



การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องโดยเกล็ดดัดแปร

Continuous Adsorption of Cutting Fluid by Modified Rice Husk

ปณพร เล็กประเสริฐ รังสิณี ชื่นเจริญ และ โกวิท ปิยะมังกลา*

Pranaporn Lekprasert, Rungsinee Chunjaroen and Kowit Piyamongkala*

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Applied Science,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Pracharat 1 road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, 10800

E-mail: kowit.p@sci.kmutnb.ac.th, Tel 02-5552000, Fax 02-5878251

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นในลักษณะอิมัลชัน โดยใช้เกล็ดดัดแปรเป็นตัวดูดซับ การทดลองทำแบบต่อเนื่องในลักษณะไหลขึ้น ศึกษาผลอัตราการไหลในช่วง 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูงของเกล็ดดัดแปรที่ 4.5 – 18.0 เซนติเมตร ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูง 18.0 เซนติเมตร พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ ความสามารถในการดูดซับ และร้อยละการดูดซับมีค่าที่ดีที่สุดเท่ากับ 150 นาที 71.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 88.8 ตามลำดับ สภาวะการทดลองที่ดีที่สุดนำมาใช้กับน้ำเสียจริง ผลการทดลองยืนยันได้ว่าเกล็ดดัดแปรสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะในลักษณะขึ้นตริงแบบต่อเนื่องได้ดี เส้นโค้งการดูดซับทำนายจากสมการอดัม-โบฮาร์ท และสมการยูน-เนลสัน พบว่าสมการยูน-เนลสัน สามารถใช้ทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดีตลอดการทดลอง

คำสำคัญ: การดูดซับแบบต่อเนื่อง น้ำมันหล่อเย็น เกล็ดดัดแปร

ABSTRACT

The modified rice husk was used as an adsorbent for removal cutting fluid emulsion. The effects of the flow rate in range 1.0 – 4.0 cm³/min, initial cutting fluid concentration at 5,816.7 – 15,000.0 mg/L and height of adsorbent at 4.5 – 18.0 cm were thoroughly investigated in continuous up-flow adsorption process. At the flow rate 1.0 cm³/min, initial cutting fluid concentration 5,876.1 mg/L and height 18.0 cm, the highest of breakthrough point, adsorption capacity and percent adsorption to adsorb cutting fluid was 150 minutes, 71.0 mg/g and 88.8%, respectively. The best of flow rate and height of adsorbent was conducted to use for removal cutting fluid wastewater. The results confirmed that modified rice husk can be used as an adsorbent for fixed-bed continuous adsorption of cutting fluid in the waste water from turning operation. The breakthrough curves were predicted by Adams-Bohart and Yoon-Nelson models. The Yoon-Nelson model was fitted well to predict the over all of breakthrough curve with the experimental data.

Key words: Continuous adsorption, Cutting fluid, Modified rice husk

1. บทนำ

น้ำมันหล่อเย็นในกระบวนการตัดกลึงโลหะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท [1] ได้แก่หนึ่งน้ำมันอย่างเดี่ยว ประกอบด้วยน้ำมันแร่และสารเพิ่มคุณภาพ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการหล่อลื่นสูง เช่นงานกัดเฟืองเกียร์ งานเจาะร่อง สองน้ำมันหล่อเย็นธรรมดา ประกอบด้วยน้ำมันแร่ร้อยละ 60 – 90 การใช้งานต้องผสมน้ำในอัตราส่วน 1:20 ซึ่งจะได้อายุของเหลวหล่อลื่นนาน โดยมากใช้กับงานเจียระไน งานตัดกลึงและขึ้นรูปโลหะ สามน้ำมันหล่อเย็นสังเคราะห์ ไม่มีส่วนผสมของน้ำมันแร่ การใช้งานต้องผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:20 จะได้อายุของเหลวหล่อลื่นสูง มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี เหมาะกับงานเจียระไนที่ต้องการความละเอียดสูง มีความสามารถต้านทานต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดี และสี่น้ำมันหล่อเย็นกึ่งสังเคราะห์ ประกอบด้วยน้ำมันแร่ร้อยละ 5 – 40 การใช้งานต้องผสมน้ำในอัตราส่วน 1:20 ได้ของเหลวข้น ทึบแสง เหมาะกับการใช้งานตัดกลึงโลหะ

ภายหลังจากการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง น้ำมันหล่อเย็นจะมีการเสื่อมสภาพ เนื่องจากการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับใบมีด ก่อให้เกิดความร้อน เป็นผลให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ดี ทำลายสมบัติการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อเย็น โดยทั่วไปการกำจัดน้ำมันหล่อเย็นมีการใช้ถังดักไขมันซึ่งเป็นวิธีทางกายภาพ (Physical process) โดยปล่อยน้ำเสียพักไว้ในถังระยะหนึ่ง เพื่อให้ไขมันลอยตัวแยกออกจากน้ำ แล้วจึงดักไขมันทิ้ง แต่ถ้าน้ำมันหล่อเย็นชนิดผสมน้ำที่ใช้กันในอุตสาหกรรม วิธีการดังกล่าว นำมาใช้ไม่ได้ผล เนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นมีการผลิตขึ้นมาเป็นพิษ โดยใช้สารตัวกลางที่เรียกว่า อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) เติมผสมในขั้นตอนการผลิต เพื่อให้หยดน้ำมันแขวนลอยเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ดังนั้นการแยกน้ำมันออกจากน้ำโดยวิธีทางกายภาพจึงใช้ไม่ได้ผล ต้องเลือกวิธีทางเคมี (Chemical process) เข้ามาช่วย โดยใช้ FeCl_3 หรือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ เป็น Coagulating agent นอกจากนั้น น้ำมันหล่อเย็นยังสามารถกำจัดได้ด้วยการแยกโดยใช้กระบวนการไมโครฟิวเตรชันและ

อัลตราฟิวเตรชัน การเผาโดยใช้ความร้อน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [2]

การดูดซับเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดน้ำมันหล่อเย็นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีการทำงานที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ไม่มีปัญหาเรื่องการลอยตัวของน้ำมันหล่อเย็น ไม่ต้องใช้สารเคมีล้างทำความสะอาดน้ำมันหล่อเย็นที่อยู่บนตัวดูดซับ [3] ตัวดูดซับดัดแปรที่มีการนำมาใช้ดูดซับน้ำมันหล่อเย็น ได้แก่โคลโลไมท์ [4] ขี้เถ้า [5] โคลโคซาน [6] ดินเปรี้ยวสังเคราะห์ [7]

แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นจากการสีข้าวสาร ในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีการผลิตข้าวเปลือกประมาณ 34 ล้านตัน มีแกลบเกิดขึ้นประมาณ 14 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 44.2 ของปริมาณข้าวเปลือก [8] แกลบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ร้อยละ 20 – 25 เซลลูโลสร้อยละ 30 – 40 และลิกนินร้อยละร้อยละ 19 – 47 เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของสารอินทรีย์ พบว่ามีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงมาก อยู่ในช่วงร้อยละ 85 – 99 นอกนั้นถือว่าเป็นสารปนเปื้อนในแกลบ ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น แกลบเป็นวัสดุที่ไม่ละลายน้ำ มีความต้านทานต่อสารเคมีและมีขนาดเล็ก การนำแกลบมาใช้เป็นวัสดุดูดซับมีประโยชน์ในด้าน การลดปัญหาสารมลพิษในน้ำเสีย และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงมีการนำแกลบมาใช้เป็นตัวดูดซับสารมลพิษในน้ำ ได้แก่โลหะหนัก สีย้อม สารพิษ [9]

การดูดซับ น้ำมันหล่อเย็น โดยส่วนใหญ่ใช้กระบวนการแยกแบบแบดจ์ ในขณะที่การดูดซับแบบต่อเนื่องมีผู้ทำวิจัยน้อยมาก โดย Viraraghavan และ Mathavan ได้ใช้ถ่านหิน Peat ดูดซับน้ำมันหล่อเย็น [10] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องโดยใช้แกลบดัดแปรเป็นตัวดูดซับ เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนของน้ำมันหล่อเย็นที่มีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยศึกษาผลอัตราการไหลและความ

เข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็น ผลความสูงของแถบตัดแปร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ และทำนายเส้นโค้งการดูดซับ (Breakthrough curve)

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

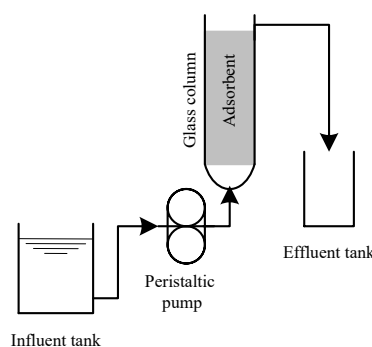
นำแถบปริมาณ 50 กรัม มาล้างด้วยน้ำสะอาด ประมาณ 3 – 4 ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมาให้หลุดออกไป จากนั้นกรองโดยใช้ตะแกรงกรองขนาดช่องว่าง 1.6 มิลลิเมตร เพื่อแยกแถบออกมา จากนั้นนำไปอบในตู้อบ (Binder รุ่น FD 53) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำที่เกาะติดผิวแถบ ได้แถบแห้ง จากนั้นนำแถบแห้งมาบดให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้เครื่องบดน้ำผลไม้ (Phillips รุ่น HR 2068) ใช้เวลา 2 นาที ได้ผงแถบ จากนั้นนำผงแถบไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร โดยผงแถบที่ผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตรลงมานำไปกวนกับสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ด้วยเครื่องกวน (Janke&Kunkel รุ่น RW 20) ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 เพื่อแยกผงแถบออกมา จากนั้นนำผงแถบไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 3 วัน ได้แถบตัดแปร ใช้เป็นตัวดูดซับ น้ำมันหล่อเย็น มีขนาดรูพรุน ปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิว เท่ากับ 9.9 นาโนเมตร 7.5×10^{-3} ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 3.0×10^{-2} ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ โดยแถบตัดแปรจัดอยู่ในรูพรุนขนาดกลาง มีค่าอยู่ในช่วง 2 – 50 นาโนเมตร [11]

2.2 การเตรียมน้ำมันหล่อเย็น

เตรียมโดยชั่งน้ำมันหล่อเย็นปริมาณ 15.0 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นให้ถึงขีดบอกปริมาตร จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องกวน ที่ความเร็ว 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลา 10 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้ฟองหายไป

2.3 การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่อง

อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย ถังจ่าย น้ำมันหล่อเย็น เครื่องสูบจ่ายสารเคมี (Peristaltic pump, Master Flex รุ่น L/S 10-600) คอลัมน์แก้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 3.0 เซนติเมตร โดยน้ำมันหล่อเย็น จะถูกสูบเข้าสู่คอลัมน์แก้วในลักษณะไหลขึ้น (Up flow) และไหลออกทางด้านบน โดยเครื่องสูบจ่ายสารเคมี เก็บตัวอย่างน้ำมันหล่อเย็นที่ไหลผ่านคอลัมน์แก้วทุก ๆ 15 นาที จากนั้นนำมาวัดความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็น ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (UV-VIS Spectrophotometer, Thermo electron รุ่น Spectronic Genesys 20) ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร นำผลจากการดูดกลืนแสงมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน อ่านเป็นความเข้มข้นของน้ำมันหล่อเย็นที่เหลือภายหลังการดูดซับ



รูปที่ 1 การดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่อง

ศึกษาผลอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที (ใช้แถบตัดแปรปริมาณ 20 กรัม) ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ใช้แถบตัดแปรปริมาณ 20 กรัม) และความสูงแถบตัดแปร 4.5 – 18.0 เซนติเมตร (ใช้แถบตัดแปรปริมาณ 6 – 20 กรัม)

สำหรับการดูดซับแบบต่อเนื่อง เส้นโค้งการดูดซับ เป็นการเขียนกราฟจากผลการทดลอง โดยให้แกน x เป็นเวลาที่ใช้ในการดูดซับหรือปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด และแกน y เป็นค่าความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้น (C_t/C_0) โดยเส้น

โค้งการดูดซับควรมีลักษณะคล้ายรูปตัวเอส (S-curve) เมื่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.05 เรียกว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ (Breakthrough time, $C_t/C_0 = 0.05$) ในขณะที่ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.95 เรียกว่าเวลาสมมูลการดูดซับ (Exhaustion time, $C_t/C_0 = 0.95$) [12] ดังนั้นปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัด เขียนได้ดังสมการที่ 1

$$V_{\text{eff}} = Q \times t_{\text{total}} \quad (1)$$

เมื่อ V_{eff} หมายถึงปริมาตรน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลูกบาศก์เซนติเมตร) Q หมายถึงอัตราการไหลของน้ำเสีย (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) และ t_{total} หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่องทั้งหมด (นาที)

สำหรับการดูดซับแบบต่อเนื่อง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นถูกป้อนเข้าสู่คอลัมน์ด้วยอัตราการไหลคงที่ ปริมาณตัวถูกดูดซับทั้งหมดภายในคอลัมน์ เขียนได้ดังสมการที่ 2

$$q_{\text{total}} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^t C_{\text{ad}} dt \quad (2)$$

เมื่อ q_{total} หมายถึงมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ (มิลลิกรัม) C_{ad} หมายถึงความเข้มข้นตัวถูกดูดซับภายในคอลัมน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาเริ่มต้น ลบด้วย ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับที่เวลาใด ๆ ($C_0 - C_t$, มิลลิกรัมต่อลิตร) และ t หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับแบบต่อเนื่อง (นาที)

มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ เขียนได้ดังสมการที่ 3

$$m_{\text{total}} = \frac{C_0 Q t_{\text{total}}}{1000} \quad (3)$$

เมื่อ m_{total} หมายถึงมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (มิลลิกรัม)

ดังนั้นความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง เขียนได้ดังสมการที่ 4

$$q_e = \frac{q_{\text{total}}}{m} \quad (4)$$

เมื่อ q_e หมายถึงความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ m หมายถึงมวลตัวดูดซับ (กรัม)

ในขณะที่ร้อยละการดูดซับ เขียนได้ดังสมการที่ 5

$$\% \text{ Total adsorption} = \frac{q_{\text{total}}}{m_{\text{total}}} \times 100 \quad (5)$$

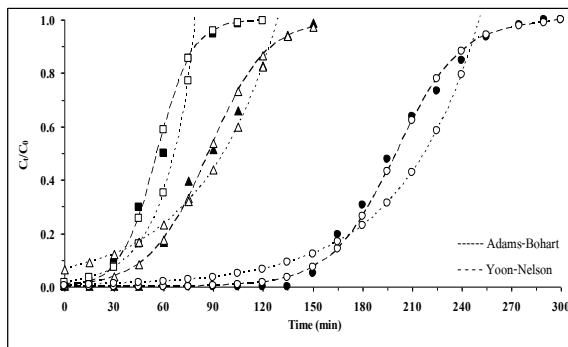
3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น

ผลการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น โดยใช้เกล็ดดัดแปรความสูง 18.0 เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นเท่ากับ 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ในช่วง 1.0, 2.0 และ 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แสดงในรูปที่ 2 พบว่าที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 150 นาที โดยเกล็ดดัดแปรสามารถดูดซับน้ำมันหล่อเย็นได้ดี หลังจากนั้นการดูดซับเริ่มลดลง จนกระทั่งหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยมีเวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นที่ 275 นาที พิจารณาที่อัตราการไหล 2.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีปานกลาง มีเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ 65 นาที จากนั้นการดูดซับเริ่มลดลงและหมดประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลา 135 นาที ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ 35 นาที และเวลาหมดประสิทธิภาพการดูดซับเกิดขึ้นที่ 105 นาที แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของน้ำมันหล่อเย็นมีผลต่อการดูดซับ โดยอัตราการไหลที่เพิ่มสูงขึ้น น้ำมันหล่อเย็นมีระยะเวลาสั้นในการสัมผัสกับเกล็ดดัดแปร น้ำมันหล่อเย็นเกาะที่ผิวภายนอกของเกล็ดดัดแปรได้ปริมาณน้อย เป็นผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมมูลการดูดซับเกิดในช่วงเวลาที่สั้นลง โดยผลการทดลองที่ได้

เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการใช้ Carbon aerogel ดูดซับสีข้อมไครเร็กซ์เรด 2 [13]

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็นจาก 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีผลทำให้มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร มีแนวโน้มลดต่ำลงจาก 1,420.8 – 1,060.0 มิลลิกรัม 71.0 – 53.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 88.8 – 45.6 ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 1,599.6 – 2,326.7 มิลลิกรัม ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร ที่อัตราการไหล: ● 1.0, ▲ 2.0 และ ■ 4.0 cm³/min

ตารางที่ 1 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล

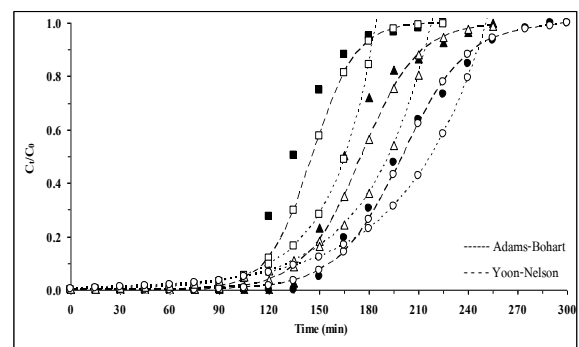
Q (cm ³ /min)	q _{total} (mg)	m _{total} (mg)	q _e (mg/g)	%Adsorption
1.0	1,420.8	1,599.6	71.0	88.8
2.0	1,193.0	1,628.7	59.6	73.2
4.0	1,060.0	2,326.7	53.0	45.6

3.2 ผลความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น

เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และความสูงแกลบคัดแปร 18.0 เซนติเมตร เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นที่ 5,816.7, 11,383.3 และ 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงในรูปที่ 3 ผลการทดลองพบว่า เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 150, 45

และ 15 นาที ตามลำดับ เวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นที่ 275, 135 และ 90 นาที ตามลำดับ

พิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับแบบต่อเนื่อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นจาก 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร มีแนวโน้มลดต่ำลงจาก 1,420.8 – 1,122.0 มิลลิกรัม 1,599.6 – 1,350.0 มิลลิกรัม 71.0 – 56.1 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 88.8 – 83.1 ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำมันหล่อเย็นมีผลทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดต่ำลง เนื่องจากการถ่ายโอนมวลน้ำมันหล่อเย็นเกิดขึ้นได้ช้า เป็นผลทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของน้ำมันหล่อเย็นจากน้ำไปยังผิวแกลบคัดแปรมีค่าลดต่ำลง [14]



รูปที่ 3 เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแกลบคัดแปร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น: ● 5,816.7, ▲ 11,383.3 และ ■ 15,000.0 mg/L

ตารางที่ 2 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นแบบต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้น

C ₀ (mg/L)	q _{total} (mg)	m _{total} (mg)	q _e (mg/g)	% Adsorption
5,816.7	1,420.8	1,599.6	71.0	88.8
11,383.3	1,302.8	1,536.7	65.1	84.8
15,000.0	1,122.0	1,350.0	56.1	83.1

3.3 ผลความสูงแถบดัดแปร

ผลการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นความเข้มข้นเริ่มต้น 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เปลี่ยนแปลงความสูงของแถบดัดแปร 4.5, 9.0 และ 18.0 เซนติเมตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดขึ้นที่ 5, 40 และ 150 นาที ตามลำดับ ในขณะที่เวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นที่ 50, 100 และ 275 นาที ตามลำดับ การลดความสูงแถบดัดแปรมีส่วนทำให้เส้นโค้งการดูดซับเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายมือ และมีความชันเพิ่มสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความสูงของแถบดัดแปรจาก 4.5 – 18.0 เซนติเมตร มีผลทำให้มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแถบดัดแปร มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 255.6 – 1,420.9 มิลลิกรัม 290.8 – 1,599.6 มิลลิกรัม 42.6 – 71.0 มิลลิกรัม ต่อกรัม และร้อยละ 87.9 – 88.8 ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3 การเพิ่มความสูงแถบดัดแปรมีส่วนทำให้ระยะเวลาในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นยาวนานขึ้น และประสิทธิภาพการดูดซับทำได้ดีขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ พื้นที่ผิวและตำแหน่งที่ว่างของแถบดัดแปรที่ใช้ในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นเพิ่มมากขึ้น [15] นอกจากนั้นการถ่ายโอนมวลไปตามแกนมีการกระจายตัวลดต่ำลง เป็นผลทำให้การแพร่ของน้ำมันหล่อเย็นไปยังแถบดัดแปรเกิดได้ดีขึ้น ดังนั้นน้ำมันหล่อเย็นจึงมีเวลายาวนานมากพอที่จะแพร่ไปตามความยาวของคอลัมน์และเกิดการเกาะติดผิวแถบดัดแปร [14]

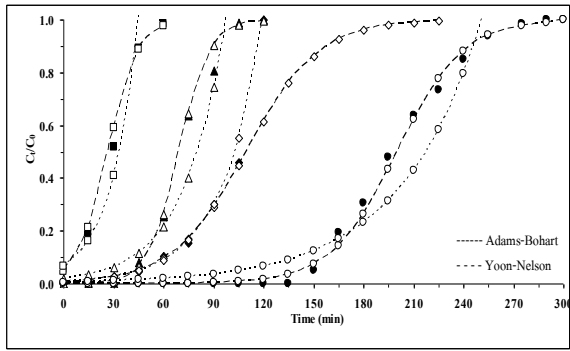
การใช้น้ำเสียจริง (Wastewater) จากกระบวนการดัดกลึงโลหะ ป้อนเข้าสู่กระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ใช้แถบดัดแปรความสูง 18.0 เซนติเมตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมมูลการดูดซับเกิดขึ้นเกิดขึ้นที่ 45 และ 110 นาที ตามลำดับ คำนวณมวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการ

ดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และร้อยละการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของแถบดัดแปร มีค่าเท่ากับ 561.0 มิลลิกรัม 599.5 มิลลิกรัม 28.1 มิลลิกรัมต่อกรัม และร้อยละ 93.6 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริงที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และใช้แถบดัดแปรที่มีความสูง 18.0 เซนติเมตร พบว่าน้ำเสียจริงมีเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ และเวลาสมมูลการดูดซับ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่เกิดการดูดซับภายในคอลัมน์ มวลตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ และความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง น้อยกว่าน้ำมันหล่อเย็น เนื่องจากน้ำเสียจริงมีการใช้งานซ้ำกันหลายรอบ และผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน เป็นผลทำให้มีสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ได้แก่ สนิม เศษโลหะ ตลอดจนคราบน้ำมันหล่อลื่นปนอยู่ในน้ำเสียจริงในปริมาณมาก โดยสารปนเปื้อนเหล่านี้จะไปเกาะติดผิวแถบดัดแปร เป็นผลทำให้การดูดซับน้ำเสียจริงของแถบดัดแปรมีปริมาณน้อยกว่าน้ำมันหล่อเย็น

แถบดัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็นได้ เนื่องจากมีเซลลูโลส (RH-OH) อยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล [16] หลังจากทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแถบดัดแปร (RH- OH₃²⁺) เป็นผลทำให้แถบดัดแปรมีประจุที่ผิวเป็นบวก เขียนได้ดังสมการที่ 6 แถบดัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็น (CF⁻) ซึ่งมีประจุเป็นลบ [6] โดยการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันหล่อเย็น เป็นผลทำให้น้ำมันหล่อเย็นเกาะติดผิวแถบดัดแปร เขียนได้ดังสมการที่ 7





รูปที่ 4 เส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นของเกล็ดคัดแปร
ที่มีความสูง: ■ 4.5, ▲ 9.0, ● 18.0 cm และ ♦ การดูด
ซับน้ำเสียจริง

ตารางที่ 3 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น
แบบต่อเนื่องเมื่อเปลี่ยนแปลงความสูง

Z (cm)	q _{total} (mg)	m _{total} (mg)	q _e (mg/g)	% Adsorption
4.5	255.6	290.8	42.6	87.9
9.0	512.3	581.7	51.2	88.1
18.0	1,420.9	1,599.6	71.0	88.8
Waste	561.0	599.5	28.1	93.6

3.4 การทำนายเส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็น แบบต่อเนื่องโดยเกล็ดคัดแปร

สมการอดัม-โบฮาร์ท (Adams-Bohart) ใช้พื้นฐาน
การดูดซับเกิดขึ้นที่บริเวณผิว มีสมมติฐานที่ว่าอัตราเร็ว
ของการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงของทั้งความสามารถ
ในการดูดซับของตัวดูดซับที่เหลืออยู่และความเข้มข้นของ
ตัวถูกดูดซับ [17] สมการอดัม-โบฮาร์ท เขียนได้ดังสมการที่
8

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{(k_{AB}C_0t - k_{AB}N_0\frac{Z}{v})} \quad (8)$$

เมื่อ k_{AB} หมายถึงค่าคงที่อดัม-โบฮาร์ท (ลิตรต่อมิลลิกรัม-
ชั่วโมง) N_0 หมายถึงความเข้มข้นอิ่มตัว (มิลลิกรัมต่อ
ลิตร) v หมายถึงความเร็วของน้ำมันหล่อเย็นในคอลัมน์
(เซนติเมตรต่อวินาที) และ Z หมายถึงความสูงของเกล็ด
คัดแปรในคอลัมน์ (เซนติเมตร)

สมการที่ 8 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง
สำหรับการหาค่าคงที่อดัม-โบฮาร์ท และความเข้มข้นอิ่มตัว
เขียนได้ดังสมการที่ 9

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = k_{AB}C_0t - k_{AB}N_0\frac{Z}{v} \quad (9)$$

สมการยูน-เนลสัน (Yoon-Nelson) มีสมมติฐาน
ที่ว่าอัตราเร็วการลดต่ำลงในโอกาสของการดูดซับสำหรับ
โมเลกุลตัวถูกดูดซับ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับโอกาสการดูด
ซับของตัวถูกดูดซับ และโอกาสของตัวถูกดูดซับทั้งหมด
ประสิทธิภาพการดูดซับบนตัวดูดซับ [18] สมการยูน-
เนลสัน เขียนได้ดังสมการที่ 10

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{(k_{YN}(\tau - t))}} \quad (10)$$

k_{YN} หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน (ต่อชั่วโมง) τ
หมายถึงเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของน้ำมันหล่อ
เย็นบนเส้นโค้งการดูดซับ (ชั่วโมง)

สมการที่ 10 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง
เขียนได้ดังสมการที่ 11

$$\ln \frac{C_t}{(C_0 - C_t)} = k_{YN}t - \tau k_{YN} \quad (11)$$

นำผลการใช้เกล็ดคัดแปรดูดซับน้ำมันหล่อเย็น
แบบต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมัน
หล่อเย็น ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ความสูงเกล็ด
คัดแปร และการดูดซับน้ำเสียจริง มาเขียนความสัมพันธ์
ระหว่าง $\ln (C_t/C_0)$ กับเวลา ตามสมการเส้นตรงอดัม-โบ
ฮาร์ท ดังแสดงในรูปที่ 5 (a), 6 (a) และ 7 (a) ตามลำดับ
ค่าคงที่อดัม-โบฮาร์ท และความเข้มข้นอิ่มตัว สามารถหาได้
จากความชันและจุดตัดของสมการที่ 9 ตามลำดับ ผลการ
คำนวณดังแสดงใน ตารางที่ 4 ในขณะที่นำผลการ
เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ความเข้มข้น
เริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ความสูงเกล็ดคัดแปร และการดูด
ซับน้ำเสียจริง มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (C_t/(C_0 -$
 $C_t))$ กับเวลา ตามสมการเส้นตรงยูน-เนลสัน ดังแสดงใน
รูปที่ 5 (b), 6 (b) และ 7 (b) ตามลำดับ โดยค่าคงที่

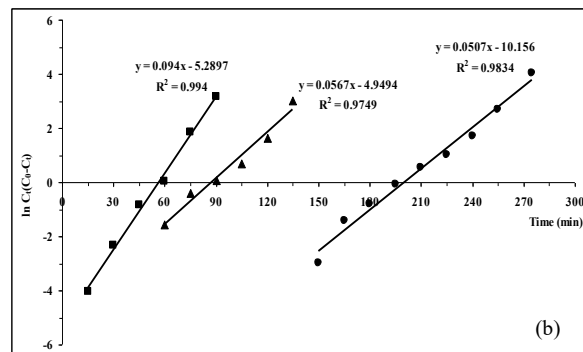
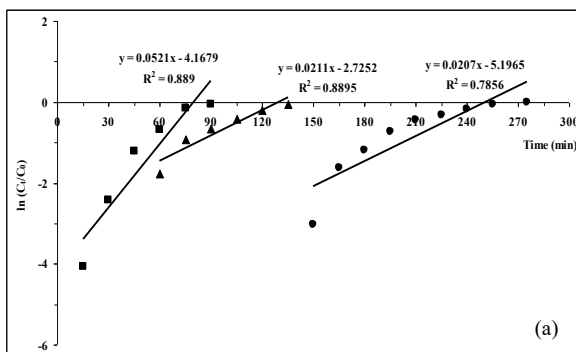
อัตราเร็วยูน-เนลสัน และเวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับของน้ำมันหล่อเย็นบนเส้นโค้งการดูดซับ สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดของสมการที่ 11 ตามลำดับ ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 ความถูกต้องของการทำนายเส้นโค้งการดูดซับจากสมการอดัม-โบฮาร์ และสมการยูน-เนลสัน พิจารณาจากค่า Mean Square Error (MSE) ที่เข้าใกล้ศูนย์ [19] เขียนได้ดังสมการที่ 12

$$MES = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{C_t}{C_0} \right)_{\text{exp}} - \left(\frac{C_t}{C_0} \right)_{\text{cal}} \right)^2 \quad (12)$$

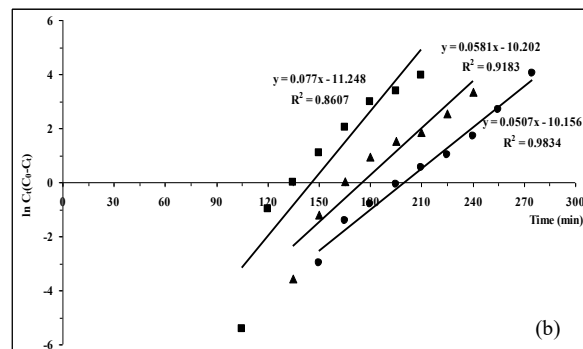
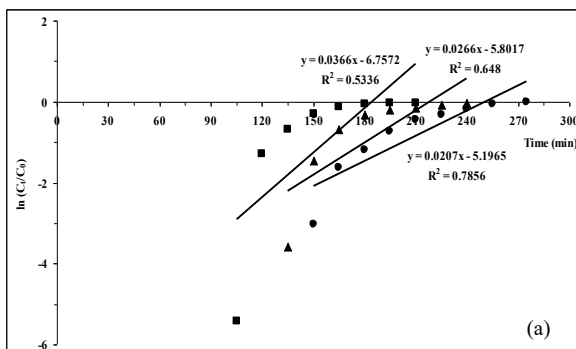
เมื่อ n หมายถึงจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

ผลการทำนายเส้นโค้งการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นโดยใช้เกล็ดคดแปรร่วมกับสมการอดัม-โบฮาร์และสมการยูน-เนลสัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลน้ำมันหล่อ

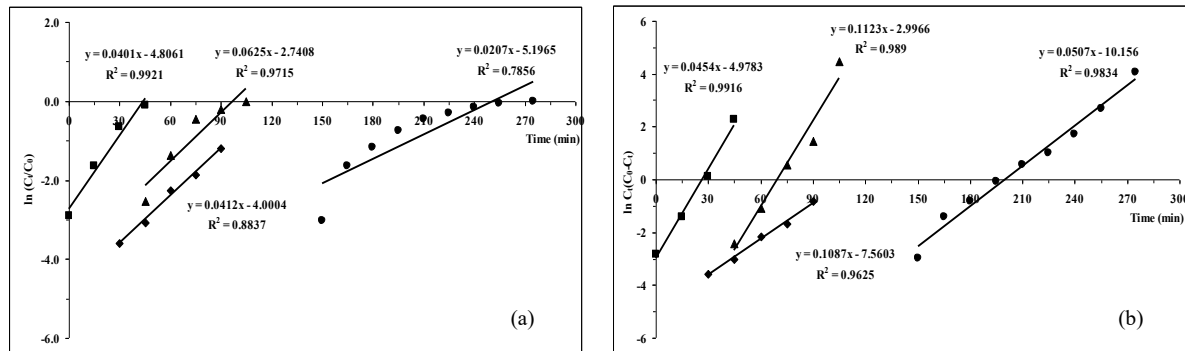
เย็น และความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2 – 3 ตามลำดับ ผลการเปลี่ยนแปลงความสูงเกล็ดคดแปรร่วมและการดูดซับน้ำเสียจริง ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเส้นโค้งการดูดซับที่ทำนายได้จากสมการยูน-เนลสัน มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าทำนายจากสมการอดัม-โบฮาร์ นอกจากนั้นผลการคำนวณค่า Mean Square Error ที่ได้จากสมการยูน-เนลสัน มีค่าน้อยกว่าสมการอดัม-โบฮาร์ ยกเว้นผลการดูดซับน้ำเสียจริง ที่ค่า Mean Square Error ที่ได้จากสมการอดัม-โบฮาร์ มีค่าน้อยกว่าสมการยูน-เนลสัน แต่อย่างไรก็ตาม สามารถลงความเห็นว่าสมการยูน-เนลสัน เหมาะสมและมีความถูกต้องสำหรับการนำมาทำนายเส้นโค้งการดูดซับแบบต่อเนื่อง ของดูดซับน้ำมันหล่อเย็นและน้ำเสียจริงโดยใช้เกล็ดคดแปรร่วม



รูปที่ 5 กราฟเส้นตรงตามสมการ: (a) อดัม-โบฮาร์ และ (b) ยูน-เนลสัน ที่อัตราการไหลน้ำมันหล่อเย็น ● 1.0, ▲ 2.0 และ ■ 4.0 cm³/min



รูปที่ 6 กราฟเส้นตรงตามสมการ: (a) อดัม-โบฮาร์ และ (b) ยูน-เนลสัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็น ● 5,11,383.3 และ ■ 15,000.0 mg/L



รูปที่ 7 กราฟเส้นตรงตามสมการ: (a) อัดม-โบฮาร์ และ (b) ยูน-เนลสัน ที่ความสูงเกลบดัดแปร ■ 4.5, ▲ 9.0, ● 18.0 cm และ ◆ น้ำเสียจริง

ตารางที่ 4 ค่าคงที่อัดม-โบฮาร์ ความเข้มข้นอิ่มตัว ค่าคงที่อัตราเร็วยูน-เนลสัน เวลาร้อยละ 50 สำหรับการดูดซับ และ Mean Square Error สำหรับการดูดซับน้ำมันหล่อเย็นโดยเกลบดัดแปร

พารามิเตอร์		อัดม-โบฮาร์			ยูน-เนลสัน		
		k_{AB} (L/mg-hr)	N_0 (mg/L)	MSE	k_{YN} (hr ⁻¹)	τ (hr)	MSE
Q (cm ³ /min)	1	3.5×10^{-7}	165,488.40	0.106	0.051	200.3	0.0006
	2	3.6×10^{-7}	75,138.70	0.0084	0.057	87.3	0.0022
	4	8.9×10^{-7}	52,735.90	0.9808	0.094	56.3	0.0012
C ₀ (mg/L)	5,816.70	3.5×10^{-7}	165,488.40	0.106	0.051	200.3	0.0006
	11,383.30	2.3×10^{-7}	281,384.80	0.2131	0.058	175.6	0.0034
	15,000.00	2.4×10^{-7}	313,859.00	0.9147	0.077	146.1	0.0065
Z (cm)	4.5	1.1×10^{-7}	115,633.60	0.5113	0.112	26.7	0.0013
	9	7.1×10^{-7}	128,015.70	0.2987	0.019	69.6	0.0011
	18	3.5×10^{-7}	165,488.40	0.106	0.051	200.3	0.0006
Wastewater		7.4×10^{-7}	14,029.10	14,029.10	0.045	109.7	0.0146

4. สรุป

การเพิ่มอัตราการไหลจาก 1.0 – 4.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นน้ำมันหล่อเย็นจาก 5,816.7 – 15,000.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้เวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพเกิดได้เร็วขึ้นเนื่องจากน้ำมันหล่อเย็นมีระยะเวลาสั้นในการสัมผัสกับเกลบดัดแปร การเกาะที่ผิวภายนอกของเกลบดัดแปรมีปริมาณน้อย และการถ่ายโอนมวลน้ำมันหล่อเย็นเกิดขึ้นได้ช้า ที่อัตราการไหล 1.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 5,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และความสูง 18.0 เซนติเมตร พบว่าเวลาการดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ ความสามารถในการดูดซับ และร้อยละการดูดซับมีค่าเท่ากับ 150 นาที 71.0 มิลลิกรัมต่อกรัม และ

ร้อยละ 88.8 ตามลำดับ เมื่อนำสภาวะการทดลองที่ดีที่สุดมาใช้ดูดซับน้ำเสียจริง พบว่าเกลบดัดแปรสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับแบบต่อเนื่อง สำหรับการกำจัดน้ำมันหล่อเย็นจากกระบวนการตัดกลึงโลหะได้ดี และสมการยูน-เนลสันสามารถนำมาใช้ทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มจพ. ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Irani, R.A., Bauer, R.J. and Warkentin, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005; 45: 1696–1705.
- [2] Tembhurkar, A.R. and Deshpande, R. Powdered activated lemon peels as adsorbent for removal of cutting oil from wastewater. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2012; 16: 311–315.
- [3] Toyai, S., Vilipornjaroen, K., Pornputtkul, Y. and Piyamongkala, K. Kinetics mechanism and thermodynamic adsorption chromium (VI) from electroplating wastewater by Chitosan. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2012; 19 (1): 28–39.
- [4] Solisio, C., Lodi, A., Converti, A. and Borghe, M.D. Removal of exhausted oils by adsorption on mixed Ca and Mg Oxides. *Water Research*, 2002; 36: 899–904.
- [5] Cambiella, Á., Ortea, E., Ríos, G., Benito, J.M., Pazos, C. and Coca, J. Treatment of oil-in-water emulsion: performance of a sawdust bed filter. *Journal of Hazardous Materials*, 2006; 131: 195–199.
- [6] Piyamongkala, K., Mekasut, L. and Pongstabodee, S. Cutting fluid effluent removal by adsorption on chitosan and SDS-modified chitosan. *Macromolecular Research*, 2008; 16(6): 492–502.
- [7] Kittithawornkul, V., Aoonpoontarik, S. and Piyamongkala, K. Adsorption of cutting oil by synthetic acid soil. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2010; 20 (2): 266–277.
- [8] ณัฐพันธุ์ สุกกา. ข้าวไทย ก้าวไกลด้วยนาโนเทคโนโลยี. *Technology Promotion and Innomag Magazine*, 2553-2554; 37(214): 35–39.
- [9] Lakshmi, U.R., Srivastava, V.C., Mall, I.D. and Lataye, D.H. Rice husk ash as an effective adsorbent: evaluation of adsorptive characteristics for indigo carmine dye. *Journal of Environmental Management*, 2009; 90: 710–720.
- [10] Viraraghavan, T. and Mathavan, G.N. Treatment of oil-in-water emulsions using peat. *Oil and Chemical Pollution*, 1998; 4: 261–280.
- [11] เดชา นัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [12] Daengbutdee, P., Kaew-in, K. and Piyamongkala, K. Adsorption of methylene blue dye by rice-husk in fixed-bed column. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 2014; 24 (2): 398–408.
- [13] Wu, X., Wu, D., Fu, R. and Zeng, W. Preparation of carbon aerogels with different pore structures and their fixed bed adsorption properties for dye removal. *Dyes and Pigments*, 2012; 95, 689–694.
- [14] Sadaf, S. and Bhatti, H.N. Batch and fixed bed column studies for the removal of indosol yellow Bg dye by peanut husk. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014; 45: 541–553.
- [15] Vieira, M.L.G., Esquerdo, V.M., Nobre, L.R., Dotto, G.L. and Pinto, L.A.A. Glass beads coated with chitosan for the food azo dyes adsorption in a fixed bed column. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014; 20: 3387–3393.
- [16] Nakbanpote, W., Goodman, B.A. and Thiravetyan, P. Copper adsorption on rice husk derived materials studied by EPR and FTIR. *Colloids and Surfaces A*, 2007; 304: 7–13.
- [17] Bohart, G.S. and Adams, E.Q. Some Aspects of the Behavior of Charcoal with Respect of Chlorine. *Journal of the American Chemical Society*, 1920; 42 (3): 523–544.
- [18] Yoon, Y.H. and Nelson, J. H. Application of Gas Adsorption Kinetics. Part I. A Theoretical Model for Respirator Cartridge Service Life. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1984; 45 (8): 509–516.
- [19] Cavas, L., Karabay, Z., Alyuruk, H., Doğan, H. and Demir, G.K. Thomas and Artificial Neural Network Models for the Fixed-Bed Adsorption of Methylene Blue by a Beach Waste *Posidonia Oceanica* (L.) Deal Leaves. *Chemical Engineering Journal*, 2011; 171: 557–562.



ภาพรวมของการเพิ่มคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวล ด้วยกระบวนการอบย่าง Overview of Biomass Upgrading by Torrefaction Process

ทศพร อ่อนศรี* และ นคร ทิพย์วงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 50200, Thailand

*E-mail: th.onsree@gmail.com

บทคัดย่อ

การอบย่างคือกระบวนการไพโรไลซิสอย่างอ่อน ใช้อุณหภูมิในช่วง 200 – 300 °C ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ค่าความร้อนของชีวมวลเพิ่มขึ้น ค่าความชื้นลดลง และน้ำหรือความชื้นถูกดูดซับเข้าได้ยาก การอบย่างอาจใช้ในขั้นตอนการเตรียมวัสดุก่อนเข้ากระบวนการแปลงสภาพทางเคมีความร้อนอื่น ๆ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้นและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการให้ดีขึ้น เช่น การใช้กับกระบวนการแกสซิฟิเคชันจะทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงขึ้นพร้อมกับปริมาณที่มากขึ้นด้วย การใช้ร่วมกับการอัดเม็ดจะทำให้ได้เชื้อเพลิงแข็งศักยภาพสูงใช้เป็นพลังงานหมุนเวียน และทดแทนการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้าและโรงถลุงเหล็กได้ บทความนี้เป็นการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง ที่รวบรวมอย่างครบถ้วน และนำเสนอภาพรวมของกระบวนการ ลักษณะของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการทั้งภายใต้ก๊าซเฉื่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในสถานะที่มีออกซิเจน พร้อมทั้งกล่าวถึงหลักการพื้นฐาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบย่าง การนำไปใช้ประโยชน์ และมาตรฐานสากลสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบย่าง

ABSTRACT

Torrefaction is a mild-pyrolysis process at temperature within 200 – 300 °C. This process results in treated biomass with improved heating value, reduced moisture content, and hydrophobicity. Torrefaction may be used in the process of preparing the raw biomass before any thermochemical conversion process, which will improve quality of product and process performance. For example, torrefaction may be used in gasification for increasing the heating value and yield of syngas. Due to the high potential for renewable energy, torrefaction can be combined with densification for the coal power plant and blast furnace. In this article, the literature reviews have been done and the overview of torrefaction on each product characteristic under an inert gas, carbon dioxide, and in the presence of oxygen were considered. The basis of torrefaction, mathematical modelling, applications and international standard are also presented.

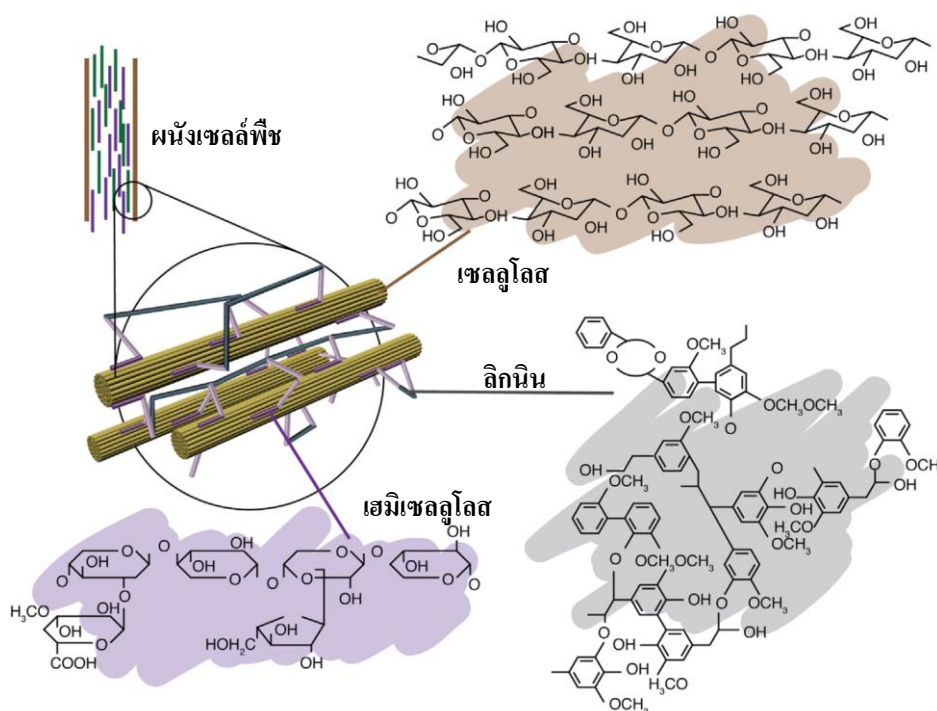
1. บทนำ

สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ และปัญหาความไม่มั่นคงด้านพลังงาน มีสาเหตุสำคัญมาจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของประชากรโลก จึงมีความ

พยายามควบคุมการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ และค้นหาพลังงานทดแทนแหล่งใหม่แทนพลังงานจากฟอสซิล เพื่อสร้างความมั่นคงทางด้านพลังงานและเศรษฐกิจของโลก สำหรับการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศของ

โลกทำโดยการกำหนดคุณสมบัติของประชากรว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและพิธีสารเกียวโต ซึ่งภายใต้พันธกิจนี้กำหนดให้ประเทศที่เข้าร่วมจะต้องลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยมากมายที่ให้ความสำคัญกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระหว่างกิจกรรม ทั้งกิจกรรมในด้านอุตสาหกรรม การขนส่ง และอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ถิราญ ปิ่นทอง และคณะ [1] ประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศไทย ปีติ ปีตา และวารุณี เตีย [2] วิเคราะห์การใช้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการขนส่งทางรถไฟในประเทศไทย และงานวิจัยของ เหมือนจิต แจ่มศิลป์ และคณะ [3] ชี้ให้เห็นว่าการใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อใช้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงถึง 71 % ของทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลาย ๆ งานที่ใช้ชีวมวลมาเป็นพลังงานทดแทนพร้อมกับแก้ปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น ธรณิศวร ติหาชาติ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ [4] ใช้ชีวมวลเป็นแหล่งความร้อนในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

ชีวมวลถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีปริมาณมากและมีศักยภาพที่จะสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้แก่โลก โดยชีวมวลสามารถนำมาให้ความร้อนโดยตรงด้วยกระบวนการเผาไหม้หรือทำการแปลงสภาพชีวมวลก่อนก็ได้ ซึ่งชีวมวลสามารถแปลงสภาพให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงหรือน้ำมันชีวภาพด้วยกระบวนการแกสซิฟิเคชัน ไพโรไลซิส และการหมักอัดอากาศ แต่การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์นั้นไม่ใช่เรื่องที่ย่ายดายเท่าไร เนื่องจากชีวมวลโดยธรรมชาติจะมีหลายชนิด หลายขนาด ค่าความชื้นสูง ค่าความหนาแน่นต่ำ และเกิดการย่อยสลายทางธรรมชาติได้ง่าย [5] ด้วยเหตุนี้ทำให้การนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ยังไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรทั้งในแง่ของการแปลงสภาพและการให้ความร้อนโดยตรง สำหรับการแปลงสภาพพบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการแปลงสภาพมีค่าต่ำ ส่วนการใช้ชีวมวลให้ความร้อนโดยตรงยังไม่สามารถใช้เพียงชีวมวลอย่างเดียวได้จะต้องใช้ร่วมกันกับถ่านหิน (co-firing) ดังนั้นจึงมีความต้องการเทคนิคที่จะทำให้คุณภาพของชีวมวลสูงขึ้นก่อนการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 1 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส [6]

โดยกระบวนการหรือเทคนิคที่น่าสนใจคือการอบย่าง (torrefaction) ซึ่งกระบวนการนี้ถือว่ามีศักยภาพที่จะช่วยเพิ่มคุณภาพของชีวมวลในด้านต่าง ๆ เช่น เพิ่มค่าความร้อน ลดค่าความชื้น ป้องกันการย่อยสลายทางธรรมชาติ และเพิ่มความสามารถทางการบดกับการกระจายขนาดเป็นต้น [7] นอกจากนี้เมื่อประยุกต์รวมการอบย่างกับการอัดเม็ดเข้าด้วยกันจะทำให้มีความน่าสนใจเพิ่มขึ้นอีก เพราะการอัดเม็ดจะเพิ่มคุณสมบัติด้านการจัดเก็บ การดูแลรักษา และการขนส่งของชีวมวลอย่างให้ดีขึ้นอีก

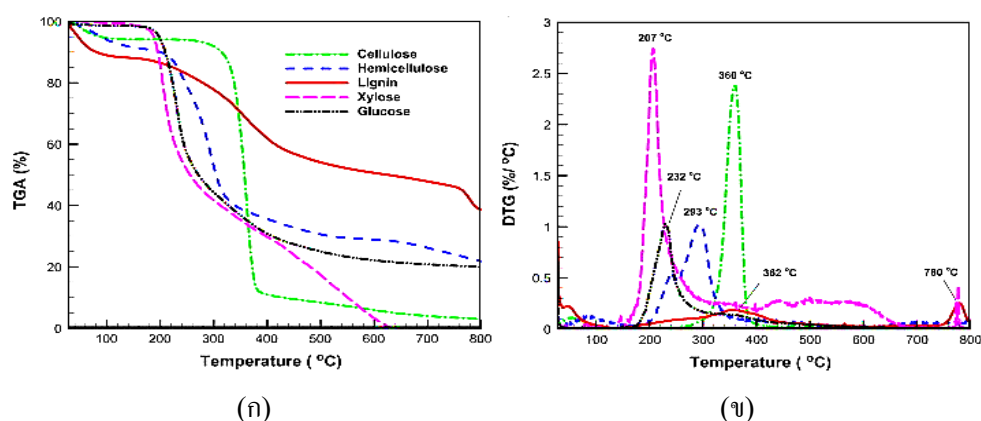
วัตถุประสงค์หลักของบทความนี้คือการนำเสนอแนวทางการเพิ่มคุณภาพชีวมวลโดยการอบย่างให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น เหมาะสมแก่การแปลงสภาพทางเคมีความร้อนและการใช้งานด้านต่าง ๆ พร้อมกับการเพิ่มคุณค่าให้แก่ชีวมวลอัดเม็ดธรรมชาติ โดยเนื้อหานี้ได้รวบรวมตั้งแต่หลักการพื้นฐาน สมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของสลายตัวทางความร้อน คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการอบย่าง และสุดท้ายได้นำเสนอตัวอย่างที่สำคัญสำหรับการใช้ประโยชน์จากชีวมวลอย่าง

2. โครงสร้างและคุณสมบัติของชีวมวล

โดยทั่วไปชีวมวลประกอบไปด้วยเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ลิกนิน (lignin) สารสกัดอินทรีย์ (organic extractives) และ

แร่ธาตุอนินทรีย์ (inorganic minerals) หรือบางครั้งจะถูกเรียกว่า “ขี้เถ้า (ash)” ซึ่งทั้งสามส่วนแรกนั้นจะเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวลทั่วไป [8] ดังรูปที่ 1 และสัดส่วนของสามองค์ประกอบจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ตัวอย่างเช่น ใน ไม้ผลัดใบ (deciduous wood) และ ไม้สน (coniferous wood) ซึ่งไม้ทั้งสองชนิดเป็นไม้เนื้อแข็งและเนื้ออ่อน ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนดังนี้ 25–35 wt% กับ 18–25 wt% (ลิกนิน) 35–50 wt% กับ 40–50 wt% (เซลลูโลส) และ 20–32 wt% กับ 15–35 wt% (เฮมิเซลลูโลส) [9] หรือของฟางข้าวและหญ้าจะเป็น 7–14 wt%, 27–43 wt% และ 29–34 wt% ตามลำดับ [6] ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสามองค์ประกอบของไม้ทั้งสองชนิดหรือของฟางข้าวและหญ้านั้นก็แตกต่างกันไม่มากนัก

เซลลูโลสคือพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (10^6 หรือมากกว่า) ซึ่งเป็นเส้นใยในชีวมวล [6] เกิดจากโฮมโพลีแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharides) ที่ประกอบด้วย β -D-glucopyranose ต่อกันเป็นเส้นตรงโดยพันธะไกลโคไซด์ ((1 $\rightarrow$ 4)-glycosidic bond) [10] ที่ตำแหน่ง β -1,4 [11] สารประกอบกลูโคส (glucose anhydride) ซึ่งจะถูกรวบรวมขึ้นจากการกำจัดน้ำออกจากกลูโคสและกลูโคสจะถูกทำให้เป็นพอลิเมอร์เข้าไปในสายของเซลลูโลสที่มีหน่วยกลูโคส 5,000-10,000 โมเลกุล



รูปที่ 2 (ก) การวิเคราะห์ thermogravimetric (TGA) และ (ข) การวิเคราะห์ derivative thermogravimetric (DTG) ขององค์ประกอบชีวมวล [12]

หน่วยซ้ำพื้นฐานของเซลลูโลสประกอบด้วยสองหน่วยของสารประกอบกลูโคสที่เรียกว่าหน่วยเซลโลบิโอส (cellobiose) [13] ดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถเขียนโครงสร้างพื้นฐานของเซลลูโลสได้เป็น $(C_6H_{10}O_5)_m$ เมื่อ m คือระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน [12]

เฮมิเซลลูโลสเป็นการผสมผสานกันของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharides) ต่างชนิดกัน เช่น กลูโคส (glucose), แมนโนส (mannose), กาแลคโตส (galactose) ไซโลส (xylose) อาราบิโนส (arabinose) กรดเมทิลกลูคูโรนิก (4-O-methyl glucuronic acid) และกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) ซึ่งมีหน่วยซ้ำของมอนอเมอร์ (monomers) ที่เป็นแซ็กคาไรด์ (saccharide) ประมาณ 150 โมเลกุล ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสต่ำกว่าเซลลูโลส [13] ไซโลสซึ่งเป็นน้ำตาลเพนโตส (pentose sugar) จะเป็นส่วนหลักของเฮมิเซลลูโลสที่มาจากไม้เนื้อแข็ง [10] เช่น เฮมิเซลลูโลสของไม้พัดใบประกอบด้วยไซแลน (xylan) ประมาณ 80-90 wt% [9] ในขณะที่อาราบิโนสจะพบเป็นจำนวนมากในเศษวัสดุทางการเกษตรและสมุนไพร เช่น อาราบิโนสในสมุนไพร 10-20 % ของน้ำตาลเพนโตสทั้งหมด หรือพบอาราบิโนสสูงถึง 30 – 40 % ของน้ำตาลเพนโตสทั้งหมดของเส้นใยข้าวโพดที่เหลือจากการอบแห้ง ในขณะที่ในไม้เนื้อแข็งถูกพบเพียง 2 - 4 % ของน้ำตาลเพนโตสทั้งหมด [14] โครงสร้างพื้นฐานของเฮมิเซลลูโลสสามารถเขียนได้เป็น $(C_5H_8O_4)_m$ [12]

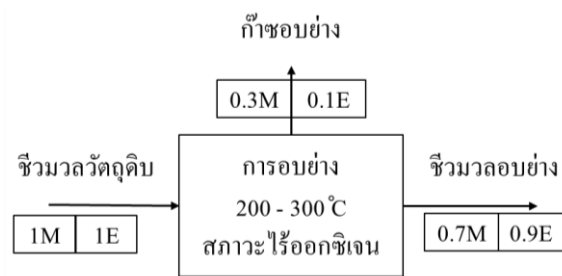
ลิกนินเป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งเชื่อมต่อกับเรซินแบบร่างแห (cross-link resin) เป็นโครงสร้างไม้แน่นอน มีกิ่งก้านเป็นสามมิติ [13] ประกอบไปด้วยไซโมเลกุลของออกซิเจนเตเตฟีนีลโพรเพน (oxygenated phenyl propane) [14] ลิกนินเป็นส่วนประกอบในผนังเซลล์ร่วมกับ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และส่วนประกอบเพคติน (pectin) ซึ่งมันเชื่อมต่อกับเฮมิเซลลูโลสด้วยพันธะโคเวเลนต์เป็นการเชื่อมต่อบนร่างแหของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ต่างกัน ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงขึ้น [6] สูตรทางเคมีของลิกนินคือ $[C_9H_{10}O_3 \cdot (OCH_3)_{0.9-1.7}]_m$ [15]

จากสูตรเคมีพื้นฐานของทั้งสามองค์ประกอบหลักพบว่าอัตราส่วนอะตอม O/C เป็น 0.83 ,0.80 และ 0.47-0.36 และอัตราส่วนอะตอม H/C เป็น 1.67 1.60 และ 1.19 – 1.53 ของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินตามลำดับ [12] ความแตกต่างกันของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทั้งในด้านองค์ประกอบและโครงสร้างภายในจึงทำให้สิ่งเหล่านี้มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนแตกต่างกัน คือ 305 – 375 ,225 – 325 และ 250 – 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [9] ดังจะสังเกตได้จากรูปที่ 2 โดยจะพบว่าแต่ละองค์ประกอบของชีวมวลจะมีอุณหภูมิที่ทำให้มีความรุนแรงของการสลายตัวไม่เท่ากัน

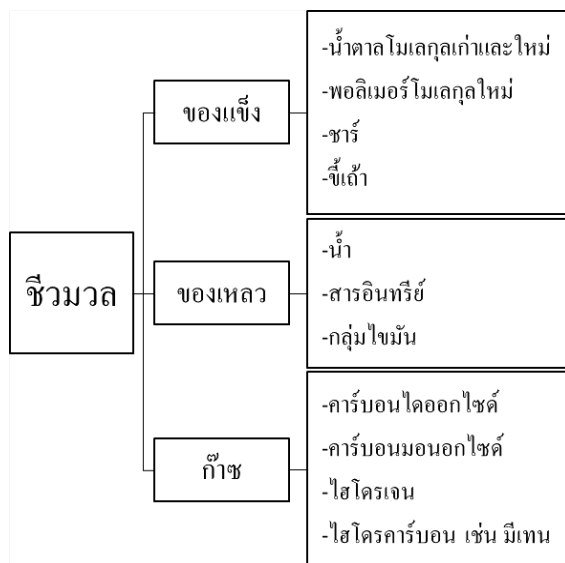
3. การอบแห้ง

การอบแห้งคือกระบวนการไพโรไลซิสอย่างอ่อน (mild-pyrolysis) ที่แปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และความดันบรรยากาศที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิน้อยกว่า 50 องศาเซลเซียส/นาที่ [16] นอกจากนั้นยังมีการดำเนินการภายใต้ CO_2 [17–21] แก๊สเฉื่อยผสม O_2 [19] และอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความดัน [22] ด้วย ซึ่งในระหว่างกระบวนการ ส่งผลให้มีการสูญเสียมวลและพลังงานเคมีในรูปของแก๊ส [23] ดังรูปที่ 3 หลังจากการอบแห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ 3 กลุ่ม ที่อุณหภูมิห้องคือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ดังรูปที่ 4 โดยกลุ่มของแข็งจะถูกเรียกว่า “ชีวมวลอบแห้ง (torrefied biomass)” ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างของน้ำตาลเก่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาทำให้ได้โครงสร้างน้ำตาลขนาดใหญ่บางส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ชาร์ (char) และขี้เถ้า (ash) กลุ่มของของเหลวจะมีส่วนประกอบหลักเป็น น้ำ สารอินทรีย์ (organics) และกรดไขมัน (fatty acids) กลุ่มสุดท้ายแก๊สซึ่งเป็นการผสมกันของ CO , CO_2 , H_2 และไฮโดรคาร์บอนบางชนิด เช่น CH_4 โดยทั่วไปนั้นชีวมวลอบแห้งจะมีมวลเหลือหลังการอบแห้งประมาณ 70% ของมวลเริ่มต้น และพลังงานจะเหลือ

ประมาณ 90% ของพลังงานเริ่มต้น เมื่อพิจารณาผล 30% ที่หายไประหว่างกระบวนการจะพบว่าถูกแปลงไปในรูปของ ก๊าซของการอบอย่างดังรูปที่ 3 แต่จะมีพลังงานบรรจุอยู่แค่ 10% เท่านั้น ดังนั้นความหนาแน่นเชิงพลังงาน (energy densification) ของชีวมวลอย่างจะเพิ่มขึ้นถึง 1.3 เท่าของ ชีวมวลวัตถุดิบ [24]



รูปที่ 3 สมดุลมวลและพลังงานของกระบวนการอบอย่าง [24]



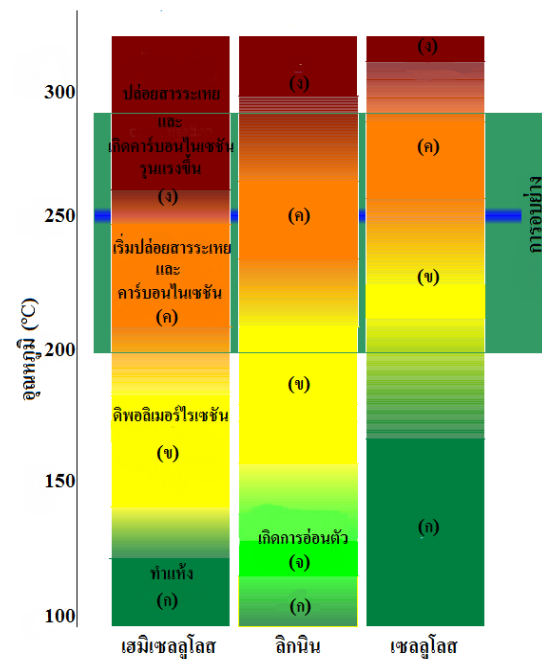
รูปที่ 4 กลุ่มของผลิตภัณฑ์หลังการอบอย่าง [16]

3.1 กลไกการอบอย่าง

ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ของการอบอย่างจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากมายและมีเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันออกของ ทั้ง 3 องค์ประกอบหลัก แต่อย่างไรก็ตามเส้นทางการเกิด และปฏิกิริยาที่มากมายนี้สามารถจัดกลุ่มและแบ่งเป็นช่วง การเกิดได้ดังรูปที่ 5 คือ 1. ช่วงการทำแห้ง (ก) 2. ช่วง การ

แตกตัวของพอลิเมอร์ (ข) ซึ่งทำให้โครงสร้างของของแข็ง สิ้นลง โดยเกิดจากการแตกออกของพอลิเมอร์ (depolymerisation) และ 3. ช่วงการปล่อยสารระเหย (devolatilisation) และการเกิดคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) โดยช่วงนี้สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ระดับ คือ ระดับเริ่มต้น (ค) กับระดับรุนแรง (ง) นอกจากนี้ใน ลิกนินยังมีอีกหนึ่งช่วงเพิ่มเข้ามา ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ลิกนิน อ่อนตัว (จ) โดยปรากฏการณ์นี้จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ในกระบวนการอัดเม็ด [25] ดังรูปที่ 5 สำหรับการ เปลี่ยนแปลงช่วงการสลายตัวจากช่วงหนึ่งไปยังอีกช่วงหนึ่ง จะเกิดอย่างช้า ๆ ค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งสำหรับเฮมิเซลลูโลส นั้นจะมีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงที่สั้นต่างจากเซลลูโลส กับลิกนินที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่กว้างมาก [16]

ชีวมวลที่ถูกอบอย่างจะสามารถแบ่งระดับการถูกอบอย่าง ได้เป็น 3 ระดับคือ แบบเบา (light) แบบอ่อน (mild) และ แบบรุนแรง (severe) ซึ่งทั้ง 3 ระดับนั้นถูกแบ่งจาก



รูปที่ 5 ปรากฏการณ์ทางเคมีกายภาพหลักในระหว่างการให้ความร้อนแก่ชีวมวล [25]

ตารางที่ 1 ระดับการอบย่าง [26]

ประเภท	เบา	อ่อน	รุนแรง
อุณหภูมิ (°C)	200 – 235	235 – 275	275 – 300
ความเสียหาย			
เฮมิเซลลูโลส	ปานกลาง	ปานกลาง - รุนแรง	รุนแรง
เซลลูโลส	น้อย	น้อย - ปานกลาง	ปานกลาง - รุนแรง
ลิกนิน	น้อย	น้อย	น้อย

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบย่าง [26] ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งในการอบย่างแบบเบานั้นความชื้นและสารระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาจะถูกปล่อยพร้อมกับเกิดการสลายตัวทางความร้อนของเฮมิเซลลูโลสบางส่วนแต่ก็มากกว่าเซลลูโลสและลิกนิน [27] ทำให้ความหนาแน่นเชิงพลังงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การอบย่างแบบอ่อนเมื่อชีวมวลผ่านการอบย่างแบบนี้ เฮมิเซลลูโลสจะผ่านช่วงลดระดับพอลิเมอร์อย่างสมบูรณ์ เซลลูโลสและลิกนินเริ่มลดระดับพอลิเมอร์ลง ทำให้สารระเหยถูกปล่อยรุนแรงขึ้น โดยในการอบย่างระดับนี้เฮมิเซลลูโลสถูกสลายตัวทางความร้อนจนเกือบหมดสิ้น แต่เมื่อชีวมวลผ่านการอบย่างแบบรุนแรงจะทำให้เฮมิเซลลูโลสสลายตัวอย่างสมบูรณ์ เซลลูโลสและลิกนินจะอยู่ในช่วงสิ้นสุดกระบวนการลดลงของระดับพอลิเมอร์และเริ่มเข้าสู่การปล่อยสารระเหย จึงเกิดการสูญเสียมวลและพลังงานสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นเชิงพลังงานก็เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกันด้วย [12] ส่วนของลิกนินนั้นเกิดการสลายตัวทางความร้อนยากและมีช่วงการสลายตัวในระหว่างอุณหภูมิของการอบย่างน้อย อาจกล่าวได้ว่าเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนเป็นหลักตามมาด้วยเซลลูโลส ซึ่งเป็น 2 ส่วนที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุดในระหว่างกระบวนการอบย่าง [26,28]

3.2 สัดส่วนมวล/พลังงาน และค่าความร้อน

สัดส่วนมวล/พลังงาน (Mass/Energy Yield) คือ สัดส่วนมวล/พลังงานของผลิตภัณฑ์หลังการอบย่าง [29,30] หาได้จาก

$$\text{Mass Yield} = \frac{M_T}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

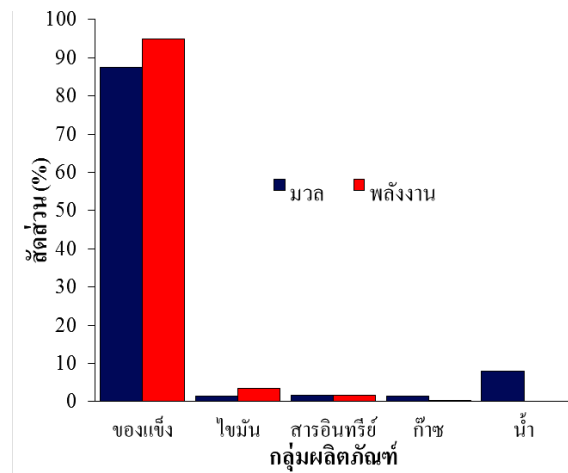
$$\text{Energy Yield} = \text{Mass Yield} \times \frac{\text{HHV}_T}{\text{HHV}_0} \quad (2)$$

