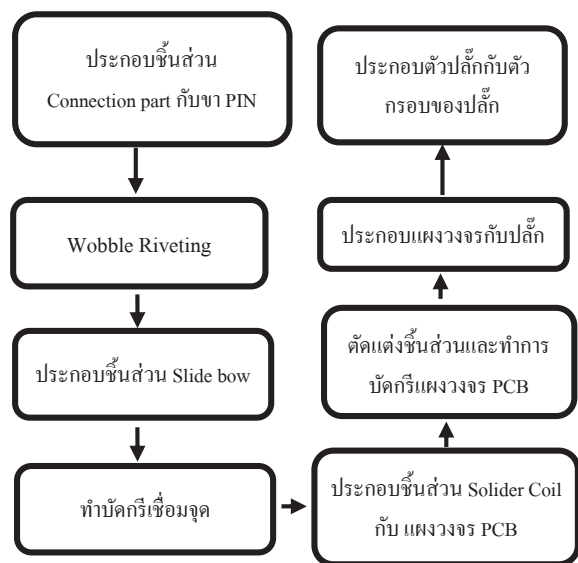
จากงานวิจัยที่ได้ยกตัวอย่างมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันความพึงพอใจถูกนำมาใช้ในงานวิจัยกรณีที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมของผลตอบหลายผลตอบ

3. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตตัวกรองสัญญาณโดยวิธีการออกแบบการทดลอง มีรายละเอียดการดำเนินการ ดังนี้

3.1 ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตตัวกรองสัญญาณ

โดยเริ่มจากการทำการศึกษากระบวนการผลิตตัวกรองสัญญาณ ที่กระบวนการย้าหัวหมุดด้วยแรงสั่น เมื่อทำการศึกษากระบวนการผลิต ขั้นตอนการผลิตตัวกรองสัญญาณแสดงรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตตัวกรองสัญญาณ

จากการเข้าไปศึกษากระบวนการผลิตตัวกรองสัญญาณ พบว่า เกิดปัญหาที่ขั้นตอนการย้าหัวหมุดด้วยแรงสั่น โดยในการตั้งค่าเครื่องจักรแต่ละครั้งมีค่าไม่แน่นอน มีการปรับเปลี่ยนค่าเครื่องจักรทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนอุปกรณ์ของเครื่องจักร

3.2 ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต

เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการย้าหัวหมุดด้วยแรงสั่น ทำให้สามารถทราบปัจจัยที่สามารถปรับค่าได้ ซึ่งปัจจัยที่นำมาทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความดันอากาศ คือ ค่าความดันจากท่อความดันหลักของโรงงาน ค่าความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อ คือ ค่าความดันที่ใช้ในการย้าหัวหมุดเวลา คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการย้าหัวหมุดเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อ ความสูง คือ ระยะความสูงจากหัวพินของเครื่องจักรถึงบริเวณที่เชื่อมต่อของชิ้นส่วน ในส่วนของ

การกำหนดค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองนั้นจะทำการกำหนดค่าให้ครอบคลุมค่าปัจจัยที่ใช้ในการผลิต ณ ปัจจุบัน

ค่าผลตอบในการทดลองมี 2 ตัว คือ ค่าความสูงของหัวหมุดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ (Wobble High) คือ ระยะความสูงของบริเวณที่มีการเชื่อมต่อของชิ้นส่วน และ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (DCR) คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ ซึ่งค่าผลตอบเหล่านี้เป็นค่าที่ส่งผลต่อคุณภาพของ โดยต้องมีค่าอยู่ในช่วงที่โรงงานสามารถยอมรับได้ ซึ่งคือค่ากำหนดของผลิตภัณฑ์

3.3 การเลือกระดับของปัจจัย และขอบเขต

ในการเลือกระดับของปัจจัยและขอบเขต อ้างอิงมาจากการทดลองเบื้องต้น โดยในการกำหนดค่าระดับปัจจัยในการทดลองที่ระดับสูงและระดับต่ำ จะทำการกำหนดช่วงให้ครอบคลุมกับค่าที่ใช้ในการผลิต ณ ปัจจุบันทำให้สามารถกำหนดขอบเขตของค่าระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		หน่วย	สัญลักษณ์
	ต่ำ (-1)	สูง (+1)		
1.Air Pressure	1.5	2.5	bar	A
2.Rivet Pressure	1	6	level	B
3.Rivet Time	2	6	level	C
4.Height	10.482	10.518	cm.	D

3.4 ทำการสอบเทียบมาตรฐานการวัด

เพื่อลดความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้นในการวัดค่าผลการทดลอง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ GR&R โดยทำการสุ่มตัวอย่างชิ้นงานของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษามา 10 ชิ้น ทำการวัดค่าผลตอบ ได้แก่ ค่าความสูงของหัวหมุดและค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ซ้ำ 3 ครั้ง ผู้ทำการวัด 2 คน

3.5 ออกแบบการทดลอง

ออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมมินิแท็บ 16.0 (Minitab 16.0) โดยวิธีแฟกทอเรียลเต็มจำนวน โดยมีจำนวนปัจจัย 4 ปัจจัย ได้แก่ A B C และ D ทำการทดลองที่ค่าระดับของปัจจัย 2 ระดับ (สูงและต่ำ) รวมเป็น 16 การทดลอง ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยที่ค่าผลการทดลองมี 2 ตัว คือ ค่าความสูงของหัวหมุดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ และค่าความต้านทานของบริเวณที่ทำการเชื่อมต่อ ตารางที่ออกแบบได้แสดงดังตารางที่ 2

3.6 ทำการทดลองตามลำดับที่ได้ทำการออกแบบ

ทำการทดลองตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยลำดับที่ใช้ในการทดลองจะใช้หลักการสุ่มเข้ามาใช้ สุ่มลำดับการทดลอง และทำการบันทึกผล

3.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแท็บ 16.0 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ ดังนี้

โดยจะทำการวิเคราะห์ปัจจัยในการทดลอง เพื่อตรวจสอบปัจจัยตัวใดที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการทดลอง เมื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดลองแล้วจะทำการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ค่าส่วนโค้ง ทำการสร้างแบบจำลองลดจำนวน โดยรวมเฉพาะเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ เพื่อใช้เป็นสมการในการทำนายผลของค่าผลตอบแทน และทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่าผลตอบแทนหลายผลตอบแทนโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ

3.8 ทำการทดลองยืนยันผล

ทำการทดลองยืนยันผลโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ มาทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อทำการยืนยันผล และจะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน มาวิเคราะห์ผลการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัดค่าผลตอบแทน

การวิเคราะห์ระบบการวัดค่าผลตอบแทนด้วยการวิเคราะห์ GR&R แสดงดังรูปที่ 4 และ 5

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0001987	8.57
Repeatability	0.0001987	8.57
Reproducibility operators	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0021203	91.43
Total Variation	0.0023189	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0140952	0.084571	29.27
Repeatability	0.0140952	0.084571	29.27
Reproducibility operators	0.0000000	0.000000	0.00
Part-To-Part	0.0460462	0.276277	95.62
Total Variation	0.0481552	0.288931	100.00

Number of Distinct Categories = 4

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ GR&R ของระบบการวัดค่าผล

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000170	6.16
Repeatability	0.0000170	6.16
Reproducibility operators	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0002595	93.84
Total Variation	0.0002766	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0041281	0.0247683	24.82
Repeatability	0.0041281	0.0247683	24.82
Reproducibility operators	0.0000000	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0161101	0.0966608	96.87
Total Variation	0.0166306	0.0997837	100.00

Number of Distinct Categories = 5

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ GR&R ของระบบการวัดค่าผล

จากการวิเคราะห์ระบบการวัดด้วยการวิเคราะห์ GR&R ที่แสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 จะพบว่าค่า GR&R ของระบบการวัดค่าความสูงของหัวหมุดและค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 29.27 และร้อยละ 24.82 ตามลำดับ เนื่องจากค่าดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วน P/T คือ ค่าความผันแปรของการวัดทั้งระบบ หรือค่าความเผื่อของความแปรปรวนที่สามารถยอมรับได้ของระบบการวัด แสดงว่าระบบการวัดค่าความสูงของหัวหมุดและค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามีสมรรถภาพเพียงพอ กล่าวคือ เครื่องมือวัดมีความสามารถในการวัดซ้ำ

4.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการบันทึกผลการทดลอง

No.	A	B	C	D	รอบที่ 1		รอบที่ 2	
					High	DCR	High	DCR
1	-1	-1	-1	-1	0.87	0.14	1.15	0.19
2	1	-1	-1	-1	0.65	0.14	0.63	0.14
3	-1	1	-1	-1	0.85	0.22	1.16	0.15
4	1	1	-1	-1	0.64	0.14	0.71	0.14
5	-1	-1	1	-1	0.59	0.15	0.59	0.15
6	1	-1	1	-1	0.57	0.13	0.58	0.14
7	-1	1	1	-1	0.57	0.18	0.5	0.15
8	1	1	1	-1	0.55	0.14	0.51	0.14
9	-1	-1	-1	1	0.93	6.14	1.33	70.12
10	1	-1	-1	1	0.61	12.68	0.46	14.58
11	-1	1	-1	1	0.76	20.64	1.08	3.43
12	1	1	-1	1	0.46	46.2	0.61	26.77
13	-1	-1	1	1	0.45	0.24	0.44	0.68
14	1	-1	1	1	0.35	10.05	0.48	0.22
15	-1	1	1	1	0.43	92.17	0.33	3.09
16	1	1	1	1	0.45	8.43	0.42	26.62

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลทดลองดังตารางที่ 2 จะทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าผลตอบทั้ง 2 ค่า คือ 1. ค่าความสูงของหัวหมุด (mm.) 2.ค่าความต้านทานไฟฟ้า (mΩ) ดังนี้

4.3.1 ค่าความสูงของหัวหมุด (Wobble High)

ผลการวิเคราะห์ค่าความสูงของหัวหมุด โดยทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6

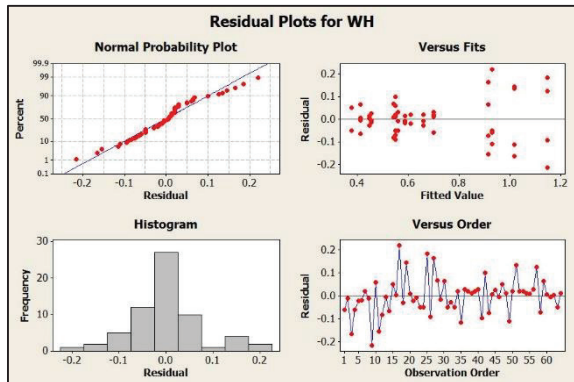
Factorial Fit: WH versus A, B, C, D					
Estimated Effects and Coefficients for WH (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.6539	0.01124	58.19	0.000
A	-0.1922	-0.0961	0.01124	-8.55	0.000
B	-0.0303	-0.0152	0.01124	-1.35	0.184
C	-0.3066	-0.1533	0.01124	-13.64	0.000
D	-0.0953	-0.0477	0.01124	-4.24	0.000
A*B	0.0397	0.0198	0.01124	1.77	0.084
A*C	0.1959	0.0980	0.01124	8.72	0.000
A*D	-0.0428	-0.0214	0.01124	-1.90	0.063
B*C	-0.0022	-0.0011	0.01124	-0.10	0.923
B*D	-0.0397	-0.0198	0.01124	-1.77	0.084
C*D	-0.0572	-0.0286	0.01124	-2.54	0.014
A*B*C	-0.0047	-0.0023	0.01124	-0.21	0.836
A*B*D	0.0428	0.0214	0.01124	1.90	0.063
A*C*D	0.0528	0.0264	0.01124	2.35	0.023
B*C*D	0.0509	0.0255	0.01124	2.27	0.028
A*B*C*D	-0.0241	-0.0120	0.01124	-1.07	0.290

S = 0.0898987 PRESS = 0.689644
R-Sq = 88.96% R-Sq(pred) = 80.38% R-Sq(adj) = 85.51%

รูปที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความสูงของหัวหมุด

ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ จะทำการวิเคราะห์จากค่า P-Value ถ้าค่า P-Value ของค่าผลกระทบของปัจจัยตัวใดที่มีค่าน้อยกว่าค่ากำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha=0.05$) ปัจจัยตัวนั้นจะมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 6 พบว่าค่า P-Value ของปัจจัย A,C,D ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย AC และ CD และผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ACB และ BCD มีค่าน้อยกว่า 0.05 กล่าวคือปัจจัยดังกล่าวส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดลอง

เมื่อทำการตรวจสอบปัจจัยที่มีนัยสำคัญแล้วจะทำการวิเคราะห์ค่าส่วนโค้ง เพื่อตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง โดยจะทำการวิเคราะห์จากกราฟดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงส่วนตกค้างค่าผลตอบของค่าความสูงของหัวหมุด

กราฟแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของส่วนค้างของค่าความสูงของหัวหมุดแสดงดังรูปที่ 7 จากกราฟแบบปกติของผลตอบค่าความสูงของหัวหมุด ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้บริเวณกับเส้นปกติ ซึ่งแสดงถึงส่วนค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

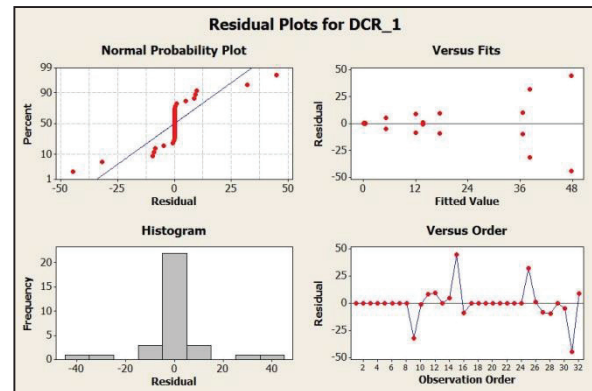
ในส่วนของกราฟส่วนค้างกับลำดับการทดลอง (Versus Order) เป็นกราฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ความอิสระของข้อมูล ว่าลำดับการทดลองไม่ส่งผลต่อผลของการทดลอง จากกราฟส่วนค้างกับลำดับการทดลองของค่าความสูงของหัวหมุดดังแสดงในรูปที่ 7 นั้น จะพบว่าไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ ข้อมูลมีการกระจายตัว แสดงถึงลำดับการทดลองในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อผลการทดลอง

และจากกราฟส่วนค้างกับค่าทำนาย (Fitted Values) เป็นกราฟที่ใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลที่ไม่ขึ้นกับค่าทำนายกราฟส่วนค้างกับค่าทำนายของค่าความสูงของหัวหมุดที่แสดงดังรูปที่ 7 ข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างอิสระ ไม่พบรูปแบบหรือแนวโน้มในการกระจายตัวของข้อมูล แสดงถึงข้อมูลไม่ขึ้นกับค่าทำนาย

จากการวิเคราะห์กราฟส่วนค้างของค่าความสูงของหัวหมุดแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลผลการทดลองของค่าความสูงของหัวหมุดไม่มีความผิดปกติ

4.2.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ส่วนค้างค่าผลตอบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า พบความการกระจายตัวของข้อมูลมีความผิดปกติ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟแสดงส่วนตกค้างค่าผลตอบที่ไม่มีการแปลงค่าผลตอบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

ซึ่งจากกราฟแสดงส่วนตกค้างของค่าผลตอบจริงของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า จะพบว่าที่กราฟแบบปกติของค่าส่วนค้าง ข้อมูลอยู่ห่างจากเส้นปกติ ในส่วนกราฟส่วนค้างกับค่าทำนาย จะพบว่าในช่วงแรกข้อมูลจะมีการเกาะกลุ่มกัน ไม่มีการกระจายตัวและในช่วงหลังของข้อมูลข้อมูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากช่วงแรก แสดงถึงข้อมูลไม่มีความเป็นอิสระ และกราฟส่วนค้างกับลำดับการทดลอง จะพบได้ข้อมูลมีการเกาะกลุ่มกันและข้อมูลมีแนวโน้มที่เป็นวัฏจักร กล่าวคือ ข้อมูลจะกลับมาเป็นซ้ำๆ แบบเดิม แสดงว่าข้อมูลไม่มีความเป็นอิสระอาจขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง

กราฟแสดงส่วนค้างแบบต่างๆ ในรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของค่าผลตอบจริงมีค่าไม่คงที่และจากการศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ ได้นำวิธีการแปลงข้อมูลค่าผลตอบมาใช้ในกรณีที่ผลตอบของการทดลองมีความผิดปกติ เพื่อช่วยให้ความแปรปรวนคงที่ จะเห็นได้จากงานวิจัยของ วรกิจ วัฒนวิทย์กรรมและสรสฐดิษฐ์ ชิวสุทสิศิลป์ [11] เนื่องจากค่าผลตอบเป็นข้อมูลที่เป็นจำนวนนับ (0,1,2...) จากการตรวจสอบจากกราฟส่วนค้าง

แบบต่างๆพบว่าข้อมูลมีแนวโน้มไม่ปกติ ทำให้ต้องมีการแปลงข้อมูลค่าผลตอบก่อนนำมาทำการวิเคราะห์ผล และงานวิจัยของ Laosiritaworn W. and Aoonchan P. [12] เป็นอีกงานวิจัยที่มีค่าผลตอบในงานวิจัยนี้มีความแปรปรวนไม่คงที่ จึงต้องทำการแปลงข้อมูลค่าผลตอบก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ผล จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการนำวิธีการแปลงผลข้อมูลค่าผลตอบ ที่ช่วยให้ความแปรปรวนของข้อมูลและการวิเคราะห์ผลการทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น

ดังนั้นจากข้อมูลค่าผลตอบของความต้านทานทางไฟฟ้า จึงต้องทำการแปลงค่าผลตอบ เนื่องจากความแปรปรวนของค่าผลตอบจริงมีค่าไม่คงที่ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์ผลข้อมูลค่าผลตอบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า จึงได้ทำการแปลงค่าผลตอบ ก่อนนำข้อมูลผลการทดลองไปวิเคราะห์ เพื่อให้ความแปรปรวนของค่าผลตอบมีค่าคงที่ ทำการแปลงค่าผลตอบดังสมการ 4

$$y_t = \frac{1}{\sqrt{y}} \quad (4)$$

จากทำการแปลงค่าผลตอบดังสมการ 4 แล้วจึงนำข้อมูลที่เป็นค่าแปลง ไปทำการวิเคราะห์ผล ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า เพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 9

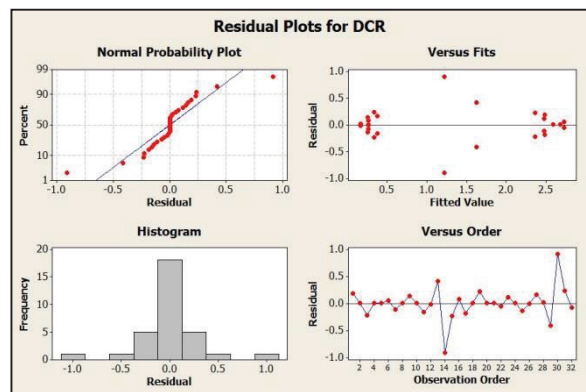
Factorial Fit: DCR versus A, B, C, D						
Estimated Effects and Coefficients for DCR (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		1.573	0.06859	22.94	0.000	
A	0.022	0.011	0.06859	0.16	0.873	
B	-0.315	-0.157	0.06859	-2.29	0.036	
C	0.329	0.165	0.06859	2.40	0.029	
D	-2.012	-1.006	0.06859	-14.67	0.000	
A*B	0.038	0.019	0.06859	0.28	0.785	
A*C	-0.054	-0.027	0.06859	-0.39	0.699	
A*D	-0.190	-0.095	0.06859	-1.38	0.185	
B*C	-0.287	-0.144	0.06859	-2.09	0.052	
B*D	-0.242	-0.121	0.06859	-1.77	0.096	
C*D	0.264	0.132	0.06859	1.92	0.072	
A*B*C	0.061	0.031	0.06859	0.45	0.660	
A*B*D	-0.009	-0.005	0.06859	-0.07	0.948	
A*C*D	-0.014	-0.007	0.06859	-0.10	0.921	
B*C*D	-0.278	-0.139	0.06859	-2.03	0.060	
A*B*C*D	0.077	0.039	0.06859	0.56	0.580	

S = 0.387988 PRESS = 9.63420
R-Sq = 93.85% R-Sq(pred) = 75.40% R-Sq(adj) = 88.08%

รูปที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า กรณีแปลงค่าผลตอบ

จากรูปที่ 9 ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการทดลอง จะทำการวิเคราะห์จากค่า P-Value ของปัจจัยแต่ละตัว พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความต้านทานทางไฟฟ้า คือ B, C และ D เนื่องจากค่า P-Value ของปัจจัยดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ($\alpha=0.05$)

กราฟส่วนข้างของค่าความต้านทานไฟฟ้าหลังจากทำการแปลงค่าผลตอบ โดยจะทำการวิเคราะห์จากกราฟดังต่อไปนี้



รูปที่ 10 กราฟแสดงส่วนตกค้างค่าผลตอบที่ไม่มีการแปลงค่าผลตอบของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์กราฟส่วนข้างต่างๆของค่าความต้านทานทางไฟฟ้ากรณีที่แปลงค่าผลตอบที่แสดงดังรูปที่ 10 จะพบว่าข้อมูลไม่มีความผิดปกติ ข้อมูลมีความอิสระ และมีความแปรปรวนคงที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีแปลงค่าผลตอบ

4.4 สมการทำนายผล

4.4.1 สมการทำนายผลค่าความสูงของหัวหมุด

แสดงดังสมการ 5

$$y_1 = 0.6539 - 0.0961A - 0.1533C - 0.477D + 0.098AC - 0.0286CD + 0.0264ACD + 0.0255BCD \quad (5)$$

4.4.2 สมการทำนายผลค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

สมการทำนายผลค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจากการแปลงค่าผลตอบ แสดงดังสมการ 6

$$y_2 = 1.573 - 0.157B + 0.165C - 1.006D \quad (6)$$

สมการทำนายผลค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจาก

ค่าจริง แสดงดังสมการ 7

$$y_3 = 0.404 - 40.57B + 36.73C - 0.988D \quad (7)$$

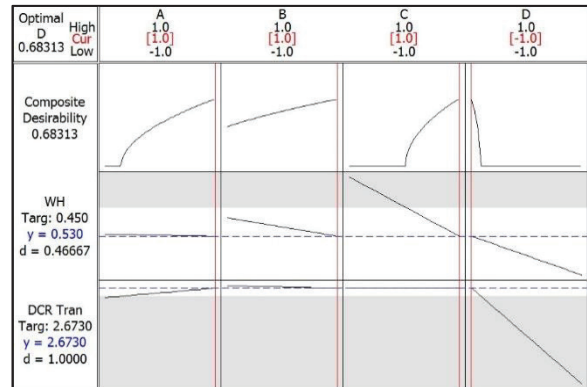
4.5 การหาค่าที่เหมาะสม

ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เนื่องจากค่าผลตอบในการทดลองมี 2 ค่าผลตอบ จึงนำหลักการของฟังก์ชันความพึงพอใจมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป 16.0 การตั้งค่าแสดงดังรูปที่ 11

Response	Goal	Lower	Target	Upper
C9 WH	Target	0.25	0.45	0.6
C11 DCR Transfer	Target	2.5	2.673	5

รูปที่ 11 การกำหนดค่าเป้าหมาย ขอบเขตบนและล่างของค่าผลตอบทั้งสอง

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงการกำหนดค่าเป้าหมาย ขอบเขตบนและล่างของค่าผลตอบทั้งสอง โดยจะต้องทำการกำหนดค่าเป้าหมายของค่าผลตอบจากข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าขอบเขตบนและล่างนั้นเป็นช่วงของค่าผลตอบที่สามารถยอมรับได้ และค่าเป้าหมายที่กำหนด คือค่าผลตอบที่ต้องการของผลิตภัณฑ์ หลังจากทำการกำหนดค่าแล้ว การวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี Response Optimizer ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ดังนี้ ปัจจัย A เท่ากับ 2.5 บาร์ ปัจจัย B เท่ากับ ระดับ 6 ปัจจัย C ระดับ 6 และปัจจัย D เท่ากับ 10.482 เซนติเมตร จากค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้นั้นมีค่าความพึงพอใจรวม เท่ากับ 0.68313 ซึ่งค่าดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละค่า

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้ดังแสดงดังรูปที่ 12 นั้น ค่าผลตอบของค่าความสูงของหัวหมุดที่ดีที่สุด คือ 0.53 มม. และค่าความต้านทานทางไฟฟ้า คือ 2.673 ซึ่งแปลงเป็นค่าผลตอบจริงได้เท่ากับ 0.14 มิลลิโอมห์ ซึ่งยังอยู่ในช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างของข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

4.6 ผลการทดลองยืนยันผล

ทำการทดลองยืนยันผล โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ค่าผลการทดลองก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าผลการทดลองก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์

ครั้งที่	ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง	
	High	DCR	High	DCR
1	0.62	0.18	0.5	0.14
2	0.60	0.16	0.53	0.14
3	0.58	0.18	0.48	0.12

จากผลการทดลองยืนยันผลหลังจากทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับผลการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นหัวหมุดด้วยแรงสั่น ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสูงของหัวหมุด แสดงดังรูปที่ 13 และผลการวิเคราะห์ความ

แปรปรวนของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 14

One-way ANOVA: Wobble High versus Method					
Source	DF	SS	MS	F	P
Method	1	0.014017	0.014017	27.13	0.006
Error	4	0.002067	0.000517		
Total	5	0.016083			

S = 0.02273 R-Sq = 87.15% R-Sq(adj) = 83.94%

รูปที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสูงของหัวหมุด

One-way ANOVA: DCR versus Method_1					
Source	DF	SS	MS	F	P
Method_1	1	0.002400	0.002400	18.00	0.013
Error	4	0.000533	0.000133		
Total	5	0.002933			

S = 0.01155 R-Sq = 81.82% R-Sq(adj) = 77.27%

รูปที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลตอบดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14 พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าผลตอบค่าก่อนและหลังการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.006 และ 0.013 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงให้เห็นถึงหลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการผลิตตัวกรอง

สัญญาณนั้น ทำให้ค่าผลตอบของการทดลองมีค่าแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต ณ ปัจจุบัน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นหัวหมุดด้วยแรงสั่น โดยวิธีการการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้ค่าปัจจัยในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อค่าผลตอบ คือ 1. ค่าความสูงของหัวหมุดบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ ได้แก่ ความดันอากาศ เวลา และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความดันอากาศกับเวลา 2. ค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ได้แก่ ความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อ เวลา และความสูง ค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต คือ ความดันอากาศ 2.5 บาร์ ความดันที่ใช้ในการเชื่อมต่อที่ระดับ 6 เวลาที่ระดับ 6 ความสูง 10.482 เซนติเมตร ค่าความพึงพอใจรวม 0.68313

ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของค่าผลตอบจะพบว่าค่าผลตอบที่ดีที่สุดที่ได้ มีค่าไม่เกินช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่างข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ และจากการทำการทดลองยืนยันผลจากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าผลตอบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าผลตอบก่อนและหลังการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์และค่าผลตอบที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. เอกสารเผยแพร่อุตสาหกรรมนำความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, 2556. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.oie.go.th>
- [2] สันติชัย ชิวสุทริศิลป์. กลยุทธ์การออกแบบการทดลองสำหรับวิศวกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [3] Altmeyer, J., dos Santos, J.F., Amancio-Filho, S.T. Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether ether ketone joints. *Materials and Design*, 2014; 60: 164-176.
- [4] Yang, Y-K., Chuang, M-T., Lin, S-S. Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009; 209(9): 4395-4400.
- [5] Lopez-Cruz, P., Laliberté, J., Lessard, L. Investigation of bolted/bonded composite joint behaviour using design of experiments. *Composite Structures*, 2017; 170: 192-201.

- [6] ทศพล เกียรติเจริญผล. การออกแบบการทดลองแบบแฟคเตอเรียล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแลกเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2552; 26(1): 60-65.
- [7] ประภัศวรรณ สวัสดิ์วงศ์ และไพโรจน์ อดาวิจิตรกุล. การวิเคราะห์ระบบการวัด: กรณีศึกษาโรงงานผลิตกล่องและชุดเลนส์. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 2557; 25(4): 70-80
- [8] อภินันท์ แต่ตระกูล. การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมทิก กรณีศึกษาชิ้นส่วนเครื่องบิน. *ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, 2553.
- [9] กฤษณา บุญทาวงศ์ และ นิวิธ เจริญใจ. การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของเครื่องพ่นขดลวดโดยการออกแบบการทดลอง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2554; 18(2): 55-64.
- [10] Poroach-Seritana, M., Gutt, S., Gutt, G., Cretescub, I., Cojocarub, C., Severina, T. Design of experiments for statistical modeling and multi-response optimization of nickel electroplating process. *Chemical Engineering Research and Design*, 2001; 89: 136-147.
- [11] วรกิจ วัฒนวิทย์กรรม และ สรรฐดิษฐ์ ชิวสุทธิศิลป์. การลดจำนวนรอยตำหนิในการฉีดพลาสติกชิ้นส่วนไดนาโม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2554; 18(2): 65-74.
- [12] Laosiritawon, W., Aoonchan, P. Multi-Panel Lamination Process Optimization with Design of Experiment. *The World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, 2012.



อิทธิพลของการเติมโครเมียมในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์

The Effect of Chromium Addition in Weld Metal by Submerged Arc Welding Process

บันเทิง ศรีकरัน* และ ประภาส เมืองจันทร์บุรี

Buntoeng Srikarun* and Prapas Muangjunburee

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถ. กาญจนวนิชย์ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112

Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, 15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

*E-mail: buntoeng@hotmail.com, Telephone Number: 08 9725 9290

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งที่มีการเติมโครเมียมลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเป็นวิธีใหม่ที่ได้รับการนิยมน เนื่องจากสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการสึกหรอได้ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของโครเมียมโดยการเติมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติกรัด 401 ลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้ามาร์เทนซิติกรัดในการเชื่อม ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียมประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ส่วนบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมประกอบด้วยเฟอร์ไรต์และมาร์เทนไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณโครเมียมลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมยังช่วยลดการเงาบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมและสามารถเพิ่มความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม ทั้งโครงสร้างจุลภาคและค่าความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมยังคงมีความแตกต่างกับบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิติกรัดที่ไม่มีการเติมโครเมียม

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ การเชื่อมพอกแข็ง การเติมโครเมียม การเงาเนื้อเชื่อม

ABSTRACT

Hardfacing with chromium addition has been a new technique and widely employed to extend the service life of machine parts related to wear mechanisms. In this work, the effect of chromium from high chromium martensitic stainless steel type 401 in hardfacing deposit was studied. Low carbon steel electrode and martensitic steel electrode were used to deposit using submerged arc welding process. The results revealed that the microstructure of low carbon steel deposit without chromium addition consists of ferrite and pearlite. The microstructure of weld metal with chromium addition showed ferrite and martensite. It can be seen that the increasing amount of additional chromium showed lower welding dilution and higher hardness values of the weld layer. The microstructure and hardness values of welding layer welded with chromium addition are different to those of welding layer welded with martensitic steel type electrode without addition.

Keywords: Submerged Arc Welding, Hardfacing, Chromium Addition, Welding Dilution

1. บทนำ

ปัจจุบัน การเชื่อมพอกแข็ง (Hardfacing) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรที่เกิดการสึกหรอ เนื่องจากมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากกว่าการเปลี่ยนอะไหล่ทดแทน โดยการเชื่อมพอกแข็งมักนิยมใช้กันเพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการสึกหรอเป็นหลัก เช่น ในเครื่องจักรกลการเกษตร เครื่องจักรสำหรับเตรียมดิน และเครื่องจักรในงานเหมืองแร่ [1,2] ซึ่งในกระบวนการเชื่อมพอกแข็งจำเป็นต้องใช้ลวดเชื่อมและกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะที่จะเชื่อม รวมถึงลักษณะการใช้งานของชิ้นส่วนดังกล่าว ดังนั้นการศึกษาสมบัติบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมให้สามารถใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่หลากหลายได้จึงเป็นสิ่งจำเป็น [3,4]

การเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมสูงเป็นวิธีการที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด ซึ่ง โลหะที่นิยมใช้กันมากในการเชื่อมพอกแข็งชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม คือ เหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของโครเมียมสูงหรือเหล็กกล้าผสมโครเมียมสูง (High Cr Alloy Steel) เนื่องจากโครเมียมเป็นธาตุที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในเหล็กกล้า [5,6] โดยธาตุโครเมียมช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความต้านทานการสึกหรอ ความสามารถในการชุบแข็ง ตลอดจนการทนต่อการกัดกร่อนในเหล็กกล้า และจากเหตุผลดังกล่าวรวมไปถึงมีต้นทุนที่ต่ำ ดังนั้นปัจจุบันเหล็กกล้าชนิดดังกล่าวจึงได้รับความนิยมในการเชื่อมพอกแข็งมากกว่าเหล็กกล้ามาร์เทนซิก [7]

การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (Dilution) ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากหากเปอร์เซ็นต์การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมสูง อันหมายถึงการที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมผสมกับลวดเชื่อมมาก จะทำให้สมบัติบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเปลี่ยนไปจากเดิม โดยการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเป็นผลมาจากสองสาเหตุหลัก คือ ปริมาณความร้อนเข้า (Heat Input) จากการเชื่อมและชนิดของกระบวนการ

เชื่อม (Welding Process) โดยทั่วไปแล้วการเชื่อมพอกแข็งต้องการการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมต่ำ นั้นหมายความว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่ได้ควรมีลักษณะสูงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโลหะวิทยาและทางกล [8-10]

กระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding; SAW) เป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ให้ค่าความร้อนเข้าสู่เชื่อมได้กับชิ้นงานที่มีความหนามาก ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม เนื่องจากไม่มีควันและแสงจากการเชื่อม สามารถเชื่อมด้วยอัตราการเดินบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมได้มากกว่ากระบวนการเชื่อมชนิดอื่น นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมโดยใช้ลวดเชื่อมได้มากกว่าหนึ่งเส้นในเวลาเดียวกัน อันเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยเพิ่มอัตราการเดินบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมและปรับปรุงสมบัติของเนื้อโลหะเชื่อม [11-13]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลทางโครงสร้างมหภาค/จุลภาค การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม และความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมโดยกระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ โดยมีการเติมโครเมียมลงไปในขณะที่เชื่อมในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม และนำมาเปรียบเทียบกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิก

2. ขั้นตอนการศึกษา

2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อม

การศึกษานี้เป็นการเชื่อมพอกแข็งโดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (SS400 Steel) เป็นเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) ซึ่งมีขนาดกว้าง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 203.2 มิลลิเมตร และหนา 9.5 มิลลิเมตร โดยส่วนผสมทางเคมีของเนื้อโลหะเดิมดังแสดงในตารางที่ 1 [14] ทำการเชื่อมพอกแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คใต้ฟลักซ์ชนิดลวดเชื่อมคู่ (Twin-Wires Submerged Arc Welding) โดยใช้ลวดเชื่อมสองชนิดเป็นลวดเดิม คือ ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้า

มาร์เทนซิติคและลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ขณะเชื่อมมีการใช้ฟลักซ์ชนิดไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Flux) สำหรับปกคลุมแนวเชื่อม การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิติค (MS wire) เป็นการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมมาตรฐานทั่วไป ส่วนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Fe wire) เป็นการเชื่อมทั้งไม่มีและมีการเติมโครเมียมในขณะเชื่อม ซึ่งโครเมียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติคเกรด 401 (Martensitic Stainless Steel Type 401) ที่มีส่วนผสมของโครเมียมเท่ากับ 12.5 เปอร์เซ็นต์ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อมเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร ซึ่งถูกนำมาตัดให้มีขนาดยาว 2.5-3.0 มิลลิเมตร แสดงอยู่ในรูปที่ 1

ตารางที่ 2 และ 3 แสดงส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิติค ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติคเกรด 401 และฟลักซ์ ตามลำดับ [15-18]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของบริเวณเนื้อโลหะเดิม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

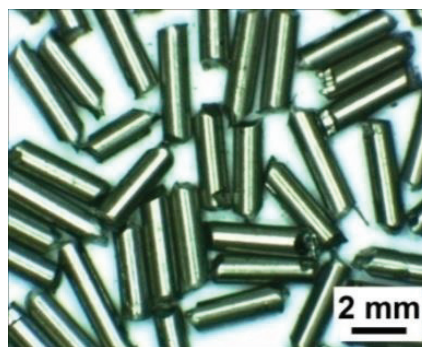
C	Si	Mn	P/S	Fe
0.13	0.15	0.50	0.05	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและเหล็กกล้าไร้สนิม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

วัสดุ	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Fe
ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิติค (EN 14700: T Fe8)	0.50	0.80	1.30	7	-	1.30	1.50	Bal.
ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (EN 756: S2Si)	0.10	0.20	1.00	-	-	-	-	Bal.
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติคเกรด 401 (AWS A5.9: ER410)	0.11	0.29	0.45	12.5	0.10	0.03	-	Bal.

ตารางที่ 3 ส่วนผสมทางเคมีของฟลักซ์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ฟลักซ์	SiO ₂ + TiO ₂	CaO + MgO	Al ₂ O ₃ + MnO	CaF ₂
EN 760: S A FB 2 65 DC H5	18	35	23	22



รูปที่ 1 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติคเกรด 401

เหล็กกล้ามาร์เทนซิติคเป็นเหล็กกล้าผสมสูงที่มีธาตุผสมหลัก คือ คาร์บอน โครเมียม โมลิบดีนัม และไนโอเบียม ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงสูง และยังมีการเติมธาตุ แมงกานีสและนิกเกิล ที่ทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนต์ เหล็กกล้าชนิดนี้จึงมีทั้งความแข็งแรงและเหนียว ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิติคเกรด 401 เป็นเหล็กกล้าผสมสูง โดยมีธาตุโครเมียมผสม 12-15 เปอร์เซ็นต์เป็นธาตุผสมหลักที่ทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีความแข็งแรงและยังสามารถต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าได้อีกด้วย สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์ นอกจากคาร์บอนแล้ว ยังมีธาตุอื่นผสมอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน แต่มีปริมาณน้อยเนื่องจากหลงเหลือมาจากกระบวนการผลิต

สำหรับกรรมวิธีการเชื่อม ในทุกสภาวะการเชื่อมเป็นการเชื่อมในท่าราบ (Flat Position) โดยเชื่อมเพียงหนึ่งแนว ชนิดของขั้วไฟฟ้าใช้กระแสตรงชนิดบวก (DC+) ในกรณีการเชื่อมที่มีการเติมโครเมียม เริ่มต้นโดยการเติมเหล็กกล้าไร้สนิมลงบนเนื้อโลหะเดิม จากนั้นเปลี่ยนให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีปริมาณที่เท่ากันตลอดทั้งแนวการเชื่อม แล้วจึงทำการเชื่อม ซึ่งเป็นการเชื่อมพอกลงบนเนื้อโลหะเดิมไปพร้อมกับเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งในขณะเชื่อมจะเกิดการอาร์กและเกิดการหลอมละลายของลวดเชื่อม บริเวณเนื้อโลหะเดิม และฟลักซ์ ในขณะเดียวกันก็หลอมละลายเหล็กกล้าไร้สนิมไปด้วย ทำให้โลหะทั้งสามชนิดหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันกลายเป็นเนื้อโลหะเชื่อม (Weld metal; WM) ซึ่งการเติมโครเมียมจะเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 0.6 กรัมต่อเซนติเมตร 1.2 กรัมต่อเซนติเมตร 2.4 กรัมต่อเซนติเมตร และมีหนึ่งสภาวะการเชื่อมที่ไม่มีการเติมโครเมียมในขณะเชื่อม (0.0 กรัมต่อเซนติเมตร) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงและเปรียบเทียบสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกล บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม การเชื่อมในทุกสภาวะใช้ตัวแปรเชื่อมที่เป็นไปตามคำแนะนำของผู้ผลิตลวดเชื่อม โดยสภาวะการเชื่อมและตัวแปรเชื่อมทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5 หลังจากเชื่อมเสร็จแล้ว ชิ้นงานจะถูกปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ



รูปที่ 2 การเชื่อมอาร์กใต้ฟลักซ์โดยใช้ลวดเชื่อมคู่ที่มีการเติมโครเมียม

ตารางที่ 4 ปริมาณเหล็กกล้าไร้สนิมที่เติมลงไปบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

ชิ้นงานเชื่อม	ปริมาณเหล็กกล้าไร้สนิม (กรัมต่อเซนติเมตร)
Ms wire	-
Fe wire	0.0
Fe+0.6 SUS	0.6
Fe+1.2 SUS	1.2
Fe+2.4 SUS	2.4

ตารางที่ 5 ตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม

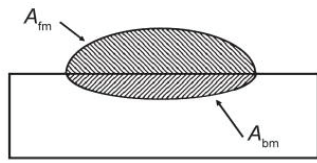
ตัวแปรเชื่อม	ค่า
กระแสเชื่อม (แอมป์)	600
แรงดันเชื่อม (โวลต์)	30
ความเร็วการเชื่อม (เซนติเมตรต่อนาที)	60
ความร้อนเข้า (กิโลจูลต่อเซนติเมตร)	18

2.2 การตรวจสอบทางโลหะวิทยาของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค/จุลภาค กระทำบริเวณภาคตัดขวาง (Cross section) ที่กึ่งกลางความยาวของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม โดยนำชิ้นงานไปตัดด้วยวิธีทางกลและหล่อด้วยเรซิน จากนั้นทำการขัดหยาบและขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาขนาด 5 ไมโครเมตร จากนั้นนำมากัดผิวหน้าชิ้นงานด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (2% Nital) แล้วจึงนำมาตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคโดยใช้กล้องสเตอริโอ (Stereoscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น SZ2-ET และกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) ยี่ห้อ Carl Zeiss รุ่น Axio Scope.A1 ตามลำดับ

ทำการวิเคราะห์การเงี่ยงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมจากรูปโครงสร้างมหภาค แสดงดังรูปที่ 3 โดยทำการวัดพื้นที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่หลอมละลาย (A_{bm}) และพื้นที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (A_{fm}) ด้วยโปรแกรม Image J

จากนั้นทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมตามสมการที่ 1



รูปที่ 3 การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม [15]

$$\% \text{Dilution} = \frac{A_{bm}}{A_{bm} + A_{fm}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A_{bm} คือ พื้นที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมที่หลอมละลาย

A_{fm} คือ พื้นที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

2.3 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ตรวจสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Optical Emission Spectrometer: OES) ยี่ห้อ Thermo ARL รุ่น 3460 ในบริเวณผิวบน (Top Surface) ของแนวเชื่อม โดยทำการเตรียมผิวให้ได้ระนาบ พร้อมทั้งทำการขัดหยาบในบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ

2.4 การทดสอบความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานด้วยการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ (Micro Vickers Hardness) ยี่ห้อ Matsuzawa รุ่น MMT-X7B ในบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงาน โดยเริ่มวัดจากบริเวณเนื้อโลหะเดิม เข้าสู่บริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม โดยใช้แรงกด 200 กรัม ($HV_{0.2}$) เป็นระยะเวลา 10 วินาที ซึ่งระยะห่างระหว่างจุดเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและการเจือจางในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

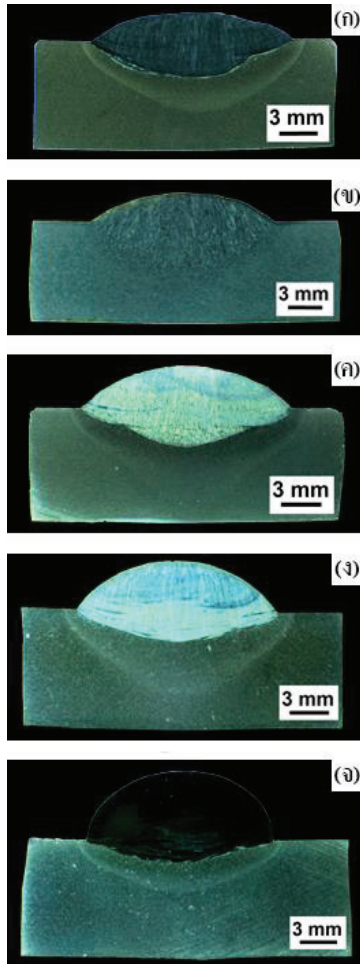
ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4 โดยพบว่า แนวเชื่อมมีการหลอมละลายสมบูรณ์และไม่ปรากฏรอย

แตกร้าวหรือข้อบกพร่องทั้งในบริเวณเนื้อโลหะเดิม บริเวณกระทบร้อน และบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม รูปที่ 4 (ก) และ 4 (ข) แสดงโครงสร้างมหภาคของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิดิกและชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียม พบว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีความนูนค่อนข้างต่ำแต่มีการหลอมลึกสูง ในขณะที่การเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมพบว่ามีความนูนมากกว่าและมีการหลอมลึกน้อยกว่า ซึ่งการเชื่อมที่ไม่มีการเติมโครเมียมมีการหลอมลึกมากกว่าเนื่องจากการหลอมละลายเกิดขึ้นเฉพาะกับลวดเชื่อมและบริเวณเนื้อโลหะเดิมเท่านั้น ส่งผลให้ความร้อนเข้ามามีความเข้มข้นมากกว่า ดังนั้นบริเวณเนื้อโลหะเดิมจึงเกิดการหลอมละลายได้มากกว่า

โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีการเติมโครเมียมในปริมาณที่แตกต่างกันจากน้อยไปมาก แสดงดังรูปที่ 4 (ค) ถึง 4 (จ) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียมในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ขนาดของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมก็เพิ่มมากขึ้น แต่การหลอมลึกลดลง ซึ่งชิ้นงานเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมมากที่สุด (Fe+2.4 SUS) แสดงให้เห็นว่าบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีความนูนมากที่สุดและการหลอมลึกน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อมีการเติมโครเมียม ความร้อนที่ได้จากการอาร์กสำหรับหลอมละลายลวดเชื่อมกับบริเวณเนื้อโลหะเดิม ได้ถูกแบ่งมาเพื่อหลอมละลายโครเมียมด้วย ทำให้การหลอมละลายในบริเวณเนื้อโลหะเดิมลดลง ส่งผลให้การหลอมลึกลดลง [19]

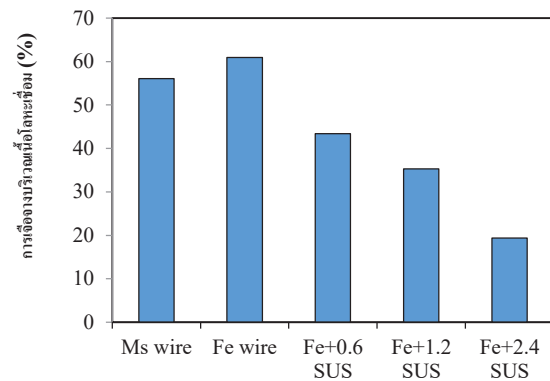
รูปที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานทั้งหมด พบว่าการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิดิกมีค่าเท่ากับ 56 เปอร์เซ็นต์ และการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียมมีค่าเท่ากับ 61 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมด้วยปริมาณจากน้อยไปมาก มีค่าเท่ากับ 43 เปอร์เซ็นต์ 35 เปอร์เซ็นต์ และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเชื่อมที่ไม่มีการเติมโครเมียมมีการเจือจางสูงกว่าการเชื่อมที่มีการเติมโครเมียม

อย่างชัดเจน นั้นหมายความว่า การเติมโครเมียมลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมคือการเพิ่มอัตราการเติมของเนื้อโลหะเชื่อมนั่นเอง



รูปที่ 4 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่เชื่อมด้วย
(ก) Ms wire (ข) Fe wire (ค) Fe+0.6 SUS
(ง) Fe+1.2 SUS (จ) Fe+2.4 SUS

จากผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าปริมาณโครเมียมเป็นปัจจัยหลักต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม เนื่องจากช่วยเพิ่มอัตราการเติมบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมให้มากขึ้นและมีการหลอมลึกที่ต่ำ จึงเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการเชื่อมพอกแข็ง



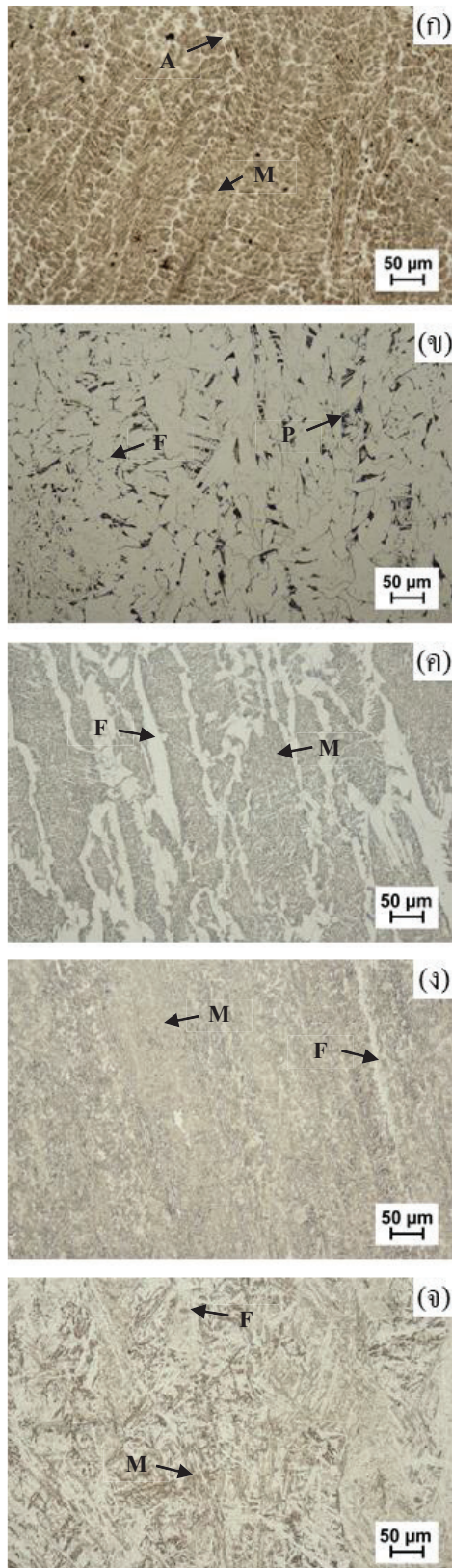
รูปที่ 5 เปอร์เซนต์การเติมจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

3.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

รูปที่ 6 แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด โดยรูปที่ 6 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนไซด์ิก พบว่าประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่มีลักษณะแบบเดนไดรต์ (บริเวณสีเข้ม) และออสเทนไนต์ดก้างที่บริเวณขอบเกรน (บริเวณสีขาว) อันเกิดจากส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่มีธาตุผสมอยู่สูง [21-23]

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียม แสดงดังรูปที่ 6 (ข) โดยพบว่าประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (บริเวณสีขาว) และเพิร์ลไลต์ (บริเวณสีดำ) ที่มีลักษณะแบบเดนไดรต์ เนื่องจากเป็นลวดเชื่อมเหล็กกล้าที่มีธาตุผสมต่ำ [24]

รูปที่ 6 (ค) ถึง 6 (จ) แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมของการเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมในปริมาณที่แตกต่างกันจากน้อยไปมาก พบว่าทุกชิ้นงานเชื่อมประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ (บริเวณสีขาว) และมาร์เทนไซด์ (บริเวณสีเข้ม) [25-27] อย่างไรก็ตามกลับพบว่าปริมาณโครงสร้างมาร์เทนไซด์แตกต่างกัน โดยการเชื่อมที่มีการเติมโครเมียมมากที่สุด (Fe+2.4 SUS) มีมาร์เทนไซด์มากที่สุด



รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วย (ก) Ms wire (ข) Fe wire (ค) Fe+0.6 SUS (ง) Fe+1.2 SUS (จ) Fe+2.4 SUS

โดยทั่วไปแล้วเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ แต่เมื่อมีการเติมโครเมียมเข้าไป ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์มากขึ้น การเติมโครเมียมลงในลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการเชื่อมพอกแข็ง เนื่องจากโครเมียมเป็นธาตุผสมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมจากการจับตัวกับคาร์บอนและเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ และยังช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนและการออกซิเดชัน [28]

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมระหว่างการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เติมโครเมียม ปรากฏว่ายังมีความแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากยังคงมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะมีการเติมโครเมียมลงไป ปริมาณโครเมียมที่ใกล้เคียงกันก็ตาม แต่การที่จะปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่ใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำให้มีลักษณะใกล้เคียงกับการใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำได้ นั้น จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณคาร์บอนด้วย [29]

3.3 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม แสดงดังตารางที่ 6 โดยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อส่วนผสมทางเคมี คือ การเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม และการเติมโครเมียมลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในกรณีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียม มีส่วนผสมทางเคมีบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมแตกต่างจากส่วนผสมทางเคมีเดิมของลวดเชื่อม (ตารางที่ 2) เนื่องจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเป็นบริเวณที่เกิดการผสมกันระหว่างลวดเชื่อมกับบริเวณเนื้อโลหะเดิม ซึ่งโลหะทั้งสองชนิดมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันอยู่แล้ว เมื่อเกิดการผสมกันของโลหะส่วนผสมทางเคมีก็ผสม

ตารางที่ 6 ส่วนผสมทางเคมีในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

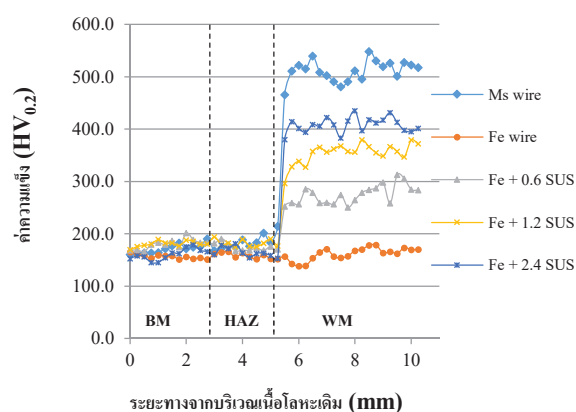
ชิ้นงาน	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Fe
Ms wire	0.29	0.44	0.85	3.08	-	0.57	0.22	Bal.
Fe wire	0.12	0.17	0.69	-	-	-	-	Bal.
Fe+0.6 SUS	0.11	0.19	0.71	1.64	0.01	-	-	Bal.
Fe+1.2 SUS	0.11	0.20	0.69	3.05	0.02	0.01	-	Bal.
Fe+2.4 SUS	0.11	0.23	0.67	5.52	0.04	0.01	-	Bal.