เมื่อ M_0 และ M_T คือมวลของชีวมวลก่อนและหลังการอบย่าง เช่นกัน HHV_0 และ HHV_T ก็คือค่าความร้อนของชีวมวลก่อนและหลังการอบย่าง รูปที่ 6 แสดงสัดส่วนมวลและพลังงาน ของกลุ่มผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ หลังการอบย่าง จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ของแข็งมีสัดส่วนมวลที่สูง น้ำจะมีสัดส่วนมวลลดลงมา อย่างไรก็ตามสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอบย่างและชนิดของการอบย่าง โดยทั่วไปของแข็งจะเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการจากกระบวนการอบย่างและแสดงถึงระดับการอบย่างด้วย [12] ในตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนของของแข็งตามเงื่อนไขการอบย่างต่าง ๆ อยู่ในช่วง 50 - 90 % โดยอุณหภูมิอบย่างเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความรุนแรงของการอบย่าง กล่าวคือสัดส่วนมวลของของแข็งจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น [31] เช่นเดียวกับงานของ Chen et al. [26] แสดงให้เห็นว่าการอบย่างแบบเบาส่งผลให้สัดส่วนมวลที่เหลือหลังการอบย่างของเฮมิเซลลูโลสอยู่ที่ 97.53 %wt ในขณะที่การอบย่างแบบรุนแรงมีสัดส่วนมวลที่เหลือมีค่าน้อยกว่ามากเพียง 41.63 %wt เท่านั้น ปัจจัยรองลงมาจะเป็นเวลาและสื่อกลางที่ใช้ สำหรับเวลาในการอบย่างนั้นจะมีตั้งแต่เป็นชั่วโมง [32] ไปจนถึงเพียงไม่กี่นาที [33] แต่จากการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกพบว่าสัดส่วนมวลจะลดลงอย่างรวดเร็วที่เวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมงและเกิดช้ามากหลังจากนั้น [27] ตัวอย่างของสื่อกลางอื่น ๆ ที่เป็นก๊าซ

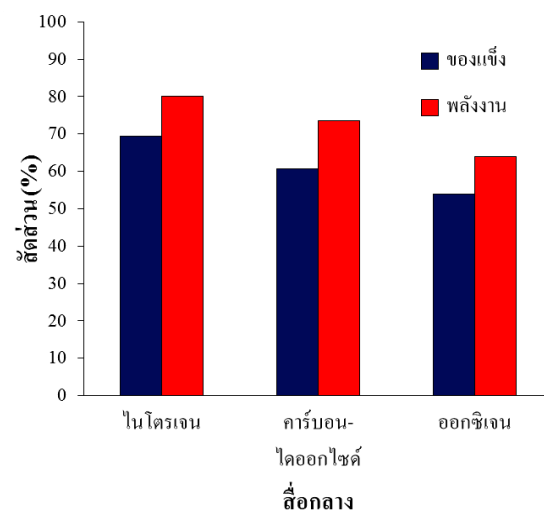
นอกจากก๊าซเฉื่อย (N_2 , He ,และ Ar [31]) ได้แก่ CO_2 และก๊าซผสมระหว่าง N_2 กับ O_2 [17–20,29,30] โดยพบว่าการใช้ CO_2 และ O_2 จะทำให้ความรุนแรงของการอบอย่างมากขึ้นเมื่อเทียบกับการอบอย่างในก๊าซเฉื่อยดังรูปที่ 7 เป็นผลมาจากภายใต้บรรยากาศ CO_2 มีการเกิดปฏิกิริยาของ CO_2 กับ C(s) [17,18,20] ในขณะที่เดียวกันภายใต้บรรยากาศการอบอย่างที่มี O_2 เป็นส่วนผสมจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้บางส่วน [19]

ในกระบวนการอบอย่างจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่มีสัดส่วนพลังงานสูงที่สุด โดยอยู่ในช่วง 60 – 90 % (ตารางที่ 2) และเมื่อสังเกตที่เงื่อนไขการอบอย่างเดียวกันจะพบว่าสัดส่วนพลังงานมีค่ามากกว่าสัดส่วนมวล ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในระหว่างการอบอย่าง พันธะ H–C และ O–C ที่เป็นองค์ประกอบภายในชีวมวลซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำจะถูกทำลายลงและถูกแปลงไปเป็นก๊าซจากการอบอย่าง ในขณะที่เดียวกันชีวมวลที่เหลืออยู่ในรูปของของแข็งก็มีการก่อตัวเพิ่มขึ้นของพันธะ C–C ซึ่งเป็นพันธะที่มีพลังงานสูง [17] จึงส่งผลต่อให้ค่าความร้อนสูงของชีวมวลอบอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลแบบธรรมดา ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้เป็นเป้าหมายสำคัญของกระบวนการอบอย่าง สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงพบว่ามีความสัมพันธ์แบบใกล้เคียงกับการลดลงของสัดส่วนมวล โดย Peng et al. [34] และ Almeida et al. [29] เสนอความสัมพันธ์นี้เป็นแบบเชิงเส้น ในขณะที่ Shang et al. [35] พบว่าความสัมพันธ์ของค่าความร้อนกับสัดส่วนมวล

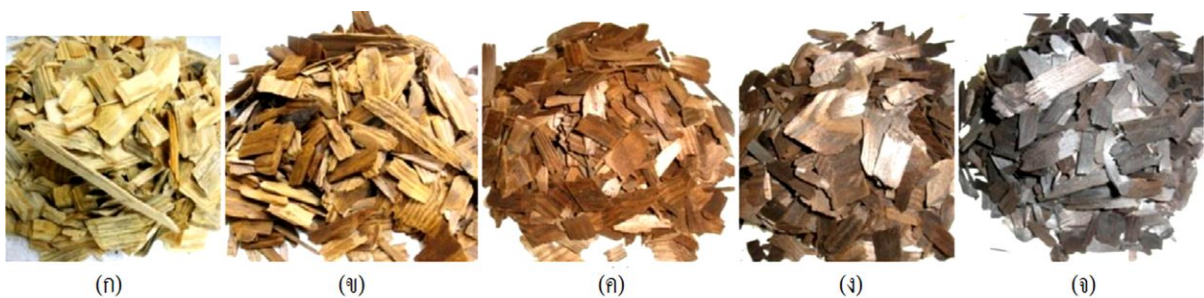
นั้นเป็นแบบโพลิโนเมียล ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัดส่วนพลังงานและค่าความร้อนสูงประกอบด้วย อุณหภูมิอบอย่าง เวลาและสื่อกลาง เช่นเดียวกับสัดส่วนมวล



รูปที่ 6 สัดส่วนมวลกับพลังงานของผลิตภัณฑ์ [23]



รูปที่ 7 สัดส่วนมวลและพลังงานของ oil palm kernel shell หลังการอบอย่างที่ 300 °C [19]



รูปที่ 8 ลักษณะทางกายภาพของไม้สนสับอบอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ

(ก) วัตถุดิบ (ข) 225°C (ค) 250°C (ง) 275°C (จ) 300°C [36]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของชีวมวลประเภทต่าง ๆ ก่อนและหลังการอบย่าง

Biomass	T(°C)	t(min)	FC	VM	SY	HHV	EF	EY	O/C	H/C	Ref.
Wheat straw											[37]
Raw			17.3	76.4		18.9	1.00		0.60	1.73	
Torrefied	250	30	15.6	77.0	82.6	19.8	1.05	86.2	0.54	1.48	
	270	30	26.5	65.1	71.5	20.7	1.10	78.2	0.48	1.36	
	290	30	38.0	51.8	55.1	22.6	1.20	65.8	0.37	1.19	
Leucaena											[32]
Raw			13.1	86.1		20.3	1.00		0.63	1.77	
Torrefied	200	30	14.0	85.3	86.5	21.0	1.04	90.3	0.59	1.65	
	250	30	16.9	82.2	73.0	21.2	1.04	76.2	0.57	1.45	
	275	30	24.9	73.8	54.5	22.8	1.12	61.2	0.48	1.15	
Pine											[36]
Raw			13.8	86.0		18.8	1.00		0.73	1.69	
Torrefied	225	30	15.0	84.8	81.0	21.2	1.13	92.0	0.67	1.47	
	275	30	23.3	76.4	70.0	22.0	1.17	82.0	0.52	1.36	
	300	30	40.9	58.7	52.0	26.4	1.41	72.0	0.35	1.05	
Spruce											[38]
Raw			14.6	85.2		20.3	1.00		0.64	1.48	
Torrefied	260	8	15.7	84.0	89.2	21.5	1.06	94.5	0.62	1.38	
	260	25	19.3	80.3	80.3	22.2	1.09	87.9	0.56	1.32	
	285	16.5	22.3	77.3	45.9	27.8	1.37	62.8	0.53	1.22	
Eucalyptus											[39]
Raw						18.4	1.00				
Torrefied	250	60	-	-	83.6	20.6	1.12	93.7	-	-	
	275	60	-	-	75.8	21.5	1.17	88.5	-	-	
	280	60	35.5	62.8	-	25.0	-	-	0.37	1.00	
	300	60	-	-	57.9	23.9	1.30	75.4	-	-	[40]
SPF shaving											[41]
Raw			6.8	93.0		18.1	1.00		0.67	1.49	
Torrefied	240	60	15.3	84.5	86.7	20.9	1.15	90.89	0.59	1.38	
	270	60	26.0	73.7	66.2	23.1	1.28	76.81	0.46	1.17	
	300	60	35.8	63.8	49.3	25.3	1.40	62.72	0.36	1.02	
	340	60	50.6	48.9	39.4	29.5	1.63	58.33	0.24	0.80	
Bamboo											[15,28]
Raw			17.8	80.1		18.7	1.00		0.75	1.64	
Torrefied	220	60	22.5	75.2	-	-	-	-	0.67	1.44	
	230	60	-	-	49.36	24.3	1.30	64.17	-	-	
	250	60	29.2	67.9	-	-	-	-	0.57	1.26	
	260	60	-	-	40.92	26.1	1.40	57.13	-	-	
	280	60	37.8	58.8	-	-	-	-	0.46	1.05	
	290	60	-	-	37.98	26.1	1.40	53.09	-	-	

หมายเหตุ : FC คือคาร์บอนคงตัว(wt% พื้นฐานแห้ง), VM คือสารระเหย(wt% พื้นฐานแห้ง), SY คือปริมาณของแข็ง(%), HHV คือค่าความร้อนสูง (MJ/kg), EF คืออัตราส่วนพลังงาน, EY คือปริมาณพลังงาน (%), O/C และ H/C คืออัตราส่วนอะตอมออกซิเจนต่อคาร์บอนและอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่อคาร์บอน(สัดส่วนอะตอมและพื้นฐานแห้ง)

3.3 ลักษณะของชีวมวลบ่งชี้

3.3.1 ลักษณะทางกายภาพทั่วไป

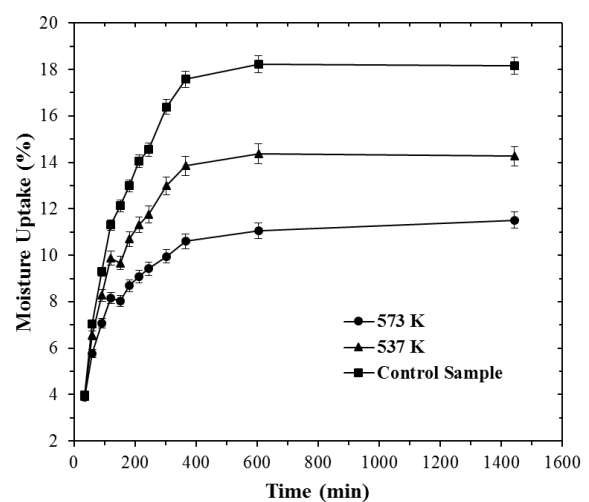
ลักษณะภายนอกที่แตกต่างกันและสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนของชีวมวลก่อนและหลังการอบแห้งคือสีของชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้งให้สูงขึ้นชีวมวลจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลไปเป็นสีดำ [42] ทั้งนี้เกิดจากองค์ประกอบเคมีภายในชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลง โดยผ่านปฏิกิริยาเมลลาร์ดและการสลายตัวของสีโดยสารแทรก [43] ดังนั้นสีของชีวมวลบ่งชี้ถึงเครื่องมือที่ได้อย่างหนึ่งที่ใช้แสดงถึงระดับของการอบแห้งหรือใช้คาดการณ์คุณสมบัติบางอย่างของชีวมวลหลังผ่านการเตรียมสภาพ เช่น Lam et al. [43] ใช้ค่าของสี (ความสว่าง ความเขียว/แดง และความน้ำเงิน/เหลือง) หลังชีวมวลถูกอบแห้งทำนายองค์ประกอบเคมี (คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน) ภายในชีวมวลบ่งชี้ โดยพบว่าค่า R^2 ของความสัมพันธ์มีค่ามากกว่า 0.97

3.3.2 ค่าความชื้นและพฤติกรรมดูดซับความชื้น

ค่าความชื้นเป็นสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่สำคัญเป็นลำดับต้น ๆ และจำเป็นจะต้องควบคุมให้มีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้นถูกนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากค่าความชื้นจะมีอิทธิพลต่อค่าความร้อน ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และคุณภาพการเผาไหม้ [44] นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ [6,45] ก่อปัญหาระหว่างการจัดเก็บและขนส่ง [12] ตัวอย่างเช่นเมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีค่าความชื้นสูงไปใช้ในการเผาไหม้จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเพื่อทำระเหยน้ำในเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง [45] โดยทั่วไปชีวมวลจะมีความชื้นอยู่ที่ 50 – 150 % พื้นฐานแห้ง แต่ค่าความชื้นที่เหมาะสมแก่การใช้งานด้านต่าง ๆ (การเผาไหม้ การไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน) อยู่ที่ 5 – 25 % พื้นฐานแห้ง ขึ้นกับการนำไปใช้ [45] อย่างไรก็ตามกระบวนการอบแห้งจะทำให้คุณสมบัติในแง่ดีขึ้นเพราะว่าในระหว่างกระบวนการจะทำให้ชีวมวลนั้นถูกทำแห้งอย่างสมบูรณ์ [23] จะสังเกตได้

จากการลดลงอย่างมากของค่าความชื้นหลังการอบแห้ง ซึ่งในระหว่างกระบวนการอบแห้งจะมีช่วงการทำแห้ง 2 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการทำระเหยของน้ำอิสระบนพื้นผิวชีวมวล ส่วนช่วงที่ 2 เป็นการทำแห้งโดยผ่านกระบวนการการขับน้ำออกจากเนื้อชีวมวล (dehydration)

นอกจากค่าความชื้นที่สร้างปัญหาระหว่างการจัดเก็บและขนส่งแล้ว พฤติกรรมดูดซับความชื้นของชีวมวลก็เช่นกัน พฤติกรรมดูดซับความชื้นของชีวมวลธรรมชาติมีแนวโน้มที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งพฤติกรรมนี้เกี่ยวข้องความสามารถแทรกซึมของน้ำเข้าสู่ผนังเซลล์ภายในชีวมวล [46] และความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) ของน้ำกับกลุ่ม OH ภายในชีวมวล โดยความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจนจะสูงมากในเฮมิเซลลูโลส รองลงมาจะเป็นเซลลูโลส เนื่องจากทั้ง 2 ส่วนนี้มีโครงสร้างที่สะดวกต่อการสร้างพันธะไฮโดรเจนและสัดส่วนของกลุ่ม OH ภายในองค์ประกอบสูงมาก [17] แต่เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการอบแห้งจะทำให้กลุ่ม OH ภายในชีวมวลถูกทำลายบางส่วน [23,46,47] ในระหว่างการทำแห้งช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการทำลายความสามารถการสร้างพันธะไฮโดรเจน นอกจากนั้นในระหว่างกระบวนการยังเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของกลุ่มโครงสร้างไม่อิ่มตัว ทำให้เกิดการ

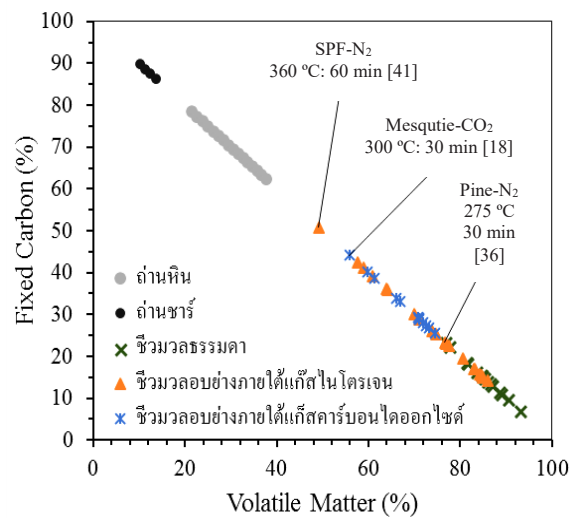


รูปที่ 9 พฤติกรรมดูดซับความชื้น [48]

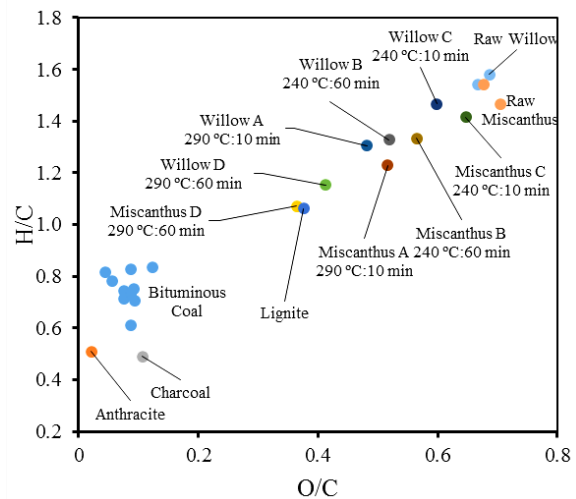
ป้องกันการสลายตัวทางชีวภาพ [23] และเกิดการควบแน่นของทาร์ภายในรูปพรุนของชีวมวล โดยกลุ่มที่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่และทาร์ [47] นั้นเป็นกลุ่มไม่มีขี้ ด้วยสาเหตุนี้ทำให้ความสามารถในการดูดความชื้นขึ้นจำกัดและส่งผลให้ชีวมวลอบย่างมีความชื้นสมดุลที่ต่ำกว่าชีวมวลธรรมชาติ เช่น รูปที่ 9 แสดงผลความสามารถการดูดซับน้ำ Yan et al. [46] ซึ่งให้เห็นการเปลี่ยนไปของค่าความชื้นสมดุลของชีวมวลที่ลดลงจาก 16 % เหลือ 9 % ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 84% เป็นต้น จึงถือได้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวแสดงถึงการกลายเป็นวัสดุไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ตัวอย่างเอกสารเพิ่มเติมที่ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมดูดซับความชื้น เช่น [17,34,48–50] โดยระดับการไม่ชอบน้ำแปรผันตรงกับระดับการอบย่าง

3.3.3 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบประมาณแสดงถึงสัดส่วนของสารที่ระเหยได้ในชีวมวล ซึ่งทั่วไปอยู่ในช่วง 60 – 80 % พื้นฐานเปียก ในขณะที่สัดส่วนคาร์บอนคงตัวของชีวมวลจะค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 10 – 20 % พื้นฐานเปียก [51] การที่เชื้อเพลิงมีสัดส่วนของสารระเหยสูงมากเช่นนี้จะทำให้การใช้งานในแง่ของการให้ความร้อนประสบกับปัญหาการเกิดเขม่าควันปริมาณสูง [47] และค่าความร้อนมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านหิน แต่กระบวนการอบย่างจะทำให้สัดส่วนของสารที่ระเหยได้ลดลงและทำให้คาร์บอนคงตัวในชีวมวลเพิ่มขึ้น โดยการลดลงของสารที่ระเหยได้และการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวเกิดจากกระบวนการปล่อยสารระเหยและปฏิกิริยาการบดในเซชัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างสารระเหยและคาร์บอนคงตัว (free ash and moisture) ดังรูปที่ 10 จะพบว่าเมื่อเพิ่มความรุนแรงของการอบย่างจะทำให้ค่าของคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นในรูปที่ 10 ยังแสดงถึงความแตกต่างระหว่างชีวมวลก่อนและหลังการอบย่าง ถ่านหิน และถ่านชาร์ด้วย ซึ่งจะเห็นว่าสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวในชีวมวลอบย่างจะเข้าใกล้ถ่านหินมากขึ้น เช่นกัน

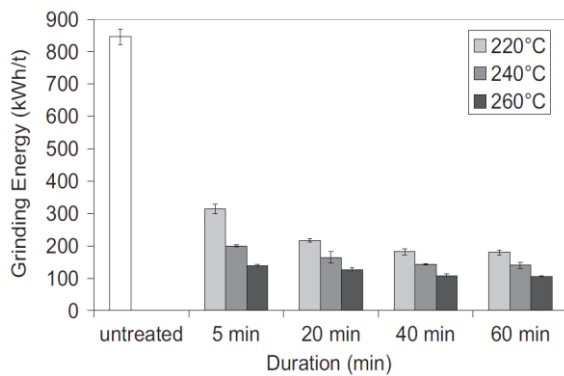


รูปที่ 10 การวิเคราะห์แบบประมาณ



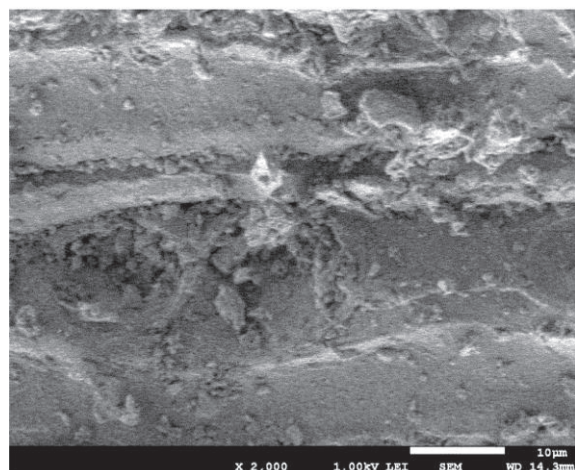
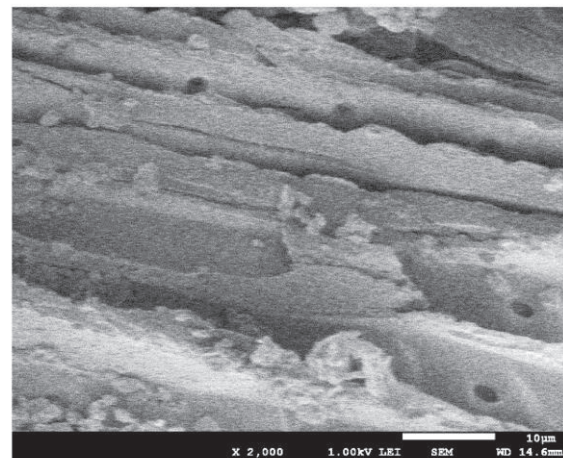
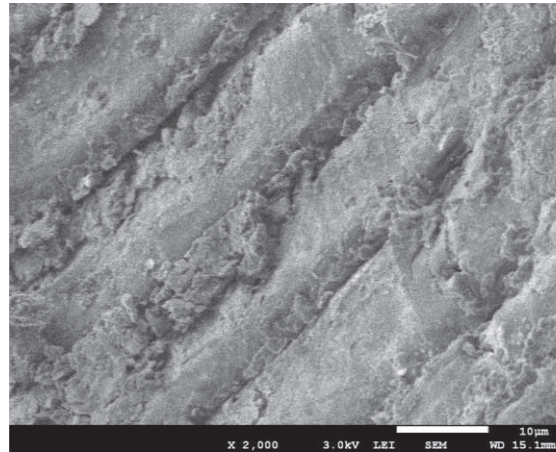
รูปที่ 11 แผนภาพ van Krevelen [6]

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวลแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนอะตอมทั้ง 3 องค์ประกอบหลัก ซึ่งถูกนำเสนอในแผนภาพ van Krevelen รูปที่ 11 กล่าวคือกระบวนการอบย่างส่งผลทำให้สัดส่วนอะตอม H และ O ลดลง ในทางตรงกันข้ามสัดส่วนอะตอม C จะเพิ่มขึ้น [21,34,39,46,50,52] ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เป็น ไอน้ำ, CO, และ CO₂ [6] ซึ่งโดยทั่วไปนั้นการเปลี่ยนแปลงนี้จะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาของการอบย่างสูงขึ้น และในกระบวนการนี้เองก็เป็นสาเหตุทำให้อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ลดลง



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบพลังงานในการบดของชีวมวล ก่อนและหลังอบแห้ง [53]

ซึ่งถือเป็นข้อดีเพราะจะทำให้ควันและไอน้ำที่ก่อตัวน้อยลง และระหว่างกระบวนการเผาไหม้กับแก๊สซัลไฟเรชั่นเกิดการสูญเสียความร้อนลดลง [6] นอกจากนั้นยังทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสลดความเป็นกรดลง [54] สำหรับแผนภาพ van Krevelen นอกจากจะแสดงการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนอะตอม C แล้วยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความรุนแรงของการอบแห้งจะทำให้อัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C ของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จะมีความใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์มากขึ้น [6] ซึ่งถ้าเราเปรียบเทียบสัดส่วนของอะตอม O, H, N, และ S ระหว่างชีวมวลอบแห้งกับถ่านหินจะพบว่าสัดส่วนของ N และ S ในชีวมวลอบแห้งจะต่ำกว่าถ่านหินมาก นั่นเป็นการบอกเป็นนัยว่าเมื่อใช้ชีวมวลอบแห้งเป็นเชื้อเพลิงค่าของมลพิษ NO_x และ SO_x ในไอเสียจะต่ำกว่าที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน นอกจากนั้นการอบแห้งยังส่งผลให้สัดส่วน N และ S ในชีวมวลอบแห้งลดลงอีกด้วย [55,56] ในขณะที่สัดส่วนของ O และ H ในชีวมวลยังสูงกว่าถ่านหิน ซึ่งเป็นเหตุทำให้ค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านหิน แต่อย่างไรก็ตามจากการ simulation ของ Spence[®] ชี้ให้เห็นว่าการใช้ชีวมวลอบแห้งร่วมกับถ่านหินไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของหม้อต้ม (boiler) ที่สัดส่วนการใช้ของชีวมวลอบแห้งสูง (มากกว่า 56 % โดยมวล) [57]



(ค)

รูปที่ 13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ก) ชีวมวลวัตถุดิบ, (ข) ชีวมวลอบแห้งภายใต้ CO_2 , (ค) ชีวมวลอบแห้งภายใต้ N_2 . [18]

3.3.4 การบดและการกระจายขนาด

ชีวมวลหลังจากผ่านการบดอย่างจะมีลักษณะที่เปาะเนื่องมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและการลดลงเล็กน้อยของระดับลิกนินและเซลลูโลส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบเหล่านี้เป็นเส้นใยทำให้เกิดข้อจำกัดในระบบการลดขนาดแบบเก่า แต่เมื่อชีวมวลผ่านการบดอย่างเส้นใยที่เหนียวส่วนใหญ่จะถูกทำลายลง [36] และชีวมวลบดอย่างมีความพรุนเพิ่มขึ้น [18] เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลธรรมชาติ การบดชีวมวลบดอย่างในก้อนบดจะใช้พลังงานลดลงมากถึง 70-90% [23] หรือ 50-85% [58] ของแบบธรรมชาติ ดังจะสังเกตได้จากรูปที่ 12 และกำลังการผลิตจะเพิ่มขึ้นถึง 2 - 6.5 เท่า [57,58] แต่อย่างไรก็ตามความสามารถทางการบดจะดีขึ้นมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการบด เทคนิคการบด ชนิดของเครื่องบด เงื่อนไขของการบด และลักษณะของชีวมวลด้วยตัวอย่างเงื่อนไขที่เกี่ยวข้องกับความสามารถทางการบดคือสื่อกลางที่ใช้ในการบด โดยพบว่าเมื่อใช้สื่อกลางที่เป็น CO₂ จะทำให้ความสามารถของการบดดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ N₂ [18] สังเกตจากรูปที่ 13 ซึ่งเป็นภาพที่ได้จากการวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความพรุนเมื่อบดอย่างภายใต้ CO₂ โดยการเพิ่มขึ้นของความพรุนนี้เกิดจากปฏิกิริยา Boudouard [18] สำหรับการเพิ่มขึ้นของความพรุนสามารถสังเกตได้จากการการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและการลดลงของสารที่ระเหยได้ ซึ่งทั้งนี้เป็นเพราะว่ามีก๊าซออกของสารที่ระเหยได้จากรูพรุนที่เกิดขึ้น [18]

การกระจายขนาดของชีวมวลบดอย่างหลังการบด จากการศึกษาของ Shang [46] แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิของการบด โดยพบว่าที่อุณหภูมิอบอย่าง 230 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของอนุภาคขนาดเล็ก ($\phi < 1$ มิลลิเมตร) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอบอย่างส่งผลให้การลดลงอย่างรวดเร็วของอนุภาคขนาดใหญ่ ($\phi > 2$ มิลลิเมตร) และ Eseltine et al. [20] แสดงความแตกต่างของการใช้ก๊าซตัวกลางในการ

อบอย่างต่อการกระจายอนุภาคพบว่าขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 840 ไมโครเมตร มีมากถึง 40.2 % ใน CO₂ ตรงกันข้ามกับ N₂ ที่มีเพียง 20 % เท่านั้น

3.4 แบบจำลองจลนศาสตร์การบด

มีแบบจำลองมากมายที่ใช้อธิบายพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล ซึ่งในแต่ละแบบจำลองก็จะมีระดับความแม่นยำที่ต่างกันออกไป ในระหว่างกระบวนการสลายตัวของชีวมวลนั้นสามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ เนื่องมาจากความสัมพันธ์กันของการถ่ายเทความร้อนและการเกิดปฏิกิริยารวม โดยลักษณะแรกถูกเรียกว่า chemical regime คือเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนในชีวมวลสูงมากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยารวมทำให้กระบวนการแปลงสภาพทางความร้อนถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี ในทางกลับกันลักษณะที่สอง ablation regime จะถูกควบคุมโดยการถ่ายเทความร้อน ซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยารวมและก่อให้เกิดเกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายในชีวมวล ดังนั้นเวลาในการสลายตัวของชีวมวลจะขึ้นอยู่กับทั้งพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและปฏิกิริยาเคมี [59] สำหรับการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้เงื่อนไข chemical regime [51] และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของชีวมวลถูกพิจารณาเป็นกลุ่มก้อน (lumping product) ดังอธิบายในหัวข้อที่ 3

ความแตกต่างกันของข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการศึกษาต่าง ๆ เกิดจากลักษณะการทดลอง (isothermal, dynamic) เงื่อนไขการทดลอง (อุณหภูมิ, เวลา, อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ) คุณลักษณะทางกายภาพของชีวมวล (ค่าความชื้นเริ่มต้น, ขนาดอนุภาค) องค์ประกอบภายในชีวมวล (เฮมิเซลลูโลส, เซลลูโลส, และลิกนิน) และระยะเวลาของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์ มีความแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม Di Blasi [59] ได้แบ่งลักษณะการสลายตัวทางความร้อนออกเป็น 3 แบบ คือ

ตารางที่ 3 ปัจจัยทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองหนึ่งขั้นตอนปฏิกิริยารวม

Biomass	Conditions	Order	A (min ⁻¹)	Ea (kJ/mol)	Ref.
Beech Sawdust	177-327 °C	1	3.18×10 ⁻¹	18.00	[59]
Wood	48-447 °C	1	6.00×10 ⁹	125.40	[59]
Corn Cob	TGA, 100-800 °C, 30 K/min	1	3.84×10 ⁻¹	27.64	[60]
Pine Wood	TGA, 280-400 °C, 30 K/min	1	8.40×10 ¹¹	150.00	[61]
Oak	Tube Furnace, 300-400 °C	1	1.48×10 ⁸	106.50	[62]
Forest	TGA, 225-325 °C, 2 K/min	1	4.61×10 ⁹	124.87	[63]
Furniture	TGA, 225-325 °C, 2 K/min	1	5.52×10 ¹⁰	135.76	[63]
Spruce	TGA, 127-527 °C, 100 K/min	1	3.47×10 ⁴	68.40	[64]
Sewage	TGA, 127-527 °C, 100 K/min	1	8.95×10 ¹	45.30	[64]
Bagasse	TGA, 200-400 °C, 5 K/min	0.71	4.60×10 ¹³	78.05	[65]
Coir Pith	TGA, 200-400 °C, 5 K/min	1.71	2.45×10 ¹³	72.43	[65]
Groundnut Shell	TGA, 200-400 °C, 5 K/min	0.88	1.28×10 ¹²	64.15	[65]
Casuarina	TGA, 200-400 °C, 5 K/min	0.60	6.24×10 ¹⁰	51.65	[65]
Palm Shell	TGA, 25-600 °C, 5 K/min	1.02	4.47×10 ⁵	54.10	[66]
	TGA, 25-600 °C, 10 K/min	1.07	5.84×10 ⁵	54.80	
	TGA, 25-600 °C, 20 K/min	0.98	6.72×10 ⁵	55.20	
	TGA, 25-600 °C, 30 K/min	1.04	8.16×10 ⁵	55.30	

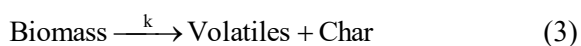
(1) แบบจำลองหนึ่งขั้นตอนปฏิกิริยารวม คือแบบจำลองที่อธิบายการสลายตัวของชีวมวลวัตถุดิบในรูปแบบขั้นตอน ซึ่งจะได้ออกมาจากการวัดมวลของชีวมวลวัตถุดิบที่สูญเสียไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว โดยแบบจำลองนี้จะใช้คาดการณ์เวลาของกระบวนการแต่ไม่สามารถใช้คาดการณ์สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่จะได้ภายใต้เงื่อนไขปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ [67]

(2) แบบจำลองหนึ่งขั้นตอนหลายปฏิกิริยา คือแบบจำลองที่อธิบายการสลายตัวของชีวมวลวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์ ชาร์, ทาร์, และก๊าซ แยกออกจากกัน โดยสร้างจากปฏิกิริยาหนึ่งขั้นตอน

(3) แบบจำลองสองขั้น กึ่งปฏิกิริยารวม คือแบบจำลองที่ต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาหลักและปฏิกิริยารองของการสลายตัว

3.4.1 แบบจำลองหนึ่งขั้นตอนปฏิกิริยารวม

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ง่ายสามารถใช้อธิบายการสลายตัวของชีวมวลไปเป็นชาร์และสารระเหย โดยจะเหมาะสมกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ [60] ซึ่งแบบจำลองแสดงได้เป็น:



สมการควบคุมของแบบจำลอง (3) สำหรับปฏิกิริยาลำดับที่ n คือ

$$\frac{da}{dt} = k(1-a)^n \quad (4)$$

เมื่อ α เป็นตัวแทนของมวลของชีวมวลที่ถูกแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ และ k คือค่าคงที่ตามกฎของอัตราในความสัมพันธ์ของ Arrhenius ซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้ภายใต้เงื่อนไข chemical regime และการเกิดปฏิกิริยาระยะที่หนึ่ง [59] โดยควบคุมผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซให้อยู่ภายในเตาปฏิกรณ์เพียงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น เพื่อป้องกันการเกิดกระบวนการแตกตัว (cracking) ต่อเนื่องและการลดลงต่อเนื่องของระดับพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระยะที่สอง

ตารางที่ 3 แสดงปัจจัยจลนศาสตร์ที่ได้ของแบบจำลอง อย่างไรก็ตามแบบจำลอง 3 อาจจะยังไม่เหมาะสมสำหรับการอธิบายกระบวนการอบแห้ง ทั้งนี้เป็นเพราะว่ายังมีความหยาบเกินไป [9] และจะใช้ได้ดีเฉพาะการอบแห้งเวลานาน ๆ เท่านั้น

ตารางที่ 4 ปัจจัยทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองหนึ่งชั้นหลายปฏิกิริยา

Biomass	C_j	$A \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$E_a \text{ (kJ/mol)}$	Ref.
Pine Wood				[68]
Hemicellulose	0.276	3.16×10^7	88.4	
Cellulose	0.400	6.83×10^{16}	201.0	
Lignin	0.324	9.42×10^{-1}	18.1	
Eucalyptus Wood				[68]
Hemicellulose	0.332	5.20×10^6	79.4	
Cellulose	0.423	6.38×10^{16}	201.0	
Lignin	0.245	1.46	20.2	
Pine Bark				[68]
Hemicellulose	0.394	2.44×10^3	48.5	
Cellulose	0.158	6.83×10^{16}	201.0	
Lignin	0.448	7.37×10^{-1}	20.4	
Alder				[69]
Hemicellulose	0.310	3.15×10^8	100.0	
Cellulose	0.430	2.28×10^{19}	236.0	
Lignin	0.090	2.39×10^2	46.0	
Beech				[69]
Hemicellulose	0.340	2.56×10^8	100.0	
Cellulose	0.390	2.28×10^{19}	236.0	
Lignin	0.100	2.39×10^2	46.0	
Pine				[70]
C_1	0.263	7.20×10^9	115.0	
C_2	0.704	2.58×10^{18}	225.0	
Fir				[71]
C_1	0.250	1.80×10^9	110.0	
C_2	0.722	7.80×10^{19}	241.0	
Spruce				[71]
C_1	0.200	1.74×10^{12}	140.0	
C_2	0.775	1.08×10^{15}	187.0	
Pine Bark				[71]
C_1	0.179	8.40×10^5	66.0	
C_2	0.672	6.60×10^6	97.5	

3.4.2 แบบจำลองหนึ่งชั้นหลายปฏิกิริยา

แบบจำลองนี้ถูกนำมาใช้เนื่องจากการสังเกตลักษณะการสลายของ 3 องค์ประกอบหลักที่มีช่วงอุณหภูมิต่างกัน ซึ่งแสดงถึงมีความเป็นไปได้ที่การสลายตัวของชีวมวลจะเกิดจากการรวมกันของการสลายตัวแบบเชิงเส้นของทั้ง 3 องค์ประกอบหลักนั้น โดยสามารถแสดงอัตราการผลิตปฏิกิริยารวมได้เป็น :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = - \sum_{j=1}^m C_j \frac{\partial \omega_j}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial t} = k_j (1 - \omega_j)^{n_j} \quad (6)$$

เมื่อ C_j คือสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ j และ ω_j คือสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบ j ที่ถูกแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ โดย Orfao et al. [68] ศึกษาจลนศาสตร์ของไม้สน ไม้ยูคาลิปตัสและเปลือกไม้สน โดยมองว่า j คือ เฮมิเซลลูโลส, เซลลูโลส, และลิกนิน แต่ Parthasarathy et al. [65] ศึกษาจลนศาสตร์ของชานอ้อย แก่นมะพร้าว เปลือกถั่วลิสง และสนทะเล โดยให้ j คือ ความชื้น, เฮมิเซลลูโลส – เซลลูโลส, และลิกนิน ซึ่งปัจจัยทางจลนศาสตร์แสดงในตารางที่ 4 ในขณะเดียวกันบางกลุ่มของผู้ศึกษาอาจให้ j มีแค่ 2 องค์ประกอบเท่านั้น เช่น Peng et al. [48] กำหนดให้ j คือกลุ่มที่เกิดปฏิกิริยา

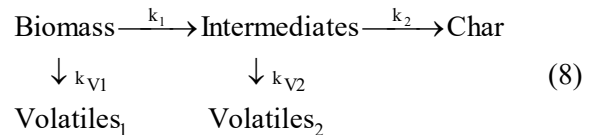
ไว้กับกลุ่มที่เกิดปฏิกิริยาปานกลาง และถ้าสมมติให้ปฏิกิริยาเป็นลำดับที่ 1 ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ จะได้

$$\alpha = (1 - C_1 - C_2) + C_1 e^{-k_1 t} + C_2 e^{-k_2 t} \quad (7)$$

เมื่อ C_1 และ C_2 คือสัดส่วนขององค์ประกอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ตัวอย่างปัจจัยทางจลนศาสตร์แสดงในตารางที่ 4 สำหรับแบบจำลองแบบนี้จะมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และใช้เวลาในกระบวนการสั้น [12]

3.4.3 แบบจำลองสองขั้นกึ่งปฏิกิริยารวม

แบบจำลองนี้ถูกใช้โดย Várhegyi et al. [72] เพื่ออธิบายการสลายตัวของไซแลนเนื่องจากพวกเขาพบว่าแบบจำลองนี้มีความสอดคล้องที่ดีมากกับข้อมูลของพวกเขาเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ซึ่งแบบจำลองนี้เองจะสามารถคาดการณ์สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เงื่อนไขปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้ ซึ่งต่างจากทั้งสองแบบจำลองข้างต้น นอกจากนั้นยังมีการใช้แบบจำลองในลักษณะคล้ายกันเพื่ออธิบายการสลายตัวของความร้อนของไม้ [73] กลไกของแบบจำลองสองขั้นกึ่งปฏิกิริยารวมนี้สามารถแสดงได้เป็น:



สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลอง (8) คือ

$$\frac{d[A]}{dt} = -(k_B + k_{V1})[A] \quad (9)$$

$$\frac{d[B]}{dt} = k_B[A] - (k_C + k_{V2})[B] \quad (10)$$

$$\frac{d[C]}{dt} = k_C[B] \quad (11)$$

เมื่อ $[A]$ คือมวลของ xylan, $[B]$ คือ Intermediate compound เป็นของแข็งที่แสดงการลดระดับลงของพอลิเมอร์, $[C]$ คือของแข็งที่เหลืออยู่, k คือค่าคงที่อัตราของแต่ละขั้นตอน, $[V1]$ และ $[V2]$ คือมวลของสารระเหย ตัวอย่างข้อมูลปัจจัยทางจลนศาสตร์แสดงในตารางที่ 5 โดยทั่วไปพบว่าในขั้นแรกจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่าขั้นที่สอง [9,35] สำหรับเวลาที่ใช้แบ่งระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขั้นแรกกับขั้นสองนี้ถูกนำเสนอในเทอม demarcation time ซึ่งแสดงถึงเวลาที่ปฏิกิริยาขั้นแรกสิ้นสุดและปฏิกิริยาขั้นที่สองเริ่มต้น [9]

ตารางที่ 5 ปัจจัยทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองสองขั้นกึ่งปฏิกิริยารวม

Biomass	Conditions	k_j	$A \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$E_a \text{ (kJ/mol)}$	Ref.
Willow	TGA, 230-300 °C	k_1	1.40×10^6	75.90	[9]
		k_{V1}	1.99×10^9	114.20	
		k_2	6.60×10^{11}	151.70	
		k_{V2}	9.57×10^{11}	151.70	
Xylan	Tube Furnace, 200-340 °C	k_1	1.04×10^6	15.82	[74]
		k_{V1}	1.99×10^8	21.86	
		k_2	2.00×10^4	13.47	
		k_{V2}	3.52×10^3	12.57	
Wood Chipes	TGA, 250-300 °C	k_1	4.63×10^3	46.85	[35]
		k_{V1}	1.61×10^{10}	122.11	
		k_2	6.00×10^{-4}	0.01	
		k_{V2}	3.45×10^6	94.39	
Wood	Tube Furnace, 255-435 °C	k_A^*	1.61×10^6	76.20	[73]
		k_B^{**}	3.55×10^{11}	142.80	

หมายเหตุ : $*k_A = k_1 + k_{V1}$ และ $**k_B = k_2 + k_{V2}$

4. การนำไปใช้ประโยชน์

4.1 การอัดเม็ด

การอัดเม็ดเป็นกระบวนการใช้แรงเชิงกลกดอัดชีวมวลทำให้ชีวมวลมีลักษณะเป็นเม็ด มีความสม่ำเสมอของรูปร่างและขนาดมากขึ้น [75] โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเรียกว่า แท่ง (briquettes) หรือเม็ด (pellets) [76] ซึ่งเทคโนโลยีนี้ถูกใช้เพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงมวลและพลังงานให้แก่ชีวมวลจาก 80 – 200 kg/m³ ไปเป็น 500 – 1200 kg/m³ และ 5 – 8 GJ/m³ ไปเป็น 8 – 11 GJ/m³ ตามลำดับ [24,77] ส่งผลให้การจัดการ การเก็บรักษา และการขนส่ง ของชีวมวลอัดเม็ดง่ายขึ้น และประหยัดค่าใช้จ่ายอย่างมากเมื่อเทียบกับชีวมวลธรรมดา [31,41,71] แต่ชีวมวลอัดเม็ดก็ยังประสบปัญหาในระหว่างการนำไปใช้งาน เช่น มีความไวต่อการดูดซับความชื้น เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ [21] อัตราส่วนของ O/C กับ H/C สูง [78] และประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ต่ำ ดังนั้นชีวมวลอัดเม็ดจึงมีความน่าสนใจเพราะว่าในกระบวนการอบแห้งสามารถกำจัดปัญหาที่เกิดขึ้นกับชีวมวลอัดเม็ดดังกล่าวข้างต้นได้ ทำให้ชีวมวลอัดเม็ดได้รับการพิจารณาเป็นชีวมวลอัดเม็ดรุ่นที่สอง (2nd generation of biomass pellets) ซึ่งมีศักยภาพสูงสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนถ่านหิน [49] ในการผลิตความร้อนของโรงไฟฟ้าความร้อนและโรงถลุงเหล็กได้นอกจากนั้น Peng [79] ศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของชีวมวลอัดเม็ดเทียบกับชีวมวลอัดเม็ดธรรมดา ซึ่งพบว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดของกระบวนการผลิตชีวมวลอัดเม็ดโดยรวมทั้งค่าจัดเก็บและขนส่งจากแคนาดาสู่ยุโรปจะถูกกว่าชีวมวลอัดเม็ดธรรมดา กล่าวคือจาก 8.60 \$/GJ ของชีวมวลอัดเม็ดธรรมดาลดลงเหลือ 7.59 \$/GJ ของชีวมวลอัดเม็ด ทั้งนี้เหตุผลหลักก็เพราะว่าค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บและขนส่งของชีวมวลอัดเม็ดนั้นถูกกว่าแบบธรรมดา

สำหรับกระบวนการอัดเม็ดนั้นเป็นที่ทราบกันดีว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการอัดเม็ดประกอบด้วย ขนาดชีวมวล, ค่าความชื้นชีวมวล, อุณหภูมิชีวมวล, ขนาดกับ

รูปร่างหัวอัด, ความเร็วการอัด, และอุณหภูมิหัวอัด [80] ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเปรียบเทียบคุณภาพและความสะดวกของการอัดเม็ดระหว่างชีวมวลธรรมดา กับชีวมวลอัดเม็ด ซึ่งเบื้องต้นได้ข้อสรุปว่าการอัดเม็ดชีวมวลอัดเม็ดยากกว่าอัดเม็ดชีวมวลธรรมดา และถ้าหากต้องการคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหมือนกันชีวมวลอัดเม็ดต้องใช้อุณหภูมิกับความดันที่สูงกว่าหรืออาจมีตัวประสานเข้าร่วมในกระบวนการด้วย [41,49] ส่งผลให้การอัดเม็ดชีวมวลอัดเม็ดต้องใช้พลังงานที่มากขึ้น ดังนั้นจึงเกิดการเปรียบเทียบความเหมาะสมของกระบวนการอัดเม็ดควรอยู่ก่อนหรือหลังกระบวนการอบแห้ง ซึ่งอาจมองได้หลายแง่มุม เช่น Peng et al. [70] กล่าวว่ากระบวนการอบแห้งชีวมวลที่ถูกอัดเม็ดจะทำให้ความแข็งแรงของชีวมวลอัดเม็ดกับค่าความหนาแน่นพลังงานต่อปริมาตรลดลง ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการจัดการและการขนส่งทางไกลเพราะจะทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม Ghiasi et al. [49] กล่าวว่ากระบวนการอบแห้งชีวมวลอัดเม็ดมีความเหมาะสมในแง่ของการใช้พลังงาน กล่าวคือกระบวนการอบแห้งชีวมวลอัดเม็ดจะต้องใช้พลังงานที่ต่ำกว่าโดยพวกเขาให้เหตุผลว่าตลอดกระบวนการทำชีวมวลอัดเม็ดในขั้นตอนการทำแห้งนั้นจะใช้พลังงานที่สูงถ้าอบแห้งก่อนการอัดเม็ด อย่างไรก็ตามคำตอบที่เหมาะสมของคำถามนี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการนำชีวมวลอัดเม็ดไปใช้ประโยชน์

4.2 ไฟโรไลซิส

ออรอน คัมสัคคี และคณะ [54] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสมบัติน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสพบว่ากระบวนการอบแห้งทำให้ปริมาณออกซิเจนในชีวมวลอัดเม็ดลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สมบัติของน้ำมันชีวภาพดีขึ้น เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่มากเกินไปในวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ ค่าความหนืดสูง ไม่มีความเสถียร และไม่สามารถผสมกับน้ำมันชนิดอื่นได้นอกจากนั้นการอบแห้งยังทำให้ถ่านชาร์ที่ได้หลังกระบวนการไพโรไลซิสมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ค่าความร้อนและพื้นที่ผิวสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Chen et

al. [81] และ Ren et al. [82] ที่พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้นถ้าอย่างชีวมวลก่อนการไพโรไลซิส โดยพวกเขาให้เหตุผลว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลอย่างนั้นจะมีน้ำเป็นส่วนผสมที่ต่ำ กล่าวคือสัดส่วน 62.3 % น้ำหนักของน้ำในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชีวมวลธรรมชาติลดลงเหลือ 37.5 % น้ำหนักของน้ำที่ได้จากชีวมวลอย่าง 280 °C ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มจาก 9.95 MJ/kg เป็น 14.93 MJ/kg และน้ำมันชีวภาพยังลดความเป็นกรดลงอีกด้วย [54,83] ซึ่งเป็นผลมาจากการลดสัดส่วนลงของกรดอะซิติกในน้ำมันชีวภาพ นอกจากนั้นก๊าซที่ได้จากการไพโรไลซิสยังมีปริมาณมีเทนกับไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งมาพร้อมกับการลดปริมาณลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ Meng et al.[84] กล่าวสรุปว่ากระบวนการอย่างมีศักยภาพช่วยเพิ่มคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ และกล่าวอีกว่าศักยภาพของน้ำมันชีวภาพอาจจะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตสารฟีนอลได้ด้วย

4.3 แกสซิฟิเคชัน

แกสซิฟิเคชันคือกระบวนการแปลงสภาพชีวมวลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิง ปัญหาทั่วไปที่ปัจจุบันกระบวนการแกสซิฟิเคชันยังประสบคือค่าความชื้นกับอัตราส่วนอะตอม C/H ของชีวมวลวัตถุดิบที่สูง ทำให้เกิด over-oxidize นำไปสู่การสูญเสียทางเทอร์โมไดนามิก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิที่เหมาะสมของการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงต่ำกว่า 700 °C ดังนั้นการออกแบบจึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการแกสซิฟิเคชันเนื่องจากกระบวนการอย่างช่วยลดค่าความชื้นกับอัตราส่วนอะตอม C/H ในชีวมวลให้น้อยลง ซึ่งทำให้การสูญเสียทางเทอร์โมไดนามิกน้อยลงด้วย [33] Couhert et al. [85] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิอย่างต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอย่างจะทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น กล่าวคือ จากการวิเคราะห์แบบประมาณแสดงให้เห็นว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันชีวมวลอย่างจะมีสัดส่วนของ H₂ กับ CO สูงกว่าก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้

จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันชีวมวลธรรมดาถึง 7 % และ 20 % ตามลำดับ ขณะที่สัดส่วนของ CO₂ ของทั้งสองที่มานั้นเท่ากัน นอกจากนั้นการออกแบบยังทำให้กระบวนการแกสซิฟิเคชันผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้มากขึ้นด้วย [86] Chen et al. [87] ทำการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลธรรมดา ชีวมวลอย่างและถ่านหิน พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบเย็น (cold gasification efficiency) ของชีวมวลอย่างสูงกว่าชีวมวลธรรมดาถึง 88 % และเมื่อเปรียบเทียบชีวมวลอย่างกับถ่านหินจะพบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก Prins et al. [33] กล่าวสรุปว่าการออกแบบมีความเป็นไปได้ที่จะใช้เพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น

5. มาตรฐานสากลสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล

คณะกรรมการเทคนิคองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน 238 (ISO/TC 238) [88] ร่างมาตรฐานสินค้าระหว่างประเทศสำหรับชีวมวลอย่างอัดเม็ดและอัดแท่ง ที่ทำจากไม้และไม้ไผ่ (พืชอุตสาหกรรม) เริ่มตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2013 และจะตีพิมพ์ในยุโรปเป็นมาตรฐาน EN ISO 17225-8 “Graded thermally treated and densified biomass fuels” ภายในธันวาคม 2015 โดยการแปลงสภาพทางความร้อนประกอบด้วยการอบแห้ง, การใช้ไอน้ำบำบัด กระบวนการทำถ่านแบบไฮโดรเทอร์มอล และการทำคาร์ริง ซึ่งในมาตรฐานนี้จะรวมถึงระดับด้านคุณภาพที่ใช้สำหรับในอุตสาหกรรมและอื่น ๆ (เช่น ใช้ในครัวเรือน) ด้วย

สำหรับการแบ่งข้อกำหนดของวัตถุดิบสามารถแบ่งประเภทได้เป็น 2 ชนิด คือ TW หมายถึงวัตถุดิบมาจากไม้ และ TA หมายถึงวัตถุดิบที่มาจากพืชอุตสาหกรรม โดยแต่ละข้อกำหนดของวัตถุดิบก็จะมี 3 ลำดับชั้น ดังนี้ TW1, TW2, และ TW3 เป็นของ TW ส่วน TA1, TA2, และ TA3 เป็นของ TA ซึ่งแต่ละลำดับชั้นจะประกอบด้วยคุณสมบัติของ แหล่งที่มา ขนาดมิติของเชื้อเพลิง ค่าความชื้น ค่าความแข็งแรงเชิงกล ปริมาณผงฝุ่น ปริมาณสารเติมแต่ง ค่าความร้อน ความหนาแน่น ปริมาณคาร์บอน

ไนโตรเจน กำมะถัน คลอรีน สารหนู แคลเซียม โครเมียม ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล สังกะสี สารระเหยได้ และ พฤติกรรมการหลอมตัวของขี้เถ้า ความแตกต่างหลักของ TW1, TW2, และ TW3 จะเป็นปริมาณของไนโตรเจน คลอรีนและขี้เถ้า โดย TW1 จะมีสัดส่วนน้อยที่สุดและ เพิ่มขึ้นตามลำดับ คล้ายกันกับ TA1, TA2, และ TA3 แต่ ใน TA1, TA2, และ TA3 จะ ไม่แตกต่างกันมากใน สัดส่วนของคลอรีน นอกจากนั้นยังมีการจำแนกประเภท การอัดเป็น 2 ประเภท คือ การอัดเม็ดและการอัดแท่ง โดย ทั้งสองประเภทก็จะประกอบด้วยข้อกำหนดและลำดับขั้น ดังกล่าวข้างต้น

6. สรุป

การอบย่างถือเป็นเทคนิคที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่ม คุณภาพชีวมวล หรือเตรียมชีวมวลก่อนเข้ากระบวนการ แปลงสภาพทางเคมีความร้อนอื่น ๆ ซึ่งศักยภาพของ กระบวนการอบย่างประกอบด้วย การเพิ่มค่าความร้อนของ ชีวมวล การเพิ่มความหนาแน่นเชิงความร้อน การเพิ่ม ความสามารถในการจัดเก็บและขนส่ง การลดพลังงานใน กระบวนการลดขนาด การลดอัตราส่วนของ O/C กับ H/C ช่วยให้ประสิทธิภาพกับคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิง จากกระบวนการแกสซิฟิเคชันสูงขึ้น และช่วยเพิ่มคุณภาพ ของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสให้ดีขึ้น นอกจากนั้นประยุกต์ใช้การอบย่างร่วมกับการอัดเม็ดก็จะ ได้ชีวมวลอัดเม็ดรุ่นที่สอง ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้ ทดแทนถ่านหินในโรงไฟฟ้าและโรงถลุงเหล็ก ถึงแม้ว่า การอัดเม็ดชีวมวลอย่างจะยุ่งยากกว่าชีวมวลธรรมดา ก็ตาม แต่หากมองในแง่ทางเศรษฐศาสตร์จะพบว่าชีวมวล อบย่างอัดเม็ดจะมีความเหมาะสมมากกว่าถ้าระยะทางการ ขนส่งมีนัยสำคัญ

ชีวมวลโดยทั่วไปประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิ เซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งทั้งสามองค์นี้เป็นสาเหตุหลักของ พฤติกรรมทางความร้อนที่แตกต่างกันของชีวมวลแต่ละ ชนิด โดยพฤติกรรมทางความร้อนถูกแยกออกเป็นช่วงการ สลายตัวได้ 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงทำแห้ง ช่วงแตกตัวของ

พอลิเมอร์ และช่วงการปล่อยสารระเหย สำหรับ กระบวนการอบย่างนั้นจะเกิดการสลายตัวทางความร้อน ใน ส่วนของเฮมิเซลลูโลสมากที่สุดเมื่อเทียบกับ องค์ประกอบทั้ง 2 องค์ประกอบที่เหลือ ซึ่งส่งผลให้ สัดส่วนของคาร์บอนในชีวมวลอบย่างเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า ความร้อนของชีวมวลอบย่างสูงขึ้นและอัตราส่วนของ O/C กับ H/C ลดลง นอกจากนั้นชีวมวลอบย่างจะมีระดับ ความเหนียวลดลงจึงง่ายต่อการลดขนาด และกระบวนการ อบย่างยังสามารถจำกัดความสามารถให้การดูดซับน้ำของ ชีวมวลอบย่างได้อีกด้วย จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในด้านการจัดการและขนส่ง

การศึกษาจลนศาสตร์ของการอบย่างเป็นเครื่องมือ สำคัญสำหรับวิศวกรเพื่อใช้ในช่วงกระบวนการ ออกแบบเตาปฏิกรณ์พร้อมทั้งกระบวนการผลิต และมี ประโยชน์อย่างมากในการทำนายคุณภาพของชีวมวลหลัง ผ่านการอบย่างเพราะว่าคุณสมบัติบางอย่างของชีวมวลอบ ย่างจะมีความสัมพันธ์กับแบบแปรผันตรงกับระดับการอบ ย่างซึ่งถูกนำเสนอโดยมวลที่สูญหายไป ตัวอย่างเช่น ค่า ความร้อน และความสามารถในการดูดซับน้ำ เป็นต้น ซึ่ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 แบบเกิดจากความต่างกัน ของสมมุติฐานตั้งต้นของกลไกการเกิดปฏิกิริยา สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอบย่างแต่ละ แบบก็จะให้ระดับความแม่นยำที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการดำเนินการอบย่างและความ โกล่เกลี่ยกันของกลไกการเกิดปฏิกิริยาจริงและแบบจำลอง

การนำกระบวนการอบย่างไปใช้ประโยชน์ร่วมกับ กระบวนการแปลงสภาพอื่น ๆ จะทำให้ประสิทธิภาพของ กระบวนการนั้นสูงขึ้น เช่น ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ เชื้อเพลิงแบบเย็นของชีวมวลอบย่างสูงขึ้นถึง 88 % [87] เทียบกับชีวมวลธรรมดา เมื่อใช้การอบย่างร่วมกับกระบวนการ แกสซิฟิเคชัน หรือเพิ่มคุณภาพของน้ำมันชีวภาพจาก กระบวนการไพโรไลซิสทำให้ค่าความร้อนเพิ่มจาก 9.95 MJ/kg เป็น 14.93 MJ/kg [82] และมีความสะดวกใน การจัดการและการขนส่งมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับการอัดเม็ด สังเกตได้จาก 8.60 \$/GJ ของชีวมวลอัดเม็ดธรรมดา

ลดลงเหลือ 7.59 \$/GJ ของชีวมวลอบย่างอัดเม็ด [79] เป็นต้น ในปัจจุบันการศึกษาผลของการอบย่างต่อกระบวนการแปลงสภาพทางเคมีความร้อนต่าง ๆ มีอยู่อย่างกว้างขวาง แต่ยังอยู่ระดับของการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

นอกจากนั้นปัจจุบันคณะกรรมการเทคนิคองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน 238 (ISO/TC 238) ทำการร่างมาตรฐานสินค้าชีวมวลอบย่างอัดเม็ดและอัดแท่งที่ครอบคลุมการแปลงสภาพทางความร้อนต่าง ๆ ประกอบด้วย การอบย่าง การใช้ไอน้ำบำบัด กระบวนการ

ทำถ่านแบบไฮโดรเทอร์มอล และการทำชาร์ริง ซึ่งคาดว่าจะตีพิมพ์ในยุโรปเป็นมาตรฐาน EN ISO 17225-8 ภายในธันวาคม 2015

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับทุนการศึกษาระดับปริญญาเอก PHD 57I0059 และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่อำนวยความสะดวก และทุนวิจัยบางส่วน

เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิราช ปิ่นทอง, วงศกต วงศ์อภัย และ ณัฐนิช วรรณยศ. ประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขแผนการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2552; 16(3): 55–73.
- [2] ปิติ ปิตา และ วารุณี เตีย. การวิเคราะห์การใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการขนส่งทางรถไฟในประเทศไทย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2556; 20(3): 34–41.
- [3] เหมือนจิต แจ่มศิลป์, ศิริพร วิริยะตั้งสนุล, ปวีณา พานิชพิเชษฐ์, บงกช กิตติสมพันธ์ และ พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์. วิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2558; 22(2): 98–106.
- [4] ธรณิศวรรค์ ดิทยาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากกังหันแก๊สแรงดันอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2557; 21(3): 84–93.
- [5] Saptoadi, H. The best biobriquette dimension and its particle size. *Asian Journal of Energy and Environment*, 2008; 9: 161–175.
- [6] Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T. and Boardman, R.D. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 2011; 7: 384–401.
- [7] Peduzzi, E., Boissonnet, G., Haarlemmer, G., Dupont, C. and Marechal, F. Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion processes. *Energy*, 2014; 70: 58–67.
- [8] Murphy, J.D. and McCarthy, K. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland, *Applied Energy*, vol. 82, 2005, pp. 148–166.
- [9] Prins, M.J., Ptasiński, K.J. and Janssen, F.J.J.G. Torrefaction of wood part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006; 77, 2006: 28–34.
- [10] Balata, M., Balat, H. and Öz, C. Progress in bioethanol processing. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008; 34: 551–573.
- [11] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนปณนั. Food Network Solution (2015). *Cellulose*, Available [Online]: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose>.
- [12] Chen, W.H., Peng, J. and Bi, X.T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015; 4: 847–866.
- [13] Mohan, D., Pittman, C.U., Jr. and Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 2006; 20: 848–889.

- [14] Mohagheghi, A., Evans, K., Chou, Y.C. and Zhang, M. Cofermentation of glucose, xylose, and arabinose by genomic DNA-integrated xylose/arabinose fermenting strain of *Zymomonas mobilis* AX101. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2002; 98–100: 885–898.
- [15] Chen, W.H., Cheng, W.Y., Lu, K.M. and Huang, Y.P. An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction. *Applied Energy*, 2011; 88: 3636–3644.
- [16] Acharya, B., Sule, I. and Dutta, A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2012; 2: 349–369.
- [17] Li, M.F., Li, X., Bian, J., Xu, J.K., Yang, S. and Sun, R.C. Influence of temperature on bamboo torrefaction under carbon dioxide atmosphere. *Industrial Crops and Products*, 2015; 76: 149–157.
- [18] Thanapal, S.S., Chen, W., Annamalai, K., Carlin, N., Ansley, R.J. and Ranjan, D. Carbon dioxide torrefaction of woody biomass. *Energy and Fuels*, 2014; 28: 1147–1157.
- [19] Uemura, Y., Saadon, S., Osman, N., Mansor, N. and Tanoue, K. Torrefaction of oil palm kernel shell in the presence of oxygen and carbon dioxide. *Fuel*, 2015; 144: 171–179.
- [20] Eseltine, D., Thanapal, S.S., Annamalai, K. and Ranjan, D. Torrefaction of woody biomass (Juniper and Mesquite) using inert and non-inert gases. *Fuel*, 2013; 113: 379–388.
- [21] Chen, Y., Yang, H., Yang, Q., Hao, H., Zhu, B. and Chen, H. Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass pyrolysis poly-generation. *Bioresource Technology*, 2014; 156, 2014: 70–77.
- [22] Wannapeera, J. and Worasuwannarak, N. Upgrading of woody biomass by torrefaction under pressure. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012; 96: 173–180.
- [23] Bergman, P.C.A. and Kiel, J.H.A. Torrefaction for biomass upgrading. 14th European Biomass Conference & Exhibition, Paris, France, 2005.
- [24] Bergman, P.C.A. Combined torrefaction and pelletisation. ECN Biomass, 2005.
- [25] Bergman, P.C.A., Boersma, A.R., Zwart, R.W.H. and Kiel, J.H.A. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. ECN report, 2005.
- [26] Chen, W.H. and Kuo, P.C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy*, 2011; 36: 803–811.
- [27] Chen, W.H. and Kuo, P.C., A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, 2010; 35: 2580–2586.
- [28] Rousset, P., Aguiar, C., Labbé, N. and Commandré, J.M. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. *Bioresource Technology*, 2011; 102: 8225–8231.
- [29] Almeida, G., Brito, J.O. and Perré, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. *Bioresource Technology*, 2010; 101: 9778–9784.
- [30] Saadon, S., Uemura, Y. and Mansor, N. Torrefaction in the presence of oxygen and carbon dioxide: the effect on yield of oil palm kernel shell. *Procedia Chemistry*, 2014; 9: 194–201.
- [31] Prins, M.J., Ptasinski, K.J. and Janssen, F.J.J.G. Torrefaction of wood Part 2. Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006; 77: 35–40.
- [32] Wannapeera, J., Fungtammasan, B. and Worasuwannarak, N. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011; 92: 99–105.
- [33] Prins, M.J., Ptasinski, K.J. and Janssen, F.J.J.G. More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*, 2006; 31: 3458–3470.
- [34] Peng, J.H., Bi, X.T., Sokhansanj, S. and Lim, C.J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. *Fuel*, 2013; 111: 411–421.
- [35] Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Bach, L.S., Stelte, W. and Henriksen, U.B. Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014; 108: 109–116.
- [36] Phanphanich, M. and Mani, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 2011; 102: 1246–1253.

- [37] Bridgeman, T.G., Jones, J.M., Shield, I. and Williams, P.T. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*, 2008; 87: 844–856.
- [38] Broströma, M., Nordina, A., Pommera, L., Brancab, C. and Blasi, C.D. Influence of torrefaction on the devolatilization and oxidation kinetics of wood. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012; 96: 100–109.
- [39] Lu, K.M., Lee, W.J., Chen, W.H., Liu, S.H. and Lin, T.C. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology*, 2012; 123: 98–105.
- [40] Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M.G., Rubiera, F. and Pis, J.J., Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 2008; 89: 169–175.
- [41] Peng, J.H., Bi, H.T., Lim, C.J. and Sokhansanj, S. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. *Energy and Fuels*, 2013; 27: 967–974.
- [42] Stelte, W., Clemons, C., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Ahrenfeldt, J., Shang, L. and Henriksen, U. B. Pelletizing properties of torrefied spruce. *Biomass Bioenergy*, 2011; 35: 4690–4698.
- [43] Lam, P.S., Sokhansanj, S., Bi, X.T. and Lim, C. J. Colorimetry applied to steam treated biomass and pellets made from western douglas fir (*Pseudotsuga Menziesii*, L.). *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2012; 55(2): 673–678.
- [44] Obernberger, I. and Thek, G. Physical characterisation and chemical composition of desified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy*, 2014; 27: 653–669.
- [45] Pang S. and Mujumdar A.S. Drying of wood biomass for bioenergy: drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant. *Drying Technology*, 2010; 28: 690–701.
- [46] Yan, W., Acharjee, T.C., Coronella, C.J. and Vasquez, V.R. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2009; 28(3): 435–440.
- [47] Felfli, F.F., Luengo, C.A., Suárez, J.A. and Beatón, P.A. Wood briquette torrefaction. *Energy for Sustainable Development*, 2005; 10: 20–23.
- [48] Peng, J.H., Bi, H.T., Sokhansanj, S. and Lim, J.C. A study of particle size effect on biomass torrefaction and densification. *Energy and Fuels*, 2012; 26: 3826–3839.
- [49] Ghiasi, B., Kumar, L., Furubayashi, T., Lim, C.J., Bi, X., Kim, C.S. and Sokhansanj, S. Densified biocoal from woodchips: Is it better to do torrefaction before or after densification?. *Applied Energy*, 2014; 134: 133–142.
- [50] Baonongbua, D., Soponpongpiapat, N. and Wasananon, S. Properties of torrefied biomass and torrefied pellet. *Journal of Science and Technology MSU*, 2013; 32(1): 73–83.
- [51] นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวลฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ISBN: 978-616-398-026-7, 2558.
- [52] Sadaka, S. and Negi, S. Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2009; 28(3): 427–434.
- [53] Repellin, V., Govin, A., Rolland, M. and Guyonnet, R. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and Bioenergy*, 2010; 34: 923–930.
- [54] อรอริน กลุ่มศักดิ์, วีรพงษ์ วัฒนะน้อย, และนคร วรสุวรรณรักษ์. อิทธิพลของอุณหภูมิของทอรรีแฟกชันต่อสมบัติน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 2554; 34(4): 341–355.
- [55] Chen, W.H., Du, S.W., Tsai, C.H. and Wang, Z.Y. Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces. *Bioresource Technology*, 2012; 111: 433–438.
- [56] Uemura, Y., Matsumoto, R., Saadon, S. and Matsumura, Y. A study on torrefaction of *Laminaria japonica*. *Fuel Processing Technology*, 2015; 138: 133–138.
- [57] Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S. and Madrali, S. Status overview of torrefaction technologies. IEA Bioenergy Task 32 report, 2012.