กันเช่นกัน สำหรับกรณีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีการเติมโครเมียม พบว่าเมื่อเติมโครเมียมในปริมาณมากขึ้น ธาตุโครเมียมในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมก็มากขึ้นด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.64 เปอร์เซ็นต์ 3.05 เปอร์เซ็นต์ 5.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งนั่นหมายความว่าธาตุโครเมียมได้หลอมละลายรวมเป็นบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม อย่างไรก็ตามธาตุโครเมียมกลับมีปริมาณต่ำกว่าที่คาดไว้ อันเป็นผลมาจากการเจือจางบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมกับบริเวณเนื้อโลหะเดิมที่ทำให้ปริมาณของโครเมียมที่เติมลงไปลดลง

3.4 ค่าความแข็ง

รูปที่ 7 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมในแต่ละบริเวณ จะเห็นได้ว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณผลกระทบร้อนมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นโลหะผสมต่ำ (SS400 Steel) จึงยากต่อการชุบแข็ง (Hardenability) ถึงแม้ว่าในระหว่างการเชื่อมจะทำให้บริเวณกระทบร้อนจะมีอัตราการเย็นตัวสูงก็ตาม ส่วนค่าความแข็งในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม พบว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิกมีค่าความแข็งสูงสุด ในขณะที่บริเวณเนื้อโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียมมีค่าความแข็งต่ำสุด สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีการเติมโครเมียม พบว่าค่าความแข็งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับลวดเชื่อมที่ไม่มีการเติมโครเมียม ซึ่งผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโครเมียม ความแข็งในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมีค่า

เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การเจือจางบริเวณเนื้อเชื่อมและลักษณะโครงสร้างจุลภาค แม้ว่าความแข็งในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมเมื่อใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีการเติมโครเมียมมีค่าต่ำกว่าการใช้ลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิก แต่ก็ทำให้ทราบว่าการเติมธาตุโครเมียมสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมได้



รูปที่ 7 ค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณโครเมียมที่เติมลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม มีอิทธิพลต่อสมบัติทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้ามาร์เทนซิกพบว่ามีความแข็งสูงสุด เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์และออสเทนไนต์

ตกค้าง แต่มีเปอร์เซ็นต์การเงาจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมสูง

2) ชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิดเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ไม่มีการเติมโครเมียม พบว่ามีค่าความแข็งต่ำ เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ และเปอร์เซ็นต์การเงาจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมมากที่สุด

3) โครเมียมที่เติมลงไปสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์และเฟอร์ไรต์ และยังลดเปอร์เซ็นต์การเงาจากบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม เพิ่มอัตราการเติมเนื้อโลหะเชื่อม และเพิ่มความแข็งแรงบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม

4) การเติมเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมาร์เทนซิกเกรด 401 ลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม เป็นการเพิ่มปริมาณธาตุ

โครเมียมลงในบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม ซึ่งโครเมียมช่วยปรับปรุงสมบัติของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อมให้ดีขึ้น จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเชื่อมพอกแข็งที่ต้องการเพิ่มความแข็งแรงของบริเวณเนื้อโลหะเชื่อม เพื่อให้สามารถทนต่อการสึกหรอ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดินของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ENG600279S) ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Buchely, M. F., Gutierrez, J. C., Leon, L. M., and Toro, A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, 2005; 259(1-6): 52-61.
- [2] Kirchgäßner, M., Badisch, E. and Franek, F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*, 2008; 265(5-6): 772-779.
- [3] Shen, S., Oguocha, I. N. A. and Yannacopoulos, S. Effect of heat input on weld bead geometry of submerged arc welded ASTM A709 Grade 50 steel joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012; 212(1): 286-294.
- [4] Chatterjee, S. and Pal, T. K. Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron. *Wear*, 2003; 255(1-6): 417-425.
- [5] Morsy, M. and El-Kashif, E. The effect of microstructure on high-stress abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing deposits. *Welding in the World*, 2014; 58(4): 491-497.
- [6] Yang, J., Yang, Y., Zhou, Y., Qi, X., Gao, Y., Ren, X. and Yang, Q. Microstructure and wear properties of Fe-2 wt-% Cr-X wt-% W-0.67 wt-% C hardfacing layer. *Welding journal*, 2013; 92(8): 225s-230s.
- [7] Yüksel, N. and Şahin, S. Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe–Cr–C and Fe–Cr–C–B based hardfacing alloys. *Materials & Design*, 2014; 58: 491-498.
- [8] Ribeiro, R. A., Santos, E. B. F., Assunção, P. D. C., Maciel, R. R. and Braga, E. M. Predicting weld bead geometry in the novel CW-GMAW process. *Weld J*, 2015; 94: 301s-311s.
- [9] Palani, P. K. and Murugan, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007; 190(1-3): 291-299.
- [10] Shahi, A. S. and Pandey, S. Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures. *Journal of materials processing technology*, 2008; 196(1-3): 339-344.
- [11] Gülenç, B. and Kahraman, N. Wear behaviour of bulldozer rollers welded using a submerged arc welding process. *Materials & design*, 2003; 24(7): 537-542.
- [12] McPherson, N. A., Chi, K. and Baker, T. N. Submerged arc welding of stainless steel and the challenge from the laser welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003; 134(2): 174-179.

- [13] Tušek, J. and Suban, M. High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition. *Journal of materials processing technology*, 2003; 133(1-2): 207-213.
- [14] Henan BEBON International Co., Ltd. Steel Plate, SS400 Steel Plate, 2017. [Online] Available: <http://www.steel-plate-sheet.com>
- [15] Welding Alloys Co., Ltd. Products & Services, Welding Alloys Consumables, Hardfacing Cored Wires, 2017. [Online] Available: <https://www.welding-alloys.com>
- [16] ESAB Group (UK) Co., Ltd. Products & Solutions, Welding Consumables, Submerged Arc Wires & Fluxes (SAW), Mild Steel Wires, 2017. [Online] Available: <http://www.esab.co.uk>
- [17] Lincoln Electric Co., Ltd. Products Consumable, Stainless Alloys, Lincoln® ER410, 2017. [Online] Available: <http://www.lincolnelectric.com>
- [18] Welding Alloys Co., Ltd. Products & Services, Welding Alloys Consumables, Fluxes, WAF, 2017. [Online] Available: <https://www.welding-alloys.com>
- [19] Mendez, P. F., Barnes, N., Bell, K., Borle, S. D., Gajapathi, S. S., Guest, S. D., Izadi, H., Gol, A. K., Wood, G. Welding processes for wear resistant overlays. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014; 16(1): 4-25.
- [20] Lienert, T., Siewert, T., Babu, S., Acoff, V. and Specifications, S. W. P. ASM handbook. Materials Park, OH, USA: ASM international, 2011; 6A: 121-215.
- [21] Coronado, J. J., Caicedo, H. F. and Gómez, A. L. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, 2009; 42(5):745-749.
- [22] Gualco, A., Svoboda, H. G., Surian, E. S. and de Vedia, L. A. Effect of welding procedure on wear behaviour of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit. *Materials & Design*, 2010; 31(9):4165-4173.
- [23] Amin, M., Khafagy, S. M. and Zaghlool, B. Repair Welding Restoration of the Screw Conveyor for Resin Extruder. *Journal of American Science*, 2011; 7(1):313-320.
- [24] Eroğlu, M. and Aksoy, M. Effect of initial grain size on microstructure and toughness of intercritical heat-affected zone of a low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2000; 286(2): 289-297.
- [25] Chuvas, T. C., Garcia, P. S. P., Pardal, J. M. and Fonseca, M. D. P. C. Influence of heat treatment in residual stresses generated in P91 steel-pipe weld. *Materials Research*, 2015; 18(3): 614-621.
- [26] Zhou, X., Liu, C., Yu, L., Liu, Y. and Li, H. Phase transformation behavior and microstructural control of high-Cr martensitic/ferritic heat-resistant steels for power and nuclear plants: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015; 31(3): 235-242.
- [27] Tao, X. G., Han, L. Z. and Gu, J. F. Effect of tempering on microstructure evolution and mechanical properties of X12CrMoWVNbN10-1-1 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2014; 618: 189-204.
- [28] Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P. and Subramanian, C. (2014). Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. *Surface and Coatings Technology*, 2014; 260: 220-229.
- [29] Valeria, L., Lorusso, H. N. and Svoboda, H. G. Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *Procedia Materials Science*, 2015; 8: 1047-1056.



อิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อคุณสมบัติ ทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง Influence of Stress Concentration and Temperature on Mechanical Properties and Microstructure of High Strength Steels

เฉลิมพล คล้ายนิล* และพงศกร หลีตระกูล

Chalermpol Klayni* and Pongsakorn Leetrakul

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

Department of Production Engineering Technology, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, Huahin, Prachuapkhirikhan, 77110

*E-mail: chalermpol1@hotmail.com, chalermpol.kla@rmutr.ac.th

Telephone Number: 086-783-6060

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นกับอุณหภูมิในการทดสอบแรงดึงที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS G3135 เกรด SPFC440 ขึ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM-E8 ผ่านการเตรียมให้มีศูนย์รวมความเค้นที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ และอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25°C 200°C 400°C และ 600°C ผลการทดลองพบว่าอิทธิพลของศูนย์รวมความเค้นส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุโดยมีแนวโน้มลดลงทุกรูปแบบอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดสอบที่อุณหภูมิปกติเป็นการแตกแบบเหนียว เพราะผลจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควิเวณพื้นผิวตรงรอยแตกมีลักษณะเป็นร่องหลุม เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อน

คำสำคัญ: เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง, ศูนย์รวมความเค้น, สมบัติทางกล, โครงสร้างจุลภาค

ABSTRACT

This research aimed to study the influence of stress concentration and temperature under tensile testing on mechanical properties and microstructure of JIS G3135 SPFC440 high strength steels. Tensile specimens, ASTM-E8 standard, were prepared into five different stress concentration patterns and the four different tensile tests temperature were 25°C, 200°C, 400°C, and 600°C. The results showed that the effect of stress concentration on the tensile strength of the material was significantly decreased. From testing at room temperature as a ductile fracture is a result of the microstructure investigation of fracture surface caused the dimples fracture comparing to the testing in high-temperature which loss ductility from heat.

Keywords: High strength steel, Stress concentration, Mechanical properties, Microstructure

1. บทนำ

ปัจจุบันเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel: HSS) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และโครงสร้างของรถยนต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุมีค่าอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ความสามารถในการดูดซับพลังงาน ลดการยุบตัวจากแรงกระแทกที่เกิดจากการชน [1, 2] ทั้งนี้เมื่อชิ้นส่วนผ่านกระบวนการผลิตด้วยการตัดเจาะรู [3] หรือผ่านการขึ้นรูปขยายรู (Hole flanging) ทั้งที่มีการให้ความร้อนและไม่มีความร้อน จะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน กระบวนการตัดเจาะรูส่งผลทำให้เกิดศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) [4] อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมักจะเกิดปัญหาการแตกหรือลิกขาบริเวณขอบรูหรือกระบวนการขึ้นรูปไม่ได้ตามที่ต้องการ

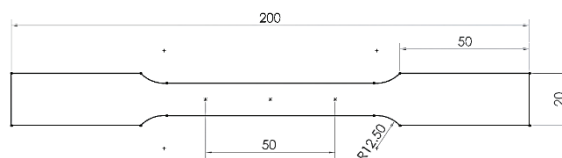
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) กับอุณหภูมิในการทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และรูปแบบความเสียหายที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อประยุกต์ไปใช้ในการออกแบบกระบวนการผลิต และการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ สำหรับเป็นข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม วัสดุทดลองคือแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง JIS G3135 เกรด SPFC440 ความหนา 1 มิลลิเมตร โดยขึ้นตัวอย่างผ่านการเตรียมให้มีศูนย์รวมความเค้นที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ ขึ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านเจาะรู ขึ้นตัวอย่างเจาะรูเดี่ยวตรงศูนย์ ขึ้นตัวอย่างเจาะรูเดี่ยวเฉียงศูนย์ ขึ้นตัวอย่างเจาะรูคู่ตรงศูนย์ และขึ้นตัวอย่างเจาะรูคู่เฉียงศูนย์ มีการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะคือ 1.2 มิลลิเมตร และอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นกับอุณหภูมิในการทดสอบ มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

2.1 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1.1 งานวิจัยนี้ทำการทดลองกับวัสดุแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง มาตรฐาน JIS G3135 เกรด SPFC440 ความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นการทดสอบแรงดึงเพื่อศึกษาสมบัติทางกลด้านต่างๆ การเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ตามมาตรฐาน ASTM-E8 ความยาวรวม (L) = 200 มิลลิเมตร ความยาวพิคัด (L₀) = 50 มิลลิเมตร ความกว้าง (W) = 12.5 มิลลิเมตร และรัศมีของบ่า (R) = 12.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการทดลองด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 ด้วยความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อวินาที (Constant crosshead speed) ผลที่ต้องการจากการทดสอบนี้คือค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength: UTS) ความแข็งแรงจุดคราก (Yield strength: YS) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) ซึ่งแสดงผลจาก Stress-Strain Curve และทำการทดสอบความแข็งแรงระดับจุลภาค (Micro hardness test) บริเวณพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง จำนวน 3 จุดต่อชิ้น เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ Wilson hardness รุ่น Tukon 1102 Test scale HV0.5 Test force 500 gf กดเข้าใช้เวลา 10 วินาที



รูปที่ 1 ชิ้นตัวอย่างทดสอบแรงดึง (หน่วย: mm)

2.1.2 การศึกษาผลกระทบของศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) ด้วยการเตรียมชิ้นตัวอย่างที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะคือ 1.2 มิลลิเมตร

2.1.3 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C ที่มีผลต่อสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และรูปแบบความเสียหาย ด้วยเตาไฟฟ้าอบโลหะรุ่น LH-18 EF-V-P และการตรวจสอบอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างในเตาด้วย Thermocouple ชนิด K เริ่มให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิทดสอบด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ 20°C/min เมื่อความร้อนของชิ้นตัวอย่างถึงอุณหภูมิทดสอบก็จะทำการอบแช่ (Holding time) ใวนานอีก 8 นาที เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน ก่อนทำการทดสอบแรงดึงตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน จำนวน 3 ชิ้นตัวอย่าง ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

2.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค เตรียมชิ้นตัวอย่างด้วยการขัดกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 220, 320, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นใช้ผงอลูมินา (Al_2O_3) ขนาด 0.3 μm และ 0.1 μm ขัดบนผ้าสักหลาดด้วยเครื่องขัดชิ้นงานยี่ห้อ Struers รุ่น Dap-7 จึงกัดด้วยสารละลายกรด และนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX 60 M และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคลักษณะของพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV และตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค Energy dispersive spectrometry (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX

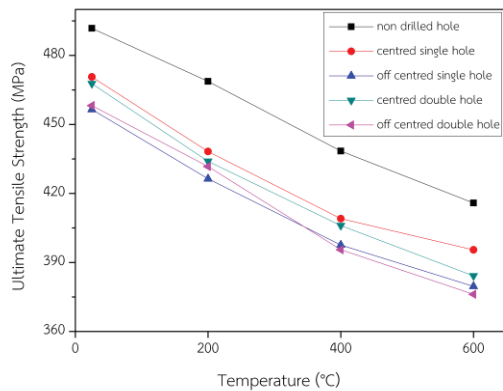
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลด้านต่างๆ

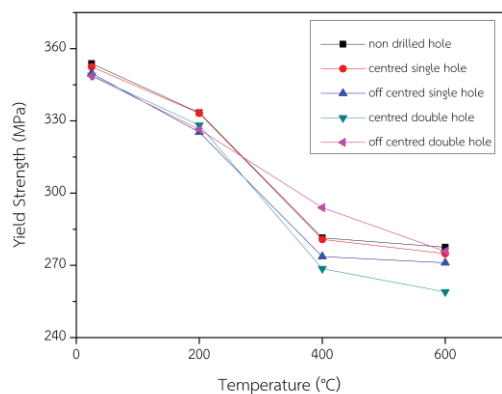
การศึกษาผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ กับอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน

4 ระดับ ที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงจุดคราก ดังกราฟในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จากการทดลองชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรู ทำการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิ 25°C ผลการทดลองพบว่าวัสดุมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดคือ 491.80 MPa ความแข็งแรงจุดครากมีค่า 353.76 MPa และความแข็งมีค่า 156.70 HV ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุมีอัตราการเพิ่มความแข็งแรงที่สูง (Strain hardening rate) โดยความแข็งแรงที่มีค่าสูงมีผลมาจากเฟส Martensite หรือการเกิด Strain hardening ที่สูง [1, 5, 6] เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้องจะทำให้ชิ้นตัวอย่างสามารถรับแรงดึงได้สูงสุด เพราะว่าปริมาณดิสโลเคชัน (Dislocation) มีค่าสูงนั่นเอง ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างพบว่าการคอดตัว (Necking) ส่งผลทำให้พื้นที่หน้าตัดตรงบริเวณที่แตกหักมีขนาดลดลง พร้อมกับมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Slow crack growth) ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว (Ductile fracture) [7] และวัสดุมีความเหนียวสูงสุดเช่นเดียวกัน คือมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 24.5% คุณสมบัตินี้มีผลมาจากลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าสองเฟส (Dual phase steels) โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 นั้นจะประกอบด้วยกลุ่มของเฟส Martensite ซึ่งเป็นเฟสที่แข็งกระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน และพื้นหลักของโครงสร้าง Ferrite เป็นเฟสพื้นที่มีความเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 4 จึงทำให้เหล็กกล้าสองเฟสนั้น มีทั้งความแข็งแรงและความเหนียว [1, 2] แต่เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิจะช่วยให้โครงสร้างของดิสโลเคชันคลายตัวออกจากกัน และทำให้ปริมาณของดิสโลเคชันลดลง จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงจุดคราก และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดต่ำลงตามอุณหภูมิทดสอบที่เพิ่มขึ้น [8] ซึ่งจากการทดลองที่อุณหภูมิสูง ผลแสดงว่าเป็นการแตกหักที่เกิดในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Plastic deformation) น้อยลง [7, 9] และการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Fast crack growth) ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อ

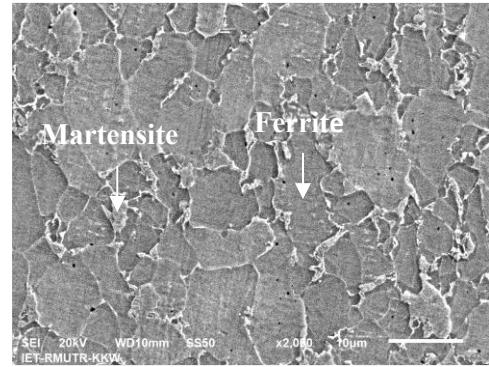
ทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600°C ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง 415.84 MPa ค่าความแข็งแรงจุดครากลดลง 277.52 MPa และความแข็งมีค่า 113.65 HV



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดกับอุณหภูมิ



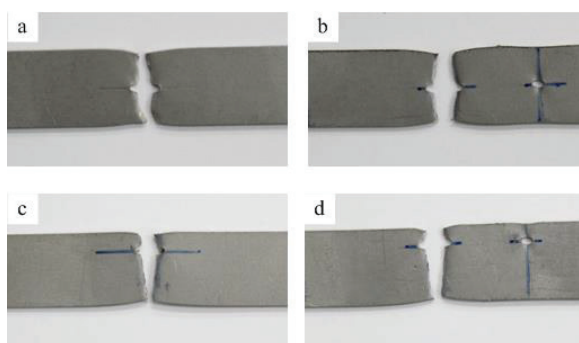
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงจุดครากกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นหลัก Ferrite และเฟส Martensite ที่กระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของศูนย์รวมความเค้น (Stress concentration) ในรูปแบบต่างๆ กับอุณหภูมิในการทดสอบแตกต่างกัน ปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างที่มีการเจาะรูจะเกิดศูนย์รวมความเค้นสูงสุดที่ขอบของรู [4] ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่มีการเจาะรูเกิดการเสียหายได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่ไม่มีรูเจาะ และความเสียหายจะเกิดขึ้นตรงขอบของรูบนชิ้นงานเสมอ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงกว่าบริเวณอื่น เพราะการกระจายตัวของความเค้นไม่สม่ำเสมอ และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง ส่วนมากจะนำไปสู่การเป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก ผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C จะเห็นได้ว่าชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวตรงศูนย์ พบว่าวัสดุมีค่า UTS 470.66 MPa ดังรูปที่ 5 (a) และเจาะรูคู่ตรงศูนย์ มีค่า UTS 467.74 MPa ดังรูปที่ 5 (b) จะมีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวเยื้องศูนย์ มีค่า UTS 458.50 MPa ดังรูปที่ 5 (c) และเจาะรูคู่เยื้องศูนย์ มีค่า UTS 458.18 MPa ดังรูปที่ 5 (d) เนื่องจากบริเวณหน้าตัดด้านที่มีเนื้อที่น้อยกว่าตรงด้านเยื้องศูนย์จะเริ่มเกิดรอยแตกขึ้นก่อนจนกระทั่งมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะขนาดพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันหรือขาดความต่อเนื่อง และจะขยายตัวไปยังพื้นที่บริเวณหน้าตัดขนาดใหญ่ เป็นการแตกหักที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยมาก จากผลการทดลองนี้

แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงจุดครากมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเหมือนกัน ซึ่งเกิดจากผลกระทบศูนย์รวมความเค้นรูปแบบต่างๆ โดยจะแปรผันกับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เจาะรูคู่เฉียงศูนย์ ทดลองที่อุณหภูมิ 600 °C มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำสุดคือ 376.15 MPa

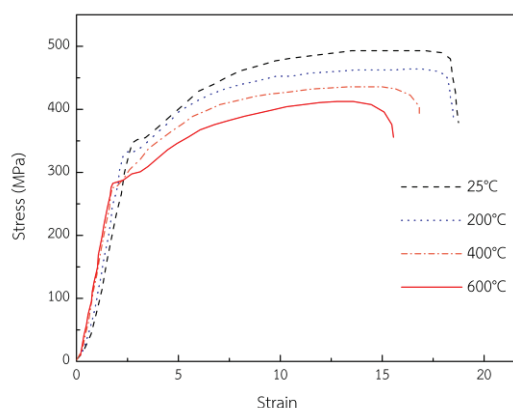


รูปที่ 5 ชิ้นตัวอย่างที่มีการเจาะรู (a) รูเดี่ยวตรงศูนย์ (b) รูคู่ตรงศูนย์ (c) รูเดี่ยวเฉียงศูนย์ และ (d) รูคู่เฉียงศูนย์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C

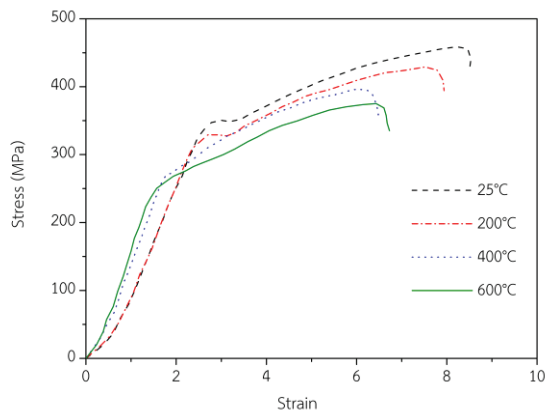
3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve ที่อุณหภูมิต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองภายใต้แรงดึง ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C ผลจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างไม่มีการเจาะรู ดังรูปที่ 6 แสดงถึงพฤติกรรมทางกลที่แตกต่างกันของเส้นกราฟ พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงสุด ซึ่งมีผลมาจากความแข็งแรงจุดครากกับความแข็งแรงดึงมีค่าต่างกันหรือบริเวณที่ค่อนข้างกว้าง นอกจากนี้เมื่อเทียบความชันของกราฟในช่วงแรก พบว่าความชันของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงดึงที่ต่ำ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นมีค่าสูง วัสดุมีการดูดซับพลังงานปริมาณมาก

(High energy absorption) ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ โดยพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ Stress-Strain และการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และผลจากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงขึ้น นั่นคือที่อุณหภูมิ 200°C มีค่า UTS 468.73 MPa ที่อุณหภูมิ 400°C มีค่า UTS 438.43 MPa และที่อุณหภูมิ 600°C มีค่า UTS 415.84 MPa ซึ่งเป็นค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ส่วนความสามารถในการยึดตัวก็มีค่าลดลง [10] โดยมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยลง [11] และจากกราฟในรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain จากชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวเฉียงศูนย์ทดสอบภายใต้แรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกันตั้งแต่ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C ผลการทดลองแสดงว่าอุณหภูมิมิผลต่อค่าความแข็งแรงดึง เช่นเดียวกัน และผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างทางด้านสมบัติทางกลอย่างชัดเจน ทั้งค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ค่าความแข็งแรงจุดคราก และความสามารถในการยึดตัว โดยการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าสูงตรงบริเวณขอบของรูบนชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟผลการทดลองชิ้นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเจาะรู



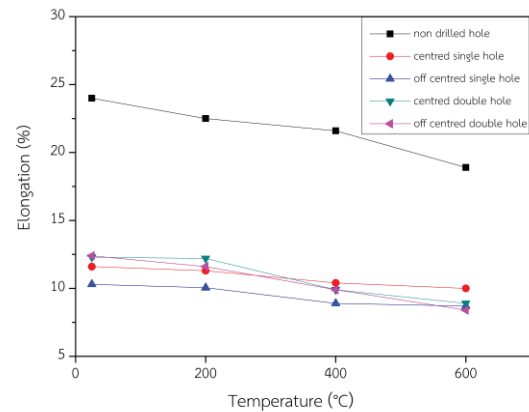
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve ที่อุณหภูมิแตกต่างกันจากชิ้นตัวอย่างที่ไม่มีการเจาะรู



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain curve ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จากชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเดี่ยวเชิงศูนย์

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percent elongation) โดยความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ผลการทดลองสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25°C การยืดตัวของวัสดุมีค่าสูงสุด คือมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเท่ากับ 24.5% ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับความเหนียวของเหล็กกล้าสองเฟสนั้นจะถูกควบคุมโดยขนาดเกรนของ Ferrite และเฟส Martensite ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวเฟส Martensite และสัดส่วนของเฟส Martensite อยู่ที่ประมาณ 5-30% [12, 13] แต่เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มสูงขึ้นคือ 200°C 400°C และ 600°C มีผลให้การยืดตัวมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ [14] นั่นคือเมื่อชิ้นตัวอย่างทดลองได้รับความร้อนมากขึ้น จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกล ส่วนการเจาะรูเพื่อทำให้เกิดศูนย์รวมความเค้นที่ชิ้นตัวอย่าง มีผลกระทบอย่างมากต่อความสามารถในการยืดตัว ปรากฏว่าค่าการยืดตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงทุกรูปแบบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างที่มีจุดศูนย์รวมความเค้นจะทำให้เกิดจุดร้าวตัวอย่างรวดเร็ว และมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยลงหรือการยืดตัวน้อย และผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเหมือนกัน ซึ่งความสามารถใน

การยืดตัวมีค่าน้อยที่สุดเกิดขึ้นกับชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูคู่เชิงศูนย์ อุณหภูมิทดสอบ 600°C เปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าต่ำสุดคือ 8.4% (Minimum hot ductility)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

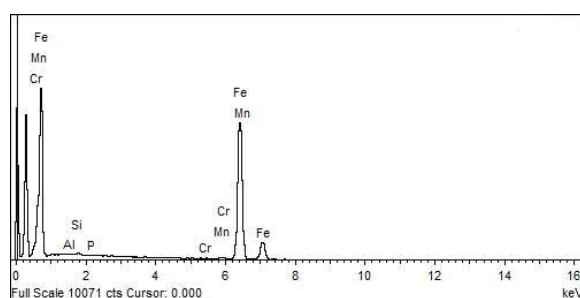
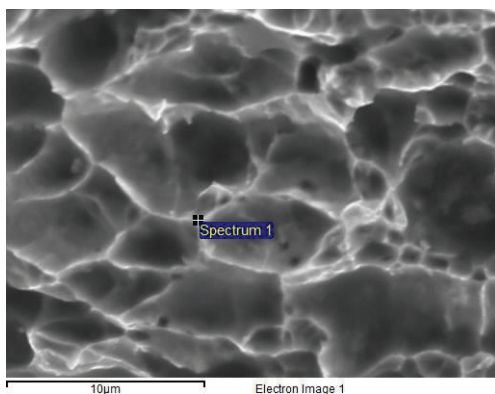
3.3 ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive spectrometry)

ผลการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ยังยืนยันผลได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS โดยแสดง Spectrum เป็นผลลัพธ์ ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS บริเวณพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) พบว่าธาตุที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด คือซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) พิจารณาได้จากตารางที่ 1 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 9 แสดงผลจากการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25°C พบว่า Spectrum ที่ 1 มีระดับความเข้มข้นของซิลิคอน (Si) เท่ากับ 0.40% และแมงกานีส (Mn) เท่ากับ 0.89% และจากรูปที่ 10 การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600°C Spectrum ที่ 2 มีระดับความเข้มข้นของซิลิคอน (Si) ลดลง 0.17% และแมงกานีส (Mn) ลดลง 0.78% จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn)

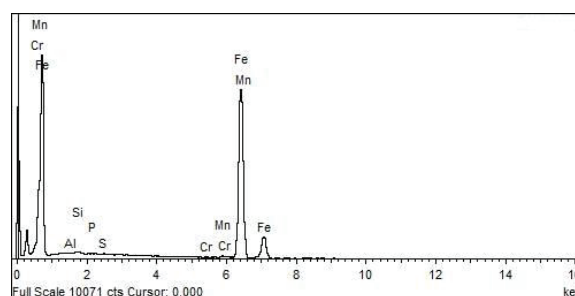
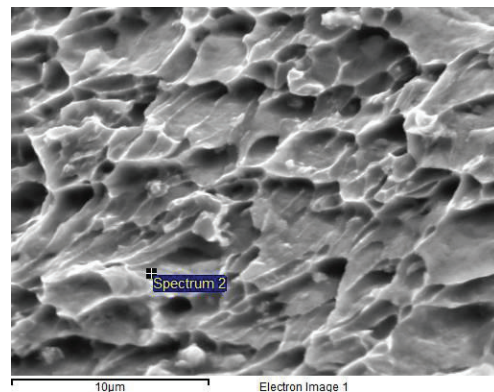
มีสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าธาตุอื่น จึงทำให้ซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) เกิดการแพร่ออกไปรวมตัวกับธาตุอื่นที่ผิวชิ้นงานเป็นชั้นออกไซด์ [15, 16] ซึ่งปริมาณซิลิคอน (Si) และแมงกานีส (Mn) ที่ลดลง มีผลต่อค่าความแข็งแรงจุดคราก และความแข็งแรงดึงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีและสอดคล้องกันกับผลการทดสอบแรงดึงดังกล่าวมา

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้า SPFC440 (%wt, Balance carbon)

Temperature (°C)	Si	Mn	Al	Cr	P	S	Fe
25	0.40	0.89	0.24	0.07	0.10	-	98.30
200	0.36	0.83	0.06	0.02	0.07	-	98.67
400	0.27	0.74	0.04	-	-	-	98.94
600	0.17	0.78	0.18	0.09	0.03	0.02	98.74



รูปที่ 9 ลักษณะ Fracture surface และผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ที่อุณหภูมิ 25°C

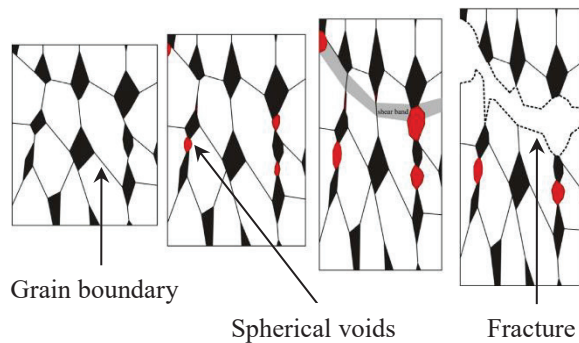


รูปที่ 10 ลักษณะ Fracture surface และผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ที่อุณหภูมิ 600°C

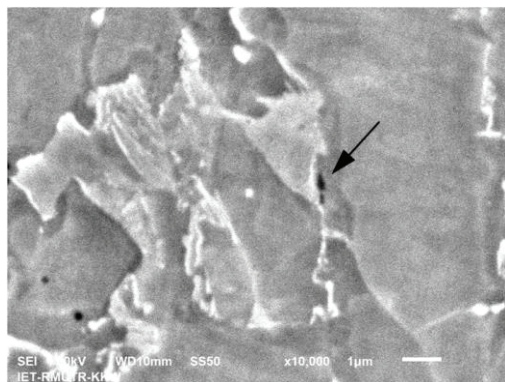
3.4 ผลการศึกษา โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

ความเสียหายของเหล็กกล้าสองเฟสขึ้นอยู่กับเกิดการช่องว่างในเฟส Ferrite ที่มีความเหนียว ซึ่งอาจเกิดจากการแยกตัวของบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส Ferrite และ Martensite และเกิดจากความเสียหายของเฟส Martensite [17] ดังแสดงในรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) จะพบลักษณะที่ขรุขระ (Fibrous fracture surface) โดยกระบวนการขยายตัวของรอยร้าวจากการแตกหักแบบเหนียวค่อนข้างจะช้า ซึ่งลักษณะร่องหลุม (Dimple) ที่ปรากฏบนผิวหน้าแตกหัก เริ่มจากการเกิดช่องว่างขนาดเล็ก (Void) ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส Ferrite และเฟส Martensite ดังแสดงในรูปที่ 12 (a) และการขยายตัวของช่องว่าง (Void growth) ดังแสดงในรูปที่ 12 (b) จากนั้นมีการขยายตัวของรอยร้าว

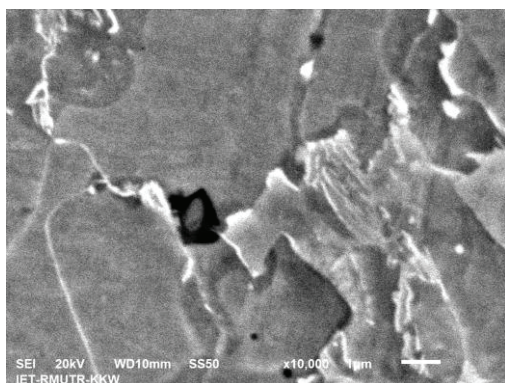
จากช่องว่าง จนเกิดการเชื่อมรวมกันของช่องว่าง (Void coalescence) [17] จนกลายเป็นรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro-crack) และการขยายตัวของรอยร้าว ส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยลงและทำให้ความเค้นที่กระทำต่อวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้น ในที่สุดก็เกิดการแตกหัก (Fracture) ออกจากกันของวัสดุ



รูปที่ 11 ลักษณะกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นในระดับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเหนียว [17]



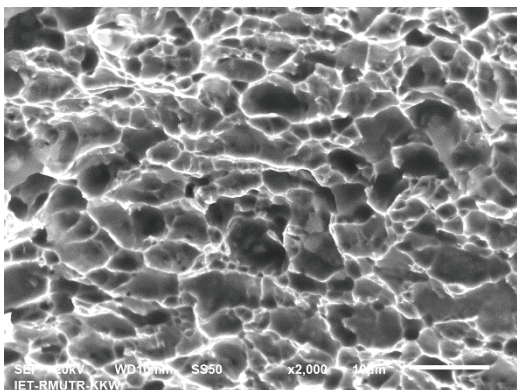
(a) ช่องว่างขนาดเล็ก (Void)



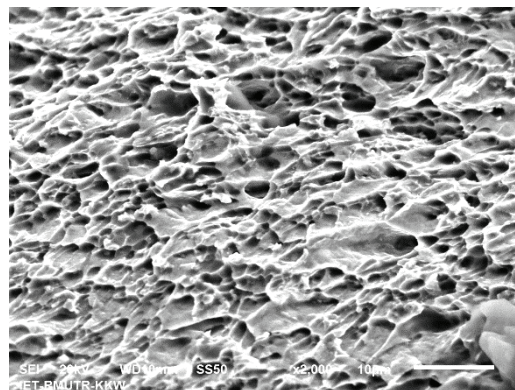
(b) การขยายตัวของช่องว่าง (Void growth)

รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของช่องว่าง (Void)

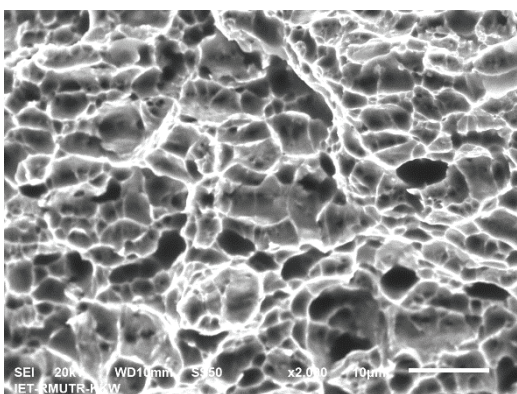
ผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวตรงรอยแตกของชิ้นตัวอย่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พบว่าลักษณะพื้นผิวแตกแบบเหนียวของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 แสดงให้เห็นช่องว่างขนาดเล็ก (Void) ลักษณะเป็นร่องหลุม (Dimple) ที่เกิดจากช่องว่างมาเชื่อมกัน (Micro-void coalescence) [18] โดยพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ดังรูปที่ 13 และการทดสอบที่อุณหภูมิ 200°C ดังรูปที่ 14 เป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) มีจำนวนและขนาดของหลุมลึก (Dimple) ที่มีการกระจายตัวค่อนข้าง Homogeneous [19] ผิวหน้าแตกที่สามารถมองเห็นร่องหลุมแบบสมมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับผิวแตกจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 400°C ดังรูปที่ 15 และการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C ดังรูปที่ 16 กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงให้เห็นถึงลักษณะร่องหลุมที่เกิดขึ้นแตกต่างไปจากการทดสอบที่อุณหภูมิปกติและที่อุณหภูมิ 200°C อย่างชัดเจน โดยลักษณะของร่องหลุมที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะยืดออก (Elongated dimple) คล้ายวงรีและราบเรียบมากขึ้น หรืออาจเรียกลักษณะความเสียหายแบบ Semi-ductile หรือเกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อนขึ้น ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงและการยืดตัวน้อยลง จึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการทดสอบเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง SPFC440 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งพิจารณาได้จากลักษณะของพื้นผิวตรงรอยแตก (Fracture surface) โดยมีผลกระทบต่อความเหนียวหรือความสามารถในการยืดตัวของวัสดุที่แตกต่างกัน จากการทดสอบที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความเหนียวลดลง โดยสอดคล้องกันกับผลการทดสอบแรงดึงดังที่กล่าวมา



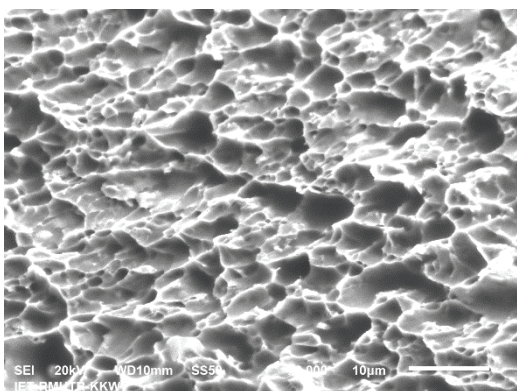
รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 25°C ภาพจาก SEM



รูปที่ 16 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 600°C ภาพจาก SEM



รูปที่ 14 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 200°C ภาพจาก SEM



รูปที่ 15 โครงสร้างจุลภาคแสดง Fracture surface ที่อุณหภูมิ 400°C ภาพจาก SEM

4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นกับอุณหภูมิในการทดสอบ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงเกรด SPFC 440 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1 ผลกระทบของศูนย์รวมความเค้นในรูปแบบต่างๆ ปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างที่มีเจาะรูตรงศูนย์มีความสามารถในการรับแรงดึงสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูเอียงศูนย์ เนื่องจากบริเวณหน้าตัดด้านที่มีเนื้อที่น้อยกว่าตรงด้านเอียงศูนย์จะเริ่มเกิดรอยแตกขึ้นก่อน จนกระทั่งมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะขนาดพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันหรือขาดความต่อเนื่อง

4.2 ผลการทดลอง Stress-Strain curve ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 25°C, 200°C, 400°C และ 600°C พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงจุดครากต่อความแข็งแรงดึงที่ต่ำ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นมีค่าสูง วัสดุมีการดูดซับพลังงานปริมาณมาก (High energy absorption) ส่วนการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด

4.3 การเจาะรูเพื่อทำให้เกิดศูนย์กลางความเค้นที่ขึ้นตัวอย่าง มีผลกระทบต่อความสามารถในการยึดตัว ปรากฏว่าการยึดตัวของชิ้นตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงทุกรูปแบบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากชิ้นตัวอย่างที่มีจุดศูนย์กลางความเค้นจะทำให้เกิดจุดครากตัวอย่างรวดเร็ว และมีการขยายตัวของรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Fast crack growth) โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรน้อยลง และผลการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมีแนวโน้มลดลงในลักษณะเหมือนกัน

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างในระดับจุลภาค เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวตรงรอยแตก ด้วย SEM พบลักษณะพื้นผิวเป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C มีจำนวนและขนาดของหลุมลึก (Dimple) ที่มีการกระจายตัวค่อนข้าง

Homogeneous เมื่อเปรียบเทียบกับผิวแตกจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 600°C ลักษณะร่องหลุมที่เกิดขึ้นแตกต่างไปจากการทดสอบที่อุณหภูมิลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างของโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความเหนียวในขณะร้อนขึ้น ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงดึงและการยึดตัวน้อยลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณโครงการวิจัยนี้ ตามสัญญาเลขที่ A-11/2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lai, Q., Bouaziz, O., Gouné, M. and Brassart, L. Damage and fracture of dual-phase steels: Influence of martensite volume fraction. *Materials Science & Engineering*, 2015; 646: 322-331.
- [2] Thipwipa, S, Viton, U. and Sompong, S. Effects of the tempering temperature on mechanical properties of dual phase steels. *Journal of Metals Materials and Minerals*, 2014; 24: 13-20.
- [3] เฉลิมพล คล้ายนิล จินกมล ลุขจันทร์ และพงศกร หลีตระกูล. การศึกษาอิทธิพลของระยะช่องว่างคมตัดที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์สำหรับการตัดเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2017; 24: 1-12.
- [4] Rosenberg, G., Sinaiová, I. and Juhar, L. Effect of microstructure on mechanical properties of dual phase steels in the presence of stress concentrators. *Materials Science & Engineering*, 2013; 582: 347-358.
- [5] Li, C-N., Yuan, G. and Ji, F-G. Effects of auto-tempering on microstructure and mechanical properties in hot rolled plain C-Mn dual phase steels. *Materials Science & Engineering*, 2016; 665: 98-107.
- [6] Zhao, Z., Tong, T., Liang, J., Yin, H., Zhao, A. and Tang, D. Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of ultra-high strength dual-phase steel. *Materials Science & Engineering*, 2014; 618: 182-188.
- [7] William, d. and Callister, J.R. Materials science and engineering an introduction. 6th ed. John Wiley & Sons Inc, New York, 2003.
- [8] Zhang, M., Cao, W., Dong, H. and Zhu, J. Element partitioning effect on microstructure and mechanical property of the micro-laminated Fe-Mn-Al-C dual phase steel. *Materials Science & Engineering*, 2016; 654: 193-202.
- [9] Jung, S., Jo, Y.H. and Jeon, C. Effects of Mn and Mo addition on high-temperature tensile properties in high-Ni-containing austenitic cast steels used for turbo-charger application. *Materials Science & Engineering*, 2017; 682: 147-155.
- [10] Maa, J., Li, W., Zhang, X. and Kou, H. Tensile properties and temperature-dependent yield strength prediction of GH4033 wrought superalloy. *Materials Science & Engineering*, 2016; 676:165-172.

- [11] Choi, I-R., Chung, K-S. and Kim, D-H. Thermal and mechanical properties of high-strength structural steel HSA800 at elevated temperatures. *Materials and Design*, 2014; 63: 544-551.
- [12] Ramazani, A., Schwedt, A., Aretz, A., Prahl, U. and Bleck, W. Characterization and modelling of failure initiation in DP steel. *Computational Materials Science*, 2013; 75: 35-44.
- [13] Sodjit, S. and Uthaisangsuk, V. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. *Materials & Design*, 2012; 41: 370-379.
- [14] Qiang, X., Bijlaard, F.S.K. and Kolstein, H. Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N: Experimental study and recommendations for fire-resistance design. *Fire Safety Journal*, 2013; 55: 15-21.
- [15] Mao, H-H., Qi, X., Cao, J., An, L-C. and Yang, Y-T. Effect of Si on high temperature oxidation of 30Cr 13 stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2017; 24: 561-568.
- [16] Ran, Q., Peng, W., Xu, Y., Li, J. and Xiao, X. Self-repairing behavior of oxidation diffusion layer and phase transformation mechanism during tensile test of 19Cr duplex stainless steels with various Mn content. *Corrosion Science*, 2015; 90: 535-543.
- [17] Kadkhodapour, J., Butz, A. and Ziaei Rad, S. Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual-phase steel. *Acta Materialia*, 2011; 59: 2575-2588.
- [18] Wulpi, D.J. Understanding How Components Fail, ASM International, 2000.
- [19] Kadkhodapour, J., Butz, A., Ziaei-Rad, S. and Schmauder, S. A Micro mechanical study on failure initiation of dual phase steels under tension using single crystal plasticity model. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27: 1103-1125.



Method for Reducing Defect in Electroplating Process

Pongsakorn Kantichaimongkol^{1,*} and Parames Chutima^{1,2}

¹ Regional Centre for Manufacturing Systems Engineering, Chulalongkorn University,
254 Phayathai Rd, Wang Mai, Pathum Wan, Bangkok, 10330, Thailand

² Department of Industrial Engineering, Chulalongkorn University,
254 Phayathai Rd, Wang Mai, Pathum Wan, Bangkok, 10330, Thailand

*E-mail: Pongsakorn.kanti@gmail.com, Tel. 085-990-0171

ABSTRACT

There are many startup companies established every day because the industry is changing rapidly. Each company requires a competitive edge in order to survive in this environment. To respond to these needs, many startup R&D companies need to implement concept such as Six Sigma and DMAIC. The Six Sigma approach has been increasingly implemented around the world especially in the manufacturing sector in order to improve productivity and reduce the defect. This paper discusses the defect reduction and productivity improvement in a startup innovation R&D company. The paper deals with an application of the DMAIC methodology in an industry which provides a milestone to define the problem, quantify the problem, reduce and eliminate sources of variation in manufacturing process, in order to optimize these operation variables using new solution from the Improve phase. The outcome of the research will be sustained because the approach such as new control plan and work description from the Control phase. From this research the implementation of DMAIC reduces the defect in manufacturing process from 24% to 0% leading to better utilization of resources and maintains consistent of product quality.

1. INTRODUCTION

1.1 Product

In 2014, the company did the R&D project to develop “cheap and efficient method to recover the precious metal from industry waste water”. The result of the project was an electrowinning unit with a special cathode cell. Although the electrowinning method which uses electricity to extract metal from ion state is not a new method, in fact, it is pretty old and inefficient method, but the company found the solution to greatly enhance this method performance. This greatly improved electrowinning unit. The electrowinning unit has two important components (Figure 1), the unit and the special cell. The cell part was the result of R&D project and it was the most significant part to the performance of the electrowinning unit and it is a consumable part. In order for the electrowinning unit to operate the cell must perfectly fit with the unit slots. However the current manufacturing method was unable to achieved this.

When the product was about to launch the problem was found. About 24% of the cells were unable to fit with the units. Although the defect was found before the launch but this event severely affects the company. Firstly, the company lost about 75,000 Baht from this event. Secondly, the delivery date was delayed for at least 1 month and this affects the credit of the company. Finally, if the defect cell was able to pass the installing stage, it has high chance to breakdown during the operation which will cost the company about 200,000 Baht per unit. This was due to the company service policy. All the damage and problem that is done by the company product or solution will be fully responsible by the company.

1.2 Six Sigma

Six Sigma can be defined in many terms. Six Sigma is an approach in statistical analysis and measuring the defects per million opportunities between the mean and the nearest specification limit [1]. This can involve anything from a component, piece of material and service [2]. It was proven that improving quality actually

reduced operating costs and increased customer satisfaction and also changed the mindset from improving quality will costs money to improving quality will increase profit [3].

In Six Sigma, the DMAIC method is used as one of the main procedures. The method breaks down specific project into phases; Define, Measure, Analyze, Design, and Control [2].

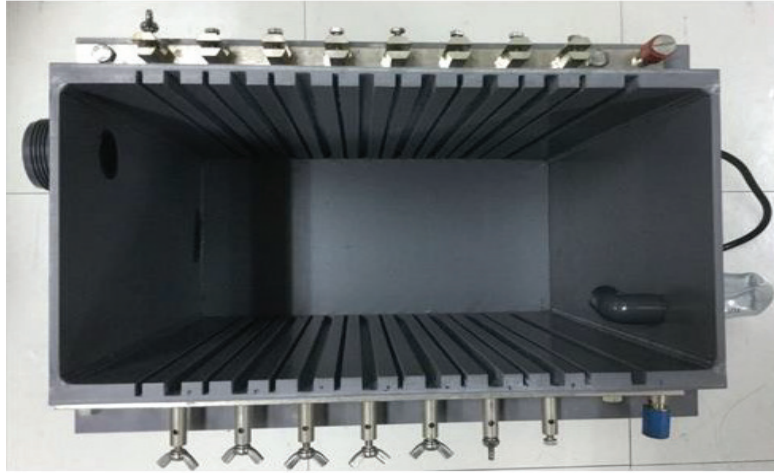


Figure 1 Electrowinning unit and cell slot

1.2.1 Define

The first step is called Define which starts with identifying the problem. For example, the problem can be associated with customer problem, product failure, financial concern, and process inefficiency. In order to achieve a suitable goal, understanding and defining the customer of the project is very important. Moreover, the scope of the project and resources needed have to be defined. The project resources include the personnel for the project and other costs seen up to this point. The team can evaluate the project's potential critically with a well estimated costs and benefits [2].

1.2.2 Measure

After the problem is defined, next is the measure stage. The flow, feedback loops and hand-offs for the processes are mapped. From this information, models with quantitative understanding of the process can be obtained.

The actual process data are then used to ensure reliable process evaluation [4].

When the current performance level is determined, it will be compared to the best possible performance which the baseline can be the best historical performance. The benchmark is with a similar process or engineering maximum capacity calculations. From the known current performance and ideal performance, a

more accurate potential benefits for the project can be predicted [2].

1.2.3 Analyze

From the first two steps of DMAIC, the business problem is defined, related processes identified and current performance evaluated. In the analyze step, the objective is to locate the difference that may arise from the goals set and the identified processes. The understanding of the relationship between the cause and effect of the problem is the most important for any improvements. The inputs that drive the output performance will be focused after the output performance of the processes' is known [2].

1.2.4 Improve

In this stage, the factors bringing the process towards the statistical solution are identified and validated. The solution will not be validated unless the desired change is observed from changing the factors. It is important to use appropriate statistical tools to evaluate the solution effects on the whole system's performance as not all changes come without any shortcomings [5].

1.2.5 Control

The final step of DMAIC is the control stage. After the solutions are found and validated, an implementation and maintenance is required. The critical inputs are set under control and the process outputs monitored. Monitoring will

ensure sustained improvements in new processes and operating procedures and that the process will not operate the old way [4].

2. THE DMAIC METHODOLOGY

2.1 Define phase

In this phase, the team will focus on identifying the problem of this project. The type and characteristic of the defects will be clarified. The official team and the responsibility will also be decided using project charter.