- [58] Bergman, P.C.A., Boersma, A.R. and Kiel, J.H.A. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. Report ECN-C--05-026, ECN Petten, 2005.
- [59] Blasi, C.D. Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993; 19(1): 71–104.
- [60] Sae-Ueng, U., Srirakul, N. and Soponpongpiat, N. Kinetic of biomass decomposition in pyrolysis and torrefaction process. *Journal of Science and Technology MSU*, 2013; 32(1): 64–72.
- [61] Wagenaar, B.M., Prins, W. and van Swaaij, W.P.M. Flash pyrolysis kinetics of pine wood. *Fuel Processing Technology*, 1993; 36: 291–298.
- [62] Blasi, C.D. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008; 34: 47–90.
- [63] Reina, J., Velo, E. and Puigjaner, L. Thermogravimetric study of the pyrolysis of waste wood. *Thermochimica Acta*, 1998; 320: 161–167.
- [64] Velden, M.V.D., Baeyens, J., Brems, A., Janssens, B. and Dewil, R. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renewable Energy*, 2010; 35: 232–242.
- [65] Parthasarathy, P. and Narayanan, S.K. Determination of kinetic parameters of biomass samples using thermogravimetric analysis. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2014; 33(1): 256–266.
- [66] Guo, J. and Lua, A.C. Kinetic study on pyrolytic process of oil-palm solid waste using two-step consecutive reaction model. *Biomass and Bioenergy*, 2001; 20: 223–233.
- [67] Blasi, C.D. Comparison of semi-global mechanisms for primary pyrolysis of lignocellulosic fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1998; 47: 43–64.
- [68] Orfao, J.J.M. and Figueiredo, J.L. A simplified method for determination of lignocellulosic materials pyrolysis kinetics from isothermal thermogravimetric experiments. *Thermochimica Acta*, 2001; 380: 67–78.
- [69] Gronli, M.G., Varhegyi, G. and Blasi, C.D. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. *Industrial & Engineering Chemistry*, 2002; 41: 4201–4208.
- [70] Peng, J., Wang, J., Bi, X.T., Lim, C.J., Sokhansanj, S., Peng, H. and Jia, D. Effects of thermal treatment on energy density and hardness of torrefied wood pellets. *Fuel Processing Technology*, 2015; 129: 168–173.
- [71] Peng, J.H., Bi, X.T., Lim, J. and Sokhansanj, S. Development of torrefaction kinetics for British Columbia softwoods. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2012; 10(1): 1542–6580.
- [72] Vtirhegyi, G., Antal, M.J., Jr., Jakab, E. and Szabo, P. Kinetic modeling of biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1997; 42: 73–87.
- [73] Branca, C. and Blasi, C.D. Kinetics of the isothermal degradation of wood in the temperature range 528–708 K. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003; 63: 207–219.
- [74] Blasi, C.D. and Lanzetta, M. Intrinsic kinetics of isothermal xylan degradation in inert atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1997; 40–41: 187–303.
- [75] Chew, J.J. and Doshi, V. Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011; 15: 4212–4222.
- [76] Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S. An overview of compaction of biomass grinds. *Powder Handling and Processing*, 2003; 15(2): 1–9.
- [77] Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Kenny, K.L. and Hess, J.R. A review on biomass densification technologies for energy application. U.S. Department of Energy National Laboratory operated by Battelle Energy Alliance, 2010.
- [78] Sarkar, M., Kumar, A., Tumuluru, J.S., Patil, K.N. and Bellmer, D.D. Gasification performance of switchgrass pretreated with torrefaction and densification. *Applied Energy*, 2014; 127: 194–201.
- [79] Peng, J.H. A study of softwood torrefaction and densification for the production of high quality wood pellets. PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2012.
- [80] Bissen, D. Biomass densification document of evaluation. Zachry Engineering Corporation, Minneapolis, MN, USA, 2009.

- [81] Chen, D., Zheng, Z., Fu, K., Zeng, Z., Wang, J. and Lu, M. Torrefaction of biomass stalk and its effect on the yield and quality of pyrolysis products. *Fuel*, 2015; 159: 27–32.
- [82] Ren, S., Lei, H., Wang, L., Bu, Q., Chen, S., Wu, J., Julson, J. and Ruan, R. The effects of torrefaction on compositions of bio-oil and syngas from biomass pyrolysis by microwave heating. *Bioresource Technology*, 2013; 135: 659–664.
- [83] Boateng, A.A. and Mullen, C.A. Fast pyrolysis of biomass thermally pretreated by torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013; 100: 95–102.
- [84] Meng, J., Park, J. Tilotta, D. and Park, S. The effect of torrefaction on the chemistry of fast-pyrolysis bio-oil. *Bioresource Technology*, 2012; 111: 439–446.
- [85] Couhert, C., Salvador, S. and Commandr, J-M. Impact of torrefaction on syngas production from wood. *Fuel*, 2009; 88: 2286–2290.
- [86] Kuo, P.C., Wu, W. and Chen, W.H. Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis. *Fuel*, 2014; 117: 1231–1241.
- [87] Chen, W.H., Chen, C.J., Hung, C.I., Shen, C.H. and Hsu, H.W. A comparison of gasification phenomena among raw biomass, torrefied biomass and coal in an entrained-flow reactor. *Applied Energy*, 2013; 112: 421–430.
- [88] Alakangas, E. Deliverable No. D8.3 Graded thermally and densified biomass fuels, Development of the ISO 17225-8 standard. 8.3–Preparation of CEN and ISO product standard, 2014.

การหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยวิธีการทาคุชิที่การหลอมละลายแนวเชื่อม Parametric Optimization of Shield Metal – Arc Welding Process by Taguchi Method on Weld Dilution

สุรพงศ์ บางพาน* พิรพันธ์ บางพาน เจษฎา แก้วสุใจ และ พงศ์นรินทร์ กิ่งอุโมงค์

Surapong Bangphan* Phiraphan Bangphan Jedsada Kaewsujai and Pongnarin Kiengumong

*สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 128 หมู่ 1 ถ.ห้วยแก้ว

ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

บทคัดย่อ

การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding (SMAW)) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายของกระบวนการเชื่อมในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพราะว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding (SMAW)) นั้นจะมีต้นทุนที่ต่ำ ในส่วนของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding (SMAW)) เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพการเพิ่มผลผลิตและต้นทุนในการเชื่อม ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการพัฒนาพารามิเตอร์สำหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding (SMAW)) ตลอดจนได้ทำการวางแผนการเพื่อเตรียมงานอย่างต่อเนื่องและตรวจดูการหลอมละลายแนวเชื่อมจากการทดสอบรอยเชื่อมต่อการซึมลึกในเหล็กทรงที่มีขนาดความกว้าง 4x4 นิ้ว และความหนา 4 มิลลิเมตรในระหว่างกระบวนการทดสอบนั้นได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมซึ่งเป็นสิ่งสำคัญประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า มุมของการเชื่อมและฐานช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมของตำแหน่งที่ทำการเชื่อม ตามที่ได้ทำการคัดเลือกตัวแปรของค่าพารามิเตอร์ซึ่งมีจำนวนอย่างเพียงพอต่อการทดลองเพราะว่าได้ดำเนินการทดลองด้วยวิธีการทาคุชิเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด สำหรับแต่ละลำดับของปัจจัยที่ดีที่สุดจะกำหนดเป็นค่าคงที่ นอกจากนี้แล้วลำดับของการทดลองจะถูกแยกเป็น 3 ระดับ ดังนั้นการทดลองนี้ จะมี 3 ปัจจัยกับ 3 ระดับ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบการจัดวางลำดับแบบแนวฉาก (Orthogonal Array, OA) ชนิด L9 ทำการทดลองจะดำเนินการด้วยการจัดวางลำดับแบบแนวฉาก (Orthogonal Array, OA) ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองประกอบด้วยการปรับกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 90 แอมแปร์ มุมของการเชื่อมเท่ากับ 10 องศาและฐานช่องว่างระหว่างชิ้นงานเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าปัจจัยที่สำคัญต่อการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม ในการหลอมละลายของการซึมลึกแนวเชื่อมอยู่ในระดับที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: วิธีการทาคุชิ การจัดวางลำดับแบบแนวฉาก Orthogonal Array การเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ การหลอมละลาย

ABSTRACT

The Shielded Metal Arc Welding (SMAW) is the most widely used welding process in small scale industries, because of its low cost. The SMAW welding parameters are the most important factors affecting the quality, productivity and cost of welding. Then, The objective of this research is to develop the parameters for Shielded Metal Arc Welding (SMAW) to provide continuous and weld dilution of deeply penetrate proof joints in 4x4 inch² width steel rails with 4 millimeter thickness during the process. The selected important welding parameter, like welding current, angle of electrode and root gap were considered with sufficient number of trail runs by Taguchi method to get optimal value. Three factor, welding current, angle of electrode and root gap, each at three levels were selected under an Orthogonal Array (OA) of L9. The experiment result indicated that welding current (90 Amp), angle of electrode (10 degree) and root gap (3 mm.) were the important factors for shielded metal arc welding on deep penetration weld dilution at the optimal levels.

KEYWORDS: Taguchi method, Orthogonal array, Shielded metal arc welding (SMAW), Dilution

1. บทนำ

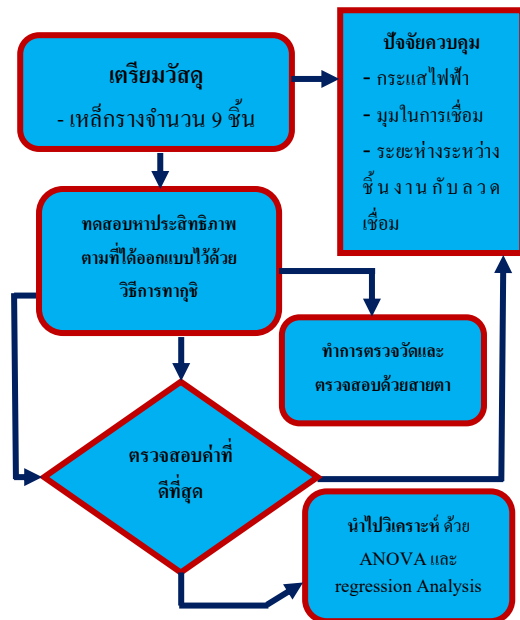
การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมที่มีสารพอกหุ้ม (Shielded Metal Arc Welding (SMAW)) จะทำหน้าที่เป็นตัวอาร์กโลหะงานทำให้เกิดความร้อนสูง จนกระทั่งโลหะงานหลอมละลายในขณะเดียวกันความร้อนที่ได้จากการอาร์กจะหลอมละลายตัวมันเองด้วย และหยดลงเติมลงในบ่อหลอมละลาย เมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นแนวเชื่อม ส่วนฟลักซ์หรือสารพอกหุ้ม เมื่อได้รับความร้อนก็จะหลอมละลายเกิดเป็นควันปกคลุมแนวเชื่อม เพื่อไม่ให้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปรวมตัวกับน้ำโลหะเหลว และฟลักซ์ที่หลอมละลายลงในบ่อหลอมละลายยังช่วยให้สารมลทินหรือสิ่งสกปรกลอยขึ้นมาจากน้ำโลหะ เมื่อเย็นตัวลงจะกลายเป็นสแลก (Slag) พอกหุ้มแนวเชื่อมให้แนวเชื่อมเย็นตัวอย่างช้า ๆ จากการที่แนวเชื่อมเกิดควันปกคลุมขณะทำการเชื่อม ควันจะเป็นเกราะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าร่วมตัวกับแนวเชื่อม จึงเรียกการเชื่อมแบบนี้ว่า Shield Metal – Arc Welding, SMAW สำหรับพื้นฐานการเชื่อมโดยทั่วไปจำเป็นต้องมีทักษะ มีสมาธิที่ดี อดทนอดทน และมีความตั้งใจพอสมควรต่อการเชื่อม เพราะว่าการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ค่อนข้างจะใช้ทักษะในการเชื่อมสูง เพราะฉะนั้นผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องเรียนรู้หลักการทางทฤษฎีพอสมควร จึงจะทำให้งานที่ได้นั้นมีคุณภาพ

ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการนำเอาเทคนิควิธีการทากุชิมาร่วมในการวิเคราะห์เพื่อทำการตรวจสอบการเชื่อมไฟฟ้า

ด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal – Arc Welding) เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดโดยปัจจัยที่ทำการควบคุมได้แก่ กระแสไฟฟ้า มุมในการเชื่อม และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมโดยทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลกับกระบวนการเชื่อมด้วยชิ้นทดสอบเหล็กราง ขนาด 4x4 นิ้ว ความหนาเท่ากับ 4 มิลลิเมตร เพราะฉะนั้นการออกแบบการทดลองโดยวิธีทากุชิ จึงเป็นการประยุกต์การออกแบบการทดลอง จะประกอบด้วยปัจจัยควบคุม (Control Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หรือ Noise Factor ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วย ซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้ เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของวิธีทากุชิ คือการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์ โดยทำการเลือกปรับปัจจัยควบคุม (Control Factor) ผลการทดลองข้อมูลดิบจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของ Signal to Noise (S/N Ratio) ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการหาเป้าหมายที่ถูกต้องเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimize) โดยที่คุณลักษณะของ S/N Ratio สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ Small – the – Better Type Problem , Nominal – the – Best – Type Problem และ Larger – the – Better Type Problem และประโยชน์ที่ได้จากวิธีการทากุชิเป็นการช่วยลดจำนวนของการทดลอง ทำให้ประหยัดเวลา และลดต้นทุนในการทดลอง ช่วยทำให้การทดลองง่ายสะดวกยิ่งขึ้น และทำให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าสนใจได้ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเชื่อมั่นมากขึ้น [1-2]

2. วิธีการดำเนินการทดลอง

2.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบการเชื่อมเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด

2.1.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

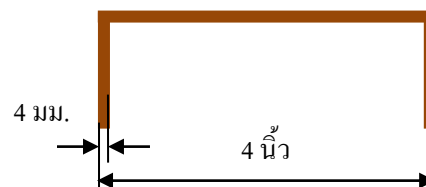
เมื่อผู้ออกแบบการทดลองทราบจำนวนของปัจจัยควบคุม (Control Factor) และระดับของปัจจัยควบคุม (Control Factor Level) ที่ได้ออกแบบไว้ โดยนำค่าทั้งสองนี้มาทำการพิจารณาเลือกใช้ชนิด Orthogonal Array การใช้ Orthogonal Array ซึ่งจะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยที่มีหลายปัจจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำหนดปัจจัยควบคุมหรือตัวแปรที่ได้ออกแบบไว้ใน Orthogonal Array อย่างเหมาะสม ดังขั้นตอนต่อไปนี้ [1-2]

พิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการกระบวนเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ตัวแปร 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาจะต้องกำหนดวิธีการควบคุมตัวแปรเพื่อให้ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยภายนอกเกิดขึ้นน้อยที่สุดเช่น ความชื้นสัมพัทธ์ สถานที่ทำการทดลองและผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น [1-2]

ตารางที่ 1 ปัจจัยและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยควบคุม	ระดับการทดลอง			การหลอมละลาย
	1	2	3	
กระแสไฟฟ้า (แอมป์)	80	90	100	-
มุมในการเชื่อม (องศา)	5	10	15	-
ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม (มิลลิเมตร)	2.6	2.8	3.0	-

หมายเหตุ : ระดับการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 3 ระดับ และ 3 ปัจจัยจะประกอบด้วย กระแสไฟฟ้า ระดับที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 80, 90 และ 100 แอมป์ (กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ระหว่าง 80 ถึง 100 แอมป์), มุมองศาในการเชื่อม ระดับที่ 1, 2 และ 3 คือ 5, 10 และ 15 องศา (โดยปกติมุมในการเชื่อมที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 10 องศา) ส่วนระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม ระดับที่ 1, 2 และ 3 เป็น 2.6, 2.8 และ 3.0 มิลลิเมตร (ในการทดลองได้กำหนดขนาดชิ้นงานเป็นเหล็กทรงขนาด 4x4 นิ้ว ความหนาเท่ากับ 4 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบชิ้นงานที่จะนำมาทำการทดสอบ

2.2 การออกแบบการทดลองโดยวิธีการทางสถิติ

วิธีการทางสถิติมีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอนคือ

1. กำหนดปัญหา
2. วางแผนการทดลอง
3. วิเคราะห์ผลลัพธ์
4. ทดลองเพื่อยืนยันผล

2.2.1 วิธีการทาคุชิ

วิธีทางวิศวกรรมคุณภาพเสนอโดย ทาคุชิ คือเทคนิคที่มีการเตรียมการของวิธีการดำเนินงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีระบบแบบแผนสำหรับทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ ข้อกำหนดของทาคุชิคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในช่วงระยะเวลาของสัดส่วนของเสียโดยผลิตภัณฑ์ บางสิ่งบางอย่างที่สูญเสียซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้จนถึงความเบี่ยงเบนสำหรับคุณลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นความต้องการสำหรับค่าเป้าหมายของวิธีการทาคุชิและถูกเรียกว่าความสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จนถึงค่าที่เบี่ยงเบน ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้เป็นอีกสาเหตุหนึ่งของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่อาจเกิดการเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายนั้นๆ จึงถูกเรียกว่าปัจจัย Noise ที่มีอยู่ภายในและภายนอก ซึ่งสามารถทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยเดียวจะอยู่ภายใต้ผลลัพธ์จากการที่รวมเข้ากับปัจจัยหลายๆปัจจัยที่ดีที่สุดจึงถูกนำมาพิจารณา [3]

ทาคุชิได้เสนอ 8 ขั้นตอนมาตรฐาน ดังนี้

1. จำแนกการดำเนินงานหลัก ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบข้างเคียงและโหมดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น
2. จำแนกปัจจัย Noise ภายในได้เงื่อนไขของการทดสอบ และลักษณะเฉพาะของคุณภาพ
3. จำแนกเป้าหมายของการดำเนินงานจนได้ค่าที่ดีที่สุด
4. จำแนกปัจจัยควบคุมและระดับต่างๆ
5. เลือกการทดลองเมตริกส์แบบ Orthogonal Array
6. ดำเนินการทดลองแบบเมตริกส์
7. วิเคราะห์ข้อมูล ทำนายผลในระดับที่คาดหวัง และสมรรถนะขบวนการที่ดีที่สุด
8. ดำเนินการทดลองเพื่อพิสูจน์ความจริงและวางแผนการดำเนินงานในอนาคต [4]

2.2.2 นิยามของวิธีการทาคุชิ (Definition Taguchi Method)

วิธีการทาคุชิเป็นการดำเนินการการออกแบบทดลอง ซึ่งเป็นพื้นฐานการแนะนำในข้อจำกัดที่ดีวิธีการทาคุชิใช้การจัดลำดับแบบพิเศษเรียกว่า ลำดับของ Orthogonal

มาตรฐานการจัดลำดับเป็นการกำหนดที่เป็นแนวทางการดำเนินงานของจำนวนตัวเลขที่มีค่าน้อยสุดสำหรับการทดลองซึ่งสามารถกำหนดให้ข้อมูลมีความละเอียดมากที่สุดของปัจจัยทั้งหมดที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น จุดสำคัญของวิธีการจัดวางลำดับแบบ Orthogonal ที่อาจไม่เป็นความจริงต่อการเลือกในระดับการรวมกันของตัวแปรที่ทำการออกแบบที่ได้ผลลัพธ์สำหรับของแต่ละการทดลอง [5]

2.3 การคำนวณ

หลังจากเลือกข้อมูลทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยสำหรับการคำนวณด้วยอัตราส่วน S/N อัตราส่วน S/N เป็นความเข้าใจของคุณภาพมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบสำหรับการเปลี่ยนแปลงโดยค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการในสมรรถนะของกระบวนการหรือผลผลิตที่ได้จากการประเมิน โดยทั่วๆ ไปการได้รับค่า S ที่ดีกว่าเมื่อค่า N ที่ได้น้อยกว่ามาก ดังนั้น ผลของอัตราส่วน S/N ที่มีขนาดมากกว่าจะดีกว่าผลลัพธ์ที่ได้ในช่วงสุดท้ายของค่าเฉลี่ยความแตกต่างสำหรับผลลัพธ์สุดท้ายจะกลายมาเป็นค่าที่น้อยที่สุดของอัตราส่วน S/N ซึ่งคุณลักษณะของอัตราส่วน S/N ที่แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้ [1-3]

ปัญหาชนิด Smaller – is – Better

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N ของค่าเป้าหมายนั้นๆ สำหรับผลตอบที่เป็นศูนย์และเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายละเอียดเพียงเพื่อหาค่าพิสัยความเพื่อจำกัดด้านบนหาได้จากสูตรดังนี้

$$S/N_s = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (1)$$

เป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์ Smaller-is-Better คือน้อยสุด $\sum y_i^2$ เมื่อค่า n คือจำนวนค่าที่ได้จากการวัดในการทดลอง และค่า y_i นั้น เป้าหมายสูงสุดหาได้จาก

$$-10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right)$$

ปัญหาชนิด Larger-is-Better

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N เป้าหมายคือค่าสูงสุดของผลตอบและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายการเพียงเพื่อหาค่าพิสัยความเพื่อจำกัดด้านล่างหาได้จากสูตรดังนี้

$$S/N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

อนึ่ง เป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์ Larger-is-Better คือค่ามากที่สุดของผลตอบ(ผลตอบของกระบวนการ) แต่ค่า y มากที่สุดคือน้อยที่สุดของ 1/y และค่า 1/y นั้น เป้าหมายสูงสุดหาได้จาก

$$-10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right)$$

ปัญหาชนิด Nominal – the – Best

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N นั้น ให้ค่าเป้าหมายคือดีที่สุดและเป็นค่าเหมาะสมเมื่อค่านี้เป็นค่าเป้าหมาย กับค่าพิสัยความเพื่อจำกัดด้านบนและด้านล่างหาได้จากสูตรดังนี้

$$S/N_N = 10 \log \left(\frac{1}{S^2} \right) \quad (3)$$

เป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์ Target-Value-is-Best คือความแปรปรวนลดลงรอบๆค่าเป้าหมายเฉพาะ เมื่อความแปรปรวนของผลตอบลดลงจะมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยผลตอบ ทำให้ S/N_N เพิ่มขึ้นหลังจากได้ค่าคำนวณจากสมการทั้งสามดังกล่าวแล้วทำการวิเคราะห์ผลตอบต่อไปด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน หาอิทธิพลของ Noise และวิเคราะห์สมรรถนะของกระบวนการ

2.3.1 ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal – Arc Welding) โดยวิธีการทากุจิ

การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Taguchi ในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งหมด 3 ปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ใช้ Orthogonal array (OAs) แบบ L-9 (3³) ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง ประกอบด้วยจำนวนการทดลองที่ขึ้นอยู่กับระดับของ

ปัจจัยที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 แสดงการจัดวางลำดับแบบ Orthogonal L-9 (3³) Array ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ [1-2]

ตารางที่ 2 L-9 (3³) Orthogonal Array

ลำดับทดลอง	ปัจจัย			การหลอมละลาย
1	1	1	1	-
2	1	2	2	-
3	1	3	3	-
4	2	1	2	-
5	2	2	3	-
6	2	3	1	-
7	3	1	3	-
8	3	2	1	-
9	3	3	2	-

3. ผลการทดลอง

3.1 ศึกษาประสิทธิภาพของการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal – Arc Welding) โดยเครื่องเชื่อมไฟฟ้า

เมื่อทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal – Arc Welding) โดยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าและนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพของการหลอมละลายการเชื่อมเพื่อตรวจสอบการซึมลึกของรอยเชื่อมตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีการทากุจิทั้ง 9 การทดลองแล้วและจากการวิเคราะห์พบว่าการทดลองที่ทำให้ได้ค่าการหลอมละลายมากที่สุด คือ การทดลองที่ 5 รองลงมา คือ การทดลองที่ 4 และ 6 ตามลำดับ โดยมีปัจจัยที่หนึ่งได้แก่กระแสไฟฟ้าที่ 90 แอมป์ มุมในการเชื่อมเท่ากับ 10 องศา และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมเป็น 3.0 มิลลิเมตร ได้การหลอมละลายแนวเชื่อมเท่ากับ 4.50, 4.30 และ 4.20 มิลลิเมตร (การซึมลึกรอยเชื่อม) ตามลำดับ ส่วนการหลอมละลายแนวเชื่อมน้อยที่สุดอยู่ที่ลำดับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับได้การหลอมละลายแนวเชื่อมที่ 3.51, 3.41 และ 3.35 มิลลิเมตร ที่กระแสไฟฟ้าที่ 80 แอมป์ มุมในการเชื่อมเท่ากับ 5 องศา และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมเป็น 2.6

มิลลิเมตรตามลำดับ ส่วนลำดับการทดลองที่เหลือของแต่ละปัจจัยแต่ละระดับแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าที่ได้จากการเชื่อม

ลำดับ	กระแสไฟฟ้า	มุมในการเชื่อม	ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม	ผลตอบ (บนหลอมละลายการเชื่อม)
1	80	5	2.6	3.51
2	80	10	2.8	3.41
3	80	15	3.0	3.35
4	90	5	2.8	4.30
5	90	10	3.0	4.50
6	90	15	2.6	4.20
7	100	5	3.0	3.90
8	100	10	2.6	3.80
9	100	15	2.8	3.00

การหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเชื่อม โดยทำการศึกษาที่การหลอมละลายทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้นใช้วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ยอัตราส่วน S/N แบบค่าที่มากกว่าให้ผลดีกว่า (Larger- the – Better -Type) เนื่องจากการหลอมละลายต้องการซึมลึก (รอยเชื่อมที่ซึมลึกจะทำให้ชิ้นงานยึดติดกันแน่น) มากที่สุดของชิ้นงานที่ต้องการ ดังนั้นจำนวนการหลอมละลายการเชื่อมที่ได้ทั้งหมดจึงควรมีค่าสูง เมื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อกระบวนการเชื่อมทั้งหมด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสามที่มีผลต่อการเชื่อมและผลกระทบต่อค่าตัวแปรที่ป้อนข้อมูลบนอัตราส่วน S/N ที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ คือปัจจัยที่อยู่ในสภาวะเหมาะสมที่สุด และได้ทำการทดลองซ้ำการทดลองครั้งที่สองเป็นการทดลองซ้ำกับปัจจัยเดิมด้วยการดำเนินการตามขั้นตอนเดิมแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำจากการเชื่อม

ลำดับ	กระแสไฟฟ้า	มุมในการเชื่อม	ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อม	ผลตอบ (บนหลอมละลายการเชื่อม)
1	80	5	2.6	3.50
2	80	10	2.8	3.39
3	80	15	3.0	3.34
4	90	5	2.8	4.31
5	90	10	3.0	4.51
6	90	15	2.6	4.19
7	100	5	3.0	3.88
8	100	10	2.6	3.79
9	100	15	2.8	2.99

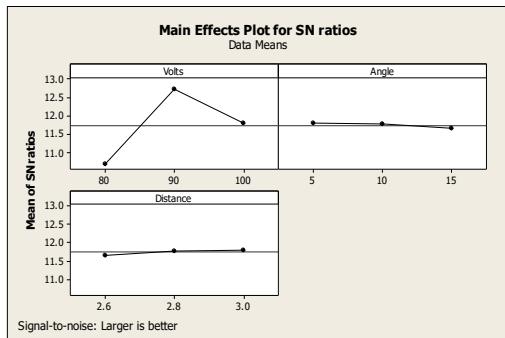
จากตารางที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองซ้ำมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยสำหรับกระบวนการเชื่อม ทั้งนี้ อาจเกิดจากควบคุมกระบวนการเชื่อมและตรวจสอบอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและผู้ปฏิบัติงานจึงทำให้ค่าที่ได้มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงซึ่งไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะตำแหน่งท่าเชื่อมซึ่งต้องทำมุมในระหว่างการเชื่อมได้ทำอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเพื่อประครองแนวให้อยู่ในระดับมุมมองสายตาที่ต้องการจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และตัวอย่างชิ้นงานเหล็กทรงที่นำมาทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



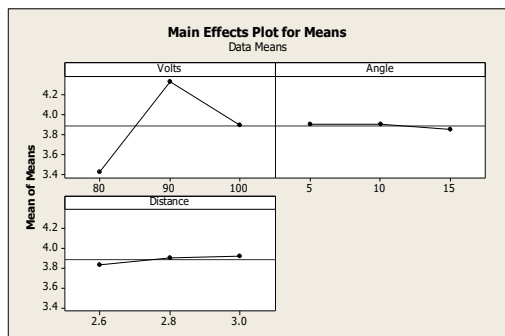
รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างหลังจากทำการเชื่อม

ในวิธีการทางสถิติ อัตราส่วน Signal-to-Noise Ratios ถูกนำมาใช้ในการตัดสินใจระดับที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยดังกล่าว รูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/N แสดงดังตารางที่ 5

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับอัตราส่วน S/N แสดงดังตารางที่ 6 รูปแบบการประมาณค่าเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 7 ผลตอบสำหรับ Signal to Noise Ratios Larger is Better แสดงดังตารางที่ 8 และผลตอบค่าเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 9



รูปที่ 4 Main effects plot for S/N ปัจจัยทั้งสาม



รูปที่ 5 Main Effects plot for Means ปัจจัยทั้งสาม

ตารางที่ 5 Estimated Model Coefficients for S/N Ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11.7441	0.1274	92.206	0.000
Volts 80	-1.0568	0.1801	-5.867	0.028
Volts 90	0.9887	0.1801	5.489	0.032
Angle 5	0.0548	0.1801	0.304	0.790
Angle 10	0.0275	0.1801	0.153	0.893
Distance 2.6	-0.0885	0.1801	-0.491	0.672
Distance 2.8	0.0372	0.1801	0.206	0.856
S = 0.3821 R-Sq = 95.6% R-Sq(adj) = 82.5%				

ตารางที่ 6 Analysis of Variance for S/N Ratios

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Volts	2	6.29688	3.14844	21.56	0.044
Angle	2	0.03163	0.01582	0.11	0.902
Distance	2	0.03557	0.01778	0.12	0.891

ตารางที่ 6 (ต่อ) Analysis of Variance for S/N Ratios

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Residual	2	0.29201	0.29201	0.14600	
Error					
Total	8	6.65608			

ตารางที่ 7 Estimated Model Coefficients for Means

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.88444	0.05807	66.898	0.000
Volts 80	-0.46111	0.08212	-5.615	0.030
Volts 90	0.44889	0.08212	5.466	0.032
Angle 5	0.01889	0.08212	0.230	0.839
Angle 10	0.01889	0.08212	0.230	0.839
Distance 2.6	-0.04778	0.08212	-0.582	0.620
Distance 2.8	0.01556	0.08212	0.189	0.867
S = 0.1742 R-Sq = 95.4% R-Sq(adj) = 81.6%				

ตารางที่ 8 Response Table for Signal to Noise Ratios Larger is better

Level	Volts	Angle	Distance
1	10.69	11.80	11.66
2	12.73	11.77	11.78
3	11.81	11.66	11.80
Delta	2.05	0.14	0.14
Rank	1	3	2

ตารางที่ 9 Response Table for Means

Level	Volts	Angle	Distance
1	3.423	3.903	3.837
2	4.333	3.903	3.900
3	3.897	3.847	3.917
Delta	0.910	0.057	0.080
Rank	1	3	2

และผลที่ได้จากการทำนายสำหรับค่าอัตราส่วน S/N และ ค่าเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลที่ได้จากการทำนายสำหรับค่าอัตราส่วน S/N และ ค่าเฉลี่ย

Order	S/N Ratio	Mean
1	11.2041	3.61444
2	10.4769	3.34778
3	10.3812	3.30778
4	12.5496	4.25778
5	13.3622	4.60444
6	12.2868	4.13778
7	11.6431	3.83778
8	11.4759	3.75778
9	9.8404	3.10444

จากตารางผลที่ได้จากการทำนายพบว่าทั้ง 9 การทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 5 สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของค่า S/N ในส่วนของค่าคงที่ (constant) มีค่าเท่ากับ 11.7441 และการประมาณค่าหุนจำลองสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ยในส่วน of ค่าคงที่ (constant) เท่ากับ 3.8844 ในตารางที่ 7 ซึ่งมีความแม่นยำค่อนข้างจะไปในแนวทางที่ตรงระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายแสดงว่าได้สภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการเชื่อมทำให้มีความเชื่อมั่นที่ดีสำหรับการออกแบบทดลองด้วยวิธีการทางทฤษฎี

3.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

จากค่า p-value ในตารางที่ 5 ผลลัพธ์สัมประสิทธิ์สำหรับอัตราส่วน S/N ของกระบวนการเชื่อมที่ระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) คือ ปัจจัยที่ 1 (Volts 80 และ 90) ผลลัพธ์การประมาณค่าหุนจำลองสัมประสิทธิ์ของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่ามีผลต่อค่า S/N (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 (Angle 5 และ 10) และปัจจัยที่ 3 (Distance 2.6 และ 2.8) ผลลัพธ์ของหุนจำลองสัมประสิทธิ์ของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่เกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่าไม่มีผลต่อค่า S/N (ไม่มีนัยสำคัญ) ในส่วนตารางที่ 6 ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า S/N ซึ่งมีค่า p-value ที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) คือปัจจัยที่ 1 (Volts) มีผลต่อค่า S/N (มีนัยสำคัญ) และปัจจัยที่ 2 และ 3 (Angle และ Distance) ทั้งสองปัจจัยไม่มีผลต่อค่า S/N (ไม่มีนัยสำคัญ) รูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ยในตารางที่ 7 ค่าคงที่ซึ่งมีค่า p-value เท่ากับ 0.000 โดยมีปัจจัยที่ 1 (Volts 80 และ 90) มีค่า p-value เท่ากับ 0.030 และ 0.032 ตามลำดับที่ไม่เกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่ามีผลต่อค่ารูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ย (มีนัยสำคัญ) ส่วนปัจจัยที่ 2 และ 3 (Angle 5 และ 10, Distance 2.6 และ 2.8) มีค่า p-value เท่ากับ 0.839, 0.839, 0.620 และ 0.0867 ตามลำดับ มีค่าเกินระดับนัยสำคัญ 5% (0.05) สรุปว่าไม่มีผลต่อค่ารูปแบบ

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ย (ไม่มีนัยสำคัญ) และการปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 82.5% รูปแบบการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับค่าเฉลี่ยได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 81.6 % ส่วนสมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับอัตราส่วน S/N การหลอมละลายการเชื่อม เพื่อตรวจสอบการซึมลึกดังสมการที่ 4 คือ

สมการสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับอัตราส่วน S/N

$$= 11.7441 + 1.0568(\text{volts}80) + 0.9887(\text{volts}90) + 0.0548(\text{angle}5) + 0.0275(\text{volts}10) - 0.885(\text{distance}2.6) + 0.0372(\text{distance}2.8) \quad (4)$$

และสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับค่าเฉลี่ยดังสมการที่ 5 คือ

$$= 3.8844 - 0.4611(\text{volts}80) + 0.4489(\text{volts}90) + 0.0189(\text{angle}5) + 0.0189(\text{angle}10) - 0.0478(\text{distance}2.6) + 0.0156(\text{distance}2.8) - 0.885(\text{distance}2.6) + 0.0372(\text{distance}2.8) \quad (5)$$

4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการตรวจสอบการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้าโดยใช้วิธีการทางทฤษฎีนั้นพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือการปรับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 90 แอมป์ มุมในการวางท่าเชื่อม 10 องศาและระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตรทำให้ได้การหลอมละลาย (การซึมลึกรอยเชื่อม) เฉลี่ยอยู่ที่ 4.50 มิลลิเมตร การทดลองเพื่อยืนยันผลมีค่ามากกว่าผลจากการคำนวณโดยวิธีทางทฤษฎี ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณที่ยอมรับได้ กล่าวคือค่าที่ได้จากการทดลองในครั้งแรกกับทำการทดลองซ้ำพบว่าค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นวิธีการทางทฤษฎีสามารถนำมาออกแบบกระบวนการเชื่อมลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ และสภาวะดังกล่าวจะถูกนำไปเพื่อใช้ในกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ที่นำเข้าเป็นหลักซึ่งมีผลต่อการหลอมละลาย (การซึมลึกรอยเชื่อม) ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงจำนวนปัจจัยนำเข้าที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโดยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าพบว่าปัจจัยทั้งสามทั้งมีและไม่มีนัยสำคัญต่อกระบวนการ กล่าวคือ การปรับกระแสไฟฟ้าที่มากกว่าในรายงานจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการเชื่อม มุมในการเชื่อมและระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับลวดเชื่อมต่ำหรือสูงขึ้นจะมีผลต่อการซึมลึกแนวเชื่อมหมายความว่าถ้าหากการซึมลึกแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอรอยซึมลึกตื้นทำให้ชิ้นงานไม่มีความคงทน เพราะฉะนั้นปัจจัยทั้งสามที่ได้กำหนดและค่าที่เหมาะสมที่สุดจะช่วยให้มีประสิทธิภาพในกระบวนการเชื่อมด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าทำให้อยู่ซึมลึกมีความเหมาะสมและมีความแข็งแรงต่อการนำไปใช้

งานต่อไป ส่วนลวดเชื่อม เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ตัวผู้ปฏิบัติงานตลอดจนสถานะแวดล้อมในการทำงานและความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยในกระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องนำพิจารณา

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณ โครงการยกระดับปริญญาโทเป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน ประจำปี 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการนำเสนอผลงานในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรพงศ์ บางพาน, พิรพันธุ์ บางพานและชิตกานต์ บุญแจ้ง. การประยุกต์วิธีการทางทาคูชิสำหรับค่าที่ดีที่สุดโดยศึกษาของกระบวนการกะเทาะข้าวกล้องด้วยลูกยางกะเทาะเปลือก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2557; 22: 59-67.
- [2] สุรพงศ์ บางพาน. การประยุกต์วิธีการทางทาคูชิสำหรับกระบวนการกลึงที่ดีที่สุดโดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 2557; 7: 104-112.
- [3] Krishankant, Jatin Taneja, Mohit Bector, Rajesh Kumar. (2012). Application of taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2012; 2(1).
- [4] Roy, R. K. Design of experiments using the taguchi approach. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [5] Roy, R.K. A primer on the Taguchi competitive manufacturing Series, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [6] Umass. 2014. Available [Online]: <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/fea/Access>.
- [7] Randhir Kujar and Hatia, Ranchi. Application of taguchi method for process parameters optimization in semi-solid forging of A356 Al-Alloy. *Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 2014; 2(4): 800-805.



การควบคุมอัตราการไหลที่เหมาะสมในเครื่องอุ่นอากาศ เพื่อควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ระบบเอฟจีดีของโรงไฟฟ้าถ่านหิน

Optimal Flow Control in Air Preheaters for Controlling FGD Exhaust Gas of a Coal-Fired Power Plant

พนมกร ทองพัฒน์กุล* อรรถกร อาสนคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

Panomkorn Thongpatthanakun*, Attakorn Asanakham and Tanongkiat Kiatsiriroat
ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหพล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Chiang Mai University

*E-mail: panomkorn.t@egat.co.th Telephone: +66 (0) 54-252221

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการปรับอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสียที่เครื่องอุ่นอากาศของหม้อไอน้ำ ในโรงไฟฟ้าถ่านหิน เพื่อควบคุมอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ก่อนเข้าสู่ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization, FGD) เครื่องอุ่นอากาศ จะมี 2 ชุด ได้แก่ ชุดเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ (Primary Air Heater, PAH) และชุดเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ (Secondary Air Heater, SAH) โดยจะนำข้อมูลการเดินเครื่องที่สภาพการทำงานจริง มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสีย กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียรวม ก่อนเข้าสู่ระบบ FGD โดยจะหาสภาวะการทำงานที่ อุณหภูมิก๊าซไอเสียรวมไม่เกิน 180°C เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ เงื่อนไขที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ จะถูกนำไปเทียบกับสภาวะการทำงานอ้างอิงที่ทำงานปัจจุบัน และหาสภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากการลดการใช้ปริมาณถ่านหิน จากผลการศึกษาพบว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD ได้ไม่เกิน 180°C และมีศักยภาพในการลดอัตราการป้อนถ่านหิน 15.22 ตันต่อชั่วโมง คิดเป็นมูลค่าประมาณ 285,825.22 บาทต่อวัน

คำสำคัญ: เครื่องอุ่นอากาศ, ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, ความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสีย, โรงไฟฟ้าถ่านหิน

ABSTRACT

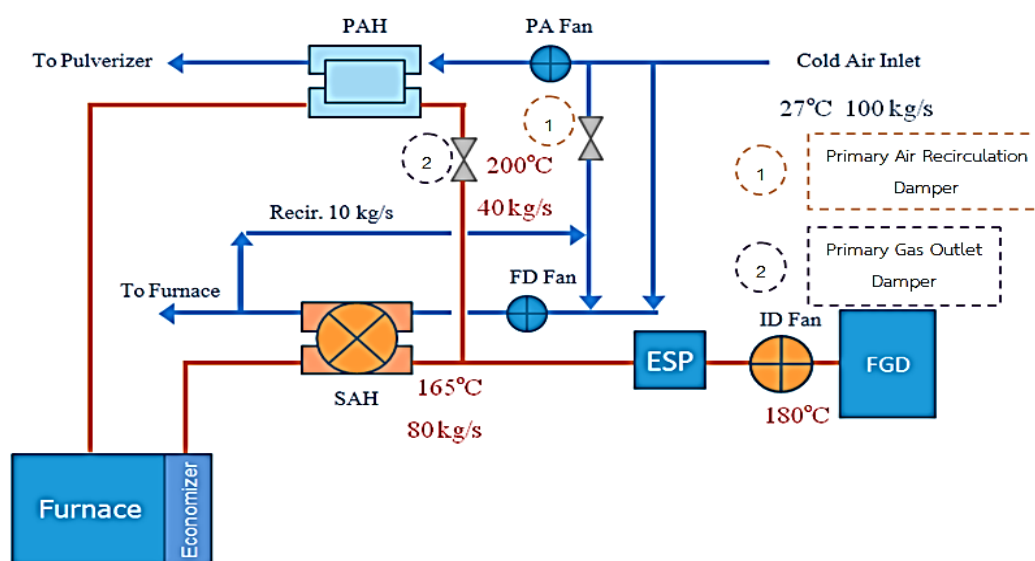
This paper presented a procedure to adjust flow rate of air and flue gas at air preheaters of a boiler for a coal-fired power plant to control flue gas temperature before entering the flue gas desulphurization (FGD). There were two sets of air preheaters: primary air heater (PAH) and secondary air heater (SAH) of which the actual operating data were undertaken to correlate the temperatures and flow rates of the flue gas at FGD for controlling the gas temperature not to exceed 180°C. Operating conditions can be compared to a reference current work and the optimization could be undertaken by considering the reduction of coal use. It could be found that the flue gas temperature could be controlled before entering the FGD system not to exceed 180°C and at the optimal condition, the coal consumption could be reduced 15.22 tons/hour of which the value was about 285,825.22 baht/day.

Keywords: Air Preheater, Flue Gas Desulphurization (FGD), Exhaust gas, Coal-Fired Power Plant

1. บทนำ

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งจะมีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปกับก๊าซไอเสีย จึงต้องมีอุปกรณ์กำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulphurization, FGD) ก่อนปล่อยก๊าซไอเสียสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ ก๊าซไอเสียก่อนเข้าระบบ FGD จะมีการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศในเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ

(Primary Air Heater, PAH) และทุติยภูมิ (Secondary Air Heater, SAH) ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อนำความร้อนทิ้งไปใช้ในการอุ่นอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ โดยอากาศที่เข้าเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิจะใช้ในการเป่าลำเลียงถ่านหินเข้าสู่หม้อไอน้ำด้วย อย่างไรก็ตามก๊าซไอเสียทั้งหมดจะไหลเข้าสู่ระบบ FGD โดยที่อุณหภูมิไม่เกิน 180°C เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป [1]



รูปที่ 1 ผังการนำความร้อนทิ้งของก๊าซไอเสีย จากหม้อไอน้ำไปอุ่นอากาศ ในเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ และทุติยภูมิ [7]

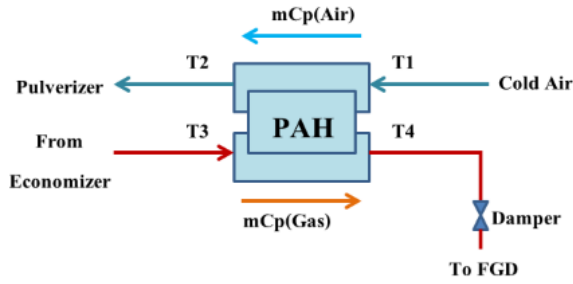
เครื่องอุ่นอากาศที่ใช้ในการดึงความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสียมาอุ่นอากาศ มีหลายลักษณะ สุนทร และทนงเกียรติ (2546) [2] ได้ใช้ท่อความร้อนชนิดเทอร์โมไซฟอน ลดอุณหภูมิก๊าซไอเสีย โดยนำความร้อนทิ้งจากก๊าซไอเสียมาอุ่นอากาศ ทำให้อุณหภูมิก๊าซไอเสียก่อนเข้าระบบ FGD ลดลง ทั้งนี้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน จะนิยมใช้แลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซสู่ก๊าซ ทั้งในกรณีการทำงานอุปกรณ์ต่างๆ เช่น การนำความร้อนทิ้งในไอเสียมาอุ่นอากาศในกระบวนการอบแห้ง [3] และอาจทำงานกับก๊าซอุณหภูมิตั้งแต่ 90 ถึง 400°C [4] อีกรูปแบบหนึ่ง คือ เครื่องอุ่นอากาศแบบโรตารีรีเจนเนอเรเตอร์ (Rotary Regenerator) [5] ซึ่งเป็นเครื่องอุ่นอากาศเช่นเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สำหรับโรงไฟฟ้า

ถ่านหินในงานวิจัยนี้ อัตราการไหลของอากาศที่มารับความร้อน จะต้องให้อัตราส่วนของอากาศ และถ่านหิน (Air/Fuel Ratio) พอเหมาะ โดยที่ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 3% [6] ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำยังคงมีค่าสูง

สำหรับงานวิจัยนี้ จะหาแนวทางในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสีย ในเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ และแบบทุติยภูมิ เพื่อหาอัตราการสันเปลี่ยนถ่านหิน เทียบกับกรณีที่อ้างอิง ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการทำงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. หลักการ และทฤษฎี

พนมกร และทงเกียรติ (2559) [7] ได้ศึกษาการทำงานของเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่แสดงในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานในเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ ที่แสดงในรูปที่ 2 จะได้



รูปที่ 2 อุณหภูมิ และอัตราการไหล ของอากาศ และก๊าซไอเสีย ที่เครื่องอุ่นอากาศ แบบปฐมภูมิ (PAH) [7]

$$\begin{aligned} PAH; (\dot{m}C_p)_{G_{PAH}} (T_3 - T_4) = \\ (\dot{m}C_p)_{A_{PAH}} (T_2 - T_1) = \\ UA_{PAH} \left[\frac{(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)}{\ln \left(\frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} \right)} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

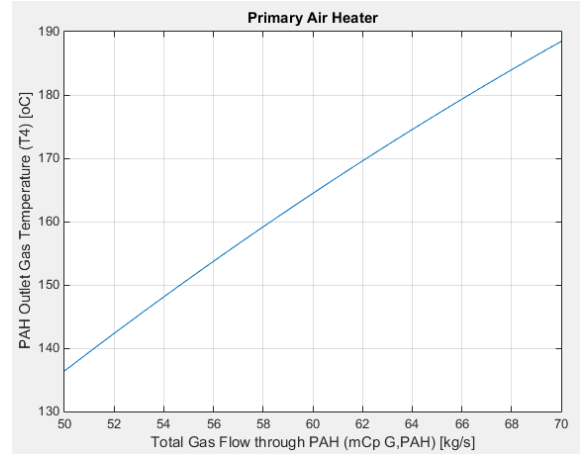
ซึ่งสามารถคำนวณอุณหภูมิก๊าซไอเสีย T_4 ได้โดย

$$T_4 = T_3 - \left[\frac{(T_3 - T_1)(1 - e^D)}{(\dot{m}C_p)_G - e^D} \right] \quad (2)$$

โดยที่ $D = UA \left[\frac{1}{(\dot{m}C_p)_G} - \frac{1}{(\dot{m}C_p)_A} \right]$

ค่าอัตราการไหลของอากาศ $(\dot{m}C_p)_{A_{PAH}}$ ในการทำงานก่อนข้างคังที่ 67.02 kg/s โดยอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{G_{PAH}}$ มีค่าระหว่าง 50 – 70 kg/s ซึ่งจากข้อมูลการเดินเครื่อง และการทดสอบสมรรถนะ พบว่าค่า $(UA)_{PAH}$ มีค่าอยู่ในช่วง 112.50 – 113.70 kW/°C ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 113.10 kW/°C

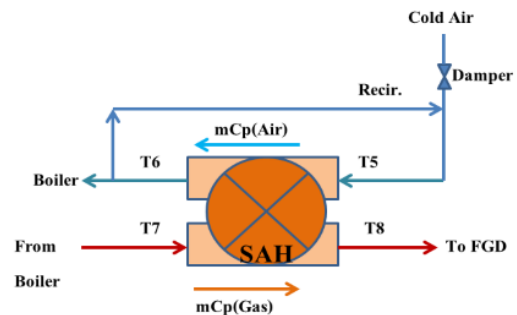
เมื่อนำค่าต่างๆ ไปแทนค่าในสมการข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก๊าซไอเสีย T_4 กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{G_{PAH}}$ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจาก PAH กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{G_{PAH}}$ [7]

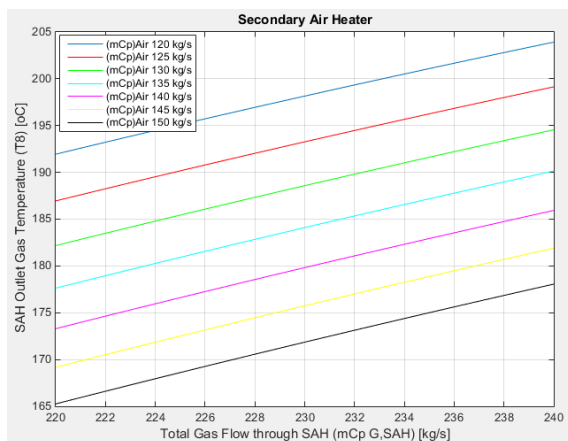
สมดุลพลังงานในเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ ที่แสดงในรูปที่ 4 โดยรวมผลของการป้อนกลับ (bypass) ของอากาศร้อน จะสามารถจัดได้เป็น

$$\begin{aligned} SAH; (\dot{m}C_p)_{G_{SAH}} (T_7 - T_8) = \\ (\dot{m}C_p)_{A_{SAH}} (T_6 - T_1) = \\ UA_{SAH} \left[\frac{(T_7 - T_6) - (T_8 - T_1)}{\ln \left(\frac{T_7 - T_6}{T_8 - T_1} \right)} \right] \end{aligned} \quad (3)$$



รูปที่ 4 อุณหภูมิ และอัตราการไหล ของอากาศ และก๊าซไอเสียในเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ (SAH) [7]

ค่า $(UA)_{SAH}$ จากข้อมูลการเดินเครื่อง และการทดสอบสมรรถนะ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 604.80 – 606.00 kW/°C และมีค่าเฉลี่ย 605.40 kW/°C ซึ่งเมื่อนำข้อมูลต่าง ๆ มาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ออกจากอุปกรณ์ T_8 กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{GSAH}$ และอัตราการไหลของอากาศที่มาจากแดมเปอร์ (Damper), $(\dot{m}C_p)_{ASAH}$ ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสีย T_8 กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{GSAH}$ และอัตราการไหลของอากาศจากแดมเปอร์ $(\dot{m}C_p)_{ASAH}$ [7]

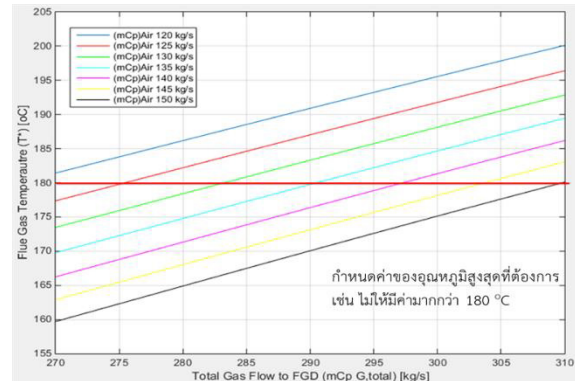
กระแสก๊าซไอเสียหลังจากให้ความร้อนแก่เครื่องอุ่นอากาศปฐมภูมิ และทุติยภูมิแล้ว จะมารวมกัน เพื่อเข้าระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต และเข้าสู่ระบบ FGD ต่อไป โดยอุณหภูมิก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD (T^*) จะสามารถคำนวณได้จาก

$$T^* = \frac{((\dot{m}C_p)_{GSAH} * T_8) + ((\dot{m}C_p)_{GPAH} * T_4)}{(\dot{m}C_p)_{GSAH} + (\dot{m}C_p)_{GPAH}} \quad (4)$$

ทั้งนี้ ค่า T^* จะต้องไม่เกิน 180 °C

เมื่อนำ $(\dot{m}C_p)_{GSAH}$, $(\dot{m}C_p)_{GPAH}$ และอัตราการไหลของอากาศที่ค่าต่างๆ จากรูปที่ 3 และ 5 จะสามารถคำนวณอุณหภูมิ T_4 และ T_8 ซึ่งเมื่อนำมาแทนในสมการ (4) จะสามารถคำนวณอุณหภูมิ T^* โดยความสัมพันธ์

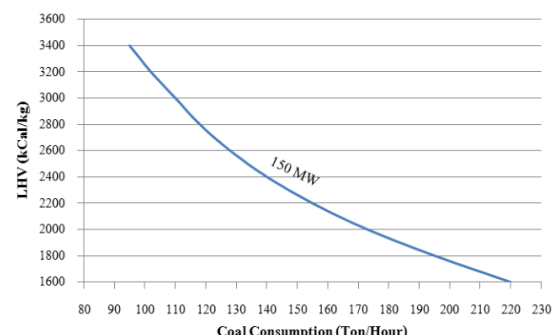
ระหว่างอุณหภูมิ T^* และค่าอัตราการไหลรวมของก๊าซไอเสียที่เข้าระบบ FGD และอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านแดมเปอร์ (Damper) จะแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่เข้าระบบ FGD กับอัตราการไหลรวมของก๊าซไอเสีย และอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านแดมเปอร์ [7]

ในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ถ้ากำหนดค่าอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแดมเปอร์ เพื่อไปยังเครื่องอุ่นอากาศทุติยภูมิ $(\dot{m}C_p)_{ASAH}$ จะสามารถเลือกค่าอัตราการไหลรวมของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{Total}$ ได้หลายค่า ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ T^* ก่อนเข้าระบบ FGD ให้มีค่าไม่เกิน 180°C (บริเวณที่อยู่ต่ำ จากค่า $T^* = 180^\circ\text{C}$)

สำหรับอัตราการป้อนถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิง จะขึ้นอยู่กับค่าความร้อนของถ่านหิน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 อัตราการป้อนถ่านหิน ตามค่าความร้อน (LHV) ของถ่านหิน [7]

เมื่อทราบชนิด และค่าความร้อนของถ่านหินที่ป้อน จะทำให้ทราบอัตราการป้อนถ่านหิน และเนื่องจาก ค่าสัดส่วนของ อากาศ และเชื้อเพลิงถ่านหิน (Air/Fuel Ratio) ถูกกำหนดให้มีค่าค่อนข้างคงที่ที่ 4.98 ดังนั้น จะทำให้ทราบอัตราการไหลของอากาศรวมที่ไหลผ่าน เครื่องอุ่นอากาศ แบบปฐมภูมิ และแบบทุติยภูมิ

ค่าอัตราการไหลของอากาศที่เครื่องอุ่นอากาศแบบ ปฐมภูมิ ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ที่ 67.02 kg/s ดังนั้น จะทราบอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแฉกเปเปอร์ เพื่อ ไปปรับความร้อนที่เครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ

เมื่อกำหนดอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่าน แฉกเปเปอร์ เพื่อไปเข้ารับความร้อนที่เครื่องอุ่นอากาศแบบ ทุติยภูมิ $(\dot{m}C_p)_{ASAH}$ จะสามารถเลือกอัตราการไหลของ ก๊าซไอเสียที่เครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ $(\dot{m}C_p)_{GSAH}$ โดยอุณหภูมิ T^* ไม่เกิน 180°C ในรูปที่ 5 ซึ่งจะได้ อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ (T_8)

เมื่อได้ค่าอัตราการไหลรวมของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{Total}$ และอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่เครื่อง อุ่นอากาศแบบ ทุติยภูมิ $(\dot{m}C_p)_{GSAH}$ จะสามารถ กำหนดค่า อัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่เครื่องอุ่นอากาศ แบบปฐมภูมิ $(\dot{m}C_p)_{GPAH}$ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะได้ อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ (T_4)

ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้เงื่อนไข ดังกล่าว จะพิจารณาจากอัตราความร้อนสูงสุดรวมที่ได้จาก เครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ และทุติยภูมิ โดย

$$Q_{max} = (\dot{m}C_p)_{GPAH} (T_3 - T_4) + (\dot{m}C_p)_{GSAH} (T_7 - T_8) \quad (5)$$

ทั้งนี้ T_3 และ T_7 จะมีค่าค่อนข้างคงที่ ที่ 408.39°C และ 347.88°C ตามลำดับ สำหรับโรงไฟฟ้านี้

ค่าอัตราความร้อนสูงสุดรวมที่คำนวณได้จากสมการ ที่ (5) จะเป็นอัตราความร้อนที่จะทำให้สามารถลดอัตรา การป้อนเชื้อเพลิง โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ลดลง (Rate of coal reduction) จะสามารถคำนวณได้จาก

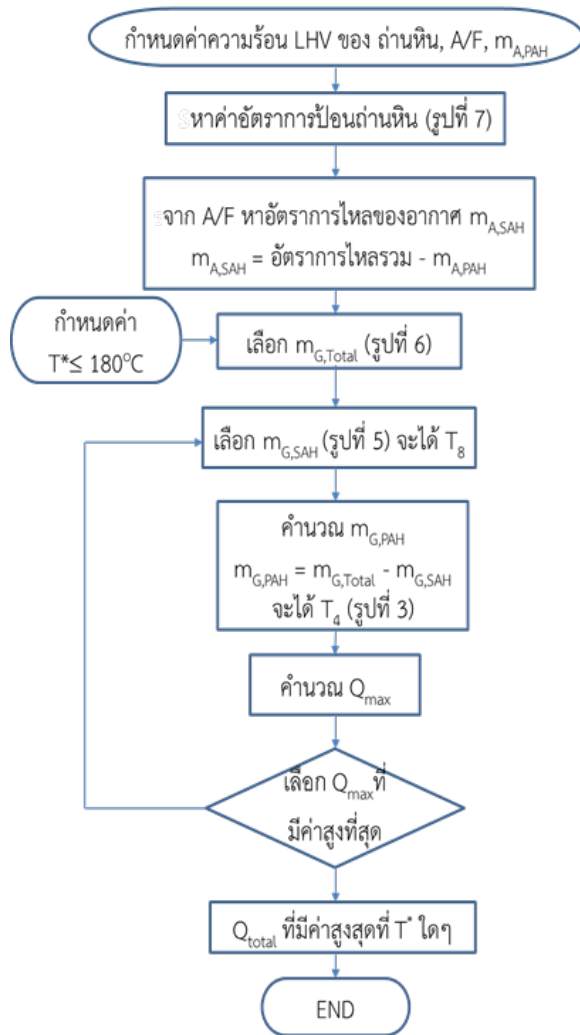
$$\text{Rate of coal reduction} = \frac{Q_{max} \times \text{Boiler Efficiency}}{LHV} \quad (6)$$

3. ขั้นตอนในการคำนวณ

ขั้นตอนในการคำนวณ มีรายละเอียดดังนี้

1. พิจารณาค่าความร้อนของถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่ หม้อไอน้ำ และหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่าน หิน จากรูปที่ (7)
2. หาค่าอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสีย ที่ผ่านเครื่องอุ่นอากาศทั้งสองชนิด ซึ่งได้แก่ เครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ (Primary Air Heater) และเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ (Secondary Air Heater) โดยปริมาณอากาศ รวม (Total Air Flow) ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องอุ่น อากาศทั้งสองชนิดจะต้องมีค่าไม่เกิน 205 kg/s ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ (FGD) สามารถรับได้
3. คำนวณประสิทธิภาพของระบบการเผาไหม้ใน หม้อไอน้ำ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล ของอากาศ และก๊าซไอเสีย ที่ผ่านเครื่องอุ่น อากาศทั้งสองชนิด
4. หาสภาวะการทำงาน หรือสภาวะการเดินเครื่องที่ เหมาะสม ที่ทำให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อน เข้าระบบกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีค่า ลดลง และไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ หม้อไอน้ำ โดยพิจารณาจากค่าอัตราความร้อน สูงสุด (Q_{max})

ขั้นตอนในการคำนวณการหาอัตราการไหลที่ เหมาะสมในเครื่องอุ่นอากาศ จะแสดงในรูปที่ 8



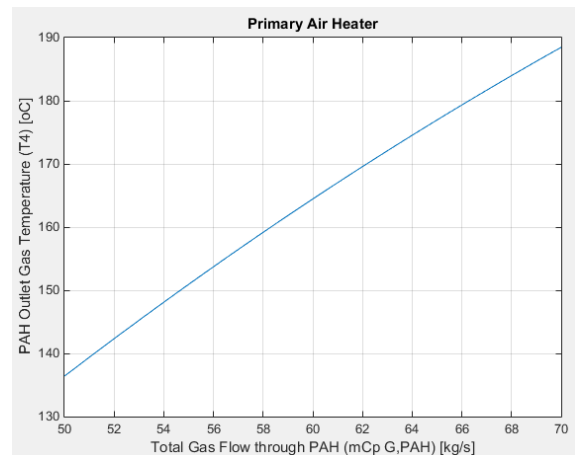
รูปที่ 8 ขั้นตอนในการคำนวณ

4. ผลการศึกษา

จากกรณีศึกษา เมื่อเชื้อเพลิงถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำมีค่า LHV 2,404.22 kcal/kg จากรูปที่ 7 จะได้อัตราการป้อนถ่านหินเท่ากับ 123 Tons/hour อัตราการไหลของอากาศรวม มีค่าเท่ากับ 197.04 kg/s ค่าอัตราการไหลของอากาศที่เครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ที่ 67.02 kg/s ดังนั้น จะทราบอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแฉกเปอร์ เพื่อไปปรับความร้อนที่เครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ มีค่าเท่ากับ 130.02 kg/s พิจารณาที่เครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ ค่าอัตราการไหลของอากาศ $(\dot{m}_{Cp})_{A,PAH}$ ก่อนข้างคงที่

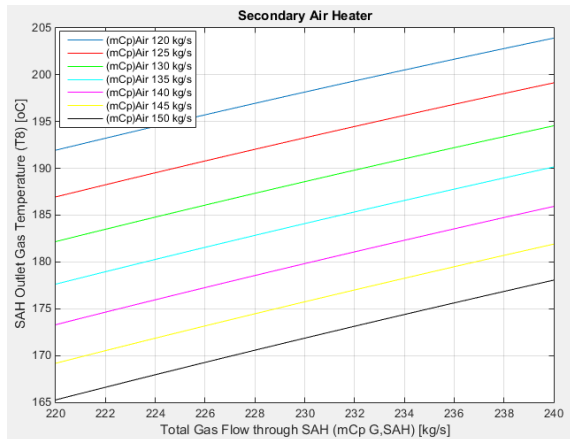
ที่ 67.02 kg/s โดยกำหนดให้อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}_{Cp})_{G,PAH}$ มีค่าระหว่าง 50 – 70 kg/s

เมื่อนำค่าต่างๆ ไปแทนค่าในสมการที่ 2 จะได้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก๊าซไอเสีย T_4 กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}_{Cp})_{G,PAH}$ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ออกจาก PAH กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}_{Cp})_{G,PAH}$ ในกรณีที่เชื้อเพลิงถ่านหินมีค่า LHV 2,404.22 kcal/kg [7]

พิจารณาที่เครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ จากสมการที่ 3 พบว่าสามารถหาค่า T_8 ได้จากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ $(\dot{m}_{Cp})_{A,SAH}$ ตั้งแต่ 120 – 150 kg/s และอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่ออกจากเครื่องอุ่นอากาศแบบทุติยภูมิ $(\dot{m}_{Cp})_{G,SAH}$ มีค่าเท่ากับ 220 – 240 kg/s โดยจะให้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิก๊าซไอเสีย T_8 กับอัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}_{Cp})_{G,SAH}$ ดังแสดงในรูปที่ 10



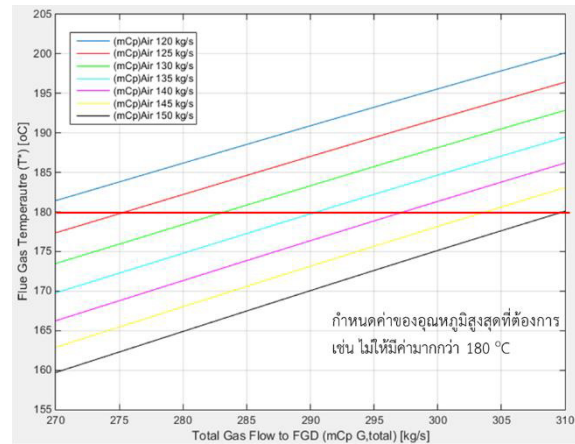
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสีย T_8 กับ อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย $(\dot{m}C_p)_{G_{SAH}}$ ในกรณีที่ เชื้อเพลิงถ่านหินมีค่า LHV 2,404.22 kcal/kg [7]

เมื่อนำค่าอุณหภูมิ T_4 , T_8 , $(\dot{m}C_p)_{G_{SAH}}$, $(\dot{m}C_p)_{G_{PAH}}$ และอัตราการไหลของอากาศที่ค่าต่างๆ จากรูปที่ 9 และ 10 แทนในสมการ (4) จะสามารถคำนวณอุณหภูมิ T^* โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T^* และค่าอัตราการไหลรวมของก๊าซไอเสียที่เข้าระบบ FGD และอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านแดมเปอร์ (Damper) จะแสดงในรูปที่ 11 จากรูปที่ 11 ถ้าต้องการอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD มีค่าไม่เกิน 180°C พื้นที่ใต้เส้นอุณหภูมิ 180°C จะเป็นบริเวณที่การทำงานไม่ทำให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียรวม ก่อนเข้าระบบ FGD เกิน 180°C

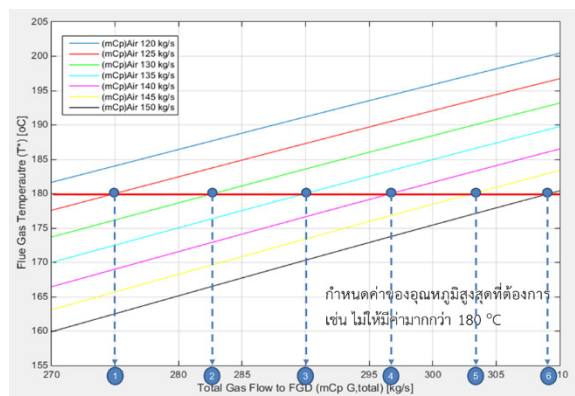
จากการคำนวณข้างต้นที่แสดงจุดต่างๆ บนเส้นกราฟที่อุณหภูมิ T^* ที่ 180°C จะเป็นตำแหน่งที่ให้ $Q_{\max}$ สูงสุดในแต่ละอัตราการไหลของ $(\dot{m}C_p)_{Air}$ ค่าอัตราความร้อนสูงสุด ($Q_{\max}$) ของจุดทั้ง 6 นี้ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย และอัตราความร้อนสูงสุดในแต่ละจุด

	สถานะอ้างอิง	จุดที่ ①	จุดที่ ②	จุดที่ ③	จุดที่ ④	จุดที่ ⑤	จุดที่ ⑥
Total Air Flow (kg/s)	197.04	192.02	197.02	202.02	ไม่พิจารณา เนื่องจากค่า Total Air Flow มีค่ามากกว่า 205 kg/s (เกินข้อกำหนดที่ FGD ขอมรับได้)		
PAH Air Flow (kg/s)	67.02	67.02	67.02	67.02			
SAH Air Flow (kg/s)	130	125	130	135			
Excess O_2 (%)	3.19	3.12	3.18	3.32			
PAH Gas Flow (kg/s)	N/A	52.6	56.4	60			
SAH Gas Flow (kg/s)	N/A	222.6	226.4	230			



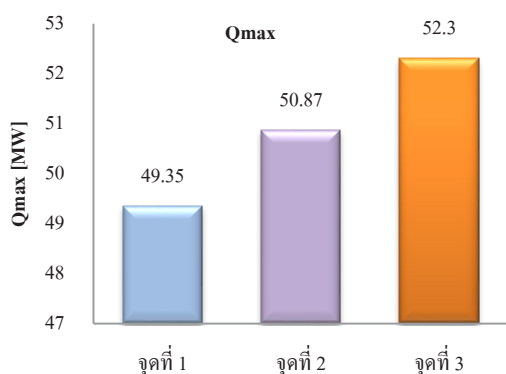
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่เข้าระบบ FGD กับอัตราการไหลรวมของก๊าซไอเสีย และ อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านแดมเปอร์ ในกรณีที่ เชื้อเพลิงถ่านหินมีค่า LHV 2,404.22 kcal/kg [7]



รูปที่ 12 จุดที่มีสภาวะอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสียที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD ได้ที่ 180°C [7]

ตารางที่ 1 (ต่อ) เปรียบเทียบอัตราการไหลของอากาศ, อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย และอัตราความร้อนสูงสุดในแต่ละจุด

	สถานะอ้างอิง	จุดที่ ①	จุดที่ ②	จุดที่ ③	จุดที่ ④	จุดที่ ⑤	จุดที่ ⑥
Boiler Efficiency (%)	81.53	81.55	81.53	81.52			
Qmax (MW)	48.44	49.35	50.87	52.30			



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าอัตราความร้อนในแต่ละจุด ของรูปที่ 12

จากผลการทดสอบปรับอัตราการไหลของอากาศและก๊าซไอเสีย ที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองชนิด พบว่า ควรเดินเครื่องในสถานะของจุดที่ 3 คือ ที่สถานะ ปริมาณอากาศรวม (Total Air Flow) 202.02 kg/s ปริมาณอากาศที่ไหลผ่าน PAH (PAH Air Flow) 67.02 kg/s ปริมาณอากาศที่ไหลผ่าน SAH (SAH Air Flow) 135 kg/s ปริมาณก๊าซไอเสียที่ไหลผ่าน PAH (PAH Gas Flow) 60 kg/s ปริมาณก๊าซไอเสียที่ไหลผ่าน SAH (SAH Gas Flow) 230 kg/s ดังแสดงในตารางที่ 1 สถานะดังกล่าว สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD ได้ 180°C

ในสถานะอ้างอิง คือ สถานะที่อุณหภูมิของก๊าซไอเสียมีค่าสูงถึง 185°C ทำให้โรงไฟฟ้าแม่เมาะต้องลดกำลังการผลิตลง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียรายได้เป็นมูลค่า 77,198.52 บาท ดังนั้น เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศและก๊าซไอเสีย ตามสถานะของจุดที่ 3 ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสีย ได้ไม่เกิน 180°C และลดการสูญเสียรายได้ดังกล่าว

ที่สถานะของจุดที่ 3 เป็นสถานะที่มีค่าอัตราความร้อนสูงสุด (Q_{max}) มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับจุดอื่น ๆ คือ 52.30 MW ดังแสดงในรูปที่ 13 จากสมการที่ (6) จะสามารถคำนวณหาอัตราค่าการลดลงของเชื้อเพลิงได้โดย

$$\text{Rate of coal reduction} = \frac{Q_{max} \times \text{Boiler Efficiency}}{\text{LHV}}$$

จากผลการคำนวณ สามารถลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านลง 15.24 ตันต่อชั่วโมง คิดเป็นมูลค่าประมาณ 208,626.70 บาทต่อวัน (ต้นทุนถ่านหินตันละประมาณ 569.70 บาทต่อวัน) สถานะของจุดที่ 3 เป็นสถานะของการเดินเครื่องที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียให้อยู่ในค่าที่กำหนด และสามารถลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านได้มากที่สุด รวมถึงค่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำที่แสดงในตารางที่ 1 มีค่าเท่ากับสถานะอ้างอิง

5. สรุปผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ ได้จัดทำผังแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสีย ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศแบบปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ของโรงไฟฟ้าถ่านหิน ซึ่งสามารถกำหนดหาแนวทางในการเลือกอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสีย สำหรับถ่านหินที่มีค่าความร้อนต่างๆ กัน เพื่อให้อุณหภูมิของก๊าซไอเสียรวมก่อนเข้าสู่ระบบ FGD มีอุณหภูมิไม่เกิน 180°C

จากกรณีศึกษา คุณสมบัติของเชื้อเพลิงถ่านหิน มีค่า LHV 2,404.20 kcal/kg เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศ และก๊าซไอเสียที่ผ่านเครื่องอุ่นอากาศทั้งสองชนิดตามแนวทางข้างต้น จะได้ปริมาณอากาศรวม (Total Air Flow) 202.02 kg/s ปริมาณอากาศที่ไหลผ่าน PAH

(PAH Air Flow) 67.02 kg/s ปริมาณอากาศที่ไหลผ่าน SAH (SAH Air Flow) 135 kg/s ปริมาณก๊าซไอเสียที่ไหลผ่าน PAH (PAH Gas Flow) 60 kg/s ปริมาณก๊าซไอเสียที่ไหลผ่าน SAH (SAH Gas Flow) 230 kg/s ซึ่งจะสามารถควบคุมอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD ให้อยู่ที่ 180°C และลดการสูญเสียรายได้ ในกรณีที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะต้องลดกำลังการผลิต จากสาเหตุอุณหภูมิของก๊าซไอเสียสูงเกินกว่าที่กำหนด เป็นมูลค่า 77,198.52 บาท รวมถึงประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ยังคงค่าสูง และค่าอัตราความร้อนมีค่าสูงที่สุด ถึง 52.30 MW ซึ่งสามารถลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านลงได้ 15.24 ตันต่อชั่วโมง คิดเป็นมูลค่าประมาณ 208,626.70 บาทต่อวัน (ต้นทุนถ่านหินตันละประมาณ 569.70 บาทต่อวัน) รวมค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ เท่ากับ 285,825.22 บาทต่อวัน

6. รายการสัญลักษณ์

- A คือ พื้นที่ [m^2]
 U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
 T_1 คือ อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้าของ PAH [$^\circ C$]
 T_2 คือ อุณหภูมิอากาศด้านขาออกของ PAH [$^\circ C$]
 T_3 คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียด้านขาเข้าของ PAH [$^\circ C$]

- T_4 คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียด้านขาออกของ PAH [$^\circ C$]
 T_5 คือ อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้าของ SAH [$^\circ C$]
 T_6 คือ อุณหภูมิอากาศด้านขาออกของ SAH [$^\circ C$]
 T_7 คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียด้านขาเข้าของ SAH [$^\circ C$]
 T_8 คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียด้านขาออกของ SAH [$^\circ C$]
 T^* คือ อุณหภูมิก๊าซไอเสียก่อนเข้าสู่ระบบ FGD [$^\circ C$]
 Cp_A คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ [J/kgK]
 Cp_G คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย [J/kgK]
 m_A คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ [kg/s]
 m_G คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสีย [kg/s]
 ΔT_{LMTD} คือ อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก [$^\circ C$]

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และหน่วยงานเดินเครื่องโรงไฟฟ้าแม่เมาะ กองการผลิต 1 โรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. คู่มือการปรับปรุงหม้อไอน้ำ. โรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 8-13, 2014.
- [2] สุนทร สิงหารุ, อติพงศ์ นันทพันธุ์ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การออกแบบเครื่องอุ่นอากาศสำหรับลดอุณหภูมิก๊าซไอเสียของโรงไฟฟ้าแม่เมาะขนาด 150 MW. การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทความร้อน และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน, ศูนย์ฝึกอบรมโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2546.
- [3] อติพงศ์ นันทพันธุ์, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และณัฐวุฒิ ดุษฎี. การประหยัดพลังงานในเตาอบแห้งลำไย โดยลดความชื้นทางอากาศสำหรับห้องเผาไหม้. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549; 13: 8-18.
- [4] Nuntaphan, A., Tiansumwan, J., Kiatsisiroat, T. and Wang, C.C. Performance improvement of thermosyphon heat exchangers by using two kinds of working fluids. *Heat Transfer Engineering*, 2001; 22(4), 28-40.
- [5] Alstom. Preliminary Case Study for Air Preheater Modification. Mae Moh Power Station Unit, 2000; 4-7.

- [6] พิริยะ ทองเชื้อ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การประเมินปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการสันดาป ในหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงถ่านหินบดละเอียด. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2553; 17(1), 53), 60-71.
- [7] พนมกร ทองพัฒนกุล และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การจัดการเชิงความร้อนของระบบนำความร้อนทิ้งกลับคืนในโรงไฟฟ้าถ่านหิน เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเอฟจีดี และตัวอุ่นอากาศ. การประชุมวิชาการ เรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อน และมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 15, โรงแรม แอล รีสอร์ท สมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี, 30 – 31 มีนาคม 2559, 304-312.



การหาคำตอบที่ดีที่สุดของการจัดตารางการใช้ห้องเรียน เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน Optimization of Classroom Scheduling for Energy Conservation

พินัญญู วิริยะรัตน์ และ วรพจน์ เสรีรัฐ

Phinyanut Wiriyarat and Worapod Sereerat

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200
E-mail: w.phinyanut@gmail.com, Telephone Number: 095-4471198

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของการจัดตารางการใช้ห้องเรียนในอาคาร 30 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้ไฟฟ้า และค่าไฟฟ้า ซึ่งถูกเรียกเก็บแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate: TOU) ซึ่งค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากัน โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย 1) ความหนาแน่นของความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา 2) การเลือกขนาดห้องเรียนให้เหมาะสมกับจำนวนนักศึกษาที่ลงทะเบียนในคอนเร็นนั้นๆ และ 3) ผลกระทบด้านอุณหภูมิของห้องเรียนที่เกิดขึ้นจากแสงแดดที่ส่งผลต่อการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศซึ่งคิดเฉลี่ยเป็นร้อยละ 40 ของภาระทางไฟฟ้าภายในห้องเรียน โดยคำตอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ คือ คำตอบที่ดีที่สุดของการจัดตารางการใช้ห้องเรียนเพื่อให้มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด ภายใต้ปัจจัยและข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการใช้ห้องเรียน จากการสรุปผลงานวิจัยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าลดลงมากที่สุด คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยดังกล่าวจะอยู่ในรูปของค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) โดยค่าใช้จ่ายดังกล่าวลดลงร้อยละ 16.60 ส่วนปัจจัยด้านการเลือกขนาดห้องเรียนให้เหมาะสมและการหลีกเลี่ยงการใช้งานห้องเรียนที่ได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากแสงแดดนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการใช้ไฟฟ้าได้ร้อยละ 3.21 ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวในข้างต้น ส่งผลให้ค่าไฟฟ้ารวมมีค่าลดลงร้อยละ 5.74 คิดเป็นค่าไฟฟ้าที่ลดลงในชั้น 2 และ 3 ของอาคาร 30 ปี จำนวน 3,954.97 บาทต่อเดือน

คำสำคัญ: การหาคำตอบที่ดีที่สุด การจัดตารางการใช้ห้องเรียน ลดค่าไฟฟ้า ลดปริมาณการใช้ไฟฟ้า

ABSTRACT

This research aims to develop a mathematical model for classroom scheduling at 30th Anniversary Building, Faculty of Engineering, Chiang Mai University. The objective of this study is to reduce energy consumption and electricity costs which were charged according to the time of consumption (Time-Of-Use (TOU) rates) which the average of electricity costs per unit is different. The factors to be considered include 1) The electricity consumption intensity in each time.

2) Classroom selections appropriately match number of students, and 3) The impacts of increasing classroom's temperature caused by sunlight affecting air conditioning which accounted for 40 percent out of the electricity consumption. The answer is an optimal solution of classroom scheduling to reduce energy consumption and electricity costs considered with factors and constraints of classroom scheduling.

A summary of the research showed the factors which reduced electricity costs the three most. First, the intensity changed of the electricity consumptions in each time, led electricity costs incurred due to cost in the form of peak load (Peak Load), expenses reduced 16.60 percent. Second, classroom selections appropriately match number of students and avoided using classroom which temperature increasing affected, cost reduced by 3.21 percent. As a result, the totally electricity costs reduced by 5.74 percent, accounted for decrease of electricity costs for 3,954.97 baht per months at 2nd and 3rd floors, 30th Anniversary Building.

Keywords: Optimal model, Classroom scheduling, Electricity costs reduction, Electricity consumption reduction.

1. บทนำ

การจัดการด้านการใช้ไฟฟ้า (Demand Side Management) ซึ่งเป็นที่แพร่หลายในปัจจุบัน นับว่าเป็นสิ่งที่ช่วยลดต้นทุนด้านการใช้ไฟฟ้าโดยตรง โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถูกเรียกเก็บค่าใช้ไฟฟ้าแบบอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate: TOU) ซึ่งค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากัน

การจัดตารางการใช้ห้องเรียน เป็นวิธีจัดการด้านการใช้พลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถทำได้ภายในมหาวิทยาลัย เนื่องจากการใช้ห้องเรียนในแต่ละช่วงเวลามีต้นทุนด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน นอกจากนั้น การเลือกใช้ห้องเรียนให้เหมาะสมกับจำนวนนักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียน ปัจจัยด้านทิศทางการวางตัวของห้องเรียนที่ได้รับผลกระทบด้านความร้อนจากแสงแดด จะมีผลทำให้ปริมาณหน่วยการใช้ไฟฟ้าลดลงได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ จัดตารางการใช้ห้องเรียนด้วยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อลดค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และมีการจัดลำดับความสำคัญของการใช้ห้องเรียน โดยคำตอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ คือ คำตอบที่ดีที่สุดของการจัดตารางการใช้ห้องเรียนที่ก่อให้เกิดปริมาณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด ภายใต้ปัจจัยและข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการใช้ห้องเรียน

2. การทบทวนวรรณกรรม

การจัดตารางการใช้ห้องเรียนประกอบด้วยปัจจัยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น จำนวนการใช้ห้องในแต่ละสัปดาห์ ข้อจำกัดของผู้สอนและผู้เรียน จำนวนนักศึกษาในแต่ละตอนเรียน เป็นต้น Erben and Keppler [1] และ Ferdoushi, et al. [2] แต่มีความแตกต่างกันที่เครื่องมือที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา โดย Humo and Vejzovic [3] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการหาคำตอบแบบฮิวริสติก (Heuristic Mathematical) เพื่อจัดเรียงตารางการใช้ห้องเรียนใหม่ ซึ่งทำให้มีการใช้ประโยชน์จากห้องปฏิบัติการที่มีอุปกรณ์มูลค่าสูงอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการจัดการ Sheau Fen Ho, et al. [4] นำเสนอการแก้ปัญหการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัยที่มีความซับซ้อนสูงในการคำนวณ โดยใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้วิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมผสมที่ได้จากการอนุมานจากข้อมูลในอดีต (Genetic Algorithm Constraint-Based Reasoning) พบว่าใช้เวลาในการหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ได้เร็วกว่ามาก แต่วิธีดังกล่าวให้ผลตอบเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดเท่านั้น Oswald and Deva Durai [5] จึงได้นำเสนองานวิจัยการแก้ปัญหการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัยด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคแบบผสม (Hybrid Particle Swarm Optimization) โดยค่าที่ได้นั้นจะ

ใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมมากกว่าและใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่า Al-Betar, et al. [6] ได้แก้ปัญหาการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัยด้วยวิธีการสลับหลายตำแหน่ง (Multi Swap Algorithm) โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) การถ่วงน้ำหนักในแต่ละเส้นทางของทางเลือกซึ่งใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบย้อนรอย (Backtracking ALGORITHM) ร่วมกับวิธีการสลับหลายตำแหน่งเพื่อหาคำตอบ และ 2) เป็นการใช้เทคนิคการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search Algorithm) ร่วมกับวิธีการสลับหลายตำแหน่ง Nouri and Driss [7] แก้ปัญหาการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัยด้วยแบบจำลองมัลติเอเจนต์ (Multi-Agent model) ซึ่งประกอบด้วยเอเจนต์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไป โดยเอเจนต์ในระบบสามารถติดต่อสื่อสารกันได้และเป้าหมายของเอเจนต์หนึ่งสามารถทำให้เป้าหมายของเอเจนต์อื่นๆบรรลุได้ Davoudzadeh, et al. [8] แก้ปัญหาการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัยด้วยแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model) โดยสมการเป้าหมายจะเป็นการจัดตารางการใช้ห้องเรียนให้สอดคล้องกับเป้าหมายหลักซึ่งส่งผลให้การให้คะแนนแบบมีการถ่วงน้ำหนักของขนาดชั้นต่อเป้าหมายรองมีค่าที่ต่ำที่สุดซึ่งรูปอยู่ในรูปของเมทริกซ์ Shimazaki, et al. [9] ได้นำเสนองานวิจัยซึ่งได้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการจัดตารางการใช้งานห้องเรียนโดยใช้แนวคิดของการแก้ปัญหาความสัมพันธ์ของคนและเครื่องจักร (Man-Machine interaction) ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดตารางการใช้ห้องเรียนนั้นจะมุ่งเน้นแก้ปัญหาในส่วนของการนัดเรียนเพิ่มเติมซึ่งเป็นเรื่องที่สามารถเกิดขึ้นบ่อย โดยการแก้ไขปัญหาก็จะกำหนดการเชิงจำนวนเต็มในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยมีสมการเป้าหมายมากกว่าหนึ่งสมการขึ้นไป (Multi-objective optimization)

งานวิจัยนี้จะทำการจัดตารางการใช้ห้องเรียนด้วยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดเนื่องจากง่ายต่อการนำไปใช้งานจริงสามารถปรับเปลี่ยนข้อจำกัดต่างๆ ได้ง่าย โดย Waterer [10] ใช้กำหนดการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มทวิภาค (Binary Integer Linear Programming) ในการ

แก้ปัญหา ซึ่งสมการเป้าหมายของการหาค่าที่ดีที่สุดคือการหาต้นทุนที่ต่ำที่สุดของค่าใช้จ่ายที่เกิดจากที่ว่างภายในห้องเรียน ที่ถูกใช้งาน และ Daskalaki, et al. [11] ใช้กำหนดการเชิงจำนวนเต็ม (Integer Programming) ในการแก้ปัญหา ซึ่งสมการเป้าหมายของการหาค่าที่ดีที่สุดคือการหาต้นทุนของปัจจัยต่างๆ ที่ถูกกำหนดไว้ให้มีค่าต่ำสุด และนอกจากนั้นยังมีการกำหนดตัวแปรที่เป็นค่าคงที่เพื่อใช้ในการบังคับผลตอบให้เป็นไปตามความต้องการในเงื่อนไขเฉพาะเพิ่มเติมอีกด้วย

นอกจากการจัดตารางการใช้ห้องเรียนที่ได้กล่าวมาข้างต้น ก็จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านการใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในรูปแบบของการจัดการช่วงเวลาการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า โดย Shimazaki, et al. [12] ทำการควบคุมพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าโดยตรงของผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์แจ้งเตือนทางสายโทรศัพท์ ซึ่งจะมีการแจ้งเตือนเมื่อปริมาณการใช้ไฟรวมของระบบมีแนวโน้มที่จะเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุด โดยมีผลตอบแทนเป็นเงินเพื่อสร้างแรงจูงใจจากผู้ใช้อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าลงในช่วงที่มีการเตือนของสัญญาณ จากการทดลองพบว่าสามารถลดค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าได้ถึงร้อยละ 35 Kong, et al. [13] ได้ทำการจัดตารางการเข้างานใหม่เพื่อทำให้เกิดพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าที่ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าเนื่องจากค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าลดลง โดยจากการเปรียบเทียบผลหลังทำการปรับปรุงพบว่าค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุดลดลงร้อยละ 19.2 Platts [14] ออกแบบอุปกรณ์ทำความร้อนที่สามารถเก็บพลังงานในรูปแบบของความร้อนได้ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้กระแสไฟฟ้าในการผลิตพลังงานความร้อนในช่วงเวลาที่มีปริมาณการใช้ไฟที่น้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความแตกต่างของปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา Chen, et al. [15] ทำการหาค่าต่ำสุดของค่าไฟฟ้าซึ่งคิดตามช่วงเวลาการใช้งาน (Time of Use) โดยเป้าหมายของการหาค่าที่ดีที่สุดคือการหาคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งส่งผลให้ความแตกต่างของช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงและช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ

มีค่าต่ำสุดโดยทำการย้ายการใช้งานของภาระทางไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีอัตราการคิดค่าไฟฟ้าที่สูงไปยังค่า Liu, et al. [16] ใช้การแก้ปัญหาด้วยวิธีกำหนดการหลายวัตถุประสงค์ (Multi - Objective Optimization Problem) ซึ่งสมการเป้าหมายคือหาค่าต่ำสุดของค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ความล่าช้าในการดำเนินการ และความแตกต่างของการใช้พลังงานในแต่ละช่วง เพื่อลดอัตราส่วนของช่วงเวลามีค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงต่อปริมาณการใช้ไฟเฉลี่ยรวม (Peak-to-average ratio)

จากการศึกษางานวิจัยที่ได้ทำการจัดตารางการใช้ห้องเรียนด้วยวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดที่ได้ศึกษามานั้น มักเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการนำกำหนดการจำนวนเต็มมาใช้และงานวิจัยที่มีจุดประสงค์ในการลดค่าไฟฟ้าลงที่ได้ศึกษานั้น มักจะมีเป้าหมายหลักในการลดการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยสูงและเพิ่มหรือย้ายการใช้ไฟฟ้าไปยังช่วงเวลามีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำ ซึ่งการจัดตารางการใช้ห้องเรียนในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาค่าที่ดีที่สุด โดยใช้กำหนดการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มทวิภาคในการหาคำตอบ เนื่องจากตัวแปรคำตอบสามารถใช้ระบุได้ว่าจะมีการใช้ห้องเรียนนั้น ๆ ในแต่ละชั่วโมงเรียนหรือไม่ (คำตอบของตัวแปรเท่ากับ 1 เมื่อกำหนดให้ห้องเรียนถูกใช้งาน และคำตอบของตัวแปรเท่ากับ 0 เมื่อกำหนดให้ห้องเรียนไม่ถูกใช้งาน) นอกจากนั้นวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดยังสามารถปรับเปลี่ยนข้อจำกัดให้เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ๆ ได้ง่ายอีกด้วย

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การจัดตารางการใช้ห้องเรียนในอาคาร 30 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จะเป็นการจัดตารางการใช้ห้องเรียนที่อยู่ในชั้น 2 และ 3 ของอาคารจำนวน 13 ห้องเรียน ซึ่งห้องเรียนดังกล่าวเป็นการใช้ภาระทางไฟฟ้าที่สามารถควบคุมพฤติกรรมการใช้งานได้ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1 ข้อมูลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ข้อมูลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยข้อมูลพื้นฐานในการจัดตารางการใช้ห้องเรียนซึ่งเป็นข้อมูลโดยทั่วไปในการจัดตารางการใช้ห้องเรียน และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณหน่วยการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้า

3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานในการจัดตารางการใช้ห้องเรียน

เงื่อนไขและข้อจำกัดในการจัดตารางการใช้ห้องเรียนโดยทั่วไปประกอบด้วย 1) จำนวนนักศึกษาในตอเรียนนั้น ๆ 2) จำนวนความต้องการใช้ห้องเรียนวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูป 3) จำนวนนักศึกษาที่ห้องเรียนสามารถรองรับได้สูงสุด โดยเงื่อนไขและข้อจำกัดดังกล่าวจะถูกใช้เป็นข้อมูลในการเขียนสมการข้อจำกัดของการหาค่าที่ดีที่สุด

3.1.2 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้า

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้าในการจัดตารางการใช้ห้องเรียนเพื่อการอนุรักษ์พลังงานประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ 1) ค่าไฟฟ้ารวมของชั้น 2 และ 3 ของอาคาร ในแต่ละช่วงเวลาซึ่งแบ่งตามชั่วโมงเรียน โดยเป็นข้อมูลเฉลี่ยตลอดภาคการศึกษา 2) ปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละห้องเรียนเมื่อห้องเรียนถูกใช้งาน และ 3) ผลกระทบด้านอุณหภูมิของห้องเรียนที่เกิดขึ้นจากแสงแดด ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้า

โดยค่าไฟฟ้ารวมของชั้น 2 และ 3 ของอาคารและปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละห้องเรียนเมื่อห้องเรียนถูกใช้งาน สามารถหาได้จากการคำนวณซึ่งได้ข้อมูลมาจากการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลกำลังไฟฟ้า โดยมีการตรวจสอบความถูกต้องซึ่งอ้างอิงได้จากมิเตอร์วัดหน่วยการใช้ไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลทั้ง 3 ปัจจัย จะถูกใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักในสมการเป้าหมาย

3.2 การสร้างแบบจำลองการจัดตารางการใช้ห้องเรียนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน

แบบจำลองการจัดตารางการใช้ห้องเรียนเพื่อการอนุรักษ์พลังงานจะใช้กำหนดการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม

ทวิภาค (Binary Integer Linear Programming) โดยใช้โปรแกรม Lingo ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขและสมมติฐานซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

3.2.1 เงื่อนไขและสมมติฐานของแบบจำลอง

- ตารางการใช้ห้องเรียนในส่วนของวิชาที่เป็นภาระเบี่ยงเบนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูป (Program Package Registration) ซึ่งเป็นการจัดการตารางการใช้ห้องเรียนที่ไม่สามารถย้ายหรือเปลี่ยนแปลงได้และห้องคอมพิวเตอร์ทั้งหมดไม่สามารถย้ายได้

- การจัดการตารางการใช้ห้องเรียนจะเป็นการจัดสอนเรียนที่มีการเรียนการสอนในชั้น 2 และ 3 ของอาคาร 30 ปี ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2557

- วันจันทร์และวันพฤหัสบดี วันอังคารและวันศุกร์ มีการจัดการตารางการใช้ห้องเรียนเหมือนกัน โดยในวันพุธไม่มีการเรียนการสอน

- ใช้อัตราค่าไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา (TOU Rate) ในการคำนวณค่าไฟฟ้า

- ภาระทางไฟฟ้าทุกประเภทในห้องเรียน ยกเว้นเครื่องปรับอากาศ มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าคงที่เมื่อห้องเรียนถูกใช้งาน

- ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ ในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2557

- ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในห้องเรียนที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากแสงแดด จะมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาปกติ McLain, et al. [17] ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้มาจากการ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยเครื่องปรับอากาศที่ได้รับผลกระทบดังกล่าว จะถูกกำหนดตัวคูณความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 จากความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าปกติ ($PF_{ij} = 1.25$) ซึ่งตัวคูณดังกล่าวจะทำการอธิบายในส่วนของพารามิเตอร์ต่อไป

3.2.2 กำหนดการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มทวิภาค

การจัดตารางการใช้ห้องเรียนจะเป็นการจัดตารางการใช้ห้องเรียน i ในช่วงโมงเรียน j เพื่อลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าให้มีค่าลดลง ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้นั้นจะเป็นการระบุว่าช่วงโมงเรียน j ของห้องเรียน i นั้น ๆ จะถูกใช้งานหรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ดัชนี (Index)

i ดัชนีของห้องเรียน, $i = 1, 2, \dots, 13$

j ดัชนีของช่วงโมงเรียน, $j = 1, 2, \dots, 10$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{ห้องเรียน } i \text{ ในช่วงโมง } j \text{ ถูกใช้งาน} \\ 0 & \text{ห้องเรียน } i \text{ ในช่วงโมง } j \text{ ไม่ถูกใช้งาน} \end{cases}$$

พารามิเตอร์ (Parameter)

PA_i ความต้องการกำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศเมื่อห้องเรียน i ถูกใช้งาน

PE_i ความต้องการกำลังไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเมื่อห้องเรียน i ถูกใช้งาน โดยยกเว้นเครื่องปรับอากาศ

PF_{ij} ตัวคูณของผลกระทบด้านอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศ ในห้องเรียน i ช่วงโมงเรียน j ($PF_{ij}=1$ เมื่อเครื่องปรับอากาศในห้องเรียนดังกล่าวไม่ได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแสงแดด และ $PF_{ij}=1.25$ เมื่อเครื่องปรับอากาศได้รับผลกระทบ)

EC_j ค่าไฟฟ้ารวมในชั้น 2 และ 3 ของอาคารที่เกิดขึ้นในช่วงโมงเรียน j

CLD_m จำนวนห้องเรียนที่ต้องการใช้งานซึ่งสามารถรองรับตอนเรียนที่มีนักศึกษาได้ขั้นต่ำจำนวน m คน

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J EC_j (PF_{ij} PA_i + PE_i) x_{ij} \right\} \quad (1)$$

ข้อจำกัด (Constraint)

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = CLD_m \quad (2)$$

$i \in$ ห้องเรียนที่สามารถรองรับนักศึกษาได้ขั้นต่ำ m คน
 $x_{ij} = 0$ (3)

$i \in$ ห้องเรียนที่มีตารางเรียนสำเร็จรูปเป็นส่วนประกอบ
 หนึ่งของตารางการใช้ห้องเรียน

$j \in$ ชั่วโมงเรียนที่ถูกใช้งานโดยตารางเรียนสำเร็จรูป

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} = \text{ปริมาณตอนเรียนทั้งหมด} \quad (4)$$

$X_{ij} \geq 0 ; \forall i, j$ (5)

$X_{ij} \in \{0, 1\}$ (6)

จากแบบจำลองดังกล่าว เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์
 ในรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มทวิภาค
 (Binary Integer Linear Programming) โดยจาก
 สมการที่ (1) สมการวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นการหาค่าที่ต่ำ
 ที่สุดของผลรวมค่าถ่วงน้ำหนักของปริมาณความต้องการ
 ใช้กำลังไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้น 2 และ 3
 ของอาคาร เมื่อมีการใช้ห้องเรียน i ในชั่วโมงเรียน j
 จากสมการวัตถุประสงค์ดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ สมการที่
 (2) แสดงจำนวนตอนเรียนที่ต้องการใช้ห้องเรียน
 ซึ่งสามารถรองรับนักศึกษาได้ขั้นต่ำ m คน เพื่อใช้ในการ
 เรียนการสอนในแต่ละชั่วโมงเรียน สมการที่ (3) คือ
 ข้อจำกัดในส่วนของวิชาเรียนที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้
 ตารางเรียนสำเร็จรูป ซึ่งไม่สามารถจัดตารางการใช้
 ห้องเรียนทับช่วงเวลาการใช้งานห้องเรียนดังกล่าวได้
 สมการที่ (4) คือข้อจำกัดเพื่อป้องกันการใช้ห้องเรียนทับ
 ซ้อนกัน สมการที่ (5) คือ ข้อจำกัดของตัวแปรตัดสินใจที่
 ต้องเป็นค่าไม่ติดลบ (Non-Negativity Constraint)
 สมการที่ (6) คือ ข้อจำกัดของตัวแปรที่ต้องการคำตอบ
 เป็นจำนวนเต็มทวิภาค (Binary Constraint)

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
 คณิตศาสตร์จะใช้การทดลองแทนค่าคำตอบให้กับตัวแปร
 คำตอบในแบบจำลองขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมาในการ

ทดสอบ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของคำตอบภายใต้
 เงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้หรือไม่

3.4 การแก้ไขปัญหาการจัดตารางการใช้ห้องเรียน กรณีศึกษาห้องเรียนรวม อาคาร 30 ปี

ข้อมูลการจัดตารางการใช้ห้องเรียนรวมจะอ้างอิง
 ข้อมูลจากการใช้ห้องเรียนในชั้น 2 และ 3 ของอาคาร 30
 ปี ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2557 ซึ่งข้อมูลพื้นฐานในการ
 จัดตารางการใช้ห้องเรียนประกอบด้วย จำนวนที่นั่งที่ของ
 แต่ละห้องเรียน การแบ่งชั่วโมงเรียน การใช้ห้องเรียนของ
 วิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูป
 จำนวนตอนเรียนที่มีนักศึกษาลงเรียนในปริมาณต่างๆ และ
 ห้องเรียนที่ควรเลือกใช้ แสดงดังตารางที่ 1-4

ตารางที่ 1 จำนวนที่นั่งของแต่ละห้องเรียน

Index i (Room)	จำนวนที่นั่ง (คน)	Index i (Room)	จำนวนที่นั่ง (คน)
1 (201)	50	8 (214)	45
2 (202)	50	9 (222)	35
3 (203)	45	10 (310)	80
4 (210)	80	11 (311)	80
5 (211)	80	12 (312)	50
6 (212)	45	13 (313)	50
7 (213)	45		

จากตารางที่ 1 แสดงจำนวนที่นั่งของแต่ละห้องเรียน
 ในขนาดต่างๆ ซึ่งการแบ่งขนาดของความต้องการใช้
 ห้องเรียนด้วยจำนวนที่นั่งในงานวิจัยนี้ จะแบ่งขนาด
 ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 10 – 20, 30 – 50 และ 60 – 80
 ที่นั่ง แสดงดังตารางที่ 4 โดยวัตถุประสงค์ของการ
 แบ่งกลุ่มขนาดห้องเรียน คือ ลดข้อจำกัดในส่วนของ
 สัดส่วนปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าต่อจำนวนที่นั่งใน
 ห้องเรียนซึ่งแต่ละห้องเรียนมีสัดส่วนดังกล่าวแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 การแบ่งชั่วโมงเรียนของตารางการใช้ห้องเรียน

Index j	วัน	ช่วงเวลา
1	จันทร์และ	08.00 - 09.30 น.
2	พฤหัสบดี	09.30 - 11.00 น.

ตารางที่ 2 (ต่อ) การแบ่งชั่วโมงเรียนของตารางการใช้ห้องเรียน

Index j	วัน	ช่วงเวลา
3		11.00 – 12.30 น.
4		13.00 – 14.30 น.
5		14.30 – 16.00 น.
6	อังคารและศุกร์	08.00 - 09.30 น.
7		09.30 - 11.00 น.
8		11.00 – 12.30 น.
9		13.00 – 14.30 น.
10		14.30 – 16.00 น.

จากตารางที่ 2 แสดงการแบ่งชั่วโมงเรียนของตารางการใช้ห้องเรียน ซึ่งตารางการใช้ห้องเรียนของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในวันจันทร์จะมีตารางการใช้ห้องเรียนเหมือนวันพฤหัสบดี และในวันอังคารจะมีตารางการใช้ห้องเรียนเหมือนวันศุกร์ โดยในวันพุธจะไม่มีการเรียนการสอน ในส่วนของการแบ่งช่วงเวลาของชั่วโมงเรียนตั้งแต่ 08.00 – 16.00 น. นั้น จะแบ่งออกเป็นช่วงละ 1 ชั่วโมง 30 นาที

ตารางที่ 3 การใช้ห้องเรียนของวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูป

วิชา package (x_{ij})
$x_{19}, x_{24}, x_{38}, x_{45}, x_{47}, x_{55}, x_{57}, x_{59}, x_{510}, x_{67}, x_{69}, x_{610}, x_{77}, x_{79}, x_{710}, x_{87}, x_{104}, x_{117}, x_{119}, x_{1110}, x_{129}, x_{1210}$

จากตารางที่ 3 แสดงการใช้ห้องเรียนของวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูปซึ่งจะไม่อนุญาตให้ใช้ในการจัดให้มีการใช้ห้องเรียนลงในชั่วโมงเรียนของห้องเรียนดังกล่าว เช่น $x_{19} = 0$ คือ $i = 1$ หมายถึงห้องเรียนที่ 1 หรือห้อง 201 และ $j = 9$ หมายถึง ชั่วโมงเรียนที่ 4 ของวันอังคารและวันศุกร์ ถูกใช้เป็นห้องเรียนของวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูป และ $x_{104} = 0$ หมายถึง ห้องเรียนที่

10 หรือห้อง 310 ในชั่วโมงเรียนที่ 4 ของวันจันทร์และวันพฤหัสบดี ไม่สามารถจัดสอนเรียนอื่น ๆ ลงในเวลเวลาดังกล่าวได้ เป็นต้น

ตารางที่ 4 จำนวนตอนเรียนที่มีนักศึกษาลงทะเบียนในปริมาณต่างๆ และห้องเรียนที่ควรเลือกใช้

จำนวนนักศึกษา (คน)	จำนวนตอน เรียน	ห้องเรียนที่ เหมาะสม (Index i)
10 15 20	4 2 4	9
30 40 50	21 11 7	1, 2, 3, 6, 7, 8, 12, 13
60 70 75 80	3 9 1 13	4, 5, 10, 11

จากตารางที่ 4 แสดงตารางจำนวนตอนเรียนที่มีนักศึกษาลงเรียนในปริมาณต่างๆ และห้องเรียนที่ควรเลือกใช้ ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการเลือกใช้ห้องเรียนพิจารณาจากขนาดของห้องเรียนและช่วงเวลาของห้องเรียนที่ไม่ถูกใช้งาน ในกรณีที่จำนวนนักศึกษาที่ลงทะเบียนในตอนเรียนดังกล่าวอยู่ในช่วงคาบเกี่ยวของการแบ่งกลุ่มขนาดของห้องเรียนที่งานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดไว้ (10 – 20, 30 – 50 และ 60 – 80 ที่นั่ง) ห้องเรียนที่เหมาะสมต่อการเลือกใช้จะต้องมีจำนวนที่นั่งเพียงพอต่อการรองรับจำนวนนักศึกษา เช่น ห้องเรียนที่สามารถรองรับตอนเรียนที่มีนักศึกษาลงทะเบียนจำนวน 25 คน ได้จะต้องมีจำนวนที่นั่งไม่ต่ำกว่า 25 ที่นั่ง ซึ่งกลุ่มขนาดของห้องเรียนที่สามารถรองรับได้คือ 30 – 50 ที่นั่ง เป็นต้น

ในส่วนของคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้า ประกอบด้วย ค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้น 2 และ 3 ของอาคาร ในแต่ละชั่วโมงเรียน ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเมื่อห้องเรียนถูกใช้งาน และห้องเรียนที่ได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิจากแสงแดด แสดงดังตารางที่ 5 – 7

ตารางที่ 5 ค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้น 2 และ 3 ของอาคารในแต่ละชั่วโมงเรียน (EC_j)

ชั่วโมงเรียน (j)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ชั่วโมงเรียน (j)	ค่าไฟฟ้า (บาท)
1	426.14	6	352.86
2	638.78	7	737.37
3	866.09	8	410.55
4	789.93	9	13,979.84
5	837.39	10	948.92

จากตารางที่ 5 แสดงค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมงเรียน ซึ่งมีค่าแปรผันโดยตรงกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา โดยชั่วโมงเรียนที่ 4 ของวันอังคารและพฤหัสบดี ($i = 9$) จะเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากเป็นช่วงเวลาเรียนของวิชาพื้นฐาน ซึ่งมีจำนวนนักศึกษาจำนวนมาก ซึ่งนอกจากค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหน่วยการใช้ไฟฟ้าโดยปกติแล้วนั้น จะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) อีกด้วย ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวสามารถทำให้มีค่าลดลงได้โดยการลดความหนาแน่นในการใช้ไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้การย้ายเวลาการใช้ห้องเรียนเพื่อลดความแตกต่างของปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในทุกๆ ช่วงเวลา

ตารางที่ 6 ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเมื่อห้องเรียนถูกใช้งานในสภาวะปกติ ($PF_{ij}PA_i + PE_i$)

ห้องเรียน (i)	กำลังไฟฟ้า (kW)	ห้องเรียน (i)	กำลังไฟฟ้า (kW)
1	4.05	8	4.25
2	4.1	9	3.16
3	3.16	10	17.08
4	9.59	11	9.4
5	8.50	12	5.33
6	4.47	13	4.57
7	4.58		

จากตารางที่ 6 แสดงความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเมื่อห้องเรียนถูกใช้งานซึ่งหาได้จากการสำรวจภาระทางไฟฟ้าที่มีอยู่ในแต่ละห้องเรียนประกอบด้วย พัดลม วงจรแสงสว่าง คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ขยายเสียง และเครื่องฉาย

วิดีโอ ซึ่งภาระทางไฟฟ้าดังกล่าวมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าคงที่เมื่อห้องเรียนถูกใช้งาน เช่น เมื่อห้องเรียนที่ 6 หรือห้อง 212 ถูกใช้งาน ภาระทางไฟฟ้าที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าแบบคงที่ที่มีความต้องการใช้ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ 450 วัตต์ วงจรแสงสว่าง 648 วัตต์ อุปกรณ์ขยายเสียงและเครื่องฉายวิดีโอ 1,865 วัตต์ เป็นต้น ในส่วนของเครื่องปรับอากาศจะใช้ข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดทั้งภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2557 ของแต่ละห้องเรียนที่อยู่ในสภาวะไม่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอื่นเนื่องมาจากแสงแดดมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า 1,514 วัตต์ในช่วงสภาวะปกติ (ช่วงเช้า) ทำให้มีความต้องการกำลังไฟฟ้ารวมทั้งสิ้นเท่ากับ 4.47 กิโลวัตต์ ซึ่งเครื่องปรับอากาศภายในอาคารมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าอยู่แล้ว โดยพฤติกรรมการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละห้องเรียนคือผลรวมของการประมาณค่าความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าจากภาระทางไฟฟ้าที่ได้จากการสำรวจและข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของเครื่องปรับอากาศในแต่ละห้องเรียน

ในส่วนของความแตกต่างของความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศระหว่างห้องเรียนที่มีขนาดและจำนวนที่นั่งในห้องเรียนเท่ากัน เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยซึ่งประกอบด้วย 1) ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ 2) ความเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน 3) ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาปัจจัยด้านความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากผลกระทบด้านอุณหภูมิจากแสงแดดที่ส่องบางห้องเรียนในช่วงบ่าย แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลกระทบด้านอุณหภูมิจากแสงแดด

ห้องเรียนที่ได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิจากแสงแดดในช่วงบ่าย (PF_{ij})
$PF_{64}, PF_{65}, PF_{69}, PF_{610}, PF_{74}, PF_{75}, PF_{79}, PF_{710}, PF_{84}, PF_{85}, PF_{89}, PF_{810}, PF_{124}, PF_{125}, PF_{129}, PF_{1210}, PF_{134}, PF_{135}, PF_{139}, PF_{1310}$

จากตารางที่ 7 แสดงข้อมูลของห้องเรียนที่ได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิจากแสงแดดในช่วงบ่าย ซึ่งห้องเรียน i ในช่วงโมงเรียน j จะมีค่าพารามิเตอร์ $PF_{ij} = 1.25$ โดยค่าดังกล่าวคือค่าถ่วงน้ำหนักของการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 25 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิห้องที่โดนแสงแดดส่องในช่วงบ่าย เช่น $PF_{64} = 1.25$ หมายถึง ห้องเรียนที่ 6 หรือห้อง 212 ในช่วงโมงเรียนที่ 4 ได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากแสงแดดส่อง ดังนั้นค่าการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศของห้องเรียนที่ 6 จะมีค่าเท่ากับ $1,514 \times 1.25$ เท่ากับ 1,892.5 กิโลวัตต์ เป็นต้น

3.5 Lingo Model

การใช้โปรแกรม Lingo ในการหาคำตอบประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ 1) การประกาศตัวแปร 2) ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ 3) สมการเป้าหมายและข้อจำกัด รายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1

MODEL :

```
SETS :
ROOM /1..13/ : PA, PE;
PERIOD /1..10/ : EC;
LINK(ROOM,PERIOD) : PF, X;
CLASSROOMDEMAND /1..3/ : CLD;
ENDSETS
```

ส่วนที่ 2

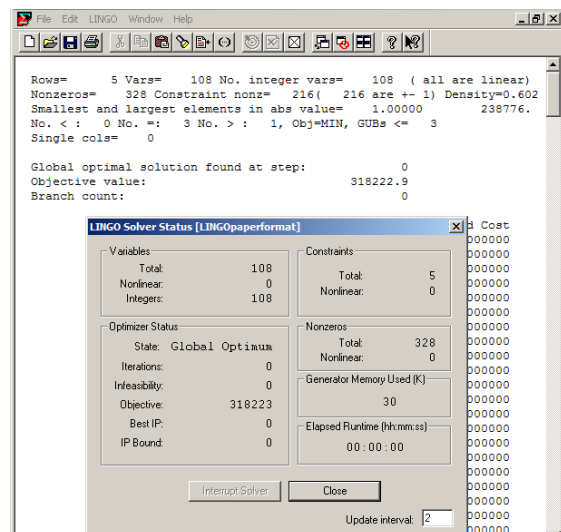
DATA :

```
!PA = A/C Power Demand in Each Room ;
PA = 0, 0, 0, 4.38, 3.29, 1.51, 1.62, 1.29, 0, 12.67, 4.99, 2.37, 1.61 ;
!PE = All Load Except A/C Power Demand in Each Room ;
PE = 4.05, 4.1, 3.16, 5.21, 5.21, 2.96, 2.96,
2.96, 3.16, 4.41, 4.41, 2.96, 2.96 ;
!EC = Electricity Cost in Each Period ;
EC = 426.14, 638.78, 866.09, 789.93, 837.39,
352.86, 737.37, 410.55, 13979.84, 948.92 ;
!PF = Thermal Condition Factor for Air Conditioner ;
PF = 1 1 1 1 1 1 1 1 1, 1 1 1 1 1 1 1 1 1,
1 1 1 1 1 1 1 1 1, 1 1 1 1 1 1 1 1 1,
1 1 1 1 1 1 1 1 1, 1 1 1 1.25 1.25 1 1 1 1.25 1.25,
1 1 1 1.25 1.25 1 1 1 1.25 1.25,
1 1 1 1.25 1.25 1 1 1 1.25 1.25, 1 1 1 1 1 1 1 1 1,
1 1 1 1 1 1 1 1 1,
1 1 1 1 1 1 1 1 1, 1 1 1 1.25 1.25 1 1 1 1.25 1.25,
1 1 1 1.25 1.25 1 1 1 1.25 1.25 ;
CLD = 10, 39, 26 ;
OVERALLCLASSEDEMAND = 75 ;
ENDDATA
```

ส่วนที่ 3

```
!objective function ;
MIN = @SUM(ROOM(i) :
@SUM(PERIOD(j) : EC(j) * ((PF(i) * PA(i) + PE(i)) * X(i,j))) ;
!constraint ;
!programe package registration ;
X(1,9) = 0 ; X(2,4) = 0 ; X(3,8) = 0 ; X(4,5) = 0 ; X(4,7) = 0 ;
X(5,5) = 0 ; X(5,7) = 0 ; X(5,9) = 0 ; X(5,10) = 0 ; X(6,7) = 0 ;
X(6,9) = 0 ; X(6,10) = 0 ; X(7,7) = 0 ; X(7,9) = 0 ; X(7,10) = 0 ;
X(8,7) = 0 ; X(10,4) = 0 ; X(11,7) = 0 ; X(11,9) = 0 ; X(11,10) = 0 ;
X(12,9) = 0 ; X(12,10) = 0 ;
!10-20 seats requirement, 35 seat rooms, for 10 class ;
@SUM(PERIOD(j) : X(9,j)) = CLD(1) ;
!30-50 seats requirement, 45 - 50 seat rooms, for 39 class ;
@SUM(PERIOD(j) :
X(1,j)+X(2,j)+X(3,j)+X(6,j)+X(7,j)+X(8,j)+X(12,j)+X(13,j)) = CLD(2) ;
!60-80 seats requirement, 80 seat rooms, for 26 class ;
@SUM(PERIOD(j) : X(4,j)+X(5,j)+X(10,j)+X(11,j)) = CLD(3) ;
!1 room for 1 class in each period >= 75 class ;
@SUM(ROOM(i) : @SUM(PERIOD(j) :
X(i,j))) >= OVERALLCLASSEDEMAND ;
!binary constraint ;
@FOR(LINK : @BIN(X)) ;
END
```

จากการใช้โปรแกรม Lingo ในการหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยคำตอบที่ได้มีค่าของสมการเป้าหมายคือ 318,223.0 วัตต์-บาท แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การใช้โปรแกรม Lingo ในการหาคำตอบ

3.6 วิเคราะห์คำตอบ

จากการหาคำตอบที่ดีที่สุดของการจัดตารางการใช้ห้องเรียนด้วยโปรแกรม Lingo ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายในส่วนของการวิเคราะห์คำตอบโดยเปรียบเทียบระหว่างตารางการใช้ห้องเรียนเดิมและตารางการใช้ห้องเรียนหลังจากที่มีการปรับปรุง โดยรูปแบบของคำตอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ จะเป็น

ตารางการใช้ห้องเรียนของแต่ละห้อง ซึ่งระบุสถานะการถูกใช้ของห้องเรียนว่าชั่วโมงเรียนใดๆ ของแต่ละวันมีการใช้งานห้องเรียนนั้นๆ หรือไม่ โดยจากการปรับปรุงตารางการใช้ห้องเรียนดังกล่าวสามารถแสดงตารางการใช้ห้องเรียนเดิมและตารางการใช้ห้องเรียนหลังจากที่มีการปรับปรุง ดังตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 ตารางการใช้ห้องเรียนเดิม

	j (จ, พก)					j (อ, ศ)				
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									R	
2				R						
3								R		
4					R		R			
5					R		R		R	R
6							R		R	R
7							R		R	R
8							R			
9										
10				R						
11							R		R	R
12									R	R
13										

ตารางที่ 9 ตารางการใช้ห้องเรียนหลังปรับปรุง

	j (จ, พก)					j (อ, ศ)				
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1									R	
2				R						
3								R		
4					R		R			
5					R		R		R	R
6							R		R	R
7							R		R	R
8							R			
9										
10				R						
11							R		R	R
12									R	R
13										

■ ห้องเรียนถูกใช้งาน

R Program Package Registration

จากตารางที่ 8 และ 9 แสดงตารางการใช้ห้องเรียนเดิมและหลังปรับปรุง โดยตัวอย่างของการอ่านค่าผลตอบ เช่น $i = 1$ และ $j = 1$ ของตารางที่ 8 (ตารางการใช้ห้องเรียนเดิม)

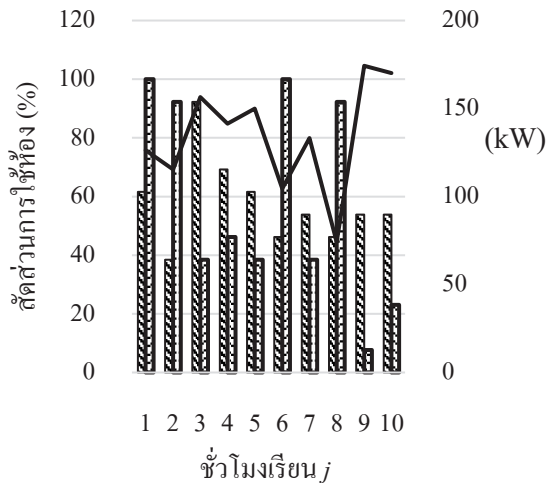
หมายถึงห้อง 201 ในช่วงเวลา 08.00 – 09.30 น. ของวันจันทร์และวันพฤหัสบดีจะไม่ถูกใช้งาน แต่หากทำการเทียบวันเวลาดังกล่าวกับตารางที่ 9 (ตารางการใช้ห้องเรียนหลังปรับปรุง) จะพบว่าห้องเรียนไม่ถูกกำหนดให้มีการใช้งาน ในส่วนของวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูปซึ่งไม่มีการย้ายช่วงเวลาการใช้ห้องเรียนจะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ R ซึ่งการเปรียบเทียบสัดส่วนการใช้ห้องเรียนตามจำนวนที่นั่ง แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สัดส่วนการใช้ห้องเรียนใน 1 สัปดาห์โดยแบ่งตามขนาดห้องเรียน

ขนาด ห้องเรียน (ที่นั่ง)	ตารางเดิม (ตอนเรียน)	ตารางใหม่ (ตอนเรียน)	เพิ่ม/ลด (ตอนเรียน)
35	14	20	6
45	60	56	-4
50	54	46	-8
80	66	72	6

จากตารางที่ 10 เปรียบเทียบสัดส่วนการใช้ห้องเรียนขนาดต่างๆ พบว่าตารางการใช้ห้องเรียนใหม่ลดจำนวนการใช้ห้องที่มีขนาดใหญ่ที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ามากเกินไปจนเกินไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลให้จำนวนหน่วยการใช้ไฟฟ้าลดลง

นอกจากหน่วยการใช้ไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการเลือกใช้งานห้องที่เหมาะสมแล้วนั้น ในส่วนของค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเป็นอีกส่วนหนึ่งที่สามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้ โดยปริมาณความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงเรียนดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สัดส่วนการใช้ห้องเรียนและการใช้ไฟฟ้า

จากรูปที่ 2 แสดงกราฟสัดส่วนการใช้ห้องเรียนเทียบกับปริมาณความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงเรียน ซึ่งพบว่าสัดส่วนการใช้ห้องเรียนของตารางการใช้ห้องเรียนหลังปรับปรุงและความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ารวมของชั้น 2 และ 3 ของอาคารมีความสัมพันธ์แบบผกผันกัน โดยหากมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ารวมสูง จะมีการใช้ห้องเรียนน้อยในช่วงเวลานั้น และหากมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้ารวมต่ำ จะมีการใช้ห้องเรียนมาก ยกตัวอย่างเช่น ในชั่วโมงเรียนที่ 6 มีสัดส่วนของการใช้ห้องเรียนร้อยละ 100 ซึ่งในชั่วโมงเรียนดังกล่าวมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า 65 กิโลวัตต์ และในชั่วโมงเรียนที่ 9 มีสัดส่วนของการใช้ห้องเรียนร้อยละ 8 ซึ่งในชั่วโมงเรียนดังกล่าวมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้า 105 กิโลวัตต์ เป็นต้น โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นดังกล่าว ส่งผลให้ความแตกต่างของความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลามีค่าลดลง ซึ่งหมายถึงค่าความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าลดลง

4. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการจัดการตารางการใช้ห้องเรียนโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดหน่วยการใช้ไฟฟ้าและลดค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยที่มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละ

ช่วงเวลาซึ่งยังคงจำนวนการใช้ห้องเรียนในแต่ละขนาดสำหรับการเรียนการสอน โดยนอกจากพิจารณาข้อจำกัดในการจัดการตารางการใช้ห้องเรียน โดยทั่วไปแล้วนั้นยังพิจารณาปัจจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้า ประกอบด้วย ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเมื่อห้องเรียนนั้นๆ ถูกใช้งาน ค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นอาคารที่จัดการการใช้ห้องเรียนอยู่ ผลกระทบด้านอุณหภูมิที่ส่งผลให้เครื่องปรับอากาศมีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยหลังการปรับปรุงการจัดการตารางการใช้ห้องเรียนพบว่าสามารถลดค่าไฟฟ้าภายในชั้น 2 และ 3 ของอาคาร 30 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ลงร้อยละ 5.74 คิดเป็นเงิน 3,954.97 บาทต่อเดือน ซึ่งการลดลงดังกล่าวเกิดขึ้นจากการลดค่าไฟฟ้าในส่วน of ค่าความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดลงร้อยละ 16.60 และการลดค่าไฟฟ้าตามหน่วยการใช้งานลงร้อยละ 3.21 ซึ่งผลลัพธ์ของการลดค่าไฟฟ้าตามหน่วยการใช้งาน เป็นการปรับปรุงตารางการใช้ห้องเรียนที่อยู่ภายใต้ข้อจำกัดเรื่องการใช้ห้องเรียนสำหรับวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูป โดยการใช้ห้องเรียนของวิชาดังกล่าวจะไม่ถูกจัดใหม่ในงานวิจัยนี้ ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าตามหน่วยการใช้งานของตารางการใช้ห้องเรียนหลังปรับปรุง มีค่าลดลงน้อย ซึ่งได้รับผลกระทบมาจากการจัดวิชาที่เป็นการลงทะเบียนแบบใช้ตารางเรียนสำเร็จรูปซึ่งมักถูกจัดในช่วงบ่าย ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่มีราคาไฟฟ้าตามหน่วยการใช้งานสูงกว่าในช่วง Off Peak นอกจากนี้ในบางห้องเรียนยังได้รับผลกระทบด้านอุณหภูมิจากแสงแดดส่องอีกด้วย

การเปรียบเทียบผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยสามารถทำได้โดยจำลองพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากตารางการใช้ห้องเรียนหลังปรับปรุง โดยข้อมูลที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าประกอบด้วย ตารางการใช้ห้องเรียนใหม่ ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าของห้องเรียนเมื่อถูกใช้งาน ข้อมูลผลกระทบด้านอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากแสงแดด โดยรายละเอียดสรุปผลการปรับปรุง แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบผลการปรับปรุง

	ก่อน ปรับปรุง	หลัง ปรับปรุง	ลดลง (ร้อยละ)
Unit (หน่วย)	10,803.87	10,663.56	140.31 (1.30%)
Unit Cost (บาท)	55,836.94	54,041.99	1,794.95 (3.21%)
Peak Cost (บาท)	13,008.25	10,848.24	2,160.01 (16.60%)
Total Cost (บาท)	68,845.19	64,890.22	3,954.97 (5.74%)

จากตารางที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบผลการปรับปรุงหลังทำการวิจัย โดยการลดลงของหน่วยการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าเกิดขึ้นได้จากการสลับใช้ห้องเรียนซึ่งห้องเรียนที่มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยจะถูกจัดลำดับให้มีการใช้งานก่อน รวมไปถึงการใช้งานห้องเรียนที่มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนนักศึกษาและความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าไม่เหมาะสม ซึ่งการลดลงของการใช้ไฟฟ้าเนื่องจากปัจจัยดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 10 โดยตัวอย่างของการเลือกใช้งานขนาดห้องเรียนให้มีความเหมาะสมกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าเมื่อห้องเรียนถูกใช้งาน เช่น ในกลุ่มขนาดห้องเรียน 30 – 50 ที่นั่ง มีการลดการใช้ห้องเรียนที่ 13 หรือห้อง 313 จำนวน 4 ชั่วโมงเรียน และมีการเพิ่มการใช้ห้องเรียนที่ 3 หรือห้อง 203 จำนวน 4 ชั่วโมงเรียน ซึ่งห้องเรียนที่ 13 มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าในภาวะปกติเท่ากับ 4.57 กิโลวัตต์ และห้องเรียนที่ 3 มีความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าในภาวะปกติเท่ากับ 3.16 กิโลวัตต์ ซึ่งห้องเรียนที่ 13 มีค่าดังกล่าวสูงกว่าห้องเรียนที่ 3 สูงถึงร้อยละ 44.62 $((4.57 - 3.16) / 3.16) \times 100$ ซึ่งหมายความว่า หากย้ายการใช้ห้องเรียนจากห้องที่ 13 ไปยังห้องที่ 3 จะสามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้ร้อยละ 44.62 หรือคิดเป็นเงินประมาณ 8 บาทต่อชั่วโมงเรียน โดยการลดลงดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการย้ายตารางการใช้ห้องเรียนในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าใน

จำนวนมาก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุด ในกรณีศึกษาของงานวิจัยหลังปรับปรุงคือชั่วโมงเรียนที่ 2 ของวันจันทร์และวันพฤหัสบดีจะมีค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 146.32 กิโลวัตต์ ลดจากเดิมที่มีค่าความต้องการใช้พลังไฟฟ้าสูงสุดในชั่วโมงเรียนที่ 4 ของวันอังคารและวันศุกร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 175.46 กิโลวัตต์ โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของการใช้ไฟฟ้าสามารถเปรียบเทียบได้จากตารางที่ 8 และ 9 ยกตัวอย่างเช่น ในชั่วโมงเรียนที่ 2 ของวันจันทร์และวันพฤหัสบดี ($j = 1$) จากเดิมที่มีการใช้ห้องเรียนจำนวน 13 ห้องเรียน ในตารางการใช้ห้องเรียนเดิม ($i = 1$ ถึง $i = 13$ ในชั่วโมงเรียนที่ $j = 1$) มีการลดจำนวนการใช้ห้องเรียนเหลือ 5 ห้องเรียน ในตารางการใช้ห้องเรียนใหม่ เป็นต้น

ในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้ โดยทำการเปลี่ยนค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั่วโมงเรียนนั้นๆ ตามขอบเขตของของพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าที่ต้องการใช้อ้างอิง เช่น การจัดการตารางสอนในทุกอาคารเรียนของคณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยอ้างอิงค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละชั่วโมงของทั้งมหาวิทยาลัย เป็นต้น เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวออกแบบมาเพื่อรองรับการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในส่วนของกระบวนการว่าตอนเรียนใช้ห้องเรียนและชั่วโมงเรียนใด โดยการระบุตอนเรียนจะอ้างอิงจากปริมาณนักศึกษาที่ลงทะเบียนในตอนเรียนนั้นๆ กับจำนวนที่นั่งในห้องเรียน ซึ่งปริมาณความต้องการใช้ห้องเรียนที่มีจำนวนที่นั่งในขนาดต่างๆ จะถูกระบุไว้ในสมการ (3) ซึ่งหากต้องการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการจัดการตารางการใช้ห้องเรียนที่มีจำนวนห้องเรียนไม่มาก สามารถเพิ่มดัชนีเพื่อระบุตอนเรียนเพิ่มเติมได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Erben,W. and Keppler, J. A genetic algorithm solving a weekly course timetabling problem. Lecture Notes in Computer Science, 1996; 1153: 198-211.
- [2] Ferdoushi, T., Das, P. K., Akhand, M. A. H. Highly constrained university course scheduling using modified hybrid particle swarm optimization. 2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), 13-15 February, Bangladesh, 2014.
- [3] Humo, E., Vejzovic, Z. A mathematical model for classroom - period schedule defragmentation. EUROCON 2007 The International Conference on Computer as a Tool, 9-12 September, Poland, 2007; 2030-2033.
- [4] Sheau Fen Ho, I., Safaai, D., Hashim, S. Z. M. A Study on PSO-Based university course timetabling problem. International Conference on Advanced Computer Control, 22-24 January, Singapore, 2009; 648-651.
- [5] Oswald, C., Deva Durai C, A. Novel hybrid PSO algorithms with search optimization strategies for a University Course Timetabling Problem. 2013 Fifth International Conference on Advanced Computing (ICoAC), 18-20 December, India, 2013; 77-85.
- [6] Al-Betar, M. A., Khader, A. T., Muslih, O. A multiswap algorithm for the university course timetabling problem. 2012 International Conference on Computer & Information Science (ICCIS), 12-14 June, Malaysia, 2012; 301-306.
- [7] Nouri, H.E., Driss, O.B. (2013). Distributed model for university course timetabling problem. International conference on Computer Applications Technology (ICCAT), 20-22 January, Tunisia, 2013; 1-6.
- [8] Davoudzadeh, M., Rafah, R., Rashidi, R. A linear solution for the university timetabling problem. 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 28-30 December, United Arab Emirates, 2009; 54-57.
- [9] Shimazaki, S., Sakakibara, K., Matsumoto, T. Iterative optimization techniques based on man - machine interaction for timetabling problems. 2014 IEEE 7th International Workshop on Computational Intelligence and Applications, 7-8 November, Japan, 2014; 125-129.
- [10] Waterer, h. A zero - one integer programming model for room assignment at the university of auckland. The University of Auckland Library, 1995; 63-70.
- [11] Daskalaki, S., Birbas, T., Housos, E. An integer programming formulation for a casestudy in university timetabling. *European Journal of Operational Research* 2003; 153(1): 117–135.
- [12] Nannery, P. R., Foltin, M. S. The application of peak activated rates a technique to load management. *IEEE Power Engineering Review*, 1985; PER-5(11): 40-41.
- [13] Kong, W., Chai, T., Ding, J., & Yang, S. Multifurnace optimization in electric smelting plants by load scheduling and control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014; 11(3): 850 - 862.
- [14] Platts, J. Power/energy : Electrical load management : The British experience, part II: Local and remote controls coupled with off-peak rates have forced nighttime demand to record highs. *IEEE Spectrum*, 1979; 16(4): 66-68.
- [15] Chen, K., Chen, D., Liao, Y., Chen, X. The optimization of time-of-use pricing considering reliability. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), 10-13 June, Sweden, 2013; 1-4.
- [16] Liu, Y., Yuen, C., Huang, S., Hassan, N. U., Wang, X., Xie, S. Peak-to-average ratio constrained demand-side management with consumer's preference in residential smart grid. *IEEE Signal Processing Society*, 2014; 8(6): 1084-1097.
- [17] Mclain, H. A., Goldenberg, D., Karnitz, M. A., Anderson, S. D., and Ohr, S.Y. Benefits of replacing residential central air conditioning systems, ORNL/CON-11, 1985.



การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลเพื่อการ บรรเทาอุทกภัยด้วยแบบจำลอง เฮก-เรสซิม Operation of Bhumibol Reservoir for Flood Mitigation by HEC-ResSim Model

เจนวิทย์ เกษมทรัพย์* และ ธนพร สุปรียาสิลป์

Janewit Kasemsup* and Thanaporn Supriyasilp

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

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

*E-mail : janewit_kasemsup@cmu.ac.th, Telephone Number : 053-944156, Fax. : 053-892376

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางปฏิบัติการที่เหมาะสมสำหรับอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในการบรรเทาอุทกภัย โดยการประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-ResSim ภายใต้เกณฑ์ควบคุมระดับน้ำตอนบน 4 เส้น ประกอบด้วย ระดับควบคุมตอนบนเดิม ระดับควบคุมตอนบนที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 ระดับควบคุมตอนบนที่ผู้ศึกษาเสนอ 1 และ 2 และ การใช้ระดับควบคุมตอนบนทั้ง 4 เส้น พร้อมกับการควบคุมปริมาณน้ำที่สถานีควบคุม P.17 ไม่ให้เกินความจุสูงสุดเท่ากับ 1,815 ลบ.ม./วินาที อีก 4 กรณีรวมทั้งหมดเป็น 8 กรณี โดยทำการจำลองในช่วงฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงปลายเดือนตุลาคม ในปี พ.ศ. 2549 และ 2554 ซึ่งเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมครั้งใหญ่ในประเทศไทย และได้ใช้แบบจำลอง HEC-HMS มาช่วยในคำนวณปริมาณน้ำสมทบในลุ่มน้ำย่อยเพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลอง HEC-ResSim ผลการศึกษาพบว่าระดับควบคุมตอนบนที่ดีที่สุดสำหรับการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในการบรรเทาอุทกภัย ในปี พ.ศ. 2549 และ 2554 คือระดับควบคุมตอนบนที่ผู้ศึกษานำเสนอ 1 ร่วมกับการควบคุมปริมาณน้ำที่สถานี P.17 และระดับควบคุมตอนบนที่ปรับปรุงขึ้นใหม่ในปี พ.ศ. 2555 ร่วมกับการควบคุมปริมาณน้ำที่สถานี P.17 จะสามารถช่วยในการบรรเทาน้ำท่วมที่สถานีควบคุม P.17 ตามลำดับ

ABSTRACT

The aim of this research was to determine the appropriate rule curve for Bhumibol Reservoir in order to mitigate flood by applying HEC-ResSim. Four upper rule curves, URCs, which were old upper rule curve, adjusted upper rule curve after year 2012, proposed upper rule curve-1, and proposed upper rule curve-2, were compared and analyzed together with downstream control at station P.17 to not exceed the capacity of 1,815 cms. Thus, there were 8 case studies: each URCs with and without downstream control. The model situations had applied the data during rainy season (May to October) in year 2006 and 2011, when the big flood in Thailand occurred. Apart from the HEC-ResSim, the HEC-HMS model was also used to calculate side flows as the input data for the HEC-ResSim model. The results showed that the best Bhumibol reservoir operation that could help alleviate the flood in year 2006 and 2011 at the control station (P.17) the most were the proposed upper rule curve-1 with downstream control and the adjusted upper rule curve after year 2012 with downstream control, respectively.