Project Charter

In this phase, the team was set up in order to set out the roles and responsibilities. The scope and the goals for the project are also presented. The charter consists of a business case file with possible benefit and background to the project. The project status table was revised as the project proceeds. The team realized that there was many type of information that will be needed in the further phase. In order to make sure that the project will flow smoothly, the team also define some of the data that will be needed for the project and how or who they need to contact for the data. The only data that cannot be access was the in depth information about the raw material which was classified as information of supplier. However from the past experience and confirmation from expertise, the existing data was enough to use in the project [6,7].

Critical to quality

In this section, the team identified the type of defect and tried to find out the relation of each type with the customers' need. The process is heavily related to brainstorming, gathering information and investigating the rejected cell.

Voice of the customer

There were three main clearly visible type of defect at that moment. The first defect was identified as deformed of product at the middle. The second one was the product which deformed at the rim. The last one was the thickness at the rim of both side was thicker than designed [8,9].

The conversion from VOC to CTQ was related to the three type of defect that was identified. The potential CTQ, each CTQ represent each defect, was listed below:

CTQ for defect type 1: The dimension at the middle of the cell

CTQ for defect type 2: The deformed spots at the edge of the cell

CTQ for defect type 3: The thickness at the rim of the cell

2.2 Measure phase

In this phase, the team will characterize further into the selected CTQ and also identify the potential X's which affect the Y's.

Data collection plan

In order to gather the data needed for further analysis, the data collection plan was developed. There are many important steps that need to be addressed to ensure that the data collection process and measurement systems are stable and reliable. It was very important that the reasons for the measurement was clearly understood by everyone involved with the project and company so that the measurement procedure can be properly planned and ensure the good results of data collecting [10].

Measurement System Analysis

There was no MSA done directly for this project. The main reason for this was because there was the MSA, GAGE R&R ANOVA done for similar type of product recently. In the early state of developing this product, the MSA was done with the prototype product (Figure 2.1-2.2). The measurement that was used then, was the same one as the one that used in this project, furthermore, the company always calibrate tools and instruments.

The expertise also confirmed that the characteristic of cell in prototype phase and in this project is almost the same. There was only one different between them. While the current dimension of the product is 18x24 cm with thickness between 0.62-0.7 cm, the prototype was 10x10 cm with the same thickness. The skill of the operator should not have the noticeable effect with the data collecting because the measurement method and tool is very simple.

The data below shows the result of Gage R&R ANOVA Method. Total Gage R&R contribution in the % Study Var column (% Tolerance, %Process) was 26.58% which is still acceptable from the application. The Total Gage R&R could be reduced via using more accurate measurement tool to measure in term of three digit decimal. However the past experienced and research data proved that the current process did not required more advance tool. From the manufacturing, the process should increase the thickness only about 0.02 cm, but the defects one were at increased about 0.07 cm [11]. This shows that the current tool was suitable for the project in order to detect the defect cell.

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000442	7.29
Repeatability	0.0000250	4.13
Reproducibility	0.0000192	3.16
Operators	0.0000001	0.02
Operators*Parts	0.0000191	3.15
Part-To-Part	0.0005619	92.71
Total Variation	0.0006060	100.00

Process tolerance = 0.15

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.0066458	0.039875	27.00	26.58
Repeatability	0.0050000	0.030000	20.31	20.00
Reproducibility	0.0043780	0.026268	17.78	17.51
Operators	0.0003043	0.001826	1.24	1.22
Operators*Parts	0.0043674	0.026204	17.74	17.47
Part-To-Part	0.0237034	0.142220	96.29	94.81
Total Variation	0.0246174	0.147705	100.00	98.47

Figure 2.1 Gage R&R for thickness (Part 1)

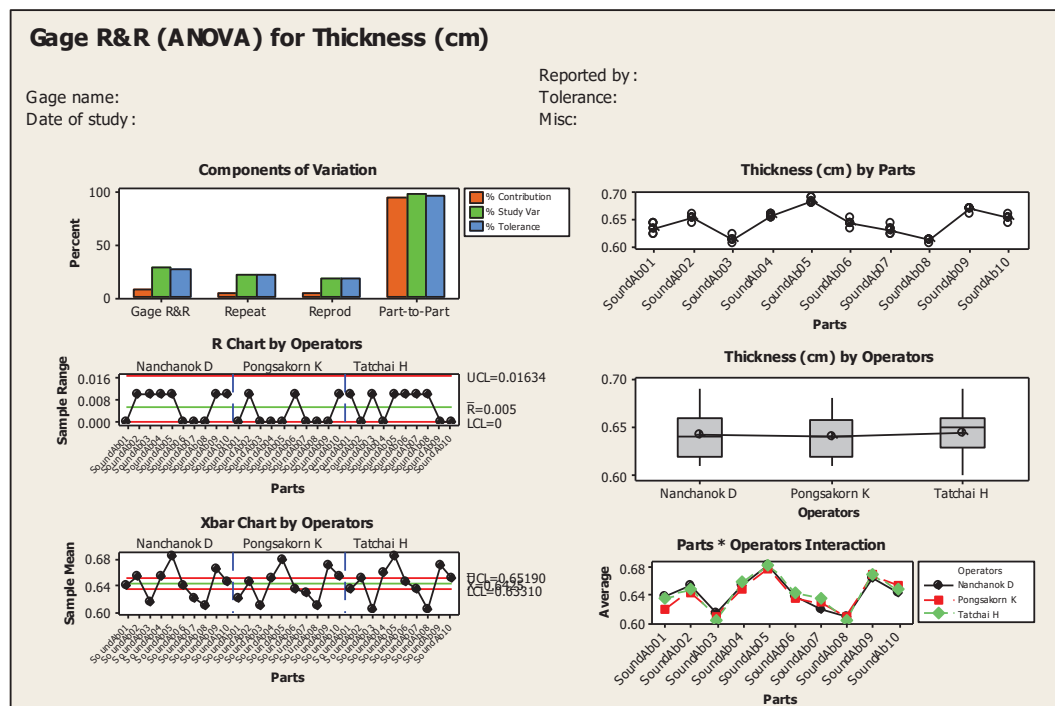


Figure 2.2 Gage R&R for thickness (Part 2)

Baseline performance

The DPMP baseline was determined from the number of defect from the last three batches (Figure 3). The average thickness was calculated and recorded into the measurement sheet. The current defect rate is 25.33% which is very high and affect the profit of the company in many ways (Figure 4). The data were short-term which is not accurate, but for practical reasons, there was no data that could be further collected. The

data will at least give some basic information and habit of the product and process.

2.3 Analyze phase

In this phase, the team will focus on identifying the root cause of the rapidly increasing thickness at the edge problem and improvement opportunities

Find Root Cause

Some of the potential attribute was already discussed from previous phase. In order to truly

understand and improve the Y's, the rapidly increasing of rim thickness, root cause analysis

such as 5 Whys and Fish bone diagrams were used.

$$\text{DPMO} = \frac{(\text{Number of Defects} \times 1,000,000)}{((\text{Number of Defect Opportunities/Unit}) \times \text{Number of Units})}$$

Defects	19	DPMO	63333.33
Opportunities	75	Sigma Level	3.0
Defect Opportunities per unit	4		

Figure 3 Baseline DPMO

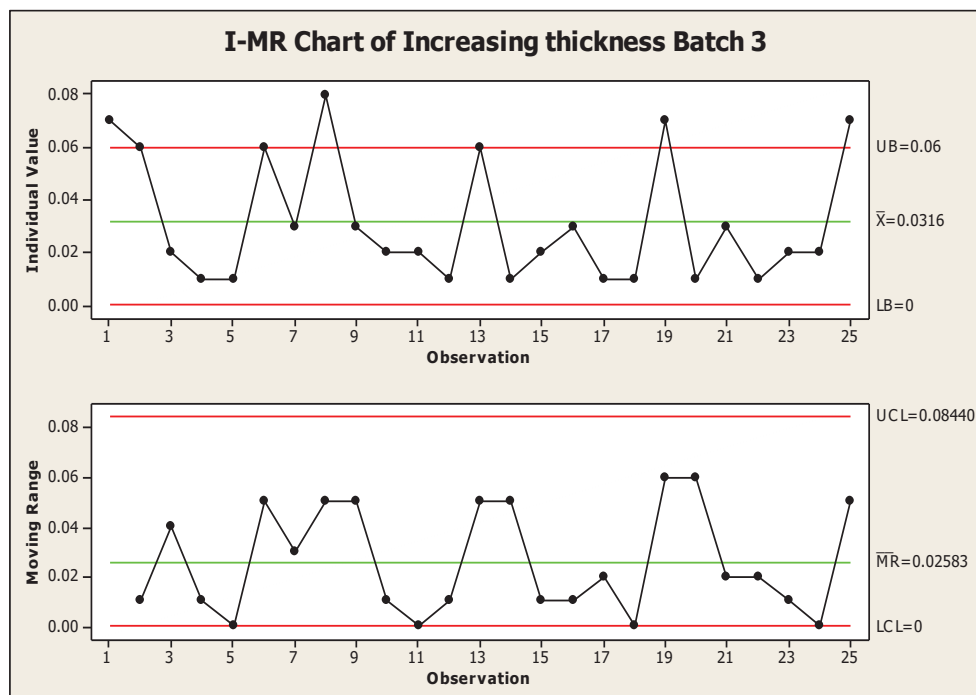


Figure 4 Control Chart

Fishbone Diagram and 5 Whys

The data from previous meetings were used in this phase in order to identify the potential factors which are the root of the problem. The simple fishbone diagram using, 6M categories, was formed in order to identify the root of the problem. After that, the team goes further in each category via using 5 Whys to dig deeper into the root of the potential cause [12].

From the Fishbone diagram and 5 Whys analysis, some of the low possibility or low severity was cut off from further analysis. The list below is the potential root cause of the problem.

1. Corrosion at cathode and anode
2. Unstable rack
3. Untight contact point

4. Bath temperature
5. High current density
6. Solution level
7. pH level
8. Chemical content
9. High humidity
10. Metal practical

Decision Matrix

After fishbone diagram and 5 Whys were done, the decision matrix was used in order to identify the priority of the selected factors. The team transfer the information from Fishbone diagram and 5 Whys into criteria and rating system. First the criteria was identify (Table 1). Then, the analysis was carried on by brainstorming in team and use rating system to

rate each factor. Each person individually rated the factors. Then everyone compared the result and discussed the reason with each other [7].

Potential X's --Theories to be Test

X1: High bath temperature can increase the rim thickness rapidly.

X2: High Current density can increase the rim thickness rapidly.

X3: The unstable rack can increase the rim thickness rapidly

Design of experimental: DOE

As can be viewed in previous discussion, the rapidly increasing of thickness depends on many variables. A further analysis of these factors was done to identify which variables have significant impact to the product. Plating temperature, current density, and the degree of rack were the control variable that will be used in this section DOE.

Table 1 Decision Matrix for factors

Decision Factors		Corrosion at anode cathode	Ungiht contact point	Unstable rack	High bath temperature	High current density	Solution level	pH level	Chemical content	High humidity	Metal particle
		Criteria	Wt.								
Impact	3	2	1	3	3	3	1	1	1	1	1
Ease of experiment	1	2	2	1	2	3	3	1	1	1	1
Time consuming	2	1	3	3	3	3	3	2	1	1	1
Cost	2	3	2	3	3	3	1	1	1	1	1
Technical support	1	3	2	3	3	3	2	2	1	1	2
Safety of operator	3	3	1	3	3	3	3	2	3	2	1
Potential to implement	3	3	2	3	3	3	3	1	1	1	1
Weighted score		37	26	43	44	45	34	21	21	18	16
Priority		4	6	3	2	1	5				

Criteria	Definition
Impact	How likely this factor is the cause of the problem
Ease of experiment	How easily the experiment can be done to analysis this factor
Time consuming	How long it take to run the experiment
Cost	How much the experiment cause
Technical support	How ready is the equipment, instrument and tool
Safety of operator	How dangerous is the experiment
Potential to implement	How realistic to implement the solution if this factor was the root cause

Experimental

The two-level, full factorial design for three factors, namely the 2^3 design, was used in this experiment. This implied eight runs. Table 2 represents the 2^3 design for this experiment.

Table 2 Factorial design

Run#	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

	Factor	-	+
Temperature	A	60 C	65 C
Current density	B	0.1 A/sq.cm	0.12 A/sq.cm.
Degree of rack	C	0	15 degree

Key to Factor Selection

Factor A = Temperature ; B = Current density ; C = Degree of rack

Analysis a factorial design

For the 95% confidence interval, $L = 0.05$. P-values < 0.05 indicate the effect is significant. The P-values of current density and rack degree is less than 0.05 which indicates that the effect is

significant (Figure 5). There is no sign of significance from the temperature effect.

The same result is also represented in normal plot of the standardized effects (Figure 6). The Rack, C, degree has greater effect than current density, B, then follows by the interaction between them, BC.

Analyzing a factorial design

For the main effect, rack degree and current density has a significant effect to the thickness (Figure 7). The temperature almost does not affect the thickness of the product because there is small difference of thickness between low and high level.

Analyzing Interactions

There was no interaction between the temperature with either the rack degree or current density (Figure 8). This is a sign of interaction between current density and rack degree. The response of thickness increases when both current density and rack degree is at high level.

DOE Conclusion

From this experiment, both current density and rack degree is a root cause of the problem. There is a clear sign which showed the effect to the thickness. The interaction between them also increases the response. These factors should be controlled to be at the low level in order to reduce the defect in the process.

Factorial Fit: Thickness versus Temperature, Current dens, Rack degree

Estimated Effects and Coefficients for Thickness (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.053833	0.001267	42.50	0.000
Temperature	-0.004333	-0.002167	0.001267	-1.71	0.106
Current density	0.025667	0.012833	0.001267	10.13	0.000
Rack degree	0.059000	0.029500	0.001267	23.29	0.000
Temperature*Current density	-0.000333	-0.000167	0.001267	-0.13	0.897
Temperature*Rack degree	-0.000333	-0.000167	0.001267	-0.13	0.897
Current density*Rack degree	0.011000	0.005500	0.001267	4.34	0.001
Temperature*Current density* Rack degree	-0.003667	-0.001833	0.001267	-1.45	0.167

S = 0.00620484 PRESS = 0.001386
R-Sq = 97.66% R-Sq(pred) = 94.75% R-Sq(adj) = 96.64%

Figure 5 Factorial Fit: Thickness versus Temperature, Current density, Rack degree

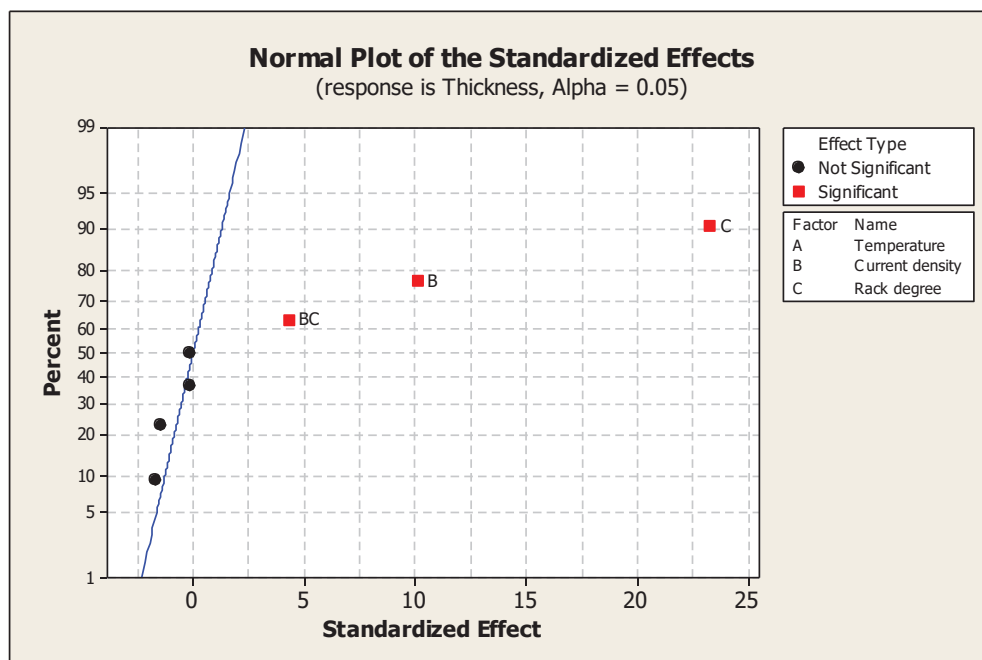


Figure 6 Normal plot of the standardized effects

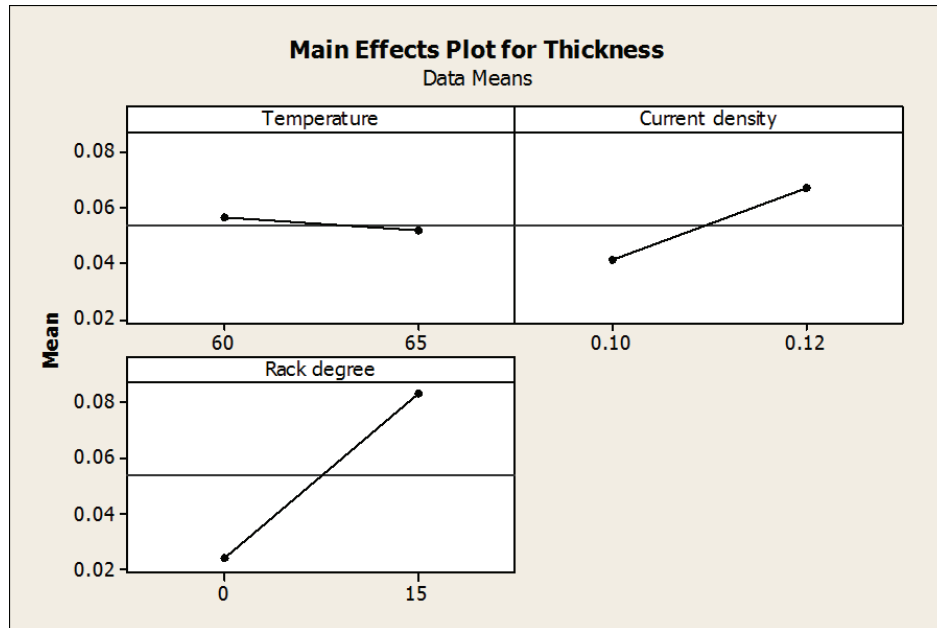


Figure 7 Main effects plot for thickness

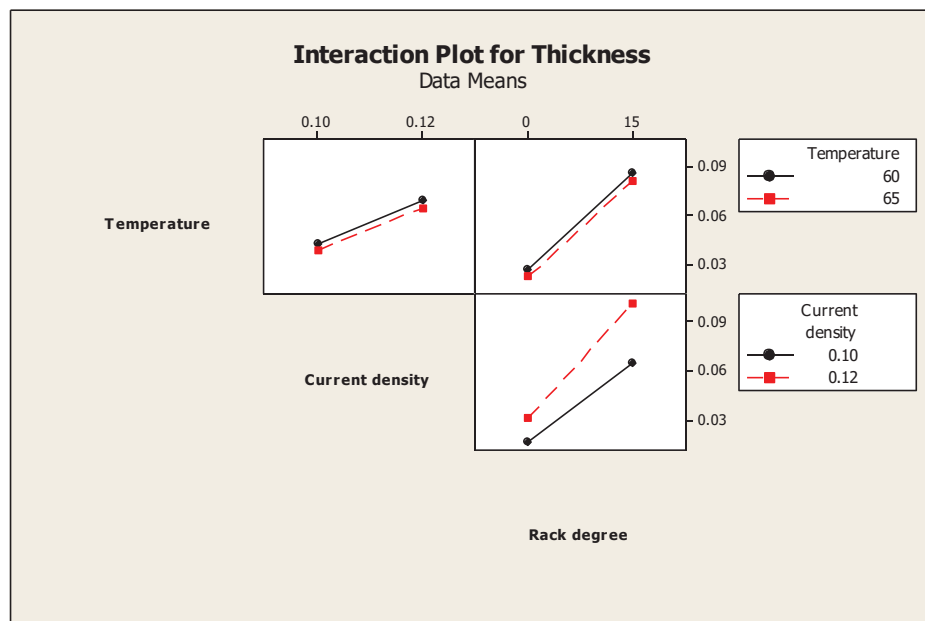


Figure 8 Interaction plot for thickness

2.4 Improve

In the previous phase, the factors which greatly influence the rapid increase of edge thickness have been found. Next phase was Improve, which involved developing the implementation of the solution.

Decision matrix

From the possible solutions, there were many solutions which could potentially solve this problem. These solutions were suggested via expertise, conventional solution in industry and textbook. However not all of them could be

practically implemented, due to many reason, such as budget, order size, current technology, etc. The remaining four solutions could not be chosen or eliminated via quick analysis phase because there were many factors which should be concerned and each of them have no critical weakness like the first three. The team used decision matrix together with rating system [12].

Equipment design

From previous analysis and brainstorming the new equipment was very important in order to solve the current problems. From marketing

research and supplier interview, there was no equipment that completely fit with our product. The company had two choices, develop by ourselves and outsource the developing.

In-house or outsource

The company already has the resource and material for developing the rack. The rack design normally involves standard testing such as conductive test, which can also be done via current tools and equipment. Although they are not a complex process, the design and drawing the model itself may take longer time than we expected. It also required knowledge and experienced in rack design field. This was both an advantage and disadvantage for both developing rack ourselves and outsourcing it. In

order to help the team decide, Abetti's Matrix (Figure 9) had been used.

From Abetti's Matrix, the equipment developing process is important to the business. It increases the ability to compete in the market and also increase the efficiency in the team. The model suggests investing and developing this process. The company will gain a huge benefit via developing the rack ourselves because the company is a R&D company. The others product which company designed in the past may have suffered from the similar situation. If the company has the ability to develop the equipment, it will strongly support the core of the company aspect.

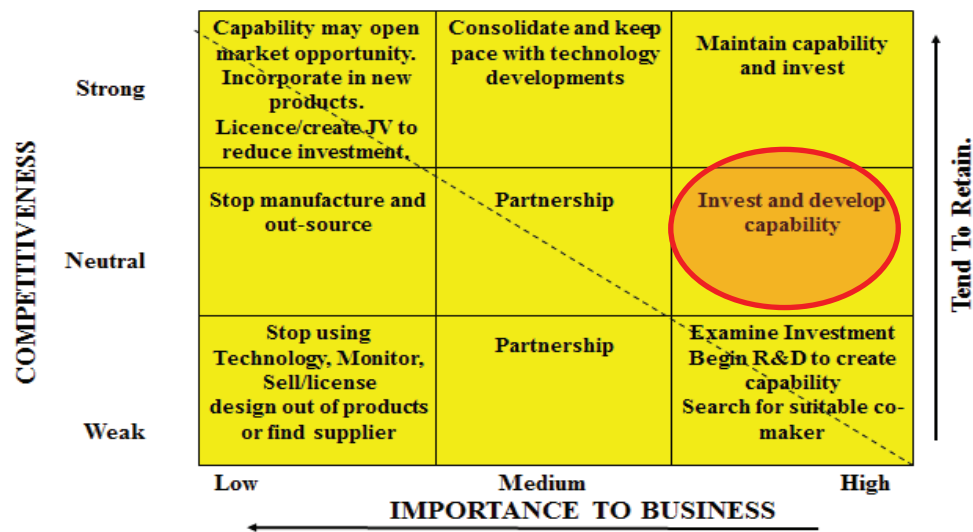


Figure 9 Abetti's Matrix for Testing stage

2.5 Control

In this phase, the team made sure that the result from this project will sustain. The main focus was to design the control plan that suits the project and the company. Most of the data and information was already mention in other phases such as FMEA, so the control plan was like an official version of the process procedure [10].

3. RESULT AND DISCUSSION

The objective of this research is to understand the root cause of the problem in order to develop the solution that best suit the company's current state. The project followed the DMAIC methodology and aligned the mindset of the team with company strategy. As a result of the project, the team was able to achieve the goal of the project, Table 3. The current defect rate after implementing the solution in phase 4 was zero percent.

The company also gained indirect benefits from this project. The first one was the IP about the new equipment and product. The second one was the investment from investor through pitching using this project result to support the business strategy.

Table 3 Overall Project status

Phase	Y=f(x)goal	Result
Define	Identify Y's	Thickness at the rim was chosen as the business Y.
Measure	Identify X's	The rapidly increasing of thickness at the edge of the cell, X's, can represent the cell and it is the factor that drive Y's.
Analysis	Identify the root cause of X's and improvement opportunities	Rack degree and current density were the root cause of the problem
Improve	Define changes required to X's to reach optimal Y	The new rack design together with the dummy significantly reduce the variant of the process and defect
Control	Manage X's and monitor Y	The control plan and important technical sheet

CONCLUSION

Although Six Sigma and DMAIC methodology focuses on reducing the variance of the process, but they can also increase the possible of finding new innovation. In a stable market environment, the aspect of variance

reduction of Six Sigma is proved to be very effective. However, it is not very effective in the high level dynamic market with changing of technology all the time. In this situation, the aspect of understanding the customer and the process becomes more important to the business. The VOC and CTQ usually used in Six Sigma process which gives company an in depth understanding in term of customer perspective. The analysis of process, SIPOC and process mapping, tells company the strength and weakness of the current process. When combined these two aspect, it is clear that DMAIC can

enhance the innovative thinking in the organization, not only for existing customer but also the new customer [13].

This is very important to the success of the project. As mentioned before, the product is very unique and new to the market. Due to the product itself is already considered to be an innovation, it is very difficult to find the existing available solution for the problem. The clearly understanding of the problem and its root is required in order to design a method or even the innovation one to success.

ABBREVIATION

R&D	Research and Development
DMAIC	Define, Measure, Analysis, Improve, Control
CTQ	Critical to quality
VOC	Voice of customer
MSA	Measurement system analysis
Gage R&R	Gage repeatability and reproducibility
ANOVA	Analysis of variance
VAR	Variance
COMP	Computing
SD	Standard deviation
SV	Standard Variance
Toler	Tolerance
DPMO	Defects per million opportunities
6M	Method, Mother nature, Man, Measurement, Machine, Materials
FMEA	Failure Mode Effects Analysis

REFERENCE

- [1] Brady, J. E. and Allen, T. T. Six Sigma Literature: A Review and Agenda for Future Research. *Quality and Reliability Engineering International*, 2006; 22(3): 335-367.
- [2] Bhote, K. R. The Ultimate Six Sigma: Beyond Quality Excellence to Total Business Excellence. New York: AMACOM/American Management Association, 2002.
- [3] Harry, M. J., & Schroeder, R. Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations: Currency. 2005.
- [4] Eckes, G. Six Sigma for Everyone. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [5] Eckes, G. The Six Sigma revolution. *Business Digest*, 2001; 11-18.
- [6] Affinity Diagram. [online] available: <https://www.isixsigma.com/dictionary/affinity-diagram/>
- [7] Swinney, Z. Six Sigma Project Charter (With Template). [online] available: <https://www.isixsigma.com/tools-templates/project-charter/six-sigma-project-charter/>
- [8] Lee, H., Han, J., and Suh, Y. Gift or threat? An examination of voice of the customer: The case of MyStarbucksIdea.com. *Electronic Commerce Research and Applications*, 2014; 13(3): 205-219.
- [9] Sharma, M. Know the Drill: Rooting out critical-to-quality factors. [online] available: <http://asq.org/quality-progress/2014/12/back-to-basics/know-the-drill.html>
- [10] Tague, N. R. The Quality Toolbox, Second Edition (2 ed.): ASQ Quality Press, 2005.
- [11] Bari, G. A. D. Electrodeposition of Nickel Modern Electroplating. John Wiley & Sons, Inc, 2010; 79-114.

- [12] Pyzdek, T., and Keller, P. A. Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels (3 ed.). New York: McGraw-Hill, 2003.
- [13] Parast, M. M. The effect of Six Sigma projects on innovation and firm performance. *International Journal of Project Management*, 2011; 29(1), 45-55.



ผลของระยะเวลาเก็บต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักแห้ง จากมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้น Effect of Retention Time on Dry Basis Biogas Production from Broiler Manure with Rice Husk Bedding

นรายุทธ วงศ์สมุทร^{1*} รสสุคนธ์ จະวะนะ² และ พฤษัย อักกะรังสี³
Narayut Wongsamut^{1*}, Rotsukon Jawana² and Pruk Aggarangsi³

^{1,3}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

²สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 155 ม.2 ต.แม่เหียะ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50100

^{1,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
239 HuayKaew Road, Suthep, Muang, Chiang Mai, 50200

²Energy Research and Development Institute - Nakorping Chiang Mai University
155 M.2, Mae Hia, Muang, Chiang Mai 50100

*Corresponding author: narayut_benz@hotmail.com

Telephone Number: 08-9191-2950

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงผลของระยะเวลาเก็บที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้น โดยการหมักแบบแห้ง ซึ่งใช้ถังหมักที่มีใบพัดกวนขนาด 1,000 ลิตร และได้ทำการควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยศึกษาที่ระยะเวลาเก็บ 30 และ 60 วัน จากผลการศึกษาพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบรองพื้นที่ระยะเวลาเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.239 ± 0.016 และ 0.249 ± 0.016 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ โดยสัดส่วนก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 48.9 ± 0.6 และ 52.0 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.17 ± 2.76 และ 79.55 ± 8.88 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 53.76 ± 3.57 และ 84.32 ± 8.37 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดลองที่ระยะเวลาเก็บ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ระยะเวลาเก็บ 60 วัน มีปริมาณแอมโมเนียในโตรเจน $2,409 \pm 208$ มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถควบคุมไม่ให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนได้ แต่ที่ระยะเวลาเก็บ 30 วัน ตรวจพบปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนสูงถึง $4,017 \pm 221$ มิลลิกรัมต่อลิตร อาจมีความเสี่ยงต่อเสถียรภาพของระบบได้

คำสำคัญ: ระยะเวลาเก็บ/ การหมักแบบแห้ง/ มูลไก่เนื้อ/ ก๊าซชีวภาพ

ABSTRACT

This article focuses on finding design and operating conditions of dry fermentation biogas system using broiler manure mixed with rice husk bedding as input substrate. The research was conducted in 1000-liter plug-flow dry anaerobic reactors with horizontal paddle agitator. Total solid content of input for this experiment was controlled at 25% with reactor retention time of 30 and 60 days. The results for

biogas yield at retention time of 30 and 60 days were 0.239 ± 0.016 and 0.249 ± 0.016 $\text{Nm}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$ with average CH_4 content of $48.9 \pm 0.6\%$ and $52.0 \pm 0.9\%$ respectively. The removal efficiency of total solids were $45.17 \pm 2.76\%$ and $79.55 \pm 8.88\%$ for the retention time of 30 and 60 days respectively and corresponding the removal efficiency of volatile solids were $53.76 \pm 3.57\%$ and $84.32 \pm 8.37\%$. In addition for the retention time at 60 days, the measured $\text{NH}_3\text{-N}$ is in the range of $2,409 \pm 208$ mg/l which shall not affect methanogen microorganism activity compared to $4,017 \pm 221$ mg/l for 30-day retention time which can lead to process inhibition.

Keywords: Retention Time/ Dry Fermentation/ Broiler Manure/ Biogas

1. บทนำ

ประเทศไทยมีปัญหาการขาดความมั่นคงทางด้านพลังงาน จึงต้องมีการนำเข้าน้ำมันและก๊าซธรรมชาติจากประเทศเพื่อนบ้าน อีกทั้งมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในประเทศค่อนข้างสูง ทำให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นจำนวนมาก และส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมโดยตรง ดังนั้นพลังงานทดแทนจึงเป็นพลังงานทางเลือกที่ประเทศไทยต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงาน ซึ่งในปัจจุบันภาครัฐได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ และพลังงานลม เป็นต้น

ก๊าซชีวภาพถือเป็นพลังงานทดแทนอีกทางเลือกหนึ่งที่เกิดจากการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์หรือของเสียโดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งปัจจุบันมีการนำก๊าซชีวภาพมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โรงงานอุตสาหกรรม และสถานประกอบการต่างๆ เป็นต้น โดยสามารถใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในการขนส่ง การผลิตกระแสไฟฟ้า การทำความร้อนหรือความเย็นได้อีกด้วย เนื่องจากพลังงานจากก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่สะอาดและช่วยลดปัญหามลภาวะด้านสิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืน จากข้อมูลแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (AEDP2015) ของกระทรวงพลังงาน ระบุในปี พ.ศ. 2557 ได้มีการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่มาจากน้ำเสียและของเสียต่างๆ มีปริมาณ 311.50 เมกะวัตต์ ซึ่งในแผนพัฒนาพลังงาน 15 ปี ได้วางเป้าหมายไว้ว่าภายในปี พ.ศ. 2579 ประเทศไทย

ต้องมีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่มาจากน้ำเสียและของเสียต่างๆ เพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 600 เมกะวัตต์ [1]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม สัตว์ปีก เช่น ไก่เนื้อ จึงจัดว่าเป็นหนึ่งในสัตว์เศรษฐกิจของประเทศไทย จากข้อมูลของสำนักงานปศุสัตว์จังหวัดระบุนว่าในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีการเพาะเลี้ยงไก่เนื้อจำนวน 261,431,345 ตัว [2] โดยของเสียที่ได้คือมูลไก่เนื้อที่ปนกับวัสดุที่ใช้รองพื้น เพื่อช่วยลดความชื้นจากน้ำที่หกและมูลไก่ ช่วยให้ไก่ไม่สัมผัสมูลที่ขับถ่ายออกโดยตรง ส่วนมากการเลี้ยงไก่เนื้อในประเทศไทยจะใช้เกล็ดเป็นวัสดุรองพื้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี หาง่ายในท้องถิ่นและมีราคาถูก ซึ่งของเสียจากผลผลิตทางการเกษตรและจากกิจกรรมทางปศุสัตว์สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานก๊าซชีวภาพได้ แต่พบว่ามูลสัตว์ปีก ควรมีการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับหมักก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมูลสัตว์ปีกมีปริมาณไนโตรเจนสูง โดยเฉพาะมูลไก่เนื้อหากเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน และแอมโมเนียมไอออนที่ความเข้มข้นมากกว่า 1,500 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ อาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ [3] วิธีการลดปัญหาการยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากความเป็นพิษของแอมโมเนีย สามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การเจือจางมูลไก่ด้วยน้ำเพื่อลดความเข้มข้นให้อยู่ในระดับร้อยละ 0.5-3 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งจากงานวิจัยของอิษฎัวร์ และคณะ [4] ที่พบว่าอัตราการเจือจางมูลไก่เนื้อด้วยน้ำที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพคือ 1:3 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก ส่งผลให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

เท่ากับ 0.341 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.166 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบร่อนพื้น โดยควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบ และอัตราการกวน ให้คงที่ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง ด้วยเทคโนโลยีการหมักแบบแห้งในระดับนำร่อง (Pilot scale) เพื่อนำองค์ความรู้และข้อมูลที่ได้ไปขยายผลและประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับฟาร์มไก่เนื้อได้ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 มูลไก่เนื้อ

มูลไก่เนื้อที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นำมาจากขยะค้ำป้อนฟาร์ม อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน โดยมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบร่อนพื้นถูกลดขนาดด้วยมือ และแยกสิ่งเจือปน เช่น ขนไก่ ก้อนหิน หรือกรวดออกก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS), ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (VS), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) เป็นต้น เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษาต่อไป

2.1.2 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบแห้งขนาด 1,000 ลิตร

ถังหมักแบบแห้งใช้ในการเดินระบบสำหรับศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำมาจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.7 เมตร ความยาว 3 เมตร ด้านในมีใบพัดกวน ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1.5 กิโลวัตต์ (2 แรงม้า) และชุดเกียร์ทดรอบในการขับเคลื่อนเพลาลูกกลิ้งควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ตั้งเวลาในการกวนแบบอัตโนมัติ โดยด้านขวาของถังหมักมีทางป้อนวัตถุดิบแบบหมุนมือ ส่วนด้านซ้ายของถังหมักมีวาล์วเปิดระบายน้ำเสียและกากของวัตถุดิบแบบหมุนมือ ด้านล่างของถังหมักมีวาล์วระบายน้ำเสียและตะกอน ส่วนด้านบนของถังหมักจะติดตั้งท่อก๊าซเพื่อส่งก๊าซผ่านไปยังมิเตอร์วัดปริมาตรก๊าซ และมีจุดเก็บก๊าซตัวอย่างสำหรับต่อกับเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซ เพื่อตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพดังแสดงในรูปที่ 1

2.2 วิธีการทดลอง

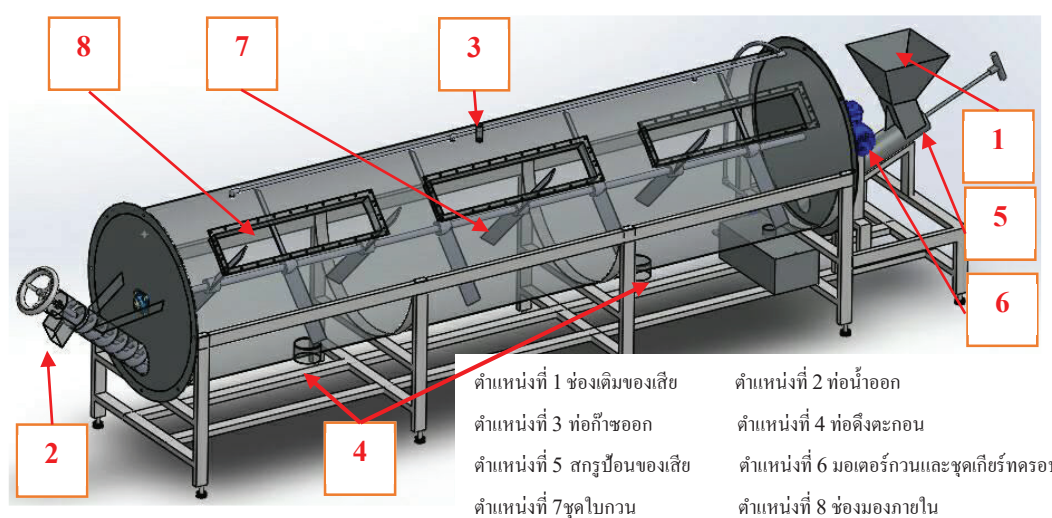
ระบบหมักแบบแห้งในสภาวะแบบไร้ออกซิเจนเป็นระบบที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบอยู่ระหว่างร้อยละ 20-40 [5] ในการดำเนินการศึกษาระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมด้วยถังหมักแบบแห้งขนาด 1,000 ลิตร ปริมาตรการหมัก 700 ลิตร ออกแบบและพัฒนาขึ้นมาโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยได้ป้อนมูลไก่เนื้อเข้าระบบทุกวัน ซึ่งปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบมูลไก่เนื้อที่ใช้ทดลองได้ควบคุมให้มีค่าร้อยละ 25 ด้วยการเจือจางด้วยน้ำ หรือโดยประมาณที่อัตราส่วนมูลไก่เนื้อต่อน้ำเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก [4] ซึ่งได้ทำการศึกษการผลิตก๊าซชีวภาพของมูลไก่เนื้อที่ระยะเวลาเก็บกัก 30 และ 60 วัน ตามลำดับ [4] และควบคุมการกวน 30 รอบต่อวันที่ เป็นเวลา 10 นาที ทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยทำการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (RSD) ไม่เกิน 10%

ตารางที่ 1 ความถี่ในการตรวจวัด ตำแหน่งที่เก็บน้ำตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ตำแหน่งที่	ความถี่	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้
		(ต่อสัปดาห์)	
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (%)	3	7	Gas Data รุ่น GFM406

ตารางที่ 1 (ต่อ) ความถี่ในการตรวจวัด ตำแหน่งที่เก็บน้ำตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ตำแหน่งที่	ความถี่ (ต่อสัปดาห์)	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือที่ใช้
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (m^3)	3	7	Gas meter
ค่าพีเอช, pH	1,2,4	7	pH meter HORIBA รุ่น pH 11
ปริมาณกรดไขมันระเหย, VFA (mg/L)	2	2	Titration Method
ปริมาณของแข็งทั้งหมด, TS (mg/L)	1,2	2	Gravimetric Method
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด, VS (mg/L)	1,2	2	Gravimetric Method
สภาพความเป็นด่าง, Alkalinity (mg/L as $CaCO_3$)	2	2	Titration Method
ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน, NH_3-N (mg/L)	1,2	2	Titration Method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด, TKN (mg/L)	1,2	2	Macro Kjeldahl Method



รูปที่ 1 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบแห้งขนาด 1,000 ลิตร

2.3 การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผล

หลังจากเริ่มต้นเดินระบบโดยการเติมเชื้อตั้งต้นที่นำมาจากจุดคูกากตะกอนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักรางจากมูลไก่ไข่ปริมาณ 300 ลิตร จากนั้นป้อนมูลไก่เนื้อผสมกับน้ำเข้าระบบแบบต่อเนื่องปริมาณ 11.67 กิโลกรัมต่อวัน สังเกตให้ระดับน้ำในถังหมักแบบแห้งอยู่ในระดับน้ำออกจึงหยุดป้อน จากนั้นปล่อยทิ้งไว้หนึ่ง

สัปดาห์เพื่อให้จุลินทรีย์ปรับตัวให้เคยชินกับของเสียในสถานะแบบไร้ออกซิเจน [6] จึงเริ่มทำการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบวันละครั้งเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เก็บที่ 60 วัน ซึ่งในการเตรียมมูลไก่เนื้อที่ได้จากฟาร์มแต่ละรอบการเลี้ยงนั้นได้ทำการส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดก่อนทุกครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณมูลไก่เนื้อและน้ำที่ใช้ในการเลี้ยงให้มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด

เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจึงปรับเพิ่มโหลดเพื่อศึกษา ระยะเวลาที่เก็บ 30 วัน ที่มีอัตราการป้อนมูลไก่เนื้อผสม กับน้ำเข้าระบบทุกวันประมาณ 23.30 กิโลกรัมต่อวัน โดย ควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดให้เท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ เช่นกัน

ในการดูแลและติดตามระบบได้ทำการตรวจวัด องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซออกซิเจน (O_2), ก๊าซ อื่นๆ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือก๊าซไข่เน่า (H_2S) พร้อมทั้งบันทึกค่าตัวเลขมิเตอร์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ ผลิตได้ในแต่ละวัน ซึ่งมีท่อก๊าซออกในตำแหน่งที่ 3 (รูปที่ 1) เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบก๊าซ ชีวภาพและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละวัน และทำการเก็บตัวอย่างของเสียจากจุดเก็บจำนวน 2 จุด ด้วยความถี่ 2 ครั้งต่อสัปดาห์ คือ น้ำเข้าระบบ (ก่อน ป้อนเข้าตำแหน่งที่ 1) และน้ำออกระบบ (ตำแหน่งที่ 2) โดยการหมุนวาล์วทางระบายน้ำเสียด้วยมือ เพื่อนำกาก ตะกอนออกมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงใน ตารางที่ 1 และคำนวณหาปริมาณแอมโมเนียอิสระของน้ำ ออกระบบ ซึ่งจะแทนค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) และค่าพีเอช (pH) ของน้ำออกระบบ ในสมการที่ 1 ซึ่งในแต่ละการทดลองได้ทำการทดลองจนระบบเข้าสู่ สภาวะคงที่ โดยพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีค่า ส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (RSD) ไม่เกิน 10% เพื่อหาสภาวะ ที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพของ ฟาร์มไก่เนื้อต่อไป

$$\text{Free ammonia (mg/l)} = \frac{\text{TKN}}{\frac{1+10^{-\text{pH}}}{10^{-\text{pK}}}} \quad (1)$$

เมื่อ

TKN คือปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)

pH คือค่าพีเอชที่วัดได้จากน้ำออกระบบ

pK มีค่าเท่ากับ 9.3 อ้างอิงที่อุณหภูมิ 35 °C

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากผลการเดินระบบเพื่อหาระยะเวลาที่เก็บที่ เหมาะสมต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่ ระยะเวลาที่เก็บ 30 และ 60 วัน ซึ่งได้ใช้ระยะเวลาทำการ ทดลองทั้งหมด 46 และ 90 วัน ตามลำดับ จึงได้พิจารณา ประสิทธิภาพของระบบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่า พีเอช (pH) ปริมาณกรดไขมันระเหย (VFA) สภาพความ เป็นด่าง (Alk) ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ปริมาณแอมโมเนียอิสระของน้ำออกระบบ ประสิทธิภาพ ในการกำจัดสารอินทรีย์ อัตราก๊าซชีวภาพ และอัตราการ ผลิตก๊าซมีเทน เป็นต้น

3.1 ค่าพีเอช สภาพความเป็นด่าง และปริมาณกรดไขมัน ระเหย

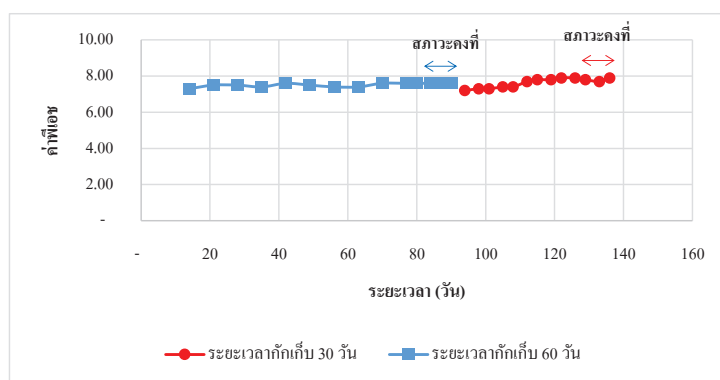
เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ค่าพีเอชน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.2 ± 0.1 และ 8.2 ± 0.1 ส่วนค่าพีเอชของน้ำออกระบบมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 7.8 ± 0.1 และ 7.6 ± 0.0 ตามลำดับ (รูปที่ 2) ซึ่งจะ เห็นได้ว่าทั้ง 2 การทดลองมีค่าพีเอชของน้ำออกใกล้เคียง กัน และไม่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซ ชีวภาพ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.6 – 7.4 [7]

สภาพความเป็นด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช [7] จากผลการ ทดลองพบว่าสภาพความเป็นด่างของน้ำออกระบบที่ ระยะเวลาที่เก็บ 30 และ 60 วัน เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะ คงที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $16,414 \pm 78$ และ $11,268 \pm 311$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 3) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสภาพ ความเป็นด่างที่สภาวะคงที่มีค่าสูงกว่าช่วงแรกที่เริ่มต้น เดินระบบ เนื่องจากในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนมีการผลิตกรดไขมันระเหย เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้น ในการผลิตก๊าซชีวภาพ [8] จากการที่ค่าสภาพความเป็น ด่างของระบบสูงขึ้นตามปริมาณกรดไขมันระเหย แสดงให้ เห็นว่าจุลินทรีย์ในระบบมีเสถียรภาพในการรักษาค่าพีเอช ของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ ดังนั้นสภาพความ

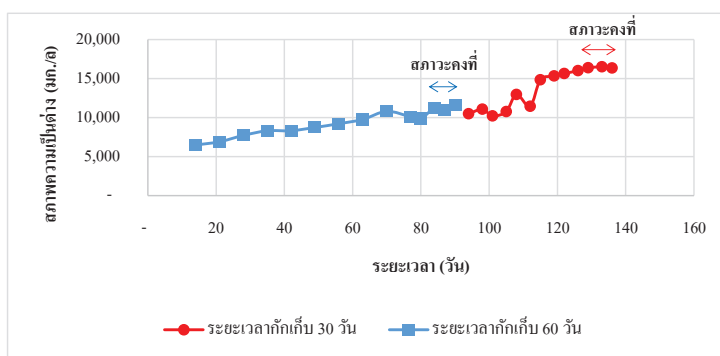
เป็นค่าจะถูกนำมาพิจารณาประสิทธิภาพของระบบร่วมกับปริมาณกรดไขมันระเหย

สภาวะการเกิดกรดไขมันระเหยในระบบบ่งบอกให้รู้ถึงความสามารถในการย่อยสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ผลิตกรด สภาวะที่เหมาะสมและไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน และยังส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพอีกด้วย [9] ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยเป็นตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่าตัวแปรอื่นๆ หากมีการเปลี่ยนสภาวะของการเดินระบบ เช่น ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ชนิดของสารอินทรีย์ และ อุณหภูมิ เป็นต้น [10] และจากรูปที่ 4 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากระบบที่ระยะเวลาเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $5,223 \pm 678$ และ $2,438 \pm 189$ มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกจากระบบที่ระยะเวลาเก็บ 30 วัน มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ระยะเวลาเก็บ 60 วัน เนื่องจากระยะเวลาเก็บที่สั้นลง ซึ่งได้มีการป้อนของ

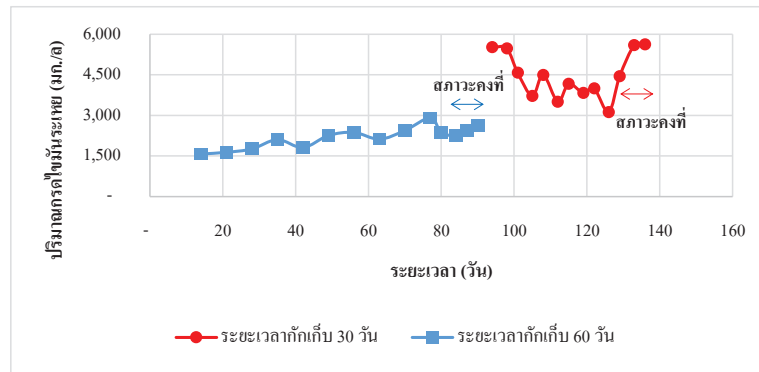
เสียเข้าสู่ระบบมากขึ้น ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบสูงขึ้นส่งผลให้ขั้นตอน Acidogenesis ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีการผลิตกรดไขมันระเหยสูงขึ้น [8] ดังนั้นในการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบควรพิจารณาอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) เนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ถึงการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบหมักย่อย หากมีค่ามากกว่า 0.40 แสดงว่าระบบอาจมีบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอต่อการรักษาค่าพีเอชที่เหมาะสมได้ จึงอาจส่งผลให้ระบบล้มเหลวได้ [11] จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) ของการทดลองที่ระยะเวลาเก็บเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 ± 0.04 และ 0.22 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อที่ระยะเวลาเก็บ 30 และ 60 วัน มีค่าไม่เกิน 0.40 จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในระบบหมักย่อย



รูปที่ 2 ค่าพีเอชของน้ำออกระบบ



รูปที่ 3 สภาพความเป็นด่างของน้ำออกระบบ

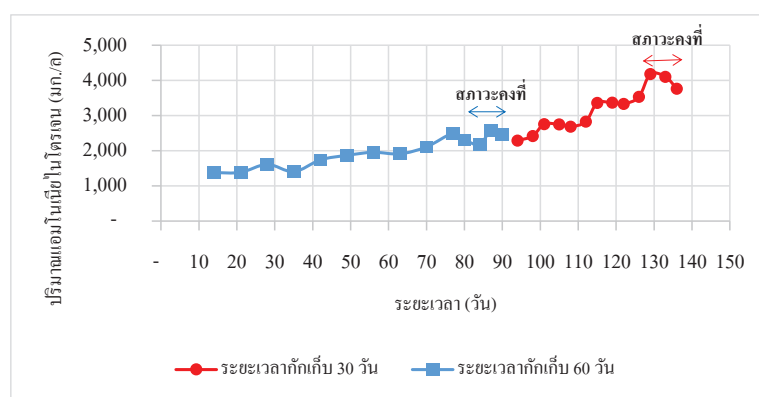


รูปที่ 4 ปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำออกระบบ

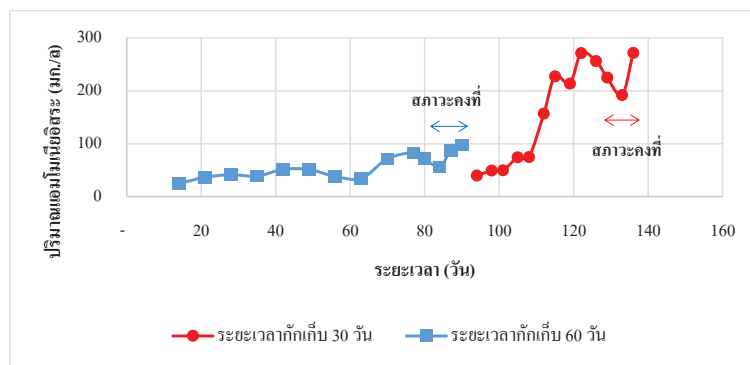
3.2 ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจน

มูลไก่เนื้อจัดเป็นมูลสัตว์ที่มีปริมาณไนโตรเจนค่อนข้างสูง เมื่อปริมาณไนโตรเจนเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอมโมเนียในโตรเจนที่มีค่ามากกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ประกอบกับค่าพีเอชของระบบสูง อาจยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในระบบได้ [3] แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบ อุณหภูมิ และระยะเวลาพักเก็บอีกด้วย [12] จากผลการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บ 30 และ 60 วัน พบว่าน้ำออกระบบมีปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนเฉลี่ยเท่ากับ $4,017 \pm 221$ และ $2,409 \pm 208$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่า 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรดังแสดงในรูปที่ 5 แต่เมื่อ