1. บทนำ

จากวิกฤตอุทกภัยที่ผ่านมาโดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2554 ได้สร้างความเสียหายในหลายพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ทั้งด้านความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ความเสียหายต่อเศรษฐกิจ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ซึ่งอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลมีส่วนสำคัญในการช่วยบรรเทาปัญหาอุทกภัยโดยการชะลอน้ำด้วยการเก็บกักน้ำในช่วงน้ำหลาก และระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้การดำเนินการอ่างเก็บน้ำมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องนำแบบจำลองมาช่วยในจำลองการปฏิบัติการระบบอ่างเก็บน้ำ เลือกใช้เกณฑ์ปฏิบัติการให้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับสถานการณ์ต่าง ๆ ภายใต้วัตถุประสงค์และข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เพื่อประโยชน์ในการใช้เป็นข้อมูลของการตัดสินใจ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลเพื่อบรรเทาปัญหาอุทกภัยเป็นหลักและให้มีปริมาณน้ำกักเก็บในปลายฤดูฝนมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2. ทฤษฎีและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ

การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ หมายถึง การเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำและการส่งน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆโดยมีการวางแผนล่วงหน้าว่าจะเก็บกักและส่งน้ำจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละช่วงเวลาเป็นปริมาณเท่าใดและมีการปฏิบัติการตามแผนที่วางไว้ทราบเท่าที่สภาพในอนาคตเป็นไปได้ตามที่คาดคะเนไว้

การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ จะใช้โค้งปฏิบัติการของอ่างเก็บน้ำ (Reservoir operation rule curves) มากำหนดนโยบายของการกักเก็บและการปล่อยน้ำเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ โดยโค้งปฏิบัติการประกอบด้วยอย่างน้อย 2 เส้น คือ ระดับควบคุมตอนบน (Upper rule curve, URC) และระดับควบคุมตอนล่าง (Lower rule curve, LRC) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ระดับควบคุมตอนบน (Upper rule curve, URC) คือระดับน้ำตอนบนที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานของอ่าง

เก็บน้ำในแต่ละเดือน จำเป็นต้องรักษาระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำไม่ให้มีระดับน้ำสูงเกินกว่าระดับควบคุมตอนบน ทั้งนี้เพื่อสำรองปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างระดับน้ำควบคุมตอนบนกับระดับน้ำเก็บกักสูงสุดไว้สำหรับป้องกันน้ำท่วม

ระดับควบคุมตอนล่าง (Lower rule curve, LRC) คือระดับน้ำที่ควบคุมต่ำสุดในอ่างเก็บน้ำของแต่ละเดือนที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานไม่ให้มีระดับน้ำต่ำกว่าระดับควบคุมตอนล่าง ทั้งนี้เพื่อสำรองปริมาณน้ำที่อยู่ระหว่างระดับน้ำควบคุมตอนล่างกับระดับน้ำเก็บกักต่ำสุดไว้สำหรับการเพาะปลูกในช่วงฤดูแล้งที่มีการขาดแคลนน้ำ

อย่างไรก็ตามกรมชลประทาน [1] จัดทำแผนการบริหารจัดการเขื่อนเก็บน้ำหลัก และจัดทำแผนบริหารน้ำประจำปี 2555 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงระบบการบริหารจัดการน้ำของประเทศ และในเขื่อนเก็บน้ำหลักให้มีประสิทธิภาพ และเพิ่มขีดความสามารถป้องกันและบรรเทาปัญหาอุทกภัยที่จะเกิดขึ้นในแต่ละปี ด้วยการปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ทั้ง 33 แห่ง ด้วยการใช้แบบจำลอง HEC-3 ทั้งนี้ในการศึกษานี้จะเน้นศึกษาเฉพาะระดับควบคุมตอนบน (URC) เท่านั้นโดยขอบเขตในการศึกษานี้จะพิจารณาที่ URC เดิม URC ที่กรมชลประทานได้จัดทำในปี พ.ศ. 2555 URC ที่ผู้ศึกษาเสนอ 1 และ 2 และการใช้ URC ทั้ง 4 เส้นพร้อมกับการควบคุมปริมาณน้ำที่สถานีควบคุม P.17 รวมทั้งหมดเป็น 8 กรณีโดยทำการจำลองเฉพาะอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลในปี พ.ศ. 2549 และ 2554

2.2 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองหลักที่ใช้ในการศึกษาคือ แบบจำลอง HEC-ResSim รุ่นที่ 3.1 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้เพื่อช่วยในการจำลองการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ ประกอบด้วย การจำลองของลักษณะทางกายภาพและการดำเนินการของระบบอ่างเก็บน้ำและการกำหนดเส้นลำน้ำเชื่อมโยงกัน รวมถึงจุดควบคุม แบบจำลองสามารถสร้างทางเลือกในการจำลองสถานการณ์ที่แตกต่างกันและแสดงผลที่ได้ในแต่ละสถานการณ์นั้นๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการวางแผนและช่วยในกระบวนการตัดสินใจการ

ดำเนินการของระบบอ่างเก็บน้ำเพื่อใช้ตอบสนองตามวัตถุประสงค์สำหรับการควบคุมน้ำท่วม การบรรเทาภัยแล้ง การผลิตกระแสไฟฟ้า และความต้องการใช้น้ำด้านท้ายน้ำ นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันสำหรับการใช้ควบคุมน้ำท่วมในการปล่อยน้ำกรณีฉุกเฉินเพื่อให้บรรเทาน้ำท่วมได้ เช่น วีระพงษ์ [2] ได้ทำการศึกษาการจัดการและควบคุมน้ำท่วม โดยใช้แบบจำลอง HEC-ResSim ในลุ่มน้ำน่านตอนล่าง และได้้นำแบบจำลอง HEC-HMS มาจำลองสร้างข้อมูลการไหลของน้ำเพื่อสร้างเป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง HEC-ResSim พิจารณาในกรณีที่มีพื้นที่ที่มีอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์อย่างเดียวและในกรณีที่มีอ่างเก็บน้ำเขื่อนแควน้อย จำลองสถานการณ์ออกเป็น 2 แบบ คือ การดำเนินการแบบธรรมชาติที่ใช้เกณฑ์ปฏิบัติการควบคุมในการบริหารจัดการน้ำ และการดำเนินการควบคุมน้ำท่วมที่จุดควบคุมท้ายน้ำ โดยแยกออกเป็น 8 กรณี พิจารณาการบริหารจัดการน้ำในปี พ.ศ.2538 ที่เกิดน้ำท่วมใหญ่ และทำการเปรียบเทียบเพื่อหาอัตราการไหลที่เขื่อนและที่จุดควบคุม จากนั้นทำการหาช่วงเวลาที่เกิดน้ำท่วมในแต่ละกรณี เพื่อหาสถานการณ์ที่ดีที่สุดมาบริหารจัดการน้ำท่วมในพื้นที่ สุธรรม [3] ได้ทำการศึกษาการจัดการระบบอ่างเก็บน้ำของโครงการกัวคองมาและกัวลม จังหวัดลำปาง โดยนำแบบจำลอง HEC-ResSim และแบบจำลอง Wusmo Version 4.60 มาช่วยทำการวิเคราะห์หาความต้องการน้ำของพืช ใช้ข้อมูลอุทกวิทยาปี 2536-2546 (10 ปี) โดยได้ทำการศึกษาสภาพการจัดการน้ำในกรณีที่มีอ่างเก็บน้ำกัวลมอย่างเดียวและกรณีที่มีการสร้างอ่างเก็บน้ำกัวคองมาโดยกรณีศึกษาแบ่งออกเป็น 6 กรณี โดยแยกตามสภาพปริมาณน้ำต้นทุนและการกำหนดพื้นที่ชลประทาน ผลจำลองเกณฑ์ปฏิบัติการที่สร้างขึ้นใหม่เมื่อนำมาทดสอบในกรณีปีที่มีน้ำน้อยพบว่าสามารถบริหารจัดการน้ำไม่ให้เกิดการขาดแคลนได้ตลอดทั้งปี แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง HEC-ResSim สามารถนำมาใช้บริหารจัดการน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แบบจำลอง HEC-ResSim ประกอบไปด้วย 3 โมดูล คือ Watershed Setup Reservoir Network

และ Simulation ซึ่งแต่ละโมดูลมีวัตถุประสงค์และหน้าที่ที่แตกต่างกัน

Watershed Module Setup สร้างและกำหนดขอบเขตของระบบลุ่มน้ำ รวมไปถึงโครงข่ายของแม่น้ำ

Reservoir Network Module กำหนดโครงสร้างของโครงข่ายแม่น้ำโดยกำหนดค่าการเคลื่อนตัวของน้ำในแต่ละช่วงของลำน้ำที่จุดพิจารณา กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพและการดำเนินการของการจำลองอ่างเก็บน้ำ และสร้างทางเลือกในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่จะใช้ในการวิเคราะห์

Simulation Module จำลอง การดำเนินการประมวลผลของทั้งระบบ และแสดงผลค่าจากการจำลอง

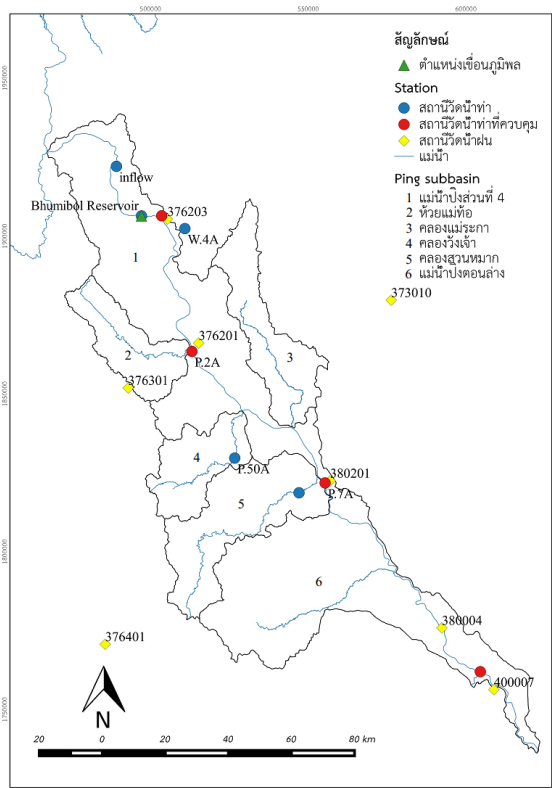
นอกจากนี้เนื่องจากในการศึกษาจะต้องทำการคำนวณค่าปริมาณน้ำสมทบ (side flow) ผู้ศึกษาจึงได้นำแบบจำลอง HEC-HMS มาใช้ในการศึกษาหาปริมาณน้ำสมทบ ซึ่งแบบจำลอง HEC-HMS เป็นแบบจำลองระบบอุทกวิทยาที่สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำท่าที่มาจากน้ำฝน และขั้นตอนการไหลทั้งในสภาพธรรมชาติและสภาพที่มีการควบคุม และยังสามารถในการจำลองกราฟน้ำท่าในช่วงเวลานาน ๆ คำนวณการกระจายน้ำท่าในรูปแบบ Grid-cell ของพื้นที่รับน้ำฝน การเคลื่อนตัวของน้ำท่า (Routing) ผ่านแม่น้ำ เกษม [4] ทำการศึกษาสภาพอุทกวิทยาในลุ่มน้ำน่าน โดยทำการหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อการประเมินน้ำท่ารายวันในพื้นที่ลุ่มน้ำ พบว่าแบบจำลอง HEC-HMS สามารถประเมินหาน้ำท่ารายวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 พื้นที่ศึกษา

1) ลุ่มน้ำปิง

ลุ่มน้ำปิงมีพื้นที่รับน้ำฝนทั้งหมดประมาณ 34,536.83 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 5 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ ลำพูน ตาก กำแพงเพชร และ นครสวรรค์ โดยมีอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่อำเภอสามเงา จังหวัดตากเป็นแนวกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนและตอนล่าง ประกอบด้วย 20 ลุ่มน้ำสาขา โดยในการศึกษานี้ จะทำการคำนวณหาปริมาณน้ำสมทบก่อน โดยใช้

แบบจำลอง HEC-HMS และใช้แบบจำลอง HEC-ResSim กำหนดระบบอ่างเก็บน้ำโดยเริ่มจากจุด Inflow จนถึงจุดควบคุมที่สถานี P.17 ที่ อ.บรรพตพิสัย จ.กำแพงเพชร โดยบริเวณจุดนี้มีปัญหาน้ำท่วมซ้ำซากเนื่องจากสภาพทางกายภาพไม่เหมาะสมในการระบายน้ำ โดยเฉพาะบริเวณนี้ที่มีสภาพลำน้ำค่อนข้างแคบโดยมีความจุสูงสุดในการระบายน้ำอยู่ที่ 1,850 ลบ.ม./วินาที และเป็นที่ราบลุ่มทำให้เกิดน้ำท่วมสลับต่ง ดังแสดงในรูปที่ 1 และแผนผังระบบลุ่มน้ำในรูปที่ 2



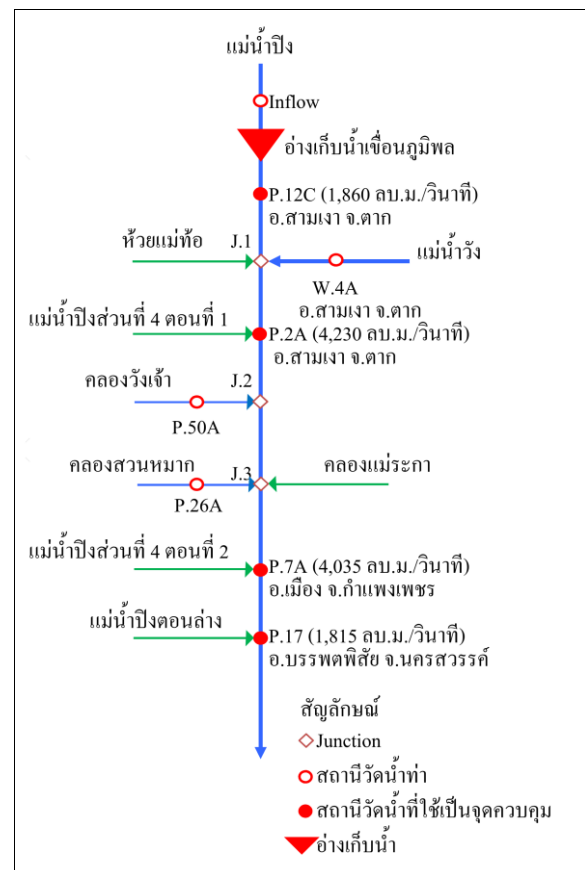
รูปที่ 1 แผนที่แสดงที่ตั้งสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

2) อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล

อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลเป็นอ่างเก็บน้ำอเนกประสงค์ขนาดใหญ่สร้างกั้นแม่น้ำปิงและมีอิทธิพลต่อการบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำปิง และลุ่มน้ำเจ้าพระยาที่อยู่ด้านท้ายเขื่อน ปริมาณกักเก็บสูงสุดเท่ากับ 13,462 ล้านลูกบาศก์เมตร (ที่ระดับ 260 ม.รทก.) ปริมาณกักเก็บต่ำสุดเท่ากับ 3,000 ล้านลูกบาศก์เมตร (ที่ระดับ 213 ม.รทก.)

3. วิธีการดำเนินการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลอง HEC-ResSim เป็นแบบจำลองหลักในการศึกษาการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลเพื่อบรรเทาน้ำท่วม ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบด้วยวิธีการศึกษา 5 ขั้นตอน คือ 1. การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา 2. การหาปริมาณน้ำสมทบด้วยแบบจำลอง HEC-HMS 3. การจำลองระบบอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลอง HEC-ResSim และทำการสอบเทียบ 4. การจำลองสถานการณ์และประมวลผล 5. การสรุปผลการการศึกษา



รูปที่ 2 แผนผังระบบลุ่มน้ำในพื้นที่ศึกษา

3.1 การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

1) ข้อมูลน้ำท่า

รวบรวมข้อมูลสถิติน้ำท่ารายวันของกรมชลประทานจำนวน 7 สถานี เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับปรับเทียบกับผลจากแบบจำลองสถานีดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

2) ข้อมูลน้ำฝน

รวบรวมข้อมูลสถิติน้ำฝนรายวันของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 8 สถานี เพื่อใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำสมทบในแบบจำลอง HEC-HMS ดังแสดงตำแหน่งที่ตั้งและค่าฝนเฉลี่ยรายเดือน (มม.) ของสถานีวัดฝนที่ใช้ในการศึกษา ในปี พ.ศ. 2549 และ 2554 ในตารางที่ 2

3) ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์

ประกอบด้วยข้อมูลขอบเขตลุ่มน้ำ เส้นลำน้ำหลัก เส้นลำน้ำย่อยของลุ่มน้ำปิง และตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่า สถานีน้ำฝน อ่างเก็บน้ำ รวมถึงจุด Inflow ของอ่างเก็บน้ำที่ใช้ในการศึกษา เพื่อใช้ในการคำนวณเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ทางอุทกวิทยา ได้แก่ ค่า $CN I_a t_p$ และค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสถานีน้ำฝนในแบบจำลอง HEC-HMS และใช้กำหนดตำแหน่งโครงข่ายลุ่มน้ำในแบบจำลองทั้งสอง

4) ข้อมูลทางกายภาพและการจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำ

รวบรวมข้อมูลจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยข้อมูลทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำ ประกอบด้วย ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำ-พื้นที่ผิว-ปริมาตรการกักเก็บ ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับอัตราการไหลที่จุดออกและทางระบายน้ำล้น และข้อมูลพื้นฐานของอ่างเก็บน้ำ ส่วนข้อมูลการบริหารน้ำรายวันประกอบด้วย ปริมาณน้ำไหลเข้า และปริมาณน้ำที่ระบายออกทั้งที่จุดหลักและทางระบายน้ำล้น ระดับกักเก็บ ปริมาตรกักเก็บ และ URC เดิม URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 ซึ่งจะเน้นการบรรเทาอุทกภัยเป็นหลักในการดำเนินการโดยจะเร่งระบายน้ำล้นให้เร็วขึ้นจาก URC เดิม และ URC ที่ผู้ศึกษาเสนอ 1 และ 2 ซึ่ง URC ทั้ง 2 ที่ผู้ศึกษาเสนอจะอิงตาม URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 โดย URC ที่ผู้ศึกษาเสนอ 1 จะอยู่เหนือ URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 เล็กน้อยเพื่อลดการระบายน้ำ และในขณะเดียวกันจะทำการกักเก็บน้ำให้เต็มอ่างเก็บน้ำในช่วงปลายเดือน ต.ค. ส่วน URC ที่ผู้ศึกษาเสนอ 2 จะอยู่

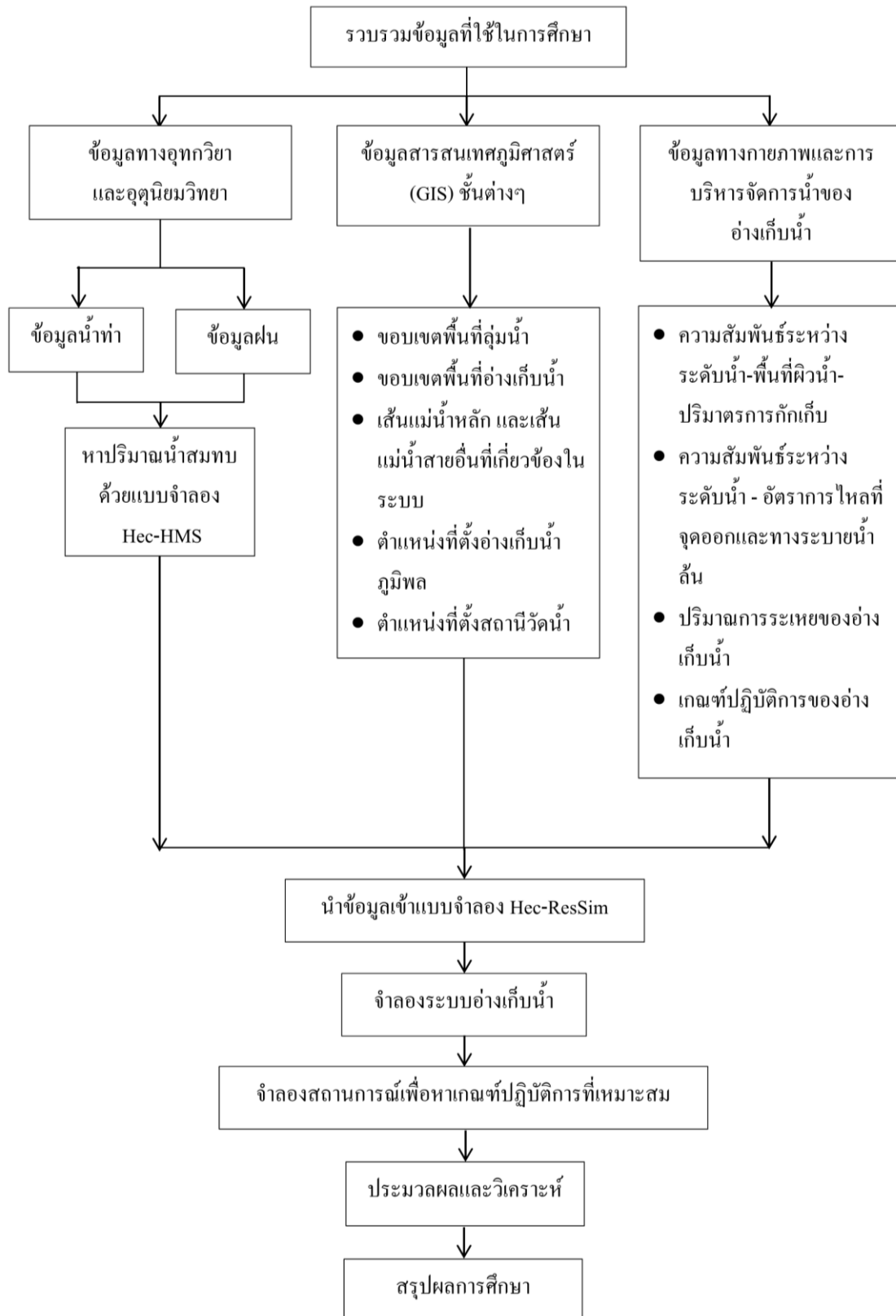
ต่ำกว่า URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 ลงมา เพื่อเพิ่มการระบายน้ำให้มากขึ้นแต่จะมีความชันของเส้นในช่วงปลายฤดูฝนมากเพราะเนื่องจากต้องการเก็บกักน้ำเพื่อให้เต็มอ่างเก็บน้ำในช่วงปลายเดือน ต.ค. และเนื่องจากผู้ศึกษาต้องการให้มีปริมาณน้ำเต็มอ่างเก็บน้ำ จึงได้ปรับให้ URC ที่นำเสนอ 1 และ 2 อยู่ในระดับเก็บกักสูงสุดในช่วงปลายเดือน ต.ค. ดังแสดงในรูปที่ 4

3.2 การจำลองปริมาณน้ำสมทบด้วยแบบจำลอง HEC-HMS

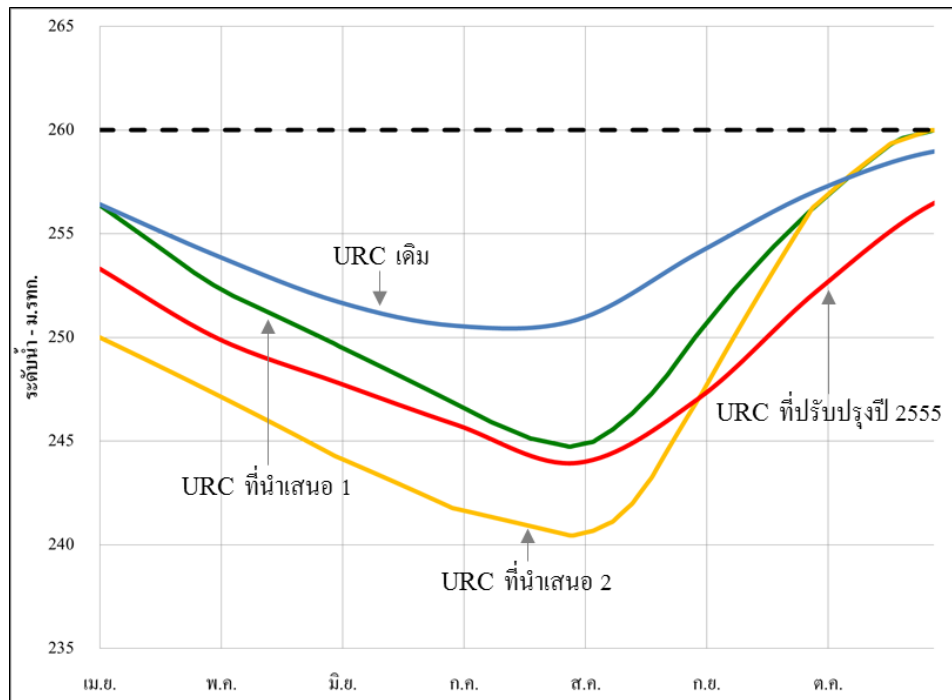
ในการจำลองด้วยแบบจำลอง HEC-HMS จะทำการหาปริมาณน้ำสมทบในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนล่างในส่วนของกลุ่มน้ำย่อยที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่าบริเวณจุด outlet ในพื้นที่ ประกอบด้วย 5 กลุ่มน้ำย่อย และจุดนำเข้าปริมาณน้ำท่ารายวันของสถานี W.4A P.50A P.26A โดยมีสถานี P.12C P.2A P.7A และ P.17 เป็นจุดควบคุมและผลการสอบเทียบค่าผลรวมของปริมาณน้ำในช่วงเดือน พ.ค. - ต.ค. ปีพ.ศ. 2549 และ 2554 จากแบบจำลอง HEC-HMS กับค่าที่วัดได้จริง โดยใช้ค่า Term of the relative error (%RE) ดังแสดงในตารางที่ 3 ทั้งนี้ข้อมูลปริมาณน้ำสมทบที่ได้มานั้นจะถูกนำเข้าแบบจำลอง HEC-ResSim เพื่อจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในลำดับต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณน้ำสมทบของกลุ่มน้ำคลองแม่ระกา

ตารางที่ 1 ตำแหน่งสถานีน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

สถานีรหัส	ตำแหน่ง		หมายเหตุ
	ละติจูด	ลองจิจูด	
P.12C	17.14.34	99.01.59	จุดควบคุม
P.2A	16.51.16	99.07.23	จุดควบคุม
P.50A	16.32.56	99.15.00	
P.26A	16.26.57	99.26.27	
P.7A	16.28.38	99.31.06	จุดควบคุม
P.17	15.56.06	99.58.36	จุดควบคุม
W.4A	17.12.22	99.06.08	



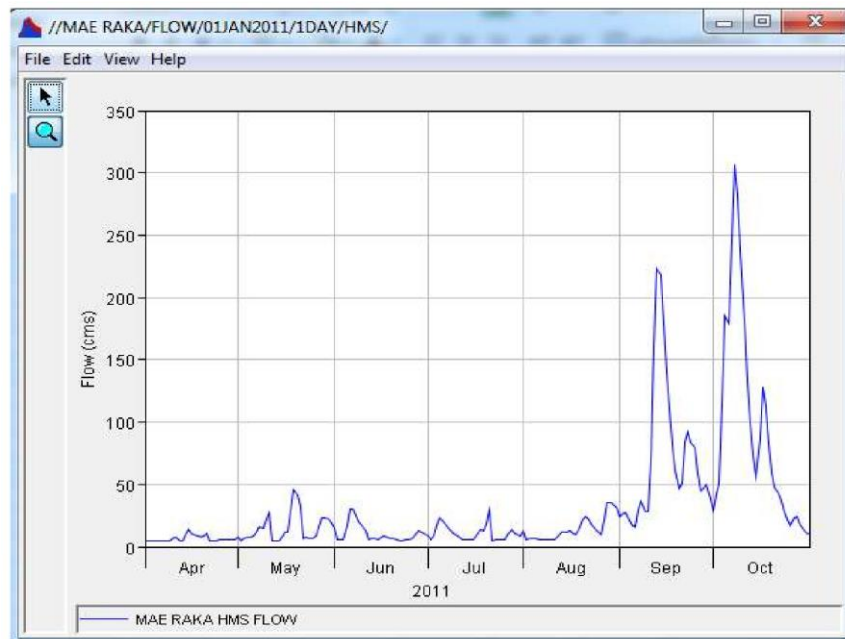
รูปที่ 3 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 4 ระดับควบคุมตอนบน (URC) ทั้ง 4 เส้น

ตารางที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งและค่าฝนเฉลี่ยรายเดือน (มม.) ของสถานีวัดฝนที่ใช้ในการศึกษาปี พ.ศ. 2549 และ 2554

ปี พ.ศ.	รหัส สถานี	ตำแหน่ง		ค่าฝนเฉลี่ยรายเดือน (มม.)					
		ละติจูด	ลองจิจูด	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
2549	373010	17.00.01	99.43.00	7.85	8.42	6.30	7.41	13.54	4.68
	376201	16.52.42	99.08.36	10.09	5.00	3.49	2.82	11.41	6.09
	376203	17.14.00	99.03.00	11.47	9.20	1.51	5.23	14.60	7.76
	376301	16.45.00	98.56.00	8.99	6.91	11.52	7.81	9.50	5.69
	376401	16.00.57	98.51.56	10.40	5.38	9.98	9.29	10.54	2.28
	380004	16.03.39	99.51.48	4.33	4.27	2.85	3.21	5.83	2.99
	380201	16.29.00	99.32.00	8.82	6.51	4.38	5.82	8.82	3.51
	400007	15.53.00	100.01.00	2.56	4.30	1.75	3.75	6.63	1.70
2554	373010	17.00.01	99.43.00	9.15	6.41	5.92	6.31	14.26	6.84
	376201	16.52.42	99.08.36	6.42	4.54	6.44	3.38	7.95	9.05
	376203	17.14.00	99.03.00	7.45	5.31	2.42	2.99	7.57	7.13
	376301	16.45.00	98.56.00	11.78	13.26	9.99	12.09	12.33	8.13
	376401	16.00.57	98.51.56	8.88	9.00	10.06	8.95	8.76	6.59
	380004	16.03.39	99.51.48	8.56	2.97	3.77	7.21	10.87	9.78
	380201	16.29.00	99.32.00	9.59	4.08	8.71	3.51	12.29	7.24
	400007	15.53.00	100.01.00	6.47	4.67	8.33	7.58	7.00	4.70



รูปที่ 5 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณน้ำสมทบที่ได้จากแบบจำลอง HEC-HMS ของลุ่มน้ำคลองแม่ระกา ในปี พ.ศ.2554

ตารางที่ 3 ตารางสรุปผลการสอบเทียบค่าผลรวมของปริมาตรน้ำจากแบบจำลอง HEC-HMS กับค่าที่วัดได้จริง ในช่วงเดือนพ.ค. - ต.ค.ของปี พ.ศ. 2549 และ พ.ศ. 2554

สถานีวัดน้ำ	พ.ศ. 2549			พ.ศ. 2554		
	ปริมาณน้ำรวมทั้งหมด (ล้าน ลบ.ม.)		ความคลาด เคลื่อน (%)	ปริมาณน้ำรวมทั้งหมด (ล้าน ลบ.ม.)		ความคลาด เคลื่อน (%)
	ค่าจำลอง	ค่าสำรวจ		ค่าจำลอง	ค่าสำรวจ	
P.12C	2,426.22	2,124.04	14.23	3,746.62	4,035.12	-7.15
P.2A	6,458.40	6,885.06	-6.20	8,913.95	8,790.94	1.40
P.7A	8,587.99	7,707.05	11.43	12,054.36	10,812.98	11.48
P.17	10,201.76	9,712.83	5.03	14,896.98	12,292.95	21.18

3.3 การจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลอง HEC-ResSim

การจำลองระบบอ่างเก็บน้ำจะทำการสร้างโครงข่ายลำน้ำในพื้นที่ศึกษา พร้อมทั้งกำหนดข้อมูลทางกายภาพและการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำ โดยในการศึกษาครั้งนี้กำหนดจุดควบคุมที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ สถานี P.12C P.2A P.7A และ P.17 มาทำการสอบเทียบกับปริมาณน้ำที่รายงานที่วัดได้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ในปี พ.ศ. 2554 และทำการจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำภายใต้สถานการณ์ที่ต่างกัน ในปี

น้ำมาก พ.ศ. 2549 และ 2554 พร้อมกำหนดช่วงเวลาที่ใช้จำลองข้อมูล เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบในแต่ละสถานการณ์ต่าง ๆ ที่พิจารณาของแบบจำลอง

4. ผลการดำเนินการศึกษา

4.1 ผลการสอบเทียบ

การสอบเทียบแบบจำลอง HEC-ResSim ได้กำหนดปี พ.ศ. 2554 มาใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง โดยจะใช้ปริมาณน้ำที่อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลปล่อยรายวัน มาทำการรวมกับปริมาณน้ำสมทบที่คำนวณได้จาก

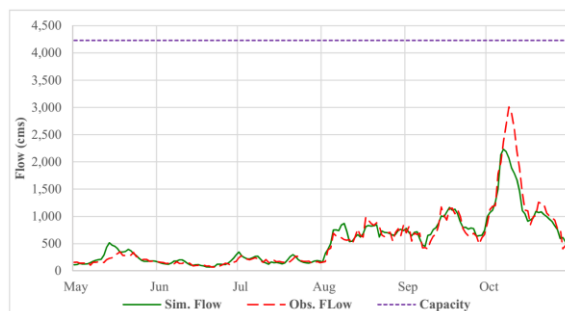
แบบจำลอง HEC-HMS และปริมาณน้ำที่รายวันจากสถานี W.4A P.50A และ P.26A โดยมีจุดที่ทำการสอบเทียบคือ สถานี P.12C P.2A P.7A และ P.17 ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6-9 และตารางสรุปผลการสอบเทียบค่าผลรวมของปริมาณน้ำในช่วงเดือน พ.ค. - ต.ค. จากแบบจำลอง HEC-ResSim กับค่าที่วัดได้จริง โดยใช้ค่า %RE แสดงในตารางที่ 4 จะพบว่าในช่วงที่ปริมาณน้ำยังไม่เกินความจุลน้ำ ผลของแบบจำลองและค่าสำรวจมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงที่เกิดน้ำท่วมค่าที่จำลองได้กับค่าสำรวจจะมีความแตกต่างกันมากเนื่องมาจากน้ำล้นตลิ่งทำให้การวัดปริมาณน้ำเกิดความคลาดเคลื่อนได้และเกิดจากการบริหารจัดการฝนนน้ำในช่วงนั้นออกจากพื้นที่

ตารางที่ 4 สรุปผลการสอบเทียบค่าผลรวมของปริมาณน้ำในช่วงเดือน พ.ค. - ต.ค. ในปีพ.ศ. 2554 จากแบบจำลอง HEC-ResSim กับค่าที่วัดได้จริง โดยใช้ค่า %RE

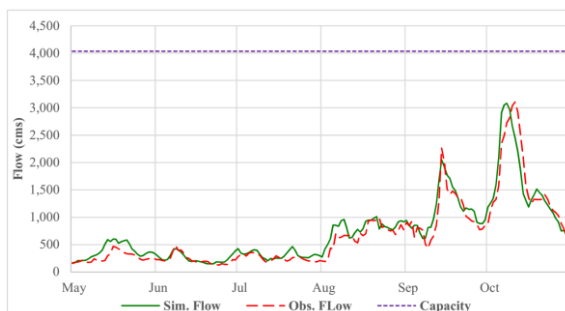
สถานีวัดน้ำ	ปริมาณน้ำรวมทั้งหมด (ล้าน ลบ.ม.)		ความคลาดเคลื่อน %
	ค่าจำลอง	ค่าสำรวจ	
P.12C	3,745.17	4,035.12	-7.19
P.2A	8,682.69	8,790.94	-1.23
P.7A	11,817.52	10,812.98	9.29
P.17	14,702.19	12,292.95	19.60



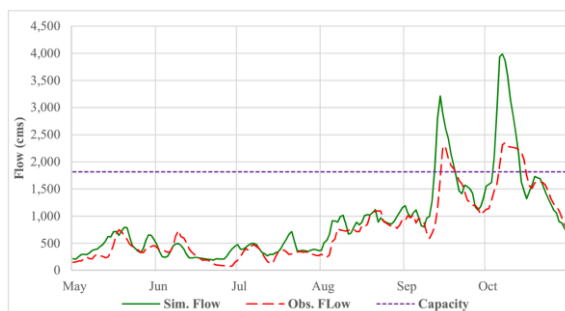
รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าจำลองกับค่าสำรวจ
ที่สถานี P.12C



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบค่าจำลองกับค่าสำรวจ
ที่สถานี P.2A



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบค่าจำลองกับค่าสำรวจ
ที่สถานี P.7A



รูปที่ 9 กราฟเปรียบเทียบค่าจำลองกับค่าสำรวจ
ที่สถานี P.17

4.2 ผลการจำลองด้วยแบบจำลอง HEC-ResSim

การศึกษานี้ได้ทำการจำลองภายใต้สถานการณ์ปีน้ำมาก ปีพ.ศ. 2549 และ 2554 ภายใต้เกณฑ์ควบคุมระดับน้ำตอนบน (Upper Rule Curve, URC) 4 เส้น ประกอบด้วย เกณฑ์ปฏิบัติการเดิม เกณฑ์ปฏิบัติการที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 เกณฑ์ปฏิบัติการที่ผู้ศึกษาเสนอ 1 และ 2 รวม 4 กรณี และภายใต้เกณฑ์ควบคุมระดับน้ำตอนบนพร้อมกับการควบคุมปริมาณน้ำที่สถานี

P.17 ไม่ให้เกิน 1,815 ลบ.ม./วินาที อีก 4 กรณีรวมทั้งหมดเป็น 8 กรณี สำหรับแต่ละปี และกำหนดการระบายน้ำขั้นต่ำของอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลตามแผนระบายน้ำในปี พ.ศ. 2554 เท่านั้นเนื่องจากปี พ.ศ. 2549 ไม่มีข้อมูล และระดับน้ำเริ่มต้นสำหรับใช้ในการจำลองจะเท่ากับระดับน้ำจริงในแต่ละปีที่ทำการจำลอง ทั้งนี้ผลการจำลองได้แสดงในตารางที่ 5-6 และรูปที่ 10-25 โดยแต่ละรูปประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

ก.) กราฟเปรียบเทียบปริมาณ Inflow จริง (เส้นประสีดำ) กับปริมาณการระบายน้ำออกของแบบจำลองรายวัน (เส้นสีเขียว) ในช่วงเวลาต่างๆ

ข.) กราฟเปรียบเทียบปริมาณการระบายน้ำรายวันของแบบจำลอง (เส้นสีเขียว) กับค่าจริง (เส้นประสีแดง)

รวมถึงปริมาณน้ำที่ระบายออกที่ทางระบายน้ำล้นจริง (เส้นประสีน้ำเงิน) และปริมาณน้ำที่ล้นเขื่อน (เส้นประสีชมพู) ในช่วงเวลาต่างๆ

ค.) กราฟเปรียบเทียบปริมาณน้ำของแบบจำลองรายวัน (เส้นสีเขียว) ที่สถานี P.17 กับค่าจริง (เส้นประสีแดง) ในช่วงเวลาต่างๆ โดยมีปริมาณน้ำที่ระดับน้ำท่วม (เส้นประสีม่วง) แสดงรวมอยู่ด้วย

ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการศึกษาคือเพื่อบรรเทาอุทกภัยและทำให้มีปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำมากที่สุดในช่วงสิ้นสุดฤดูฝน (ปลายเดือนตุลาคม) จึงเลือกใช้ช่วงเดือน พ.ค. - ต.ค. มาทำการจำลอง

ตารางที่ 5 สรุปผลการจำลองด้วยแบบจำลอง HEC-ResSim ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549

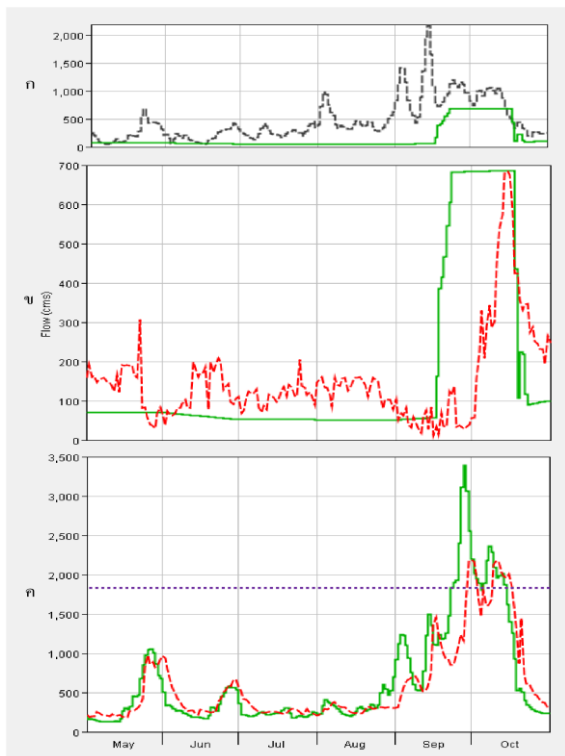
ที่	เกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ	จำนวนวันที่น้ำล้นตลิ่ง ที่จุด P.17 (วัน)	อัตราการไหลสูงสุด ที่จุด P.17 (ลบ.ม./วินาที)	ปริมาณการระบายรวม ของอ่างเก็บน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	ระบายน้ำเพิ่มผ่าน ทางระบายน้ำล้น (ล้าน ลบ.ม.)
1	URC เดิม	21	3,391	2,570	0
2	URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555	19	3,266	3,600	0
3	URC ที่น้ำเสนอ 1	14	3,140	2,515	0
4	URC ที่น้ำเสนอ 2	4	2,769	2,551	0
5	URC เดิม + P.17	5	2,759	2,533	0
6	URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 + P.17	4	2,759	3,565	0
7	URC ที่น้ำเสนอ 1 + P.17	4	2,759	2,502	0
8	URC ที่น้ำเสนอ 2 + P.17	4	2,759	2,547	0

ตารางที่ 6 สรุปผลการจำลองด้วยแบบจำลอง HEC-ResSim ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554

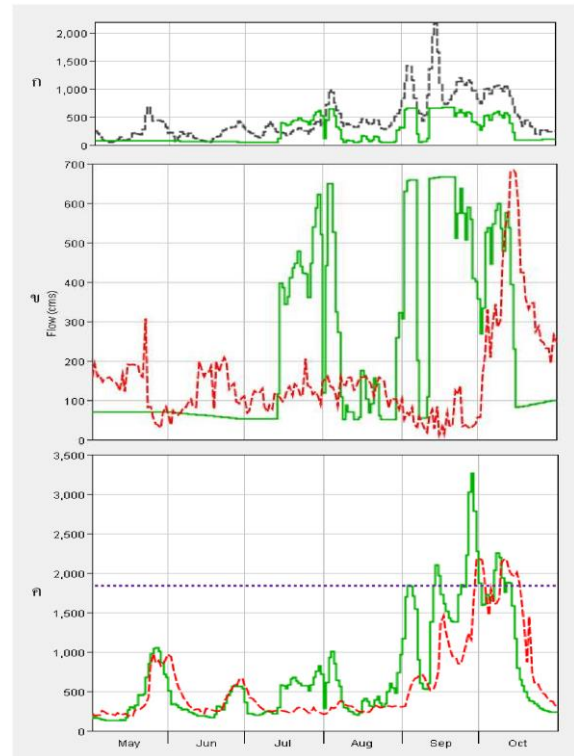
ที่	เกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ	จำนวนวันที่น้ำล้นตลิ่ง ที่จุด P.17 (วัน)	อัตราการไหลสูงสุด ที่จุด P.17 (ลบ.ม./วินาที)	ปริมาณการระบายรวม ของอ่างเก็บน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	ระบายน้ำเพิ่มผ่าน ทางระบายน้ำล้น (ล้าน ลบ.ม.)
1	URC เดิม	21	3,651	3,596	59
2	URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555	22	3,636	4,948	0
3	URC ที่น้ำเสนอ 1	19	3,644	3,889	0
4	URC ที่น้ำเสนอ 2	16	3,639	3,889	0
5	URC เดิม + P.17	19	3,549	3,242	397

ตารางที่ 6 (ต่อ) สรุปผลการจำลองด้วยแบบจำลอง HEC-ResSim ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554

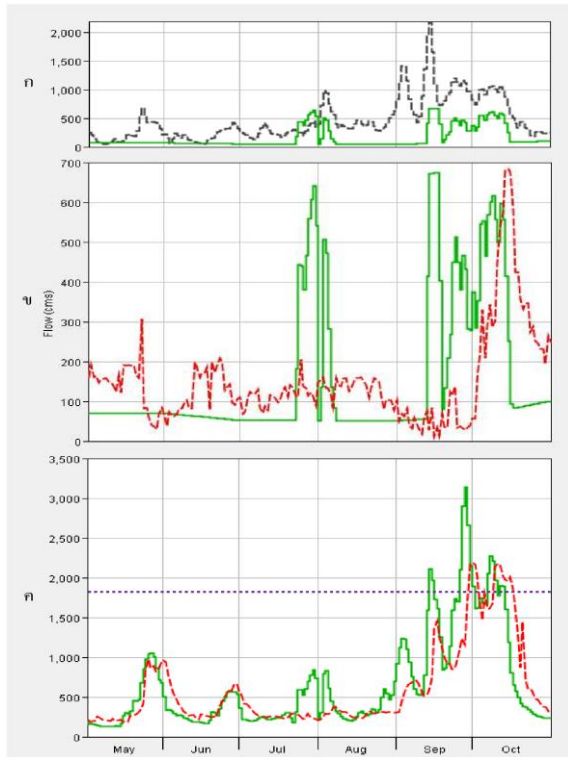
ที่	เกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ	จำนวนวันที่น้ำล้นตลิ่ง ที่จุด P.17 (วัน)	อัตราการไหลสูงสุด ที่จุด P.17 (ลบ.ม./วินาที)	ปริมาณการระบายรวม ของอ่างเก็บน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	ระบายน้ำเพิ่มผ่าน ทางระบายน้ำล้น (ล้าน ลบ.ม.)
6	URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 + P.17	11	3,024	4,390	0
7	URC ที่น้ำเสนอ 1 + P.17	14	3,130	3,716	0
8	URC ที่น้ำเสนอ 2 + P.17	14	3,128	3,835	0



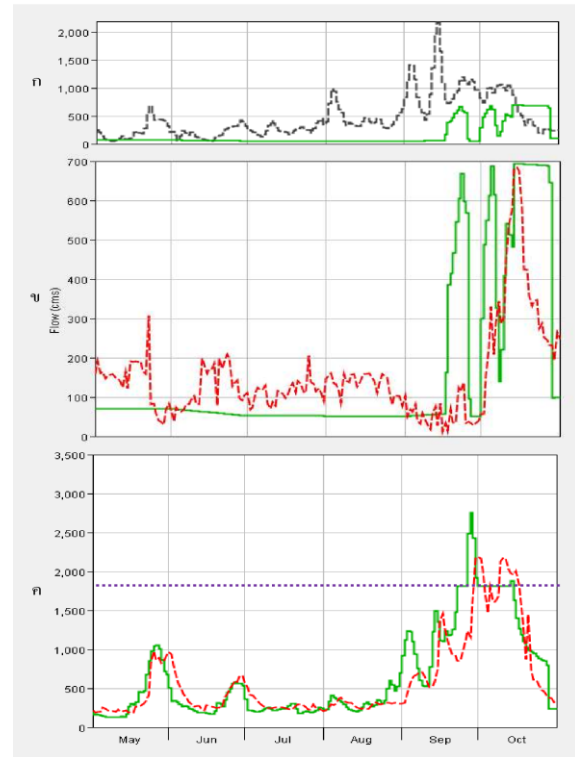
รูปที่ 10 กรณีใช้ URC เดิม ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



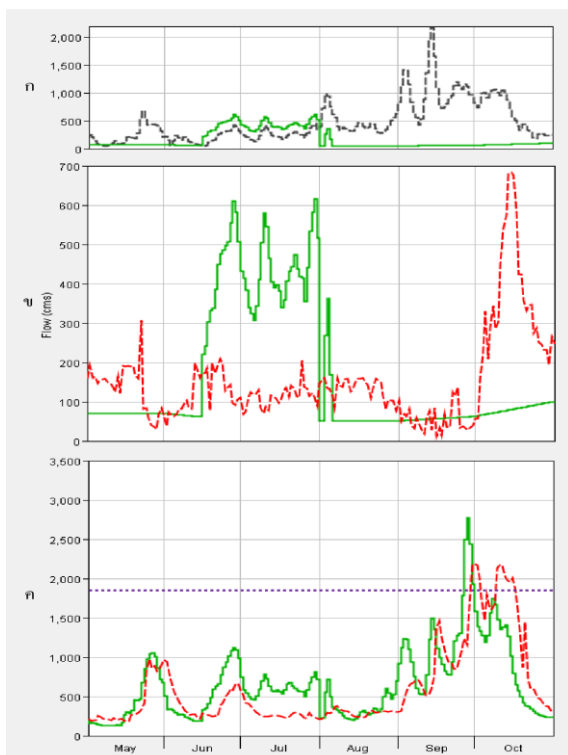
รูปที่ 11 กรณีใช้ URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



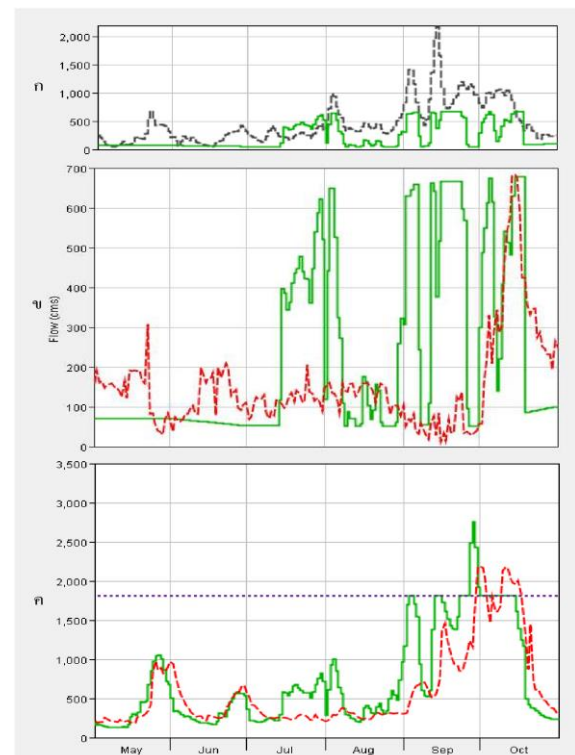
รูปที่ 12 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 1 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



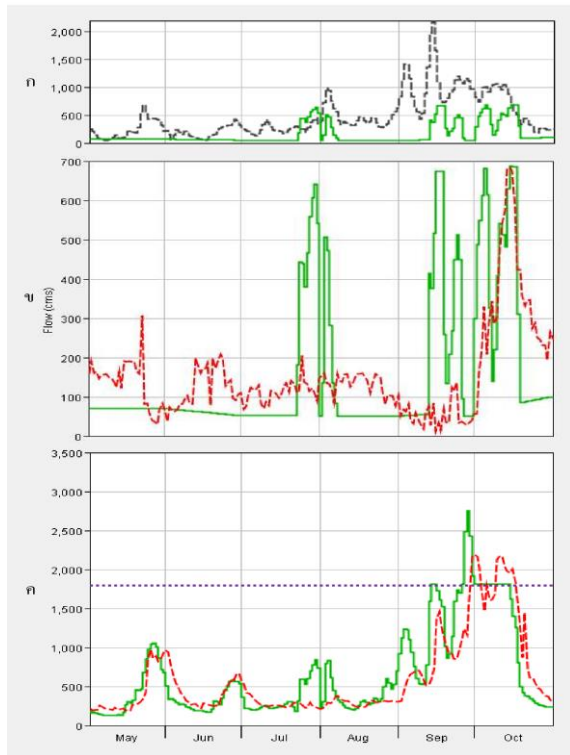
รูปที่ 14 กรณีใช้ URC เดิม และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



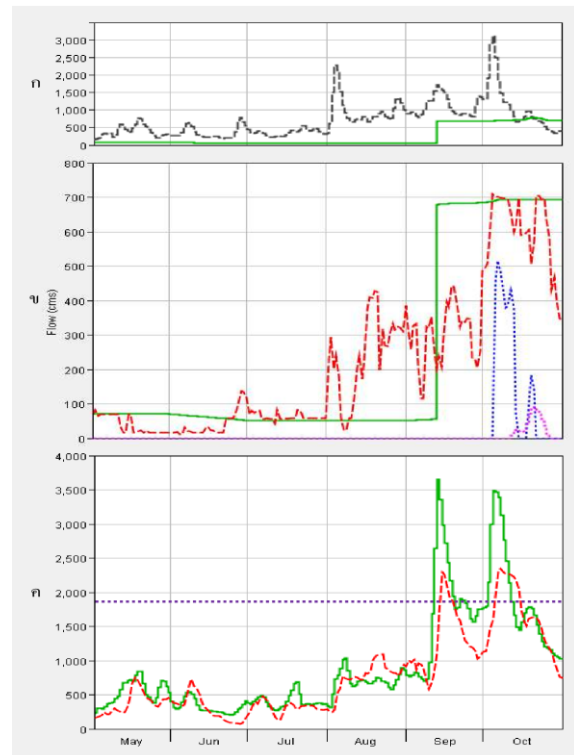
รูปที่ 13 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 2 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



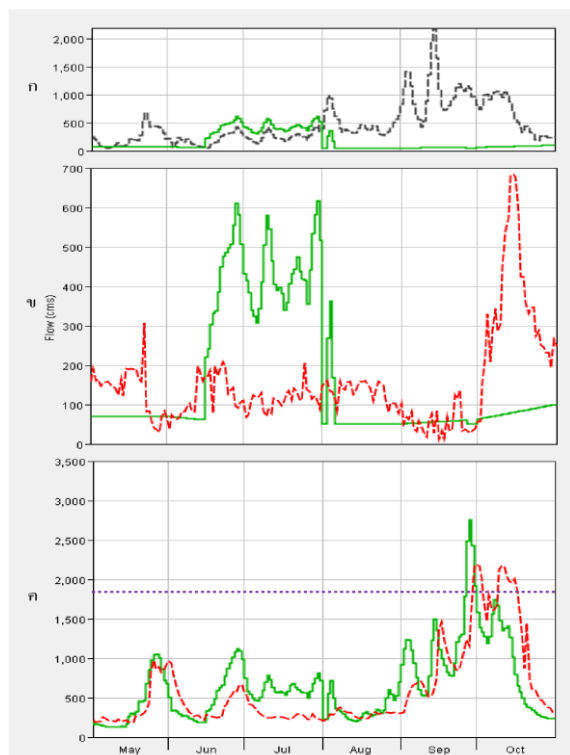
รูปที่ 15 กรณีใช้ URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



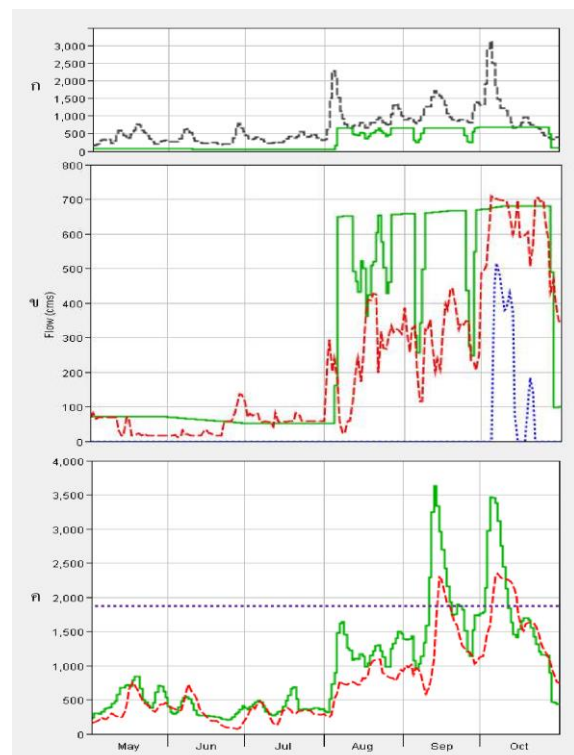
รูปที่ 16 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 1 และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



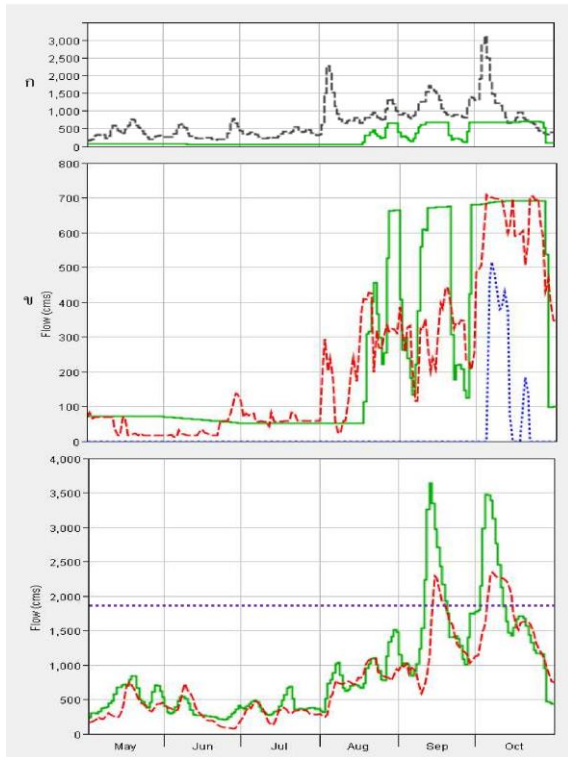
รูปที่ 18 กรณีใช้ URC เดิม ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



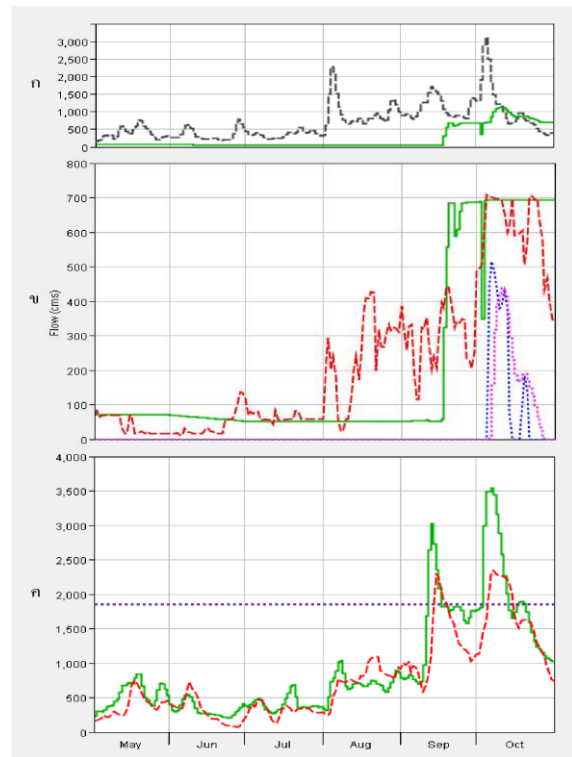
รูปที่ 17 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 2 และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2549



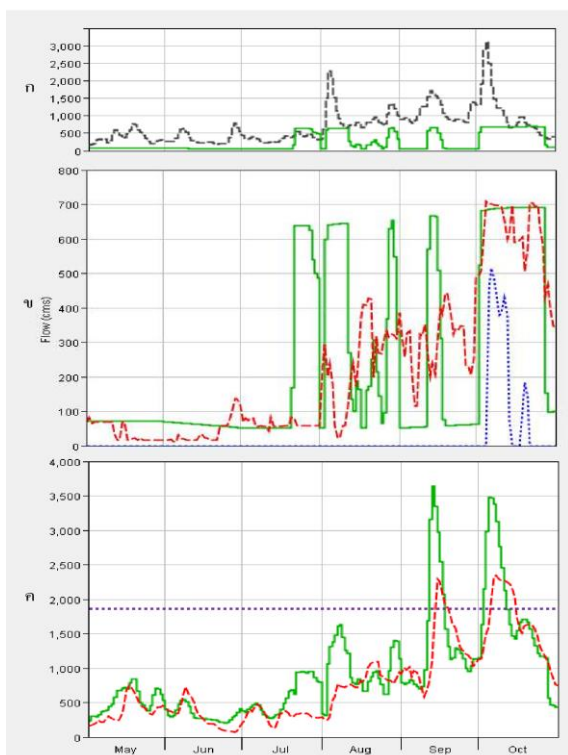
รูปที่ 19 กรณีใช้ URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



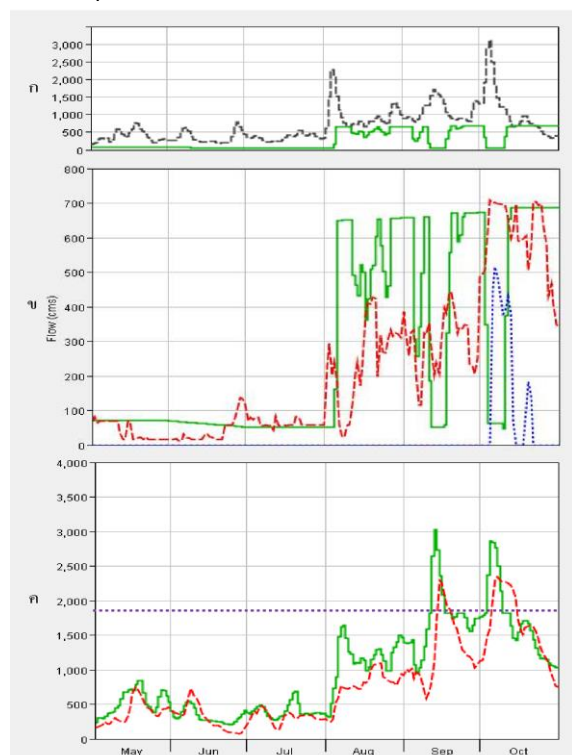
รูปที่ 20 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 1 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



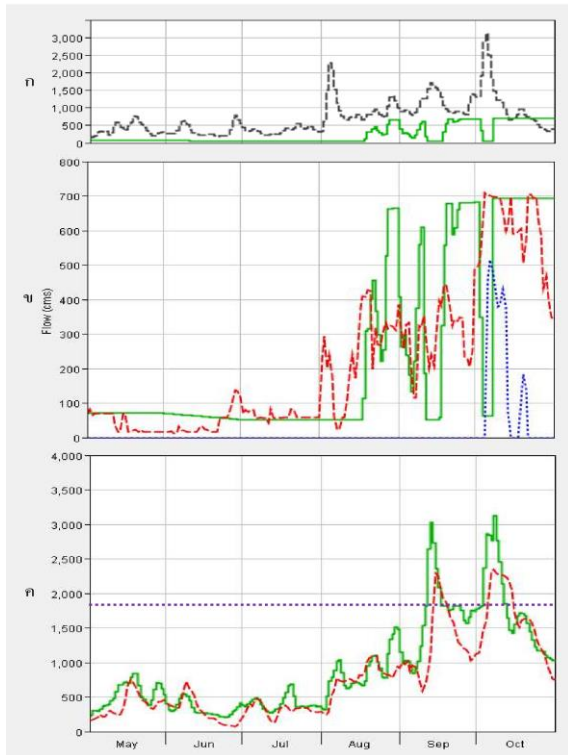
รูปที่ 22 กรณีใช้ URC เดิม และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



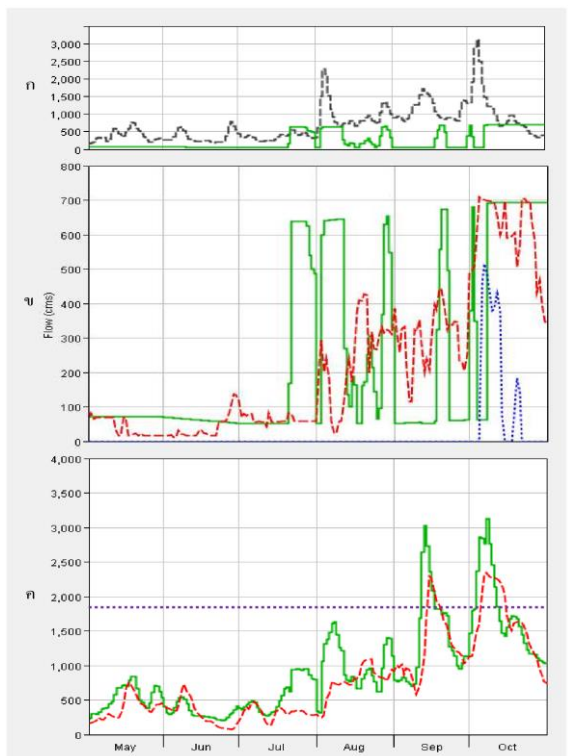
รูปที่ 21 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 2 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



รูปที่ 23 กรณีใช้ URC ที่ปรับปรุงใหม่ปี พ.ศ. 2555 และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



รูปที่ 24 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 1 และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554



รูปที่ 25 กรณีใช้ URC ที่นำเสนอ 2 และควบคุมอัตราการไหลที่จุด P.17 ภายใต้สถานการณ์ปี พ.ศ. 2554

จากผลการจำลองสถานการณ์น้ำท่วมโดยการแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 8 กรณี ในสถานการณ์ปีน้ำมากปี พ.ศ. 2549 และ 2554 พบว่าในปี พ.ศ. 2549 กรณีใช้ URC ที่ผู้ศึกษานำเสนอ 1 ร่วมกับการควบคุมอัตราการไหลที่สถานี P.17 สามารถลดจำนวนวันที่น้ำท่วมในจุดควบคุมและอัตราการไหลสูงสุด รวมถึงปริมาณน้ำที่ระบายรวมจากเขื่อนมากที่สุด ส่วนในปี พ.ศ. 2554 กรณีใช้ URC ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่ในปี พ.ศ. 2555 ร่วมกับการควบคุมอัตราการไหลที่สถานี P.17 สามารถลดจำนวนวันที่น้ำท่วมในจุดควบคุมและอัตราการไหลสูงสุดมากที่สุด

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ นำเสนอแบบจำลองในการศึกษาและควบคุมน้ำท่วมโดยใช้แบบจำลอง HEC-ResSim รวมถึงใช้แบบจำลอง HEC-HMS มาช่วยในคำนวณปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำย่อยและทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่จุดควบคุมสถานี P.17 โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 8 กรณี ในสถานการณ์แต่ละปี ผลการเปรียบเทียบพบว่า ในปี พ.ศ. 2549 อย่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลควรใช้ URC ที่ผู้ศึกษานำเสนอ 1 ร่วมกับการควบคุมอัตราการไหลที่สถานี P.17 และปี พ.ศ. 2554 ควรใช้ URC ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่ในปี พ.ศ. 2555 ร่วมกับการควบคุมอัตราการไหลที่สถานี P.17 จะสามารถช่วยในการบรรเทาน้ำท่วมที่สถานีควบคุม P.17 ได้ดีที่สุด โดยอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลจะทำการเร่งระบายน้ำเพิ่มมากขึ้นในช่วงกลางเดือนกรกฎาคมถึงกลางเดือนสิงหาคม และเริ่มระบายอีกครั้งในช่วงต้นกลางเดือนกันยายน ในกรณีปี พ.ศ. 2549 และต้นเดือนสิงหาคมในกรณี ปี พ.ศ. 2554 ตามความสามารถในการระบายสูงสุดภายใต้ URC ที่กำหนด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธนพร สุปรีศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ รวมถึงให้ความช่วยเหลือต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนบนและเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ประจำอ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาข้อมูลสำหรับใช้ในการศึกษาค้างนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมชลประทาน. การปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ. คณะทำงานจัดทำแผนการบริหารจัดการเขื่อนเก็บน้ำหลัก และการจัดทำแผนบริหารจัดการน้ำของประเทศประจำปี 2555.
- [2] วีระพงษ์ ประทุมโทน. การศึกษาการจัดการและควบคุมน้ำท่วม โดยการใช้โปรแกรม Hec-ResSim ในลุ่มน้ำน่าน ตอนล่าง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [3] สุธรรม ชลสุริยัณวงศ์. การศึกษาการจัดการระบบอ่างเก็บน้ำของโครงการอ่างเก็บน้ำของโครงการอ่างเก็บน้ำก๊วกอหมา และก๊วลม จังหวัดลำปาง โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ Hec-ResSim. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [4] เกษม ไกรสีกลาง. การศึกษาอุทกวิทยาของลุ่มน้ำน่าน โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ Hec-HMS. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2548).



การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการ

ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึม

การบรรจบร่วมกับฟัซซี่ลอจิก

Multi-Objective Car Sequencing Problem On Mixed-Model Two-Sided Assembly Lines With Combinatorial Optimization With Coincidence With Fuzzy Logic

วัชรวิทย์ ถนันทอง* และ ปารเมศ ชุตินา

Watcharawit Tanontong* and Parames Chutima

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand.

*E-mail: newwatcharawit@gmail.com Tel: 6683-6509351

บทคัดย่อ

การจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จัดเป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากและสลับซับซ้อน เนื่องจากเป็นปัญหาประเภท Non-deterministic Polynomial Hard: NP-Hard ซึ่งสามารถแก้ปัญหได้ด้วยวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) โดยปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบแบบสองด้านนี้ ได้พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน คือ จำนวนครั้ง การเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และจำนวนรถยนต์ที่ละเมิดร่น้อยที่สุด และนำเสนอ อัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับฟัซซี่ลอจิก (Combinatorial Optimization with Coincidence with Fuzzy Logic: COIN-F) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ประยุกต์มาจาก COIN มาใช้ในการแก้ปัญห โดยทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม COIN-E ที่เป็นที่ยอมรับในการแก้ปัญหการจัดลำดับการผลิต ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า COIN-F มีสมรรถนะในการ แก้ปัญหาที่ดีกว่า COIN-E ทั้งในดัชนีการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต ดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แต่ใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่า เนื่องจากการเพิ่มการทำงานให้กับอัลกอริทึม

ABSTRACT

Multi-objective car sequencing problem on mixed-model with two-sided assembly lines to solve maximum production efficiency is very complicated. This problem is a kind of non-deterministic polynomial hard: NP Hard which only be solved by heuristic method. In this paper, three objective functions are considered including 1) decreasing the number of color changes, 2) minimizing utility work and 3) reducing the number of violation. The Combinatorial Optimization with Coincidence with Fuzzy logic (COIN-F) algorithm developed from its original version (i.e. COIN), is used to solve the problem and compare with that from Combinatorial Optimization with Coincidence Expand (COIN-E)

which is a well-known algorithm. The experimental results indicate that COIN-F gave better performances than these of COIN-E, in terms of convergence to the Pareto-optimal set, spread index of solutions, ratio of non-dominated solution, but the computation time to get solution is more than COIN-E.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์มีแนวโน้มการแข่งขันที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็วและความต้องการของลูกค้าที่มีความหลากหลายและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงจำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการผลิต และพัฒนาทางด้านเทคโนโลยี ซึ่งสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยว (Single-Model Assembly Lines) อาจจะไม่สามารถตอบสนองได้อย่างเหมาะสม จึงมีการพัฒนาสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Lines) มาประยุกต์ใช้กับสายการประกอบแบบสองด้าน (Two-sided assembly line) เพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตในอุตสาหกรรมยานยนต์

การจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน มีเป้าหมายคือ การจัดลำดับการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงสุดตามวัตถุประสงค์ที่โรงงานอุตสาหกรรมต้องการ ซึ่งวัตถุประสงค์จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะและความเหมาะสมของอุตสาหกรรมนั้นๆ เช่น ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด เวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด อัตราความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ต้นทุน/เวลาในการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด ความเสี่ยงในการหยุดของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด ฯลฯ [1] ซึ่งในการผลิตมีความจำเป็นต้องพิจารณาหลายวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆกัน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดบนสายการประกอบ ทำให้ปัญหาในการจัดลำดับในสายการประกอบจึงค่อนข้างมีซับซ้อนและยุ่งยาก ใช้เวลาในการหาคำตอบนาน ซึ่งเป็นปัญหาที่เรียกว่าปัญหา NP-Hard [2] ปัจจุบันจึงมีการนำวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาประเภทนี้ ทำให้ง่ายต่อการคำนวณมากขึ้น ได้คำตอบค่อนข้างดี ยอมรับได้ และใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานมาก [3] เช่น การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (GA)

[4] การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) [5] ถึงแม้ว่าคำตอบที่ได้นั้น ไม่อาจจะรับประกันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่ผู้ออกแบบสายการประกอบสามารถนำผลที่ได้จากวิธีฮิวริสติกไปปรับปรุงคำตอบจนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมนั้นๆ [6]

2. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านถูกออกแบบมาเพื่อจัดการสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะใหญ่และมีการผลิตจำนวนมาก เช่น รถยนต์ รถบรรทุก เป็นต้น โดยจะมีสถานีงานอยู่สองด้านของสายการประกอบ [6] ขนานกันทางด้านซ้าย (L) และทางด้านขวา (R) โดยที่สถานีงานที่อยู่กันจะเรียกว่า Mated-Station โดยมีพนักงานอยู่ในแต่ละด้านและทำการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้ากับตัวถังรถยนต์ที่จะเคลื่อนผ่านไปในแต่ละสถานีงาน และเพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่มีหลากหลายมากขึ้น รูปแบบของสายการผลิตรถยนต์จึงจำเป็นต้องมีความยืดหยุ่น สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ โดยที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดสามารถเข้าสู่สายการประกอบได้อย่างอิสระ ซึ่งจะแตกต่างจากสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ที่จะต้องผลิตผลิตภัณฑ์ทีละชนิด ซึ่งสายการประกอบแบบสองด้านมีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิต คือ ความยาวสายการประกอบแบบสองด้านจะสั้นกว่าสายการประกอบแบบด้านเดียว ลดความสูญเปล่า เช่น ลดระยะทางการเคลื่อนที่ของพนักงาน ลดเวลาปรับตั้งเครื่องและเวลาผลิต และลดต้นทุนค่าเครื่องมือและของใช้ประจำตัวของพนักงานที่สามารถใช้ร่วมกันได้ในคู่สถานีงาน [7] โดยที่สายการประกอบแบบสองด้านจะแบ่งประเภทชิ้นงานที่จัดสรรลงในสถานีงาน 2 แบบ คือ ชิ้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสถานีงานได้เพียงทางด้านเดียวเท่านั้น คือ

ทางด้านซ้าย (L-type) ทางด้านขวา (R-type) ของสายการประกอบ และขั้นตอนที่สามารถจัดสรรลงในสถานงานได้ทั้งสองด้านของสายการประกอบ (E-type) [8]

3. วิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การพิจารณาแก้ปัญหาสำหรับหลายวัตถุประสงค์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีไปพร้อมกัน เป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ยาก เนื่องจากวัตถุประสงค์นั้นอาจมีความขัดแย้งระหว่างกันในการหาค่าน้อยที่สุดหรือค่าที่มากที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์ จึงยากที่จะบอกได้ว่าเป็นคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด [9] สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) มาใช้ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับสมาชิก โดยนำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดที่มีการจัดอันดับคำตอบแบบพารโต (Pareto Ranking Approach) มาใช้ คำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) ซึ่งเป็นกลุ่มคำตอบที่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีกว่ากันหรือไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่น [10] ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าน้อยที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาไปพร้อมกันทั้งหมด ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Minimize } \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\} \quad (1)$$

โดย $\bar{x}$ คือเวกเตอร์ของตัวแปรในการตัดสินใจ $f_i(\bar{x})$ คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละเรื่อง ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ y แล้ว จะได้ว่า $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่าของ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ และ $f_i(x) < f_i(y)$ อย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$

3.1 จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด

ลำดับในการผลิตรถยนต์จะมีผลอย่างมากต่อการพันสีรถยนต์ เพราะทุกครั้งที่มีการพันสีที่แตกต่างกันในลำดับการผลิตต่อกันมีความจำเป็นจะต้องล้างหัวปืนพ่นสี ดังนั้นหากลำดับการผลิตรถยนต์ที่มีสีเดียวกันติดต่อกันก็ไม่ต้องล้างหัวปืนพ่นสี จะต้องทำความสะอาดหัวปืนพ่นสีและเปลี่ยนน้ำยาในการพ่น ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิต แต่หากมีการพันสีเดียวกันติดต่อกันหลายลำดับเกินค่าที่กำหนดนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการล้างทำความสะอาดหัวปืนพ่นสี เนื่องจากหากไม่ทำความสะอาดหัวปืนพ่นสีจะมีการอุดตันและสีที่พ่นจะไม่มีคุณภาพ สูตรการคำนวณจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสี [11] ดังสมการที่ 2

$$f_1(x) = \sum_{k=0}^{nc} \delta_{COL_{k,k+1}} \quad (2)$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ จำนวนการเปลี่ยนแปลงสี $\delta_{COL_{k,k+1}}$ คือ การเปลี่ยนสีพ่นรถยนต์ ณ ตำแหน่ง k และ $k+1$ โดยที่ $\delta_{COL_{k,k+1}} = 1$ เมื่อมีการเปลี่ยนสีพ่นรถยนต์ และ $\delta_{COL_{k,k+1}} = 0$ เมื่อไม่มีการเปลี่ยนสีพ่นรถยนต์

k คือ ตำแหน่งใดๆ ในลำดับการผลิต โดยที่ $k \in [1, nc]$ เมื่อพิจารณาลำดับการผลิตในรอบการผลิตปัจจุบัน $k \in [-\infty, 0]$ เมื่อพิจารณาลำดับการผลิตในรอบการผลิตก่อนหน้า และ $k \in [nc + 1, \infty]$ เมื่อพิจารณาลำดับการผลิตในรอบการผลิตถัดไป nc คือ ผลรวมสัดส่วนการผลิต (MPS) หรือจำนวนชิ้นผลิตทั้งหมดทั้งหมดที่จะเข้าสู่สายการประกอบ

3.2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด

ปริมาณงานที่ไม่เสร็จคือ ผลรวมของปริมาณงานของทุกผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสร็จในรอบเวลาการทำงานนั้นๆ ในแต่ละชั้นงานบนสายการประกอบ ยิ่งปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตมีค่าน้อยจะทำให้ประหยัดเวลาที่ใช้ลดต้นทุนในด้าน Utility Worker และสายการประกอบจะมีความไหลลื่นและมีประสิทธิภาพที่มากยิ่งขึ้น สูตรการคำนวณ [12] ดังสมการที่ 3, 4 และ 5

$$f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} \left(\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i=1),n_m} / v_c \right) \quad (3)$$

$$U_{i,n_m} = \left\{ \max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}) - L_{n_m})}{v_c} \right], \max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}) - L_{n_m})}{v_c} \right] \right\} \quad (4)$$

$$Z_{(i+1),n_m} = \max \left\{ \max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} (t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}) - \gamma_c, L_{n_m} - \gamma_c \right) \right], \max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} (t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}) - \gamma_c, L_{n_m} - \gamma_c \right) \right] \right\} \quad (5)$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิต

N_M คือ คู่สถานีงาน โดย $n_m = 1, 2, \dots, N_M$

U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในลำดับการ
ผลิตที่ i ในคู่สถานีงาน n_m

$Z_{(i+1),n_m}$ คือ เวลาเริ่มงานในลำดับการผลิตที่ i

v_c คือ ความเร็วของสายการผลิต

$t_{2n_m-1,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์
 m ที่สถานีงานด้านซ้ายในคู่สถานีงาน
 n_m

$t_{2n_m,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์
 m ที่สถานีงานด้านขวาในคู่สถานีงาน
 n_m

$Y_{2n_m-1,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m
ที่สถานีงานด้านซ้ายในคู่สถานีงาน
 n_m

$Y_{2n_m,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m
ที่สถานีงานด้านขวาในคู่สถานีงาน
 n_m

γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่
สายการผลิต (Launch Interval)

L_{n_m} คือ ความยาวของคู่สถานีงาน n_m

3.3 จำนวนรถยนต์ที่ละเมิดร่น้อยที่สุด

รถยนต์แต่ละรุ่นจะมีตัวเลือกที่ต่างกัน โดยในการ
จัดลำดับการผลิตรถยนต์นั้นจำเป็นต้องพิจารณาตัวเลือก
ของรถยนต์พยายามไม่ให้ผลิตเกินค่าที่กำหนด โดย
พิจารณาจากค่า อัตราส่วน p/q (เมื่อ p คือ ความต้องการ
ตัวเลือก และ q คือ จำนวนลำดับการผลิตย่อย) เช่น
อัตราส่วนการประกอบระบบเบรก ABS เท่ากับ 1 ต่อ 3
จะหมายความว่า ในการผลิตรถยนต์ 3 คันจะมีรถยนต์ที่มี
ตัวเลือกนี้ได้ไม่เกิน 1 คัน ถ้ามีการเกินจะนับจำนวนที่เกิน
เป็นจำนวนการละเมิดที่เกิดขึ้น สูตรการคำนวณรถยนต์ที่
ละเมิดรวม [11] ดังสมการที่ 6

$$f_3(x) = \sum_{o \in O} \left\{ NPV_{o;i \in day J} \left\| \bigcup_{i=q_o+1}^{mc} PV_o(i, \dots, i+q_o-1) \right\| \right\} \quad (6)$$

เมื่อ $f_3(x)$ คือ จำนวนรถยนต์ที่ละเมิดร่น้อยที่สุด

o คือ ตัวเลือก (Options) เมื่อ $o=0, 1, 2, \dots, O$

$NPV_{o;i \in day J}$ คือ เซตของตัวเลือกที่มีการละเมิด
เกิดขึ้นจากตำแหน่งที่ i ถึง $i+q_o-1$

$PV_o(i, \dots, i+q_o-1)$ คือ การนับจำนวนที่มีการ
ละเมิดของตัวเลือก o ในวันที่ J

$\cup$ คือ Union operator

ในคู่สถานีงาน

4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบ ร่วมกับฟัซซี่ลอจิก

อัลกอริทึมแบบวิธีการบรรจบร่วมกับฟัซซี่ลอจิก ได้พัฒนามาจากอัลกอริทึมบรรจบ (COIN) โดยอาศัย แนวคิดวิธีการบรรจบแบบเดิมคือ การให้รางวัลแก่สตริง คำตอบที่ดี และทำการลงโทษแก่สตริงคำตอบที่ไม่ดี เพื่อ เป็นตัวกำหนดทิศทางของคำตอบสุดท้าย โดยมีการ ประยุกต์ใช้หลักการตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) ที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของเหตุผลต่างๆ คือ “ถ้า X และ Y ดังนั้น Z” ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ ที่ช่วยในการจัดการกับข้อมูลซึ่งไม่มีความชัดเจน คลุมเครือ [13] สำหรับการแก้ปัญหา การจัดลำดับ ผลัดกันเข้าสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสอง ด้านได้มีการประยุกต์ใช้ฟัซซี่ลอจิกในการปรับปรุง ค่าพารามิเตอร์ k ที่ใช้ในการให้รางวัลและลงโทษ ให้มีความเหมาะสมกับสถานการณ์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละรอบการทำงาน เพื่อให้ได้คำตอบที่เข้าใกล้คำตอบที่แท้จริง และเพิ่มการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบให้ดีขึ้น

4.1 ขั้นตอนของอัลกอริทึม COIN-F

ขั้นที่ 1 สร้างประชากรเบื้องต้น โดยการสุ่มจาก ตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม ดังตารางที่ 1 โดยที่ค่า ความน่าจะเป็นร่วมจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{n-1}$ เมื่อ n คือ ผลรวมสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (MPS) ดังนั้นความน่าจะเป็นร่วมเบื้องต้นจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{12-1} = 0.091$

ขั้นที่ 2 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และ กำหนดค่าความแข็งแรง (fitness) ของแต่ละสตริงคำตอบ ดังตารางที่ 2

ขั้นที่ 3 คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดี โดยที่ สตริงคำตอบที่ดีจะมีความแข็งแรงน้อยที่สุด และสตริง

คำตอบที่ไม่ดีจะมีความแข็งแรงมากที่สุด และปรับปรุง ค่าความน่าจะเป็นจากตารางความน่าจะเป็นเริ่มต้น โดย กำหนดให้ k คือค่าพารามิเตอร์ในการให้รางวัล/ลงโทษ ดังสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ (กำหนดให้ $k = 0.1$)

$$x = \frac{k}{n-1} \quad (7)$$

$$x = \frac{k}{(n-1)^2} \quad (8)$$

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าสตริงที่ 1 และ 2 เป็นสตริง คำตอบที่ดีเนื่องจากมีค่า fitness เท่ากับ 1 ดังนั้นจะทำการ ให้รางวัลแก่สตริงที่ 1 และ 2 ที่ละสตริง โดยการเพิ่มความ น่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{1}{12-1} = 0.091$ ให้กับคู่อันดับ (11, 12) และลดความน่าจะเป็นของคู่อันดับทั้งหมดในแถวเดียวกัน คือ (11, 1), (11, 2), (11, 3), ..., (11, 12) ด้วยค่าความ

น่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{1}{(12-1)^2} = 0.0082$ จากนั้นพิจารณา

ให้รางวัลคู่อันดับถัดไป คือ (12, 3) และลดความน่าจะเป็น ของคู่อันดับทั้งหมดในแถวเดียวกัน คือ (12, 1), (12, 2), (12, 3), ..., (12, 11) ทำเช่นนี้ไปจนทุกคู่อันดับทั้ง 2 สตริงคำตอบ และในสตริงคำตอบที่ 3 ซึ่งเป็นสตริงคำตอบ ที่ไม่ดีจะทำการลดความน่าจะเป็นในคู่อันดับ (11, 2) และ เพิ่มความน่าจะเป็นของคู่อันดับทั้งหมดในแถวเดียวกัน คือ (11, 1), (11, 2), (11, 3), ..., (11, 12) ทำเช่นนี้จนครบ ทุกคู่อันดับจะได้ผลดังตารางที่ 3

ขั้นที่ 4 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด โดยการนำสตริง คำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับรอบปัจจุบัน แล้วนำมาเรียงลำดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บค่าสตริงที่ให้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ซึ่งเป็น ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบนั้นๆ ดังตารางที่ 4

ขั้นที่ 5 กลับไปทำขั้นที่ 2 ซ้ำจนครบจำนวนรอบ

ตารางที่ 1 ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	11	12
1	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
2	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
3	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
4	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
5	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
6	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
7	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091
8	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091	0.091
9	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091	0.091
10	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091	0.091
11	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000	0.091
12	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.091	0.000

จากตารางที่ 1 คือค่าความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นที่จะนำไปใช้ในการสุ่มประชากร (สตริงคำตอบ) เริ่มต้นจำนวน 3 ประชากร โดยเริ่มการสุ่มค่าตัวเลข 1 – 12 มาหนึ่งค่าจากนั้นสุ่มค่าถัดไปด้วยค่าความน่าจะเป็นดัง

ค่าในตารางของแต่ละลำดับ โดยเริ่มต้นจะเห็นได้ว่าทุกลำดับมีโอกาสหรือค่าความน่าจะเป็นในการถูกสุ่มเท่ากันทั้งหมดจากการคำนวณจากสมการในขั้นตอนที่ 1

ตารางที่ 2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของแต่ละสตริง

String	Model sequence	f(1)	f(2)	f(3)	Fitness
1	11 12 3 6 5 2 1 7 9 10 8 4	10	65.37500	5	1
2	1 2 8 7 12 10 6 3 9 11 4 5	8	69.18750	6	1
3	11 2 12 4 8 6 1 9 3 10 7 5	10	69.03125	5	2

จากตารางที่ 2 คือผลจากการสุ่มประชากรเริ่มต้นจากตารางที่ 1 และทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ 2 สมการที่ 3 และสมการที่ 4 ตามลำดับของแต่ละสตริงคำตอบ พร้อมทั้งกำหนดค่าความแข็งแรงด้วย

วิธี Non-dominated Sorting ซึ่งจะใช้ในการพิจารณาคำตอบที่ดีและไม่ดี เพื่อทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นต่อไป สำหรับสตริงคำตอบที่ดีจะมีค่า Fitness น้อยและสตริงคำตอบที่ไม่ดีจะมีค่า Fitness มาก

ตารางที่ 3 ความน่าจะเป็นร่วมหลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	11	12
1	0.000	0.099	0.090	0.090	0.090	0.090	0.099	0.090	0.081	0.090	0.090	0.090
2	0.099	0.000	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.099	0.090	0.090	0.090	0.081
3	0.090	0.090	0.000	0.090	0.090	0.099	0.090	0.090	0.099	0.081	0.090	0.090
4	0.090	0.090	0.090	0.000	0.099	0.090	0.090	0.081	0.090	0.090	0.099	0.090
5	0.099	0.099	0.090	0.090	0.000	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.081	0.090
6	0.081	0.090	0.099	0.090	0.099	0.000	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090
7	0.090	0.090	0.090	0.090	0.081	0.090	0.000	0.090	0.099	0.090	0.090	0.099
8	0.090	0.090	0.090	0.099	0.090	0.081	0.099	0.000	0.090	0.090	0.090	0.090
9	0.090	0.090	0.081	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.000	0.099	0.099	0.090
10	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.099	0.081	0.099	0.090	0.000	0.090	0.090
11	0.090	0.081	0.090	0.099	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.000	0.099
12	0.090	0.090	0.099	0.081	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.099	0.090	0.000

จากตารางที่ 3 คือผลจากการให้รางวัลโดยการเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับสตริงคำตอบที่ดี และการลงโทษโดยการลดความน่าจะเป็นแก่คำตอบที่ไม่ดี เพื่อให้คู่อันดับที่ดีที่อยู่ติดกันมีความน่าจะเป็นสูงขึ้น และคู่อันดับที่ไม่ดี

ที่อยู่ติดกันมีความน่าจะเป็นลดลง ทำให้โอกาสในการถูกสุ่มในรอบต่อไปคู่อันดับที่ดีจะมีโอกาสในการถูกสุ่มที่มากขึ้น และโอกาสในการถูกสุ่มสำหรับคู่อันดับที่ไม่ดีจะมีโอกาสน้อยลง

ตารางที่ 4 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

String	Model sequence	f(1)	f(2)	f(3)	Fitness
รอบก่อนหน้า	11 12 3 6 5 2 1 7 9 10 8 4	10	65.37500	5	2
	1 2 8 7 12 10 6 3 9 11 4 5	8	69.18750	6	1
รอบปัจจุบัน	2 11 7 5 9 3 1 6 10 8 4 12	10	63.46875	4	1

จากตารางที่ 4 คือการนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับสตริงที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรงใหม่ด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อจบรอบ

การทำงานนั้นๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีเฉพาะสตริงคำตอบที่ 2 ในรอบก่อนหน้า และสตริงคำตอบที่ 1 ในรอบปัจจุบันที่ยังคงถูกเก็บไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่จะนำไปรวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานต่อไป

ตารางที่ 5 ผลจากการสุ่มประชากรรอบที่ 5

String	Model sequence	f(1)	f(2)	f(3)	Fitness
1	7 2 11 10 5 3 8 6 9 4 1 12	8	71.43750	4	1
2	7 11 5 8 1 10 6 12 4 3 2 9	10	65.71875	5	1
3	12 11 7 4 10 6 3 9 5 8 1 2	10	63.06250	7	1

จากตารางที่ 5 คือตัวอย่างสตริงคำตอบที่ได้จากการสุ่มประชากรในรอบที่ 5 เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณค่าการลู่เข้ากลุ่มคำตอบ (Progressive Convergence : PC) จากรอบการทำงานที่ 1 ถึงรอบการทำงานที่ 5 เพื่อใช้พิจารณาว่าคำตอบมีการพัฒนาไปไกลมากน้อยเพียงใด

ขั้นที่ 6 ใช้ฟังก์ชันลอจิกในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ในการให้รางวัลและลงโทษ (k) ในทุกๆรอบการทำงาน ของฟังก์ชันลอจิกที่กำหนดไว้ โดยกำหนดให้ช่วง $Convergence = 0.7$ และจำนวนรอบในการใช้ฟังก์ชันลอจิก $r = 5$ (จากการทดสอบพารามิเตอร์)

ขั้นที่ 6.1 คำนวณค่าการลู่เข้าของกลุ่มคำตอบ (Progressive Convergence : PC) [12] จากสมการที่ 9 ระหว่างคำตอบจากรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 5 และพิจารณาจำนวนรอบที่คำตอบไม่มีการพัฒนา (Number of NC) จากสมการที่ 10 ซึ่งจากตัวอย่างข้างต้นมีค่า $Progressive Convergence = 0.4937$ นั่นคือคำตอบมีการพัฒนา

มาจากรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 5 ก่อนข้างดี และ Number of NC = 0 นั่นคือหมายความว่าในทุกๆ รอบคำตอบมีการพัฒนาไปในทางที่ดีขึ้น หรือหมายถึงทุกๆรอบสามารถเจอคำตอบที่ดีกว่า (มีค่า fitness น้อยกว่า) คำตอบในรอบก่อนหน้าทั้ง 5 รอบ

$$PC = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y \in S^*} \min \{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{(f_i(x) - f_i(y))^2}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}}$$

เมื่อ PC คือ ค่าการลู่เข้ากลุ่มคำตอบจากรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 5 หรือค่าระยะห่างระหว่างคำตอบโดยเฉลี่ยจากรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 5

S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจากกลุ่มที่ j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, J$

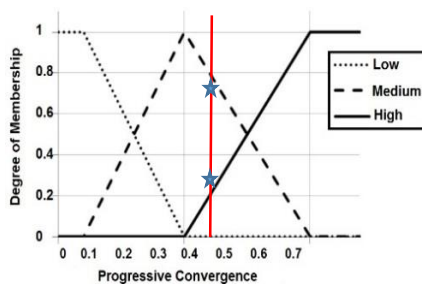
d_{xy} คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่ได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y

$$NC = \sum_{i=1}^r R_i^* \quad (10)$$

เมื่อ NC คือ จำนวนรอบที่คำตอบไม่มีการพัฒนา

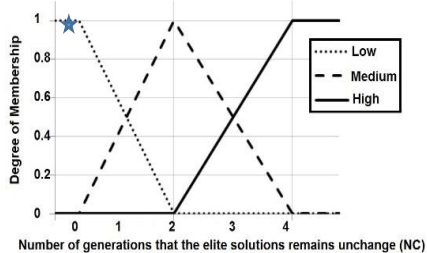
R_i^* คือ รอบการทำงานใดๆที่คำตอบไม่มีการพัฒนาให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น

r คือ จำนวนรอบการทำงานซ้ำของฟัซซี่ลอจิก
ขั้นที่ 6.2 สร้างกราฟของข้อมูลนำเข้า (input) แต่ละพารามิเตอร์ และกำหนดระดับค่าความเป็นสมาชิก (μ)



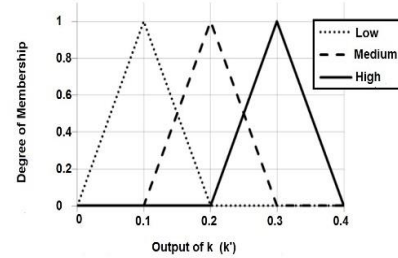
รูปที่ 1 กราฟข้อมูลนำเข้าของค่า Convergence

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า PC ค่า 0.4937 จะมีค่าความเป็น High = 0.2635 ค่าความเป็น Medium = 0.7365 และค่าความเป็น Low = 0



รูปที่ 2 กราฟข้อมูลนำเข้าของค่า Number of NC

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า NC ค่า 0 จะมีค่าความเป็น Low = 1 ค่าความเป็น Medium และ High = 0



รูปที่ 3 กราฟค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการให้รางวัลและลงโทษ (Output)

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่ากึ่งกลางความเป็น Low = 0.1 ค่ากึ่งกลางความเป็น Medium = 0.2 และค่ากึ่งกลางความเป็น High = 0.3

ขั้นที่ 6.3 สร้างกฎทางฟัซซี่ (กฎ 9 ข้อทางฟัซซี่ลอจิก) โดยอาศัยพื้นฐานของตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ว่า “ถ้า x และ y ดังนั้น z ” หรือ ถ้า PC มีค่า x NC มีค่า y ดังนั้น k ควรมีค่า z เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดระดับของค่าพารามิเตอร์ k ที่ใช้ในการให้รางวัลและลงโทษ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 กฎทางฟัซซี่

Rule	Progressive Convergence	Number of NC	Parameter k
1	Low	Low	Medium
2	Low	Medium	High
3	Low	High	High
4	Medium	Low	Medium
5	Medium	Medium	Medium
6	Medium	High	Medium
7	High	Low	Low
8	High	Medium	Low
9	High	High	Medium

จากตารางที่ 6 คือกฎทางฟัซซี่ที่ใช้กำหนดระดับของค่าพารามิเตอร์ k จากค่า PC และ NC เช่น เมื่อค่า PC เป็น Low นั้นหมายความว่าระยะห่างระหว่างคำตอบรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 5 มีค่าน้อยหรือคำตอบมีการพัฒนาได้น้อย และ NC เป็น High นั้นหมายความว่าจำนวนรอบคำตอบที่ไม่มีการพัฒนามีค่ามาก ดังนั้น หาก PC เป็น Low และ NC เป็น High จึงควรกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ k เป็น High เพื่อเป็นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและ

ลงโทษเพื่อให้คำตอบหลุดจากกลุ่มคำตอบเฉพาะที่และมีการพัฒนาคำตอบที่ดีขึ้น

ขั้นที่ 6.4 ใช้กฎทางฟuzzy ในการกำหนดระดับของค่าพารามิเตอร์ (k) โดยพิจารณาจาก

$$k = \min(\mu_{con}, \mu_{NC}) \quad (11)$$

ตารางที่ 7 กฎทางฟuzzy และการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิก

Rule	Antecedent		Consequent
	Progressive Convergence	The number of NC	Parameter : k
1	Low	Low	Medium
	0	1	0
2	Low	Medium	High
	0	0	0
3	Low	High	High
	0	0	0
4	Medium	Low	Medium
	0.7365	1	0.7365
5	Medium	Medium	Medium
	0.7365	0	0
6	Medium	High	Medium
	0.7365	0	0
7	High	Low	Low
	0.2635	1	0.2635
8	High	Medium	Low
	0.2635	0	0
9	High	High	Medium
	0.2635	0	0

จากตารางที่ 7 เป็นการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกจากตารางกฎทางฟuzzy โดยใช้ค่าจากกราฟข้อมูลการนำเข้าของค่า PC และ NC และพิจารณาเลือกพารามิเตอร์ k ตามสมการที่ 11 เพื่อนำไปใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ k ต่อไป

ขั้นที่ 6.5 การแปลงค่าผลลัพธ์แบบฟuzzy กลับเป็นค่าที่แน่นอน (Defuzzyfication) โดยในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกใช้วิธี Weighted Average Method เนื่องจากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีความสมมาตรและมีมากกว่า 1 รูป โดยนำค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จากการแปลค่าจากกฎทางฟuzzy ของแต่ละระดับคูณกับจุดที่มีค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดของกราฟแต่ละรูป แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ในการให้รางวัลและลงโทษ ดังสมการที่ 12 [14]

$$Low = \sqrt{R_7^2 + R_8^2}$$

$$Low = \sqrt{0.2635^2 + 0^2} = 0.2635$$

$$Medium = \sqrt{R_1^2 + R_4^2 + R_5^2 + R_6^2 + R_9^2}$$

$$Medium = \sqrt{0^2 + 0.7365^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2} = 0.7365$$

$$High = \sqrt{R_2^2 + R_3^2}$$

$$High = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0$$

$$k' = \frac{(Low * CL) + (Medium * CM) + (High * CH)}{Low + Medium + High} \quad (12)$$

เมื่อ CL คือ ค่ากลางของค่า Low

CM คือ ค่ากลางของค่า Medium

CH คือ ค่ากลางของค่า High

ดังนั้น

$$k' = \frac{(0.2635 * 0.1) + (0.7365 * 0.2) + (0 * 0.3)}{0.2635 + 0.7365}$$

$$k' = 0.1736$$

ดังนั้น $k' = 0.1736$ คือ ค่าในการให้รางวัลและลงโทษที่จะนำไปใช้ในการหาคำตอบรอบต่อไป

ขั้นที่ 7 กลับไปทำขั้นที่ 2 เพื่อเริ่มกระบวนการค้นหาคำตอบรอบถัดไป และวนซ้ำจนครบจำนวนรอบที่กำหนดไว้ โดยใช้ค่า k' ที่ปรับแล้วในการให้รางวัลและลงโทษแก่สตริงที่ดีและไม่ดีต่อไป

5. การทดลองทางคอมพิวเตอร์

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองแก้ตัวอย่างปัญหาผ่านโปรแกรม Visual Studio 2013 ภาษา C++ ประมวลผลด้วย คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel Core i5-3210M CPU 2.5 GHz RAM 8.0 GB โดยใช้ อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบ

ร่วมกับฟิชชี่ลอจิก (COIN-F) และวิธีการบรรจบแบบขยาย (COIN-E) ในการแก้ปัญหา

5.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการแก้ปัญหาตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ปัญหา [12] โดยแบ่งเป็นปัญหามิติเล็ก คือ เซตปัญหาที่ 1 และ 2 ปัญหามิติกลาง คือ เซตปัญหาที่ 3 และ 4 และปัญหามิติใหญ่ คือ เซตปัญหาที่ 5 โดยแต่ละปัญหะทำการทดลองซ้ำ 2 รอบการทดลอง ทำให้การทดลองย่อยในงานวิจัยนี้มีขนาด 20 การทดลองต่อ 1 อัลกอริทึม ดังตารางที่ 8 และกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ดังตารางที่ 9 และดังตารางที่ 10

ตารางที่ 8 เซตปัญหาที่ใช้ในการทดลอง [12]

ปัญหาการทดลอง	รอบการทำซ้ำ	จำนวนรุ่นรยนต์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS)	จำนวนสี	จำนวนตัวเลือก
Set 1.1	1	5:3:2:1:1	12	4	2
	2	5:3:2:1:1	12	4	2
Set 1.2	1	4:4:2:1:1	12	4	2
	2	4:4:2:1:1	12	4	2
Set 2.1	1	7:3:2:2:1	15	10	4
	2	7:3:2:2:1	15	10	4
Set 2.2	1	4:3:3:3:2	15	10	4
	2	4:3:3:3:2	15	10	4
Set 3.1	1	8:7:2:2:1	20	13	7
	2	8:7:2:2:1	20	13	7
Set 3.2	1	5:4:4:4:3	20	13	7
	2	5:4:4:4:3	20	13	7
Set 4.1	1	7:5:1:1:1:1:1:1:1	20	15	8
	2	7:5:1:1:1:1:1:1:1	20	15	8
Set 4.2	1	4:4:4:2:1:1:1:1:1	20	15	8
	2	4:4:4:2:1:1:1:1:1	20	15	8
Set 5.1	1	20:20:20:15:15:1:1:1:1:1:1:1:1	100	17	11
	2	20:20:20:15:15:1:1:1:1:1:1:1:1	100	17	11
Set 5.2	1	15:15:10:10:10:10:10:10:4:1:1:1:1:1	100	17	11
	2	15:15:10:10:10:10:10:10:4:1:1:1:1:1	100	17	11

ตารางที่ 9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ COIN-F

COIN-F	
Population size	100
Reward/Punish	0.1
จำนวนรอบพีชชีลอจิก	5
จำนวนรอบในการรัน	2000

จากตารางที่ 9 คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของ COIN-F ซึ่งได้มาจากการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 10 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ COIN-E

COIN-E	
Population size	100
Reward/Punish	0.1
สัดส่วนการสุ่มจาก	70:10:10:10
ตาราง	
จำนวนรอบในการรัน	2000

จากตารางที่ 10 คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของ COIN-E

5.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

งานวิจัยฉบับนี้อาศัยตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมตามรูปแบบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ทั้งสิ้น 5 ตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัลกอริทึมได้แก่ ตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพารето (Convergence to the Pareto-optimal Set) ใช้ประเมินว่า กลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด หากค่าการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพารетоไม่มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมาก ตัวชี้วัดด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread of Solution) ใช้บ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอเพียงใด หากค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบมีค่าเข้าใกล้ 0 หมายความว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้มีการกระจายตัวกว้างและสม่ำเสมอ ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับเทากกลุ่มคำตอบที่แท้จริง I (Ratio

of Non-dominated Solution I) ใช้บ่งชี้ว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้ทั้งหมดเป็นคำตอบที่ตรงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับเทากกลุ่มคำตอบที่แท้จริง II (Ratio of Non-dominated Solution II) ใช้แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้ทั้งหมดที่เป็นคำตอบที่ตรงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้คิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด ซึ่งหากค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับเทากกลุ่มคำตอบที่แท้จริงยิ่งเข้าใกล้ 1 หมายความว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้คือกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากเท่านั้น และตัวชี้วัดด้านระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ (Computer Time) ยิ่งใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยยิ่งดี

5.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง ผลการทดลองที่ได้อยู่ในรูปตัวชี้วัดต่างๆ ดังตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่าตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence) ส่วนใหญ่นั้น COIN-F จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า COIN-E อย่างชัดเจนในทุกๆ เซตปัญหา สำหรับตัวชี้วัดด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) พบว่า COIN-F และ COIN-E จะให้ผลลัพธ์อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน โดยในเซตปัญหามาตรฐานและขนาดใหญ COIN-E จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า แต่ในเซตปัญหามาตรฐานกลาง COIN-F จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า สำหรับตัวชี้วัดด้าน RNDS-I, RNDS-II พบว่า COIN-F จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอย่างชัดเจนในทุกๆ เซตปัญหา และตัวชี้วัดด้าน CPU Time พบว่าในเซตปัญหามาตรฐาน COIN-F จะใช้เวลาในการหาคำตอบใกล้เคียงกับ COIN-E แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น COIN-F จะใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่า COIN-E อย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า COIN-F นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาเหนือกว่า COIN-E ในทุกขนาดปัญหา และถือว่าอัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับพีชชีลอจิกเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 11 ผลการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	Convergence		Spread		RNDS-I		RNDS-II		CPU-Time	
	COIN-F	COIN-E	COIN-F	COIN-E	COIN-F	COIN-E	COIN-F	COIN-E	COIN-F	COIN-E
1	0.0203	0.0832	0.4525	0.4392	1.0000	0.3636	0.8571	0.2857	5.725	3.307
2	0.0455	0.1439	0.4603	0.4574	0.7500	0.1818	0.8182	0.1818	5.616	3.244
3	0.0457	0.0855	0.3789	0.1772	0.7273	0.4167	0.6667	0.4167	5.397	4.788
4	0.1038	0.0820	0.4514	0.4371	0.6667	0.4615	0.5000	0.5000	5.116	5.002
5	0.0096	0.1104	0.6128	0.7205	0.9310	0.1000	0.9000	0.1000	6.988	4.414
6	0.0090	0.1283	0.5824	0.6633	0.9677	0.0625	0.9375	0.0625	7.660	4.383
7	0.0664	0.0630	0.5750	0.5886	0.5652	0.4615	0.5200	0.4800	6.848	4.383
8	0.0285	0.1850	0.5511	0.5944	1.0000	0.0870	0.9091	0.0909	7.400	4.430
9	0.0405	0.0550	0.6988	0.7056	0.9714	0.7391	0.4762	0.4348	101.30	43.742
10	0.0514	0.0614	0.5020	0.6633	0.7619	0.4667	0.6154	0.5385	100.19	42.868
11	0.0168	0.0962	0.7866	0.6822	0.9512	0.1818	0.8667	0.1778	91.696	38.984
12	0.0287	0.0648	0.7329	0.7854	0.8718	0.3721	0.7727	0.3636	93.85	39.140
13	0.0639	0.0461	0.5942	0.6716	0.6774	0.4444	0.5122	0.4878	63.351	27.393
14	0.0253	0.0869	0.5705	0.6629	0.8158	0.3143	0.7381	0.2619	63.679	27.721
15	0.0415	0.0736	0.7033	0.6388	0.7561	0.2979	0.6889	0.3111	63.242	30.286
16	0.0351	0.1061	0.6070	0.5468	0.6129	0.5652	0.6333	0.4333	63.336	26.832
17	0.0360	0.0679	0.5657	0.5955	0.8077	0.4615	0.6364	0.3636	381.74	171.36
18	0.0268	0.0665	0.5599	0.4922	0.8214	0.4667	0.6866	0.3134	388.81	179.86
19	0.0345	0.0506	0.6017	0.6930	0.5690	0.3768	0.5593	0.4407	414.98	202.94
20	0.0434	0.0536	0.6759	0.5787	0.6786	0.5667	0.5278	0.4722	432.18	206.43

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีความหลากหลายและมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิตที่ให้ความสำคัญเท่ากันทั้ง 3 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสิน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และจำนวนรถยนต์ที่ละเมิดร่น้อยที่สุด และได้ทำการนำเสนออัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับพีชชีลอจิก (Combinatorial Optimization with Fuzzy Logic: COIN-F) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ผลจากการทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่าง พบว่าอัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับพีชชีลอจิก มีสมรรถนะที่เหนือกว่าอัลกอริทึมการบรรจบแบบขยายอย่างเห็นได้ชัดเจน คือ

ด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพารโตพบว่าผลลัพธ์จาก COIN-F ให้ค่าที่ดีกว่า COIN-E คิดเป็นร้อยละ 85 ของทั้งหมด ด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบพบว่าผลลัพธ์จาก COIN-F ให้ค่าที่ดีกว่า COIN-E คิดเป็นร้อยละ 55 ของทั้งหมด ด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงพบว่าผลลัพธ์จาก COIN-F มีค่าที่ดีกว่า COIN-E คิดเป็นร้อยละ 100 แต่ด้านเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบพบว่า COIN-F ใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่า COIN-E คิดเป็นร้อยละ 100 ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มการทำงานให้กับอัลกอริทึมเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า COIN-F เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Akgunduz, O. S. and Tunalı, S. A review of the current applications of genetic algorithms in mixed-model assembly line sequencing. *International Journal of Production Research*, 2011; 49: 4483-4503.
- [2] Tsai, L. H. Mixed-Model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. *Management Science*, 1995; 41: 485-495.
- [3] Hyun, C. J., Kim, Y., and Kim, Y. K. A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research*, 1998; 25: 675-690.
- [4] ปารเมศ ฐิติมา. การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2008.
- [5] วันวิสา นฤมิตวงศ์. การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [6] Bartholdi, J. J. Balancing 2 -sided assembly lines - a case-study. *International Journal of Production Research*, 1993; 31: 2447-2461.
- [7] Ozcan, U. and Toklu, B. Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 2009; 57: 217-227.
- [8] Kim, Y. K., Kim, Y. H., and Kim, Y. J. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning & Control*, 2000; 11: 44-53.
- [9] Konak, A., Coit, D. W., and Smith, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006; 91: 992-1007.
- [10] นพพล คำภิรมย์. การประยุกต์ใช้เมมเบติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [11] Chutima, P. and Olarnviwatchai, S. Multi-objective car sequencing problem on mixed-model two-sided assembly lines. *Journal on Intelligent Manufacturing*, 2016; 1-20.
- [12] สถาพร โอฬารวิวัฒน์ชัย. การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [13] Djam, X. Y., Wajiga, G. M., Kimbi, Y. H., and Blamah, N. V. A fuzzy expert system for the management of malaria. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 2011; 5: 84-108.
- [14] Hellendoorn, H. and Thomas, C. Defuzzification in fuzzy controllers. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 1993; 1(2): 109-123.



การลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบ ของชิ้นงานหล่อ

Reduction of Defective Rate from Rough Surface Defects of Casted Product

พิชญ์พันธ์ อุ่นชื่น และ นภัสดวงต์ โอสอศิลป์*

Phichaphan Oonchuen and Napassavong Osothsilp*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand

E-mail: phichaphan@gmail.com, napassavong.o@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตชิ้นงานผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid) ใช้กับรถแทรกเตอร์ เพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานเหล็กหล่อ งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เครื่องมือการปรับปรุงคุณภาพตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา โดยแบ่งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ (1) การนิยามปัญหา โดยเลือกปัญหาและอธิบายสภาพปัญหาที่จะปรับปรุง (2) การวัด โดยการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบหน่วยนับเพื่อประเมินความแม่นยำและความเที่ยงของกระบวนการวัด (3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา โดยการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าและพิสูจน์ความมีนัยสำคัญทางสถิติของปัจจัยนำเข้า (4) การปรับปรุง โดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ (5) การควบคุมกระบวนการ โดยการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง และกำหนดแผนควบคุมใหม่ โดยหลังการปรับปรุงพบว่า สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานลดลงจาก 86.82% เป็น 46% ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวได้ 139,922 บาทต่อปี

คำสำคัญ: ผิวไม่เรียบ, เหล็กหล่อ, ซิกซ์ ซิกมา, Multi-Vari Chart, การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ, การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

The objective of this research is to improve production processes of engine cover part (Case Mid), which is used in a tractor. This research has an aim to reduce the defective rate from rough inner surface of cast iron parts. This research applied the Six Sigma methodology, consisting of 5 phases, to solve the problem. In Phase 1, Define, important problem was selected and clearly defined. In Phase 2, Measure, the measurement system analysis was analyzed in terms of its accuracy and precision. In Phase 3, Analysis, all key process input variables were brainstormed and statistically tested whether they significantly affected the problem. In Phase 4, Improve, the Design of Experiments technique was performed to find out the optimal setting of the key process factors. In Phase 5, Control, a confirmatory experiment was performed to confirm the result after improvement. Then, control plan were updated. After improvement, the defective rate from rough inner surface defects was reduced from 86.82% to 46%. This improvement could save the rework cost of 139,922 baht per year.

Keywords: Rough Surface, Cast iron, Six Sigma, Multi-Vari Chart, Hypothesis Testing, Design of Experiment

1. บทนำ

อุตสาหกรรมรถยนต์มีสภาพการแข่งขันในตลาดที่รุนแรงส่งผลให้แต่ละบริษัทต้องควบคุมค่าใช้จ่ายการผลิตให้ลดลง โรงงานผลิตเหล็กหล่อชิ้นส่วนรถยนต์กรณีศึกษาประสบปัญหาในด้านค่าใช้จ่ายการผลิตสูงเนื่องจากมีผลิตภัณฑ์จำนวนมากที่มีข้อบกพร่องผิวชิ้นงานไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน โดยข้อกำหนดของมาตรฐานผิวชิ้นงานคือชิ้นงานต้องเรียบเสมอผิว ไม่เกิดลักษณะเม็ดทรายเกาะที่ผิวด้านในของชิ้นงานและ/หรือต้องไม่มีรอยคมลักษณะฟันปลา เพราะจะส่งผลต่อค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไปในการแก้ไขผิวชิ้นงาน ทำให้ค่าใช้จ่ายการผลิตสูงโดยไม่จำเป็น ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญและโรงงานต้องเร่งแก้ไขปัญหานี้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานเหล็กหล่อผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid) และลดค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวไม่เรียบของชิ้นงาน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เครื่องมือการปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิด 6 Sigma ซึ่งมีขั้นตอนการปรับปรุง 5 ขั้นตอนดังนี้

1) การนิยามปัญหา (Define) โดยทำการเลือกปัญหาที่มีผลกระทบมากที่สุดมาแก้ไขก่อน และอธิบายสภาพปัญหาให้ชัดเจน

2) การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (Measure) โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและความเที่ยงของกระบวนการวัดแบบหน่วยนับและประเมินความสามารถของกระบวนการก่อนปรับปรุง

3) การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analyze) โดยการวิเคราะห์ตำแหน่งของชิ้นงานที่เกิดปัญหาและจากนั้นทำการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าเป็นสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังก้างปลา จากนั้นเลือก

ปัจจัยมาทดสอบความมีนัยสำคัญต่อปัญหาโดยการวิเคราะห์แผนภาพและการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

4) การปรับปรุงแก้ไข (Improve) โดยกำหนดวิธีการปรับปรุงโดยการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

5) การควบคุมกระบวนการ (Control) ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุง และกำหนดแผนควบคุมใหม่ในการทำงาน [1]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การกำหนดปัญหา

การสำรวจสัดส่วนของเสียแยกตามประเภทข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid) ในช่วงมิถุนายน ปี 2557 ถึงพฤษภาคม ปี 2558 พบว่าของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในมีสัดส่วนมากที่สุด เป็น 86.82% ของปริมาณการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 1 และก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายสูญเสียในการแก้ไขข้อบกพร่องมากที่สุด คิดเป็นเงิน 1,439,436 ล้านบาทต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกปัญหาผิวไม่เรียบมาทำการศึกษาวิจัยเพื่อลดของเสียจากข้อบกพร่องนี้

ตารางที่ 1 ของเสียรุ่น Case Mid ในช่วงเดือน มิ.ย. 2557-พ.ค. 2558

ประเภทข้อบกพร่อง	ชนิด	สัดส่วนของเสีย	ค่าใช้จ่ายสูญเสีย (ล้านบาท)
ผิวไม่เรียบ	Rework	86.82	1.44
ฟองอากาศ	Scrap	4.08	1.07
ทรายตก	Scrap	3.11	0.81
สิ่งแปลกปลอมปน	Scrap	2.50	0.65
บิ่น	Scrap	2.46	0.64
ยุบ	Scrap	2.33	0.61
ทรายฝัง	Scrap	2.17	0.57
เหล็กเย็น	Scrap	2.10	0.55
อื่นๆ	Scrap	2.03	0.53

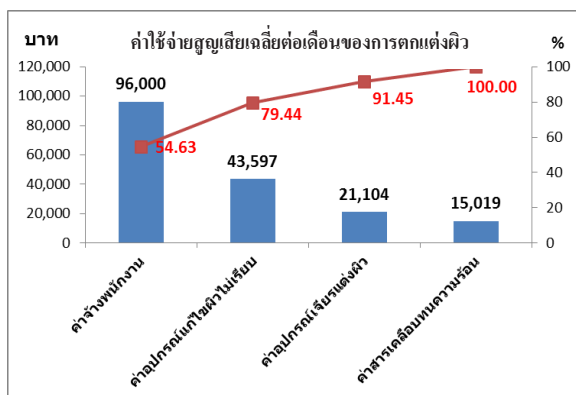
*Rework มีค่าใช้จ่ายสูญเสีย 50 บาทต่อชิ้น

*Scrap มีค่าใช้จ่ายสูญเสีย 800 บาทต่อชิ้น



รูปที่ 1 พารโตแสดงค่าใช้จ่ายสูญเสียของผลิตภัณฑ์
ฝาครอบเครื่องยนต์ (Case Mid)

เมื่อทำการศึกษาค่าใช้จ่ายสูญเสียประเภทข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบ พบว่า ค่าใช้จ่ายสูญเสียที่มากที่สุด คือ ค่าจ้างพนักงานตกแต่งผิวคิดเป็น 54.63% และค่าอุปกรณ์แก้ไขผิวไม่เรียบเป็นอันดับรองลงมาคิดเป็น 24.81% ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยค่าจ้างพนักงานตกแต่งผิวแบ่งเป็น ค่าจ้างพนักงานเจียรแต่งผิว 50% และ ค่าจ้างพนักงานแก้ไขผิวไม่เรียบ 50%



รูปที่ 2 พารโตแสดงค่าใช้จ่ายสูญเสียเฉลี่ยจากการตกแต่งผิว

ผู้วิจัยได้กำหนดเป้าหมายที่จะลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวชิ้นงานไม่เรียบให้เหลือ 50% ภายในเดือน เมษายน ปี 2559

ลักษณะของข้อบกพร่องประเภทผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งมีลักษณะที่สามารถสังเกตได้ คือ ผิวจะมีลักษณะคล้ายเม็ดทรายเกาะ ไม่เป็นระนาบ

เดียวกัน ทำให้ภายหลังนำไปใช้งานอาจทำให้เกิดเม็ดทรายหลุดและเกิดเสียงดังในตัวเครื่องยนต์ได้ ทั้งนี้การตรวจสอบในกระบวนการตกแต่งผิวสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และต้องตกแต่งผิวให้เรียบเป็นระนาบเดียว



รูปที่ 3 ของเสียประเภทข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน

3.2 การวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

เริ่มจากการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด โดยวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบผิวไม่เรียบด้านในด้วยการตรวจสอบด้วยสายตา (Measurement System Analysis) ซึ่งข้อมูลจากการตรวจสอบเป็นหน่วยนับด้วยวิธีแยกแยะตามข้อกำหนดเฉพาะ เป็นผ่าน (G) และไม่ผ่าน (NG) ซึ่งอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐานการตรวจสอบที่กำหนดไว้ว่า ผิวชิ้นงานต้องเรียบเสมอกับผิว ห้ามมีผิวขรุขระและรอยคม

การประเมินระบบการตรวจสอบชิ้นงาน มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดพนักงานผู้ทำการตรวจสอบเพื่อแยกแยะคุณภาพของชิ้นงาน 2 คน ซึ่งเป็นบุคคลที่กำหนดให้สามารถแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้
2. กำหนดขนาดตัวอย่างและจำนวนที่ทดลองซ้ำ โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ของ Fasser and Brettner [2] ซึ่งต้องตรวจสอบชิ้นงานอย่างน้อย 18 ชิ้น โดยแบ่งเป็น ชิ้นงานคุณภาพดี 6 ชิ้น ชิ้นงานคุณภาพดีแบบก้ำกึ่ง และไม่ดีแบบ

ถ้าถึงอย่างละ 3 ชิ้น และและชิ้นงานคุณภาพไม่ดี 6 ชิ้น ซึ่งพนักงานแต่ละคนจะต้องทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง

3. ทำการทดลองและเก็บข้อมูลตามลำดับอย่างสุ่ม เพื่อไม่ให้พนักงานจำค่าวัดเดิมของชิ้นงานตัวอย่างได้
4. วิเคราะห์ระบบการวัดของพนักงานเพื่อประเมินระบบการวัดจากค่าดัชนี เปอร์เซนต์ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงาน เปอร์เซนต์ความไม่ไบอัสของพนักงาน เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพความสามารถในการวัดซ้ำ และ เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพความไม่ไบอัส
5. สรุปผลการวิเคราะห์ หากค่าไม่ผ่านเกณฑ์ต้องมีการสอนมาตรฐานใหม่เพื่อให้พนักงานเกิดความเข้าใจและตัดสินใจได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

เกณฑ์ยอมรับของระบบการวัด

ค่าดัชนีการยอมรับของระบบการวัด กำหนดเกณฑ์ไว้ที่ 100% [3] ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายของบริษัท รมณีสึกษาที่ให้ความสำคัญด้านคุณภาพของสินค้าอย่างมากเพราะไม่ต้องการให้ชิ้นงานของเสียที่เกิดขึ้นถูกส่งไปถึงมือลูกค้าแม้แต่ชิ้นเดียว เพราะจะทำให้ส่งผลต่อชื่อเสียงของบริษัท

จากผลการวิเคราะห์ความสามารถของระบบการวัด พบว่า ผลการประเมินดัชนีชี้วัดทั้ง 4 ค่า ไม่ผ่านเกณฑ์ยอมรับ ดังนั้นจึงต้องทำการอบรมโดยให้เห็นชิ้นงานตัวอย่างจริงและสอนมาตรฐานใหม่ เพื่อให้พนักงานเกิดความเข้าใจและตัดสินใจได้อย่างถูกต้องมากขึ้น จากนั้นทำการตรวจสอบหลังอบรมใหม่ทั้ง 2 คน พบว่า พนักงานสามารถตัดสินใจการคัดแยกได้ถูกต้องทุกชิ้น ดังนั้นความสามารถของระบบการวัดหรือการตรวจสอบข้อบกพร่องผิวชิ้นงานด้านในไม่เรียบ ในการทดสอบครั้งที่สองอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 2

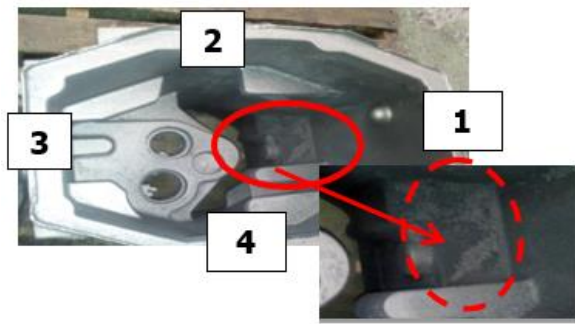
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

ก่อนอบรม	% ความสามารถ ในการวัดซ้ำ	% ความไม่ ไบอัส	% ประสิทธิภาพ ความสามารถ ในการวัดซ้ำ	% ประสิทธิภาพ ความไม่ไบอัส
พนักงานคนที่ 1	83.33	83.33	83.33	83.33
พนักงานคนที่ 2	88.89	88.89		
หลังอบรม	% ความสามารถ ในการวัดซ้ำ	% ความไม่ ไบอัส	% ประสิทธิภาพ ความสามารถ ในการวัดซ้ำ	% ประสิทธิภาพ ความไม่ไบอัส
พนักงานคนที่ 1	100	100	100	100
พนักงานคนที่ 2	100	100		

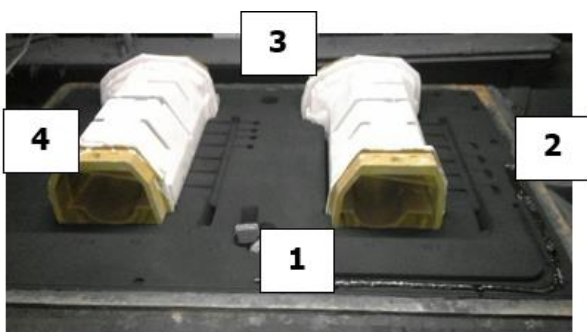
เมื่อความสามารถของระบบการวัดผ่านเกณฑ์แล้ว จึงทำการเก็บข้อมูลเพื่อหาสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบใหม่ โดยทำการทดลองเพิ่มเติมจำนวน 1 เตา (80 ชิ้นงาน) พบว่า มีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 67 ชิ้น คิดเป็น 83.75% เมื่อนำมาคำนวณขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้เพื่อประมาณค่าสัดส่วนของเสียแบบไม่ทราบขนาดประชากร พบว่าต้องใช้ขนาดตัวอย่างอย่างน้อย 53 ชิ้น ซึ่งมีค่าน้อยกว่าจำนวนชิ้นงานที่เก็บมาแล้ว 80 ชิ้น จึงสามารถนำสัดส่วนของเสียที่ประมาณจากขนาดตัวอย่างเท่ากับ 80 ชิ้น มาใช้ได้ หลังปรับปรุงความสามารถระบบการวัด พบว่า สัดส่วนของเสียเป็น 83.75% ซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินเป้าหมายของงานวิจัยนี้ จึงต้องทำการหาสาเหตุของปัญหาและปรับปรุงต่อไป

3.3 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาเริ่มจากการหาตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในเพื่อระบุสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจทำให้เกิดปัญหา จากการผลิต 1 เตา (80 ชิ้นงาน) เมื่อทำการตรวจสอบผิวไม่เรียบด้านในทั้ง 4 ด้านพบว่า ตำแหน่งของกระสวน (Pattern) ฝาล่าง จะเกิดผิวไม่เรียบเพียงด้านเดียว (ด้านที่ 1 ในรูปที่ 4) เนื่องจากทรายใส่แบบมีความหนาแน่นมาก ส่งผลให้ความร้อนของน้ำเหล็กไม่สามารถระบายขึ้นด้านบนได้ ทำให้ทรายใส่แบบได้รับความร้อนที่สูงเป็นเวลานาน เกิดการขยายตัวของเม็ดทรายใส่แบบทำให้น้ำเหล็กแทรกกระหว่างเม็ดทรายได้ จึงเกิดผิวไม่เรียบที่ชิ้นงานหล่อ แสดงในรูปที่ 4 และ รูปที่ 5 ดังนี้



รูปที่ 4 บริเวณการเกิดข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในของชิ้นงานหล่อ



รูปที่ 5 ตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในของไส้แบบ

จากผลการทดลอง พบว่า มีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 67 ชิ้น คิดเป็น 83.75% โดยบริเวณการเกิดข้อบกพร่องเกิดที่ด้านที่ 1 ทั้งหมดซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไส้แบบกดทับแบบทราซ (ด้านที่ 1 ในรูปที่ 5) แต่ตำแหน่งการเกิดข้อบกพร่องนั้นไม่แน่นอน (ส่วนบน กลาง ล่าง) นอกจากนี้ข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในไม่ได้เกิดขึ้นทุกชิ้นงาน แสดงว่าสาเหตุอาจมาจากการเคลือบสารทนความร้อนที่ไส้แบบบางตำแหน่งไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนของน้ำเหล็ก ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษากระบวนการทำไส้แบบที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่พิจารณา คือ ความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบ รวมถึงวิธีการเคลือบที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบ

การวิเคราะห์หาสาเหตุที่ชั้นสารเคลือบไม่สม่ำเสมอทำโดยใช้ฝักร้างปลา โดยการระดมสมองของทีมงานที่จัดตั้งขึ้น พบว่าอาจมีสาเหตุหลักมาจาก 1) ความเข้มข้นของสารเคลือบทนความร้อนน้อยเกินไป ส่งผลต่อชั้นความหนาของสารเคลือบที่ไม่เพียงพอที่จะทนอุณหภูมิของน้ำเหล็ก 2) วิธีการในการพ่นสเปรย์เคลือบสารทนความร้อนไม่เหมาะสม เนื่องจากวิธีการพ่นสเปรย์เคลือบสามารถควบคุมการทำงานได้ยากและชั้นความหนาสารเคลือบแต่ละตำแหน่งไม่สม่ำเสมอ ทำให้บางจุดอาจบางเกินไป และ 3) อุปกรณ์ในการพ่นเคลือบสารทนความร้อนไม่เหมาะสม เนื่องจากเป็นหัวฉีดแบบสเปรย์ ทำให้เกิดการฟุ้งของสารเคลือบทนความร้อน อาจส่งผลให้พนักงานไม่สามารถตรวจสอบการเคลือบผิวไส้แบบได้อย่างทั่วถึง อาจทำให้บางตำแหน่งของไส้แบบไม่ได้รับความหนาตามต้องการ

ทั้งนี้ปัจจัยในข้อ 2 และ 3 ส่งผลให้ความหนาของชั้นสารเคลือบไม่เหมาะสม หากความหนาของชั้นสารเคลือบน้อยเกินไป จะส่งผลให้เกิดผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีแนวทางในการปรับปรุงวิธีการเคลือบสารจากการพ่นสเปรย์เป็นการราดสารแทน จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบระหว่างวิธีการพ่นสเปรย์และวิธีการราดสารโดยใช้กล้อง Dino-Lite โดยตั้งสมมติฐานว่าการราดสารเคลือบจะทำให้ชั้นสารเคลือบมีความสม่ำเสมอมากกว่าและมีความหนามากกว่าการพ่นสเปรย์เคลือบ ซึ่งจะทำให้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานน้อยกว่า นอกจากนี้จะทำการทดสอบว่าจำนวนรอบในการหมุนเคลือบและความเข้มข้นของสารเคลือบมีผลต่อชั้นความหนาสารเคลือบอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และหาจำนวนรอบและความเข้มข้นที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความหนาชั้นสารเคลือบที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมจากการแก้ไขข้อบกพร่องและค่าใช้จ่ายของสารเคลือบต่ำที่สุด

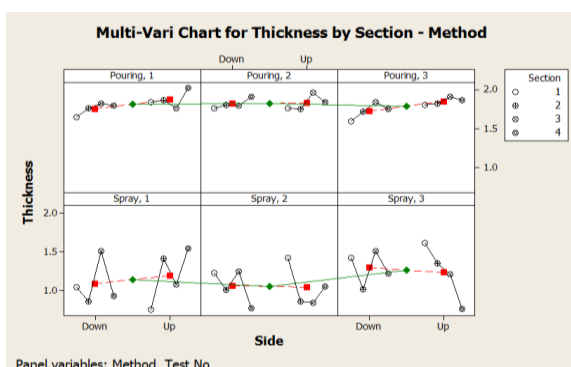
3.3.1 การวิเคราะห์ความหนาชั้นสารเคลือบเชิงเปรียบเทียบระหว่างวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

ขั้นตอนในการวัดความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบ จะทำการวัดส่วนบนและล่างของด้านทั้งสี่ของไส้แบบหลังเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร โดยสุ่มวัดวิธีการละ 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนี้



รูปที่ 6 รูปร่างของไส้แบบในแต่ละด้าน

ทำการบันทึกความหนาของชั้นสารเคลือบที่วัดได้ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และวิธีการราดสาร โดยการนำ Multi-Vari Chart [4] พบว่า ความหนาของชั้นสารเคลือบของกระบวนการเคลือบด้วยการราดสาร มีความสม่ำเสมอและให้ค่าเฉลี่ยของความหนามากกว่าการพ่นสเปรย์ โดยความหนาชั้นสารเคลือบของวิธีการราดสารอยู่ในช่วง 1.5 - 2.0 มม. โดยมีค่าเฉลี่ย 1.81 มม. และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.09 มม. ในขณะที่ความหนาชั้นสารเคลือบของวิธีการพ่นสเปรย์อยู่ในช่วง 0.7 - 1.7 มม. โดยมีค่าเฉลี่ย 1.15 มม. และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.27 มม. ดังแสดงในรูปที่ 7



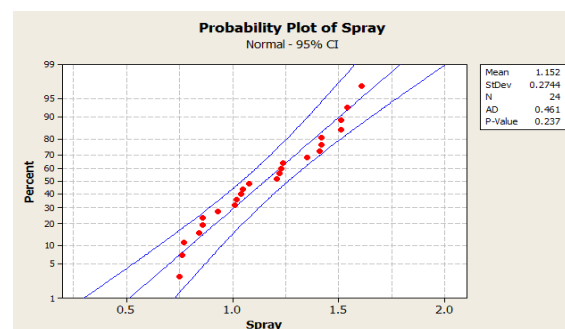
รูปที่ 7 Multi-Vari Chart ของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

จากนั้นจึงทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อพิสูจน์ว่ากระบวนการราดสารเคลือบมีผลต่อความหนาของชั้นสารเคลือบอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

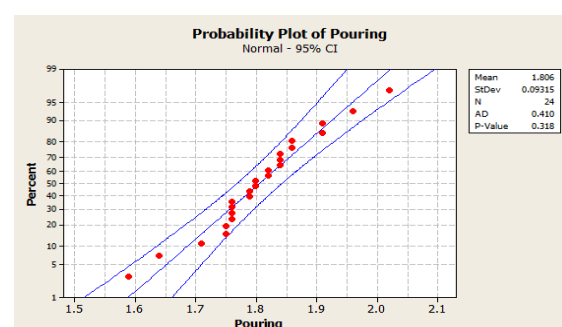
3.3.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติว่าวิธีการราดสารให้ค่าเฉลี่ยความหนาและความสม่ำเสมอของชั้นสารเคลือบมากกว่า และสัดส่วนของเสียน้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

1) การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูล

ค่าความหนาของชั้นสารเคลือบทนความร้อนด้วยวิธีทั้งสองมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ เนื่องจากค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ดังนี้