คำนวณหาปริมาณแอมโมเนียอิสระจากสมการที่ 1 พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 230 ± 40 และ 80 ± 22 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 6) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณแอมโมเนียอิสระเริ่มยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนในระบบที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร [13] จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาพักเก็บ 30 วัน มีปริมาณแอมโมเนียอิสระสูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ยังไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบ โดยสังเกตได้จากอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/Alk) มีค่าไม่เกิน 0.4 แสดงให้เห็นได้ว่าระบบมีระยะเวลาพักเก็บนานเพียงพอ และมีบัพเฟอร์เพียงพอต่อการรักษาค่าพีเอชที่เหมาะสมได้จึงไม่ส่งผลให้ระบบเกิดการสะสมตัวของปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนแต่อย่างใด



รูปที่ 5 ปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนของน้ำออกระบบ

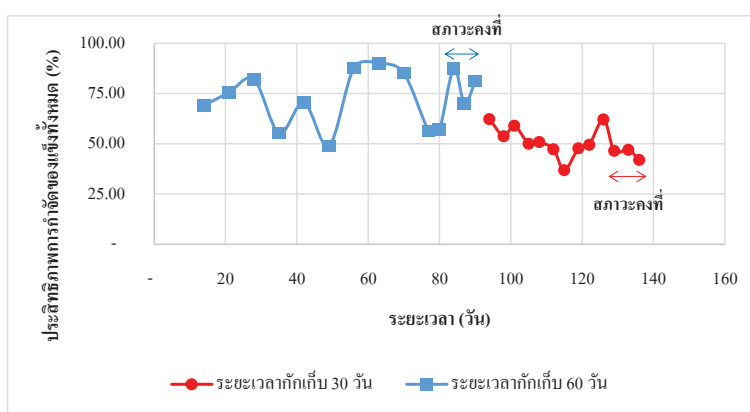


รูปที่ 6 ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำออกระบบ

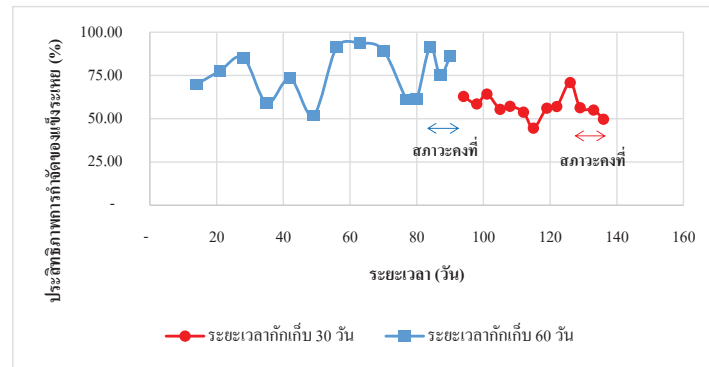
3.3 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ของการทดลองที่ระยะเวลาเก็บ 30 และ 60 วัน พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.17 ± 2.76 และ 79.55 ± 8.88 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (รูปที่ 7) และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 53.76 ± 3.57 และ 84.32 ± 8.37 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (รูปที่ 8) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดและ

ปริมาณของแข็งระเหยของการทดลองที่ระยะเวลาเก็บ 60 วัน มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ระยะเวลาเก็บ 30 วัน เนื่องจากในกระบวนการหมักย่อยที่มีระยะเวลากักเก็บนานมากพอ จะทำให้จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับของเสียได้ทั่วถึงมากกว่าการทดลองที่ระยะเวลาเก็บสั้นๆ [14] ทำให้ระยะเวลากักเก็บที่สูงขึ้นทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่สูง



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย

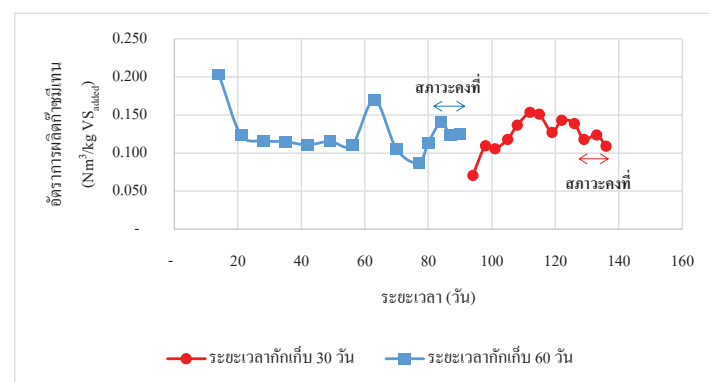
3.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพ อัตราการผลิตก๊าซมีเทน และ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคืออัตราการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในระบบได้ โดยมูลไก่เนื้อที่ใช้ทดลองซึ่งมีแกลบปนอยู่เป็นจำนวนมาก และแกลบประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน จึงทำให้ย่อยสลายได้ยาก ทั้งนี้ในการเลือกระยะเวลาการกักเก็บที่เหมาะสมหรือระยะเวลาการกักเก็บที่ไม่สั้นเกินไป อาจส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าเลือกใช้ระยะเวลาการกักเก็บที่ต่ำหรือสั้นเกินไป ต้องมีการดื่งกากตะกอนออกจากระบบในปริมาณมาก อาจส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถหลุดปนออกมาได้

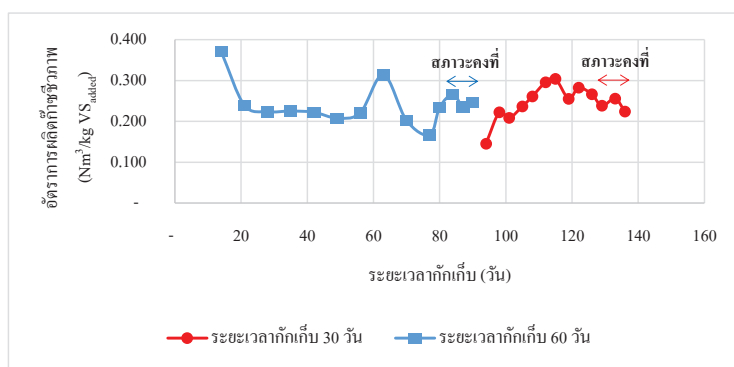
จากการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ พบว่าการทดลองระยะเวลาการกักเก็บ 30 และ 60 วัน ทำให้ระบบมี

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.117 ± 0.007 และ 0.130 ± 0.009 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ (รูปที่ 9) และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.239 ± 0.016 และ 0.249 ± 0.016 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ (รูปที่ 10) และมีสัดส่วนก๊าซมีเทน 48.9 ± 0.6 และ 52.0 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อปริมาณมูลไก่เนื้อที่มีค่าเท่ากับ 181 ± 11 และ 182 ± 8 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อตัน สำหรับการทดลองที่ระยะเวลาการกักเก็บ 30 และ 60 วัน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของศกรินทร์ [15] ซึ่งใช้เทคโนโลยีการหมักแบบเปียก (ตารางที่ 2) จะเห็นว่าผลจากการศึกษานี้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มากกว่า และยังช่วยลดการใช้พลังงานในการผสมมูลไก่เนื้อเพื่อเดินระบบ จึงมีความเหมาะสมในการนำไปขยายผลใช้งานได้จริง



รูปที่ 9 อัตราการผลิตก๊าซมีเทน



รูปที่ 10 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการศึกษากาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อกับงานวิจัยอื่นๆ

อ้างอิง	สักรินทร์ (2555)			การศึกษานี้	
ระยะเวลากักเก็บ (วัน)	40	80	40	30	60
รูปแบบการทดลอง	ASBR (TS 5.5%)	ASBR (TS 11%)	CSTR (TS 5.5%)	หมักแบบแห้ง (TS 25%)	หมักแบบแห้ง (TS 25%)
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (Nm ³ /kg VS _{added})	0.140±0.015	0.058±0.004	0.112±0.01	0.239±0.016	0.249±0.016

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่อก๊าซชีวภาพแบบหมักแห้งของมูลไก่เนื้อที่เจือปนด้วยแกลบร่อนพื้น โดยทำการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วัน ซึ่งควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดของมูลไก่เนื้อที่ใช้ทดลองให้มีค่าร้อยละ 25 ด้วยการเจือจางด้วยน้ำให้คงที่ตลอดระยะเวลาทดลอง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ผลการทดลองพบว่า การทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วันมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.239 ± 0.016 และ 0.249 ± 0.016 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐานต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าระบบ และมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเท่ากับ 48.9 ± 0.6 และ 52.0 ± 0.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.17 ± 2.76 และ 79.55 ± 8.88 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยเท่ากับ 53.76 ± 3.57 และ 84.32 ± 8.37 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 และ 60 วันตามลำดับ

ระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ระยะเวลากักเก็บ 60 วัน เนื่องจากระบบมีปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนอยู่ในระดับที่ยังไม่ส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ และมีปริมาณแอมโมเนียอิสระอยู่ในระดับที่ไม่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน ทำให้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการทดลองที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน อีกทั้งการเลือกระยะเวลากักเก็บ 60 วัน ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ที่สูงกว่า และยังช่วยลดปัญหาการหลุดของจุลินทรีย์ที่ปนมากับของเสียออกจากระบบ เพราะที่ระยะเวลากักเก็บ 60 วันมีการดึงของเสียออกจากระบบ (น้ำออก) ในปริมาณที่น้อยกว่า

เมื่อนำผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อโดยการหมักแบบแห้งไปเปรียบเทียบกับกาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อโดยการหมักแบบเปียกซึ่งเดินระบบแบบ ASBR และ CSTR [15] พบว่าการศึกษาค้นคว้านี้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า และยังสามารถลดปริมาณน้ำ

ที่ต้องนำมาผสมมูลไก่เนื้อก่อนป้อนเข้าระบบ ดังนั้นการ
ผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยเทคโนโลยีการหมัก
แบบแห้ง จึงสามารถนำไปขยายผลประยุกต์ใช้งานจริงได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์
พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวง
พลังงาน ที่ให้ทุนสนับสนุนทุนโครงการวิจัย และ
ขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลังงาน ที่สนับสนุน
วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและ
พัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่
สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579. กระทรวงพลังงาน, 2558; 7-15.
- [2] สำนักงานปศุสัตว์อำเภอ. ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่. กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ, ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กรมปศุสัตว์, 2558.
- [3] McCarty, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Public works, 1964; 95(9): 107-112.
- [4] อิชฎีวร ปานผดุง รสสุคนธ์ จะวะนะ และ สิริชัย คุณภาพดีเลิศ. การกำจัดแอมโมเนียในมูลไก่เนื้อด้วยการไล่แบบ
สูญญากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ, การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15, สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
แห่งประเทศไทย, 2559.
- [5] Nizami, A.S. and Murphy, J.D. What type of digester configurations should be employed to
produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010;
14(6): 1558-1568.
- [6] ไพเชษฐ์ ธรรมภณ. ผลของระยะเวลาเก็บน้ำของถังปฏิกรณ์สร้างกรดต่อการบำบัดน้ำเสียมูลสุกรโดยกระบวนการ
บำบัดแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2541.
- [7] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การ
ควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553.
- [8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ขั้นตอนและปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพ. กระทรวงพลังงาน, 2540.
- [9] Ahring, B. K., Sandberg, M., Angelidaki, I. (1995). Volatile fatty acids as indicators of process
imbalance in anaerobic digestors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995; 43(3): 559–
565.
- [10] Bolzonella, D., Battistoni, P., Mata-Alvarez, J. and Cecchi, F. Anaerobic Digestion of Organic
Solid Wastes: Process Behavior in Transient Conditions, *Water Science and Technology*,
2003; 48(4): 1-8.
- [11] Zickefoose, C. and Hayes, R.B. Anaerobic Sludge Digestion: Operations Manual, 1976; EPA
430/9-76-001.
- [12] Laclos, F.H., Desbois, S. and Saint-Joly, C. Anaerobic Digestion of Municipal Solid Organic
Waste: Valorga Full-scale Plant in Tilburg, The Netherlands. *Water Science and Technology*,
1997; 36(6-7): 457-462.
- [13] McCarty, P.L. and McKinney, R.E. Salt toxicity in anaerobic digestion. *Journal water pollution
control federation*, 1961; 33(4): 399-415.

- [14] นิลวรรณ ไชยหนู และ พฤษัย อัคระรังสี. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสถานะเทอร์โมฟิลิกเพื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2552; 16 (3): 74-84
- [15] ศักรินทร์ หนูเทพ. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมพลังงาน, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- [16] Abouelenien, F., Nakashimada, Y., and Nishio, N. Dry mesophilic fermentation of chicken manure for production of methane by repeated batch culture. *Journal of bioscience and bioengineering*, 2009; 107(3): 293-295.
- [17] Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., Nishio, N., and Nakashimada, Y. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. *Bioresource technology*, 2010; 101(16): 6368-6373.
- [18] Bujoczek, G., Oleszkiewicz, J., Sparling, R., and Cenkowski, S. High solid anaerobic digestion of chicken manure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000; 76(1): 51-60.
- [19] Liu, Z. G., Zhou, X. F., Zhang, Y. L., and Zhu, H. G. Enhanced anaerobic treatment of CSTR-digested effluent from chicken manure: the effect of ammonia inhibition. *Waste management*, 2012; 32(1): 137-143.
- [20] Ndon, U. J., and Dague, R. R. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic sequencing batch reactor treatment of low-strength wastewater. *Water Research*, 1997; 31(10): 2455-2466.
- [21] Polprasert, C. Organic Waste Recycling, John Willey&Sons Inc. New York, 1989.



การผลิตเอทานอลจากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสีย จากอุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้ Ethanol Production from Algae in Cultivation Using Waste Water of Vegetable and Fruit Processing Plant

ศุภกิจ ไชยพูน* เรวัต พงษ์พิสุทธินันท์ วาสนา คำโสภาส วสิน วงศ์วิไล และ กมลสัน เรืองฤทธิ์
Supakid Chaipoot*, Rewat Phongphisutthinant, Wassana Kamopas, Wasin Wongwilai
and Komsan Rungrit

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
Science and Technology Research Institute, Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai, 50200
E-mail: ic41062@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปและพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลนิธิโครงการหลวง โดยได้ทำการศึกษาระบวนการเตรียมสาหร่ายเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล ศึกษาการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายทั้ง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Pediastrum* sp. AARL G060, *Chlorella* sp. AARL G049, Microalgal consortium และ *Scenedesmus* sp. AARL G085 และวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลการศึกษาได้ว่า สาหร่ายสายพันธุ์ Microalgal consortium มีความเหมาะสมที่สุด ในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล ด้วยวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) ที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 50 นาที ร่วมกับการย่อยเซลลูโลส ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 2.00 (มิลลิลิตรต่อสาหร่าย 1 กรัม) บ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ซึ่งทำให้ได้น้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 20.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เท่ากับ 21.36 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และน้ำตาลนอนรีดิวซ์ เท่ากับ 1.10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร นอกจากนี้การผลิตเอทานอลจากสาหร่ายด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เหมาะสม พบว่า ความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อเท่ากับ 6.71 ใช้ปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ร้อยละ 1.30 บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 8 วัน ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้อยู่ที่ร้อยละ 7.17 สำหรับกระบวนการผลิตเอทานอลจากสาหร่าย Microalgal consortium จำนวน 400 กรัม โดยผ่านกระบวนการเตรียมสาหร่าย และกระบวนการผลิตเอทานอลในสภาวะที่เหมาะสม พบว่า เอทานอลที่ได้มีความเข้มข้นร้อยละ 7.30 ปริมาณน้ำตาลปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่ม เท่ากับ 1.15 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาณของเหลวที่ได้ 3,289 มิลลิลิตร ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากสาหร่าย มีค่าเท่ากับ 39.08 บาทต่อลิตร ซึ่งมีระยะเวลาการคืนทุนในการผลิตเอทานอล มีค่าเท่ากับ 4.77 ปี และมีอัตราผลตอบแทนในการลงทุน มีค่าเท่ากับ 21% ตามลำดับ

คำสำคัญ: เอทานอล, การเพาะเลี้ยงสาหร่าย, น้ำเสีย, อุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้

ABSTRACT

This research studied ethanol production from algae cultivated by waste water from processing and product development plant of Royal Project Foundation. Ethanol productions from 4 strains of algae

including *Pediastrum* sp. AARL G060, *Chlorella* sp. AARL G049, Microalgal consortium and *Scenedesmus* sp. AARL G085 were studied along with their production cost and economic value. The results showed that the microalgal consortium was the most suitable raw material for ethanol production. Steam explosion at 45 psi for 50 minutes combined with enzymatic digestion by cellulase with concentration of 2.00 ml per 1 g of algae at 50 ° C for 70 hours resulted in 20.25 mg/ml of reducing sugar, 21.36 mg/ml of total sugar content and 1.10 mg/ml of nonreducing sugar. In addition, the optimal condition for ethanol production from algae was 1.30 % *Saccharomyces cerevisiae* using, incubated at pH 6.71 and room temperature for 8 days. The resulting ethanol concentration was 7.17%. When increase the amount of Microalgal consortium to 400 g, it was found that ethanol production from the pretreated algae under optimal conditions had ethanol concentration, reducing sugar and volumes of liquids of 7.30%, 1.15 mg / ml and 3,289 ml, respectively. The cost of ethanol production from algae was 39.08 baht per liter with simple payback period of 4.77 years and 21% of return on investment.

Keyword: Ethanol, Algae Cultivation, Waste Water, Vegetable and Fruit Processing Plant

1. บทนำ

ประเทศไทยมีโรงงานแปรรูปอาหารสดเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีปริมาณน้ำทิ้งจากการแปรรูปเป็นจำนวนมากด้วยเช่นกัน การนำน้ำทิ้งจากการแปรรูป มาใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายนั้น สามารถช่วยบำบัดน้ำและลดปริมาณสารอาหารในน้ำทิ้งได้ ซึ่งสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำเสีย จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายลักษณะ เช่นการนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเอทานอล น้ำมันชีวภาพ หรือนำไปเป็นอาหารสัตว์ เป็นต้น สำหรับการผลิตเอทานอลจากสาหร่าย และนำไปใช้ประโยชน์เชิงพลังงานนั้น มีความน่าสนใจ เนื่องจากปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมีราคาที่สูงและผันผวน การผลิตเอทานอลจากสาหร่ายและนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก จะช่วยเสริมให้เกิดความมั่นคงทางพลังงานและเศรษฐกิจ นอกจากนี้ การเพาะเลี้ยงสาหร่ายในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้จะช่วยลดปริมาณสารอาหารในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งถือเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ทางหนึ่ง

การผลิตเอทานอลจากสาหร่ายในกลุ่มที่ไม่ใช่อาหารเป็นทางเลือกที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากสาหร่ายสามารถสังเคราะห์แสงเองได้ เจริญเติบโตได้ดีและรวดเร็วในบ่อเพาะเลี้ยง ทั้งในระบบปิดและระบบเปิด สามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ที่เป็นแหล่งน้ำ แม้แต่ในน้ำเสียหรือน้ำทะเล และไม่ต้องการพื้นที่มากในการเจริญเติบโต สาหร่ายใช้พลังงานในการเจริญเติบโตน้อย ทำให้สามารถ

สะสมแป้งอยู่ภายในเซลล์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง โดยทั่วไปสาหร่ายจะสะสมในแป้งและน้ำตาล [1] ซึ่งสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลได้ โดยมีงานวิจัยของ Anwar et al. (2016) [2] ได้ทำการศึกษการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายที่ได้จากน้ำเสียโดยใช้ *Clostridium phytofermentans* DSM1183 พบว่าหลังจากทำการหมักสาหร่ายได้เอทานอลที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.52 g/L

สาหร่ายจัดเป็นกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งมีขนาดที่เล็กมากตั้งแต่สาหร่ายเซลล์เดียวที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ไปจนถึงสาหร่ายขนาดใหญ่ [3] ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายนั้น จะเป็นกระบวนการที่สร้างและสะสมพลังงานเพื่อใช้ในการดำรงชีวิต โดยพลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปน้ำตาล ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในกระบวนการไกลโคไลซิสด้วยการหายใจ และน้ำตาลอีกส่วนหนึ่งจะถูกเก็บไว้ในรูปแบบต่างๆ ตามผนังเซลล์หรือแวคิวโอล ซึ่งจะสะสมไว้ในรูปของ แป้ง น้ำตาล พอลิแซ็กคาไรด์ และไขมัน [4, 5] โดยน้ำตาลที่พบมากในสาหร่ายสีเขียวและสีน้ำตาล คือ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) เช่น กลูโคส [6] นอกจากนี้ Siddhanta et al. (2001) [7] ยังพบว่าน้ำตาลในสาหร่าย *Ulva* spp. เป็นน้ำตาลในกลุ่มของ น้ำตาลแรมโนส ไชโลส และกรดกลูโคโลนิก หรือเรียกว่า glucuronoxylorhamnan เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pengzhan et al. (2002) [8] ที่พบน้ำตาลแรมโนส

และไซโลส ในสาหร่ายกลุ่ม *U. pertusa* ซึ่งนอกจากน้ำตาลกลุ่มดังกล่าวแล้วยังพบน้ำตาล กลูโคส แมนโนส กาแลคโตส และอะราบินอส์อีกด้วย แต่พบในปริมาณน้อย มีงานวิจัยที่ให้ความสนใจการใช้ประโยชน์จากน้ำตาลที่สะสมในสาหร่ายโดยเฉพาะสาหร่ายที่ได้จากการเพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตเป็นเอทานอล โดยใช้เทคโนโลยีการหมักจากเชื้อจุลินทรีย์บริสุทธิ์ เช่น *Saccharomyces cerevisiae* ซึ่งเป็นยีสต์ที่ทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ไม่เหมาะสมได้ดี เช่น มีความทนต่อเอทานอลเข้มข้น ทนอุณหภูมิสูง ทนแรงดันออสโมซิส และมีความสามารถในการตกตะกอนร่วมด้วย เนื่องจากในการหมักเอทานอลตามทฤษฎีของกลูโคส จากกลูโคส 1 กรัม จะให้เอทานอล 0.51 กรัม แต่ในทางปฏิบัติแล้ว 1 กรัม กลูโคสจะให้เอทานอลเพียงร้อยละ 90 ของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงสารประกอบคาร์บอนไปเป็นผลิตภัณฑ์ตามทฤษฎีของผลผลิต (theoretical yield) [9] ซึ่งมีรายงานของ Sree et al. (2000) [10] พบว่า *Saccharomyces cerevisiae* V3. มีความทนต่อความร้อนสูง ทนแรงดันออสโมซิส และสามารถจับกลุ่มตกตะกอนได้เป็นอย่างดี ซึ่งให้ปริมาณเอทานอลที่สูงเท่ากับ 60 กรัมต่อลิตร จากกลูโคส 150 กรัม ที่ 40 องศาเซลเซียส

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปและพัฒนาผลิตภัณฑ์ มูลนิธิโครงการหลวง โดยพิจารณาสาหร่าย 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Pediastrum* sp. AARL G060, *Chlorella* sp. AARL G049, Microalgal consortium และ *Scenedesmus* sp. AARL G085 และแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบสาหร่ายเพื่อผลิตเอทานอล และกระบวนการหมักเอทานอลด้วยเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในการศึกษาได้พิจารณาสาหร่ายที่ให้น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอลในปริมาณที่สูงที่สุด นอกจากนั้นงานวิจัย

ได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเอทานอล รวมถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

2. วิธีการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้ใช้สาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปและพัฒนาผลิตภัณฑ์ มูลนิธิโครงการหลวงจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ *Pediastrum* sp. AARL G060, *Chlorella* sp. AARL G049, Microalgal consortium และ *Scenedesmus* sp. AARL G085 ซึ่งจากการตรวจวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสียที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง พบว่า มีลักษณะเป็นกรดอ่อน มีค่าการนำไฟฟ้าสูง และสารอาหารบางตัวสูง เช่น แอมโมเนียม-ไนโตรเจน (24.1 mg/L) นอกจากนี้ยังพบปริมาณสารอินทรีย์และอนินทรีย์เป็นจำนวนมากโดยมีค่า COD (3160 mg/L) และ BOD (2400 mg/L) สูง ซึ่งน้ำเสียที่มีสมบัติดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายได้

ในขั้นตอนการศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้ ได้ทำการศึกษาระบวนการเตรียมสาหร่ายเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล การศึกษาการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายทั้ง 4 สายพันธุ์ และการวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยขั้นตอนการศึกษาระบวนการเตรียมสาหร่ายเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล ได้ใช้สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. AARL G049 เป็นตัวแทนในการศึกษา เนื่องจากสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. AARL G049 จะมีอัตราการเติบโตค่อนข้างสูง และลักษณะของโครงสร้างเซลล์สาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. AARL G049 จะมีความคล้ายคลึงกับสาหร่ายอีก 3 สายพันธุ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสาหร่ายสายพันธุ์ *Chlorella* sp. AARL G049 เป็นตัวแทนในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมสาหร่ายเพื่อผลิตเป็นเอทานอล

2.1 การศึกษาการผลิตเอทานอลจากสาหร่าย

การทดลองที่ 1 ศึกษากระบวนการเตรียมสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับผลิตเอทานอล

ทำการศึกษาวิธีการทำลายโครงสร้างของเซลล์สาหร่าย ด้วยการปรับสภาพวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) โดยพิจารณาที่ความดัน 25-45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลา 20-60 นาที จากนั้น วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิคซ์ และน้ำตาลนอนรีดิคซ์ วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert 7.1 (Statease Inc., USA) [11]

จากนั้นศึกษาการย่อยสลายโครงสร้างของเซลล์สาหร่าย ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (ที่ความเข้มข้น 1.0-6.34 นอร์มอล) ผสมผงสาหร่ายและสารละลาย Citrate buffer ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.4 ในอัตราส่วน 1:10 โดยมวลต่อปริมาตร แล้วจึงนำไปทำลายโครงสร้างของเซลล์ ทำการแยกสารละลายออกจากของแข็งด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ 4,500 rpm เป็นเวลา 15 นาที แล้วกรองแยกสารละลายส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman® No.4 จะได้สารละลายที่นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิคซ์ และน้ำตาลนอนรีดิคซ์ตามวิธีการของ AOAC (2000)

เปรียบเทียบการศึกษการย่อยโครงสร้างของเซลล์สาหร่าย ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส โดยแปรผันปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่ปริมาณ 0.25–2.00 (มิลลิกรัมต่อสาหร่าย 1 กรัม) และใช้เวลาในการบ่มที่ 50 องศาเซลเซียส 24–72 ชั่วโมง หาปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยวางแผนการทดลองแบบ 2² Factorial experiment with 2 center points [11]

ทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์ น้ำตาลนอนรีดิคซ์และน้ำตาลทั้งหมดของสาหร่ายที่ผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ และผ่านการย่อยด้วยกระบวนการที่เหมาะสม

การทดลองที่ 2 ศึกษากระบวนการผลิตเอทานอลจากเชื้อบริสุทธิ์ คือ *Saccharomyces cerevisiae* โดยใช้

กระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมสาหร่ายจากการทดลองที่ 1 เพื่อให้เอทานอลสูงที่สุด

ทำการศึกษาความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เหมาะสมเพื่อผลิตเอทานอลสูงที่สุด โดยพิจารณาปริมาณความเป็นกรด-ด่างที่ 5.00–7.00 ปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ร้อยละ 0.10–1.50 ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2-10 วัน หลังจากนั้นทำการวัดปริมาณเอทานอล และปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์ที่เหลือจากการบ่ม โดยวางแผนการทดลองแบบ 2² Factorial experiment design with 2 center points [11]

การทดลองที่ 3 ศึกษาคุณภาพเอทานอลที่ผลิตได้จากสาหร่าย คือ ปริมาณเอทานอล ปริมาณน้ำตาลปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์ที่เหลือจากการบ่ม ปริมาณของเหลวที่ได้และปริมาณกากสาหร่ายที่เหลือจากการบ่ม

2.2 การวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [11]

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเอทานอล ได้วิเคราะห์หาต้นทุนการผลิต โดยอาศัยการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกกระบวนการผลิต โดยการวิเคราะห์ต้นทุนจะอาศัยวิธีการ Life Cycle Cost Analysis (LCC) ซึ่งเป็นวิธีการที่คิดค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ ทั้งนี้จะพิจารณาด้านทุนรวมรายปี (บาท/ปี) โดยพิจารณามูลค่าเงินลงทุนสุทธิ, ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิต และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา (บาท/ปี) ดังสมการที่ 1

$$C_{pu} = \frac{\mathcal{E}_P}{E_P} \quad (1)$$

เมื่อ C_{pu} คือ ต้นทุนต่อหน่วยการผลิต (บาท/หน่วยการผลิต), คือ ต้นทุนรวมรายปี (บาท/ปี) และ คือ การผลิตที่ผลิตได้ต่อปี (หน่วยการผลิต/ปี)

การหาต้นทุนรวมของการผลิตจะทำการคำนวณจากการทำสมมูลต้นทุน ดังสมการ 2

$$\mathcal{E}_P = \mathcal{E}_C + \mathcal{E}_E + \mathcal{E}_{O\&M} \quad (2)$$

เมื่อ C_p คือ ต้นทุนรวมรายปี (บาท/ปี), C_c คือ มูลค่าเงินลงทุนสุทธิ (มูลค่าเงินลงทุนที่หักมูลค่าซากแล้ว) (บาท/ปี), C_E คือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิต (บาท/ปี) และ $C_{O\&M}$ คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา (บาท/ปี)

นอกจากนี้ ทางโครงการจะทำการวิเคราะห์ระยะเวลากินทุน (Simple Payback Period, SPP) จากสมการ (3)

$$SPP = \frac{\text{First Cost}}{\text{Cost Saving or Profit}} \quad (3)$$

สำหรับผลตอบแทนในการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR) จะใช้เป็นเครื่องมือประกอบการตัดสินใจในการลงทุน โดยพิจารณาอัตราส่วนลดที่ทำให้มูลค่าเงินปัจจุบันสุทธิในการลงทุน (Net Present Value, NPV) เท่ากับศูนย์ หรือเข้าใกล้ศูนย์ วิธีนี้มีการนำเอาค่าอัตราดอกเบี้ยมารวมคำนวณด้วย ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ถูกต้องมากขึ้น วิธีการหาอัตราผลตอบแทนการลงทุนเป็นการหาโดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error) อัตราส่วนลดที่หาได้คือค่า IRR นั่นคือค่า i ที่ทำให้ $NPV(i)$ เท่ากับ 0 ทั้งนี้สามารถพิจารณาสมการที่ 4 และ 5

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1 + IRR)^t} - TIC = 0 \quad (4)$$

$$TIC = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1 + IRR)^t} \quad (5)$$

เมื่อ NCF_t คือ เงินจ่ายลงทุนตอนติดตั้งระบบ (Total investment Baht), IRR คือ อัตราผลตอบแทนในการลงทุน, n คือ อายุการใช้งานของระบบ (ปี) และ TIC คือ

ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Cost Savings) หรือ กำไรที่ระบบสามารถทำได้ (Profit) รายปีตั้งแต่ปลายปี 1 ถึง n (บาท)

3. ผลการวิจัย

การศึกษาวិธีการทำลายโครงสร้างของเซลล์สาหร่ายด้วยการปรับสภาพวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) การย่อยสลายโครงสร้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อให้เซลล์สาหร่ายแตกตัวก่อนการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส โดยใช้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเป็นตัวชี้วัดให้ผลการศึกษาดังนี้

3.1 ผลการศึกษาระบวนการเตรียมสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับผลิตเอทานอล

ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพสาหร่ายด้วยวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) ที่ความดัน 25-45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้เวลา 15-30 นาที โดยวางแผนการทดลองแบบ 2^2 Factorial experiment design with 2 center points และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert 7.1 (Statease Inc., USA) เพื่อสภาวะที่เหมาะสม สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 1 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปสมการถดถอย (Multiple regression) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองกับความดันและเวลาที่ระดับต่างๆ พบว่าความดันและเวลาในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำมีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการถดถอย ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 การทดลองในการศึกษาการปรับสภาพสาหร่ายด้วยกระบวนการระเบิดไอน้ำ

การทดลอง	รหัส	ความดัน (psi)	เวลา (min)	ปริมาณน้ำตาล (mg/ml)		
				น้ำตาลรีดิวซ์	น้ำตาลทั้งหมด	น้ำตาลนอนรีดิวซ์
1	(1)	25.00	15.00	0.62±0.02	3.22±0.02	2.60±0.01
2	a	40.00	15.00	1.28±0.02	3.84±0.02	2.56±0.01
3	b	25.00	30.00	0.85±0.02	3.81±0.01	2.96±0.01
4	ab	40.00	30.00	1.65±0.01	4.32±0.01	2.67±0.02
5	-α a	21.89	22.50	0.60±0.03	3.13±0.01	2.53±0.03
6	+α a	43.11	22.50	1.57±0.04	6.78±0.05	5.20±0.04
7	-α b	32.50	11.89	0.75±0.04	3.31±0.01	2.56±0.03
8	+α b	32.50	33.11	1.20±0.04	3.51±0.01	2.31±0.02
9	cp1	32.50	22.50	1.01±0.04	3.29±0.01	2.27±0.02
10	cp2	32.50	22.50	0.98±0.03	3.27±0.02	2.29±0.02

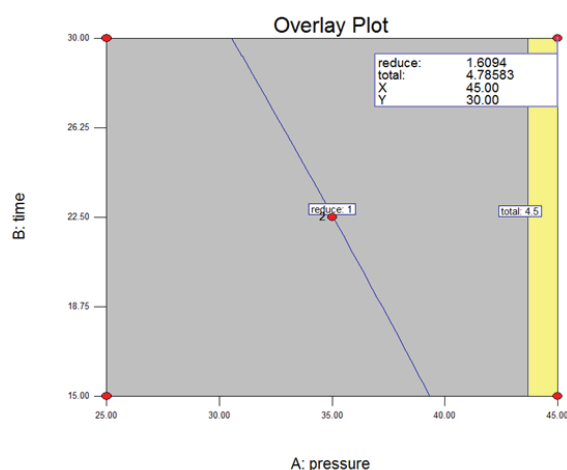
ตารางที่ 2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ

คุณภาพ	สมการความสัมพันธ์กับตัวแปร	R ²
น้ำตาลรีดิวซ์	$= 0.4624 - 0.0179 (\text{ความดัน}) - 0.0002 (\text{เวลา}) + 0.0006 (\text{ความดัน})^2 + 0.001 (\text{เวลา})^2 + 0.0005 (\text{ความดัน}) (\text{เวลา})$	0.9910
น้ำตาลทั้งหมด	$= 9.7431 - 0.4499 (\text{ความดัน}) + 0.0075 (\text{ความดัน})^2$	0.7559

จากตารางที่ 2 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ขึ้นอยู่กับความดันและเวลาในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ และความสัมพันธ์ร่วม (Interaction) ระหว่างความดันและเวลาโดยความดันและเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดขึ้นอยู่กับความดันในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยความดันเพิ่มขึ้นทำให้น้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย สอดคล้องกับรายงานของ คมสันและคณะ (2559) [13] ซึ่งได้ทำการปรับสภาพสาหร่ายไส้ไก่ (*Enteromorpha intestinalis*) ด้วยวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 25 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลา 15 นาที ทำให้น้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นร้อยละ 292.63 และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้นร้อยละ 17.35

จากสมการที่ได้ในตารางที่ 2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาในกระบวนการระเบิดที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert 7.10 (Statease Inc., Minneapolis, USA) และกำหนดขอบเขตปัจจัยที่ศึกษาและคุณลักษณะที่

ต้องการ พบว่า ความดันและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ ที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งแสดงตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 พื้นที่การตอบสนองของความดันและเวลาในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ

3.2 ผลการศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) ที่เหมาะสมในการปรับสภาพสาหร่าย

ผลการศึกษาระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเป็นค่าความดันที่มีความเหมาะสมในการสร้างน้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมดจากสาหร่ายได้มากที่สุด โดยพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิด 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที พบว่า การระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ระยะเวลา 50 และ 60 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมากกว่าที่ระยะเวลา 20, 30 และ 40 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ระยะเวลา 50 นาที ให้เป็นระดับที่เหมาะสมกว่าที่ระยะเวลา 60 นาที เพราะใช้เวลาน้อยกว่า จึงทำให้เกิดการประหยัดในเรื่องต้นทุนมากกว่า ทั้งนี้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของสาหร่ายที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการระเบิดไอน้ำความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ระยะเวลาระเบิดต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของสาหร่ายที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการระเบิดไอน้ำความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่ระยะเวลาระเบิดต่างกัน

เวลาในการระเบิด(นาที)	ปริมาณน้ำตาล (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)	
	น้ำตาลรีดิวซ์ ^{ns}	น้ำตาลทั้งหมด
20	1.52±0.07	6.20 ^d ±0.01
30	1.54±0.03	6.64 ^c ±0.02
40	1.53±0.08	7.20 ^b ±0.02
50	1.54±0.07	8.51 ^a ±0.01
60	1.57±0.07	8.51 ^a ±0.01
กรรมวิธีควบคุม	0.23±0.01	2.99 ^e ±0.01

หมายเหตุ: - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับข้อมูลในคอลัมน์เดียวกัน แสดงว่าค่าความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
 - ns คือข้อมูลในคอลัมน์เดียวกัน ไม่มีค่าความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)
 - กรรมวิธีควบคุม คือปริมาณน้ำตาลที่วัดจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ

3.3 ผลการศึกษาสภาวะการย่อยเซลลูโลสด้วยสารละลายกรดที่เหมาะสมในการปรับสภาพสาหร่าย

หลังจากกระบวนการเตรียมสาหร่าย ด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นระยะเวลา 50 นาทีแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 , 5.0 และ 6.34 นอร์มอล ตามลำดับ ใช้สารละลายสาหร่ายที่ผ่านการระเบิดไอน้ำต่อกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ปรับความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และนำมาวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่สามารถย่อยเซลลูโลสได้มากที่สุด คือ ที่ความเข้มข้น 6.34 นอร์มอล โดยให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด เท่ากับ 8.66 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งมากกว่าความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่า ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่เพิ่มขึ้น สามารถย่อยเซลลูโลสเพื่อให้เป็นน้ำตาลได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ของสาหร่ายที่ผ่านการย่อยด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นที่ต่างกัน

ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก (นอร์มอล)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
1.00	2.03 ^e ±0.09
2.00	2.78 ^f ±0.09
3.00	3.80 ^d ±0.05
4.00	4.94 ^c ±0.08
5.00	6.08 ^b ±0.31
6.34	8.66 ^a ±0.29

หมายเหตุ: - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับข้อมูลในคอลัมน์เดียวกัน แสดงว่าค่าความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยเซลลูโลสในสาหร่ายด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

หลังจากกระบวนการเตรียมสาหร่าย ด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นระยะเวลา 50 นาทีแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการย่อยด้วยเอนไซม์

เซลล์ โดยแปรผันปริมาณเอนไซม์เซลล์ที่ปริมาณ 0.25 – 2.00 (มิลลิกรัมต่อสาหร่าย 1 กรัม) และเวลาในการบ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 – 72 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด โดยวางแผนการทดลองแบบ 2^2 Factorial experiment design with 2 center points และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert 7.1 (Statease Inc., USA) เพื่อสภาวะที่เหมาะสม สามารถ

แสดงผลการศึกษาได้ดังตารางที่ 5 และเมื่อนำข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในรูปสมการถดถอย (Multiple regression) เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในการบ่มที่ระดับต่างๆ พบว่าปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในการบ่มมีผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการถดถอย ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 แผนการทดลองในการศึกษาการย่อยสาหร่ายด้วยเอนไซม์เซลล์

การทดลอง	รหัส	ปริมาณเซลล์ (ml/g.algae)	เวลาบ่ม (hr)	ปริมาณน้ำตาล (mg/ml)		
				น้ำตาลรีดิวซ์	น้ำตาลทั้งหมด	น้ำตาลนอนรีดิวซ์
1	(1)	0.25	24.00	10.72±0.61	11.92±0.73	1.20±0.54
2	a	2.00	24.00	16.70±0.70	16.88±0.42	0.18±0.31
3	b	0.25	72.00	11.15±0.75	13.26±0.57	2.11±0.74
4	ab	2.00	72.00	18.66±1.81	19.10±1.91	0.44±0.23
5	-α a	0.25	48.00	10.82±0.70	12.11±0.35	1.29±0.15
6	+α a	2.00	48.00	18.58±0.65	19.35±1.33	0.77±0.41
7	-α b	1.13	24.00	11.40±1.85	11.76±1.69	0.37±0.55
8	+α b	1.13	72.00	17.86±0.54	17.89±1.17	0.03±0.01
9	cp1	1.13	48.00	15.75±0.62	16.66±0.92	0.91±0.02
10	cp2	1.13	48.00	15.59±0.48	16.30±1.78	0.71±0.08

ตารางที่ 6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ

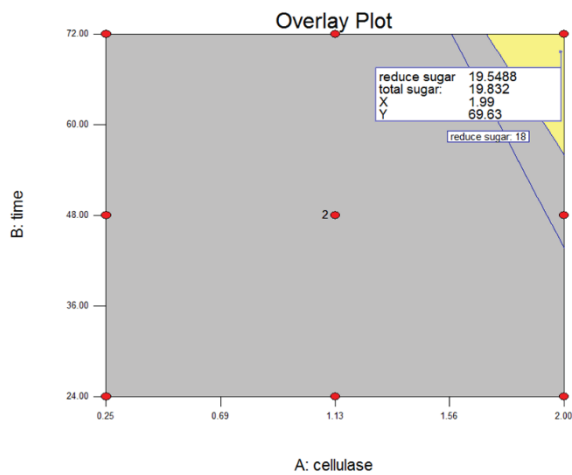
คุณภาพ	สมการความสัมพันธ์กับตัวแปร	R ²
น้ำตาลรีดิวซ์	= 7.2203 + 4.0479 (ปริมาณเอนไซม์เซลล์) + 0.0614 (เวลาในการบ่ม)	0.8744
น้ำตาลทั้งหมด	= 8.5376 + 3.4371 (ปริมาณเอนไซม์เซลล์) + 0.0640 (เวลาในการบ่ม)	0.8697

จากตารางที่ 6 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในการบ่ม โดยปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kim *et al.* (2014) [14] ที่พบว่าโครงสร้างของสาหร่ายจะมีการกระจายตัวมากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของความดัน ทำให้เอนไซม์เซลล์สามารถเข้าถึงโครงสร้างของเซลล์ได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น ตามการย่อยของเอนไซม์เซลล์ที่มากขึ้น ในขณะที่

น้ำตาลนอนรีดิวซ์จะมีค่าลดลงจากการทำงานของเอนไซม์ และเกิดการสลายตัวจากความร้อนที่มากขึ้นจากการเพิ่มความดัน

จากสมการที่ได้ในตารางที่ 6 สามารถหาปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในการบ่มที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert 7.10 (Statease Inc., Minneapolis, USA) และกำหนดขอบเขตปัจจัยที่ศึกษาและคุณลักษณะที่ต้องการ พบว่า ปริมาณเอนไซม์เซลล์และเวลาในการบ่มที่เหมาะสม คือ ปริมาณเซลล์

1.99 (มิลลิกรัมต่อสาหร่าย 1 กรัม) และเวลาในการบ่มที่ 69.65 ชั่วโมง ซึ่งแสดงตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 พื้นที่การตอบสนองของปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสและเวลาในการบ่ม

จากผลการศึกษาข้างต้นได้ว่า การย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส สามารถเปลี่ยนเป็นน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดได้มากกว่าการย่อยเซลลูโลสด้วยสารละลายกรด ดังนั้นจึงเลือกการย่อยเซลลูโลสของสาหร่ายด้วยเอนไซม์เซลลูเลสเป็นวิธีการเตรียมสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอลต่อไป

3.5 ผลการคัดเลือกสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอทานอล

จากการศึกษาสามารถเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ น้ำตาลนอนรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดของสาหร่ายที่ผ่านการกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 50 นาที แล้วทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 2.00 (มิลลิกรัมต่อสาหร่าย 1 กรัม) บ่มที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 70 ชั่วโมง โดยสาหร่ายที่นำมาทดลองมี 4 สายพันธุ์ คือ *Chlorella* sp., *Scenedesmus* sp., *Pediastrum* sp. และ Microalgal consortium ผลการทดลองดังตารางที่ 7 พบว่า สาหร่ายพันธุ์ Microalgal consortium หลังจากผ่านการกระบวนการเตรียมสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับผลิตเอทานอลแล้ว ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และน้ำตาลทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาคือสาหร่ายพันธุ์ *Chlorella* sp., *Pediastrum* sp. และพันธุ์ *Scenedesmus* sp. ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลทั้งหมดน้อยที่สุด ดังนั้นสาหร่ายพันธุ์ที่มีความเหมาะสมในกระบวนการผลิตเอทานอลจากเชื้อบริสุทธิ์มากที่สุดคือสายพันธุ์ Microalgal consortium

ตารางที่ 7 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของสาหร่าย 4 ชนิดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการระเบิดไอน้ำทำการย่อยด้วยปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสม

สาหร่าย	ปริมาณน้ำตาล (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)		
	น้ำตาลรีดิวซ์	น้ำตาลทั้งหมด	น้ำตาลนอนรีดิวซ์
<i>Chlorella</i> sp.	17.91±0.53 ^b	20.17±0.78 ^b	2.26±1.22 ^b
<i>Scenedesmus</i> sp.	1.86±0.08 ^d	2.47±0.09 ^d	0.06±0.07 ^d
<i>Pediastrum</i> sp.	6.96±0.33 ^c	7.66±0.05 ^c	0.70±0.34 ^c
Microalgal consortium	20.25±0.54 ^a	21.36±0.67 ^a	1.10±0.85 ^a

หมายเหตุ: - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับข้อมูลในคอลัมน์เดียวกัน แสดงว่า ค่าความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.6 ผลการศึกษากระบวนการผลิตเอทานอลจากเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae*

การผลิตเอทานอลจากสาหร่ายสายพันธุ์ Microalgal consortium ควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง

4.4 นำไปผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ ที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 50 นาที แล้วทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 2.00 (มิลลิกรัมต่อสาหร่าย 1 กรัม) บ่มที่

50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมงทำการแปรผัน ปริมาณความเป็นกรด-ด่างที่ 5.00–7.00 และปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ปริมาณร้อยละ 0.10–1.50 ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 120 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการวัดปริมาณเอทานอล และหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่ม โดยวางแผนการทดลองแบบ 2² Factorial experiment design with 2 center points และผลการทดลองที่ได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert 7.1 (Statease Inc.,

USA) เพื่อสภาวะที่เหมาะสม แสดงผลดังตารางที่ 8 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ในรูปแบบสมการถดถอย (Multiple regression) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองของความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ระดับต่างกัน พบว่ามีผลต่อปริมาณเอทานอลและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หลังการบ่มอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบสมการถดถอย ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 แผนการทดลองในการศึกษาการย่อยสลายจากคาร์บอนจากการแปรผันค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณ *S. cerevisiae*

สิ่งทดลอง	รหัส	pH	ปริมาณ <i>S. cerevisiae</i> (%)	เอทานอล (%)	น้ำตาลรีดิวซ์ (mg/ml)
1	(1)	5.29	0.31	5.67±0.29	1.34±0.06
2	a	6.71	0.31	6.17±0.15	1.19±0.08
3	b	5.29	1.29	6.43±0.12	1.13±0.03
4	ab	6.71	1.29	7.77±0.25	0.97±0.09
5	-α a	5.00	0.80	5.60±0.17	1.33±0.11
6	+α a	7.00	0.80	6.33±0.29	1.18±0.10
7	-α b	6.00	0.10	5.6±0.29	1.22±0.10
8	+α b	6.00	1.50	6.73±0.25	1.15±0.04
9	cp1	6.00	0.80	6.43±0.12	1.20±0.07
10	cp2	6.00	0.80	6.57±0.40	1.20±0.06

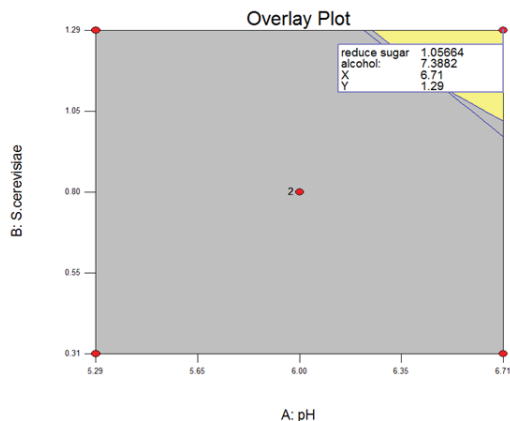
ตารางที่ 9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาในกระบวนการระเหิดด้วยไอน้ำ

คุณภาพ	สมการความสัมพันธ์กับตัวแปร	R ²
เอทานอล	$= 5.3663 + 0.0312 (\text{ความเป็นกรด-ด่าง}) - 2.5928 (\text{ปริมาณ } S. cerevisiae) + 0.5952 (\text{ความเป็นกรด-ด่าง}) (\text{ปริมาณเชื้อ})$	0.8230
น้ำตาลรีดิวซ์	$= 1.8693 - 0.0955 (\text{ความเป็นกรด-ด่าง}) - 0.1333 (\text{ปริมาณ } S. cerevisiae)$	0.7144

จากตารางที่ 9 พบว่า ปริมาณเอทานอลและน้ำตาลรีดิวซ์หลังการบ่มขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างและปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* โดยความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์หลังการบ่มลดลง

จากสมการที่ได้ในตารางที่ 9 สามารถหาค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design Expert

7.10 (Statease Inc., Minneapolis, USA) กำหนดขอบเขตปัจจัยที่ศึกษาและคุณลักษณะที่ต้องการ พบว่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เหมาะสม คือ ความเป็นกรด-ด่าง 6.71 และปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ร้อยละ 1.29 แสดงตามภาพที่ 3



ภาพที่ 3 พื้นที่การตอบสนองความเป็นกรด-ด่าง และ ปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae*

3.7 ผลของเวลาในการบ่มสาหร่าย *Microalgal consortium* ด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae*

ผลการศึกษาระยะเวลาบ่มที่เวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน และทำการวัดปริมาณเอทานอล และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่ม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ปริมาณเอทานอล และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่ม ที่ระยะเวลาในการบ่มต่างกัน

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	เอทานอล (ร้อยละ)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
2	5.17±0.29 ^c	1.49±0.09 ^a
4	6.17±0.29 ^b	1.30±0.07 ^b
6	6.83±0.29 ^a	1.20±0.03 ^b
8	7.17±0.15 ^a	1.07±0.04 ^c
10	7.13±0.23 ^a	1.06±0.02 ^c

หมายเหตุ: - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่กำกับข้อมูลในคอลัมน์เดียวกัน แสดงว่า ค่าความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 10 พบว่า เมื่อระยะเวลาการบ่มนานขึ้น ทำให้ปริมาณเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จนถึงวันที่ 8 และลดลงเล็กน้อยในวันที่ 10 เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น การเจริญเติบโตของเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เอทานอลเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ และผลผลิตพลอยได้บางชนิด เช่น กรดอินทรีย์ ก็เป็นสารยับยั้งการ

เจริญของเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ได้ รวมถึงการปนเปื้อนด้วยแบคทีเรียและยีสต์อื่นที่อาจเปลี่ยนเอทานอลให้เป็นกรดอินทรีย์จึงทำให้เอทานอลเกิดการลดลงได้ สาทวี (2549) [9] ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการบ่ม ด้วยเชื้อบริสุทธิ์ *Saccharomyces cerevisiae* ของสาหร่ายพันธุ์ *Microalgal consortium* คือ 8 วัน ซึ่งให้ค่าเอทานอลมากที่สุด ที่ร้อยละ 7.17 และมีน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่มอยู่ที่ 1.07 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

3.8 ผลวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษาเพื่อหาต้นทุนการผลิตในอนาคตอาศัยการคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกระบบการผลิต วิธีการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าต้นทุนการผลิต จะอาศัยวิธีการ Life Cycle Cost Analysis (LCC) ซึ่งเป็นวิธีการที่คิดค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ สำหรับการคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายภายใต้โครงการนี้ ได้อาศัยข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ดังนี้

1. การศึกษาการผลิตเอทานอลจากการหมักสาหร่ายด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* บริสุทธิ์ ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง โดยใช้สาหร่ายพันธุ์ *Microalgal consortium* จำนวน 400 กรัม ผสมสารละลาย Citrate buffer ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.4 อัตราส่วน 1:10 โดยมวลต่อปริมาตร นำไปผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 50 นาที และทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 2.00 (มิลลิกรัมต่อสาหร่าย 1 กรัม) บ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ทำการปรับความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายสาหร่าย ให้มีค่าเท่ากับ 6.71 เติมน้ำเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ร้อยละ 1.30 บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 8 วัน หลังจากนั้นศึกษาคุณภาพเอทานอลที่ผลิตได้จากสาหร่ายพบว่า ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้อยู่ที่ร้อยละ 7.30 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่มเท่ากับ 1.15 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และปริมาณของเหลวที่ได้ 3,289 มิลลิลิตร

2. การศึกษาเพื่อหาต้นทุนการผลิตในอนาคตอาศัยการคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกระบบการผลิต วิธีการคำนวณเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิต จะอาศัยวิธีการ Life Cycle Cost Analysis (LCC) ซึ่งเป็นวิธีการที่คิดค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ [12] สำหรับการคำนวณต้นทุนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่าย Microalgal consortium และการผลิตเอทานอลจากสาหร่าย ภายใต้โครงการนี้ได้อาศัยข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ดังนี้

- เงินลงทุนในกระบวนการต่าง ๆ
- ค่าดำเนินการและบำรุงรักษา (Operating and Maintenance Cost) กำหนดให้เป็นปีละ 1 เปอร์เซ็นต์ของเงินลงทุนเบื้องต้น
- กำหนดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ เท่ากับ 30 ปี
- อัตราส่วนลด (Discount rate) เท่ากับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ลูกค้าชั้นดี (MLR) ของธนาคารกรุงเทพ (เดือนพฤษภาคม 2560) เท่ากับร้อยละ 6.25 ต่อปี [15]
- อัตราการเพิ่มขึ้น (Escalation rate) ของค่าใช้จ่าย 3% per annum [16]
- กำหนดมูลค่าซากของระบบเท่ากับ 10% ของเงินลงทุน

จากผลการศึกษาพบว่า ต้นทุนการผลิตเอทานอล มีค่าเท่ากับ 39.08 บาทต่อลิตร (ที่ความเข้มข้นเอทานอล 7%) และระยะเวลาการคืนทุนในการผลิตเอทานอล มีค่าเท่ากับ 4.77 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายใน เท่ากับ 21%

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงในน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปและพัฒนาผลิตภัณฑ์ มูลนิธิโครงการหลวง โดยได้ทำการศึกษาระบบการเตรียมสาหร่ายเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล ศึกษาการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายทั้ง 4 สายพันธุ์ และการวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาระบบการเตรียมสาหร่ายที่เหมาะสมสำหรับผลิตเอทานอล พบว่า สาหร่ายพันธุ์ Microalgal consortium มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาปรับสภาพด้วยวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) ร่วมกับการย่อยเซลลูโลส โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้คือนำสาหร่าย Microalgal consortium มาผสมสารละลาย Citrate buffer ความเข้มข้น 0.05 โมลลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.4 อัตราส่วน 1:10 โดยมวลต่อปริมาตร นำไปผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 50 นาที แล้ว ทำการย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 2.00 (มิลลิตรต่อสาหร่าย 1 กรัม) บ่มที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ซึ่งสารละลายที่ได้จะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เท่ากับ 20.25 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด เท่ากับ 21.36 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และน้ำตาลนอนรีดิวซ์ เท่ากับ 1.10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

ใน กระบวนการผลิตเอทานอลจากเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เหมาะสมพบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อเท่ากับ 6.71 ใช้ปริมาณเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ร้อยละ 1.30 บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 8 วัน ความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้อยู่ที่ร้อยละ 7.17

การนำสาหร่าย Microalgal consortium จำนวน 400 กรัม ทดลองหมักโดยผ่านกระบวนการเตรียมสาหร่าย และกระบวนการผลิตเอทานอลที่เหมาะสม พบว่าเอทานอลที่ได้มีความเข้มข้นร้อยละ 7.30 ปริมาณน้ำตาลปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการบ่ม เท่ากับ 1.15 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาณของเหลวที่ได้ 3,289 มิลลิลิตร ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากสาหร่าย มีค่าเท่ากับ 39.08 บาทต่อลิตร ซึ่งมีระยะเวลาการคืนทุนในการผลิตเอทานอล มีค่าเท่ากับ 4.77 ปี และมีอัตราผลตอบแทนในการลงทุน มีค่าเท่ากับ 21%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการการเพาะเลี้ยงสาหร่ายจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้

เพื่อผลิตเอทานอล ภายใต้การจัดการแบบไม่มีของเสีย ภายใต้ทุนวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะวิทยาศาสตร์ และคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัยและเก็บข้อมูล และขอขอบคุณสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอผลงานทางวิชาการในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เหนือพล ดวงเบ็ญ. ผลกระทบของวัฏจักรมืดและสว่างต่อผลผลิตสาหร่ายขนาดเล็ก ในปฏิกรณ์แบบแนวตั้ง, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2556.
- [2] Fathima, A.A., Sanitha, M., Kumar, T., Iyappan, S. and Ramya, M. Direct utilization of waste water algal biomass for ethanol production by cellulolytic *Clostridium phytofermentans* DSM1183. *Bioresource Technology*, 2016; 202: 253–256.
- [3] ปรีชา สุวรรณพินิจ และนางลักษณ์ สุวรรณพินิจ. จุลชีววิทยาทั่วไป. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2548.
- [4] ยุติ พิรพรพิศาล. สาหร่ายวิทยา. ไซتناปริ้นท์ติ้ง, เชียงใหม่, 2549.
- [5] ยุติ พิรพรพิศาล. สาหร่ายวิทยา. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2549.
- [6] มนริรา จิตปัญญา. การสกัดพอลิแซ็กคาไรด์และศึกษาชนิดของน้ำตาลจากสาหร่ายทะเล. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- [7] Siddhanta, A. K., Goswami, A. M., Ramavat, B. K., Mody, K. H. and Mairh, O. P. Water soluble polysaccharides of marine algal species of *Ulva* (Ulvales, Chlorophyta) of India waters. *Indian Journal of Marine Sciences*, 2001; 30: 166-172.
- [8] Phengzhan, Y., Quanbin, Z., Ning, L., Zuhong, X., Yanmei, W. and Zhi'en, L. Polysaccharides from *Ulva pertusa* (Chlorophyta) and preliminary studies on their antihyperlipidemia activity. *Journal of Applied Phycology*, 2002; 15: 21-27.
- [9] สาวิตรี ลิ้มทอง. ยีสต์: ความหลากหลายและเทคโนโลยีชีวภาพ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [10] Sree, N.K., M. Sridhar, K. Suresh, I.M. Banat and L.V. Rao. Isolation of thermotolerant, osmotolerant, flocculating *Saccharomyces cerevisiae* for ethanol production. *Bioresource Technology*, 2000; 72: 43-46.
- [11] ไพโรจน์ วิทยาริ. การออกแบบการทดลองขั้นสูง. ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาลิขสิทธิ์, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่, 2555.
- [12] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, นายกิตติกร สาสุจิตต์, อติศักดิ์ ปัตติยะ. การพัฒนาชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยการจัดการแบบไม่มีของเสีย, รายงานฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2557.
- [13] คมสัน เรืองฤทธิ์, สุกกิก ไชยพูน, เรวัตร พงษ์พิสุทธินันท์, วาสนา คำโสภาส และวศิน วงศ์วิไล. การศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลจากสาหร่ายทะเล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2559.
- [14] Kim, D. H., Lee, S. B. and Jeong, G.-T. Production of reducing sugar from *Enteromorpha intestinalis* by hydrothermal and enzymatic hydrolysis. *Bioresource Technology*, 2014; 161: 348-353.

[15] อัตราส่วนลด (Discount rate) [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา:

http://www.bangkokbank.com/DocumentsLoan/LoanRates_16May2017.pdf

[16] กฤตภาส ศุภกรมงคล, นิคม แหยมลัก และพรรณนภา ศักดิ์สูง. การจัดทำแผนยุทธศาสตร์ระดับชุมชนในการผลิตน้ำมันดีเซลจากชีวมวลไม้โตเร็ว. *SDU RESEARCH JOURNAL*, 2014; 7(1): 71-81.



แบบจำลองสถานการณ์เพื่อจัดสรรจำนวนพนักงาน ในสายการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ Simulation Model for Operator Allocation In Head Gimbal Assembly Line

วิกานดา แสงกุลหลาบ และ วิกาวี ธรรมภรณ์พิลาส*

Wikanda Saengkularb and Wipawee Tharmmaphornphilas*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand
E-mail: wikanda.wii@gmail.com, wipawee.t@eng.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมเฟล็กซิม (FlexSim) มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ เพื่อจัดสรรจำนวนพนักงานในสายการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ให้เหมาะสมกับอัตราการผลิต และปริมาณความต้องการผลิตทันที โดยพิจารณาตามลักษณะการจัดวางสายการผลิต 2 รูปแบบ คือ (1) รูปแบบที่ 1 มีลักษณะการจัดวางสายการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง และ (2) รูปแบบที่ 2 มีลักษณะการจัดวางสายการผลิตแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้เพื่อลดต้นทุนด้านแรงงานที่ไม่จำเป็นและเพิ่มอรรถประโยชน์ของพนักงาน ข้อมูลปัจจุบันพบว่าอรรถประโยชน์ของพนักงานภายในสายการผลิตต่อวัน 21 ชั่วโมง โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 58.5% หลังจากการดำเนินงานวิจัยพบว่าจำนวนพนักงานตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 สามารถลดลงจาก 12 คน เหลือ 8 คนต่อสายการผลิต อรรถประโยชน์เฉลี่ยของพนักงานภายในสายการผลิตตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 เพิ่มขึ้น 14.2% คิดเป็นจำนวนเงินที่ลดลงต่อเดือนเท่ากับ 90,113 บาท และจำนวนพนักงานตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 สามารถลดลงจาก 12 คนเหลือ 7 คนต่อสายการผลิต อรรถประโยชน์เฉลี่ยของพนักงานภายในสายการผลิตตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 เท่ากับ 22.3% คิดเป็นจำนวนเงินที่ลดลงต่อเดือนเท่ากับ 112,641 บาท

ABSTRACT

This research developed a simulation model, using FlexSim and applies it in a reader-writer manufacturing for Hard Disk Drive industry to assign workforces to a reader-writer production line to fit with production rates and product demand by considering 2 production layouts which are the layout 1 is discontinuous layout and the layout 2 is continuous layout. The main objective of this study is to reduce labor costs and increase workforce utilization. Currently, average utilization is 58.5% under 21 working hours per day. After implementing the model, the first layout can reduce 4 out of 12 workers per production line and average utilization increases 14.2% with 90,113 baht reduction in labor cost per month. Layout 2 reduces 5 out of 12 workers per production line and average utilization increases 22.3% with 112,641 baht reduction of labor cost per month.

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีอัตราการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลค่อนข้างสูงผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ วางตลาดค่อนข้างเร็วโดยเน้นความจุของหน่วยความจำและฟังก์ชันการใช้งาน เพื่อให้สามารถแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่นได้ รวมทั้งตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน ดังนั้นเทคโนโลยีในการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (Head Gimbal Assembly: HGA) จึงเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาตามขนาดความจุและรูปแบบการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แต่ละประเภท

การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีการผลิตมีผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้นเพื่อให้ธุรกิจสามารถดำเนินการต่อไปได้และมีผลกำไรสูงสุด บริษัทผู้ผลิตต้องพิจารณาการวางแผนกำลังการผลิตให้เหมาะสมกับปริมาณความต้องการ ลดต้นทุนการผลิตที่ไม่จำเป็น ลดความสูญเปล่าในขั้นตอนการผลิต และใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์มากที่สุด งานวิจัยนี้ผู้วิจัยศึกษากระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ เนื่องจากพบว่าปัจจุบันพนักงานภายในสายการผลิตมีอัตราว่างงานเฉลี่ย 8.71 ชั่วโมง จาก 21 ชั่วโมง คิดเป็น 41.5% โดยมีรูปแบบการจัดวางสายการผลิตแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การจัดวางสายการผลิตแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง เกิดจากปริมาณความต้องการผลิตภัณฑ์ที่ไม่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถจัดสรรพื้นที่จัดวางสายการผลิตให้ต่อเนื่องกันได้เสมอ ด้วยสาเหตุนี้ผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองสถานการณ์มาใช้แก้ปัญหา โดยใช้วิธีการประโยชน์ของพนักงานแต่ละคนภายในสายการผลิต ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์ก่อนการทดลองจัดสรรพนักงานใหม่ เพื่อพิจารณาการจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตใหม่ เพื่อเพิ่มอัตราประโยชน์แก่พนักงาน และให้เกิดเวลาว่างงานเฉลี่ยน้อยที่สุด ตามรูปแบบการจัดวางสายการผลิต

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ถูกนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคการผลิตแบบลีน และการจัดสมดุลการผลิต เพื่อ

จัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิต และการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต เช่น งานวิจัยของ Chandrakumar และคณะ [1] ได้เสนอการนำระบบการผลิตแบบลีน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมฟล็กซิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของขั้นตอนการถ่ายโอนสินค้า ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าเกิดเวลารอคอย เวลาเดินทางที่ว่างเปล่าของพนักงาน และแถวคอยอย่างเห็นได้ชัดเจน จึงนำแนวคิดลีนจัดเวลารอ เวลาเดินทางที่ว่างเปล่าของพนักงาน และความยาวของแถวคอย

นอกจากนี้แบบจำลองสถานการณ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรจำนวนพนักงาน เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและใช้ประโยชน์จากพนักงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากงานวิจัยของ Kłos และ Trebuna [2] พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกำลังการผลิต คือ เวลาเฉลี่ยของชิ้นงานภายในระบบสายการผลิตและจำนวนพนักงานในสายการผลิต งานวิจัยของ วุฒิชัย ยังสว่าง [3] ได้นำแบบจำลองปัญหามาใช้จัดสรรพนักงานและปรับกระบวนการผลิตของกระบวนการผลิตท่อน้ำมันในอุตสาหกรรมยานยนต์ พบว่ากระบวนการผลิตใหม่สามารถลดจำนวนพนักงานจาก 4 คนเหลือ 2 คน และสามารถจัดสรรพนักงานและเครื่องจักรที่เหลือไปรองรับสายการผลิตใหม่ได้

การใช้แบบจำลองสถานการณ์เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน เช่นงานวิจัยของ Tijan และคณะ [4] ได้จำลองรูปแบบการไหลของเอกสารที่ใช้ในการจัดการเรือทั้งขาเข้าและขาออก ด้วยโปรแกรมฟล็กซิม เพื่อหาระยะเวลารวมเฉลี่ยที่จำเป็นสำหรับการไหลของเอกสาร พบว่าจากการใช้แบบจำลองสถานการณ์สามารถกำหนดขั้นตอนไหลของเอกสารได้ และทำให้สามารถลดจำนวนพนักงานได้และใช้ประโยชน์จากพนักงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยของ Francisco และคณะ [5] ได้ใช้แบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมฟล็กซิม ในการเปรียบเทียบการทำงานในขั้นตอนการขนย้ายสินค้า ระหว่างของพนักงานและเครื่องจักร เพื่อเป็นเครื่องมือในการช่วยตัดสินใจว่า

ควรใช้พนักงานหรือเครื่องจักรในการขนย้ายสินค้า ซึ่งพบว่าขั้นตอนในการขนย้ายสินค้าที่มีความซับซ้อน การใช้เครื่องจักรในการขนย้ายสินค้ามีความเหมาะสมมากกว่าใช้พนักงานเมื่อเทียบกับอัตราการทำงานและจำนวนสินค้าที่สามารถทำได้ต่อชั่วโมง

งานวิจัยของ Wang และ Chen [6] ต้องการปรับปรุงระบบโลจิสติกส์ของกระบวนการประกอบรถยนต์ โดยปัญหาที่พบคือ เกิดเวลาว่างงานของสถานีงานภายในสายการผลิต เนื่องจากสถานีงานของสายการผลิตรถยนต์จะประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานมากกว่าหนึ่งขั้นตอน ประกอบกับภายในหนึ่งสายการผลิตมีหลายสถานีงาน ทำให้เกิดภาระงานที่มากเกินไปในบางสถานีงาน จึงส่งผลต่อเวลาในการทำงาน ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมเพรสซิม หาสาเหตุที่ทำให้สายการผลิตไม่สม่ำเสมอหรือเป็นคอขวดของสายการผลิต จากนั้นกำหนดเงื่อนไขของเวลาว่างงานและภาระงานในแต่ละสถานีงาน เพื่อลดเวลาว่างงานในแต่ละสถานีงาน รวมทั้งไม่ให้เกิดการกระจายงานมากเกินไปในทุกสถานีงาน และกำหนดเวลาในการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้คือ สามารถลดเวลาในการผลิตจาก 3.5 นาที เหลือ 1.75 นาที

3. กรณีศึกษาและการดำเนินงานวิจัย

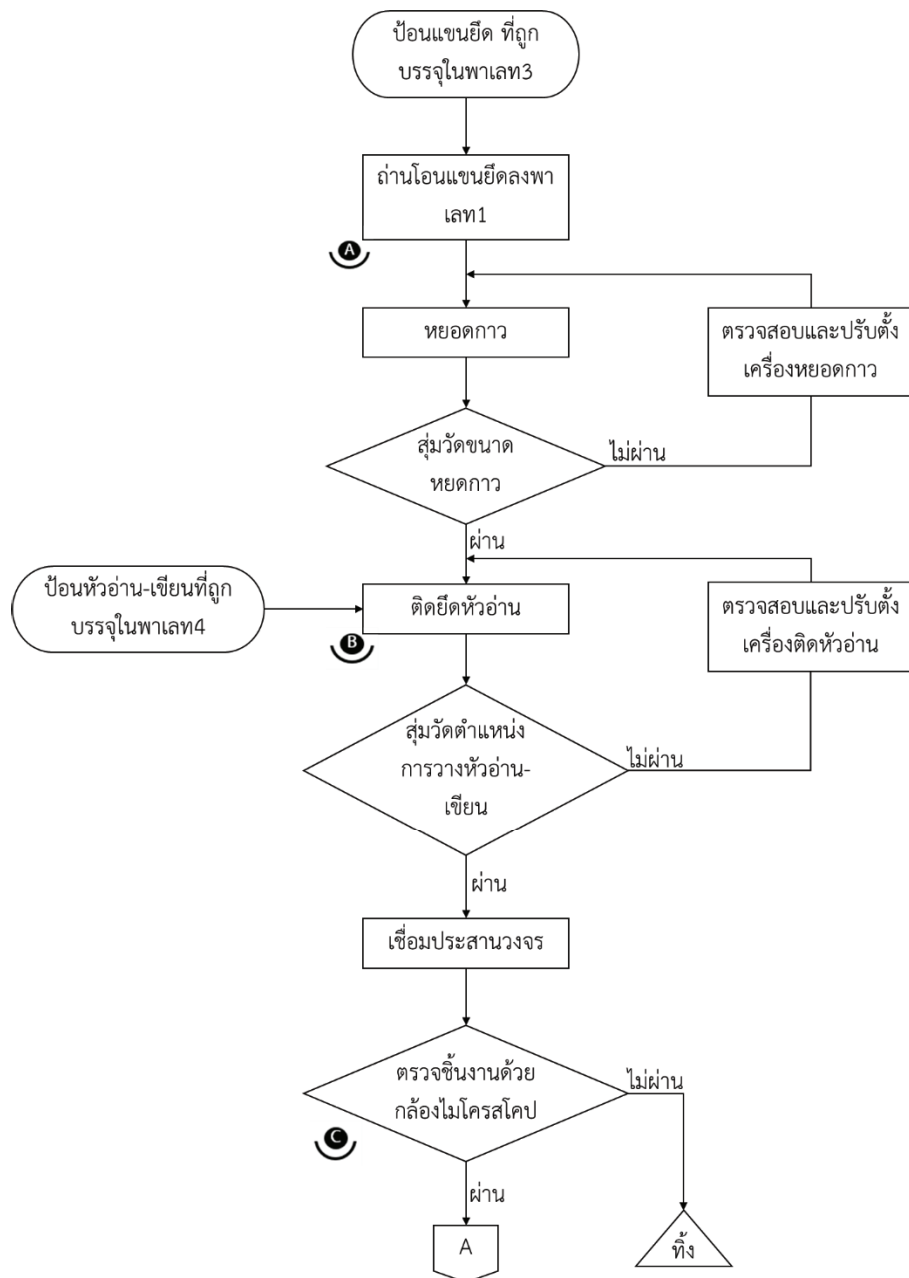
สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลเวลาการปฏิบัติงานของพนักงานภายในสายการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ของบริษัทผู้ผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ มาเป็นกรณีศึกษาเพื่อหาวิธีการจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิต ตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตในปัจจุบัน ที่มีลักษณะการจัดวางแบบต่อเนื่อง และการจัดวางสายการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง

โดยการดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาวิธีการปฏิบัติงานในแต่ละขั้นตอนการผลิต ที่ต้องใช้พนักงานในการปฏิบัติงาน เพื่อเก็บข้อมูลเวลาการทำงาน of พนักงานทุกคนภายในสายการผลิต เพื่อให้ทราบเวลาปฏิบัติงานและเวลาว่างงานของพนักงาน ที่แท้จริงก่อนดำเนินการ

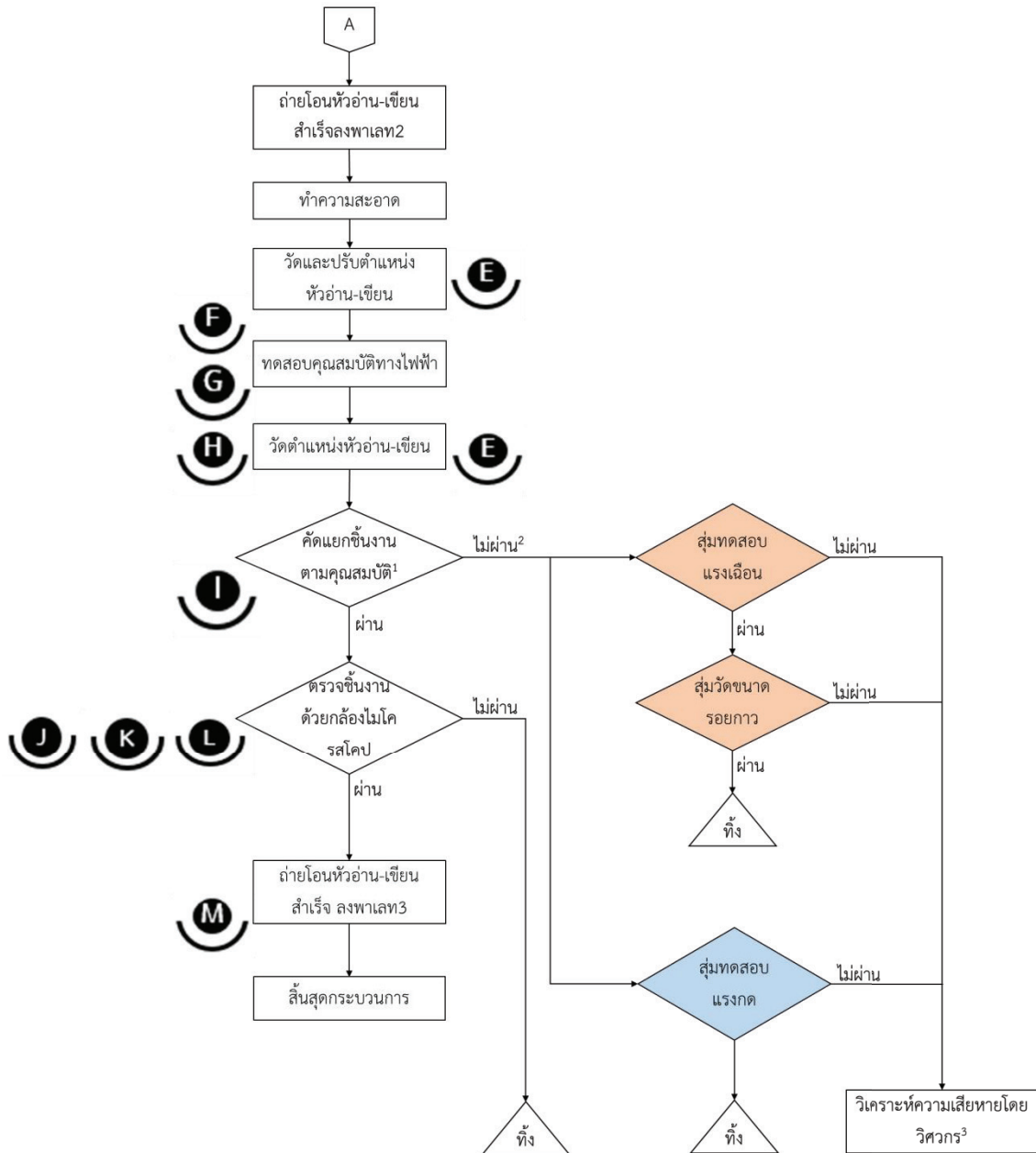
ปรับปรุง จากนั้นสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ตามลักษณะการจัดวางสายการผลิต เพื่อทดลองจัดสรรจำนวนพนักงานใหม่ โดยพิจารณาการจัดสรรจำนวนพนักงานใหม่ จากผลของอัตราประโยชน์ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์

3.1 การวิเคราะห์ปัญหา

สายการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) สายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) และ 2) สายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) สำหรับขั้นตอนการผลิตหัวอ่านเขียน-สำเร็จ ในส่วนของสายการผลิตส่วนหน้าประกอบด้วยพนักงาน 3 คน ได้แก่ A, B, C ดังรูปที่ 1 และในส่วนของสายการผลิตส่วนหลังประกอบด้วยพนักงานทั้งหมด 9 คน ได้แก่ E, F, G, H, I, J, K และ M แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งพนักงานภายในสายการผลิตจะทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบ (Raw material) เข้าเครื่องจักร และนำชิ้นงาน (HGA) ออกจากเครื่องจักร รวมทั้งนำชิ้นงานมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ โดยงานวิจัยนี้ไม่ศึกษาอัตราประโยชน์ของพนักงานขนย้าย (D) เนื่องจากภายในสายการผลิตจำเป็นต้องมีพนักงานขนย้ายจำนวน 1 คนต่อสายการผลิต ซึ่งต้องทำหน้าที่แทนพนักงานประจำสถานีงาน เมื่อพนักงานประจำสถานีงานนั้นต้องการหยุดพักชั่วคราว ร่วมกับการขนย้ายงาน ด้วยสาเหตุนี้จึงไม่นำอัตราประโยชน์ของพนักงานขนย้าย มาพิจารณาการจัดสรรพนักงานใหม่ และในตารางที่ 1 แสดงเวลาการปฏิบัติงานต่อชั่วโมงของพนักงานที่ประจำอยู่แต่ละสถานีงานของเครื่องจักร โดยนำเอาเวลาทั้งหมดใน 1 ชั่วโมง หรือ 3,600 วินาทีเป็นตัวตั้ง เก็บข้อมูลเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานของพนักงานที่ประจำอยู่ที่เครื่องจักรนั้นๆ มาทำการหาเวลาว่างงาน และร้อยละอัตราประโยชน์



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ สายการผลิตส่วนหน้า



รูปที่ 2 ขั้นตอนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ สายการผลิตส่วนหลัง

ตารางที่ 1 เวลาการปฏิบัติงานต่อชั่วโมงของพนักงานที่ประจำอยู่แต่ละสถานีของเครื่องจักร

พนักงาน	ประเภทเครื่องจักร	เวลาที่ใช้ ปฏิบัติงาน (วินาที)	เวลาว่างงาน (วินาที)	อัตราประโยชน์ (%)
A	เครื่องถ่ายภาพอินฟราเรดและหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (อัตโนมัติ) (Suspension)	1292.8	2307.2	35.9%
B	เครื่องติดหัวอ่าน (Slider Attach)	3188.3	411.7	88.5%
C	กล้องไมโครสโคป (Microscope)	1336.5	2263.5	37.1%

ตารางที่ 1 (ต่อ) เวลาการปฏิบัติงานต่อชั่วโมงของพนักงานที่ประจำอยู่แต่ละสถานีของเครื่องจักร

พนักงาน	ประเภทเครื่องจักร	เวลาที่ใช้ปฏิบัติงาน (วินาที)	เวลาว่างงาน (วินาที)	อรรถประโยชน์ (%)
E	เครื่องวัดและปรับตำแหน่ง (LSA)	890.2	2709.8	24.7%
F	เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ET)	2331.1	1268.9	64.8%
G	เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ET)	2054.4	1545.6	57.1%
H	เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ET)	2007.8	1592.3	55.8%
I	เครื่องคัดแยกชิ้นงาน (Sorter)	1417.0	2183.0	39.4%
J	กล้องไมโครสโคป (FOI)	2934.2	665.8	81.5%
K	กล้องไมโครสโคป (FOI)	3135.9	464.1	87.1%
L	กล้องไมโครสโคป (FOI)	2966.3	633.8	82.4%
M	เครื่องถ่ายโอนหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (FOI)	1722.0	1878.0	47.8%
ค่าเฉลี่ยของพนักงานทั้งหมด		2106.4	1493.6	58.5%

จากการศึกษาเวลาการปฏิบัติงานของพนักงาน ดังตารางที่ 1 พบว่าพนักงานในแต่ละสถานีนางมีเวลาปฏิบัติงานต่างกัน อัตราประโยชน์ของพนักงานโดยเฉลี่ย 58.5% โดยพนักงานที่ทำงานมีจำนวน 2 กะต่อวัน กะละ 10.5 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณเป็นชั่วโมงว่างงานเฉลี่ย 8.7 ชั่วโมงต่อวัน แสดงถึงการจัดสรรจำนวนพนักงานต่อสายการผลิตมากเกินไปจนความจำเป็น และเกิดความสูญเสียในการใช้ทรัพยากรประโยชน์ของพนักงาน ซึ่งแนวทางในการแก้ปัญหา คือ การจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตให้เหมาะสม แต่เนื่องจากการดำเนินการจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิต ไม่สามารถลงมือทำได้ทันที เพราะอาจส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิต และผลผลิตตามปริมาณความต้องการของลูกค้า จึงนำแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม FlexSim มาใช้สร้างแบบจำลองตามรูปแบบการจัดวางสายการผลิต

3.2 รูปแบบการจัดวางสายการผลิต

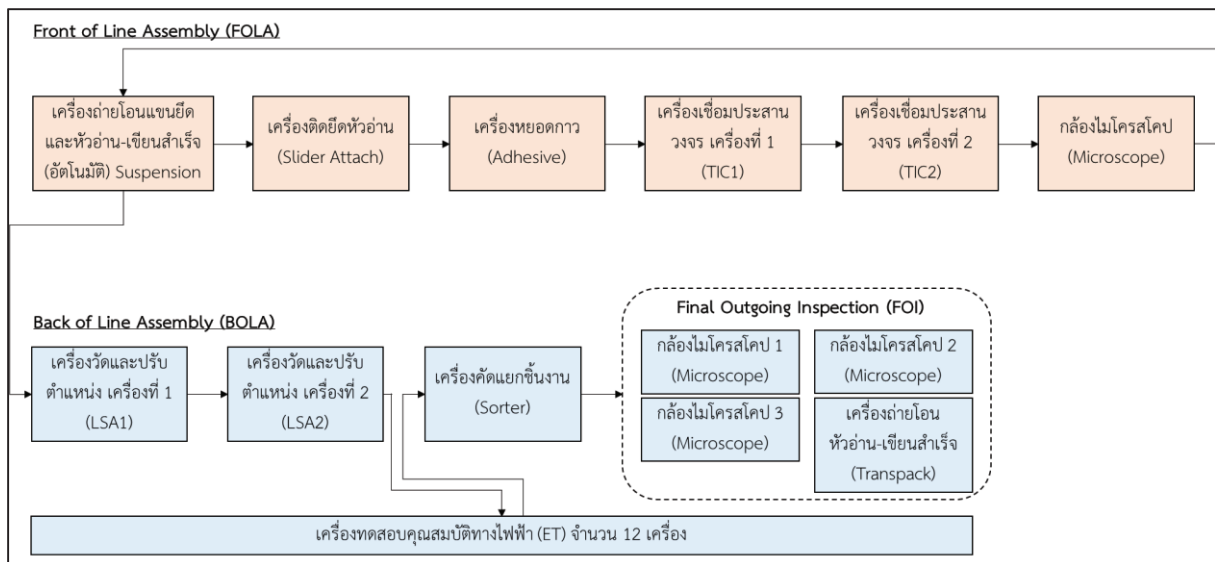
สายการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ประกอบด้วย
สายการผลิต 2 ส่วน คือ 1) สายการผลิตส่วนหน้า (Front
od Line Assembly: FL) และ 2) สายการผลิตผลิตส่วน
หลัง (Back of Line Assembly: BL) โดยประเภทและ

จำนวนเครื่องจักรภายในสายการผลิต แต่ละส่วนแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจำนวนเครื่องจักรภายในสายการผลิตส่วนหน้าประกอบด้วย 1) เครื่องถ่ายโอนแขนยึดและหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (อัตโนมัติ) Suspension 2) เครื่องติดยึดหัวอ่าน (Slider Attach) 3) เครื่องหยอดกาว (Adhesive) 4) เครื่องเชื่อมประสานวงจร (TIC) และ 5) กล้องไมโครสโคป (Microscope) ส่วนจำนวนเครื่องจักรภายในสายการผลิตส่วนหลังประกอบด้วย 1) เครื่องวัดและปรับตำแหน่ง (LSA) 2) เครื่องคัดแยกชิ้นงาน (Sorter) 3) กล้องไมโครสโคป (Microscope) และ 4) เครื่องถ่ายโอนหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (Transpack) โดยในส่วนท้ายของสายการผลิตจะเป็นขั้นตอนสุดท้าย (Final Outgoing Inspection: FOI) ที่ประกอบด้วยกล้องไมโครสโคปจำนวน 3 เครื่อง และเครื่องถ่ายโอนหัวอ่าน-เขียนสำเร็จจำนวน 1 เครื่อง

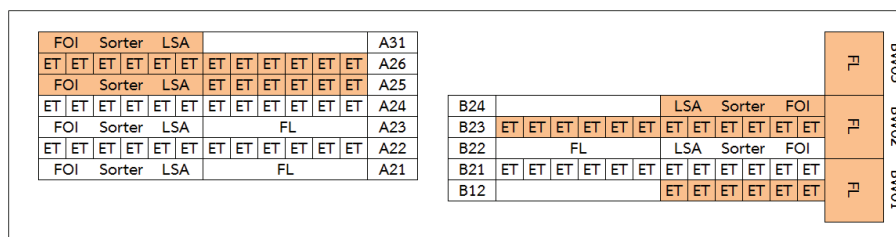
ปัจจุบันสายการผลิตถูกจัดวางตามผลิตภัณฑ์ (Product Layout) ซึ่งมีหลายหลักผลิตภัณฑ์ ประกอบกับปริมาณความต้องการที่ไม่แน่นอนในแต่ละผลิตภัณฑ์ ทำให้ไม่สามารถกำหนดตำแหน่งการจัดวางสายการผลิตสำหรับสายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line

Assembly: FL) และสายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) ของแต่ละผลิตภัณฑ์ไว้ได้ล่วงหน้า ทำให้ตำแหน่งการจัดวางสายการผลิตทั้ง 2 ส่วน มีลักษณะการจัดวางดังรูปที่ 4 และ 6 โดยรูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการจัดวางสายการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) ไม่สามารถจัดวางใกล้กับตำแหน่งของสายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) หรือไม่สามารถจัดวางสายการผลิตส่วนหน้าติดกับเครื่องวัดและปรับตำแหน่ง (Laser Static Attitude Adjust: LSA) ได้ สำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์กำหนดให้ลักษณะการจัดวางสายการผลิตนี้ เป็นการจัดวาง

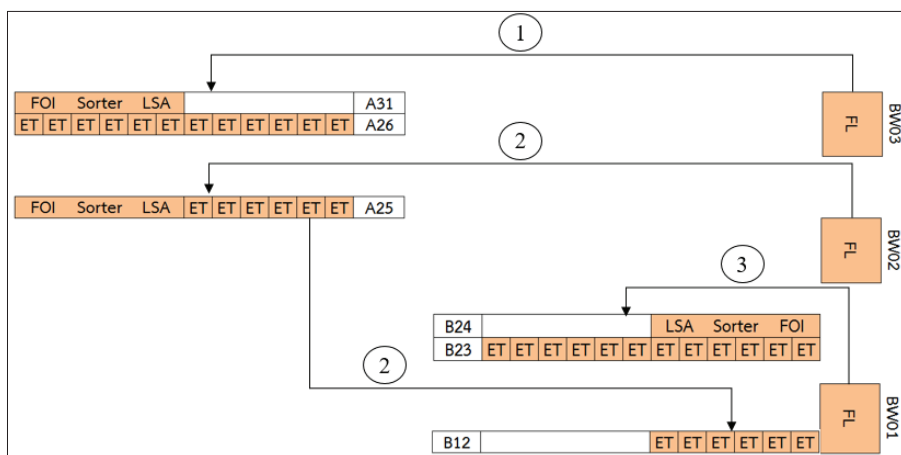
สายการผลิตรูปแบบที่ 1 โดยมีกระบวนการไหลตามขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 5 และสำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ในลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 ดังรูปที่ 6 แสดงการจัดวางสายการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งสายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) สามารถจัดวางใกล้กับตำแหน่งของสายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) หรือสามารถจัดวางสายการผลิตส่วนหน้าติดกับเครื่องวัดและปรับตำแหน่ง (Laser Static Attitude Adjust: LSA) ได้ โดยมีกระบวนการไหลตามขั้นตอนการผลิตแสดงดังรูปที่ 7



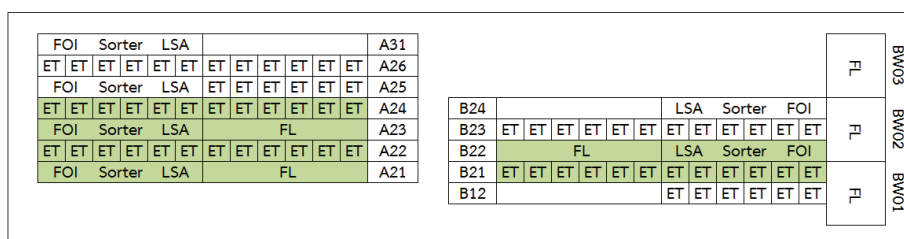
รูปที่ 3 ประเภทและจำนวนของเครื่องจักรภายในสายการผลิตส่วนหน้า และสายการผลิตส่วนหลัง



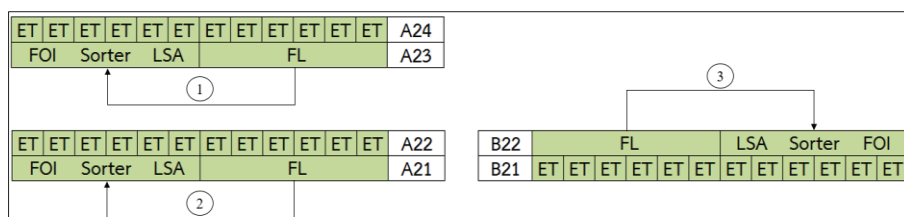
รูปที่ 4 แผนผังการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 (แบบไม่ต่อเนื่อง)



รูปที่ 5 ลักษณะการเชื่อมโยงสายการผลิตส่วนหน้าและสายการผลิตส่วนหลัง ของสายการผลิตรูปแบบที่ 1 (แบบไม่ต่อเนื่อง)



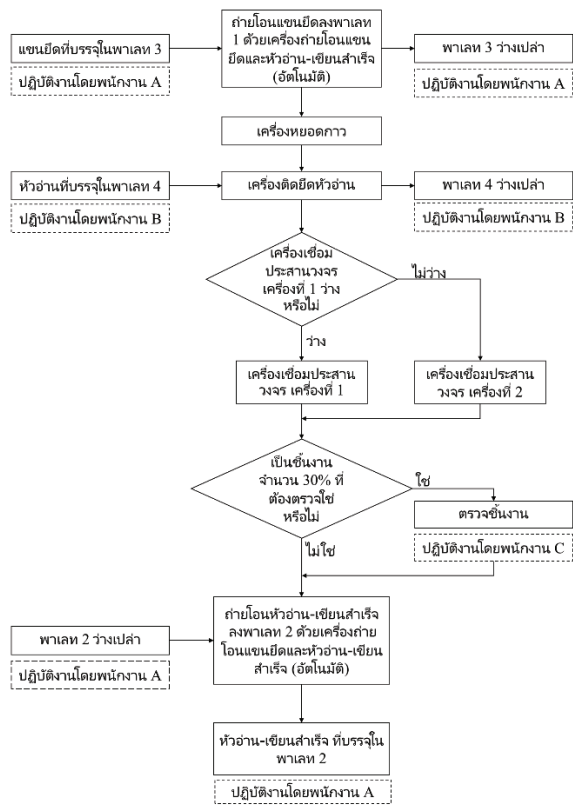
รูปที่ 6 แผนผังการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 (แบบต่อเนื่อง)



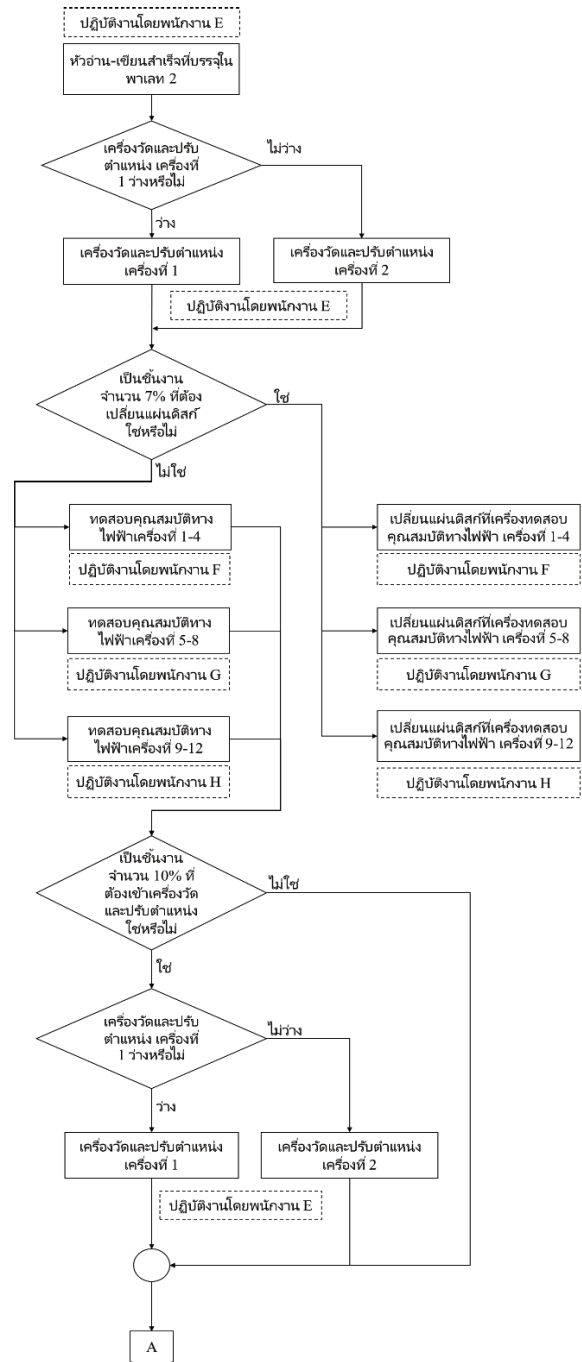
รูปที่ 7 ลักษณะการเชื่อมโยงสายการผลิตส่วนหน้าและสายการผลิตส่วนหลัง ของสายการผลิตรูปแบบที่ 2 (แบบต่อเนื่อง)

3.3 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์

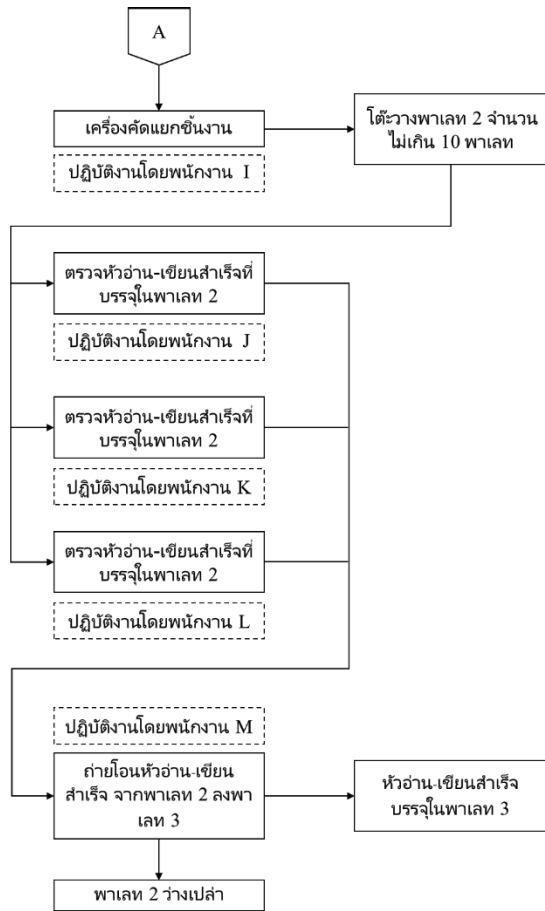
ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ จะสร้างแบบจำลองของสายการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ตามรูปแบบการจัดวางสายการผลิตทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อใช้ผลอรรถประโยชน์ของพนักงานที่ได้จากแบบจำลอง เป็นแนวทางในการพิจารณาจัดสรรพนักงานใหม่ เพื่อเกิดเวลาว่างงานน้อยที่สุด และเพิ่มอรรถประโยชน์แก่พนักงาน ซึ่งกระบวนการสร้างแบบจำลองสำหรับกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ของสายการผลิตส่วนหน้าแสดงดังรูปที่ 8 และสายการผลิตส่วนหลังแสดงดังรูปที่ 9 - 10



รูปที่ 8 กระบวนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ สำหรับ
สายการผลิตส่วนหน้า



รูปที่ 9 กระบวนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ สำหรับ
สายการผลิตส่วนหลัง



รูปที่ 10 กระบวนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์สำหรับสายการผลิตส่วนหลัง (ต่อ)

จากกระบวนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ ข้อมูลนำเข้า (Input) ที่ต้องใช้ในแบบจำลองสถานการณ์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ข้อมูลเวลาการเข้ามาของพาเลทที่บรรจุชิ้นส่วนประกอบของหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ 2) ข้อมูลเวลาการปฏิบัติงานของพนักงานในแต่ละสถานีงาน และ 3) ข้อมูลเวลาของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต โดยจำนวนตัวอย่างข้อมูลที่ต้องเก็บอ้างอิงจาก รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม [7] จากนั้นทำการยืนยันและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้น ซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง โดยดูพฤติกรรมของพนักงานภายในสายการผลิตว่ามีพฤติกรรม การดำเนินงานตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ และทดสอบความถูกต้องของข้อมูลเวลานำเข้าของพาเลท1 พาเลท2 และพาเลท3 ของระบบงานจริง (Actual system) ว่าต่าง

จากข้อมูลเวลานำเข้าของระบบจำลอง (Simulation system) หรือไม่ โดยใช้การทดสอบสมมติฐานด้วยวิธี Paired t-test [8] โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \mu_{actual} = \mu_{model}$$

$$H_a : \mu_{actual} \neq \mu_{model}$$

ซึ่งผลของการทดสอบสมมติฐานข้อมูลเวลานำเข้าของพาเลท ตามรูปแบบการจัดวางสายการผลิตดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบสมมติฐานของข้อมูลนำเข้า

รูปแบบ	ข้อมูลนำเข้า	P Value	สรุปผล
1	พาเลท 2	0.735	ไม่ปฏิเสธ H_0
	พาเลท 3	0.437	ไม่ปฏิเสธ H_0
2	พาเลท 2	0.287	ไม่ปฏิเสธ H_0
	พาเลท 3	0.648	ไม่ปฏิเสธ H_0

ผลการทดสอบสมมติฐานของเวลาการเข้ามาของพาเลท 2 และพาเลท 3 ของระบบงานจริงเทียบกับระบบจำลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า P Value มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก คือเวลาการเข้ามาของพาเลท ของระบบงานจริงไม่ต่างจากระบบจำลอง

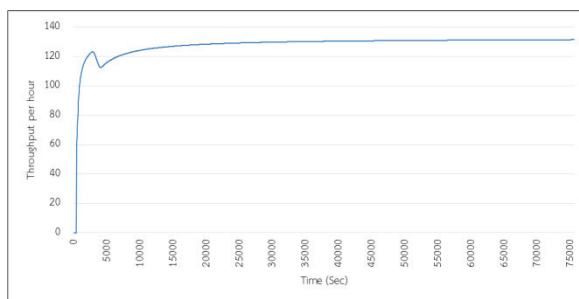
สำหรับพาเลท1 ใช้บรรจุแขนยึดและหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ จะวนอยู่ภายในสายการผลิตส่วนหน้าตลอดเวลา โดยในการสร้างแบบจำลองกำหนดให้มีพาเลท 1 จำนวน 50 พาเลท เท่ากับจำนวนในระบบงานจริง และพาเลท 4 ที่บรรจุหัวอ่านจะถูกจัดเตรียมไว้เท่ากับจำนวนที่ต้องผลิตต่อวัน จึงไม่พิจารณาเวลานำเข้าของพาเลท 1 และพาเลท 4 ในระบบจำลอง

3.4 การหาช่วงเวลาที่แบบจำลองสถานการณ์เข้าสู่สภาวะคงที่

สำหรับงานวิจัยนี้แบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นเป็นระบบจำลองสถานการณ์แบบต่อเนื่อง (Non Terminating) ซึ่งแบบจำลองสถานการณ์แบบต่อเนื่องจำเป็นต้องทำการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้น เพื่อหาเวลาที่ทำให้ระบบจำลองเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากระบบจำลองในช่วงแรกจะมีการ

แกว่ง ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้วิเคราะห์ผลการทดลองได้ โดยข้อมูลส่วนนี้จะถูกตัดทิ้งและเรียกช่วงนี้ว่า Warmup period

ในการหาเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จะใช้ผลผลิตในแต่ละช่วงเวลา ที่ได้จากการทดสอบการรันแบบจำลองที่สร้างขึ้นจำนวน 10 ครั้ง (Replicate) ที่ระยะเวลา 75,600 วินาที และนำผลที่ได้สร้างกราฟ Moving Average เพื่อหาช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตทั้ง 2 รูปแบบ โดยการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 ไม่สามารถจัดวางสายการผลิตส่วนหน้า ไว้ใกล้กับสายการผลิตส่วนหลังได้ การสร้างแบบจำลองจึงแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) สายการผลิตส่วนหน้า 2) สายการผลิตส่วนหลัง และ 3) เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และต้องหา Warmup period จากผลผลิตในแต่ละส่วน สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 สามารถจัดวางสายการผลิตส่วนหน้า ไว้ใกล้กับสายการผลิตส่วนหลังได้ ในการสร้างแบบจำลองจึงไม่แบ่งแยกสายการผลิตออกเป็น 3 ส่วน ทำให้การหา Warmup period จากผลผลิตจึงมีเพียงส่วนเดียวเท่านั้น โดยรูปที่ 11 เป็นตัวอย่างของการหา Warmup period จากกราฟ Moving Average และผลของ Warmup period แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 11 กราฟ Moving Average ของผลผลิตที่ได้จากสายการผลิตส่วนหน้า ณ ช่วงเวลาใดๆ

ตารางที่ 3 ผลของ Warmup period ตามรูปแบบการจัดวางสายการผลิต

รูปแบบ	รายละเอียด	เวลา (วินาที)
รูปแบบที่ 1	สายการผลิตส่วนหน้า	27,900
	สายการผลิตส่วนหลัง	31,350
	เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	41,250
รูปแบบที่ 2	-	62,950

หลังจากทราบ Warmup period จะดำเนินการทดลองแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยในการทดลองทุกครั้งจะต้องกำหนดช่วงเวลาที่แบบจำลองเข้าสู่สภาวะคงที่ก่อนเสมอ เพื่อให้ได้ผลของอัตราประโยชน์ที่ถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาได้อย่างถูกต้อง

3.5 วิธีการแก้ไขปัญหา

สำหรับวิธีการแก้ไขปัญหา จะพิจารณาอัตราประโยชน์ของพนักงานภายในสายการผลิต ที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์ก่อนการปรับปรุง ตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตทั้ง 2 รูปแบบ โดยอัตราประโยชน์ของพนักงานภายในสายการผลิตรูปแบบที่ 1 ก่อนปรับปรุง แสดงดังตารางที่ 4 - 6 และอัตราประโยชน์ของพนักงานภายในสายการผลิตรูปแบบที่ 2 ก่อนปรับปรุง แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 4 อร์รประโยชน์ของพนักงานสายการผลิตส่วนหน้า ก่อนลดจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
A	6.1	8.9	11.5	14.4	-	40.8
B	0.8	0.1	24.6	2.2	-	27.7
C	-	-	-	-	75.2	75.2

ตารางที่ 5 อร์รประโยชน์ของพนักงานสายการผลิตส่วนหลัง ก่อนลดจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
E	12.2	0.8	17.6	14.1	-	44.6
I	14.7	0.6	15.6	5.1	-	36.0
J	-	-	-	-	63.8	63.8
K	-	-	-	-	60.2	60.2
L	-	-	-	-	58.5	58.5
M	-	-	-	-	42.8	42.8

ตารางที่ 6 อร์รประโยชน์ของพนักงานที่เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ก่อนลดจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
F	12.2	12.3	2.3	2.5	20.3	49.6
G	5.5	5.6	2.6	2.6	31.9	48.1
H	9.8	9.2	2.6	2.6	23.9	48.1