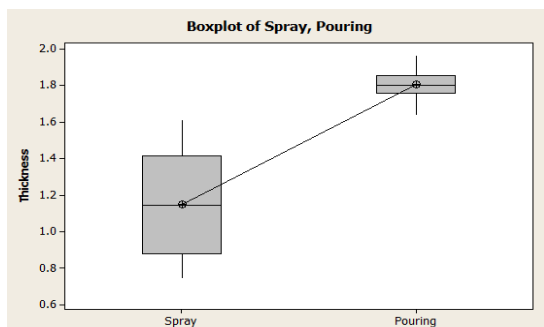
รูปที่ 8 Normal probability plot ของค่าความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์



รูปที่ 9 Normal probability plot ของค่าความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการราดสาร

2) การทดสอบสมมติฐานเรื่องความแปรปรวนของ ความหนาชั้นสารเคลือบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟแสดงค่าความหนาชั้นสารเคลือบทั้งสองวิธีการโดยการพิจารณา Box plot พบว่าวิธีการราดสารมีค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบมากกว่าและความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบค่าน้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

ผู้วิจัยจึงต้องการพิสูจน์สมมติฐานว่าวิธีการราดสารจะทำให้ความหนาของชั้นสารเคลือบมีความสม่ำเสมอมากกว่าวิธีการพ่นสเปรย์อย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือมีสมมติฐานว่าความแปรปรวนของค่าความหนาจากวิธีการพ่นสเปรย์มีค่ามากกว่าความแปรปรวนของค่าความหนาจากวิธีการราดสารซึ่งสามารถเขียนสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$$

โดย σ_1^2 , σ_2^2 แทนค่าความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสารตามลำดับ

ผลการทดสอบความแปรปรวน พบว่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง < 0.05 จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 หรือค่าความแปรปรวนของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์มีค่ามากกว่าวิธีการราดสารที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 11

Test for Equal Variances: Spray, Pouring

95% Bonferroni confidence intervals for standard deviations

	N	Lower	StDev	Upper
Spray	24	0.206047	0.274411	0.405576
Pouring	24	0.057224	0.076210	0.112637

F-Test (normal distribution)

Test statistic = 12.97, p-value = 0.000

Levene's Test (any continuous distribution)

Test statistic = 40.86, p-value = 0.000

รูปที่ 11 ผลการทดสอบความแตกต่างของ
ค่าความแปรปรวนของความหนาชั้นเคลือบ
ด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

3) การทดสอบสมมติฐานเรื่องค่าเฉลี่ยของความหนา ชั้นสารเคลือบ

เนื่องด้วยจากพิจารณาค่าความแปรปรวนของค่าความหนาชั้นสารเคลือบระหว่างกระบวนการพ่นสเปรย์และกระบวนการราดสาร พบว่าความแปรปรวนมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานของค่าเฉลี่ยเป็นแบบความแปรปรวนต่างกัน โดยมีสมมติฐานว่าวิธีการราดสารจะทำให้ค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นสารเคลือบมีค่ามากกว่าวิธีการพ่นสเปรย์ ซึ่งแสดงสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2$$

โดย μ_1 , μ_2 แทนค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราดสารตามลำดับ

ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย พบว่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง < 0.05 จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 หรือค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการพ่นสเปรย์มีค่าน้อยกว่าวิธีการราดสารที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 12

Two-Sample T-Test and CI: Spray, Pouring

Two-sample T for Spray vs Pouring

	N	Mean	StDev	SE Mean
Spray	24	1.152	0.274	0.056
Pouring	24	1.8058	0.0762	0.016

Difference = μ (Spray) - μ (Pouring)
 Estimate for difference: -0.654167
 95% upper bound for difference: -0.555012
 T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -11.26 P-Value = 0.000 F = 26

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	67	80	0.837500
2	56	80	0.700000

Difference = p (1) - p (2)
 Estimate for difference: 0.1375
 95% CI for difference: (0.00858603, 0.266414)
 Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 2.09 P-Value = 0.037

รูปที่ 12 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย ของค่าความหนาแน่นเคลือบด้วยวิธีการเคลือบ แบบพ่นสเปรย์และราดสาร

4) การทดสอบสมมติฐานเรื่องสัดส่วนของเสีย

ต่อไปพิจารณาค่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่อง
ผิวไม่เรียบด้านในของชิ้นงานด้วยวิธีการราดสารว่ามีค่า
น้อยกว่าค่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้าน
ในของชิ้นงานด้วยวิธีการพ่นสเปรย์หรือไม่ โดยสามารถ
เขียนสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 > p_2$$

โดย p_1, p_2 แทนสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่อง
ประเภทผิวไม่เรียบด้านในด้วยวิธีการพ่นสเปรย์และราด
สารตามลำดับ

ผลการทดสอบค่าสัดส่วนของเสีย พบว่า p-value มี
ค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่ง < 0.05 จึงสรุปว่าปฏิเสธ H_0 หรือ
สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้วยวิธีการราด
สารมีค่าน้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ
0.05 โดยแสดงผลดังรูปที่ 13

เนื่องจากได้ข้อสรุปว่าวิธีการราดสารให้สัดส่วนของ
เสียที่น้อยกว่าวิธีการพ่นสเปรย์ซึ่งเป็นวิธีการเดิมอย่างมี
นัยสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกกระบวนการเคลือบ
สารทนความร้อนด้วยการราดสารมาใช้ โดยจะศึกษาต่อ
เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนา
ของชั้นสารเคลือบที่จะทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุด

รูปที่ 13 ผลการทดสอบความแตกต่างของสัดส่วนของเสีย จากวิธีการพ่นสเปรย์และราดสาร

โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนาที่พิจารณาได้แก่ ความ
เข้มข้นสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบ โดย
มีแนวคิดที่ว่า ความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบ
การหมุนเคลือบที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาชั้นสารเคลือบ
มากขึ้นด้วยส่งผลให้ของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบ
น้อยลง ทำให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขข้อบกพร่องลดลงด้วย
ทั้งนี้ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นทาง
ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการหาค่าของสองปัจจัยนี้ที่
เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุด

3.4 การปรับปรุงแก้ไข

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

ในขณะนี้ เริ่มต้นจากการออกแบบการทดลองและ
ทำการทดลองเพื่อหาว่าปัจจัยนำเข้าใดบ้างที่มีผลต่อ
สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในอย่างมี
นัยสำคัญ และมีผลในทิศทางใด จากนั้น ทดสอบ
ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับแต่ละ
ปัจจัยที่จะส่งผลให้สัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม่
เรียบด้านในชิ้นงานต่ำที่สุด โดยการออกแบบการทดลอง
แบบพินผิวดอบสองแบบส่วนประสมกลาง [5] ซึ่งมี
จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 14 การทดลอง ทั้งนี้ได้ใช้แบบ
การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ Face Centered
ซึ่งมีการกำหนดให้ค่า α เป็น ± 1 เนื่องจากข้อจำกัดของ
ปัจจัยจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่ไม่สามารถปรับให้
ละเอียดเป็นทศนิยมได้ และข้อจำกัดของปัจจัยความเข้มข้น
สารไม่สามารถปรับค่าให้ละเอียดไปกว่านี้ได้ เพราะเป็น
กระบวนการที่ใช้คนในการปรุงแต่งสารเพื่อให้ได้ความ
เข้มข้นตามที่ต้องการ ช่วงค่าความเข้มข้นของสารเคลือบ
และจำนวนรอบในการหมุนเคลือบอยู่ในขอบข่ายค่าสุดและ

สูงสุดของมาตรฐานในกระบวนการผลิตแล้ว [6] หากปัจจัยทั้งสองมีค่ามากเกินไปจะส่งผลให้สารเคลือบมีความหนืดสูงเกิดเป็นก้อนไม่สามารถเคลือบได้ แต่ถ้าน้อยเกินไปจะทำให้ชั้นสารเคลือบที่บางเกินไปจนเกิดของเสียจำนวนมาก ทั้งนี้แต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ 3 ระดับ โดยค่าที่แต่ละระดับของปัจจัย แสดงไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า

ปัจจัยนำเข้า (X)		ระดับของปัจจัย		
		-1	0	1
A	ความเข้มข้นของสารเคลือบทนความร้อน (Baume)	28 (27-29)	31 (30-32)	34 (33-35)
	จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ (รอบ)	1	2	3

ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือร้อยละของชิ้นงานที่มีข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน โดยในการทดลอง 1 ครั้ง ทดสอบชิ้นงานจำนวน 20 ชิ้น และจะศึกษาตัวแปรตอบสนองเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมด้วย เนื่องจาก เมื่อสัดส่วนของเสียต่ำสุด อาจจะไม่ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำสุด เพราะค่าใช้จ่ายโดยรวม ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายจากการแก้ไขตกแต่งชิ้นงาน ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของเสียต่ำลง และค่าใช้จ่ายของสารเคลือบ ซึ่งอาจจะมีค่ามากขึ้นเมื่อสัดส่วนของเสียต่ำลงเช่นเดียวกัน

3.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองแล้วได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนข้อบกพร่องผิวไม่เรียบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (P-Value < 0.05) ได้แก่ ผลหลัก (Main effects) ของทั้งสองปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นสารเคลือบ และ จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ โดยอันตรกิริยา (A*B interaction) ไม่มีนัยสำคัญ และ

อิทธิพลเนื่องจากความโค้ง (Curvature) ก็ไม่มีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 4 ตารางออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

A	B	สัดส่วนของเสีย
-1	-1	90
0	1	55
0	-1	85
1	1	45
-1	1	70
0	0	70
0	0	70
-1	0	80
0	0	80
1	-1	70
0	0	70
1	0	60
0	0	75

Response Surface Regression: %Reject inside versus A, B

Analysis of Variance

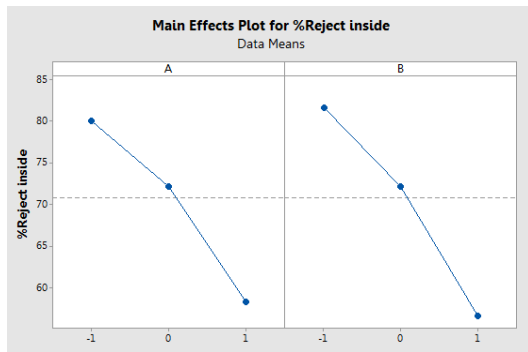
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	1689.36	337.872	22.97	0.000
Linear	2	1641.67	820.833	55.81	0.000
A	1	704.17	704.167	47.88	0.000
B	1	937.50	937.500	63.75	0.000
Square	2	41.45	20.723	1.41	0.306
A*A	1	12.83	12.828	0.87	0.381
B*B	1	12.83	12.828	0.87	0.381
2-Way Interaction	1	6.25	6.250	0.42	0.535
A*B	1	6.25	6.250	0.42	0.535
Error	7	102.95	14.706		
Lack-of-Fit	3	22.95	7.648	0.38	0.772
Pure Error	4	80.00	20.000		
Total	12	1792.31			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.83490	94.26%	90.15%	80.84%

รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน

จากการวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง พบว่า เมื่อความเข้มข้นสารเคลือบมีค่าสูงขึ้น และ จำนวนรอบในการหมุนเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในกราฟผลหลักดังรูปที่ 15 ดังนี้



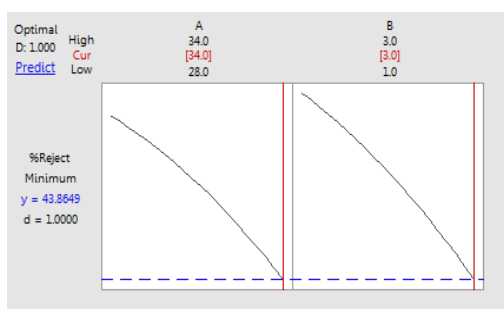
รูปที่ 15 ผลหลักของปัจจัยที่มีต่อสัดส่วนของเสีย
ข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงาน

จากนั้นหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มี
นัยสำคัญและค่าสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องผิว
ไม่เรียบด้านในชิ้นงาน โดยใช้เทคนิค Backward
Stepwise Regression ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\%Reject\ inside = 70.77 - 10.83 A - 12.50 B$$

จากสมการ Stepwise Regression พบว่ามีค่า
สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เท่ากับ 90.15% ซึ่งอยู่ในค่าที่
ยอมรับได้ (>80%) จึงสรุปได้ว่า สมการถดถอยนี้มีความ
น่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำมาพยากรณ์สัดส่วนของเสียได้

เมื่อได้ปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญแล้ว จึงทำการ
วิเคราะห์เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมให้กับแต่ละปัจจัย
โดยการใช้หลักการ Optimization โดยใช้โปรแกรม
Minitab ได้ผลการหาค่าที่เหมาะสมดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ผลการทำ Response optimizer เพื่อหาค่า
ปรับตั้งที่เหมาะสมเพื่อให้สัดส่วนของเสียต่ำที่สุด

จากการทำ Response optimizer ได้ค่าปรับตั้งที่
เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังนี้

- ความเข้มข้นสารเคลือบ 34 Baume
- จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ 3 รอบ

ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละ
ปัจจัยได้ค่าสัดส่วนของเสียจากการประมาณโดยโปรแกรม
Response Optimizer ที่ 43.86% และ พบ ว่า มี
ความสัมพันธ์กับปัญหาผิวไม่เรียบด้านในชิ้นงานดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารเคลือบ ควรอยู่ในระดับสูง
เนื่องจาก ยิ่งความเข้มข้นของสารมาก ยิ่งสามารถ
ต่อต้านอนุมูลอิสระที่สูงของน้ำเหล็กได้ดี ทำให้น้ำ
เหล็กสัมผัสกับเม็ดทรายได้น้อย เกิดการขยายตัว
ของเม็ดทรายได้ยาก น้ำเหล็กจึงไม่สามารถแทรก
ระหว่างเม็ดทรายได้ จึงทำให้สัดส่วนของเสีย
น้อย
- 2) จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ ควรอยู่ใน
ระดับสูง เนื่องจาก จำนวนรอบในการเคลือบ
แปรผันตรงกับชั้นความหนาของสารเคลือบ
ความหนาชั้นสารเคลือบยิ่งมาก โอกาสน้ำเหล็ก
สัมผัสกับเม็ดทรายจะน้อยลง เม็ดทรายขยายตัว
ได้ยาก ทำให้น้ำเหล็กไม่สามารถแทรกกระหว่าง
เม็ดทรายได้ จึงทำให้สัดส่วนของเสียลดลง

การปรับตั้งค่าของระดับปัจจัยความเข้มข้นของสาร
เคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่ค่าสูงจะทำให้
เกิดสัดส่วนของเสียลดลง ซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ไข
ตกแต่งชิ้นงานน้อยตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันจะส่งผล
ให้ค่าใช้จ่ายของสารเคลือบสูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้สารใน
ปริมาณที่สูงขึ้น ดังนั้นอาจเกิดค่าใช้จ่ายโดยรวมที่ไม่ต่ำ
ที่สุดได้ ดังนั้นในการหาค่าที่เหมาะสมของสองปัจจัย
ดังกล่าวนี้ จึงไม่สามารถนำเพียงสัดส่วนของเสียมาเป็น
ผลตอบสนองได้ ผู้วิจัยจึงเลือกค่าใช้จ่ายโดยรวม ซึ่งเป็น
ผลรวมระหว่างค่าใช้จ่ายจากการแก้ไขข้อบกพร่องผิวไม่
เรียบด้านใน และค่าใช้จ่ายจากการใช้สารเคลือบทนความ
ร้อนมาเป็นตัวแปรตอบสนองแทน โดยรายละเอียดของ
ค่าใช้จ่ายมีดังต่อไปนี้

- 1) ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขข้อบกพร่องผิวไม่เรียบด้านใน 16 บาทต่อชิ้นงาน คิดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขผิวไม่เรียบ 1 ทริตเมนต์ได้คือ $(20 \text{ ชิ้นงาน}) \times (16 \text{ บาทต่อชิ้น}) \times (\text{สัดส่วนของเสีย})$ โดยก่อนการปรับปรุง มีค่าสัดส่วนของเสีย 83.75% คิดเป็นเงิน 268 บาทต่อทริตเมนต์
- 2) ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบทนความร้อนจะเพิ่มขึ้น หากมีการใช้ความเข้มข้นของสารเคลือบเพิ่มขึ้นหรือจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งรายละเอียดค่าใช้จ่ายค่าสารเคลือบมีรายละเอียดดังนี้

ในสายการผลิตปัจจุบัน มีการจัดซื้อสารเคลือบทนความร้อนกิโลกรัมละ 20 บาท และการใช้สารเคลือบ 25 กิโลกรัม สามารถใช้ในการเคลือบสารได้ 60 ชิ้นงาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร 1 ระดับ โดยจำนวนรอบเท่าเดิม ส่งผลให้ต้องใช้สารเคลือบจำนวนมากขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าคิดที่ขนาดตัวอย่างในการทดลอง 1 ทริตเมนต์ (20 ชิ้นงาน) เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ขณะที่จำนวนรอบในการหมุนเคลือบเท่ากัน สามารถแสดงในตารางที่ 5

จากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนระดับของจำนวนรอบในการหมุนเคลือบ 1 ระดับโดยความเข้มข้นของสารเคลือบเท่าเดิม ส่งผลให้มีการใช้ปริมาณชิ้นงานที่เคลือบได้เพิ่มขึ้นหรือลดลง 2 ชิ้นงาน ซึ่งค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบจะเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นถ้าคิดที่ความเข้มข้นสารเคลือบระดับ 0 (31 Baume) สามารถคิดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบใน 1 ทริตเมนต์ คือ $(20 \text{ ชิ้นงาน}) \times [(25 \text{ กิโลกรัม} \times 20 \text{ บาทต่อกิโลกรัม}) / (\text{จำนวนชิ้นงานที่เคลือบได้})]$ โดยสรุปค่าใช้จ่าย การใช้จำนวนรอบในการหมุนเคลือบเมื่อระดับของปัจจัยเปลี่ยนแปลง 3 ระดับ ขณะที่ความเข้มข้นสารเคลือบเท่ากัน ได้ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่ความเข้มข้นระดับต่างๆ ที่มีจำนวนรอบการหมุนระดับ 0 (2 รอบ)

จำนวนชิ้นงานเคลือบ (ชิ้น)	ความเข้มข้นสารเคลือบ			หน่วย
	-1 (28 Baume)	0 (31 Baume)	1 (34 Baume)	
ปริมาณการใช้สารเคลือบสำหรับ 60 ชิ้นงาน	22	25	29	กิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบ	440	500	580	บาท
ปริมาณการใช้สารเคลือบสำหรับ 20 ชิ้นงาน	7.33	8.33	9.67	กิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบสำหรับ 20 ชิ้นงาน (1 ทริตเมนต์)	146.67	166.67	193.33	บาท

ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่จำนวนรอบการหมุนระดับต่างๆ ที่มีความเข้มข้นระดับ 0 (31 Baume)

ความเข้มข้นสารเคลือบ 31 Baume (ค่าใช้จ่ายสารเคลือบ 500 บาท)	จำนวนรอบหมุนเคลือบ			หน่วย
	-1 (1 รอบ)	0 (2 รอบ)	1 (3 รอบ)	
จำนวนชิ้นงานเคลือบได้	62	60	58	ชิ้น
ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบต่อชิ้น	8.06	8.33	8.62	บาท
ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบสำหรับ 20 ชิ้นงาน (1 ทริตเมนต์)	161.20	166.60	172.40	บาท

จากตารางที่ 5 และ ตารางที่ 6 จึงนำมาสรุปเป็นค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบได้ (ค่าใช้จ่ายที่ระดับความเข้มข้นสารเคลือบต่างๆ + ค่าใช้จ่ายที่ระดับจำนวนรอบเคลือบต่างๆ) ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบที่ระดับความเข้มข้น i จำนวนรอบหมุนเคลือบ j ใน 1 ทริตเมนต์

ค่าใช้จ่ายการใช้สารเคลือบ 1 ทริตเมนต์ (Z)		ความเข้มข้นสารเคลือบ (i)		
		-1	0	1
จำนวนรอบหมุนเคลือบ (j)	-1	307.79	327.87	354.53
	0	313.34	333.34	360.00
	1	319.08	339.08	365.74

เมื่อได้ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคลือบแล้ว ทางผู้วิจัยสามารถสรุปค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวได้ดังสมการที่ 1

$$(\text{Total cost}) = \text{cost rework} + Z_{ij} \quad (1)$$

จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวไม้เรียบก่อนการปรับปรุงซึ่งเป็นวิธีการพันสเปรย์เคลือบ ต่อ 1 ทริตเมนต์ ซึ่งใช้ระดับความเข้มข้นสารเคลือบที่ 0 (31 Baume) และ มีปริมาณชิ้นงานที่เคลือบได้เท่ากับจำนวนรอบหมุนเคลือบที่ -1 (62 ชิ้นงาน) เพราะฉะนั้นค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวก่อนปรับปรุงมีค่าเท่ากับ $268 + 327.87 = 595.87$ บาทต่อทริตเมนต์ จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าปรับตั้งที่ดีที่สุดให้กับแต่ละปัจจัย โดยผลตอบแทนเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด ได้ผลการทำ Response Optimizer ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ผลการทำ Response optimizer เพื่อหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำที่สุด

จากการทำ Response optimizer ได้ค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยดังนี้

- ความเข้มข้นสารเคลือบ 34 Baume
- จำนวนรอบในการหมุนเคลือบ 3 รอบ

จากการวิเคราะห์หาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยได้ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการตกแต่งผิวจากการประมาณ โดยโปรแกรม Response Optimizer ที่ 506.10 บาท และพบว่า ระดับความเข้มข้นของสารเคลือบและจำนวนรอบในการหมุนเคลือบที่ทำให้สัดส่วนของเสียต่ำที่สุดและค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำที่สุดเป็นค่าเดียวกัน เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการแก้ไขของเสียมีสัดส่วนที่มากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายของสารเคลือบ

3.4.3 สรุประยะการปรับปรุง

การปรับตั้งค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในวิธีการราดสารเคลือบด้วยวิธีการ optimization พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารเคลือบทนความร้อนที่ 34 Baume และ จำนวนรอบการหมุนเคลือบที่ 3 รอบ ประเมินการว่า สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทผิวไม้เรียบจะลดลงจาก 83.75% เหลือ 43.86% ลดลง 39.89% ซึ่งแม้ว่าจะลดสัดส่วนของเสียลงได้มาก แต่สัดส่วนของเสียหลังปรับปรุงก็ยังสูงอยู่ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อสัดส่วนของเสียและค่าใช้จ่ายในอนาคต

3.5 การติดตามควบคุม

3.5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังปรับปรุงโดยเลือกค่าปรับตั้งที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นสารเคลือบที่ 34 Baume และ จำนวนรอบการหมุนเคลือบ 3 รอบ จำนวน 1 เตา (80 ชิ้นงาน) พบว่า มีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 36 ชิ้น คิดเป็น 46.25% เมื่อนำมาคำนวณขนาดตัวอย่างจากกรณีต้องการประมาณค่าสัดส่วนแบบไม่ทราบขนาดประชากร พบว่า ต้องใช้ขนาดตัวอย่าง อย่างน้อย 96 ชิ้น ซึ่งมีค่ามากกว่าจำนวนข้อมูลที่มีเก็บมาแล้ว ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มอีก 1 ทริตเมนต์ (20 ชิ้นงาน) เพื่อให้เพียงพอต่อขนาดตัวอย่างที่ต้องใช้ เมื่อทำการเก็บข้อมูลเพิ่มอีก 20 ชิ้นงาน พบว่ามีชิ้นงานของเสียทั้งหมด 9 ชิ้น ซึ่งรวมเป็นปริมาณของเสียทั้งหมด 46 จาก 100 ชิ้นงาน คิดเป็น 46% ซึ่งผลสัดส่วนของเสียจะใกล้เคียงกับ Response Optimizer (43.67%) หลังจากผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลหลังปรับปรุงแล้ว พบว่าสัดส่วนของเสียข้อบกพร่องผิวไม้เรียบลดลงจาก 83.75% เป็น 46% โดยค่าใช้จ่ายหลังปรับปรุงจากการคำนวณจากสมการที่ (1) เท่ากับ $147.2 + 365.74 = 512.94$ บาทต่อทริตเมนต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวไม้เรียบก่อนการปรับปรุงต่อ 1 ทริตเมนต์ มีค่าเท่ากับ 595.87 บาทต่อทริตเมนต์ ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ 82.93 บาทต่อทริตเมนต์ ทั้งนี้ในแต่ละเดือนจะทำ

การผลิตชิ้นงาน Case Mid เหล็ก 2,800 ชิ้นต่อเดือน ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายตกแต่งผิวลงได้ 139,922 บาทต่อปี

จึงทำการทดสอบ แบบ two proportion เพื่อทดสอบว่าค่าสัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าสัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุงหรือไม่ โดยสามารถเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติได้ดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 > p_2$$

โดย p_1 คือ สัดส่วนของเสียก่อนการปรับปรุง

p_2 คือ สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุง

ผลการทดสอบค่าสัดส่วนของเสีย พบว่า P-Value < 0.05 จึงสรุปได้ว่าปฏิเสธ H_0 หรือ สัดส่วนของเสียหลังการปรับปรุงลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแสดงผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 18

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	67	80	0.837500
2	46	100	0.460000

Difference = p (1) - p (2)

Estimate for difference: 0.3775

95% CI for difference: (0.250704, 0.504296)

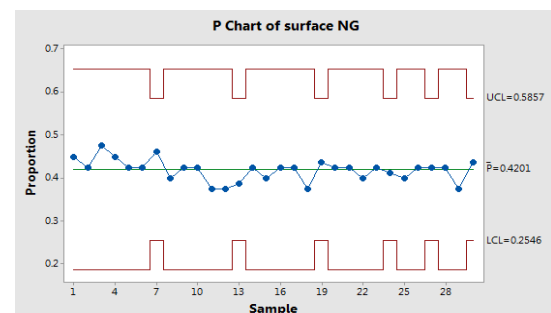
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 5.84 P-Value = 0.000

รูปที่ 18 ผลการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบสัดส่วนของเสียก่อนและหลังการปรับปรุง

3.5.2 การควบคุมกระบวนการหลังปรับปรุง

ได้จัดทำแผนการควบคุม p chart ซึ่งเป็นแผนภูมิที่ใช้ตรวจติดตาม และควบคุมกระบวนการที่มีการวัดหน่วยนับ เพื่อใช้ในการควบคุมสัดส่วนของเสียในกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้น หากมีความผิดปกติจะได้กลับไปตรวจสอบกระบวนการผลิตได้อย่างทันทั่วทั้งที่ [7] และจัดทำ Check Sheet เพื่อทำการตรวจสอบปัจจัยความเข้มข้นของสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอในการทำงานทุก ๆ กะ โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

1) ลักษณะของ p chart ต้องมีขนาดตัวอย่าง (n) ที่มากพอเพื่อให้สอดคล้องกับสมมติฐานการกระจาย โดยทั่วไปต้องมี $n \geq 30$ โดย $np \geq 5$ และ $n(1-p) \geq 5$ ซึ่งงานวิจัยนี้มีค่า $n = 40$ และ $p = 0.42$ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลสามารถประมาณค่าการแจกแจงทวินามด้วยการแจกแจงแบบปกติได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตชิ้นงานซึ่งมีการตรวจสอบข้อบกพร่องบนชิ้นงาน โดยทำการผลิตเป็น Lot ละละ 40-80 ชิ้น โดยทำการตรวจสอบด้วยสายตา หากชิ้นงานมีข้อบกพร่องก็จะถือเป็นของเสีย เนื่องจากขนาดของ Lot size ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงนำข้อมูลมาจัดทำ p chart ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ลักษณะของ p chart ชิ้นงานผิวไม่เรียบ

โดย p chart สามารถใช้ในการควบคุมและตรวจติดตามกระบวนการได้ในกรณีที่เกิดของเสียมากกว่าปกติ และยังสามารถหยุดกระบวนการและตรวจสอบกระบวนการได้ทันที

2) ลักษณะของ Check sheet ในรูปที่ 20 แสดงถึงการตรวจสอบควบคุมความเข้มข้นสารเคลือบ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบสองด้าน (two sided) ซึ่งการควบคุมต้องอยู่ภายในค่า 34 ± 1 Baume ดังนี้

Check sheet ความเข้มข้นสารเคลือบ Rhyotex		Month.....Y.....																													
Line.....																															
ความเข้มข้น สารเคลือบ (Baume)	36																														
	35																														
	34																														
	33																														
	32																														
Date	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

รูปที่ 20 ลักษณะของ Check sheet ตรวจสอบ
ความเข้มข้นสารเคลือบ

เกณฑ์การตัดสินใจ

- ถ้าการตรวจสอบอยู่ในแถบเขียว (อยู่ในช่วง 34 +/- 1 Baume) สามารถใช้ได้
- ถ้าการตรวจสอบอยู่นอกแถบเขียวต้องทำการผสมน้ำเพิ่มเพื่อให้อยู่ในแถบเขียวก่อนจึงสามารถใช้ได้

- ถ้าการตรวจสอบอยู่ในแถบเขียวต้องทำการผสมสารเพิ่มเพื่อให้อยู่ในแถบเขียวก่อนจึงสามารถใช้ได้

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการดำเนินการวิจัยใช้แนวคิดของซิกซ์ ซิกม่า ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน เริ่มจาก ระบุนิยามปัญหา ระบุการวัดเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ระบุการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ระบุการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และระบุการติดตามควบคุม มาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการลดสัดส่วนของเสียลง ได้ผลการแก้ไข ปัญหาผิวไม้เรียบมีปริมาณข้อบกพร่องก่อนการปรับปรุง 86.82% และหลังการปรับปรุง 46% ลดลง 40.82% เมื่อเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง ซึ่งสามารถประหยัด ค่าใช้จ่ายในการตกแต่งผิวได้ 139,922 บาทต่อปี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Evans, J.R., and Lindsay, W.M. An introduction to six sigma & process improvement. Mason, Ohio: Thomsan/South-Western, 2005.
- [2] Fasser, Y., and Brettner, D. Quality and Reliability Engineering International. NY : John Wiley & Sons, 1992.
- [3] AIAG, A. Measurement system analysis (MSA). Third Edition.: The Automotive Industries Action Group, 2002.
- [4] Breyfogle, Forrest W. Implementing Six Sigma Smarter Solutions Using Statistical Methods. : John Wiley & Sons, 2003.
- [5] Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments. Eighth Edition, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S., and Escalera, L.A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 2008 ; 76(5): 965-977.
- [7] Montgomery, D.C. Introduction to Statistical Quality Control. Third Edition, John Wiley & Sons, 1996.



ปัญหาและความเสียหายของโครงสร้างเหล็กในประเทศไทย Problem and Damage of Steel Structure in Thailand

วรากร ตันตระพงษ์ธร และ ทวีป ชัยสมภพ*

Warakorn Tantrapongsaton and Tawee Chaisomphob*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้ารัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต เลขที่ 99 หมู่ 18 ต.คลองหนึ่ง

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

Department of Civil Engineering and Technology, 99 Moo. 18, Khlong Luang, Pathum Thani
Thammasat University, Rangsit Campus, 12121, Thailand

*E-mail: tawee@siit.tu.ac.th, 092-284-4081

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเพื่อแสดงให้เห็นถึงปัญหาและความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเหล็กต่างๆที่ตั้งอยู่ในสถานที่ที่แตกต่างกัน รวมถึงแยกแยะและระบุปัจจัยต่างๆที่ก่อให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างเหล็ก ทั้งปัจจัยที่ส่งผลในทางอ้อมและปัจจัยที่เป็นต้นเหตุของปัญหา โดยใช้วิธีการตรวจสอบพินิจเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจริง ตามมาตรฐานการตรวจสอบของไทยและสากล และสัมภาษณ์บุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาโครงสร้างนั้นๆโดยตรง เพื่อให้ทราบถึงมาตรการรับมือความเสียหาย และปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง ทั้งขณะสร้าง และหลังสร้าง ซึ่งผลการวิจัยและรวบรวมข้อมูลได้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเหล็กส่วนใหญ่ประสบกับปัญหาการเกิดสนิม และความเสื่อมสภาพของสีกันสนิม โดยความรุนแรงของความเสียหายนั้นขึ้นอยู่กับ สภาพแวดล้อมของโครงสร้างและความสม่ำเสมอของการบำรุงรักษาโครงสร้างซึ่งเป็นผลกระทบโดยตรง แต่มีความเสียหายบางประเภทที่เกิดจากปัจจัยทางอ้อม เช่น ความบกพร่องของรอยเชื่อมที่มีสาเหตุมาจากขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ดี ช่วงเชื่อมขาดความชำนาญ และขาดขั้นตอนการตรวจสอบที่ถูกต้อง โดยในงานวิจัยฉบับนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขปัญหาไปใน 2 ทิศทาง คือ การแก้ปัญหากระบวนการบำรุงรักษาที่ไม่ดี และการแก้ปัญหาขั้นตอนการก่อสร้างที่ไม่ดี สำหรับทิศทางแก้ปัญหาทิศทางการแรกเสนอให้มีการร่างมาตรฐานหรือแนวทางในการตรวจสอบและการบำรุงรักษาโครงสร้างเหล็ก และสำหรับทิศทางที่สองเสนอให้มีการร่างและเผยแพร่ ข้อกำหนดของวัสดุเพื่อควบคุมคุณภาพของวัสดุเหล็กที่มาจากผู้ผลิตต่าง ๆ ทั้งในประเทศและนอกประเทศ และร่างหนังสือคู่มือการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างเหล็กให้มีความแข็งแรงทนทาน

ABSTRACT

This research focused on indicating the problem and damage that occurred on different steel structure in different location and identifying the cause of damage, both root cause and indirect cause. This has been done by using the methods of visual inspection on the real structure based on an existing Thailand and international standards and interviewing the maintenance personnel who directly involved the maintenance work to acknowledge the countermeasure and problem that occurred to the structure during construction and after construction. The result indicated that the majority of the steel structures have corrosion damage and the deterioration of steel coating, which the severity of the damage depend on the surrounding environment and the frequency of the maintenance work. Furthermore, there is the other type of damage such as welding defects that caused by poor construction process poor workmanship of the welder and lack of correct inspection procedures. The suggestion of solution was divided into two approaches; 1) maintenance approach, 2) construction

approach. For the first approach, standard or guideline for the inspection and maintenance of the steel structure should be drafted. For the second approach, the followings should be drafted or established; 1) material specification to control the quality of the steel product from the different manufacturers (domestic and foreign factories) and 2) construction handbook for the durable steel structure.

1. Introduction

Maintaining the durability of a structure during its service life is important for every type of structure. Therefore, an inspection, evaluation and repair are necessary to keep the structure in a good condition.

As a material for the main structure, steel is known to be used for truss structure, but steel also has been used widely in bridge structure, expressway structure, billboard structure, and power plant structure.

Nowadays, steel structures are facing with a deterioration problem. Without any maintenance action, the structure will be gradually damaged. Since, Thailand has been lacking of a standard or guideline to maintain the deteriorated steel structure, make this problem remains unsolved.

This research mainly focused on three main topics; 1) indicating the problem and damage that occurred to the steel structure, 2) identifying the indirect and root cause of the problem and 3) giving suggestion for solution of those problems.

2. Literature Review

Presently, the standard of Thailand that was published by two main organizations which are “Department of Public Works and Town & Country Planning”, and “Thailand Industrial Standards Institute” were the main standards used in construction industry.

Unfortunately, Thailand standards did not cover the maintenance of steel structures, caused an overlook on maintenance tasks for steel structure.

Nevertheless, the current Thailand standard which specified the detail involving maintenance tasks was DPT 1561-51 to DPT 1565-51; [1], which stated about Non-destructive testing (NDT) for welding inspection work, divided in to five NDT methods as follows; 1) Visual inspection (VT), 2) Ultrasonic Testing (UT), 3) Magnetic particle testing (MT), 4) Liquid Penetrant Testing (PT), 5) Radiographic Testing (RT).

Also, TIS 2387- 2555; [2] which specified the inspection of anticorrosive paint for steel,

using photographic reference method for determining degree of blistering and degree of rusting according to quantity of defect and size of defect.

Furthermore, an international standard were used widespread in Thailand, such as steel fabrication factories, and maintenance department of a steel power plants. The standards are including standards from a developed countries such as AWS D1.1/D1.1M; [3] American standards for welding inspection criteria, JASS 6; [4] Japanese standards for construction and inspection, and a standard from International Standard Organization (ISO); [5] for Paints and varnishes evaluation.

It is obvious that the mentioned standards were constructed to apply for construction, fabrication, and inspection for new structures but not for the maintenance work in order to maintain structure durability after constructed.

3. Methodology

Firstly, real site inspection was performed to indicate the problem and damage that occurred to the steel structure. Secondly, the maintenance personnel were interviewed in order to obtain relevant information to identify the indirect and root cause of the problem.

The target structures were expressways, billboards, power plants, and roof structures, which were constructed by using steel as their main structure.

3.1 Real site inspection

Visiting the real construction site or a real structure is the best way to acknowledge the problem and damage of the steel structure under different environments, locations, and functions.

The inspection criteria were followed the standard in literature review, both Thailand and International standards.

Site inspection was mostly carried out by using Visual inspection (VT), since this method does not affect capacities, appearances, or functions of the steel structures.

Visual inspection flow chart and criteria used in this research was specified in Fig. 1.

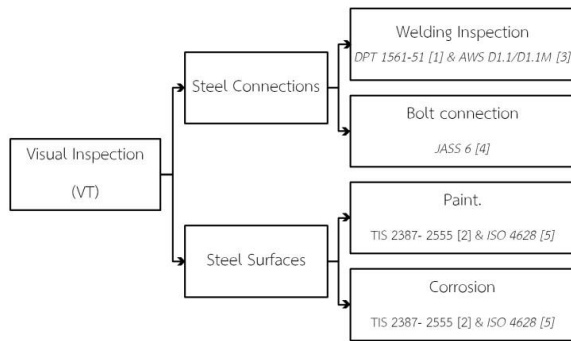


Fig. 1 Visual Inspection flow chart

3.2 Maintenance Personnel Interview

Interviewing the maintenance personnel of that structure is a good way to obtain the information about the current situations, problems, and maintenance criteria of the real steel structure. This approach strongly helps on identifying the indirect cause and root cause of the damage and problem of the steel structure in Thailand.

4. Damage and Problem

Site inspection were conducted on a steel structure at different locations and environments to see the difference effects from the external factors such as temperature, humidity, distance from the water source, etc.

4.1 Steel Power Plants

Five power plants in four different regions which are north, east, middle, and south of Thailand were visually inspected. The inspection results show that the steel structure in the power plants located at the north and the middle of Thailand has some minor corrosion on the steel surface. Additionally, the result also found some noticeable deterioration of the steel coating (Paint) due to long usage, such as blistering, flaking, and the change in intensity of color.

4.1.1 Interview Results

The interview of maintenance personnel were performed for each power plant. The results indicated that most of the power plants have the maintenance crew who responsible for the maintenance work. However, each power plant has different maintenance routine, particularly a periodic inspection routine. The inspection routine varies from every year, every two years and every five to ten years or on periodic inspection since it was built.

The maintenance routine is to inspect the structure visually to see the deterioration of steel

members, coatings, and connections (Weld and Bolt connection). If there is any major damage on the structure, that section will be replaced. If any corrosion was found, the crew will remove the paint and rust off of the steel surfaces and repaint it. In case of the paint deteriorated, the paint will be removed and repaint afterwards.

4.1.2 Inspection Results

The results from visual inspection on the steel structure in the power plant shows some minor corrosion on the steel surface occurred on every power plant, because of the coating defect.

In addition, more severe damages were found on some power plants due to the problem corresponding to poor maintenance routine and the surrounding environmental condition.

A relationship between damage and maintenance routine can be stated as, “less maintenance cause more damage”. For example, the power plant that maintenance every year will have less damages than the power plant that maintenance every five years accordingly.

Fig. 2 shows a severe corrosion on the steel column in the power plant located on the southern part of Thailand, around 1 kilometer from the sea shore. This power plant has a periodic maintenance every five to ten years, causing the deterioration of the paint and corrosion. According to ISO 4628, that the paint has the degree of blistering of 5(S3), and the degree of rusting of 4(Ri4). Those were considered as severe level of damage.



Fig. 2 Corrosion on the steel column in power plant

Also, the relationship between damage and the environment can be state as, “more severe environment cause more damage”. For example,

the power plant located on the southern part of Thailand will have more corrosion than the one located on the northern part of Thailand.

Fig. 3 and Fig. 4 show severe corrosion at the steel connection of a power plant structures, located on the eastern part of Thailand, around 50 meters from the river mouth. The water in the river was brackish water, which contain high chloride. This caused severe corrosion to the steel structure and the steel connections.



Fig. 3 Corrosion at steel bolt and plate in power plant



Fig. 4 Corrosion at weld of the column in power plant

Lastly, the weld connection and bolt connection of a steel structure in the power plants were acceptable according to the criteria in DPT 1561-51; [1] and AWS D1.1/D1.1M; [3] for welding visual inspection, and JASS 6; [4] for bolting inspection. Since, the steel structures in the power plants were fabricated from the factory, the quality of the welding and bolting connection is good.

4.2 Steel Expressways

Expressways in Thailand are mostly concrete structures, but there are a few expressways that were constructed by steel due to the lane expansions of expressways.

4.2.1 Interview Results

From interviewing the personnel who responsible for maintenance work of the expressways, inspection routine for the expressways were divided into four types which are;

1. Daily inspection: performing visual inspection in a patrol car, looking for major damage and take photos.
2. Periodic inspection: primary inspection to maintain expressway durability, the frequency of inspection per year depends on the difficulty of the location accessibility, risk and the possibility of structural damage.
3. Special inspection: the additional inspection using more advance testing apart from daily inspection to ensure the safety of the customers.
4. Emergency inspection: a visual inspection after the event of natural disasters or fatal accident on the expressway to initially check the expressway before special inspection to consider emergency repair.

The damage will be divided into four levels, namely “A (Poor Condition)”, “B (Fair Condition)”, “C (Good Condition)” and “D (Very Good Condition)”. The evaluation of damage can be carried out by using photographic reference methods.

4.2.2 Inspection Results

Inspection of steel expressway has to carry out by using patrol car for transportation around the site and parked in the parking zone under the expressways for safety. The result shows that, the expressways in Thailand are in fair condition with some minor damage found on the steel were mostly coating defect due to the deterioration of the paint. Still, there are some expressways that were repainted recently according to the maintenance routine.

For the connection of the steel, both weld and bolt were acceptable according to the criteria in DPT 1561-51; [1] and AWS D1.1/D1.1M; [3] for welding visual inspection, and JASS 6; [4] for bolting inspection. Since the steel structure of the expressways were

fabricated from the factory, the quality of the welding and bolting connection is good.



Fig. 5 Steel expressway with deteriorated coating

Fig. 5 shows the deterioration of coating on steel expressway due to long service life of the coating and the environmental damage.

4.3 Steel Billboards

The steel billboard in Thailand are mostly privately owned, so it is depends on the owner's judgment whether to maintenance it or not. Since steel billboard structure does not have to carry too much load, its maintenance is in low priority. Even though, recently there was an accident of steel billboard collapsing down, caused damage to the surrounding properties.

4.3.1 Inspection Results

The inspection criteria were carried out by using the criteria in DPT 1561-51; [1] and AWS D1.1/D1.1M; [3] for welding visual inspection, and ISO 4628; [4] for paint inspection. The billboard that was inspected is located near the road.

The results indicate many serious damages and defects of the welding that affect the capacity of the welding, such as undercut, porosity, and incomplete fusion. Also, some noticeable paint defects such as flaking (S4 to S5) and blistering (S3 to S4), as well as corrosion on the surface of the steel which has the degree of rusting ranging from Ri3 to Ri5.

Fig. 6 shows the defect called "undercut" which is one of the most severe defects for welding connection, because undercutting will decrease the steel sectional area causing a decrease in structural capacities. In this case, the size of undercut is 4.6 millimeters which are unacceptable according to the criteria that in DPT 1561-51, "Undercut shall not exceed 2mm

for any length of weld for material equal to or greater than 25mm thick"; [1].



Fig. 6 Undercut at the weld on steel billboard

Apart from the undercut, the welding defects that were clear noticeable are porosity and incomplete fusion (shown in Fig. 7). These types of defect can cause the capacity of the weld to be decrease due to the decreasing of weld area. The criteria for porosity and incomplete fusion in DPT 1565-51 are "Diameter summation of piping porosity which has $> 1\text{mm}$ diameter shall not exceed 10mm in each 25mm of weld length for fillet weld" for porosity and "Incomplete fusion is unacceptable for fillet weld"; [2] for incomplete fusion. This, in this case was clearly unacceptable.



Fig. 7 Porosity and incomplete fusion of weld on a steel billboard

4.4 Steel Roof Structures

Even though, roof structure is not the main structure of a building, but every part of the

structure still have to be maintenance to maintain the durability of the structure.

The structure that was inspected in this research was a big concrete building with steel roof structure, the area of these structure covered over 120 square meters.

4.4.1 Interview Results

The results indicated that a priority to maintenance the steel structure itself is neglected since the roof structure is a primary structure that does not have to carry too much load. Also, most of the roof structures have not been maintenance since it was built. The roof structure was constructed at the site by welding with poor quality control.

4.4.2 Inspection Results

Since, the structure that was inspected is very big, so the inspection was carried out “section by section”, covering around 25 percent of the whole structures. Because of the difficult accessibility of the location and poor illumination, the welding inspection and paint inspection are impracticable.

The first site is an old building over 20 years old that has never been maintenance or inspection activity since it was built. The result shows that, the quality of the connection (all weld connection) was poor and damaged, caused by welding procedure, such as slag, burning point or hole on the steel section, and the melted or cut spot on the steel sections as shown in Fig. 8.



Fig. 8 Missing steel section melted by poor welding procedure

The second site is a roof structure of a convention hall, constructed by steel pipe with weld connection. The result shows that, some of

the weld connections were constructed poorly, as shown in Fig. 9.



Fig. 9 Discontinuity of weld on steel pipe roof structure

Moreover, many signs of poor construction were found, such as incomplete welding, poor installation, and poor welding.

Fig. 10 shows the incomplete welding of the beam girder (over 40% of the weld was missing).



Fig. 10 Missing weld on steel beam girder

4.5 Steel structures

A simple welded steel structure (shown in Fig. 11) that was built in 2014 was thoroughly inspected based on DPT 1561-51; [1] visual inspection criteria and evaluated based on four types of welding defect, which are crack, undercut, porosity, and convexity similarly to the billboard inspection.



Fig. 11 Welded steel structure

4.5.1 Inspection Results

Since, this structure was recently built and did not locate in a severe environment, so the coating of this structure is still acceptable. The inspection was focused on beam-column welded connection. The results obtained from inspecting 12 beam-column joints which contained 64 of welds that has defects.

The result shows that the majority of the welds had defect on the surface, especially convexity and undercut, which exceed the standard limit in DPT 1561-51; [1]. The evaluation of the weld defect was classified as “unacceptable”, and the percentage of the welds that was unacceptable for this site is showing in Fig. 12.

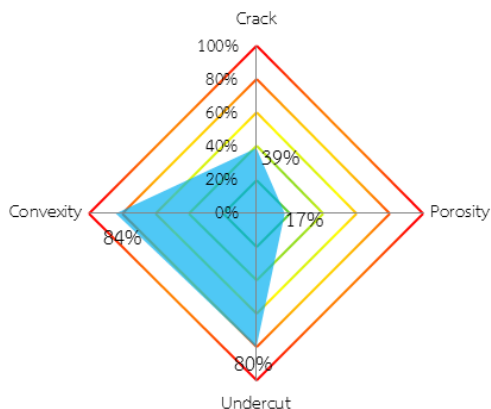


Fig. 12 Amount of welding defect found on 64 of welds (in %)

From the inspection results, it concluded that the defect of the welding came from poor workmanship because of the welding procedure. Therefore, it is clear that this site has not done

any welding inspection according to the Thailand standard.

Fig. 13 shows the welding defect found at the beam-column joint of a steel structure.

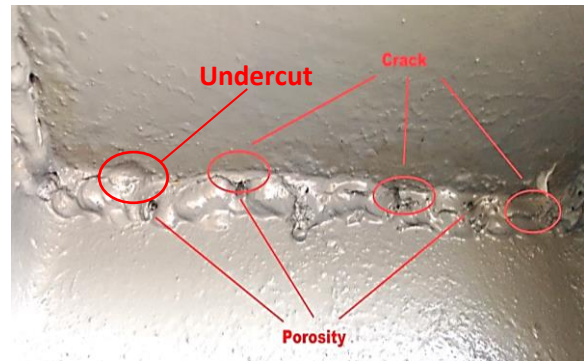


Fig. 13 Welding defect found on beam-column welding connection

5. Indirect cause and root cause of damages and problems

This section talked about the root cause and indirect cause of damage and problem that was found during the research without academic and technical approaches.

5.1 Indirect cause of damage and problem

The results of this research show several damage and defect occurred on the steel structure. This developed from the lack of standard and guideline for maintenance work. If there are standard and guideline that specify a specific time interval for the periodic inspection that the maintenance crew can referred to, the structure will be repaired and protected from the deterioration.

5.2 Root cause of damage and problem

The results of this research show that the problems were developed from poor construction system, and poor workmanship.

5.2.1 Poor or improper material

Quality of the steel material is very important to the structure, as well as the quality of the steel coating. Using poor material could cause a low capacity of the structure and using improper material could cause a low durability of the structure. Fig. 3 and Fig. 4 show that severe corrosion occurred only on the weld material and the bolt connection not on the main column or beam since the material of weld and bolt was different from the main structure. In the other hand, the structure that uses galvanized steel has more durability of the

structure, leading to less maintenance work in the future.

5.2.2 Poor workmanship

Poorly workmanship is one of the most found problem in this research as show in Fig. 6 to Fig. 10 and Fig. 13. This problem tends to cause more risks and enhance the damages to the structure which also affect the other part of the structure.

Most of the time, this problem occurred during the construction processes since there are many factors that can cause this problem such as unskilled labor (no certificate), poor construction methods, no inspection, and no quality control in practice.

However, workmanship can never be perfect since there are many difficulties in the work process such as the position of the welds (over-head welding position in practice is very difficult). As a result, the welding product from the difficult position will never be as good as the welds produce by normal welding position.

6. Suggestion of solutions

The suggestion of solution for these problems can be divided into two approaches which are;

6.1 Maintenance approach

6.1.1 Standards and Guidelines

Maintenance approach of solving the problems is to draft a standard or guideline for the engineer to follow in their work, such as the inspection, evaluation, and repair standard or guideline for steel structure.

The standard should specify the inspection criteria (base on type of damage), evaluation criteria (base on the severity of damage), repair method for each type and level of damage and all of the equipment specification as well as the requirement of inspector, engineer, and workers.

The guideline should specify the inspection routine procedure and scope, evaluation reference, repair procedure for each type and level of damage, and regularity of inspection.

6.1.2 Workshops and seminars

Occasionally arranging workshops and seminars are a good ways to establish a problem

comprehensive and solution for an engineer and anyone who involved with steel structures.

6.2 Construction approach

The construction approach is to prevent the defect that can cause damage to the structure in the future as the root cause of the problem is “poor construction system”.

6.2.1 Construction handbook

The solution is to draft a handbook for an engineer, which specifies a specification for the material, construction methods, and workmanship specification clearly. Therefore, engineer or contractor can follow the proper ways to construct a steel structure. This could relate to the inspection routine in the previous section.

For an example, if the handbook specify the material specification for a power plant such as a minimum steel properties that the contractor should use for the heavy chloride environment, or the properties and thickness of the coating for the steel structure that will be expose in heavy sunlight. The structure durability will be better than the structure that was constructed with any material.

6.2.2 Strength reduction factor for steel

When considering about the material specification, the design specification shall also be considered. Because, when a designer has to designs a structure using poor material or a material that is under spec, the designer shall be able to use those materials. But the structure has to be design and construct properly according to its properties. Since many construction projects construct the structure using imported material which produced base on foreign standard, the properties of those materials may not match Thailand standard specification.

The solution for this problem is to draft a standard or a handbook that specify the “strength reduction factor” for the poor grade of material as specify in BC1 design guide; [6] (which reduce the strength up to 80%). The factor should base on Thailand material standard and strength reduction factor should reduce the design strength of the under specification materials to the proper level, in order to use those materials safely.

References

- [1] Department of Public Works and Town & Country Planning. DPT 1561-51 to DPT 1565-51 Structural Steel welding inspection standard using Non-destructive testing. Thailand, 2008.
- [2] Thailand Industrial Standard. TIS 2387- 2555 Anticorrosive priming paint. Thailand, 2012.
- [3] American Welding Society. AWS D1.1/D1.1M Structural Welding Code – Steel. United State of America, 2010.
- [4] Architectural Institut of Japan Japanese Architiectural Standard Specification JASS 6 Structural Steelwork Specification for Building Construction. Japan, 1993.
- [5] International Standard Organization. ISO 4628-1 to 10 Paints and varnishes – Evaluation of degrading of coatings – designation of quantity and size of defect and of intensity of uniform changes in apperance – Part 1 to Part 10. Inteanational standard, 2003.
- [6] Building and Construction Aurtherity. BC1: 2012 Design Guide on Use of Alternative Structural Steel to BS 5950 and Eurocade 3. Singapore, 2012.



การออกแบบระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อสำหรับโรงพิมพ์

A Design of Order Receiving Support System for a Paper Printing Company

ศศิพรรณ งามมณีวัฒน์* และ ปวีณา ชาวลิตวงศ์

Sasiphan Ngammaneevat* and Paveena Chaovalitwongse

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand

Telephone Number: 0-2218-6814-6, Fax. Number: 0-2251-3969

*E-mail: sasiphan@gmail.com, Telephone Number: 081-6284647

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อการออกแบบระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อสำหรับโรงพิมพ์ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้ระบบสามารถรองรับลักษณะการผลิตแบบ Make-to-Order และสนับสนุนให้การประเมินวันส่งมอบของผลิตภัณฑ์ในการรับคำสั่งซื้อมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การประเมินวันส่งมอบจะต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้น เนื่องจากปัจจุบันความต้องการของผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงไปและมีการแข่งขันที่สูงขึ้น ส่งผลให้ทางโรงพิมพ์ต้องการลดความคลาดเคลื่อนของการประเมินวันส่งมอบ จึงมีการศึกษาถึงสาเหตุของปัญหานี้ ซึ่งได้แก่ 1. การขาดข้อมูลกำลังการผลิตที่นำไปใช้ได้จากฝ่ายผลิตให้อ้างอิง 2. การขาดข้อมูลของค่าเวลามาตรฐานการผลิต 3. การประเมินโดยพึ่งพาประสบการณ์ส่วนบุคคลซึ่งเป็นการประเมินที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับผลตอบแทนภาพรวม ดังนั้นเพื่อที่จะแก้ปัญหาที่สาเหตุ จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าการรับคำสั่งซื้อปัจจุบัน โครงสร้างของกระบวนการผลิตทั้งหมด วิธีการหาค่าเวลามาตรฐาน และทำการออกแบบระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทำงานที่ถูกออกแบบให้เห็นถึงการไหลของข้อมูลที่จำเป็นทั้งหมดและระบบสารสนเทศถูกออกแบบขึ้นเพื่อเอื้อต่อการประสานงานกันระหว่างฝ่าย รวมถึงการแสดงผลการประเมินในรูปแบบเอกสาร เพื่อให้ผู้ประเมินสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการเจรจาหรือต่อรองวันส่งมอบกับลูกค้าได้ ผลการออกแบบระบบได้ถูกทดสอบประสิทธิภาพซึ่งให้ผลที่อยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้เป้าหมายยอมรับได้และนอกจากนี้ยังได้ลงความเห็นเห็นว่า ระบบที่นำเสนอสมควรค่าและมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงด้วย ดังนั้นผลการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าเป็นการวิจัยที่แก้ปัญหาที่สาเหตุและได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงด้วย

ABSTRACT

This research aims to design an order receiving supporting system for a paper printing company. The purpose is to support Make-to-Order industry in efficiently estimating committed due date of customer orders. Estimated committed due date should be as accurate as possible. Currently, since the customer needs have changed and the competition is higher, the printing company would like to reduce the estimating errors. Therefore, the root cause is studied on: 1. Lacking of available capacity information from production department, 2. Lacking of standard time information, and 3. Implementing estimation depending on personal experience that has not enough effectiveness for the overall profit. Therefore, to solve the aforementioned causes, this research has conducted as follows: study of current order-receiving process, study of production systems, study of standard time estimation method, and designing supporting system. The proposed system also describes the necessary information process flow, and information system that is constructed to promote the

coordination between departments. Also, the design of report format for the estimated result in order that estimator can refer it for negotiation of delivery date with customer. After designing system, the evaluation of the designed system shows the acceptable result from the target users. In addition, the target users also conclude that the proposed system is valuable and it could be used in practical applications. In summary, this research can solve the problems by focusing on the identified root cause and also propose the countermeasures that can be practically applied.

1. บทนำ

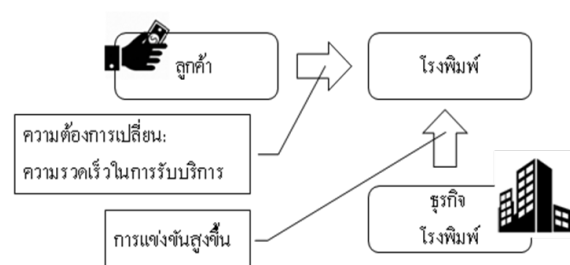
ปัจจุบันเนื่องจากเทคโนโลยีมีการพัฒนามากขึ้น ทำให้การลงทุนเพื่อประกอบกิจการสิ่งพิมพ์ไม่ใช่เรื่องยาก ส่งผลให้เกิดโรงพิมพ์ขนาดเล็กจำนวนมาก และธุรกิจโรงพิมพ์มีการแข่งขันกันอย่างสูงตามมา ลูกค้าของโรงพิมพ์โดยปกติจะไม่ใช้ลูกค้าทั่วไปเนื่องจากธุรกิจโรงพิมพ์เป็นธุรกิจที่ขายผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต่อการดำรงชีพเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่น ๆ แต่มีความจำเป็นในการประกอบอาชีพและการหารายได้ต่าง ๆ ซึ่งปัจจุบันลักษณะการบริโภคผลิตภัณฑ์สิ่งพิมพ์มีความเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น การใช้สื่ออิเล็กทรอนิกส์ แทนสื่อสิ่งพิมพ์ [1] ตลาดการออกแบบบรรจุภัณฑ์กลายเป็นสิ่งสำคัญของการสร้างแบรนด์ การเกิดธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมเป็นจำนวนมาก เป็นต้น

ตารางที่ 1 สื่อสิ่งพิมพ์ vs สื่ออิเล็กทรอนิกส์ของโลก [1]

เปรียบเทียบสัดส่วน สื่อสิ่งพิมพ์ vs สื่ออิเล็กทรอนิกส์ของโลก			
Table: Print Takes a Back Seat			
Pages	1995	2010	2020
Electric	30%	52%	65%
Print	70%	48%	35%

โรงพิมพ์กรณีศึกษาได้ดำเนินธุรกิจโรงพิมพ์ที่ผลิตภัณฑ์ไม่ใช่แค่สื่อสิ่งพิมพ์เท่านั้น จึงทำให้ปัจจุบันแม้การใช้สื่อสิ่งพิมพ์ลดลง แต่ก็มีโอกาสจากตลาดด้านอื่น เช่น ตลาดด้านบรรจุภัณฑ์มาแทน อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์ปัจจุบันก็ยังเกิดความเสี่ยงจากลักษณะการบริโภคของลูกค้าที่เปลี่ยนไปคือ ความรวดเร็วในการรับบริการ เมื่อจำนวนที่สั่งผลิตต่อครั้งของผู้บริโภคมีการเปลี่ยนแปลงจากจำนวนมากเป็นจำนวนที่น้อยลงเรื่อย ๆ

เนื่องจากปัจจุบันลูกค้าเลือกทำสิ่งพิมพ์เฉพาะสิ่งที่จำเป็นเท่านั้น ทำให้การกำหนดวันส่งมอบจากความต้องการของผู้บริโภคจะมีระยะเวลารอคอยที่สั้นลงตามไปด้วย จากการศึกษาโรงพิมพ์กรณีศึกษาพบว่า จากเดิมที่มีวิธีการกำหนดวันส่งมอบแบบหยาบ โดยการใช้นโยบายเป็นมาตรฐานเดียวกันในการกำหนด (เฉลี่ย 7-10 วัน) ก็จะไม่สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคได้ และด้วยความต้องการลูกค้าที่เปลี่ยนไป จึงทำให้ผู้ประกอบการมักจะยอมรับวันส่งมอบที่ลูกค้าต้องการโดยไม่มีการคำนึงถึงสถานะกำลังการผลิตที่ใช้ได้ ณ ขณะนั้น และคาดหวังว่าจะทำให้โรงพิมพ์ได้รับการตกลงว่าจ้างจากลูกค้าโดยไม่เลือกโรงพิมพ์คู่แข่ง จึงเห็นได้ว่าการประเมินแบบปัจจุบันไม่ได้เป็นการประเมินที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ที่จะสนับสนุนให้ภาพรวมผลกำไรตอบแทนของโรงพิมพ์ดีขึ้นแต่อย่างใด



รูปที่ 1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของธุรกิจโรงพิมพ์ปัจจุบัน

เนื่องด้วยการแข่งขันที่สูงขึ้นและลักษณะการบริโภคของลูกค้าที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 1 ทำให้การเจรจาเพื่อลูกค้าตัดสินใจเลือกที่จะว่าจ้างนั้นเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่งเพราะข้อมูลวันส่งมอบเป็นข้อมูลสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของลูกค้า จึงทำให้ขั้นตอนของการเจรจาดำเนินการกับลูกค้า ต้องอาศัยข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือและครบถ้วนเพียงพอที่จะทำการตอบรับ

และตกลงวันส่งมอบตามที่ลูกค้าต้องการได้ ดังนั้นผลการคาดการณ์หรือการประเมินของวันส่งมอบในกระบวนการรับคำสั่งซื้อ ควรจะมีประสิทธิภาพเพื่อให้ทางโรงพิมพ์สามารถดำเนินการผลิตเสร็จภายในวันส่งมอบ เพราะหากการผลิตเกิดความผิดพลาด จนกระทบกับวันส่งมอบ จะทำให้เกิดความเสียหายกับทางโรงพิมพ์ทั้งทางตรง เช่น ค่าจ้างล่วงเวลา และทางอ้อม เช่น ทำให้ลูกค้าขาดความไว้วางใจในบริษัท และผลสุดท้ายคือเสียโอกาสทางการขายในอนาคตต่อไปได้ เป็นต้น [2]

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะออกแบบระบบของการรับคำสั่งซื้อที่สนับสนุนการรับคำสั่งซื้อของโรงพิมพ์เพื่อให้การประเมินวันส่งมอบ มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถรองรับความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนไป

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โรงพิมพ์มีลักษณะการผลิตเป็นแบบ Make-to-order (MTO) และมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะชิ้นงานที่ลูกค้าต้องการ (Product specification) จึงทำให้ระดับความซับซ้อนของการจัดการดำเนินงาน (Operations management) เพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [3] เพื่อที่จะให้องค์กรมีความสามารถในการแข่งขันภายใต้สภาวะอุตสาหกรรมดังกล่าวได้ การรับคำสั่งซื้อจึงเป็นจุดที่สำคัญมากสำหรับอุตสาหกรรมลักษณะนี้ เนื่องจากความไม่แน่นอนสูงของรายละเอียดชิ้นงานและกระบวนการผลิตสำหรับชิ้นงาน [4, 5]

วิธีการสำหรับการประเมินวันส่งมอบมีอยู่ 2 มุมมอง [6, 7] คือการกำหนดจากภายนอกและการกำหนดจากภายใน การกำหนดจากภายนอกจะทำการพิจารณาประเมินความเป็นไปได้ที่จะรับคำสั่งซื้อของลูกค้าตามวันส่งมอบที่ถูกกำหนดโดยทำการวางแผนการผลิต ซึ่งวิธีการที่ถูกเสนอในหลายบทความคือการจัดการตารางเวลาการผลิต (Scheduling approaches) [8, 9] และสำหรับการกำหนดจากภายในเท่าที่มีกรกล่าวถึง วันส่งมอบที่ถูกกำหนดถือเป็นผลลัพธ์ของการวางแผนการผลิต [7, 10]

การกำหนดวันส่งมอบได้ถูกตั้งประเด็นเกี่ยวกับการยึดนโยบายหรืออัลกอริทึมที่แตกต่างกันไป [3, 11] และโดยส่วนใหญ่การศึกษาลักษณะของการตัดสินใจเรื่องวันส่งมอบสำหรับกระบวนการผลิตที่มีความไม่แน่นอนอยู่ในระดับสูง จะให้ความสำคัญในการอ้างอิงข้อมูลทั้งความต้องการของลูกค้าและกำลังการผลิตที่นำไปใช้ได้ (Production capacity availability) [12, 13]

นอกจากการวิจัยถึงรูปแบบของระบบสนับสนุนการตัดสินใจแล้วนั้น ยังมีการวิจัยถึงแบบแผนการทำงาน (Framework) ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกำหนดวันส่งมอบที่ใช้ระยะเวลาสั้นและน่าเชื่อถือ จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมีการประสานงานกันอย่างต่อเนื่องระหว่างการตลาดและการผลิตในช่วงเวลาการเสนอวันส่งมอบ [3a, 14] โดยนักวิจัยกลุ่มหนึ่งได้เสนอวิธีการเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการกำลังการผลิตและเวลานำการส่งมอบ (Delivery lead time) ให้สอดคล้องกับมุมมองของการทำงานข้ามสายงาน (Cross-functional perspective) [9, 15-17] ซึ่งหมายถึงการประสานงานกันในส่วนเชื่อมต่อระหว่างการตลาดและการผลิตที่สำคัญและถูกกล่าวถึงอย่างมากในบทความการจัดการการดำเนินงาน [18] การกำหนดวันส่งมอบ เป็นสิ่งที่ต้องทำสมดุลระหว่างเวลารอคอยสินค้าและกำลังการผลิตที่เกิดขึ้น ซึ่งถือว่าการทำสมดุลที่ยาก เนื่องด้วยปัจจัยการขัดแย้งกันในวัตถุประสงค์ของการตลาดและการผลิต [19] เพื่อที่จะลดความขัดแย้งนี้ Crittenden และคณะ (1993) จึงการเสนอ 4 กลไกสำคัญในการปรับปรุงการประสานงาน [20]

แบบแผนการทำงานสำหรับการประเมินวันส่งมอบได้ถูกวิเคราะห์เพิ่มเติมโดย Zorzini (2006) ซึ่งสรุปจากการศึกษาโรงงานกรณีศึกษากลุ่มหนึ่งที่ประสบความสำเร็จแล้ว เริ่มตั้งแต่ 1. รูปแบบวิธีการทำงานระหว่างการตลาดและการผลิตที่ดำเนินอยู่ มีอยู่ 4 แบบ ปัจจัยจากความซับซ้อนด้านเทคนิคของกระบวนการผลิต ระดับความสัมพันธ์ของเวลาส่งมอบกับลูกค้า และระดับการปรับแต่งของชิ้นงานจะเป็นตัวกำหนดการเลือกใช้วิธีการดำเนินใน 4 แบบนี้ โรงงานที่มีปัจจัยทั้งหมดอยู่ใน