ตารางที่ 7 อร์รประโยชน์ของพนักงาน สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 ก่อนจัดสรรจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
A	6.0	7.7	10.5	13.2	13.2	37.4
B	0.9	0.1	22.2	1.9	1.9	36.3
C	-	-	-	-	-	66.8
E	10.8	1.1	17.9	14.4	14.4	44.2
F	9.2	15.1	2.2	2.3	2.3	42.0
G	5.5	6.7	2.5	2.5	2.5	37.0
H	8.5	6.4	2.5	2.5	2.5	39.6
I	14.7	0.7	15.6	5.1	5.1	36.1
J	-	-	-	-	-	63.9
K	-	-	-	-	-	60.2
L	-	-	-	-	-	58.5
M	-	-	-	-	-	42.8

หลังจากทราบผลอร์รประโยชน์ของพนักงานภายในสายการผลิต ตามลักษณะการจัดวางสายการผลิต ทั้ง 2 รูปแบบ จะดำเนินการพิจารณาจัดสรรจำนวนพนักงานใหม่

ซึ่งวิธีการจัดสรรจำนวนพนักงาน จะพิจารณาจากอร์รประโยชน์ของพนักงาน ที่ได้จากสายการผลิตส่วนหน้าและสายการผลิตส่วนหลัง ตามลักษณะการจัดวาง

สายการผลิตทั้ง 2 รูปแบบ โดยทดลองลดพนักงานที่มี ชั่วโมงว่างงานต่อวันมากที่สุดออกจากสายการผลิต จากนั้นจัดสรรให้พนักงานที่เหลือปฏิบัติงานแทน หลังจากนั้นจะพิจารณาอัตราประโยชน์ของพนักงานหลังลด จำนวนพนักงานอีกครั้งโดยอัตราประโยชน์ของพนักงานที่เหลือจะต้องไม่รับภาระงานมากเกินไป และเพื่อทดสอบว่า หลังจากลดจำนวนพนักงานและจัดสรรพนักงานใหม่แล้ว จะไม่มีผลต่อจำนวนผลผลิตต่อวัน จึงทำการทดสอบ สมมติฐานด้วยวิธี Paired t test ของจำนวนผลผลิตที่ได้ ก่อนลดจำนวนพนักงานจากระบบงานจริง เทียบกับจำนวน ผลผลิตที่ได้จากระบบจำลองหลังลดจำนวนพนักงาน ว่า ต่างกันหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

หากพบว่าค่า P-value ที่ได้จากการทดสอบ สมมติฐาน มากกว่า 0.05 จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก และสามารถสรุปได้ว่าจำนวนผลผลิตก่อนลดจำนวนพนักงาน ไม่ต่างจากจำนวนผลผลิตหลังลดจำนวนพนักงาน หรือ หลังลดจำนวนพนักงานพบว่าไม่มีผลต่อจำนวนผลผลิตต่อ วัน จึงสามารถดำเนินการจัดสรรพนักงานใหม่ได้ โดยได้

ดำเนินการจัดสรรจำนวนพนักงาน ตามลักษณะการจัดวาง สายการผลิตดังนี้

1) สำหรับรูปแบบที่ 1 สำหรับสายส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) ได้พิจารณาลดพนักงาน B ออกจากสายการผลิต และกำหนดให้พนักงาน A ปฏิบัติงานแทนพนักงาน B ซึ่งได้จัดสรรกิจกรรมของ พนักงานใหม่ดังตารางที่ 8 และอัตราประโยชน์ของ พนักงานหลังจัดสรรจำนวนพนักงาน แสดงดังตารางที่ 9 สำหรับสายส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) ได้พิจารณาลดพนักงาน I และ J ออกจากสายการผลิต และ กำหนดให้พนักงาน E และพนักงาน M ปฏิบัติงานแทน พนักงาน I ส่วนพนักงาน K, L และ M ให้ปฏิบัติงานแทน พนักงาน J ซึ่งในตารางที่ 10 ได้แสดงการจัดสรรกิจกรรม ของพนักงานใหม่ และอัตราประโยชน์ของพนักงานหลัง จัดสรรจำนวนพนักงาน แสดงดังตารางที่ 11 และพนักงาน ที่ปฏิบัติงานกับเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Testing: ET) ถูกจัดสรรกิจกรรมใหม่ดัง ตารางที่ 12 และอัตราประโยชน์ของพนักงานหลังจัดสรร จำนวนพนักงาน แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 8 การจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหน้า หลังลดพนักงาน B

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	ก่อน	หลัง
นำแขนยึดที่บรรจุในพาเลท 3 เข้าเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ	A	A
นำพาเลท 2 เข้าเครื่องเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ	A	A
นำแขนยึดที่บรรจุในพาเลท 3 ออกจากเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ	A	A
นำพาเลท 2 ออกจากเครื่องเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ	A	A
นำหัวอ่านที่บรรจุในพาเลท 4 เข้าเครื่องติดยึดหัวอ่าน	B	A
นำหัวอ่านที่บรรจุในพาเลท 4 ออกจากเครื่องติดยึดหัวอ่าน	B	A
ตรวจหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ที่บรรจุในพาเลท 1	C	C

ตารางที่ 9 อัตราประโยชน์ของพนักงานสายการผลิตส่วนหน้า หลังจัดสรรจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
A	10.4	6.6	36.5	16.6	-	70.0
C	-	-	-	-	74.7	74.7

ตารางที่ 10 การจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหลัง หลังลดพนักงาน I และ J

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	ก่อน	หลัง
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องวัดและปรับตำแหน่งครั้งที่ 1	E	E
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องวัดและปรับตำแหน่งครั้งที่ 1	E	E
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องคัดแยกชิ้นงาน	I	E
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องคัดแยกชิ้นงาน	I	M
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องวัดและปรับตำแหน่งครั้งที่ 2	E	E
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องวัดและปรับตำแหน่งครั้งที่ 2	E	E
ตรวจหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ที่บรรจุในพาเลท 2	J, K, L	K, L, M
ถ่ายโอนหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ จากพาเลท 2 ลงพาเลท 3	M	M

ตารางที่ 11 รรถประโยชน์ของพนักงานสายการผลิตส่วนหลัง หลังจัดสรรจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
E	13.4	1.7	26.6	21.3	-	63.0
K	-	-	-	-	82.0	82.0
L	-	-	-	-	73.4	73.4
M	3.1	0.4	7.5	2.5	81.0	81.0

ตารางที่ 12 การจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหน้าสำหรับเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า หลังลดพนักงาน G

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	ก่อน	หลัง
นำหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	F,G,H	F,H
นำหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า		
เปลี่ยนแผ่นดิสก์		
นำพาเลท 2 ที่เครื่องวัดและปรับตำแหน่ง วางที่เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า		
นำพาเลท 2 ที่เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า วางที่เครื่องคัดแยก		

ตารางที่ 13 รรถประโยชน์ของพนักงานที่เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า หลังจัดสรรจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
F	16.2	15.9	3.4	3.6	31.4	70.4
H	12.2	10.5	3.8	3.8	37.2	67.4

สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 รรถประโยชน์ของพนักงานหลังจัดสรรจำนวนพนักงานใหม่ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 72.7% พนักงานภายในสายการผลิตมีชั่วโมงว่างงานเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 5.73 ชั่วโมง

2) สำหรับรูปแบบที่ 2 ได้พิจารณาลดพนักงาน B, E, G, I และ J ออกจากสายการผลิต ซึ่งได้จัดสรรกิจกรรมของพนักงานใหม่ดังตารางที่ 14 และรรถประโยชน์ของพนักงานหลังจัดสรรจำนวนพนักงาน แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 14 การจัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหลัง หลังลดพนักงาน B, E, G, I และ J ออกจากสายการผลิต

ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	ก่อน	หลัง
นำแขนยึดที่บรรจุในพาเลท 3 เข้าเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ	A	A
นำพาเลท 2 เข้าเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ		
นำแขนยึดที่บรรจุในพาเลท 3 ออกจากเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ		
นำพาเลท 2 ออกจากเครื่องถ่ายโอนชิ้นงานอัตโนมัติ		
นำหัวอ่านที่บรรจุในพาเลท 4 เข้าเครื่องติดยึดหัวอ่าน	B	
นำหัวอ่านที่บรรจุในพาเลท 4 ออกจากเครื่องติดยึดหัวอ่าน		
ตรวจหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ที่บรรจุในพาเลท 1	C	C
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องวัดและปรับตำแหน่ง	E	F, H
นำหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ ที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องวัดและปรับตำแหน่ง		
นำหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า	F,G,H	F, H
นำหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า		
เปลี่ยนแผ่นดิสก์		
นำพาเลท 2 ที่เครื่องวัดและปรับตำแหน่ง วางที่เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า		
นำพาเลท 2 ที่เครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า วางที่เครื่องคัดแยก	I	M
นำหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 เข้าเครื่องคัดแยกชิ้นงาน		
นำหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 ออกจากเครื่องคัดแยกชิ้นงาน	J, K, L	K, L
ตรวจหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2		
ถ่ายโอนหัวอ่าน-เขียนที่บรรจุในพาเลท 2 ลงพาเลท 3	M	M

ตารางที่ 15 รรถประโยชน์ของพนักงานตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 หลังจัดสรรจำนวนพนักงาน

Operator	Travel empty (%)	Travel loaded (%)	Loading (%)	Unloading (%)	Operate machine (%)	Total utilization (%)
A	9.3	5.8	34.3	15.6	9.7	74.8
C	-	-	-	-	70.2	70.2
F	22.8	19.5	7.5	8.0	30.2	88.0
H	14.8	10.9	8.5	8.6	34.9	77.6
K	-	-	-	-	89.2	89.2
L	-	-	-	-	86.3	86.3
M	14.6	1.1	15.2	5.0	43.7	79.6

สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 รรถประโยชน์ของพนักงานหลังจัดสรรจำนวนพนักงานใหม่ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 80.8% พนักงานภายในสายการผลิตมีชั่วโมงว่างงานเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 4.03 ชั่วโมง

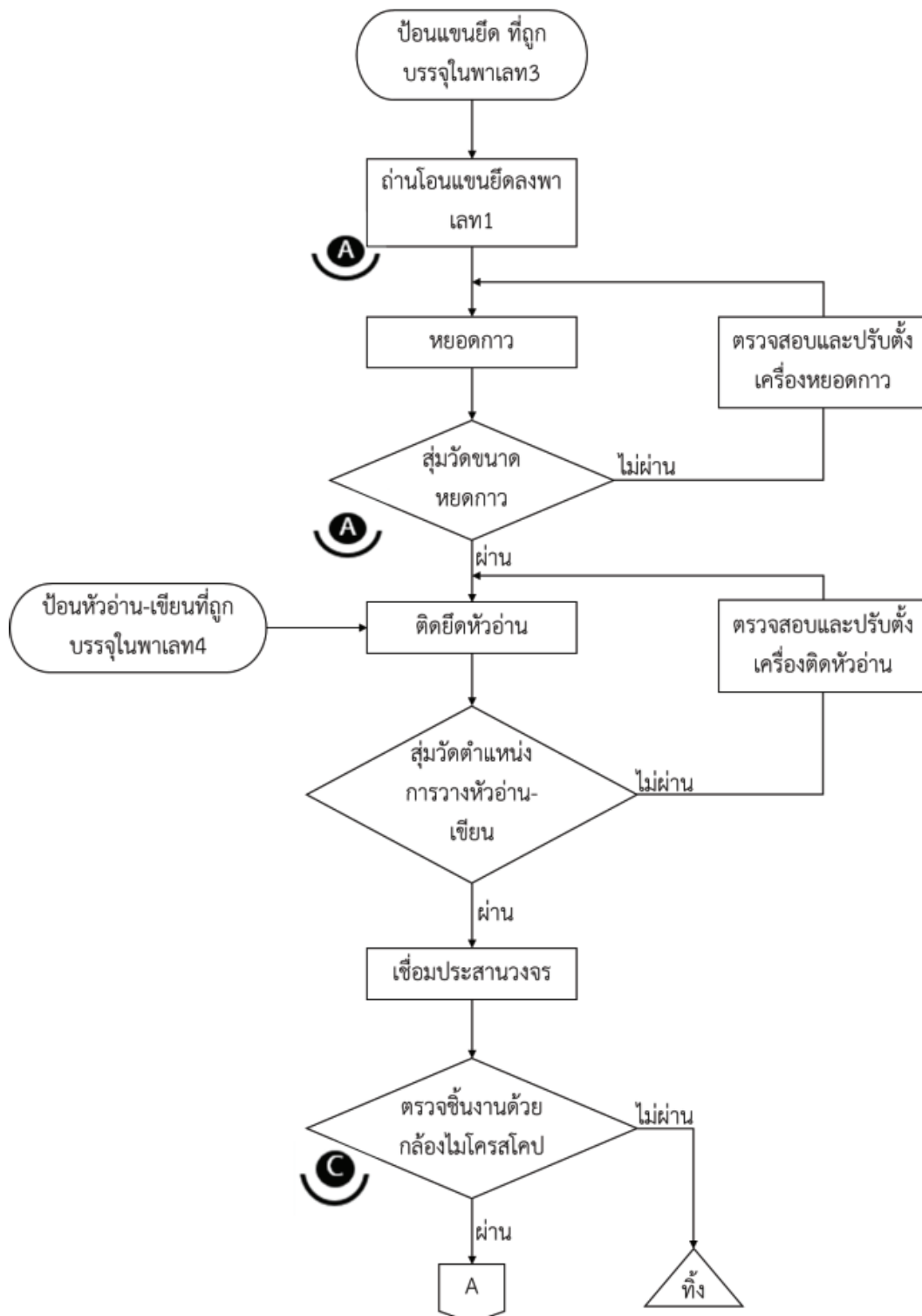
4. สรุปแนวทางการปรับปรุง

จากการใช้แบบจำลองสถานการณ์จัดสรรจำนวนพนักงานภายในสายการผลิต พบว่าลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 สามารถลดพนักงานใน

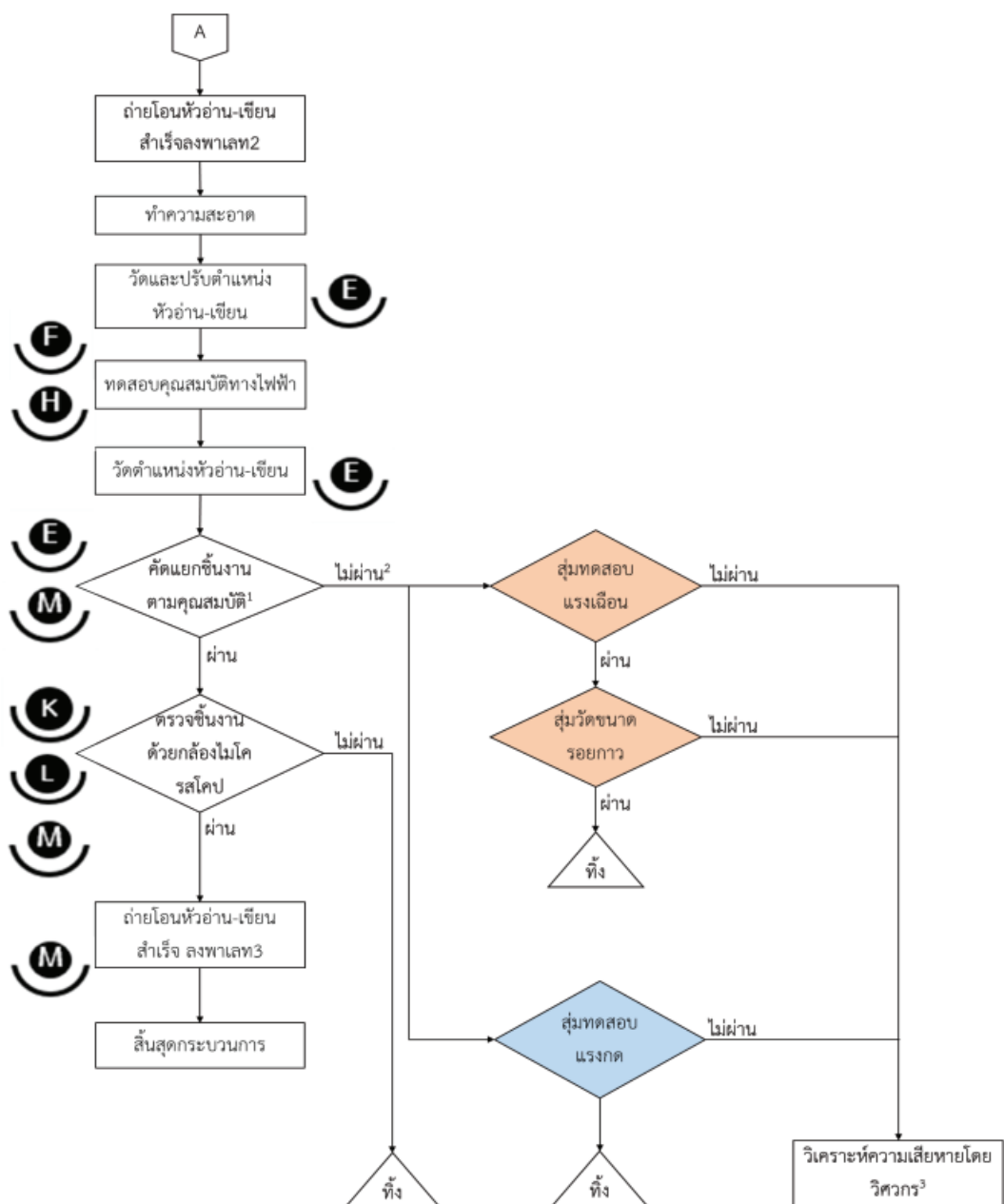
สายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) ได้ ๑ คน คือพนักงานที่ปฏิบัติงานกับเครื่องติดฮั่วอ่าน (Slider Attach) หรือตำแหน่งของพนักงาน B ในสายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) สามารถลดจำนวนพนักงานได้ ๒ คน คือพนักงานปฏิบัติงานกับเครื่องคัดแยกชิ้นงาน (Auto Sort) หรือพนักงานที่ตำแหน่ง I และพนักงานที่ปฏิบัติงานกับกล่องไมโครสโคป หรือตำแหน่งของพนักงาน J ในส่วนของเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Testing: ET) สามารถลดพนักงานได้ ๑ คน คือพนักงานที่ตำแหน่ง G การจัดสรรพนักงานใหม่ ได้กำหนดให้พนักงาน A ปฏิบัติงานแทนพนักงาน B, พนักงาน F และพนักงาน H ปฏิบัติงานแทนพนักงาน G, พนักงาน E และพนักงาน M ปฏิบัติงานแทนพนักงาน I, พนักงาน K, L และ M ปฏิบัติงานแทนพนักงาน J โดยจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) หลังจัดสรรพนักงานใหม่ แสดงดังรูปที่ 12 และจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหลัง (BOLA) หลังจัดสรรพนักงานใหม่ แสดงดังรูปที่ 13

สำหรับลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 สามารถลดพนักงานในสายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) ได้ 1 คน คือพนักงานที่ปฏิบัติงานกับเครื่องติดฮั่วอ่าน (Slider Attach) หรือตำแหน่งของพนักงาน B ในสายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) สามารถลดจำนวนพนักงานได้ 3 คน คือพนักงานปฏิบัติงานกับเครื่องวัดและปรับตำแหน่ง (Laser Static Attitude Adjust: LSA) หรือพนักงานที่ตำแหน่ง E, พนักงานปฏิบัติงานกับเครื่องคัดแยกชิ้นงาน (Auto Sort) หรือพนักงานที่ตำแหน่ง I และพนักงานที่ปฏิบัติงานกับกล่องไมโครสโคป หรือตำแหน่งของพนักงาน J ในส่วนของเครื่องทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Testing: ET) สามารถลดพนักงานได้ 1 คน

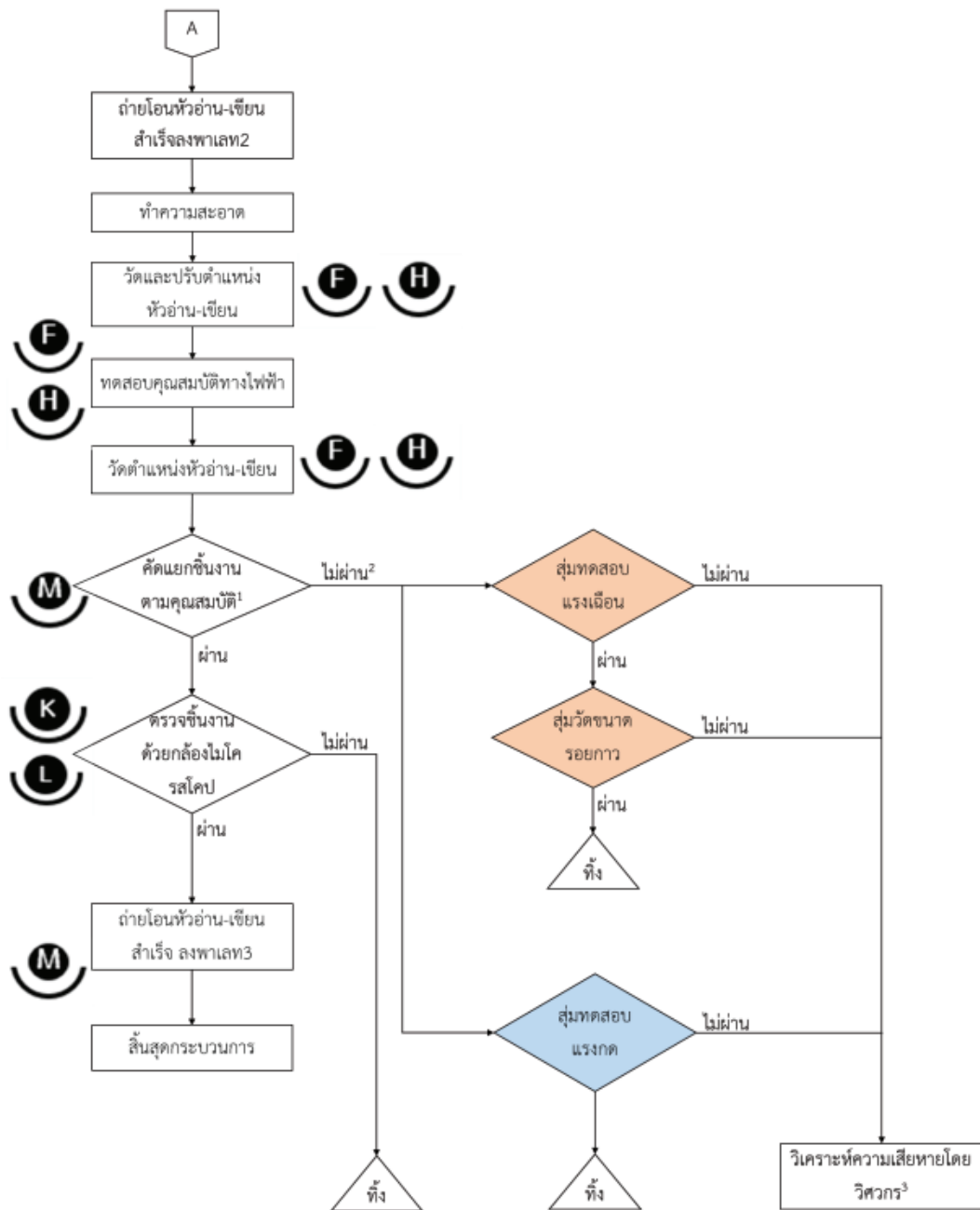
คือพนักงานที่ตำแหน่ง G แสดงดังรูปที่ 14 กำหนดให้พนักงาน A ปฏิบัติงานแทนพนักงาน B, พนักงาน F และพนักงาน H ปฏิบัติงานแทนพนักงาน G และพนักงาน E, พนักงาน M ปฏิบัติงานแทนพนักงาน I, พนักงาน K และพนักงาน L ปฏิบัติงานแทนพนักงาน J โดยจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหน้า (Front of Line Assembly: FL) หลังจัดสรรพนักงานใหม่ แสดงดังรูปที่ 9 และจำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหลัง (Back of Line Assembly: BL) หลังจัดสรรพนักงานใหม่ แสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 12 จำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหน้า สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 (หลังปรับปรุง)



รูปที่ 13 จำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหลัง สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 (หลังปรับปรุง)



รูปที่ 14 จำนวนพนักงานภายในสายการผลิตส่วนหลัง สำหรับการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 (หลังปรับปรุง)

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าการลดจำนวนพนักงาน ไม่มีผลต่อกำลังการผลิตและผลผลิตตามปริมาณความต้องการของลูกค้า โดยลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 สามารถจัดสรรจำนวนพนักงาน 8 คน ให้ปฏิบัติงานภายในสายการผลิตได้ และสำหรับ

ลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 สามารถจัดสรรจำนวนพนักงาน 7 คน ให้ปฏิบัติงานภายในสายการผลิตได้ สำหรับงานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนแรงงานต่อสายการผลิตได้สูงสุด 112,641 บาทต่อเดือน อรรถประโยชน์ของพนักงานตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 72.7% และ

ชั่วโมงว่างงานโดยเฉลี่ยลดลงเหลือ 5.73 ชั่วโมงต่อวัน และอรรถประโยชน์ของพนักงานตามลักษณะการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 80.8% และ ชั่วโมงว่างงานโดยเฉลี่ยลดลงเหลือ 4.03 ชั่วโมงต่อวัน

ผลของงานวิจัยสามารถพิสูจน์ได้ว่า การจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 2 ใช้จำนวนพนักงานต่อสายการผลิตน้อยกว่าการจัดวางสายการผลิตรูปแบบที่ 1 ดังนั้นในการจัดวางสายการผลิตในอนาคต ควรพิจารณารูปแบบการจัดวางสายการผลิตตามกลุ่มผลิตภัณฑ์ ให้อยู่

ในลักษณะรูปแบบที่ 2 เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ให้สามารถใช้ประโยชน์จากพนักงานได้มากที่สุด และควรทำแผนการฝึกอบรมงาน ให้แก่พนักงานภายในสายการผลิตที่ยังไม่มีทักษะการปฏิบัติงานนอกเหนือจากงานที่ตนเองเคยรับผิดชอบ ซึ่งพนักงานทุกคนภายในสายการผลิตควรมีทักษะในการปฏิบัติงานทุกสถานีงาน ในระดับชำนาญการ สามารถปฏิบัติงานนอกเหนือจากสถานีงานที่รับผิดชอบ เพื่อเกิดการกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง และลดชั่วโมงว่างงานของพนักงานภายในสายการผลิต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chandrakumar, C., Gowryathan, J., Kulatunga A.K., and Sanjeevan N. Incorporate LEAN and Green Concepts to Enhance the Productivity of Transshipment Terminal Operations. *Procedia CIRP*, 2016; 40: 301-306.
- [2] Kłos, S. and Trebuna, P. Using Computer Simulation Method to Improve Throughput of Production Systems by Buffers and Workers Allocation. *The Journal of Production Engineering Committee of Polish Academy of Sciences and Polish Association for Production Management*, 2015; 6(4); 60-69.
- [3] วุฒิชัย ยังสว่าง. การประยุกต์ใช้วิศวกรรมคอนเคอร์เร้นท์และการจำลองสถานการณ์ในการเพิ่มความสามารถในการผลิตของกระบวนการตัดท่อ: กรณีศึกษาบริษัทผลิตท่อน้ำมัน. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2558, 233-242.
- [4] Tijan, E., S. Aksentijević, and B. Hlača. Simulation of administrative labour costs in seaport clusters, *Scientific Journal of Maritime Research*, 2014; 28(1): 22-30.
- [5] Francisco, R.P., Campos, D.P., Frazzon, E.M. and Machado R.L. On the application of modelling and simulation to compare human-and automation-based order-picking systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2016; 49(12):1062-1067.
- [6] Wang, Y.R. and Chen, A.N. Production Logistics Simulation and Optimization of Industrial Enterprise base on FlexSim. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 2016; 15(4): 732-741.
- [7] รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. การศึกษางานอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ, 2552.
- [8] Douglas, C. Montgomery. Introduction to Statistical Quality Control 6 th ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 2008.



คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ Carbon Footprint of an Organiztion Case Study of Chaiyaphum Rajabhat University

สุรวุฒิ สุธา* และ ดุษฎีพร หิรัญ

Surawut Sudha* and Dussadeeporn Hirun

มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ 167 ตำบลนาฝาย อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

Chaiyaphum Rajabhat University, 167 Tambol Na Fai, Muang, Chaiyaphum 36000

Chiang Mai University, 50200, Thailand

*yimwow@hotmail.com, 091-827-9710, 044-815-126

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในด้านปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) เป็นหลัก เนื่องจากเป็นเหตุการณ์สำคัญที่ทำให้โลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีสาเหตุจากการเพิ่มปริมาณของก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ การจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์เป็นวิธีการประเภทหนึ่งในการแสดงข้อมูลปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาตลอดวงจรชีวิต ของทั้งผลิตภัณฑ์ กระบวนการ หรือหน่วยองค์กรหนึ่ง อันจะนำไปสู่การกำหนดแนวทางการบริหารจัดการ เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ เป็นสถานศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาหาปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ ด้านพลังงานการใช้ไฟฟ้า ด้านการใช้เชื้อเพลิงและขนส่ง ด้านการกำจัดของเสีย และด้านอื่นๆ ได้แก่ การใช้เชื้อเพลิง และการพลังงานใช้ไฟฟ้า ผลการวิจัย ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ มีปริมาณการปล่อยเป็นปริมาณรวมทั้งสิ้น 3,469.14 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี หรือคิดเป็นปริมาณ 0.569 ตันต่อนักศึกษาหนึ่งคนต่อปี โดยมีสัดส่วนการปล่อยมากที่สุดคือปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศภายในอาคารเรียนคิดเป็นร้อยละ 52.62 รองลงมาคือสัดส่วนการปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและขนส่ง จากยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ที่มีปริมาณการปล่อยคิดเป็นร้อยละ 29.70 การลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศ และการลดปริมาณการขับขี่ยานพาหนะชนิดรถจักรยานยนต์ จะเป็นแนวทางทำให้ลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้ดีที่สุด

ABSTRACT

This research study about the seriously problem of Global Warming problem. The Carbon Footprint was the one parameter that used to reduce this problem in various categories such as product life cycle, any process in factory's production or any of the organizations. Chaiyaphum Rajabhat University (CPRU) is the university placed in Chaiyaphum province and be the organization in this research and was studied in 4 categories of the emission of the standard of Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO) and the result was the emission overall from CPRU about 3,469.14 tons CO₂ per year of about 0.569 tons of CO₂ per student per year. The major category of this emission was from the emission in electrical usage part especially in the usage of air conditions in all building about 52.62 percent, the second major of emission part was the fuel combustion from the motorcycle

and calculate to be 29.70 percent. The easiest way to reduce these two major parts of emission is to reduce the amount of air conditional usage and the amount of motorcycle transportation in the area of university by using variety of campaigns by CPRU.

1. บทนำ

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมกำลังเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางที่ทำให้ประเทศทั้งหลายต่างเริ่มตระหนักและให้ความสำคัญในการศึกษา โดยมีเป้าหมายเพื่อที่จะหาวิธีลดปัญหา ลดผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ หนึ่งในปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในขณะนี้ คือ ปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) สาเหตุหลักของปัญหานี้เกิดจากบรรดาก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์โดยเฉพาะการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล ที่ลอยขึ้นไปปกคลุมชั้นบรรยากาศของโลกเพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็นตัวการสำคัญที่กักคลื่นรังสีอินฟราเรดซึ่งเป็นคลื่นความร้อนที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ไม่ให้สะท้อนออกไปนอกชั้นบรรยากาศโลกในปริมาณที่เหมาะสมตามปกติ แต่กลับสะท้อนกลับป้อนมาสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลกแทน จนเป็นเหตุทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในชั้นบรรยากาศโลก สูงขึ้นกว่ามากกว่าเดิมมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งส่งผลย้อนกลับมายังมนุษย์ เช่น เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติที่รุนแรงขึ้น เกิดความไม่มั่นคงทางด้านอาหาร เป็นต้น (องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก, 2552) [1]

ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) โดยประกอบไปด้วยก๊าซสำคัญ 7 ชนิดที่จะต้องลดการปล่อย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซเรือนกระจกที่เป็นปัญหาสำคัญที่สุด เพราะมีส่วนมากที่สุดประมาณร้อยละ 70 ในบรรดาก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ในปี 2548 ที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากทุกภาคส่วนการผลิตรวมประมาณ 351.3 ล้านตัน ซึ่งมากกว่าปี 2543 ถึง 21.3 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างรวดเร็ว ไม่มีแนวโน้มจะลดลงได้เลย ภาคเศรษฐกิจของไทยที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นปริมาณมากที่สุด คือ ภาคพลังงานและภาคอุตสาหกรรม ที่ปล่อยรวมกันคิดเป็นร้อยละ 72.47 รองลงมาคือภาคการ

เกษตรกรรมมีร้อยละ 25.28 และจากข้อมูลยังพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยในประเทศไทยมีอัตราเพิ่มขึ้นทุกปี (สำนักนโยบายและแผนพัฒนาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) [6]

การจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint: CF) เป็นวิธีการประเภทหนึ่งในการแสดงข้อมูลปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาตลอดวงจรวัฏจักรชีวิตของทั้งผลิตภัณฑ์ กระบวนการ หรือหน่วยองค์กรหนึ่ง อันจะนำไปสู่การกำหนดแนวทางการบริหารจัดการ เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในระดับโรงงาน ระดับอุตสาหกรรม และระดับประเทศ (องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก, 2553) [1] ส่วนคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร [3] คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกิจกรรมต่างๆ ขององค์กร ในส่วนของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาระดับอุดมศึกษาของไทย ปัจจุบันเริ่มมีการตื่นตัวและทำการศึกษากันมากขึ้น อาทิเช่น มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ประเมินไว้ที่ 1.62 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อนักศึกษาหนึ่งคน กิจกรรมที่มีส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรมากที่สุด คือ กิจกรรมการใช้ไฟฟ้า (ไพรัช และหาญพล, 2557) [5]

มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ เป็นสถานศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการศึกษาปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ดังกล่าว เพราะเป็นมหาวิทยาลัยใหม่ที่ได้รับการจัดตั้งได้เพียง 10 ปี แต่มีขนาดพื้นที่ขนาดใหญ่ถึงกว่า 1,482 ไร่ ในปีการศึกษา 2556 มีจำนวนนักศึกษาคาดปกติในระดับปริญญาตรี รวม 4,400 คน นักศึกษาคาด กศ.ปช. (เสาร์อาทิตย์) ระดับปริญญาตรี รวม 1,193 คน นักศึกษาระดับปริญญาโท รวม 497 คน รวมนักศึกษาทั้งหมด 6,090 คน (สำนักส่งเสริมและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ, 2557) มีบุคลากรสายวิชาการรวม 220 คน บุคลากรสายสนับสนุนรวม 189 คน

รวมทั้งสิ้น 409 คน (กองการเจ้าหน้าที่, ธันวาคม 2556) จากข้อมูลรายงานผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ เมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2556 หากคิดปริมาณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้และค่าไฟฟ้าตลอด 1 ปี ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 ถึง ตุลาคม พ.ศ.2557 ผลปรากฏว่าใช้พลังงานไฟฟ้าไปทั้งสิ้น 1,059,367.00 หน่วย (kWh)/ปี เป็นเงิน 3,479,001.97 บาท/ปี (รัฐ, 2557) [6] ซึ่งพบว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และการใช้พลังงานไฟฟ้านั้นเป็นปัจจัยหลักหนึ่งที่ส่งผลต่อปัญหาภาวะโลกร้อนโดยตรง

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

2.2 เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่างๆ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงประยุกต์เพื่อหาปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) [1] โดยการเก็บข้อมูลทุติยภูมิจากหน่วยงานภายในองค์กรทุกหน่วยที่อยู่ในขอบเขตงานวิจัยโดยวิธีสัมภาษณ์ รวมไปถึงค้นคว้าหาวิธีการจากข้อมูลเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ข้อมูลสถิติ เอกสารราชการภายใน วิทยานิพนธ์ งานวิจัยต่างๆ [5] [6] [8] และฐานข้อมูลที่เผยแพร่ทั่วไปผลที่ได้คือวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรกรณีศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ และประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมทางด้านศักยภาพในการที่จะก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ที่เกิดขึ้นทั้งหมดรวมถึงข้อเสนอแนะในการลดการปล่อยต่อไป

3.2 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการศึกษาวิจัยนี้มีลักษณะขอบเขตองค์กรเป็นแบบควบคุม (Control Approach) แบบควบคุมดำเนินงาน และมีขอบเขตการดำเนินงาน 3 ประเภท ตามคู่มือแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรองค์กรบริหารก๊าซเรือนกระจก 2554 [8] แบ่งเป็น

(1) ประเภทที่ 1 การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร ได้แก่ การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

(2) ประเภทที่ 2 การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้าในองค์กร

(3) ประเภทที่ 3 ได้แก่ การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกในด้านอื่นๆ

3.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้จะรวบรวมจากประชากรและกลุ่มตัวอย่างดังต่อไปนี้

(1) ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดปีของหน่วยงาน เลือกใช้ข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดชัยภูมิ รวมถึงงานวิจัยอื่นๆ ของมหาวิทยาลัยที่เกี่ยวข้อง

(2) ข้อมูลการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงของมหาวิทยาลัย ได้แก่ เชื้อเพลิงจากยานพาหนะต่างๆ ที่สัญจรเฉพาะภายในมหาวิทยาลัย จะทำการรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิจากการสุ่มเก็บตัวอย่างประเภท จำนวน และระยะทางของยานพาหนะที่มีการสัญจรภายในมหาวิทยาลัย โดยจะทำการเก็บข้อมูลเป็นครั้งๆ ละ 7 วัน (วันจันทร์ถึงวันอาทิตย์) โดยจะศึกษาทั้งสามภาคการศึกษา ภาคละ 1 ครั้งเป็นตัวแทนข้อมูลของภาคการศึกษา

(3) ข้อมูลการกำจัดของเสีย จะทำการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิจาก 2 แหล่ง คือ งานอาคารสถานที่ และงานวิศวกรรม

(4) ข้อมูลทุติยภูมิอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องจากข้อมูลขององค์กรที่มีการเก็บบันทึกไว้

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ จะเริ่มจากการศึกษาข้อมูลงานวิจัยด้านการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร โดยเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับองค์กรการศึกษาในระดับอุดมศึกษา รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ โดยศึกษาข้อมูลจากขอบเขตการดำเนินงานทั้ง 3 ประเภท ของอาคารหลักของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ซึ่งเป็นมหาวิทยาลัยใหม่ ที่มีอาคารหลักจำนวน 3 อาคาร ได้แก่ อาคาร 50 พรรษามหาชิราลงกรณ (อาคารเรียนรวมสูง 6 ชั้น), อาคารบรรราชนครินทร์ (อาคารเรียนสูง 5 ชั้น) และอาคารศูนย์ภาษาและคอมพิวเตอร์ สูง 4 ชั้น จากนั้นดำเนินการรวบรวมค่าแฟคเตอร์ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO₂ Emission Factor) [2] [5] [7] จากแหล่งข้อมูลสนับสนุนต่างๆทั้งในประเทศและต่างประเทศ เพื่อหาแฟคเตอร์และวิธีการวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ เพื่อนำมารวบรวมทำรายการ แสดงผลการคำนวณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรต่อไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ขอบเขตการดำเนินงานประเภทที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงขององค์กร

จากการเก็บข้อมูลปฐมภูมิเกี่ยวกับปริมาณการใช้ยานพาหนะภายในมหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2556 โดยการลงเก็บพื้นที่จริงภายในมหาวิทยาลัยโดยการนับแยกประเภทยานพาหนะจากประตูทางเข้าออกมหาวิทยาลัยทุกประตูในรอบหนึ่งสัปดาห์ โดยทำการเก็บข้อมูลในช่วงกลางเดือนตุลาคม 2556 ที่มีการจัดการเรียนการสอนปกติ แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการหาจำนวนพาหนะเฉลี่ยแยกตามประเภท ได้ข้อมูลดังตาราง 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของยานพาหนะที่สัญจรภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ในปี 2556

ประเภทของพาหนะ	จำนวนเฉลี่ยต่อวัน	ระยะทางเฉลี่ยต่อวัน (กม.)	Emission Factor (TGO)	CF _{exhaust} (kg CO ₂ e)
A	35.429	5.74	0.3105	23,047.58
B	1.143	2.87	0.0720	86.21
C	2.571	2.87	0.0529	142.47
D	4.380	5.74	0.2684	2,462.98
E	5.429	2.87	0.0548	311.66
F	0.286	3.15	0.1126	37.03
G	129.571	5.74	0.0610	16,599.32
H	1,045.14	5.74	0.4706	1,030,462.98
Total				1,073,110.22

ที่มา: ได้จากการลงเก็บในพื้นที่จริงในเขตมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิในเดือนตุลาคม 2556

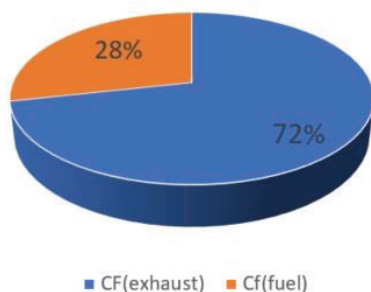
ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ปี 2556 ในส่วนของการเผาไหม้จากการใช้ยานพาหนะรวมเป็นปริมาณทั้งสิ้น 1,073,712.70 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยเกิดจากการเผาไหม้จากยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์มากที่สุดถึงร้อยละ 96.03

ตารางที่ 3 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของยานพาหนะที่สัญจรภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ในปี 2556

เชื้อเพลิง	ปริมาณใช้ต่อวัน	หน่วย	EF	จำนวนพาหนะเฉลี่ยต่อวัน	CF _{fuel} (kg CO ₂ e)
เบนซิน	0.459	ลิตร	2.1896	1,134.68	416,238.70
ดีเซล	0.195	ลิตร	2.7080	49.24	9,493.65
LPG	0.202	ก.ก.	0.4166	36.45	1,119.59
NGV	0.074	ก.ก.	0.4645	3.58	44.92
รวม					426,896.86

ที่มา: ได้จากการลงเก็บในพื้นที่จริงในเขตมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิในเดือนตุลาคม 2556

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ปี 2556 ในส่วนของการประเภของเชื้อเพลิงที่ใช้รวมเป็นปริมาณทั้งสิ้น 426,896.86 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ในจำนวนนี้เกิดจากการใช้น้ำมันเบนซินมากที่สุดถึงร้อยละ 97.50 สรุปปริมาณการปล่อยจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงยานพาหนะรวมทั้งหมดคือ 1,500,000.08 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมากที่สุดถึงร้อยละ 71.54 ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ 2556

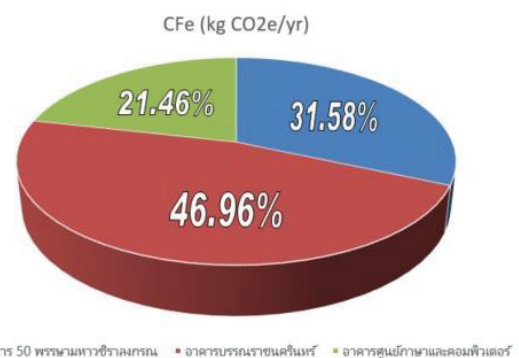
4.2 ขอบเขตการดำเนินงานประเภทที่ 2 การปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน

จากการเก็บข้อมูลทุติยภูมิด้านการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าของอาคารในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิทั้ง 3 อาคาร ได้แก่ อาคารบรรณราชนครินทร์, อาคาร 50 พรรษามหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ และอาคารศูนย์ภาษาและคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นอาคารหลักของมหาวิทยาลัยที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นประจำในแต่ละวันทำการ ที่มีการตรวจวัดอาคารละ 3 วัน เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในส่วนของการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง จะได้ผลสรุปดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกจากการใช้พลังงานไฟฟ้าอาคารของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ในปี 2556 (หน่วย: kg CO₂e)

อาคาร	CF _{Light}	CF _{Air}	CF _{electric}
50 พรรษาฯ	42,706.06	579,108.23	621,823.29
บรรณราชนครินทร์	52,236.43	872,485.40	924,721.83
ศูนย์ภาษาฯ	48,734.37	373,861.76	422,595.50
รวม	143,676.86	1,825,463.76	1,969,140.62

ที่มา: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคชัยภูมิ



รูปที่ 1 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการใช้พลังงานไฟฟ้ามหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ปี 2556

4.3 ขอบเขตการดำเนินงานประเภทที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในด้านอื่นๆ

จากการประสานงานด้านข้อมูลกับกองอาคารสถานที่ สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ เกี่ยวกับการกำจัดของเสียและระบบบำบัดต่างๆ พบว่าไม่ได้มีการเก็บข้อมูลทางด้านการกำจัดของเสียไว้ การระบายน้ำเสียในแต่ละอาคารยังเป็นการระบายน้ำเสียที่ออกจากถังบำบัดสำเร็จรูปเป็นหลักและปล่อยลงสู่ธรรมชาติที่ไม่มีการบำบัดที่แน่นอนและยังไม่ได้มีการเก็บข้อมูลไว้ในปี 2556 จึงไม่นำมารวมไว้ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ ในส่วนของปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกิจกรรมในด้านอื่นๆ เช่น การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมด้านการก่อสร้างอาคาร หรือ การจัดซื้อจัดจ้างวัสดุและครุภัณฑ์สำนักงาน เป็นกิจกรรมที่มีรายละเอียดเป็นปริมาณมหาศาล อีกทั้งมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิยัง

ขาดการเก็บรักษาข้อมูลที่เป็นระเบียบ จะต้องใช้ระยะเวลาในการสืบค้นและวิเคราะห์มาก อีกทั้งจากการศึกษาในงานวิจัยอื่นๆ พบว่า การปล่อยจากขอบเขตอื่นๆ นั้นมีสัดส่วนปริมาณน้อยมาก ผู้วิจัยจึงยังไม่รวมไว้ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ มีปริมาณการปล่อยเป็นปริมาณรวมทั้งสิ้น 3,469,140.70 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยมีสัดส่วนการปล่อยมากที่สุดคือ ขอบเขตการดำเนินงานประเภทที่ 2 ได้แก่ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศภายในอาคารเรียนถึง 1,825,463.76 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี คิดเป็นร้อยละ 52.62 ของสัดส่วนปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทั้งหมดขององค์กร รองลงมาคือสัดส่วนการปล่อยจากขอบเขตการดำเนินงานประเภทที่ 1 ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบเคลื่อนที่ พบว่า ปริมาณการปล่อยจากยานพาหนะ ประเภทรถจักรยานยนต์มีปริมาณการปล่อยก๊าซสูงที่สุด คือ 1,030,462.98 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี คิดเป็นร้อยละ 29.70 ของสัดส่วนปริมาณการปล่อยจากผลการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ทั้งหมดขององค์กร ที่เหลือร้อยละ 17.68 เป็นสัดส่วนการปล่อยที่เหลือทั้งหมดรวมกัน เมื่อนำจำนวนนักศึกษาทั้งหมดที่ทำการศึกษตลอดปีการศึกษา 2556 เป็นฐานการคำนวณ (กองบริการการศึกษา, 2556) ที่มีจำนวนนักศึกษาลงทะเบียนเรียนรวม 6,090 คน จะได้ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิตำนวนตามฐานจำนวนนักศึกษาได้เป็นปริมาณเฉลี่ย 569.65 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อนักศึกษาหนึ่งคนต่อปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิควรมีการลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบเครื่องปรับอากาศ เช่น มีการรณรงค์ให้เปิดเครื่องปรับอากาศเป็นช่วงเวลา เช่น เวลา 13.00 – 16.00 น. แทนการเปิดเครื่องปรับอากาศทั้งวัน หรือ ปรับปรุงการระบายความร้อนอาคารด้วยเทคนิคเชิง eco-building เพื่อให้อุณหภูมิภายในอาคารไม่ร้อนเกินไป ซึ่งจะลดการเปิดเครื่องปรับอากาศได้อีกทางหนึ่ง

(2) มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิควรมหาแนวทางแก้ปัญหาเชิงรณรงค์เพื่อลดปริมาณการขับจักรยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ เช่น รณรงค์ทางเดียวกันไปด้วยกัน หรือจัดให้มีรถรับส่งภายในมหาวิทยาลัยตามความเหมาะสม

(3) มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ควรศึกษาและออกแบบอาคาร กลุ่มอาคาร ระบบสาธารณูปโภคภายในมหาวิทยาลัยให้สอดคล้องกับแนวทางในการลดภาวะโลกร้อน เช่น จัดให้อาคารเรียนเป็นกลุ่มอาคารที่ตั้งอยู่ใกล้กัน เพื่อลดการเดินทางด้วยพาหนะบ่อยครั้ง การออกแบบอาคารควรออกแบบให้มีการระบายถ่ายเทอากาศและความร้อนได้ดี เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการเปิดเครื่องปรับอากาศได้ดียิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากหลายฝ่ายในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่ได้กรุณาให้ข้อมูลของมหาวิทยาลัยในอดีตจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่าเหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของคณะผู้วิจัยที่ทำให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาเกี่ยวกับการ์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรประเภทมหาวิทยาลัยในประเทศไทยและผู้ที่เกี่ยวข้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก (2552). คาร์บอนฟุตพริ้นท์, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.tgo.or.th/index.php?option=com_content&task=category§ionid=8&id=44&Itemid=68
- [2] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2552). ค่า Emission Factor โดยแบ่งตามกลุ่มอุตสาหกรรมของประเทศ ไทย, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/products_emission/products_emission.pnc
- [3] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2554). แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://tgoweb.logicdevsite.com/2015/tgojml/index.php/component/html5flippingbook/publication/-/12#page/0>
- [4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2554). รายงานสรุปค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยประจำปี 2553, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.tgo.or.th/2015/thai/download_detail.php?id=27
- [5] ไพรัช อุตกรัตน์ (2557). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://tujournals.tu.ac.th/tstj/detailart.aspx?ArticleID=68>.
- [6] รัชฎ์ สุทธิ (2557). รายงานวิจัยเรื่อง การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ, สำนักวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ.
- [7] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2005). Global Warming Potentials and Other Metrics for Comparing Different Emissions, available online: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>.
- [8] Anthony Ferraro (2009). The Carbon Footprint of Miami University, Oxford, Ohio, available online: <https://pfd.muohio.edu/sustainability/carbon.php>
- [9] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2554). แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://library.psru.ac.th/GreenLib/files>



การพัฒนาวิธีการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางโดยพิจารณาที่ กรอบเวลาแบบหมุน กรณีศึกษา: บริษัทผลิตอาหารสัตว์

The Development Centralized Purchasing Method Considering Rolling Horizon: A Case Study of Feed Production Company

กมลนัท อรุณรัตน์ วิชาวี ธรรมภรณ์พิลาศ* และ วรโชค ไชยวงศ์

Kamolnut Arunrat, Wipawee Tharmmaphornphilas* and Worachok Chaiwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Chulalongkorn University,

254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok Thailand. 10330

*E-mail: wipawee.t@chula.ac.th, kamolnut.a@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการสั่งซื้อถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ของบริษัทแห่งหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วย 12 โรงงาน และผู้ผลิตถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ 3 ราย โดยพิจารณาถุงบรรจุภัณฑ์ทั้งหมด 188 ชนิด ในปัจจุบัน การสั่งซื้อของแต่ละโรงงานจะเป็นอิสระต่อกัน พนักงานจัดซื้อวางแผนโดยไม่มีการร่วมมือใดๆ ช่วยตัดสินใจอาศัยเพียงประสบการณ์ในการตัดสินใจ เป็นผลให้เกิดต้นทุนจัดซื้อที่สูง บทความนี้ได้สร้างแนวทางการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางโดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Programming) เพื่อช่วยตัดสินใจปัญหาที่ซับซ้อน ภายใต้เงื่อนไขที่บริษัทและผู้ผลิตกำหนด วิธีการนี้ช่วยลดต้นทุนจัดเก็บพัสดุคงคลัง ลดต้นทุนสินค้าและ ลดค่าใช้จ่ายในการจัดส่ง จากการทดสอบกับข้อมูลจริงพบว่าในช่วงแรกระบบจะตัดสินใจนำพัสดุคงคลังที่ค้างอยู่มาใช้เป็นผลให้ระบบตัดสินใจสั่งซื้อน้อย ทำให้ต้นทุนในช่วงแรกลดลงเป็นจำนวนมาก และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่า การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางสามารถลดต้นทุนรวมในระบบเฉลี่ยต่อสัปดาห์ได้ 810,974 บาท ซึ่งคิดเป็น 10.66%

คำสำคัญ: การสั่งซื้อผ่านส่วนกลาง โปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม กรอบเวลาแบบหมุน

ABSTRACT

The purpose of this paper is to reduce ordering cost of feed packaging of a company having 12 production plants, 3 suppliers and 188 SKUs (Stock Keeping Unit). Currently, each plant staff makes decisions based on his/her own judgment that comes from his/her experience without decision making tools resulting in high purchasing cost. This paper develops a centralized purchasing system using mixed-integer programming to help making decision in a complex system under the conditions which the company and suppliers defined. This system can reduce holding cost, product cost and transportation cost. Testing the system with real data, it found that in the initial stage the model decides to use current inventory resulting in small order quantity. Thus, the total cost in the initial stage is extremely reduced. For the later stages, with this centralized system, the total cost is reduced 810,974 baht per week or about 10.66%.

Keywords: Centralized purchasing, Mixed-Integer Programming, Rolling Horizon

1. บทนำ

การบริหารบริษัทให้สามารถอยู่ในสภาวะการแข่งขันที่รุนแรงได้นั้น จำเป็นต้องบริหารจัดการให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด เพื่อให้บริษัทสามารถแข่งขันในตลาดได้ จากบริษัทกรณีศึกษา พบว่าต้นทุนการสั่งซื้ออุปกรณ์อาหารสัตว์ของบริษัทซึ่งประกอบไปด้วย 12 โรงงานมีค่าสูง ดังนั้นหากทางบริษัทสามารถบริหารจัดการการสั่งซื้ออุปกรณ์อาหารสัตว์ได้อย่างเหมาะสม จะช่วยลดต้นทุนรวมได้

จากการศึกษาวิธีการสั่งซื้ออุปกรณ์อาหารสัตว์ พบว่า ปัจจุบันการสั่งซื้ออุปกรณ์อาหารสัตว์ของทั้ง 12 โรงงาน จะเลือกสั่งซื้อจากผู้ผลิต 3 ราย ตามสัดส่วนที่ตกลงไว้กับทางผู้ผลิต โดยที่การวางแผนสั่งซื้อของทั้ง 12 โรงงาน นั้นจะเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีการควบคุมการสั่งซื้อผ่านส่วนกลาง การวางแผนสั่งซื้อเป็นการตัดสินใจของพนักงานที่วางแผนในโรงงานนั้นๆ ไม่มีหลักเกณฑ์แน่นอนตายตัว ไม่มีเครื่องมือใดๆช่วยในการตัดสินใจ ใช้เพียงประสบการณ์ส่วนตัวในการสั่งซื้อ และพิจารณาเพียงว่าการสั่งซื้อต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของข้อตกลงระหว่างบริษัทผู้ผลิตแต่ละราย

เนื่องจากเงื่อนไขตามข้อตกลงมีความซับซ้อน ทำให้พนักงานใช้เวลาตัดสินใจนาน อีกทั้งยังส่งผลให้การตัดสินใจมีความผิดพลาดและไม่มีประสิทธิภาพมากนัก และเนื่องจากการวางแผนสั่งซื้อของทั้ง 12 โรงงานเป็นอิสระต่อกันทำให้ผู้วางแผนสั่งซื้อของแต่ละโรงงานไม่ทราบยอดรวมที่ผู้ผลิตต้องผลิต รวมถึงไม่ทราบความสามารถในการรองรับการผลิตที่เหลือของผู้ผลิต ซึ่งหากในช่วงเวลาต่างๆ มีการสั่งซื้อพร้อมๆ กันจากหลายโรงงานจะส่งผลให้ทางผู้ผลิตไม่สามารถผลิตและจัดส่งได้ทันเวลา จึงเกิดการส่งเร่งด่วน เป็นผลให้ทางโรงงานขาดความเชื่อมั่นในตัวผู้ผลิต จึงจำเป็นต้องสั่งสินค้าในปริมาณที่มากกว่าเดิมเพื่อเก็บเป็นพัสดุคงคลังไว้ใช้ในสายการผลิต ส่งผลให้เกิดสินค้าค้างในระบบตามมา ซึ่ง

สิ่งเหล่านี้จะสะท้อนมายังต้นทุนการจัดส่งและการจัดเก็บสูงตามมา

แนวคิดการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจึงเกิดขึ้น เพื่อให้เห็นภาพรวมการสั่งของทุกโรงงาน จำนวนการใช้อุปกรณ์อาหารสัตว์ และจำนวนคงคลังโดยรวมของทั้ง 12 โรงงาน จะได้มีการตัดสินใจสั่งซื้อที่เหมาะสม โดยพิจารณาการสั่งซื้อของแต่ละโรงงานให้เหมาะสมกับผู้ผลิตแต่ละรายโดยที่สัดส่วนการสั่งยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขของข้อตกลง นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาการขนส่งร่วมกันระหว่างโรงงาน เพื่อประหยัดต้นทุนในการจัดส่ง [1]

บทความนี้จะเสนอแนวทางการสั่งซื้อผ่านส่วนกลาง โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อระบุปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่สั่งซื้อจากผู้ผลิตแต่ละราย ปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่จัดเก็บในแต่ละช่วงเวลา เส้นทางที่ใช้ในการจัดส่ง รวมถึงขนาดรถและจำนวนเที่ยวรถที่ใช้ในการจัดส่ง เนื่องจากโรงงานมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลปริมาณการใช้จริงอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่สอดคล้องกับความต้องการปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการวางแผนแบบ กรอบเวลาแบบหมุน (Rolling Horizon) เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน ซึ่งการปรับข้อมูลนี้ทำให้ข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใกล้เคียงกับปัญหาหน้างานจริงมากขึ้น [2, 3]

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางพบว่า Munson และ Hu [4] ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้ระบบการตัดสินใจสั่งซื้อผ่านส่วนกลางที่มีผลต่อระดับสินค้าคงคลัง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีสต็อกเพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสม จากนั้น Karjalainen [5] ได้ศึกษาผลกระทบด้านต้นทุนของการสั่งซื้อผ่านระบบส่วนกลางโดยการเปรียบเทียบต้นทุนการดำเนินการของการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางและ การสั่งซื้อแบบไม่ผ่านส่วนกลาง

ซึ่งผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้พบว่า การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะสามารถประหยัดต้นทุนได้มากกว่า

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาเลือกสั่งซื้อจากผู้ผลิตหลายราย Ghodsypour และ O'Brien [6] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในการแก้ปัญหาการเลือกซื้อสินค้าจากผู้ผลิตที่มีความหลากหลาย โดยต้องการให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้พิจารณาเพียงสินค้าประเภทเดียว ต่อมา Hammami et al. [7] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาในลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีการพิจารณาเพิ่มเติมของสินค้าหลายประเภท สิ่งที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้คือ จำนวนสินค้าแต่ละประเภทที่ต้องสั่งจากผู้ผลิตแต่ละรายในแต่ละช่วงเวลา จากนั้น Pazhani และ Mendoza [8] ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่อ เพื่อพิจารณาเป็นส่วนใหญ่การสั่งซื้อของผู้ผลิตต่างๆ โดยได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมกรณีต้นทุนขนส่งเป็นค่าฟังก์ชันเชิงเส้นแบบช่วง (Piecewise) กล่าวคือ ปริมาณการขนส่งต่อคันรถจะมีผลต่อต้นทุนการขนส่งด้วย

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการขนส่ง รวมไปถึงการพิจารณาเลือกเส้นทางขนส่ง ชวิศ บุญมี และ ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์ [9] ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ต้นทุนการขนส่งที่ต่ำที่สุด โดยพิจารณาเลือกศูนย์กระจายสินค้าเพื่อส่งมอบต่อ และ Zhang et al. [10] ได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อเลือกเส้นทางที่เหมาะสมจากตัวเลือกเส้นทางเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งจะพิจารณาจากระยะทางและเวลา เพื่อลดต้นทุนการขนส่ง ในขณะที่ Gao et al. [11] พิจารณาปัญหาการเลือกเส้นทางจากเส้นทางเดิมที่มีอยู่แล้วเช่นกัน และได้มีการพิจารณาเพิ่มเติมการออกแบบเส้นทาง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัย 3 ชิ้นนี้ไม่ได้มีการกล่าวถึงขนาดรถ และต้นทุนการจัดเก็บ

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับต้นทุนการขนส่ง และต้นทุนการจัดเก็บ Vidović et al. [12] สนใจปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งเพื่อเติมเต็มเชื้อเพลิงหลายชนิด จากคลังไปยัง

สถานีต่างๆ ในแต่ละวัน ซึ่งได้นำเสนอปัญหาในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ต้นทุนการจัดเก็บ และต้นทุนการขนส่งที่ต่ำที่สุด ในเวลาเดียวกัน Mirzapour และ Rekik [13] ได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพื่อจัดเส้นทางขนส่งที่พิจารณาสินค้าหลายชนิด หลายช่วงเวลา โดยพิจารณาการขนส่งจากผู้ผลิตหลายๆที่มายังโรงงานเป้าหมาย

3. รูปแบบปัญหา

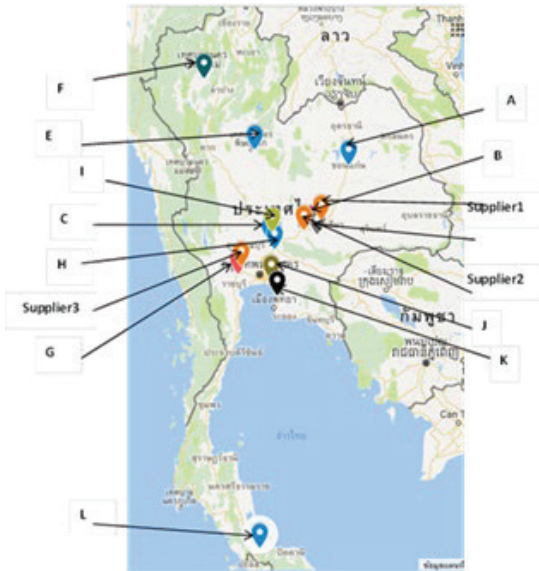
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการสั่งซื้ออุปกรณ์อาหารสัตว์ของบริษัทแห่งหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วย 12 โรงงาน จากผู้ผลิตบรรจุก้นท์ 3 ราย โดยต้องการให้เกิดค่าใช้จ่ายดำเนินการต่าง ๆ น้อยที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วย ต้นทุนสินค้า ต้นทุนการจัดเก็บสินค้า และ ต้นทุนการขนส่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะหมายถึงค่าขนส่ง โดยเงื่อนไขต่างๆ ที่นำมาพิจารณาในการสั่งซื้อ การเลือกผู้ผลิต การเลือกเส้นทาง รวมไปถึงการกำหนดปริมาณคงคลัง มีดังนี้

1. ระยะเวลาการตัดสินใจเป็นรายสัปดาห์ โดยการนำไปใช้จะเป็นในลักษณะ “กรอบเวลาแบบหมุน” หรืออธิบายได้ว่า เบื้องต้นจะวางแผนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (3 เดือน) ที่มีการปรับปรุงข้อมูลทุก 4 สัปดาห์ โดยผลเฉลยใน 4 สัปดาห์แรกจะเป็นแผนที่บริษัทนำไปใช้จริง ส่วนผลเฉลยในสัปดาห์ที่เหลือจะเป็นเพียงการประมาณการเพื่อแจ้งให้ทางผู้ผลิตทราบ เพื่อที่ทางผู้ผลิตจะได้จัดเตรียมวัตถุดิบได้ทัน จากนั้นเมื่อผ่านไป 4 สัปดาห์จะมีการปรับปรุงข้อมูลนำเข้าความต้องการใหม่ที่มาจากการยืนยันของลูกค้าและโดยผลของ 4 สัปดาห์แรกจะนำไปใช้จริงเช่นเดิม และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ

2. ความต้องการใช้ถูงบรรจุก้นท์อาหารสัตว์ทราบล่วงหน้าซึ่งมาจากการประมาณการของบริษัทที่มีความแม่นยำสูง

3. เทียบรถขนส่งมีไม่จำกัด

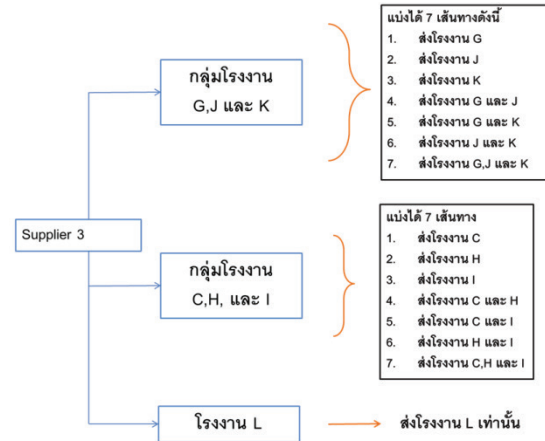
4. เส้นทางในการขนส่งจะพิจารณาเลือกเฉพาะเส้นทางที่ทางผู้ผลิตสามารถจัดส่งได้จริงเท่านั้น โดยพิจารณาจากตำแหน่งที่ตั้งของผู้ผลิต 3 ราย และตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานทั้ง 12 โรงงาน ดังรูปที่ 1 ซึ่งคิดเป็น 47 เส้นทางตามรูปที่ 2-4



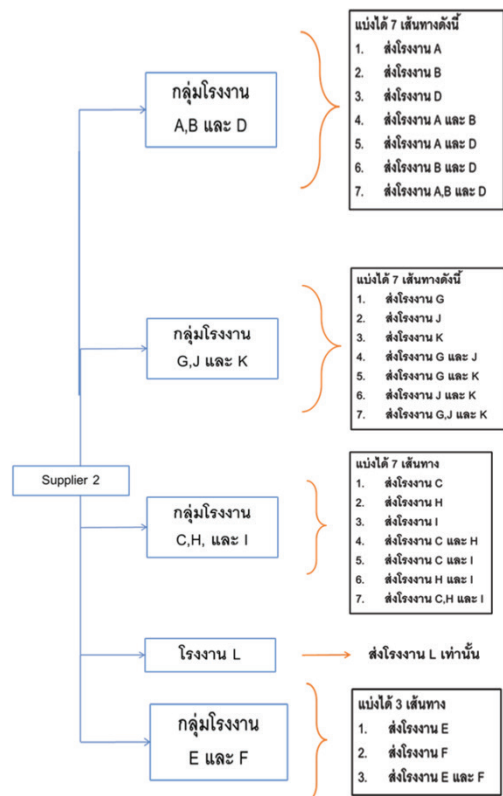
รูปที่ 1 ตำแหน่งของทั้ง 12 โรงงานและ ผู้ผลิต 3 ราย



รูปที่ 2 เส้นทางที่เฉพาะผู้ผลิตรายที่ 1 สามารถจัดส่งได้



รูปที่ 3 เส้นทางที่เฉพาะผู้ผลิตรายที่ 3 สามารถจัดส่งได้



รูปที่ 4 เส้นทางที่เฉพาะผู้ผลิตรายที่ 2 สามารถจัดส่งได้

5. พิจารณารถ 3 ขนาด: 4 ล้อ 6 ล้อ และ 10 ล้อ โดยปริมาณการจัดส่งแต่ละรอบต้องไม่เกินความจุของรถ

6. บริษัทได้ตกลงสัดส่วนการสั่งซื้อถุงบรรจุภัณฑ์จากผู้ผลิตทั้ง 3 รายในแต่ละเดือน (รวม 4 ครั้ง) ดังนี้

- ต้องสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 1 ไม่ต่ำกว่า 250 ลีต
 - ต้องสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 2 หลังจากหักยอดการสั่งจากผู้ผลิตรายแรกแล้ว สัดส่วนการสั่งซื้อจะเป็น 70-80% ของการสั่งทั้งหมด และสัดส่วนที่เหลือจะตกเป็นของผู้ผลิตรายที่ 3
- *การสั่งซื้อจากผู้ผลิตทุกรายต้องสั่งซื้อเป็นลีตเท่านั้น โดยกำหนดว่า 1 ลีต = 1,000 ใบ

7. รายละเอียดการสั่งซื้อถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ของ 12 โรงงาน จากผู้ผลิตทั้ง 3 ราย จะพิจารณาจากชนิดสินค้าที่ทางผู้ผลิตสามารถผลิตให้แก่โรงงานได้ซึ่งรวมทั้งรวม 188 ชนิด แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดการผลิตถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ของผู้ผลิตทั้ง 3 รายให้แก่แต่ละโรงงาน

ผู้ผลิต โรงงาน	ผู้ผลิต รายที่ 1	ผู้ผลิต รายที่ 2	ผู้ผลิต รายที่ 3
A (15 ชนิด)	ผลิตได้ 6 ชนิด	ผลิตได้ 9 ชนิด (ไม่ซ้ำกับผู้ผลิต1)	-
B (23 ชนิด)	ผลิตได้ 5 ชนิด	ผลิตได้ 18 ชนิด (ไม่ซ้ำกับผู้ผลิต1)	-
C (19 ชนิด)	ผลิตได้ 5 ชนิด	ผลิตได้ 14 ชนิด (ไม่ซ้ำกับผู้ผลิต 1)	
D (1 ชนิด)	-	ผลิตได้ 1 ชนิด	-
E (16 ชนิด)	-	ผลิตได้ 16 ชนิด	-
F (26 ชนิด)	-	ผลิตได้ 26 ชนิด	-
G (26 ชนิด)	-	ผลิตได้ 26 ชนิด	
H (19 ชนิด)	-	ผลิตได้ 19 ชนิด	
I (2 ชนิด)	-	ผลิตได้ 2 ชนิด	
J (23 ชนิด)	-	ผลิตได้ 23 ชนิด	
K (5 ชนิด)	-	ผลิตได้ 5 ชนิด	
L (13 ชนิด)	-	ผลิตได้ 13 ชนิด	
รวม = 188 ชนิด			

8. กรณีของผู้ผลิตรายที่ 1 ถ้าปริมาณการสั่งทุกบรรจุภัณฑ์ทุกโรงงานรวมต่อครั้งไม่ถึง 20 ลีตจะมีค่าใช้จ่ายต่อลีตเพิ่มเติมดังนี้

- สั่งมากกว่า 10 ลีต แต่ไม่ถึง 20 ลีต คิดราคาราคาเพิ่ม 200 บาท/ลีต
 - สั่งมากกว่า 5 ลีต แต่ไม่เกิน 10 ลีต คิดราคาเพิ่ม 500 บาท/ลีต
 - สั่งมากกว่า 2 ลีต แต่ไม่เกิน 5 ลีต คิดราคาเพิ่ม 800 บาท/ลีต
 - สั่งไม่เกิน 2 ลีต คิดราคาเพิ่ม 1,000 บาท/ลีต
9. แต่ละบรรจุภัณฑ์ที่สั่งกับผู้ผลิตรายที่ 2 และ รายที่ 3 ต้องสั่งขั้นต่ำ 10 ลีต

10. ถ้าผู้ผลิตรายที่ 3 จัดส่งให้โรงงาน L ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม 10,000 บาท/เที่ยวรถ

11. ระยะเวลาจัดส่ง (Lead time) = 2 สัปดาห์

12. ปริมาณการสั่งซื้อสินค้ารวมต้องไม่เกินความสามารถในการผลิตของผู้ผลิตแต่ละราย

13. ไม่อนุญาตให้เกิดการขาดสินค้า ซึ่งในบทความนี้จะกำหนดให้มีระดับสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัย ซึ่งมาจากค่าที่ทางโรงงานเป็นผู้กำหนด

4. แบบจำลองคณิตศาสตร์

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับภาพรวมปัญหา

การกำหนดดังนี้

S = เซตของผู้ผลิต {1,2,3}

1 = ผู้ผลิตรายที่ 1 2 = ผู้ผลิตรายที่ 2 3 = ผู้ผลิตรายที่ 3

L = เซตของขนาดรถ {1,2,3}

1 = 4 ลีต 2 = 6 ลีต 3 = 10 ลีต

P = เซตของถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ {1,2, ..., 188}

$P1$ = เซตของถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ที่สามารถสั่งกับผู้ผลิตรายที่ 1 ได้ {1,2, ..., 16}

$P2 =$ เซตของถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ที่สามารถ
 สั่งกับผู้ผลิตรายที่ 2 ได้ {17,18, ...,188}
 $P3 =$ เซตของถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ที่สามารถ
 สั่งกับผู้ผลิตรายที่ 3 ได้ {87,88, ...,188}
 $J =$ เซตของโรงงาน {1,2, ...,12}; $1 = A$, $2 =$
 B , ...,12 = L
 $J1 =$ เซตของโรงงานที่ผู้ผลิตรายที่ 1 สามารถส่ง
 ได้ {1,2,3}
 $J2 =$ เซตของโรงงานที่ผู้ผลิตรายที่ 2 สามารถส่ง
 ได้ {1,2, ...,12}
 $J3 =$ เซตของโรงงานที่ผู้ผลิตรายที่ 3 สามารถส่ง
 ได้ {3,7,8, ...,12}
 $R =$ เซตของเส้นทางทั้งหมด {1,2, ...,47} ที่ผู้ผลิต
 สามารถจัดส่งได้ ตามรูปที่ 2-4
 $R1 =$ เซตของเส้นทางที่ผู้ผลิตรายที่ 1 สามารถ
 ส่งได้ {1,2, ...,7}
 $R2 =$ เซตของเส้นทางที่ผู้ผลิตรายที่ 2 สามารถส่ง
 ได้ {8,9, ...,32}
 $R3 =$ เซตของเส้นทางที่ผู้ผลิตรายที่ 3 สามารถ
 ส่งได้ {33,34, ...,47}
 $T =$ เซตของสัปดาห์ทั้งหมด {0,1,2, ..., t }
 $T1 =$ เซตของสัปดาห์ในช่วงเดือนที่ 1
 $T2 =$ เซตของสัปดาห์ในช่วงเดือนที่ 2
 $T3 =$ เซตของสัปดาห์ในช่วงเดือนที่ 3

การกำหนดข้อมูลนำเข้า

$RouteCost_{l,r} =$ ต้นทุนการขนส่งที่ใช้รถชนิด l ที่
 เส้นทาง r (บาท/รอบ)
 $HoldingCost_p =$ ต้นทุนการจัดเก็บของถุง p
 (บาท/ล็อต/สัปดาห์)
 $ProCost_{p,s} =$ ต้นทุนถุง p จากผู้ผลิต s
 (บาท/ล็อต)
 $D_{p,j,t} =$ ความต้องการใช้ถุง p ที่โรงงาน j
 ที่ช่วงเวลา t (ล็อต/สัปดาห์)

$Cap_l =$ ความจุของรถขนาด l (ล็อต/เที่ยว)
 $CapPro_s =$ ความสามารถในการผลิตของผู้ผลิต s
 (ล็อต)
 $CapWh_j =$ ความสามารถในการจัดเก็บของ
 โรงงาน j (ล็อต)
 $M =$ ข้อมูลจำลองนำเข้า (Dummy) ที่มี
 ค่ามาก ๆ เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้
 $FT =$ ค่าขนส่งเพิ่มคงที่กรณีที่ผู้ผลิตรายที่ 3
 ยังโรงงาน L (บาท/รอบ)
 $SS_{p,j} =$ ระดับคงคลังเพื่อความปลอดภัยของ
 ถุง p ที่โรงงาน j (ล็อต)
 $g_{p,j,r} =$ 1; ถุง p ของโรงงาน j สามารถจัดส่ง
 บนเส้นทาง r ได้
 0; อื่นๆ

การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ

$Truck_{l,r,t} =$ จำนวนเที่ยวรถ l เลือกใช้เส้นทาง r
 ณ ช่วงเวลา t (รอบ)
 $O_{p,j,s,t} =$ จำนวนล็อตของถุง p ที่โรงงาน j
 สั่งซื้อจากผู้ผลิต s ณ เวลา t (ล็อต)
 $Inv_{p,j,t} =$ จำนวนถุง p ที่จัดเก็บที่โรงงาน j ณ
 สิ้นสุดช่วงเวลา t (ล็อต)
 $Send_{p,r,t} =$ จำนวนถุง p ที่ขนส่งโดยเส้นทาง r
 ณ ช่วงเวลา t (ล็อต)
 $f(Cost_p) =$ ฟังก์ชันเชิงเส้นเป็นช่วง (Piecewise
 Function) ของถุงชนิด p สำหรับ
 กรณีสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 1 (บาท/ล็อต)
 $W_{p,j,s,t} =$ 1; ถ้าเกิดการสั่งถุง p ที่โรงงาน j จาก
 ผู้ผลิต s ณ ช่วงเวลา t
 0; อื่นๆ

จากข้อมูลนำเข้าและตัวแปรตัดสินใจ สามารถเขียน
 แบบจำลองคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$MinZ = \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} RoutingCost_{l,r} Truck_{l,r,t} +$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} FT Truck_{l,r=47,t} + \\ & \sum_{p \in P1} \sum_{j \in J1} \sum_{t \in T} f(Cost_p) O_{p,j,s=1,t} + \\ & \sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T} ProCost_{p,s} O_{p,j,s,t} + \\ & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} HoldingCost_p Inv_{p,j,t} \end{aligned} \quad (1)$$

$$Inv_{p,j,t-1} + \sum_{s \in S} O_{p,j,s,t-2} - D_{p,j,t} = Inv_{p,j,t} \quad ; \forall p,j,t \geq 1 \quad (2)$$

$$O_{p,j,s,t-2} = \sum_{r \in R1} g_{p,j,r} * Send_{p,r,t} \quad ; \forall p \in P1, j \in J1, s = 1, \forall t \quad (3.1)$$

$$O_{p,j,s,t-2} = \sum_{r \in R2} g_{p,j,r} * Send_{p,r,t} \quad ; \forall p \in P2 \setminus P3, j \in J2 \setminus J3, s = 2, \forall t \quad (3.2)$$

$$O_{p,j,s,t-2} = \sum_{r \in R2 \cup 3} g_{p,j,r} * Send_{p,r,t} \quad ; \forall p \in P3, j \in J3, s = 2,3, \forall t \quad (3.3)$$

$$\sum_{p \in P} Send_{p,r,t} \leq \sum_{l \in L} Cap_l * Truck_{l,r,t} \quad ; \forall r,t \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P1} \sum_{j \in J1} O_{p,j,s,t} \leq CapPro_s \quad ; \forall t, s = 1 \quad (5.1)$$

$$\sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} O_{p,j,s,t} \leq CapPro_s \quad ; \forall t, s = 2 \quad (5.2)$$

$$\sum_{p \in P3} \sum_{j \in J3} O_{p,j,s,t} \leq CapPro_s \quad ; \forall t, s = 3 \quad (5.3)$$

$$10 - O_{p,j,s,t} \leq M(1 - W_{p,j,s,t}) \quad ; \forall p(P2 \cup P3), j \in (J2 \cup J3), s = 2,3, \forall t \quad (6.1)$$

$$O_{p,j,s,t} \leq M * W_{p,j,s,t} \quad ; \forall p \in (P2 \cup P3), j \in (J2 \cup J3), s = 2,3, \forall t \quad (6.2)$$

$$\sum_{p \in P1} \sum_{j \in J1} \sum_{t \in T1} O_{p,j,s,t} \geq 250 \quad ; s = 1 \quad (7.1)$$

$$\sum_{p \in P1} \sum_{j \in J1} \sum_{t \in T2} O_{p,j,s,t} \geq 250 \quad ; s = 1 \quad (7.2)$$

$$\sum_{p \in P1} \sum_{j \in J1} \sum_{t \in T3} O_{p,j,s,t} \geq 250 \quad ; s = 1 \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} \sum_{t \in T1} O_{p,j,s=2,t} \geq \\ & 0.70 (\sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T1} O_{p,j,s,t}) \end{aligned} \quad (8.1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} \sum_{t \in T2} O_{p,j,s=2,t} \geq \\ & 0.70 (\sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T2} O_{p,j,s,t}) \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} \sum_{t \in T3} O_{p,j,s=2,t} \geq \\ & 0.70 (\sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T3} O_{p,j,s,t}) \end{aligned} \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} \sum_{t \in T1} O_{p,j,s=2,t} \leq \\ & 0.80 (\sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T1} O_{p,j,s,t}) \end{aligned} \quad (9.1)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} \sum_{t \in T2} O_{p,j,s=2,t} \leq \\ & 0.80 (\sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T2} O_{p,j,s,t}) \end{aligned} \quad (9.2)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P2} \sum_{j \in J2} \sum_{t \in T3} O_{p,j,s=2,t} \leq \\ & 0.80 (\sum_{p \in (P2 \cup P3)} \sum_{j \in (J2 \cup J3)} \sum_{s=2}^3 \sum_{t \in T3} O_{p,j,s,t}) \end{aligned} \quad (9.3)$$

$$\sum_{p \in P} Inv_{p,j,t} \leq CapWh_j \quad ; \forall j,t \quad (10)$$

$$Truck_{l,r,t} \in Int+ \quad ; \forall l,r,t \quad (11)$$

$$O_{p,j,s,t} \in Int+ \quad ; \forall p,j,s,t \quad (12)$$

$$W_{p,j,s,t} \in \{0,1\} \quad ; \forall p,j,s,t \quad (13)$$

$$Send_{p,r,t} \geq 0 \quad ; \forall p,r,t \quad (14)$$

$$Inv_{p,j,t} \geq SS_{p,j} \quad ; \forall p,j,t \quad (15)$$

สมการ (1) เป็นสมการวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยพิจารณาต้นทุนการขนส่งแต่ละเส้นทาง ต้นทุนขนส่งครั้งที่กรณีผู้ผลิตรายที่ 3 ส่งไปโรงงาน L ต้นทุนของบรรจุภัณฑ์ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีคือ 1) ต้นทุนการสั่งซื้อของผู้ผลิตรายที่ 1 ที่มีต้นทุนต่อหน่วยไม่คงที่ (Piecewise Linear Function) ซึ่งยังไม่ใช่ฟังก์ชันเชิงเส้นจึงต้องทำการแปลงให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นต่อไป (อธิบายในแบบจำลองคณิตศาสตร์ ส่วนที่ 2) ต้นทุนการสั่งซื้อของผู้ผลิตรายที่ 2 และ 3 ที่มีต้นทุนต่อหน่วยคงที่ และส่วนสุดท้ายคือต้นทุนการจัดเก็บสินค้า เงื่อนไข (2) เป็นเงื่อนไขการไหลเพื่อคำนวณหาระดับสินค้าคงคลังแต่ละชนิดสินค้า แต่ละโรงงาน เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลานั้นๆ เงื่อนไข (3.1) - (3.3) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดว่าปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่ส่งจะต้องเท่ากับปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่ขนส่งไปยังโรงงานนั้นๆ โดยเงื่อนไขที่ (3.1) เป็นข้อจำกัด

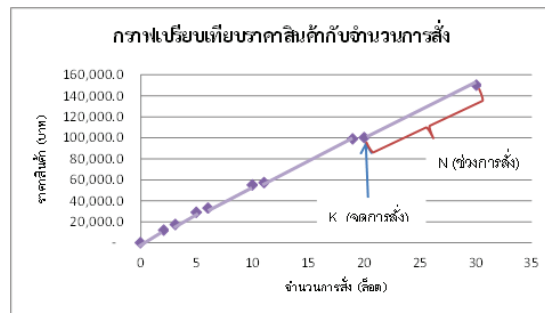
ของการสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 1 เท่านั้น เงื่อนไขที่ (3.2) เป็นข้อจำกัดของการสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 2 เท่านั้น และ เงื่อนไขที่ (3.3) เป็นข้อจำกัดของบรรจุกัณฑ์ที่สามารถการสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 2 และรายที่ 3 ได้ เงื่อนไข (4) ปริมาณที่ส่งไม่เกินความจุของรถขนส่ง เงื่อนไข (5.1) – (5.3) ปริมาณที่สั่งรวมทุกบรรจุกัณฑ์ ทุกโรงงาน จะต้องไม่เกินความสามารถในการผลิตของผู้ผลิตนั้นๆ เงื่อนไข (6.1) และ (6.2) แสดงว่าถ้าจะสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 2 และรายที่ 3 ในแต่ละครั้งในแต่ละชนิด ต้องสั่งขั้นต่ำ 10 ล็อต ซึ่งจะทำให้ $W_{p,j,s,t}$ เท่ากับ 1 แต่ถ้าไม่สั่งจะเท่ากับ 0 เงื่อนไข (7.1) – (7.3) กำหนดให้การสั่งรวมกันของทุกโรงงาน ทุกผลิตภัณฑ์รวมกัน 4 ครั้งใน 1 เดือนต้องสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 1 ไม่ต่ำกว่า 250 ล็อต เงื่อนไข (8.1) – (8.3) แสดงถึงการสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 2 ต้องมากกว่า 70% ของการสั่งซื้อจากผู้ผลิตรายที่ 2 รวมกับผู้ผลิตรายที่ 3 ในทุกเดือน เงื่อนไข (9.1) – (9.3) การสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 2 ต้องไม่เกิน 80% ของการสั่งซื้อจากผู้ผลิตรายที่ 2 รวมกับผู้ผลิตรายที่ 3 ในทุกเดือน เงื่อนไข (10) ปริมาณสินค้าคงคลังรวมในแต่ละโรงงาน แต่ละช่วงเวลาต้องไม่เกินความสามารถในการจัดเก็บของโรงงานนั้นๆ เงื่อนไข (11) – (14) เป็นการกำหนดประเภทตัวแปรตัดสินใจ และ เงื่อนไข (15) เป็นเงื่อนไขที่ใช้กำหนดระดับคงคลังให้ไม่ต่ำกว่าระดับคงคลังเพื่อความปลอดภัย

4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับฟังก์ชันเชิงเส้นเป็นช่วง (Piecewise Linear Function)

เนื่องจากต้นทุนของผู้ผลิตรายที่ 1 มีต้นทุนต่อหน่วยไม่คงที่ ซึ่งแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 5 ดังนั้นแล้วในส่วนนี้จะทำการปรับรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เกิดฟังก์ชันเชิงเส้น โดยแทนค่าสมการที่ 16

$$f(Cost_p)O_{p,j,s=1,t} = \sum_{k \in K} Z_{k,t} Cost(b_{p,k}) \quad (16)$$

ในฟังก์ชันจุดประสงค์และเพิ่มเงื่อนไข (17)-(22) ในแบบจำลอง (3.1) รายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 5 ราคาสินค้ากับจำนวนที่สั่ง

การกำหนดดัชนี

N = เซตของช่วงปริมาณการสั่งซื้อที่ทุกๆ โรงงานสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 1 ที่ทำให้ราคาของบรรจุกัณฑ์เปลี่ยนไป $\{1, 2, \dots, 5\}$; 1 = สั่งในปริมาณ 0-2 ล็อต, 2 = สั่งในปริมาณ 3-5 ล็อต, 3 = สั่ง ในปริมาณ 6-10 ล็อต, 4 = สั่งในปริมาณ 11-19 ล็อต, 5 = สั่งในปริมาณมากกว่า 20 ล็อต
 K = เซตของจุดการสั่งที่ทำให้ราคาบรรจุกัณฑ์ของผู้ผลิตรายที่ 1 เปลี่ยนไป $\{1, 2, \dots, 10\}$ 1= 0 ล็อต, 2= 2 ล็อต, 3= 3 ล็อต, 4= 5 ล็อต, 5=6 ล็อต, 6= 10 ล็อต, 7= 11 ล็อต, 8= 19 ล็อต, 9= 20 ล็อต, 10= M ล็อต

การกำหนดข้อมูลนำเข้า

b_k = ปริมาณการสั่งซื้อ ณ จุด k (ล็อต)

$Cost(b_{p,k})$ = ราคาของบรรจุกัณฑ์ p ที่จุดเปลี่ยนราคาสินค้า k เมื่อสั่งจากผู้ผลิตรายที่ 1 (บาท)

การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ

$Z_{k,t}$ = สัดส่วนการสั่งที่จุด k ณ ช่วงเวลา t

$Y_{n,t}$ = 1; ถ้าทุกๆ โรงงานสั่งรวมกันอยู่ในช่วง n ณ ช่วงเวลา t
 0; อื่นๆ

ซึ่งสามารถเขียนเงื่อนไขได้ดังนี้

$$f(Cost_p)O_{p,j,s=1,t} = \sum_{k \in K} Z_{k,t} Cost(b_{p,k}) \quad ; \forall p \in P1, \forall t \quad (16)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} O_{p,j,s=1,t} = \sum_{k \in K} b_k Z_{k,t} ; \forall t \quad (17)$$

$$Z_{k=1,t} \leq Y_{n=1,t} ; \forall t \quad (18.1)$$

$$Z_{k=2,t} \leq Y_{n=1,t} \quad ; \forall t \quad (18.2)$$

$$Z_{k=3,t} \leq Y_{n=2,t} \quad ; \forall t \quad (18.3)$$

$$Z_{k=4,t} \leq Y_{n=2,t} \quad ; \forall t \quad (18.4)$$

$$Z_{k=5,t} \leq Y_{n=3,t} \quad ; \forall t \quad (18.5)$$

$$Z_{k=6,t} \leq Y_{n=3,t} \quad ; \forall t \quad (18.6)$$

$$Z_{k=7,t} \leq Y_{n=4,t} \quad ; \forall t \quad (18.7)$$

$$Z_{k=8,t} \leq Y_{n=4,t} \quad ; \forall t \quad (18.8)$$

$$Z_{k=9,t} \leq Y_{n=5,t} \quad ; \forall t \quad (18.9)$$

$$Z_{k=10,t} \leq Y_{n=5,t} \quad ; \forall t \quad (18.10)$$

$$\sum_{n \in N} Y_{n,t} = 1 \quad ; \forall t \quad (19)$$

$$Y_{n,t} \in \{0,1\} \quad ; \forall n, t \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K} Z_{k,t} = 1 \quad ; \forall t \quad (21)$$

$$Z_{k,t} \geq 0 \quad ; \forall k, t \quad (22)$$

ฟังก์ชันที่ (16) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนราคาถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ชนิด p ที่สั่งซื้อกับผู้ผลิตรายที่ 1 โดยสามารถคำนวณต้นทุนได้จากผลรวมของสัดส่วนการสั่งซื้อที่จุด k คูณกับราคาถุงบรรจุภัณฑ์อาหารสัตว์ชนิด p ที่จุด k เช่น ทราบค่าสัดส่วนการสั่งซื้อคือ $Z_{k=5,t} = 0.5$ และ $Z_{k=6,t} = 0.5$ และต้นทุนสินค้าที่จุด k คือ $Cost(b_{p,k=5}) = 33,000$ และ $Cost(b_{p,k=6}) = 55,500$ เมื่อแทนค่าลงในเงื่อนไขที่ 16 จะได้ต้นทุนสินค้าชนิด p ดังนี้ $(33,000*0.5) + (55,500*0.5) = 44,000$ บาท เงื่อนไขที่ (17) เป็นเงื่อนไขหาสัดส่วนการสั่งซื้อ โดยพิจารณาจากจำนวนการสั่งซื้อรวมของบรรจุภัณฑ์ทุกชนิด ทุกโรงงาน โดยกำหนดว่าจำนวนรวมของการสั่งซื้อจะต้องเท่ากับผลรวมของสัดส่วนการ

สั่งซื้อของจุดเปลี่ยนราคา k คูณกับจุดที่ทำให้ราคาเปลี่ยน เช่น หากสั่งซื้อสินค้า 8 ล็อต จำนวน 8 ล็อตนี้จะอยู่ระหว่างจุด $k = 5$ (6 ล็อต) และ $k = 6$ (10 ล็อต) และมีสัดส่วนการสั่งซื้อ $Z_{k=5,t} = 0.5$ และ $Z_{k=6,t} = 0.5$ และเมื่อนำมาแทนในเงื่อนไขที่ 17 จะได้ $6*(0.5)+10*(0.5) = 8$ เงื่อนไขที่ (18.1)-(18.10) แสดงว่าการสั่งซื้อในช่วง n ต้องอยู่ระหว่างสัดส่วนการสั่งซื้อ ณ จุด k และ $k + 1$ เงื่อนไขที่ (19) สามารถเลือกสั่งซื้อได้เพียง 1 ช่วงราคาในแต่ละช่วงเวลาเงื่อนไขที่ (20) ถ้า $Y_{n,t}$ เป็น 1 แสดงว่าจำนวนการสั่งซื้อในแต่ละช่วงเวลาอยู่ในช่วงการสั่งซื้อ n เงื่อนไขที่ (21) ในแต่ละช่วงเวลาเมื่อรวมสัดส่วนการสั่งซื้อแล้วจะต้องเท่ากับ 1 เงื่อนไขที่ (22) ในแต่ละช่วงเวลาสัดส่วนการสั่งซื้อจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0

5. ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ผลการวิจัย

1. การตัดสินใจของงานวิจัยนี้จะมาจากผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ผ่านการทำรอบเวลาแบบหมุน (Rolling Horizon) ซึ่งคิดเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์โดยที่แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ได้ถูกประมวลผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CPLEX โดยใช้คอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i5-3210M CPU@2.50 GHz RAM: 8GB

2. เนื่องจากลักษณะข้อมูลนำเข้าในงานวิจัยนี้ได้แบ่งปัญหาในการหาผลเฉลยออกเป็น 3 ปัญหาย่อย 1) ปัญหาสำหรับถุงบรรจุภัณฑ์ที่สามารถสั่งซื้อกับผู้ผลิตรายที่ 1 ได้เท่านั้น ใช้เวลาประมวลผล 3 นาที โดยให้คำตอบของต้นทุนที่ต่ำที่สุดคือ 8,809,504.172 บาท 2) ปัญหาสำหรับถุงบรรจุภัณฑ์ที่สามารถสั่งซื้อกับผู้ผลิตรายที่ 2 ได้เท่านั้น ใช้เวลาประมวลผล 55 นาที ให้คำตอบของต้นทุนที่ต่ำที่สุดคือ 15,303,416.128 บาท 3) ปัญหาสำหรับสำหรับถุงบรรจุภัณฑ์ที่สามารถพิจารณาเลือกสั่งซื้อจากผู้ผลิตรายที่ 2 หรือผู้ผลิตรายที่ 3 ใช้เวลาประมวลผล 1 ชั่วโมง 30 นาที ให้คำตอบของต้นทุนที่ต่ำที่สุดคือ 25,737,863.243 บาทโดย

ทั้ง 3 ปัญหา ทำให้ได้ผลเฉลยคือปริมาณการสั่งถุงบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภทจากผู้ผลิตแต่ละรายของแต่ละโรงงานในแต่ละช่วงเวลา ปริมาณการจัดเก็บถุงบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภทของแต่ละโรงงานในแต่ละช่วงเวลา รวมไปถึงจำนวนเที่ยวรถและขนาดรถที่ใช้จัดส่งในแต่ละเส้นทางแต่ละช่วงเวลา

3. จากเปรียบเทียบต้นทุนของการใช้วิธีการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางที่มาจากผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์และการสั่งซื้อแบบปัจจุบันที่มาจากทางบริษัท โดยในบทความนี้ใช้ข้อมูลจริงในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2560 พบว่าการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะสามารถลดต้นทุนโดยรวมได้ ซึ่งจะแสดงตัวอย่างรายละเอียดการตัดสินใจของการสั่งซื้อแบบปัจจุบันที่มาจากบริษัทและการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางที่มาจากผลเฉลยของแบบจำลองคณิตศาสตร์ในตารางที่ 2-4 และแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนแต่ละด้านอย่างละเอียดในแต่ละสัปดาห์ในรูปที่ 6-8

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตรายที่ 1 ในแต่ละสัปดาห์ของวิธีการสั่งซื้อแบบเดิม (ล็อต)

โรงงาน	ผลิตภัณฑ์	สัปดาห์							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C	12	0	20	20	0	0	20	0	0
	13	10	0	0	20	10	0	10	0
	14	10	0	0	0	10	0	0	0
	15	10	0	0	0	10	0	0	0
	16	5	0	0	0	5	0	10	0

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตรายที่ 1 ในแต่ละสัปดาห์ของวิธีการสั่งซื้อผ่านส่วนกลาง (ล็อต)

โรงงาน	ผลิตภัณฑ์	สัปดาห์							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	1	11	0	25	0	18	0	24	0
	2	17	0	0	22	0	0	0	17
	3	0	13	0	22	0	0	0	0
	4	0	32	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	25	0	0	0	0
	6	0	0	0	17	0	0	0	0

ตารางที่ 3 (ต่อ) ตัวอย่างการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตรายที่ 1 ในแต่ละสัปดาห์ของวิธีการสั่งซื้อผ่านส่วนกลาง (ล็อต)

โรงงาน	ผลิตภัณฑ์	สัปดาห์							
		1	2	3	4	5	6	7	8
B	7	11	54	0	0	35	0	42	0
	8	19	33	0	0	0	21	0	0
	9	0	0	0	0	1	0	68	0
	10	0	21	0	0	19	0	21	0
	11	22	0	0	0	0	0	0	0
C	12	0	21	8	0	0	11	0	10
	13	0	14	0	8	0	11	0	9
	14	0	0	0	7	0	6	0	3
	15	0	6	0	4	0	5	0	4
	16	0	6	0	2	0	5	0	4

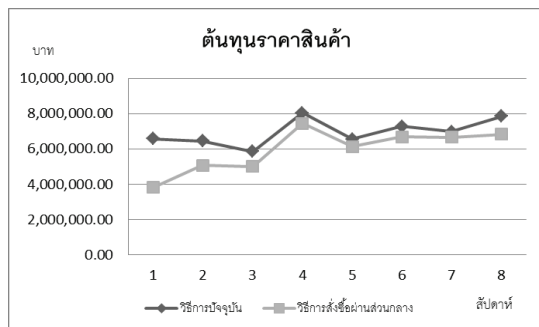
จากตารางที่ 2 และ 3 สามารถบอกได้ว่าการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์จะมีประสิทธิภาพดีกว่า การสั่งซื้อแบบปัจจุบัน กล่าวคือการวางแผนผ่านส่วนกลางจะมองเห็นภาพรวมทำให้สามารถพิจารณาสั่งซื้อหลายโรงงานพร้อมกันได้ ทำให้การตัดสินใจผ่านส่วนกลางในแต่ละช่วงเวลา โรงงาน C ไม่จำเป็นต้องสั่งให้ครบ 20 ล็อตเนื่องจากสามารถรวมการสั่งจากโรงงานอื่นๆได้ เช่นในสัปดาห์ที่ 3 ผลิตภัณฑ์ที่ 12 ของโรงงาน C จะสามารถสั่งซื้อเพียง 8 ล็อตเท่านั้นเพราะสามารถรวมยอดการสั่งจากโรงงาน A และ B ได้ ในขณะที่การตัดสินใจสั่งซื้อแบบปัจจุบัน ผู้วางแผนโรงงาน C จะไม่ทราบปริมาณ และช่วงการสั่งของโรงงาน A และ B ทำให้ไม่สามารถรวมการสั่งซื้อกับโรงงานอื่นๆได้ เป็นผลให้ผู้วางแผนของโรงงาน C ต้องสั่งซื้อถึง 20 ล็อตเพื่อจะได้ไม่เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการสั่งซื้อผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตรายที่ 2 และผู้ผลิตรายที่ 3 ของโรงงาน G โดยการสั่งซื้อโดยแบบวิธีปัจจุบันและ การสั่งซื้อโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ในช่วง 8 สัปดาห์

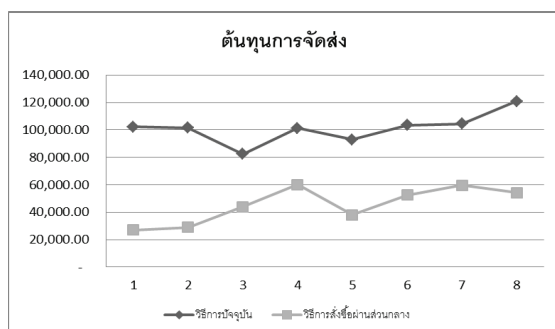
ผลิต- ภัณฑ์	ต้นทุน		แบบปัจจุบัน			สั่งซื้อผ่านส่วนกลาง		
	ผู้ผลิต 2	ผู้ผลิต 3	ผู้ผลิต รายที่		ต้นทุน สินค้ารวม	ผู้ผลิตรายที่		ต้นทุน สินค้ารวม
			2	3		2	3	
100	7,480	7,450	0	150	1,117,500	49	32	600,020
101	7,790	7,860	0	88	691,680	34	10	343,460
102	13,900	13,400	90	0	1,251,000	0	40	536,000
103	9,130	8,630	70	0	639,100	0	40	345,200
104	7,550	8,050	10	0	75,500	13	0	98,150
105	13,900	13,400	70	0	973,000	0	21	281,400
106	9,730	9,230	20	0	194,600	0	23	212,290
107	13,900	13,400	24	0	333,600	0	12	160,800
108	8,470	8,320	10	0	84,700	0	38	316,160
109	8,000	7,750	40	0	320,000	0	32	248,000
110	8,430	7,930	10	0	84,300	0	26	206,180
111	8,300	8,050	32	0	265,600	0	27	217,350
112	7,380	7,450	0	0	-	0	0	-
113	7,380	7,450	48	0	354,240	17	0	125,460
114	8,500	8,000	30	0	255,000	0	26	208,000
115	8,770	8,620	90	0	789,300	0	19	163,780
116	7,380	7,620	0	34	259,080	18	0	132,840
117	7,030	7,250	0	0	-	0	0	-
118	7,030	7,250	0	8	58,000	21	0	147,630
119	9,130	8,630	14	0	127,820	0	18	155,340
120	7,480	7,450	0	40	298,000	0	15	111,750
121	9,120	8,620	8	0	72,960	0	12	103,440

จากตารางที่ 4 พบว่าการตัดสินใจแบบปัจจุบันทำให้ต้นทุนที่สูงกว่าเพราะทางโรงงานต้องพยายามสั่งผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตรายที่ 2 เป็นจำนวนมากแม้ว่าบางผลิตภัณฑ์ผู้ผลิตรายที่ 2 จะมีราคาสูงกว่าผู้ผลิตรายที่ 3 เพื่อให้สัดส่วนการสั่งซื้ออยู่ในช่วง 70-80% ตามนโยบายของบริษัทในขณะที่การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางโรงงาน G ไม่จำเป็นต้องสั่งสินค้าจากผู้ผลิตรายที่ 2 ให้ได้ 70-80% เนื่องจากสามารถรวมการสั่งซื้อกับโรงงานอื่นๆ ได้

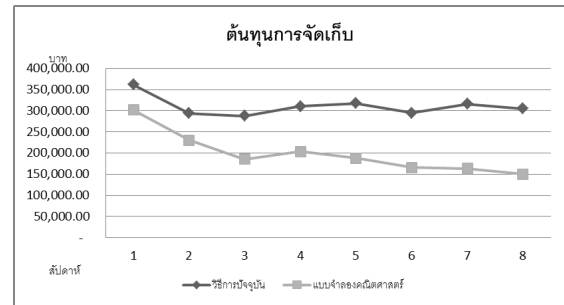
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1 พบว่าโรงงาน G จะอยู่ใกล้ผู้ผลิตรายที่ 3 มากกว่าผู้ผลิตรายที่ 2 ส่งผลให้ต้นทุนการจัดส่งของวิธีการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางต่ำกว่าวิธีการสั่งซื้อแบบปัจจุบัน



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบต้นทุนราคาสินค้าในแต่ละสัปดาห์



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบต้นทุนการขนส่งในแต่ละสัปดาห์



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบต้นทุนการจัดเก็บในแต่ละสัปดาห์

จากรูปที่ 6-8 เป็นการเปรียบเทียบต้นทุนในแต่ละด้านในแต่ละสัปดาห์ โดยจะเห็น ในช่วงสัปดาห์แรกๆวิธีการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะมีต้นทุนราคาสินค้าต่ำและจะค่อยๆสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วต้นทุนราคาสินค้าจะค่อนข้างคงที่เมื่อมาวิเคราะห์ห้ดูแล้วพบว่า ในช่วงแรกแบบจำลองคณิตศาสตร์ตัดสินใจนำพัสดุคงคลังที่ค้างในระบบมาใช้ เป็นผลให้มีการสั่งซื้อน้อยลง และส่งผลให้การจัดส่งลดลงตามมา ซึ่งสะท้อนมายังต้นทุนราคาสินค้าและ ต้นทุนการขนส่ง แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป พักคงคลังที่ค้างในระบบเริ่มลดลงจึงมีการสั่งสินค้ามากขึ้นทำให้ผลต่างของการสั่งซื้อและการจัดส่งของทั้ง 2 วิธีลดลง เมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่สถานะที่ไม่ได้ใช้สินค้าคงคลังเดิมเพื่อสนองความต้องการลูกค้า พบว่าการสั่งซื้อโดยผ่านส่วนกลางจะสามารถประหยัดค่าต้นทุนสินค้าได้เฉลี่ย 632,420.01 บาท/สัปดาห์ หรือคิดเป็น 8.91% ประหยัดต้นทุนค่าขนส่งเฉลี่ย 49,489.84 บาท/สัปดาห์ หรือคิดเป็น 42.32% ในขณะที่ต้นทุนการจัดเก็บในช่วงระยะแรกผลต่างของต้นทุนการจัดเก็บของทั้ง 2 วิธีไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะมีต้นทุนการจัดเก็บลดลงเนื่องจากนำพัสดุคงคลังที่ค้างในระบบออกมาใช้มากขึ้น โดยพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปสามารถประหยัดต้นทุนโดยเฉลี่ย 129,064.02 บาท/สัปดาห์ หรือคิดเป็น 52.44%

5.2 วิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการวิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์พบว่าสาเหตุที่ทำให้การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางสามารถลดต้นทุนจากการสั่งซื้อจากแบบปัจจุบันคือ

1. การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางสามารถสร้างทางเลือกการตัดสินใจได้มากกว่า ทำให้การตัดสินใจมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

- สำหรับบรรจุกฎเกณฑ์ที่ตั้งกับผู้ผลิตรายที่ 1 พบว่าในแต่ละช่วงเวลาทุกโรงงานสามารถส่งในปริมาณที่ต้องการใช้จริงโดยไม่จำเป็นต้องสั่งขั้นต่ำ 20 ล็อตเพื่อที่จะไม่เสียค่าใช้จ่ายพิเศษเพิ่มเติม เนื่องจากการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะพิจารณาการสั่งร่วมกับโรงงานอื่นๆ โดยเมื่อรวมปริมาณการสั่งทุกโรงงานแล้วจะสามารถทำให้ปริมาณการสั่งในแต่ละช่วงเวลาเกิน 20 ล็อตได้
- สำหรับบรรจุกฎเกณฑ์ที่สามารถเลือกพิจารณาสั่งซื้อกับผู้ผลิตรายที่ 2 และผู้ผลิตรายที่ 3 พบว่าระบบสามารถตัดสินใจเลือกสั่งซื้อจากผู้ผลิตได้เหมาะสม โดยแต่ละโรงงานไม่จำเป็นต้องพยายามสั่งซื้อบรรจุกฎเกณฑ์จากผู้ผลิตรายที่ 2 เป็นปริมาณมากเพื่อรักษาสัดส่วนไว้ เนื่องจากมีการพิจารณาหลายๆ โรงงานร่วมกัน เป็นผลให้เมื่อรวมปริมาณการสั่งกับทุกโรงงานแล้วภาพรวมทั่วประเทศของบริษัทยังสามารถรักษาสัดส่วนการสั่งไว้ได้
- การตัดสินใจผ่านส่วนกลางสามารถเลือกเส้นทางในการจัดส่งที่เหมาะสมทำให้ต้นทุนการจัดส่งลดลง

2. การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะตัดสินใจสั่งซื้อในช่วงเวลาที่เหมาะสมเป็นผลให้สินค้าเข้าระบบในช่วงเวลาที่พอดี กล่าวคือสินค้าเข้าระบบในช่วงเวลาที่ระบบต้องการเต็มสินค้าพอดี ในขณะที่การสั่งซื้อแบบปัจจุบันจะมีสินค้า

เกินในระบบ เนื่องจากยังคงมีการสั่งซื้อ แม้ว่าในระบบจะมีพัสดุคงคลังเพียงพอกับความต้องการอยู่

3. จากการสั่งซื้อที่เหมาะสมสามารถลดจำนวนเที่ยวรถในการจัดส่งได้เป็นผลให้ต้นทุนในการจัดส่งลดลงตามมา

5.3 การทดสอบใช้ในสถานการณ์จริง

การจะนำผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ไปใช้จริงได้นั้นจะต้องมั่นใจว่าจะไม่เกิดเหตุการณ์สินค้าขาดมือนั้นแล้วก่อนจะนำไปใช้งานจริงจะต้องทำการทดสอบผลเฉลยที่ได้กับความต้องการที่เกิดขึ้นจริงก่อน เพราะความต้องการจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนได้เล็กน้อย โดยจะแสดงตัวอย่างทดสอบในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการทดสอบใช้ในสถานการณ์จริงของบรรจุกฎเกณฑ์ตัวอย่างที่ 1 ที่สามารถสั่งกับผู้ผลิตรายที่ 1 ได้

สัปดาห์ (t)	พัสดุคงคลัง ในช่วงก่อนหน้า (t-1)	*การสั่ง (t-2)	ความต้องการจริง (t)	พัสดุคงคลัง ณ สิ้นเวลา (t)
t=1	28.1	0	10.364	17.736
t=2	17.736	0	9.596	8.14
t=3	8.14	10	8.245	9.895
t=4	9.895	0	0.773	9.122
t=5	9.122	11	9.594	10.528
t=6	10.528	0	8.991	1.537
t=7	1.537	10	9.137	2.4
t=8	2.4	10	10.333	2.067

*การสั่ง (t-2) จะมาจากผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลจากงานวิจัย

งานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า สำหรับบริษัทกรณีศึกษา การสั่งซื้อผ่านส่วนกลางในช่วงเริ่มต้นจะสามารถลดต้นทุนได้เป็นจำนวนมากเนื่องจากในระบบมีพัสดุคงคลังค้างเป็นจำนวนมาก ทำให้การตัดสินใจสั่งซื้อน้อยลง การจัดส่งจึง

ลดลงตามมา แต่เมื่อเวลาผ่านไปพัสดุคงคลังในระบบลดลง จึงมีการสั่งซื้อและจัดส่งมากขึ้นเป็นผลให้ต้นทุนเริ่มสูงกว่า ในช่วงเริ่มต้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปยังสามารถลดต้นทุนโดยรวมได้เฉลี่ย 810,974 บาทต่อสัปดาห์ ซึ่งคิดเป็น 10.66% ซึ่งเป็นต้นทุนราคาสินค้าเฉลี่ย 632,420 บาท/สัปดาห์ หรือคิดเป็น 8.91% ต้นทุนการจัดส่งเฉลี่ย 49,490 บาท/สัปดาห์ และต้นทุนการจัดเก็บเฉลี่ย 129,064 บาท/สัปดาห์ หรือคิดเป็น 52.44% โดยที่การเปลี่ยนวิธีการสั่งซื้อนี้ไม่ทำให้บรรจุกฎเกณฑ์ใดๆ เกิดเหตุการณ์สินค้าขาดมือ

อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดและความซับซ้อนของปัญหาจึงต้องทำการแบ่งปัญหออกเป็น 3 ส่วน เพื่อให้สามารถหาผลเฉลยตามเงื่อนไขที่กำหนดได้แต่จากรูปแบบข้อมูลนำเข้าของบริษัทกรณีศึกษา การแบ่งเป็นปัญหาย่อยไม่ได้ส่งผลต่อผลเฉลยที่ดีที่สุดแต่อย่างใด

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสั่งซื้อในแผนกอื่นๆของบริษัทได้ อาทิเช่น การสั่งซื้อวัตถุดิบ โดยอาจมีการปรับปรุงข้อจำกัดหรือเงื่อนไขอื่นๆเพิ่มเติม เช่น

เงื่อนไขปริมาณการขนส่ง หรือ จำนวนแหล่งที่สามารถสั่งซื้อวัตถุดิบได้ เป็นต้น

2. การจะนำระบบการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางไปใช้จริงนั้นทางทางบริษัทจะต้องมั่นใจได้ว่าข้อมูลต่างๆ มีการอัปเดต และไม่มีคามผิดพลาด เช่น ระดับสินค้าคงคลัง หรือ ปริมาณความต้องการใช้ถูบบรรจุกฎเกณฑ์แต่ละชนิด

3. ก่อนจัดทำระบบการสั่งซื้อผ่านส่วนกลางจะต้องทำการแจ้งขั้นตอนในการทำงานให้กับทางผู้ผลิตทุกราย ตลอดจนพนักงานทุกคนที่มีส่วนร่วมกับทั้งระบบการสั่งซื้อแบบเดิม และระบบการสั่งซื้อแบบใหม่ เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนต่างๆ ก่อนเริ่มใช้งาน

4. การนำไปปรับใช้ควรเริ่มจากการนำไปใช้กับการสั่งซื้อของผู้ผลิตรายที่ 1 และ โรงงาน A, B และ C ก่อน เนื่องจากเป็นผู้ผลิตขนาดเล็ก และพิจารณาบรรจุกฎเกณฑ์ของทางบริษัทเพียง 16 ชนิด ซึ่งหากมีข้อผิดพลาดใดๆ เกิดขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อที่รุนแรงนัก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chen, Y., Wahab, M. and Ongkunaruk, P. A joint replenishment problem considering multiple trucks with shipment and resource constraints. *Computers & Operations Research*, 2016; 74: 53-63.
- [2] Sethi, S. and Sorger, G. A theory of rolling horizon decision making. *Annals of Operations Research*, 1991; 29(1): 387-415.
- [3] นิรชร วัชรุม และ กาญจน์ภา อมรัชกุล. ตัวแบบปริมาณการสั่งซื้อแบบพลวัตเมื่อระยะเวลาไม่แน่นอน: กรณีศึกษาถ่านหินอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์. *วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน*, 2009; 4(2).
- [4] Munson, C. L. and Hu, J. Incorporating quantity discounts and their inventory impacts into the centralized purchasing decision. *European Journal of operational research*, 2010; 201(2): 581-592.
- [5] Karjalainen, K. Estimating the cost effects of purchasing centralization—Empirical evidence from framework agreements in the public sector. *Journal of Purchasing and supply Management*, 2011; 17(2): 87-97.
- [6] Ghodsypour, S. H. and O'brien, C. The total cost of logistics in supplier selection, under conditions of multiple sourcing, multiple criteria and capacity constraint. *International journal of production economics*, 2001; 73(1): 15-27.
- [7] Hammami, R., Frein, Y. and Hadj-Alouane, A.B. An international supplier selection model with inventory and transportation management decisions. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2012; 24(1): 4-27.

- [8] Pazhani, S., Ventura, J. A. and Mendoza, A. A serial inventory system with supplier selection and order quantity allocation considering transportation costs. *Applied Mathematical Modelling*, 2016; 40(1): 612-634.
- [9] ชวิศ บุญมี และ ชมพูนท เกษมเศรษฐ์. การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับการกระจายสินค้า: กรณีศึกษา โรงงานผลไม้กระป๋อง. วารสารไทยการวิจัยดำเนินงาน, 2557; 2(2).
- [10] Zhang, X., Zhang, Z., Zhang, Y., Wei, D. and Deng, Y. Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm. *Safety science*, 2013; 54: 87-91.
- [11] Gao, G., Zhang, B., Li, X. and Lv, J. Research on Routing Selection Algorithm Based on Genetic Algorithm. *Intelligent Computing and Information Science*, 2011; 353-358.
- [12] Vidović, M., Popović, D. and Ratković, B. Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery. *International Journal of Production Economics*, 2014; 147: 593-604.
- [13] Mirzapour Al-e-hashem, S. and Rekik, Y. Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach. *International Journal of Production Economics*, 2014; 157: 80-88.



การประเมินความเข้ากันได้ระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันกับวัสดุหิน คัดเลือกเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพพาราสเลอรีซีล A Compatibility Evaluation of Asphalt Emulsion- Selected Aggregate to Develop Performance of Para Slurry Seal

ธน บัวหลวง* และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

Thanon Bualuang* and Peerapong Jitsangiam

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

Department of Civil Engineering, Chiang Mai University

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

*E-mail: thnon.bualuang@gmail.com, Telephone Number: 053-944156

บทคัดย่อ

การฉาบผิวถนนด้วยวัสดุพาราสเลอรีซีล (Para slurry seal) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผิวทางได้รับความนิยมสำหรับประเทศไทยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา แต่ยังมีปัญหาเรื่องแหล่งหินมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับการทำวัสดุพาราสเลอรีซีลมีอยู่อย่างจำกัดเนื่องจากปัญหาความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างหินมวลรวมทั่วไปกับวัสดุเชื่อมประสานแอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับการทำวัสดุพาราสเลอรีซีล บทความได้นำเสนอถึงวิธีการประเมินความเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) สำหรับงานพาราสเลอรีซีลเพื่อนำมาเป็นแนวทางการคัดเลือกวัสดุผสมที่มีความจำกัดในงานฉาบผิวทางประเภทนี้ให้มีประสิทธิภาพ โดยประเมินค่าความเป็นกรดเบสของวัสดุหินมวลรวมที่ผสมในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชันร่วมกับการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่ผิวของหินมวลรวมเพื่อวิเคราะห์ถึงเสถียรภาพในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ที่เป็นประจุบวก แล้วนำมาออกแบบส่วนผสมพาราสเลอรีซีลเพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างส่วนผสมนี้โดยพิจารณาความต้านทานแรงบิดและการขัดผิวซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างหินจากโรงโม่บริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยที่ยังไม่ได้รับการรับรองในการใช้งานฉาบผิวแบบพาราสเลอรีซีล จำนวน 3 ตัวอย่าง พบว่าแหล่งหินชนิด A และ B ซึ่งเป็นหินปูนที่มีปริมาณ CaO สูง มีค่า pH ของส่วนผสมกับสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) เข้าใกล้สู่ความเป็นกลางและมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินมวลรวมเข้าใกล้ค่าความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮดรอกซอริก ส่วนตัวอย่างหินชนิด C ซึ่งเป็นหินบะซอลต์พบว่ามีค่า pH ในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นกรดอ่อนและมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวในการทดสอบมีค่าเป็นบวก แล้วนำตัวอย่างหินทั้งสามมาออกแบบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพพาราสเลอรีซีลพบว่าตัวอย่างหินชนิด B มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่เข้าใกล้สู่ความเป็นกลางมากที่สุด จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างประจุลบของหินและประจุบวกของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ได้ดีจึงทำให้การยึดเกาะระหว่างหินมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันแน่น ส่วนตัวอย่างหินชนิด C พบว่าตัวอย่างพาราสเลอรีซีลไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีน้ำหนักที่สูญเสียและได้กำลังรับแรงบิดไม่เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดสอบ

ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเช่นกัน จึงไม่เหมาะที่จะทำไปใช้ในงานฉาบผิวชนิดนี้ ดังนั้นแนวทางการคัดเลือกหินในงานวิจัยนี้ที่คำนึงถึงความเข้ากันได้ของวัสดุพาราสเลอรีซีลสามารถนำมาเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพงานพาราสเลอรีซีลที่มีคุณภาพได้

ABSTRACT

The road pavement surface dressing technique using Para slurry seal to improve such surface quality has gained popularity for Thailand road pavement for the last ten years. However, suitable aggregates to produce Para slurry seal material are very limited because of a compatibility problem between general aggregates and an asphalt emulsion binder. This paper aims to demonstrate an evaluation of the compatibility between aggregate and cationic asphalt emulsion CSS-1h(EMA) which is an asphalt emulsion binder of Para slurry seal. This could be an alternative method of aggregate selection for using in producing Para slurry seal. A series of pH tests in conjunction with Zeta-potential analyses were used to basically evaluate the potential use of aggregate in Para slurry seal mixing and design processes. The study aggregates of A, B, and C, which were not in the recommendation list for using in Para slurry seal, were sourced from active quarries in the northern region of Thailand as a study area. Based on the petrographic analyses, the aggregates of A and B were classified as Limestone, but C could be geologically grouped as Basalt. Results of pH tests in conjunction with Zeta-potential analyses on A, B, and C aggregates were that aggregates of A and B which had a high portion of CaO while mixing with CSS-1h(EMA) exhibit a neutral pH value, but aggregate C was prone to have a negative pH value of acid with a minus Zeta-potential value. When considering the performance of torsion (cohesion) and wearing resistance after mix design processes, Para slurry seal produced from aggregates of A and B could demonstrate much higher torsion and wearing resistance than those of Para slurry seal produced from aggregate C. Furthermore, torsion and wearing resistance of Para slurry seal produced from aggregate B complies with the specifications of Para slurry seal of Department of Highway, Thailand. It was be, therefore, concluded that the basic evaluation process of pH tests in conjunction with Zeta potential analyses could be simply used to examine the compatibility between general aggregates and CSS-1h (EMA). That was greatly beneficial to Para slurry seal construction in Thailand in the way that more aggregate sources could be more effectively and wider selected.

1. บทนำ

ผิวทางแบบพาราสเลอรีซีล (Para Slurry Seal) เป็นวัสดุฉาบผิวทางเพื่อซ่อมแซมและยกระดับการให้บริการ (Level of Service) ของถนนที่ใช้งานมาได้ระยะหนึ่งและมีการเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยวัสดุผิวทางแบบพาราสเลอรีซีลนี้ประกอบด้วยส่วนผสมระหว่างหินมวลรวม (Aggregate) ที่มีขนาดคละมาตรฐานกับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชัน (Polymer Modified Asphalt Emulsion) ชนิด CSS-1h(EMA) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางพารา โดยทำการผสมกับน้ำและปูนซีเมนต์หรือสารผสมเพิ่มอื่นๆตามความจำเป็น โดยผิวทางที่ได้รับการฉาบหน้าด้วยพาราสเลอรีซีลนี้พบว่าผิวทางมีคุณสมบัติดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในด้านความต้านทานการลื่นไถลที่สูงขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติเสริมจากการผสมยางพารา

ที่ทำให้แอสฟัลต์มีความคงทนและความยืดหยุ่นสูงอีกทั้งยังเพิ่มกำลังรับแรงดึงให้วัสดุผสมทั้งนี้จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ดีและนานมากขึ้นเมื่อเทียบกับเทคนิคการฉาบผิวทางด้วยวัสดุอื่นๆ เช่นสเลอรีซีล (Slurry seal) หรือแคปซีล (Cape seal) ทั่วไป ซึ่ง Kintali Sai และNanda Kishore [1] ได้ศึกษาผลของยางพาราที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) กับยางพาราพบว่าเมื่อผสมยางพาราลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ทำให้จุดอ่อนตัวของวัสดุผสมดังกล่าวมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ปกติ โดยผลการศึกษานี้ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของ Colin Ruggles [2] ที่ได้หาคุณสมบัติการคืนตัวและการยุบตัวของถนนที่ประเมินเทียบเคียงจากค่าเพเนตรชัน (Penetration) ของวัสดุ

แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) มีค่าต่ำกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดปกติ ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทานการยุบตัวที่ดีกว่า ค่าความต้านทานการลื่นไถลจึงสูงกว่า เกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัย ข้อได้เปรียบประการสำคัญที่ทำให้การฉาบผิวด้วยพาราสเลอริซัลได้รับความนิยม คือสามารถเปิดให้รองรับการจราจรได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-2 ชั่วโมง ภายหลังจากการก่อสร้างฉาบผิวแล้วเสร็จ ทำให้การซ่อมแซมถนนไม่ส่งผลกระทบต่อและเป็นอุปสรรคในการสัญจรเหมือนการก่อสร้างและซ่อมแซมผิวทางด้วยเทคนิคอื่นๆ รูปที่ 1 แสดงการฉาบผิวด้วยพาราสเลอริซัลและผิวทางพาราสเลอริซัลหลังก่อสร้างเสร็จ



รูปที่ 1 งานก่อสร้างพาราสเลอริซัล

อย่างไรก็ตามในสถานการณ์ปัจจุบันแม้ว่าผิวทางแบบพาราสเลอริซัลได้ถูกใช้อย่างแพร่หลาย แต่ยังคงพบว่ามีข้อจำกัดที่ส่งต่อการเป็นอุปสรรคในการก่อสร้างผิวทางแบบพาราสเลอริซัลของประเทศไทย โดยหินมวลรวมขนาดคละมาตรฐานตามข้อกำหนดการก่อสร้างผิวทางแบบสเลอริซัล [3] ต้องผ่านการคัดเลือกแหล่งหินที่ได้รับการยอมรับเพื่อให้มีความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) กับ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1h(EMA) ที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน โดยแหล่งหินที่ได้รับการแนะนำจากกรมทางหลวงว่าสามารถใช้ได้กับโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1h(EMA) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงมีจำนวน 25 แห่งทั่วประเทศ [4] โดยข้อจำกัดนี้ได้กลายเป็นอุปสรรคที่สำคัญก่อสร้างผิวทางแบบพารา-

สเลอริซัลของประเทศไทยในปัจจุบัน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งหินมวลรวมมาตรฐานไปสู่สถานที่ก่อสร้างที่ไกลจากแหล่งหินที่ได้รับการรับรอง ทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งศึกษาถึงการหาแนวทางในการนำแหล่งหินอื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ในรายการแนะนำของกรมทางหลวงมาใช้เป็นหินมวลรวมสำหรับการก่อสร้างผิวทางแบบพาราสเลอริซัล โดยได้คัดเลือกแหล่งหินที่ไม่ได้ถูกระบุให้เป็นแหล่งหินที่สามารถใช้ได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ของกรมทางหลวงมาเป็นหินต้นแบบของการดำเนินงานวิจัยและโครงการนี้ได้ศึกษาถึงกระบวนการในการคัดเลือกแหล่งหินจากการประเมินสภาพความเหมาะสมอย่างง่าย โดยจะสามารถประเมินถึงความเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) และนำหินต้นแบบมาประเมินความเข้ากันได้แล้วนำไปออกแบบส่วนผสมพาราสเลอริซัลเพื่อตรวจสอบคุณภาพให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง [5]

1.1 วัตถุประสงค์

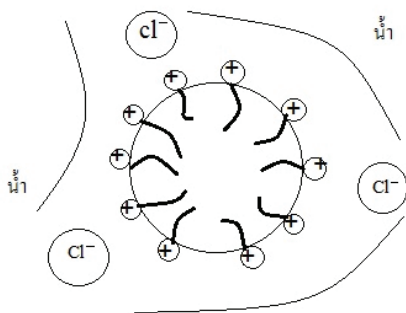
1.1.1 ประเมินถึงความเข้ากันได้ของวัสดุหินมวลรวมที่ได้รับการคัดเลือกกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) เพื่อให้ได้แนวทางการคัดเลือกหินอย่างง่ายและอยู่บนพื้นฐานของความเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA)

1.1.2 ประเมินประสิทธิภาพด้วยการทดสอบกำลังแรงบิดและความต้านทานการขัดผิวของพาราสเลอริซัลที่ใช้หินมวลรวมที่ได้รับการคัดเลือกตามวิธีการข้อ 1.1.1

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

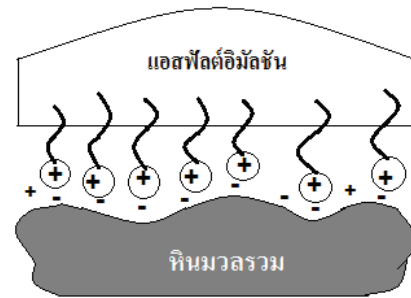
ความเข้าได้กันระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันกับหินมวลรวมตามหลักการพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมพาราสเลอริซัลขึ้นอยู่กับความสามารถในการดึงดูดเคลือบระหว่างวัสดุที่ใช้ผสมในงานผิวทาง โดยโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ที่มีสารละลายกรดไฮดรอกลอริกเป็นส่วนผสม ได้มีการนำส่วนที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) จับตัวกับขั้วลบของ

โมเลกุลน้ำ (OH^-) ทำให้ผิวโดยรอบของแอสฟัลต์ถูกเคลือบด้วยประจุบวกของน้ำ [6] ดังรูปที่ 2 จึงเปลี่ยนสภาพแอสฟัลต์ให้มีอำนาจทางไฟฟ้าที่ผิวเป็นบวกตามประจุบวกของน้ำหลังจากการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนของสารละลายกรดไฮดรอกลอริก จึงทำให้แอสฟัลต์อิมัลชันชนิดนี้มีความเหมาะสมที่จะจับกับหินมวลรวมที่มีสภาพประจุไฟฟ้าที่ผิวเป็นประจุลบ



รูปที่ 2 ภาพแสดงถึงสารละลายไฮดรอกลอริกที่จับกับโมเลกุลของน้ำและแอสฟัลต์

การประเมินถึงคุณภาพพาราเลอริซัลซึ่งใช้แอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกต้องคำนึงถึงเสถียรภาพในการแลกเปลี่ยนประจุกับหินมวลรวมที่เป็นประจุลบให้ได้มาซึ่งความเป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างแอสฟัลต์กับหินที่แข็งแรง สามารถยึดเกาะเคลือบผิวของหินมวลรวมที่เป็นลักษณะแผ่นฟิล์ม [7] ดังแสดงในรูปที่ 3 จากหลักการพื้นฐานนี้หากสามารถหาหินแหล่งที่มีประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมกับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันก็สามารถทำให้เกิดการเข้ากันได้และการดูดซับระหว่างแอสฟัลต์กับหินซึ่งจะได้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบส่วนผสมพาราเลอริซัลเพื่อเพิ่มศักยภาพด้านความปลอดภัยและความทนทานในการใช้งาน



รูปที่ 3 การจำลองแอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกจับตัวกับผิวของหินประจุลบ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุผสมพาราเลอริซัล

วัสดุหินมวลรวมที่ใช้สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้นำหินในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ซึ่งไม่ได้เป็นแหล่งหินที่ได้รับการยืนยันจากรายงานของกรมทางหลวงตามหัวข้อที่ 1 ในงานฉาบผิวชนิดพาราเลอริซัล โดยได้ทำการคัดเลือกจากโรงโม่ที่ผลิตหินมวลรวมสำหรับการก่อสร้าง 3 แหล่ง โดยกำหนดให้เป็น มวลรวม A, B, และ C ร่วมกับหินจากโรงโม่สุวรรณซึ่งเป็น 1 ใน 25 แหล่งหินที่ได้รับการรับรองในการใช้งานพาราเลอริซัลตามรายงานของกรมทางหลวงเพื่อนำมาอ้างอิงผลการทดสอบส่วนแอสฟัลต์อิมัลชันในงานวิจัยครั้งนี้เป็นโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) ซึ่งสามารถรองรับการผลิตเพื่อใช้งานฉาบผิวประเภทพาราเลอริซัลได้จริงตามมาตรฐานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันที่กรมทางหลวงใช้ในการอ้างอิง [8]

3.2 การประเมินความเข้ากันได้เชิงการแลกเปลี่ยนประจุ

การประเมินความเข้ากันได้เชิงการแลกเปลี่ยนประจุของวัสดุผสมสามารถประเมินได้จากทดสอบหาค่ากรดเบสโดยนำตัวอย่างหินมวลรวมที่มีขนาดเท่ากับช่องเปิดตามตะแกรงมาตรฐาน ASTM D3910 [9] จำนวน 25 กรัม ผสมกับสารละลายน้ำกลั่น ($\text{pH}=6.89$) สารละลายกรดไฮดรอกลอริก ความเข้มข้น 0.03 โมล ($\text{pH}=1.58$) และสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h(EMA) ($\text{pH}=2.86$) ปริมาณ 300 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

แล้ววัดค่า pH ด้วยเครื่องมือวัดค่าแบบอัตโนมัติตามลักษณะดังรูปที่ 4 อ่านค่า pH ที่เกิดขึ้น เมื่อได้ค่า pH ของหินเป็นเบสสามารถทราบได้ว่ามีแนวโน้มเป็นประจุลบจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ส่วนหินที่มีค่า pH สภาพเป็นกรดสามารถทราบได้ว่ามีแนวโน้มเป็นประจุบวกจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) การประเมินความเสถียรในการแลกเปลี่ยนประจุซึ่งจะมีความเข้ากันได้ดีเมื่อค่า pH ที่ได้เข้าสู่ความเป็นกลางที่ถือว่ามีความเสถียรเป็นกลางทางไฟฟ้า



รูปที่ 4 เครื่องมือวัดการทดสอบกรดเบส

การประเมินประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุหินสามารถอธิบายโดยความต่างศักย์ของประจุไฟฟ้าที่ผิวและประจุในสารละลายที่อยู่ล้อมรอบซึ่ง Hefer and Little [10] กล่าวว่าประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุรวมสามารถประมาณค่าประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการทดสอบศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential) โดยประจุในหินรวมจะถูกขับไล่ให้แยกออกจากกันด้วยสารละลายที่ผสมทำให้ที่ผิวของวัสดุหินเกิดอำนาจทางไฟฟ้า จึงสามารถทราบถึงประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุหินที่ชัดเจน โดยงานวิจัยนี้ทดสอบหาประจุไฟฟ้าของวัสดุหินด้วยการใช้สารละลายน้ำและประเมินเสถียรภาพความเข้ากันได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันประจุบวกด้วยสารละลายกรดไฮดรอกลอร์ริก ความเข้มข้น 0.03 โมล วัดจากตัวอย่างที่ได้หลังการทดสอบค่า pH ซึ่งจะใช้วัสดุหินที่มีขนาดคล้อยอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 กับเบอร์ 16 (ขนาดเม็ดหินระหว่าง 1.18-2.36 มิลลิเมตร) และตัวอย่างขนาดคล้อยอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 กับเบอร์ 50 (ขนาดเม็ดหินระหว่าง 0.30-0.60 มิลลิเมตร)

ทดสอบเพื่อวิเคราะห์ถึงขนาดหินมวลรวมที่มีผลต่อค่าประจุไฟฟ้าที่ผิวมีการแลกเปลี่ยนประจุกันได้ดีเมื่อสามารถวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้เข้าใกล้ 0 mV เนื่องจากไม่เกิดการเหนี่ยวนำของประจุไฟฟ้าในส่วนผสม

3.3 การประเมินคุณภาพพาราสเลอรีซิล

การประเมินคุณภาพพาราสเลอรีซิลในงานวิจัยนี้ใช้ขนาดมาตรฐานแบบประเภทที่ 3 ที่มีขนาดกะทัดรัดใหญ่ที่สุดตามมาตรฐานของ ASTM D3910 ดังแสดงในตารางที่ 1 เหมาะสำหรับการใช้ในการซ่อมหรือปรับปรุงผิวทางเดิมที่แตกร้าวและหลุดร่อน นำมาผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งและน้ำปริมาณ 12% ,1% และ 8% โดยน้ำหนักของหินมวลรวมแห้งที่ใช้ตามลำดับ สร้างเป็นตัวอย่างพาราสเลอรีซิลสำหรับใช้ทดสอบประสิทธิภาพตามรายงานการทดสอบสเลอรีซิลของกรมทางหลวงและ International Slurry Surfacing Association (ISSA) [11] ด้วยวิธีการประเมินกำลังรับแรงบิดตามมาตรฐาน ISSA TB139 [12] ที่วัดค่าในช่วงเวลาที่ 30, 60, 90 และ 120 นาที และความต้านทานการขัดผิวตามมาตรฐาน ISSA TB100 [13] จึงสามารถตรวจสอบถึงความเข้ากันได้ของหินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) มีผลต่อคุณภาพของงานสเลอรีซิลในรูปแบบการใช้งานจริงอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางในการคัดเลือกแหล่งหินที่มีประโยชน์ได้ในอนาคตเพื่อให้ได้พาราสเลอรีซิลที่มีคุณภาพและผ่านเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบที่กรมทางหลวงกำหนดไว้ โดยค่ากำลังรับแรงบิดจะต้องไม่น้อยกว่า 12 kg-cm. เมื่อผ่านไป 30 นาทีและ 20 kg-cm. เมื่อผ่านไป 120 นาที และน้ำหนักที่สูญเสียหลังการทดสอบการขัดผิวไม่เกิน 800 กรัมต่อตารางเมตรจึงถือว่าตัวอย่างพาราสเลอรีซิลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 1 ขนาดคละที่ใช้ในงานสเลอรี่ซิลแต่ละประเภท

ขนาด ตะแกรง	ร้อยละที่ผ่านตะแกรง (%)		
	ประเภท 1	ประเภท 2	ประเภท 3
3 ส่วน 8 นิ้ว	100	100	100
เบอร์ 4	100	90-100	70-90
เบอร์ 8	90-100	65-90	45-70
เบอร์ 16	65-90	45-70	28-50
เบอร์ 30	40-65	30-50	19-34
เบอร์ 50	25-42	18-30	12-25
เบอร์ 100	15-30	10-21	7-18
เบอร์ 200	10-20	5-15	5-15

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการวิเคราะห์วัสดุผสมพาราสเลอรี่ซิล

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้นำแหล่งหินที่ไม่เคยใช้ในงานพาราสเลอรี่ซิลมาก่อน 3 แหล่งในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยได้ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางธรณีวิทยาด้วยวิธีวิเคราะห์รังสีเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) แสดงผลดังตารางที่ 2 พบว่าหินชนิด A , B และหินจากโรงโม่สุวรรณมีลักษณะทางธรณีวิทยาของแร่หินเป็นหินปูนเนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (CaO) ที่เป็นธาตุองค์ประกอบหลักปริมาณสูง ส่วนหินชนิด C มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินบะซอลต์ [14] สำหรับผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของแอสฟัลต์อิมัลชันที่ใช้ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ใช้ตรวจสอบคุณภาพของแอสฟัลต์แสดงผลดังตารางที่ 3 พบว่าแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h(EMA) ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาพาราธรมชาติ 5% ได้คุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่หินด้วยวิธี XRF

%ธาตุ	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C	สุวรรณ
K ₂ O	0.00	0.71	0.79	0.25
CaO	98.10	99.29	17.14	93.19
SiO ₂	1.38	0.00	34.05	0.00

ตารางที่ 2 (ต่อ) การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่หินด้วยวิธี XRF

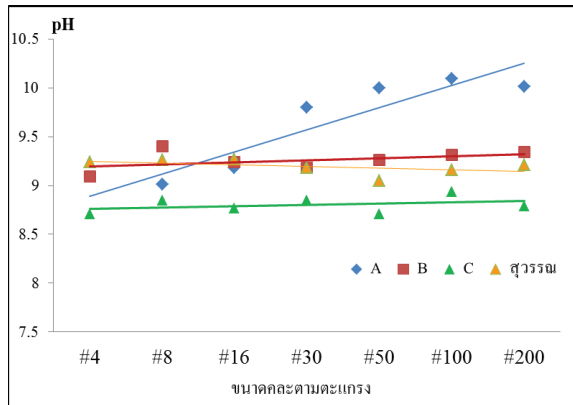
%ธาตุ	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด C	สุวรรณ
Fe ₂ O ₃	0.52	0.00	33.16	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	9.63	1.05
TiO ₂	0.00	0.00	4.65	0.14
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	4.58

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแอสฟัลต์ CSS-1h (EMA)

Tests	Result	Spec.	
		Min	Max
Viscosity 25°C, SSF	28	20	100
Settlement 7days, %	2.4	-	15
Storage 24 hrs., %	1.2	-	1.5
Sieve, %	0.00	-	0.1
Particle charge	Positive	Positive	
Asphalt Content by Evaporation, %	67.3	60	-
Solid Polymer, %	4.0	3.5	-
Softening Point, °C	61.7	60	-
Elastic Recovery at 25°C, %	64	30	-
Penetration at 25°C	65	40	100
Ductility at 25°C, cm.	95	40	-
Solubility, %	99.34	97.5	-

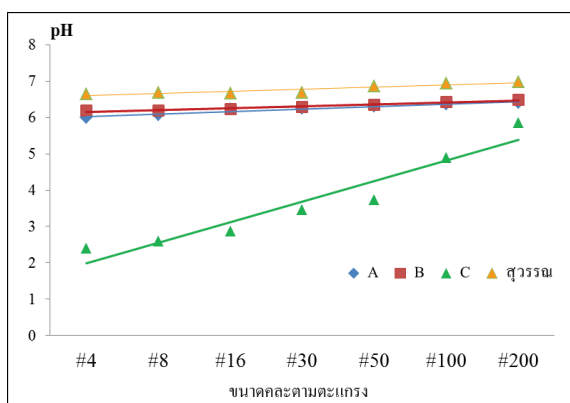
4.2 ผลการประเมินความเข้ากันได้ของพาราสเลอรี่ซิล

การประเมินความเป็นสภาพกรดเบสของหินมวลรวมด้วยการใช้น้ำเป็นสารละลายเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มทางประจุไฟฟ้าที่ผิวของหินมวลรวม ดังแสดงผลในรูปที่ 5 พบว่าหินชนิด A มีค่า pH อยู่ในช่วง 9-10 โดยค่า pH จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของหินมวลรวมมากขึ้น หินชนิด B มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 9.2 และหินชนิด C มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 8.8 ทำให้ทราบว่าหินทั้งสามแหล่งนี้มีแนวโน้มที่เป็นหินประจุลบเนื่องจากมีความเป็นเบส โดยเมื่อเทียบกับค่า pH ของหินจากโรงโม่สุวรรณที่ใช้อ้างอิงที่มี pH เฉลี่ยเท่ากับ 9.2 จึงประเมินผลในเบื้องต้นได้ว่าสามารถนำผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่มีความเป็นกรดได้



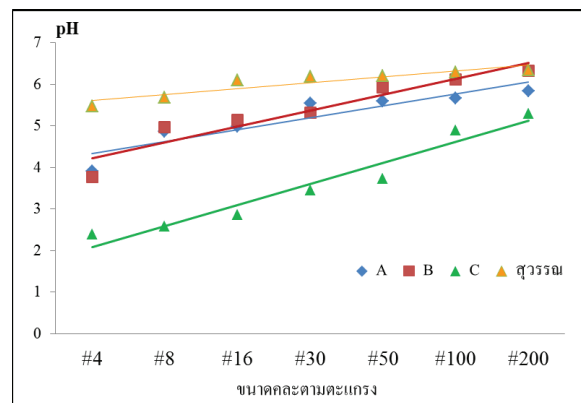
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ค่า pH ของหินแต่ละแหล่ง
ในสารละลายน้ำกลั่น

การประเมินความเข้ากันได้ระหว่างหินกับสารละลายกรดไฮดรอกซิดริกดังแสดงผลในรูปที่ 6 ว่าหินชนิด A มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.2 และหินชนิด B มีค่า pH เท่ากับ 6.3 โดยถือว่าหินทั้งสองนี้มีค่า pH ที่เข้าสู่ความเป็นกลางซึ่งมีลักษณะกราฟผลการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับหินจากโรงโม่สุวรรณที่มีค่า pH เฉลี่ยเท่ากับ 6.8 ส่วนหินชนิด C พบว่าได้ค่า pH อยู่ในช่วง 2-5 โดยแปรตามขนาดผลขนาดต่างๆ ซึ่งถือเป็นกรดอ่อนที่ไม่มีความเป็นกลางทางสภาพกรดเบส แสดงถึงศักยภาพในการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินและสารละลายของหินชนิด C และอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการพาราเซลเลอร์เซลล์ได้เมื่อเทียบผลการทดสอบของหินจากโรงโม่สุวรรณ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ค่า pH ของหินแต่ละแหล่ง
ในสารละลายกรดไฮดรอกซิดริก

สำหรับการประเมินถึงความเข้ากันได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) พบว่าขนาดผลของหินมวลรวมมีผลต่อค่า pH โดยตัวอย่างหินชนิด A มีค่า pH ในช่วง 4.0-5.8 และตัวอย่างหินชนิด B มีค่า pH ในช่วง 4.0-6.3 เมื่อค่า pH จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของหินมวลรวมมากขึ้น ส่วนตัวอย่างหินชนิด C อยู่ในช่วง pH 2.4-5.3 ซึ่งในเบื้องต้นจึงสามารถคาดการณ์ลักษณะความเข้ากันได้ของส่วนผสมว่าแหล่งหินชนิด A และ B เมื่อเทียบกับตัวอย่างหินชนิด C เนื่องจากมีลักษณะกราฟผลการทดสอบมีแนวโน้มเดียวกับหินจากโรงโม่สุวรรณที่มีค่า pH ในช่วง 5.5-6.4

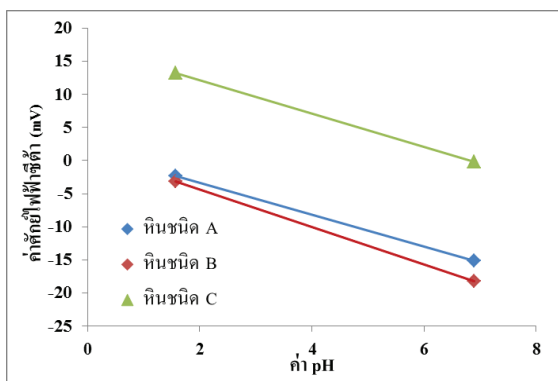


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ค่า pH ของหินแต่ละแหล่ง
ในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA)

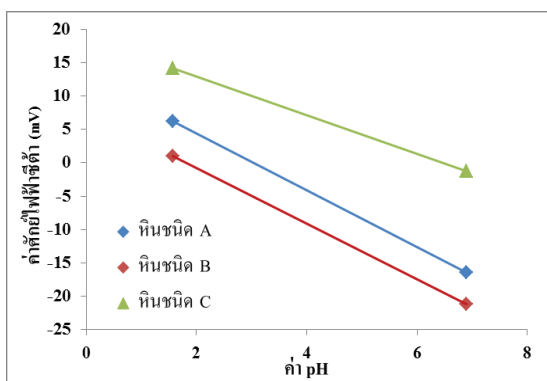
การประเมินสภาพทางไฟฟ้าที่ผิวของหินมวลรวมที่ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 พบว่าตัวอย่างหินชนิด A และ B มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุหินเป็นลบในน้ำที่เป็นตัวทำละลาย เมื่อใช้สารละลายกรดไฮดรอกซิดริกเป็นตัวทำละลายเพื่อประเมินความเข้ากันได้ระหว่างหินที่เป็นประจุลบกับประจุบวกของไฮดรอกไซด์ไอออนพบว่าตัวอย่างหินชนิด A มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเท่ากับ -2.31 mV ตัวอย่างหินชนิด B มีค่าเท่ากับ -3.2 mV สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดผลอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 กับเบอร์ 16 ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงที่เป็นกลางทางไฟฟ้า 0 mV แต่สำหรับตัวอย่างหินชนิด C มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเท่ากับ 13.2 mV ซึ่งถือว่ามีความเข้ากันได้ไม่ดีกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่เป็นประจุบวก

เนื่องจากเกิดการแสดงอำนาจทางไฟฟ้าหลังจากการทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินมวลรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความเป็นกรดเบสของหินชนิด C ที่มีสภาพเป็นกรดในสารละลายแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) นี้

พื้นที่ผิวของหินมวลรวมมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของหินเพิ่มขึ้นตามขนาดกะทัดรัดส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวลดลง โดยตัวอย่างหินชนิด B สามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 และเบอร์ 16 ได้เท่ากับ -18.2 mV และได้ค่าเท่ากับ -21.2 mV สำหรับตัวอย่างหินที่มีขนาดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 และเบอร์ 50 ซึ่งมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับตัวอย่างหินชนิด B และหินชนิด C



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของขนาดกะทัดรัดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 8 กับเบอร์ 16



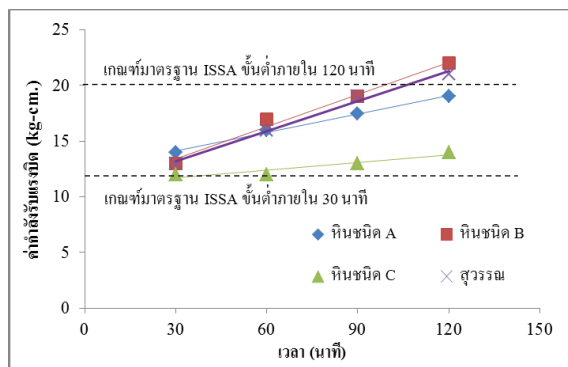
รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของขนาดกะทัดรัดอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 กับเบอร์ 50

การประเมินความเสถียรเชิงการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างหินมวลรวมและไฮดรอกไซด์ไอออน พบว่าหินชนิด B ที่มีขนาดของหินอยู่ระหว่างตะแกรงเบอร์ 30 และเบอร์ 50 มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.6 mV ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งถือว่ามีความเข้ากันได้ดีที่สุดโดยมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเข้าใกล้ความเป็นกลางทางไฟฟ้ามากที่สุด เหตุผลเนื่องจากหินชนิด B นี้มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักมากที่สุด จึงเกิดการจับตัวกันได้ดีกับไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลายกรดไฮดรอกลอร์ริกซึ่งเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA) โดยหินชนิด A มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบของหินชนิด B เนื่องจากมีองค์ประกอบทางธรณีวิทยาของหินมวลรวมที่คล้ายคลึงกัน แต่สำหรับหินชนิด C มีการแลกเปลี่ยนประจุไม่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวในสารละลายกรดเท่ากับ 14.2 mV ซึ่งมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก จึงสามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่าหินชนิด C นี้ไม่สามารถนำมาใช้ในงานพาราสเลอรีซิลให้ที่มีคุณภาพได้

4.3 ผลการประเมินคุณภาพพาราสเลอรีซิล

การประเมินประสิทธิภาพพาราสเลอรีซิลเมื่อพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของหินมวลรวมที่ใช้ซึ่งถูกควบคุมขนาดกะทัดรัดของตัวอย่างหินทั้งสามแหล่งให้เหมือนกันโดยจะอยู่ในช่วงระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของขนาดกะทัดรัดที่ใช้ในงานสเลอรีซิลประเภทที่สามดังที่แสดงในตารางที่ 1 ผสมเป็นตัวอย่างพาราสเลอรีซิลตามหัวข้อที่ 3.2 ได้ผลการทดสอบกำลังรับแรงบดดังรูปที่ 10 พบว่าตัวอย่างพาราสเลอรีซิลที่ใช้หินชนิด B มีค่ากำลังรับแรงบดสูงที่สุด (13 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 22 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) สอดคล้องกับปัจจัยความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุหินและแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) มีความเข้ากันได้ดีที่สุดเมื่อพิจารณาถึงค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินเมื่อเทียบกับค่ากำลังรับแรงบดของหินชนิด A และ C มีค่าเข้าใกล้ความเป็นกลางจึงทำให้เกิดความเสถียรในการแลกเปลี่ยนประจุส่งผลให้หินมวลรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันมีการจับตัวกันได้ดีจนได้ค่ากำลังรับแรงบดสูง รองลงมาเป็นตัวอย่าง

พาราเลลเลอร์ซีลที่ใช้หินจากโรงโม่สุวรรณ (13 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 21 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) และ หินชนิด A (14 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 19 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) ตามลำดับ ซึ่งหินปูนทั้งสามแหล่งนี้มีผลใกล้เคียงกันเนื่องจากมีความสัมพันธ์กรดเบสและองค์ประกอบของแร่คล้ายคลึงกัน ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด C (12 kg-cm. ณ เวลา 30 นาที และ 14 kg-cm. ณ เวลา 120 นาที) มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับสภาพความเป็นกรดเบสของตัวอย่างหินที่เป็นกรดอ่อนและมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ทำให้หินมวลรวมและแอสฟัลต์อิมัลชันมีการจับตัวกันและการยึดเกาะระหว่างวัสดุผสมไม่ดีพอส่งผลให้มีค่ากำลังแรงบิดน้อย



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่ากำลังรับแรงบิดของตัวอย่าง ณ เวลาการเซตตัวต่าง ๆ

ความต้านทานการขัดผิวของพาราเลลเลอร์ซีลที่ทดสอบตามมาตรฐาน ISSA TB100 ดังแสดงผลในตารางที่ 4 พบว่าตัวอย่างที่ใช้หินชนิด B ได้ค่าน้ำหนักการสูญเสียหลังการขัดผวน้อยที่สุดซึ่งถือว่ามีความทนทานการขัดผิวจนทำให้น้ำหนักของตัวอย่างหลุดร่อนน้อย ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด C ได้ค่าน้ำหนักที่สูญเสียหลังการทดสอบมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากหินชนิด C มีความเข้ากันได้ไม่ดีกับแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) ทำให้มีการจับกันของวัสดุไม่ดีจึงหลุดได้ง่ายเมื่อเกิดการขัดผิวของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลความต้านทานการขัดผิวพาราเลลเลอร์ซีล

ตัวอย่างแหล่งหิน	น้ำหนักสูญเสีย (กรัม/ตร.ม.)
หินชนิด A	405.40
หินชนิด B	388.22
หินชนิด C	1133.57

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางธรณีวิทยาของหินมวลรวมที่ใช้ในการผสมตัวอย่างพาราเลลเลอร์ซีลพบว่าหินชนิด B ซึ่งเป็นหินปูนที่มีปริมาณ CaO สูงที่สุดที่ 99.29% ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด รองลงมาเป็นตัวอย่างที่ใช้หินชนิด A ที่มีปริมาณ CaO อยู่ที่ 98.10% ได้ค่ากำลังรับแรงบิดใกล้เคียงกันแต่เนื่องด้วยปริมาณ CaO ที่น้อยกว่า ทำให้เกิดเป็นประจุลบของหินมวลรวมน้อยลงจึงเกิดปฏิกิริยากับแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1h (EMA) ที่มีส่วนผสมของกรดไฮดรอกลอริก ทำให้อิทธิพลของหินชนิด B เกษะน้อยกว่าจึงทำให้น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดผิวมากกว่าหินชนิด B

การประเมินผลตามเกณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างพาราเลลเลอร์ซีลที่ใช้หินชนิด B ผ่านเกณฑ์ในการทดสอบมาตรฐานตามหัวข้อที่ 3.2 สามารถรองรับการใช้งานได้จริง ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด A ไม่ผ่านเกณฑ์เนื่องจากค่ากำลังรับแรงบิดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามการควบคุมขนาดคละของหินมวลรวมและปริมาณสารผสมเพิ่มที่ใช้ในขอบเขตงานวิจัยนี้ ซึ่งถ้าหากมีการปรับอัตราส่วนของขนาดคละให้มีมวลละเอียดมากขึ้นหรือเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ก็จะสามารถทำให้แหล่งหินชนิด B มีแนวโน้มที่จะผ่านเกณฑ์และสามารถเป็นวัสดุหินทางเลือกให้มีคุณภาพได้ ส่วนตัวอย่างที่ใช้หินชนิด C ไม่ผ่านมาตรฐาน จึงไม่มีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในการก่อสร้างผิวทางแบบพาราเลลเลอร์ซีลได้ ซึ่งถือว่าผลการประเมินประสิทธิภาพสอดคล้องการหลักการเข้ากันได้ระหว่างหินมวลรวมกับแอสฟัลต์มีผลต่อประสิทธิภาพของพาราเลลเลอร์ซีล

5. สรุปผลและวิเคราะห์ผลดำเนินงานวิจัย

1. ความเข้ากันได้ระหว่างแอสฟัลต์อิมัลชันและหินมวลรวมสามารถพิจารณาได้จากค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของหิน โดยพบว่าแหล่งหินที่มีปริมาณ CaO มากทำให้ได้ค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเป็นลบมากขึ้น ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการตรวจสอบเบื้องต้นว่าวัสดุหินตัวอย่างมีความสามารถในการเข้ากันได้กับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1h (EMA)

2. ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหินโดยใช้สารละลายกรดสามารถนำมาเป็นแนวทางการประเมินความเข้ากันได้ของพาราสเลอรีซีล โดยหินที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าใกล้ความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะส่งผลให้มีการแลกเปลี่ยนประจุกันได้ดีระหว่างอนุภาคของหินและประจุของแอสฟัลต์อิมัลชัน

3. ขนาดของวัสดุหินมีผลต่อความเข้ากันได้ของวัสดุพาราสเลอรีซีล เมื่อพื้นที่ผิวของวัสดุหินเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่เป็นประจุบวก

ได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่ความเป็นกลางทางไฟฟ้าและมีความเสถียรจับตัวกันระหว่างอนุภาคของส่วนผสม

4. การเลือกวัสดุหินโดยใช้การตรวจสอบการหาค่า pH และค่าศักย์ไฟฟ้าของวัสดุผสมมีความจำเป็นต่อประสิทธิภาพพาราสเลอรีซีล โดยตัวอย่างที่ใช้หินที่มีความเป็นกรดเบสและค่าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นกลางจะได้ประสิทธิภาพของพาราสเลอรีซีลที่ดี เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดประจุบวกที่เหมาะสม

5. แนวทางการคัดเลือกหินในงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์ความเหมาะสมของหินเพื่อนำมาเป็นแหล่งหินทางเลือกในงานพาราสเลอรีซีล ซึ่งถ้ามีการพิจารณาขนาดและปริมาณสารผสมเพิ่มที่เปลี่ยนไปก็สามารถนำมาเป็นแนวทางศึกษาที่มีประโยชน์ได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sai, K., Kishore, N. A Study on Effect of Addition of Natural Rubber on the Properties of Bitumen & Bituminous Mixes. *International Journal of Science Technology & Engineering*, 2015; 2(01).
- [2] Ruggles, C. The Use of Natural Rubber Latex in Modified Asphalt Road Binders in the UK. Annual General Meeting. Las Vegas, USA, 2005.
- [3] รายงานมาตรฐานการฉาบผิวทางแบบสเลอรีซีล (SLURRY SEAL). มาตรฐานกรมทางหลวงชนบท. 2545; 232: 97-104.
- [4] สุรพล เกตุแก้ว. การทำงานพาราสเลอรีซีลอย่างมีคุณภาพ. บริษัท ทิปปโก้ แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน), 2556.
- [5] มาตรฐานวิธีการฉาบผิวทางแบบพาราสเลอรีซีล (Para Slurry Seal). มาตรฐานงานทางกรมทางหลวง, ทล.-ม. 415/2546.
- [6] Polymer Modified Asphalt Emulsions Composition, Uses, and Specifications for Surface Treatments. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2012, FHWA-CFL/TD-12-004.
- [7] Keven Heitschmidt, K. Understanding the differences in emulsions and the manufacturing process. Benton County Preservation Round Table. Albina Asphalt, 2016.
- [8] Specification for Elastomeric Modified Asphalt Emulsion. มาตรฐานกรมทางหลวง. สำนักงานมาตรฐานและประเมินผล กรมทางหลวง, 2538; 405.
- [9] ASTM D 3910, Standard Practice for Design, Testing and Construction of Slurry Seal. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards, 1999; 04(02-03), 14(02).

- [10] Hefer, A. and Little, D. Adhesion in Bitumen Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond. Texas Transportation Institute, College Station, Texas, USA, 2005.
- [11] Recommended Performance Guideline for Emulsified Asphalt Slurry Seal A105. International Slurry Surfacing Association. *Annual Report, 2010*.
- [12] Test Method to Determine Set and Cure Development of Slurry Surfacing Systems by Cohesion Tester. ISSA TB139, INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION TECHNICAL BULLETIN, 2017.
- [13] Laboratory Test Method for Wet Track Abrasion of Slurry Surfacing Systems. ISSA TB100, INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION TECHNICAL BULLETIN, 2017.
- [14] การศึกษาวิทยาหินและสีถาวรบนผิวของตัวอย่างหินปียะกิจ สีลาแม่ทะ สีลาสามยอด ห้วยนสีลา และชัยพัฒน์. ภาควิชาธรณีวิทยา, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2560; 1-18.