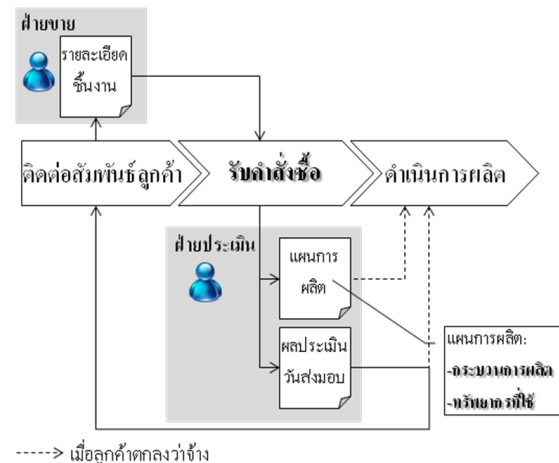
ระดับสูง มักจะใช้การติดต่อแบบขั้นสูงโดยการใช้ระบบข้อมูลสารสนเทศ [14, 19] สำหรับการ 2. เสนอวันส่งมอบ มี 3 แนวคิด ความซับซ้อนด้านเทคนิคของกระบวนการผลิต ระดับความยืดหยุ่นของทรัพยากร (เช่น การจัดจ้างคนภายนอก) และระดับการปรับแต่งของชิ้นงานจะเป็นสิ่งที่มีผลต่อการเลือกใช้ สุดท้ายสำหรับ 3. รูปแบบของกลยุทธ์ในการวางแผนการผลิต ซึ่งมี 3 รูปแบบ โดยที่มี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความซับซ้อนด้านเทคนิคของกระบวนการผลิต ปัจจัยที่มีผลต่อการสั่งซื้อมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ และปัจจัยที่ลูกค้าให้ความสำคัญในการสั่งซื้อคือระยะเวลาการรอคอยเท่านั้นหรือไม่ [14]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยส่วนใหญ่จะมีการเสนอแนวคิดในการส่งเสริมการประสานงานกันระหว่างฝ่ายผลิตและฝ่ายการตลาดเพื่อสนับสนุนให้การประเมินเวลาและราคาขายดำเนินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีหลายงานวิจัยที่ได้คิดค้นวิธีการดำเนินแล้วซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นการคิดค้นวิธีการในการประสานงานกัน แต่การวิจัยเพื่อการออกแบบวิธีการรับคำสั่งซื้อทั้งเรื่องของกระบวนการทำงานและระบบสารสนเทศสำหรับอุตสาหกรรมที่มีทรัพยากรหลากหลาย (แรงงานคน แรงงานเครื่องจักร) ในกระบวนการผลิตนั้นยังน้อย

วัตถุประสงค์ของการรับคำสั่งซื้อของโรงพิมพ์นั้นเหมือนอุตสาหกรรม MTO ทั่วไป ซึ่งต้องการให้ได้ผลการประเมินวันส่งมอบที่น่าเชื่อถือ แต่เนื่องจากโรงพิมพ์มีลักษณะการสั่งผลิตแบบ Job Shop ซึ่งบางขั้นตอนทำการผลิตแบบกลุ่ม (Batch) และบางขั้นตอนทำการผลิตแบบทีละหน่วย (One Piece) อีกทั้งมีรูปแบบการใช้ทรัพยากรที่หลากหลายในการผลิตต่อเนื่องชิ้นงาน ด้วยความซับซ้อนนี้ทำให้การให้ได้ว่าซึ่งวิธีการการรับคำสั่งซื้อในปัจจุบันไม่สามารถเอื้อหรือรองรับได้ และค่าใช้จ่ายที่ไม่ได้วางแผนไว้นั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนของการประเมินวันส่งมอบ ดังนั้นจุดประสงค์หลักสำหรับการรับคำสั่งซื้อของโรงพิมพ์ในการวิจัยครั้งนี้คือการลดความคลาดเคลื่อนผลการประเมินวันส่งมอบ

3. สภาพการรับคำสั่งซื้อในปัจจุบัน

การศึกษารายละเอียดของโรงพิมพ์กรณีศึกษา จะทำการศึกษาทั้งในเรื่องของกระบวนการรับคำสั่งซื้อ กระบวนการผลิต และรูปแบบการใช้ทรัพยากร ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อ

กระบวนการรับคำสั่งซื้อจะทำการศึกษาถึงการทำงานของปัจจุบันว่าทางโรงพิมพ์มีขั้นตอนการทำงานและการแบ่งหน้าที่ของแต่ละฝ่ายเช่นไร เพื่อที่จะเข้าใจแนวความคิดและข้อจำกัดของผู้ปฏิบัติงานงาน ทำให้สามารถออกแบบกระบวนการทำงานที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริง

สำหรับกระบวนการผลิตจะทำการศึกษารายละเอียดทั้งด้านโครงสร้างและปัจจัยที่ทำให้ทางผู้ประเมินคำนวณค่าเวลามาตรฐานการผลิตที่ต้องการได้ยากเพื่อที่จะออกแบบแนวทางการสร้างโครงสร้างการผลิตให้สามารถนำไปใช้สร้างกระบวนการผลิตที่มีความแปรผันสูงตามลักษณะชิ้นงาน และกระบวนการผลิตนั้นสามารถที่จะนำไปใช้ประเมินหาเวลามาตรฐานของการผลิตชิ้นงานแต่ละงาน ซึ่งจะช่วยให้ประเมินกำลังการผลิตที่ต้องการต่อไปได้

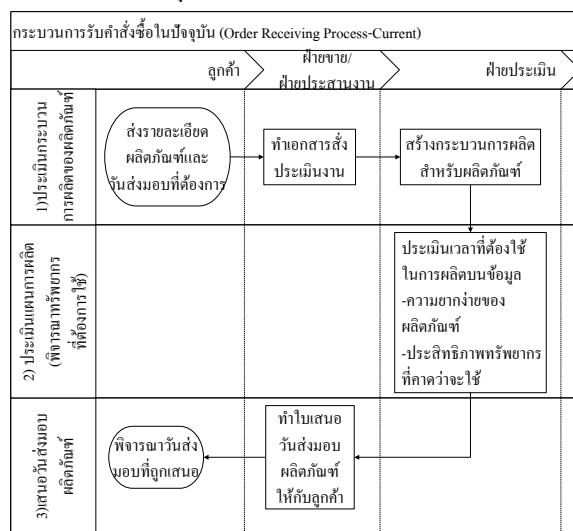
รูปแบบการใช้ทรัพยากรในโรงพิมพ์นั้น จะใช้แรงงานเครื่องจักรเป็นหลัก และแรงงานคนบางส่วนทำให้มีโอกาสที่รูปแบบการใช้ทรัพยากรมีความซับซ้อนและไม่

เหมือนกับอุตสาหกรรมที่มีการใช้แรงงานคนเป็นหลัก เพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบการเก็บข้อมูลสถานะการใช้ทรัพยากรและรูปแบบการแสดงผลข้อมูลกำลังการผลิตต่อไป

3.1 ศึกษากระบวนการรับคำสั่งซื้อในปัจจุบัน

จากการศึกษาโดยการเข้าเยี่ยมชมโรงพิมพ์ในเวลาการปฏิบัติงานจริงและทำการสอบถามผู้เชี่ยวชาญที่มีความเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการรับคำสั่งซื้อของโรงพิมพ์กรณีศึกษาในปัจจุบันพบว่า กระบวนการรับคำสั่งซื้อมีการดำเนินงานโดยมีลูกค้า ฝ่ายขาย/ฝ่ายประสานงาน (ฝ่ายขาย) และฝ่ายประเมินที่มีความเกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อเป็นหลัก และสามารถแบ่ง 3 ขั้นตอนหลัก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กระบวนการรับคำสั่งซื้อของโรงพิมพ์กรณีศึกษาในปัจจุบัน



1) ประเมินกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ โดยลูกค้าจะส่งรายละเอียดชิ้นงานและวันส่งมอบที่ต้องการกับฝ่ายขาย ซึ่งฝ่ายขายจะต้องตรวจสอบข้อมูลว่าครบถ้วนพอที่จะทำการประเมินหรือไม่ หลังจากนั้นจึงทำเอกสารเพื่อส่งให้การประเมินเริ่มขึ้นพร้อมทั้งส่งรายละเอียดชิ้นงาน ทางฝ่ายประเมินจะทำการสร้างกระบวนการผลิตที่จะสามารถผลิตให้ได้ตามลักษณะชิ้นงานที่ถูกกำหนด

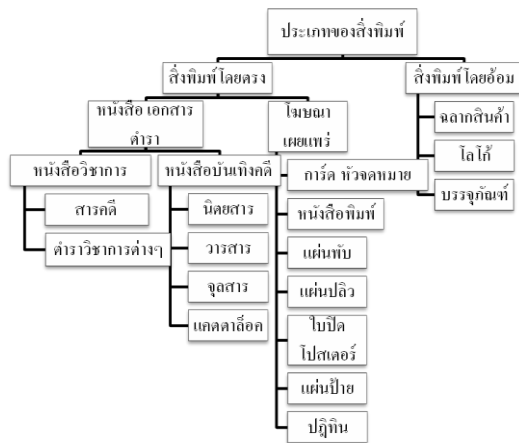
2) ประเมินแผนการผลิต ฝ่ายประเมินจะทำการพิจารณาวันส่งมอบที่เป็นไปได้ จากการอ้างอิงผลการพิจารณาความยากง่ายของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพของทรัพยากร (เครื่องจักรและพนักงาน) โดยฟังฟังประสบการณ์ส่วนบุคคลของพนักงานฝ่ายประเมิน ความยากของผลิตภัณฑ์จะแปรผันตรงกับระยะเวลาการผลิตรวม เนื่องจากกระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอน สำหรับระดับประสิทธิภาพทรัพยากรจะมีผลต่อการประเมินวันส่งมอบเช่นกัน หากเครื่องจักรที่ไม่ดีหรือพนักงานมีความชำนาญน้อย เช่นมีอายุการทำงานน้อย ก็จะต้องใช้ระยะเวลาการผลิตที่ยาวกว่า

3) เสนอวันส่งมอบผลิตภัณฑ์ หลังจากที่ยฝ่ายประเมินได้ทำการประเมินวันส่งมอบผลิตภัณฑ์แล้วก็จะเสนอวันส่งมอบที่เป็นไปได้กลับให้ทางฝ่ายขาย รวมถึงข้อมูลกระบวนการผลิตและแผนการผลิต (มีการระบุทรัพยากรที่คาดว่าจะต้องใช้แต่ยังไม่มีการระบุเวลาทำงาน) เพื่อให้ฝ่ายขายทำการเสนอและเจรจาต่อรองข้อตกลงกับลูกค้าต่อไป

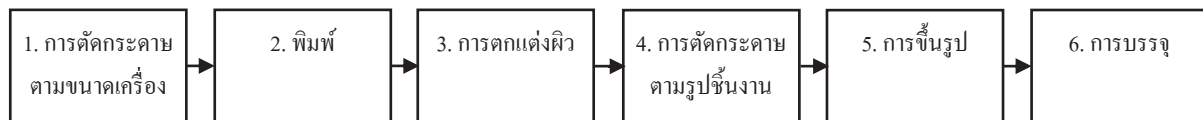
ในปัจจุบันไม่มีการวางแผนตารางการผลิตหรือวางแผนการใช้ทรัพยากร ทำให้ไม่สามารถคาดการณ์หรือป้องกันการเกิดสภาพคอขวดในการผลิต ซึ่งมีจะรู้ปัญหาในช่วงใกล้วันส่งมอบ จึงต้องแก้ไขด้วยการทำงานล่วงเวลาเพื่อยังคงความสามารถในการส่งมอบให้ได้ตามวันส่งมอบที่ตกลงกับลูกค้าไว้

3.2 ศึกษากระบวนการผลิตของโรงพิมพ์

การศึกษาค้นคว้านี้ตั้งอยู่บนความสามารถการผลิตของโรงพิมพ์กรณีศึกษา ซึ่งโรงพิมพ์นี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์สิ่งพิมพ์ได้หลากหลาย โดยจำแนกประเภทได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลผลิตขั้นต้นสิ่งพิมพ์ของโรงพิมพ์กรณศึกษา



รูปที่ 4 ขั้นตอนการผลิตหลักของโรงพิมพ์กรณศึกษา

เมื่อเข้าใจภาพรวมของกระบวนการผลิตสิ่งพิมพ์แล้ว จึงทำการพิจารณารายละเอียดในแต่ละขั้นตอนการผลิต หลักว่าประกอบด้วยสถานีงานใดบ้าง การแบ่งโครงสร้างของสถานีงานได้ถูกพิจารณาตามสินค้าระหว่างการผลิต (Work-in-process) ซึ่งแต่ละสถานีงานจะมีหน้าที่รับผิดชอบสินค้าระหว่างการผลิตตามที่ได้รับมอบหมาย และเมื่อทำเสร็จก็จะทำการส่งต่อสินค้าระหว่างการผลิตไปยังสถานีถัดไปตามแผนการผลิต แต่ละขั้นตอนการผลิตหลักมีสถานีงานดังนี้ การตัดกระดาษตามขนาดเครื่องจะมีสถานีงานตัดกระดาษตามขนาดเครื่อง การพิมพ์จะมีสถานีงานพิมพ์ การตกแต่งผิวจะมีสถานีงานอาบผิวและปั๊มเค การตัดกระดาษตามรูปชิ้นงานจะมีสถานีตัดเหลี่ยมและปั๊มโคตซ์ การขึ้นรูปจะมีสถานีงานพับ ปะหน้าต่าง ปะกล่อง ปะถุง เก็บเล่ม เจาะรู เย็บมุงหลังคา เย็บกระดูกงู กาวหัว ใสกาว เย็บกึ่งใสกาว ร้อยเชือก และปกหุ้มจับบัง สดท้ายการบรรจุจะมีสถานีงานห่อสถานีงานเดียวเท่านั้น

จากการศึกษายังพบว่า ภายในแต่ละสถานีงานมี โอกาสที่ขั้นตอนการผลิตจะแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้ มีผลให้ระยะเวลาการผลิตแตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงยังไม่

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโดยการสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญที่มีความเกี่ยวข้องกับการผลิต กระบวนการผลิตของโรงพิมพ์กรณศึกษาส่วนใหญ่จะใช้เครื่องจักรเป็นแรงงานหลัก โดยมีขั้นตอนการผลิตหลักได้แก่ การตัดกระดาษตามขนาดเครื่องพิมพ์ การตกแต่งผิว การตัดกระดาษตามรูปชิ้นงาน การขึ้นรูป และการบรรจุ ซึ่งทั้ง 6 ขั้นตอนมีการเรียงลำดับตามรูปที่ 4

สามารถหาค่าเวลามาตรฐานของการผลิตจากสถานีงานได้ จำเป็นที่จะต้องทำการออกแบบโครงสร้างของขั้นตอนการผลิตสิ่งพิมพ์ที่จะทำให้สามารถนำไปใช้ในการหาค่าเวลามาตรฐานของการผลิตได้

3.3 รูปแบบการใช้ทรัพยากรปัจจุบัน

การผลิตสิ่งพิมพ์เป็นการพึ่งพาแรงงานของเครื่องจักรเป็นหลัก และมีการใช้แรงงานคนบางส่วน และเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะมีหน้าที่และความสามารถการผลิตเฉพาะตัว ทำให้ทางโรงพิมพ์จำเป็นต้องออกแบบรูปแบบการใช้ทรัพยากร เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างเหมาะสม จึงได้ศึกษาโดยแยกแยะระหว่างทรัพยากรแรงงานเครื่องจักรและแรงงานคน พบว่ามีรูปแบบการใช้งานทรัพยากรรวมแล้ว 4 รูปแบบ รูปแบบการใช้แรงงานเครื่องจักรมีความแตกต่างกัน เกิดจากปัจจัยของเครื่องจักรมาเกี่ยวข้องคือ ขนาดของเครื่องจักร และทักษะการใช้งาน รูปแบบการใช้แรงงานคนไม่มีความแตกต่างกันดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการใช้ทรัพยากร

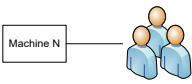
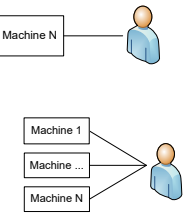
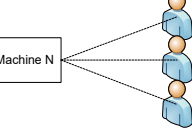
ทรัพยากร	ขนาดเครื่องจักร	ทักษะใช้เครื่องจักร	รูปแบบการใช้ทรัพยากร
แรงงานเครื่องจักร (คู่กับแรงงานคน)	ขนาดใหญ่ (ดูแลมากกว่า 1 คน)	เฉพาะด้าน	รูปแบบ 1
		ทั่วไป	ไม่พบ
	ขนาดเล็ก (1 คนดูแลได้)	เฉพาะด้าน	รูปแบบ 2
		ทั่วไป	รูปแบบ 3
แรงงานคน	-	-	รูปแบบ 4

ขนาดของเครื่องจักรมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตรงกับปริมาณแรงงานคนที่ต้องการ เพื่อรองรับกับปริมาณงานที่ต้องทำในการใช้งานเครื่องจักร เช่น เครื่องพิมพ์ ซึ่งมีหน้าที่หลักอยู่ 3 หน้าที่ คือตรวจสอบปริมาณกระดาษและป้อนกระดาษเมื่อปริมาณกระดาษลดลงจนถึงปริมาณที่กำหนด ควบคุมปริมาณสีของแท่นพิมพ์ และตรวจสอบสีที่ได้จากชิ้นงานที่พิมพ์แล้ว จากตัวอย่างเครื่องพิมพ์ทำให้เข้าใจได้ว่า ขนาดเครื่องจักรหรืองานที่ต้องทำในการใช้เครื่องจักรมีผลกับรูปแบบการใช้ทรัพยากร สำหรับทักษะใช้เครื่องจักรก็เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบการใช้ทรัพยากร เช่น เครื่องพิมพ์ที่พนักงานที่ดูแลจะต้องรู้จักและเข้าใจถึงการใช้งาน การติดตั้งเครื่องที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่า หากเปรียบเทียบกับเครื่องเจาะรูที่มีความซับซ้อนน้อยซึ่งใช้เวลาในการเรียนรู้ได้ไม่นานหรือไม่เกิน 1 ชั่วโมง

รูปแบบการใช้ทรัพยากรที่แตกต่างกันถูกออกแบบมาให้รองรับปัจจัยที่แตกต่างกัน มีทั้งหมด 4 รูปแบบดังตารางที่ 4 ด้วยแนวทางที่ว่าหากขนาดเครื่องจักรใหญ่และต้องการพนักงานที่มีทักษะเฉพาะด้าน ก็จะมอบหมายให้กลุ่มพนักงานเป็นผู้ดูแลประจำเครื่องนั้นๆ (รูปแบบ 1) หากขนาดเครื่องจักรเล็กจะถูกมอบหมายให้พนักงานคนใดคนหนึ่งเป็นผู้ดูแล แต่จะพิจารณาถึงทักษะที่จำเป็นด้วยว่าจะต้องมีทักษะเฉพาะด้านหรือไม่ หากจำเป็นต้องมีทักษะเฉพาะด้านก็จะมอบหมายให้พนักงานเป็นผู้ดูแลประจำ

เครื่องนั้นๆ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่พนักงาน 1 คนจะถูกมอบหมายให้ดูแลเครื่องจักรมากกว่า 1 เครื่องได้ (รูปแบบ 2) แต่หากการใช้งานเครื่องจักรสามารถใช้งานโดยอาศัยทักษะทั่วไป ก็จะไม่มีการมอบหมายให้พนักงานคนใดคนหนึ่งเป็นผู้ดูแลประจำ (รูปแบบ 3) นอกจากการใช้แรงงานเครื่องจักรแล้วกระบวนการผลิตสิ่งพิมพ์บางขั้นตอนยังจำเป็นต้องใช้แรงงานคน โดยไม่ต้องอาศัยแรงงานเครื่องจักร (รูปแบบ 4)

ตารางที่ 4 รูปแบบการใช้ทรัพยากร โรงพิมพ์กรณีศึกษา

รูปแบบ	ขนาดเครื่องจักร	ทักษะใช้เครื่องจักร
1	แรงงานหนึ่งเครื่องจักรกับกลุ่มพนักงานประจำ	
2	แรงงานหนึ่งเครื่องจักรกับหนึ่งพนักงานประจำ	
3	แรงงานหนึ่งเครื่องจักรกับพนักงานคนใดก็ได้	
4	แรงงานคนอย่างเดียว	

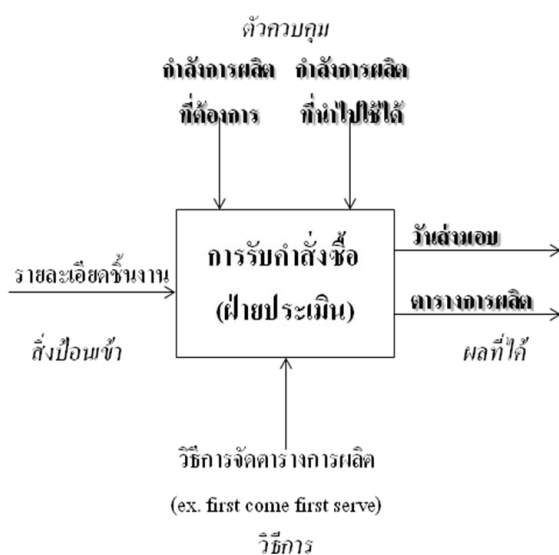
การใช้ทรัพยากรด้วยรูปแบบปัจจุบันของโรงพิมพ์กรณีศึกษาพบว่า ได้มีการจัดรูปแบบการใช้ทรัพยากรอย่างเหมาะสมแล้ว เพียงแต่ยังเกิดปัญหาจากการวางแผนการผลิต เพราะไม่มีแผนการผลิตในระดับตารางการใช้ทรัพยากร ทำให้มีโอกาสสูงที่จะเกิดสภาวะรอคอยจนส่งผลกระทบต่อวันส่งมอบที่ถูกกำหนดได้

3.4 วิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของการรับคำสั่งซื้อ

จากการศึกษาสิ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อ ทำให้พิจารณาได้ว่า ปัญหาที่ก่อให้เกิดการประเมินที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ คือ 1. การขาดข้อมูลกำลังการ

ผลิตที่นำไปใช้ได้จากฝ่ายผลิตให้อ้างอิง 2. การขาดข้อมูลของค่าเวลามาตรฐานการผลิต 3. การประเมินโดยพึ่งพาประสบการณ์ส่วนบุคคลซึ่งเป็นการประเมินที่ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับผลตอบแทนภาพรวม

ดังนั้นระบบสนับสนุนนี้จึงควรที่จะต้องมียุทธศาสตร์ของ 1. ลำดับขั้นตอนการประเมินวันส่งมอบที่ชัดเจน 2. สมการหรือวิธีการประเมินกำลังการผลิตที่ต้องการที่จะทำให้รู้ input และ output ที่เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative) นอกจากนี้เพื่อให้ระบบสามารถที่จะทำให้การประเมินวันส่งมอบโดยมีการอ้างอิงข้อมูลพื้นฐานมากมายได้ดังรูปที่ 5 ระบบสารสนเทศบนพื้นฐานคอมพิวเตอร์จะสามารถเข้ามาช่วยรองรับการจัดการข้อมูลให้เป็นระบบและข้อมูลเพื่อการใช้ซ้ำ และมีการออกแบบรูปแบบการแสดงผลประเมินเพื่อผู้ใช้ระบบเข้าใจได้ง่ายและสอดคล้องกับการใช้งานจริง เพื่อสนับสนุนให้การรับคำสั่งซื้อสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 ระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่นำเสนอ

4. ระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่นำเสนอ

จากการศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบันการรับคำสั่งซื้อของโรงพิมพ์กรณีศึกษา และการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้เกิดแนวคิดของการลดช่องว่างระหว่างภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ โดยการวิจัยครั้งนี้จะทำการ

ออกแบบระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อสำหรับโรงพิมพ์ให้สามารถใช้งานได้จริงและทดสอบได้ว่าผลการประเมินวันส่งมอบมีแนวโน้มที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

ระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่ต้องการเสนอนี้จะเป็นการเสนอกระบวนการทำงานในการรับคำสั่งซื้อและกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องต่อการประเมินวันส่งมอบช่วยให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ผู้ใช้สามารถเข้าใจที่มาของวันส่งมอบที่ได้จากการประเมินเพื่อที่จะนำข้อมูลเหล่านั้นมาทำการเจรจาต่อรองกับลูกค้าต่อไปได้

ผลลัพธ์ของการออกแบบระบบสามารถแบ่งเป็น

1. กระบวนการทำงานและระบบการเก็บข้อมูลที่ส่งเสริมการประสานงานกันระหว่างฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อ
2. วิธีการได้มาซึ่งกำลังการผลิตที่สามารถรองรับทุกลักษณะชิ้นงานถึงแม้จะมีความแตกต่างกันได้
3. รูปแบบการแสดงผลข้อมูลประเมินวันส่งมอบที่จะทำให้เกิดการแบ่งปันข้อมูลทั้งฝ่ายประเมินและฝ่ายผลิตให้มีความเข้าใจที่ตรงกัน

4.1 กระบวนการทำงานและระบบการเก็บข้อมูลของการรับคำสั่งซื้อ

กระบวนการทำงานได้ถูกออกแบบโดยมีการมุ่งเน้นให้ส่งเสริมการประสานงานกันระหว่างฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อ ซึ่งระดับการประสานงานในทางปฏิบัตินั้นได้ถูกแบ่งเป็น 4 ระดับ [14] และจากลักษณะเฉพาะของโรงพิมพ์ที่มีระดับความซับซ้อนด้านเทคนิคของกระบวนการผลิตที่สูง เวลาส่งมอบส่งผลกับลูกค้าโดยตรงและการปรับแต่งของชิ้นงานอยู่ในระดับยืดหยุ่น ทำให้เห็นว่าระดับการประสานงานที่เหมาะสมคือการติดต่อแบบขั้นสูงโดยใช้ระบบข้อมูลสารสนเทศในการยอมให้เกิดการแบ่งปันข้อมูลภายในองค์กร

ในส่วนของการออกแบบกระบวนการทำงานจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. กระบวนการทำงานการรับคำสั่งซื้อ 2. การออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูล กระบวนการทำงานการรับคำสั่งซื้อจะทำให้เห็นว่ามียานใดถูกดำเนินขึ้นและฝ่ายใดมีหน้าที่รับผิดชอบ รวมถึงการ

แสดงให้เห็นถึงการประมวลผลข้อมูลตลอดทั้งระบบ การออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูลช่วยในการจัดระเบียบและจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ที่สำคัญในการดำเนินการ

กระบวนการทำงานการรับคำสั่งซื้อที่ต้องการนำเสนอได้ถูกแสดงในตารางที่ 5 ขั้นตอนการทำงานถูกแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก 1. ประเมินกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ 2. ประเมินแผนการผลิต 3. ประเมินตารางการผลิตและกำหนดวันส่งมอบผลิตภัณฑ์ 4. เสนอวันส่งมอบผลิตภัณฑ์ การดำเนินการรับคำสั่งซื้อจะเริ่มขึ้นเมื่อทางฝ่ายขายได้รับรายละเอียดผลิตภัณฑ์จากลูกค้า และทำการตรวจสอบความครบถ้วนข้อมูล หากครบถ้วนดีแล้วจึงทำการส่งประเมินงานด้วยเอกสารไปประเมินงาน จากนั้นทางฝ่ายประเมินจะเริ่มทำการประเมินสิ่งต่างๆ ได้แก่ กระบวนการผลิต แผนการผลิต ตารางการใช้ทรัพยากร และสุดท้ายคือการกำหนดวันส่งมอบโดยอ้างอิงข้อมูลนโยบายส่งมอบเพิ่มเติม (ค่าเวลาเผื่อความปลอดภัยและระยะเวลาขนส่งที่ได้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานในโรงพิมพ์) ซึ่งสามารถแก้ไขได้ตามความเหมาะสมสำหรับแต่ละงาน

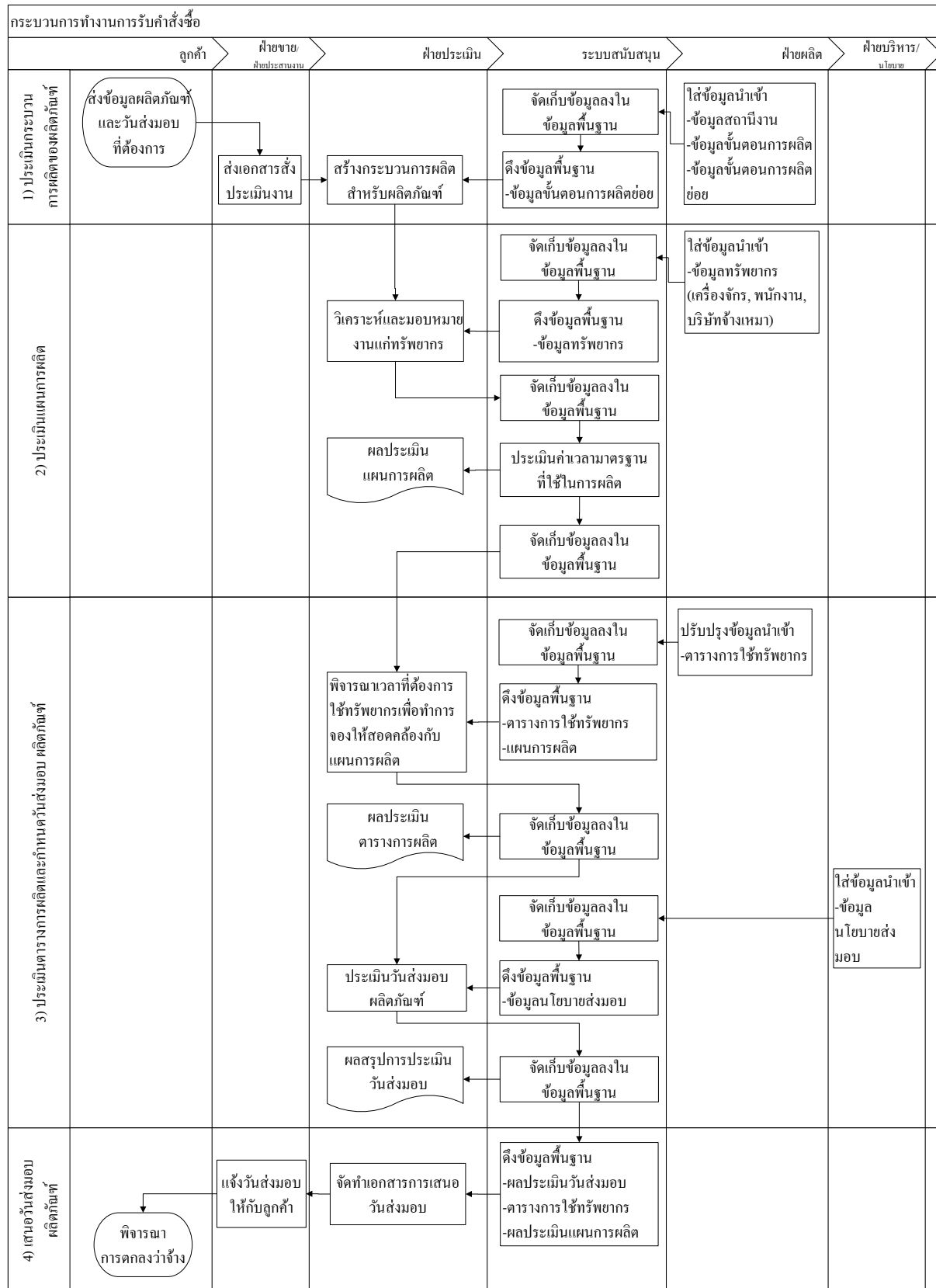
ส่วนการประเมินกระบวนการผลิตและแผนการผลิตฝ่ายประเมินจะดำเนินการโดยอ้างอิงข้อมูลจากฝ่ายผลิตโดยไม่ทำการแก้ไขในข้อมูลเหล่านั้น แต่จะทำการป้อนข้อมูลใหม่ (ในที่นี้คือกระบวนการผลิตและแผนการผลิต

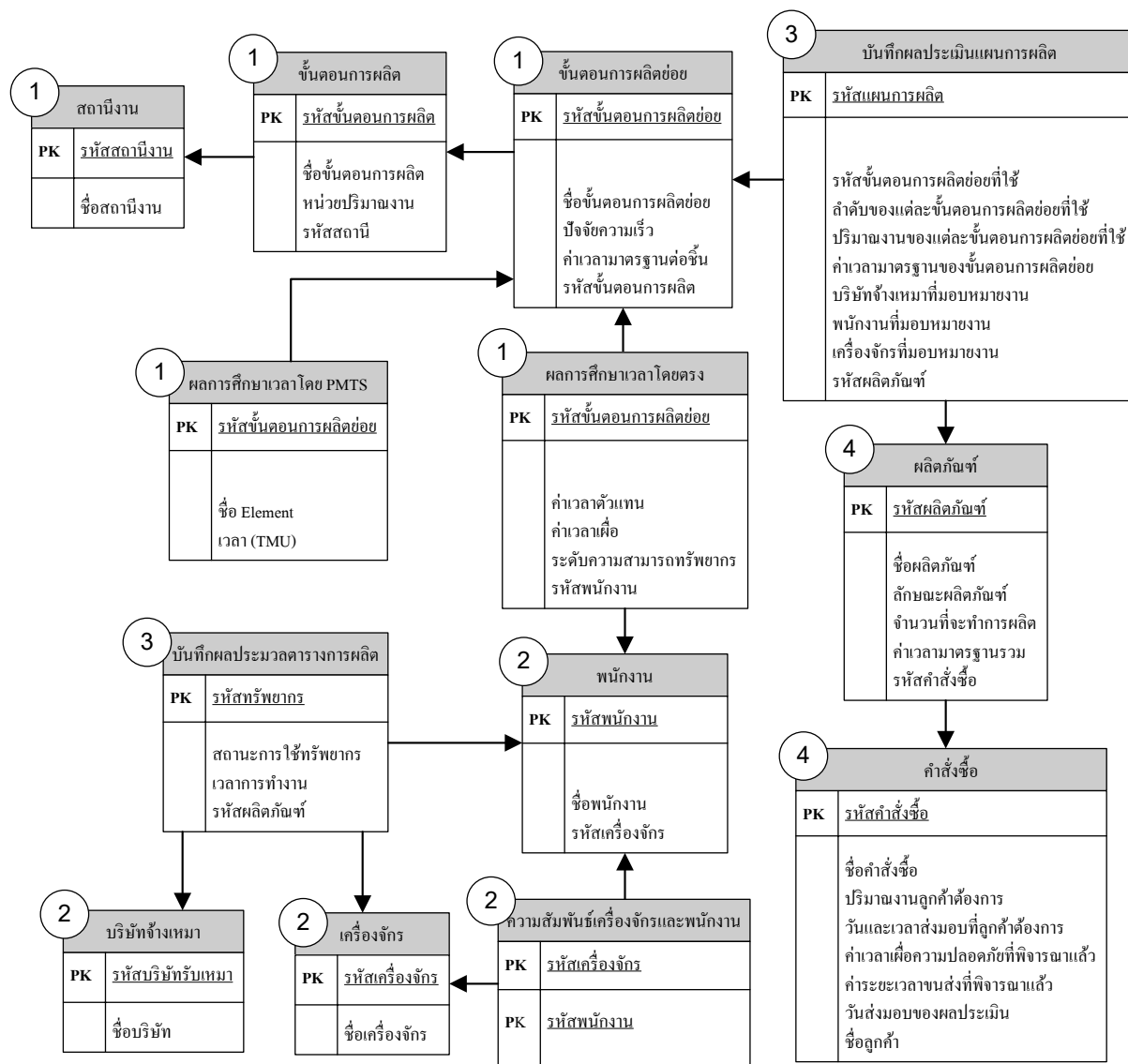
ของชิ้นงานเป้าหมาย) เข้าไปในระบบสนับสนุนเพื่อทำการจัดเก็บต่อไป

การประเมินตารางการใช้ทรัพยากรเป็นจุดที่เกิดการแบ่งปันข้อมูลร่วมกันระหว่างฝ่ายประเมินและฝ่ายผลิต โดยใช้ข้อมูลตารางการใช้ทรัพยากรเป็นสื่อที่ทำให้ทั้งสองฝ่ายเข้าใจสภาพกำลังการผลิตของโรงพิมพ์ ทั้งที่เป็นกำลังการผลิตที่นำไปใช้ได้และนำไปใช้ไม่ได้ ทำให้ฝ่ายประเมินเข้าใจสถานะทรัพยากรที่ต้องการใช้ ส่งผลให้ไม่เกิดการวางแผนจะใช้ทรัพยากรที่ซ้ำซ้อน การประเมินวันส่งมอบจึงน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น โดยฝ่ายประเมินจะทำการป้อนสถานะทรัพยากรเพื่อให้ฝ่ายผลิตเข้าใจว่าเกิดการจองหรือวางแผนว่าจะใช้เมื่อใด ทำให้ฝ่ายผลิตทราบได้ว่าควรทำงานใดก่อนหลังและควรทำให้เสร็จภายในเวลาเท่าใด โดยอ้างอิงตามตารางการใช้ทรัพยากรนี้ รวมทั้งฝ่ายผลิตจะทำการแก้ไขสถานะทรัพยากรเพื่อเป็นการรายงานสภาพความคืบหน้าของงานด้วย

เมื่อผู้ประเมินทำการจองทรัพยากรตามแผนการผลิตแล้ว จะทำให้ทราบได้ว่าวันที่มีโอกาสดำเนินการได้คือวันที่ทำการผลิตขั้นสุดท้ายเสร็จสิ้น โดยอ้างอิงจากการจองทรัพยากรที่ได้รับมอบหมายงานของการผลิตขั้นสุดท้าย นอกเหนือจากนี้เพื่อเพิ่มการจัดการความเสี่ยง ผู้ประเมินจะต้องทำการพิจารณาวันส่งมอบอีกครั้ง โดยการรวมถึงค่าเวลาเผื่อความปลอดภัยและระยะเวลาขนส่งที่ได้ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐานของโรงพิมพ์จากฝ่ายบริหารด้วย

ตารางที่ 5 กระบวนการทำงานการรับคำสั่งซื้อ





รูปที่ 6 ผลการออกแบบฐานข้อมูล

ฐานข้อมูลถูกออกแบบมาให้สอดคล้องตามการประมวลผลข้อมูลบนพื้นฐานของหลักการการออกแบบฐานข้อมูลในระดับแนวคิด (Conceptual design) ผลจากการออกแบบจะมีเอนทิตี (Entity) ที่สามารถถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ซึ่งจะมีการแสดงตัวเลขในวงกลมขนาดเล็กในรูปที่ 6 กลุ่มแรกจะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างขั้นตอนการผลิตและข้อมูลสำหรับคำนวณค่าเวลามาตรฐานต่อชิ้นในแต่ละขั้นตอนการผลิตย่อย กลุ่มที่สองจะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรที่โรงพิมพ์ครอบครองอยู่ กลุ่มที่สามและสี่จะเป็นข้อมูลที่ไดจากการ

ประเมินที่จะทำให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องสามารถแบ่งปันข้อมูลด้วยระบบสารสนเทศนี้ได้

จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่นำเสนอนี้เอื้อต่อการประสานงานกันโดยสามารถใช้ระบบสนับสนุนในตารางที่ 5 ซึ่งเทียบได้กับระบบข้อมูลสารสนเทศให้เกิดการแบ่งปันข้อมูลระหว่างฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อได้ จนทำให้ฝ่ายประเมินสามารถดำเนินการประเมินวันส่งมอบอย่างมีประสิทธิภาพและมีข้อมูลที่มาของผลประเมินที่สามารถติดตามได้

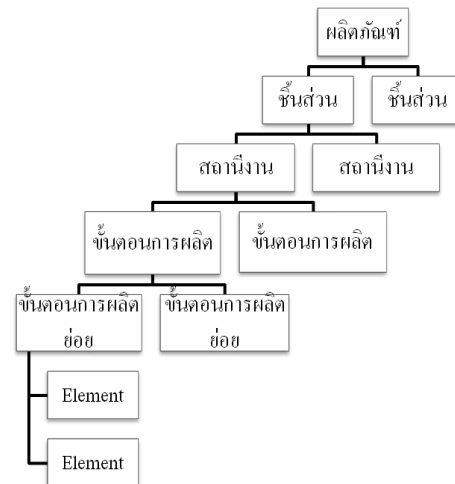
4.2 แนวทางการหาค่าลังการผลิตที่ต้องการ

ค่าลังการผลิตหมายถึงความสามารถสูงสุดในการผลิตโดยหน่วยของข้อมูลจะเป็นปริมาณผลผลิตต่อเวลา เช่น ชิ้น/วัน ซึ่งการจะหาค่าลังการผลิตได้ จึงจำเป็นต้องมีข้อมูลของค่าเวลามาตรฐานการผลิตต่อชิ้น เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์มีลักษณะการผลิตแบบ MTO ทำให้ต้องมีการสร้างกระบวนการผลิตใหม่ทุกครั้งเพื่อรองรับลักษณะชิ้นงานที่ต่างกัน และทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตมีความผันผวนสูง จึงเป็นเรื่องยากแก่การหาค่าเวลามาตรฐานในระดับชิ้นงาน

จากการศึกษาวิธีการหาค่าเวลามาตรฐานแล้วจึงค้นพบว่า แท้ที่จริงแล้วกระบวนการผลิตของชิ้นงานใด ๆ เกิดจากการประกอบกันของขั้นตอนการผลิตในระดับย่อยๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ และแก้ไขข้อมูลในการทำงานได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่งทำทางการทำงานที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะใช้เวลามากหรือน้อยต่างกันแค่ไหน ไม่ว่าจะซับซ้อนหรือง่ายดายเป็นเพียงใด ต่างก็ประกอบขึ้นมาจากการทำทางพื้นฐานของการทำงาน [21]

ดังนั้นเพื่อกำหนดแนวทางการหาค่าลังการผลิตที่ต้องการสำหรับชิ้นงานนั้น จึงมีการกำหนด 1. โครงสร้างการผลิตที่ถูกแบ่งเป็นระดับย่อยพอที่จะหาค่าเวลามาตรฐานได้ และ 2. วิธีการได้มาซึ่งค่าเวลามาตรฐานเพื่อรองรับขั้นตอนการผลิตที่ใช้ทรัพยากรต่างรูปแบบกัน

จากการศึกษากระบวนการผลิตของโรงพิมพ์ ได้นำข้อมูลมาจัดโครงสร้างการผลิตโดยแบ่งจากระดับใหญ่จนถึงระดับย่อยพอจะหาค่าเวลามาตรฐานได้ตามรูปที่ 7 และคำนึงถึงความสามารถที่จะนำกลับมาประกอบกันเป็นกระบวนการผลิตที่สมบูรณ์และปรับเปลี่ยนได้ตามลักษณะชิ้นงาน



รูปที่ 7 โครงสร้างการผลิตในระดับต่างๆของโรงพิมพ์

จากโครงสร้างการผลิตทำให้เห็นว่า ระดับใหญ่ที่สุดคือผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะถูกสร้างขึ้นจากแต่ละสถานีงาน โดยที่แต่ละสถานีงานก็มีขั้นตอนการผลิต แต่เนื่องจากยังมีปัจจัยที่ทำให้ค่าเวลาที่ใช้ในการผลิตมีความแตกต่างกันมากเกินไป (ความแปรผันสูง) มีโอกาสที่จะทำให้ค่าขอบเขตที่เป็นไปได้มีความกว้างมากจนเป็นเหตุให้การประเมินมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิตเพิ่มเติม แล้วจึงนำข้อมูลปัจจัยเหล่านี้มาใช้เพื่อแจกแจงออกมาอีกระดับที่เรียกว่า ขั้นตอนการผลิตย่อย และขั้นตอนการผลิตย่อยก็สามารถแบ่งย่อยเป็นระดับการเคลื่อนที่เพื่อทำงานบางอย่างได้ ซึ่งเรียกว่า “Element” สำหรับขั้นตอนทำงานที่มีความแน่ชัด

การวิจัยครั้งนี้ต้องการมุ่งเน้นถึงวิธีการหาค่าเวลามาตรฐานของแต่ละขั้นตอนการผลิตย่อยว่าควรจะใช้วิธีการใดจึงจะเหมาะสม เนื่องจากวิธีการศึกษาเวลามีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่ การศึกษาเวลาโดยตรง (Direct Time Study), การสุ่มงาน (Work Sampling), การศึกษาจากข้อมูลเวลามาตรฐานและสูตร (Standard Data and Formulas), การศึกษาเวลาโดยระบบหาเวลาก่อนล่วงหน้า (Predetermined Motion Time System-PMTS) ซึ่งแต่ละวิธีการมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน [22]

ผลจากการพิจารณาโครงสร้างการผลิตของโรงพิมพ์ในระดับขั้นตอนการผลิตย่อยนั้น จะได้เห็นว่ามีการใช้ทรัพยากรที่แตกต่างกัน และรูปแบบการทำงานก็ต่างกันด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อเวลาทั้งสิ้น จึงได้นำ 2 ปัจจัยนี้มาเป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้วิธีการศึกษาเวลา ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 วิธีการศึกษาเวลามาตรฐานที่น่าเสนอ

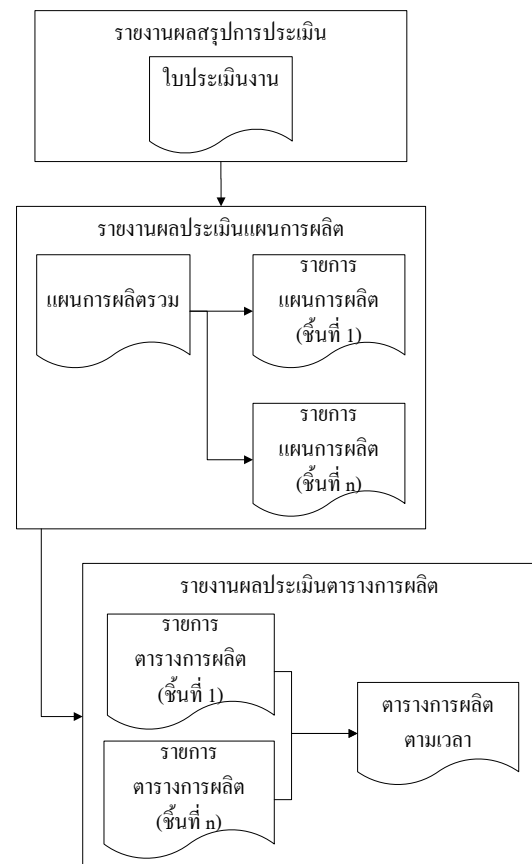
ปัจจัยที่มีผลต่อเวลา	วิธีการศึกษาเวลามาตรฐานที่น่าเสนอ
เครื่องจักร	การศึกษาจากข้อมูลเวลามาตรฐานและสูตร
พนักงาน	วิธีการชัดเจน: การศึกษาเวลาโดยระบบหาเวลาก่อนล่วงหน้า
	วิธีการไม่ชัดเจน: การศึกษาเวลาโดยตรง
จ้างเหมา	การศึกษาจากข้อมูลเวลามาตรฐานและสูตร

การเลือกวิธีการศึกษาเวลาจึงเริ่มจากการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อเวลาการผลิตคือทรัพยากรใด เนื่องจากการผลิตบางขั้นตอนที่ถึงแม้จะใช้เครื่องจักรแต่เครื่องจักรก็ไม่ได้มีผลต่อเวลา เช่นการตั้งเครื่องพิมพ์ที่จะช้าหรือเร็วจะขึ้นอยู่กับพนักงาน ดังนั้นจึงไม่สามารถพิจารณาจากทรัพยากรที่ใช้ แต่จะต้องพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาว่าเป็นทรัพยากรใด จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่เป็นเครื่องจักรและบริษัทจ้างเหมา ได้ถูกกำหนดให้ใช้การศึกษาจากข้อมูลเวลามาตรฐานและสูตร เนื่องจากทางโรงพิมพ์ได้ทำการตั้งค่าความเร็วของเครื่องจักรเป็นมาตรฐานไว้ สำหรับบริษัทจ้างเหมาได้มีการกำหนดตารางเวลาหรือรอบที่จะเข้ามารับงานและส่งงานประจำอยู่แล้ว จึงใช้ระยะเวลานั้นเป็นตัวแทนของค่าเวลามาตรฐานได้ กรณีที่ปัจจัยของเวลาเป็นพนักงาน จะมีการเพิ่มเกณฑ์ที่ต้องพิจารณามาขึ้นคือวิธีการทำงานมีความชัดเจนหรือไม่ หากวิธีการทำงานชัดเจนได้ถูกเสนอให้ใช้วิธีการศึกษาเวลาโดยระบบหาเวลาก่อนล่วงหน้า และหากไม่ชัดเจนสามารถใช้วิธีการศึกษาเวลาโดยตรงได้ ขั้นตอนการผลิตย่อยใดใช้วิธีการศึกษาเวลาโดยระบบหาเวลาก่อนล่วงหน้า จำเป็นต้องวิเคราะห์

ถึงโครงสร้างการผลิตในระดับที่เล็กลงอีก ซึ่งเรียกว่า “Element” เพิ่มเติมด้วย [21]

4.3 รูปแบบการแสดงผลข้อมูลผลประเมินวันส่งมอบ

การออกแบบรูปแบบการแสดงผลข้อมูลเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงทุกฝ่ายที่มีความเกี่ยวข้องเนื่องจากเป็นข้อมูลที่จะถูกใช้เพื่ออ้างอิงในหลายฝ่าย จึงมีข้อคำนึงถึง ดังนี้ 1. ความสอดคล้องของข้อมูล 2. การเชื่อมโยง 3. การเลือกใช้คำศัพท์ 4. รูปแบบการนำเสนอข้อมูล [2] โดยทำการศึกษาเบื้องต้นจากเอกสารที่ทางโรงพิมพ์ใช้อยู่ปัจจุบันและทำการออกแบบรูปแบบการนำเสนอ ทั้งในเรื่องของโครงสร้างความสัมพันธ์ของรายงานและรูปแบบข้างในรายงานแต่ละเอกสารด้วย



รูปที่ 8 องค์ประกอบของเอกสารรายงานผลประเมินของระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่น่าเสนอ

การออกแบบโครงสร้างจะมีรูปแบบดังรูปที่ 8 แบ่งออกเป็นรายงานผลสรุปการประเมิน รายงานผลประเมิน

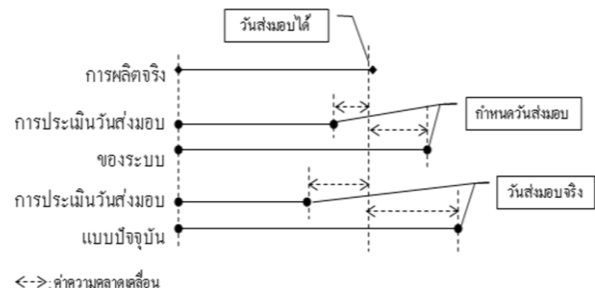
แผนการผลิต รายงานผลประเมินตารางการผลิต เป็นการแสดงจากผลสรุปสุดท้ายของวันส่งมอบที่ได้จากการประเมิน โดยมีรายละเอียดที่ทำให้เข้าใจถึงความเป็นมาของวันส่งมอบที่ถูกประเมินขึ้น และสามารถใช้เป็นข้อมูลในการเจรจากับลูกค้าได้

5. การทดสอบการใช้งานระบบ

ระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่นำเสนอนี้ได้ถูกออกแบบเพื่อให้เกิดผลการประเมินวันส่งมอบที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น โดยลดการพึ่งพาประสบการณ์ส่วนบุคคลในการประเมิน ทำให้ลดการเกิดโอกาสของค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมที่ไม่ได้ถูกวางแผนเอาไว้ เช่น ค่าจ้างล่วงเวลาเพื่อยังคงความสามารถในการส่งมอบให้ได้ตามที่ตกลง และด้วยกระบวนการทำงานและระบบสารสนเทศที่ถูกออกแบบได้ช่วยส่งเสริมการประสานงานกันระหว่างฝ่ายประเมินและฝ่ายผลิตให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบโดยแบ่งออกเป็น 2 แง่มุมได้แก่ 1. ทดสอบหาค่าความคลาดเคลื่อนของผลประเมินวันส่งมอบ 2. ประเมินการแก้ไขปัญหาการรับคำสั่งซื้อด้วยระบบสนับสนุนที่นำเสนอในภาพรวม

5.1 ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนผลประเมินวันส่งมอบ

เนื่องจากผลการประเมินวันส่งมอบเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับการรับคำสั่งซื้อ การนำเสนอระบบสนับสนุนนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้ผลการประเมินวันส่งมอบมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถที่จะทดสอบด้วยการหาค่าความคลาดเคลื่อนของการประเมินวันส่งมอบของปัจจุบันเทียบกับของระบบที่นำเสนอ โดยมีความคาดหวังว่าค่าความคลาดเคลื่อนของระบบที่นำเสนอจะน้อยกว่าของปัจจุบัน ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นได้ว่ามีแนวโน้มของประสิทธิภาพการประเมินที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความหมายของค่าความคลาดเคลื่อนของการประเมินวันส่งมอบ

เกณฑ์การทดสอบประสิทธิภาพการประเมินวันส่งมอบคือ ความคลาดเคลื่อนของการประเมินวันส่งมอบแบบที่ระบบเสนอมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนของการประเมินแบบปัจจุบัน โดยอ้างอิงจากข้อมูลที่ทางโรงพิมพ์เก็บไว้ ซึ่งมีข้อมูลของวันส่งมอบจริงที่ได้ทำการตกลงกับลูกค้าไว้ให้ถือว่าเป็นผลจากการประเมินแบบปัจจุบัน และวันสิ้นสุดการผลิตในที่นี้จะถือว่าเป็นวันที่ส่งมอบได้ของการผลิตจริง สำหรับข้อมูลภาระงานหรือกำลังการผลิตที่นำไปใช้ไม่ได้จะอ้างอิงเฉพาะช่วงก่อนเริ่มการผลิตแต่ละขั้นตอนเท่านั้น และหากผลประเมินของระบบนั้น เวลาของการผลิตเสร็จพร้อมส่ง เกินกว่า 14:00 จะถือว่าวันส่งมอบเป็นวันถัดไป

ชิ้นงานที่ได้ถูกพิจารณานำมาทำการทดสอบ ได้เลือกจากประเภทสิ่งพิมพ์ส่วนใหญ่ที่มีการสั่งซื้อ (อ้างอิงข้อมูลจากโรงพิมพ์กรณีศึกษา มิถุนายน-กันยายน 2558) ชิ้นงานเดี่ยวจะเป็นกล่องบรรจุภัณฑ์ประมาณ 5,000-15,000 ชิ้น หรือราว 1-3 วัน สำหรับชิ้นงานประกอบจะเป็นหนังสือประมาณ 500-2,000 ชิ้นหรือราว 10-20 วัน

ผลทดสอบประสิทธิภาพของการประเมินวันส่งมอบจากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าผลประเมินแบบที่ระบบเสนอ ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่เมื่อเทียบกับวันส่งมอบที่ได้จากผลการผลิตจริงซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.92% ของการผลิตจริง แต่หากเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของผลประเมินวันส่งมอบแบบปัจจุบันแล้ว จะมีค่าเฉลี่ยที่น้อยกว่าเพราะแบบปัจจุบันมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 39.17% ของการผลิตจริง ดังนั้นผลการทดสอบครั้งนี้จึงแสดงให้เห็นว่า

วิธีการประเมินวันส่งมอบแบบที่ระบบเสนอมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบปัจจุบัน ซึ่งมีความหมายเป็นนัยว่า การประเมินวันส่งมอบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งหากระบบนี้ได้ถูกใช้ในสภาวะจริงโดยข้อมูลกำลังการผลิต

หรือสถานะการใช้ทรัพยากรสมจริงยิ่งขึ้น แนวโน้มของการประเมินก็จะมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งโอกาสการเกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมที่ไม่ได้ถูกวางแผนไว้ก็จะลดลงไปด้วย

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของการประเมินวันส่งมอบ

แนวทางการทดสอบ	ชิ้นงาน	ค่าเวลามาตรฐาน (ชั่วโมง)	ค่าเวลาที่ใช้จริง (ชั่วโมง)	ค่าเผื่อความปลอดภัย (20% ค่าเวลามาตรฐาน)	วันเริ่มผลิต	วันส่งมอบ			ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	
						ผลการผลิตจริง	ผลประเมินแบบที่ระบบเสนอ	ผลประเมินแบบปัจจุบัน	ผลประเมินแบบที่ระบบเสนอ	ผลประเมินปัจจุบัน
ชิ้นงานเดี่ยว: กล่องบรรจุภัณฑ์	ชิ้นที่ 1	27.41	25.75	5.48	21/10/2558	24/10/2558	25/10/2558	28/10/2558	33.33	133.33
	ชิ้นที่ 2	9.14	10.5	1.83	31/10/2558	4/11/2558	4/11/2558	4/11/2558	0.00	0.00
	ชิ้นที่ 3	8.94	7.41	1.79	21/10/2558	24/10/2558	24/10/2558	24/10/2558	0.00	0.00
	ชิ้นที่ 4	21.54	20.58	4.31	19/9/2558	24/10/2558	25/10/2558	26/10/2558	20.00	40.00
	ชิ้นที่ 5	8.90	8	1.78	7/10/2558	13/10/2558	13/10/2558	15/10/2558	0.00	33.33
ชิ้นงานประกอบ: หนังสือ	ชิ้นที่ 1	81.89	85.36	16.38	26/10/2558	31/10/2558	2/11/2558	2/11/2558	40.00	40.00
	ชิ้นที่ 2	22.49	27.58	4.50	25/9/2558	27/9/2558	27/9/2558	28/9/2558	0.00	50.00
	ชิ้นที่ 3	146.16	161.8	29.23	6/9/2558	12/9/2558	15/9/2558	13/9/2558	50.00	16.67
ค่าเฉลี่ย									17.92	39.17

5.2 ประเมินการแก้ไขปัญหการรับคำสั่งซื้อด้วยระบบสนับสนุนที่นำเสนอ

ในส่วนนี้จะทำการประเมินโดยการพิจารณาระบบสนับสนุนที่นำเสนอ ว่าสามารถแก้ไขและรองรับกับปัญหาที่เกิดขึ้นได้หรือไม่อย่างไรจากเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ทั้งการกำหนดเกณฑ์และการประเมินระบบจะถูกดำเนินการจากผู้เข้าหามา ซึ่งเป็นบุคลากรของโรงพิมพ์ รมณศึกษา โดยจัดการประชุมในลักษณะการสนทนากลุ่ม (Focus Group) ทำให้เกิดการโต้ตอบและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นจนได้เป็นข้อสรุปของเกณฑ์การทดสอบในแต่ละหัวข้อปัญหาและทำการประเมินระบบที่นำเสนอ

จากปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้น ปัญหาแรกคือการขาดข้อมูลกำลังการผลิตที่นำไปใช้ได้จากฝ่ายผลิตให้อ้างอิง ผู้ใช้ต้องการรู้สภาพของกำลังการผลิตที่นำไปใช้ได้ ซึ่งระบบที่นำเสนอได้มีการกำหนดให้มีการแบ่งปันข้อมูลของสถานะการใช้ทรัพยากร จึงทำให้ฝ่ายประเมินสามารถ

รู้สภาพของกำลังการผลิตทั้งที่นำไปใช้ได้และไม่ได้ สำหรับปัญหาที่สองคือการขาดข้อมูลของค่าเวลามาตรฐานการผลิต ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้เสนอวิธีการหาค่าเวลามาตรฐานระดับชิ้นงาน ที่สามารถรองรับกับชิ้นงานที่มีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกันได้ ปัญหาสุดท้ายคือการประเมินโดยพึงพาประสบการณ์ส่วนบุคคล ซึ่งจากการสนทนากลุ่มได้ลงความเห็นว่ ผลการวิจัยครั้งนี้ได้ให้ผลลัพธ์ที่มีทั้งการกำหนดกระบวนการและการจัดเก็บข้อมูล ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีการกำหนดเป็นเอกสารอ้างอิง โดยสามารถที่จะให้บุคลากรของโรงพิมพ์เรียนรู้วิธีการทำงาน และเกณฑ์การประเมิน วันส่งมอบ ได้โดยไม่ใช้ประสบการณ์ส่วนบุคคล

6. สรุปผล

การรับคำสั่งซื้อของอุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ได้ถูกศึกษาจากโรงพิมพ์รมณศึกษาที่มีความสามารถในการผลิตสิ่งพิมพ์ได้หลากหลาย เช่น กล่องบรรจุภัณฑ์ หนังสือ

ใบปลิว เป็นต้น โดยการศึกษาในสถานที่จริงและการสอบถามในรายละเอียดต่าง ๆ จากบุคลากรของโรงพิมพ์ ทั้งฝ่ายบริหาร ฝ่ายประเมิน ฝ่ายผลิต และฝ่ายขาย ซึ่งเป็นฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อทั้งสิ้น การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเสนอระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อให้ดำเนินการประเมินวันส่งมอบอย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ระบบสนับสนุนที่นำเสนอได้มีการออกแบบทั้งกระบวนการทำงาน ระบบการจัดเก็บข้อมูล แนวทางวิธีการหาเวลามาตรฐานการผลิต และรูปแบบการเสนอผลประเมิน

กระบวนการทำงานและระบบการจัดเก็บข้อมูลได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อที่จะส่งเสริมให้มีการประสานงานกันระหว่างฝ่ายที่เกี่ยวข้องกับการรับคำสั่งซื้อโดยเฉพาะฝ่ายประเมินและฝ่ายผลิต ซึ่งข้อมูลที่มีการแบ่งปันซึ่งกันและกันคือสถานะการใช้ทรัพยากร ฝ่ายประเมินจะสามารถทำการประเมินวันส่งมอบโดยเพิ่มการอ้างอิงสถานะการใช้

ทรัพยากรจากฝ่ายผลิต ซึ่งเปรียบเสมือนกับการอ้างอิงข้อมูลกำลังการผลิตทั้งที่นำไปใช้ได้และใช้ไม่ได้ อีกทั้งได้มีการกำหนดวิธีการหาเวลามาตรฐานการผลิตที่รองรับกับกระบวนการผลิตที่มีลักษณะยืดหยุ่น เพื่อให้ฝ่ายประเมินสามารถที่จะคำนวณกำลังการผลิตที่ต้องการได้ โดยไม่ใช้การคาดเดาจากประสบการณ์ รูปแบบการเสนอผลการประเมินได้ถูกสร้างขึ้นจากการคำนึงถึงการใช้งานจริงด้วย

ระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่นำเสนอนี้ ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพ ทั้งในด้านความถูกต้องของการประเมินวันส่งมอบและด้านการแก้ไขปัญหาที่เป็นสาเหตุทำให้การรับคำสั่งซื้อถูกดำเนินอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจากผลการทดสอบทำให้เข้าใจได้ว่า ระบบสนับสนุนการรับคำสั่งซื้อที่เป็นผลลัพธ์จากการวิจัยครั้งนี้ควรค่าแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินการจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] อรัญ หาญสืบ. สายการปรับตัวเข้าสู่ AEC สำหรับผู้ประกอบการโรงพิมพ์ไทย. *วารสารการพิมพ์ไทย*, 2556; 96.
- [2] คลพร รักถิ่น. การออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการรับคำสั่งซื้อสำหรับโรงงานผลิตเครื่องนุ่งห่ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [3] Sridharan, S.V. Managing capacity in tightly constrained systems. *International Journal of Production Economics*, 1998; 56–57: 601–610.
- [4] Muntslang, D.R. Profit and risk evaluation in customer driven engineering and manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 1994; 36: 97–107.
- [5] Zijm, W.H.M. Towards intelligent manufacturing planning and control systems. *OR Spectrum*, 2000; 22: 313–345.
- [6] Cheng, T.C.E. and Gupta, M.C. Survey of scheduling research involving due date determination decisions. *European Journal of Operational Research*, 1998; 38: 156–166.
- [7] Enns, S.T. An economic approach to job shop performance analysis, *International Journal of Production Economics*, 1995; 38: 117–131.
- [8] Wester, F.A.W., Wijngaard, J. and Zijm, W.H.M. Order acceptance strategies in a production-to-order environment with setup times and due-dates. *International Journal of Production Research*, 1992; 30 (6): 1313–1326.
- [9] Kate, H.A.T. Towards a better understanding of order acceptance. *International Journal of Production Economics*, 1994; 37: 139–152.
- [10] Lawrence, S.R. Negotiating due-dates between customers and producers. *International Journal of Production Economics*, 1994; 37: 127–138.
- [11] Park, C., Song, J., Kim, J.-G. and Kim, I. Delivery date decision support system for the large scale make-to-order manufacturing companies. *Production Planning & Control*, 1999; 10(10): 585–597.
- [12] Wullink, G., Gademann, A.J.R.M., Hans, E.W. and Harten, A. Scenario-based approach for flexible resource loading under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 2004; 42 (24): 5079–5098.

- [13] Corti, D., Pozzetti, A. and Zorzini, M. A capacity-driven approach to establish reliable due dates in a MTO environment. *International Journal of Production Economics*, 2006; 104: 536–554.
- [14] Zorzini, M., Corti, D., and Pozzetti, A. Due date (DD) quotation and capacity planning in make-to-order companies: Results from an empirical analysis. *International Journal of Production Economics*, 2008; 112: 919-933.
- [15] Ebben, M.J.R., Hans, E.W. and Olde Weghuis, F.M. Workload based order acceptance in job shop environments. *OR Spectrum*, 2005; 27: 107–122.
- [16] Kromker, M., Thoben, K.-D. and Wickner, A. An infrastructure to support concurrent engineering in bid. *Computers in Industry*, 1997; 33: 201–208.
- [17] Jin, G. and Thomson, V. A new framework for MRP systems to be effective in engineered-to-order environments. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2003; 19: 533–541.
- [18] Sawney, R. and Piper, C. Value creation through enriched marketing–operations interfaces: An empirical study in the printed circuit board industry. *Journal of Operations Management*, 2002; 20: 259–272.
- [19] John, St., Hall, C.H. and Jr., E.H. The interdependency between marketing and manufacturing. *Industrial Marketing Management*, 1991; 20: 223–229.
- [20] Crittenden, V.L., Gardiner, L.R. and Stam, A. Reducing conflict between marketing and manufacturing. *Industrial Marketing Management*, 1993; 22: 299–309.
- [21] ศรีญา ปิงกาวิ. การพัฒนาระบบเวลามาตรฐานแบบ MTM-2 สำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานเครื่องหนัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [22] นิสากร มรกตเขียว. การปรับปรุงสายการผลิตแผงประตูภายในรถยนต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.



กำลังรับแรงตามแนวแกนของเสาเหล็กกลวงเอียงขึ้นรูปเย็น

การรอกคอนกรีตภายใต้แรงสลับทิศในแนวตั้ง

Axial Strength of Inclined Concrete-Filled Cold-Formed Steel Tubular Columns under Vertical Cyclic Loading

กฤษณะ เป็งถากาศ* ชยานนท์ หารชัยโย ชินพัฒน์ บัวชาติ และ พุทธิรักษ์ จรัสพันธุ์กุล

Kritsana Pengtakad*, Chayanon Hasapinyo, Chinapat Buachart and Bhuddarak Charatpangoon

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

*E-mail: kritsana.tn23@gmail.com

Tel: 053-944156, Fax: 053-892376

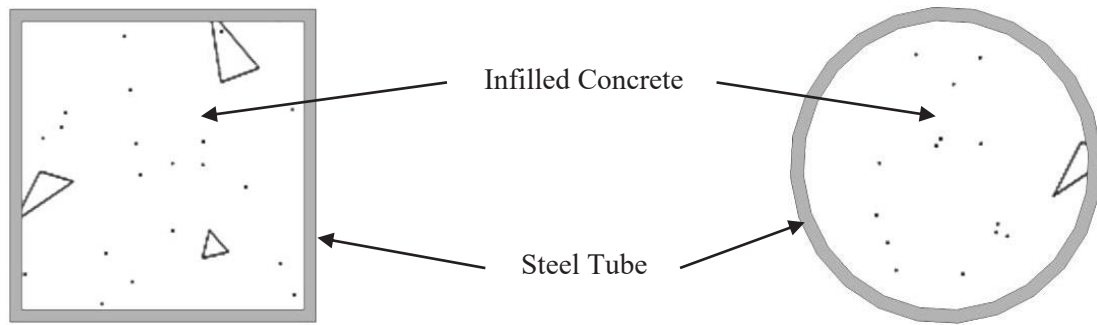
บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงสลับทิศในแนวตั้งของเสาเหล็กกลวงเอียงกรอกคอนกรีต (ซึ่งในที่นี้เรียกว่า เสา CFST) โดยตัวอย่างเสาทดสอบมีขนาด 75×75 มม. ยาว 500 มม. รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่างทำการทดสอบภายใต้การรับแรงสลับทิศในแนวตั้ง ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความหนาของเสาเหล็กกลวง (1.8 และ 3.0 มม.) การกรอกคอนกรีต (ไม่กรอกคอนกรีต และกรอกคอนกรีตกำลังอัด 20 MPa) และมุมเอียงของเสา (0° , 4° และ 9°) จากการทดสอบพบว่า เสาตัวอย่างเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยคอนกรีตที่กรอกลงไปทำให้เสาตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ทั้งนี้เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดึงของเสาพบว่า การกรอกคอนกรีตไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด โดยกำลังรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับกำลังดึงครากของเสาเหล็กกลวงเท่านั้น และยังพบว่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและกำลังรับแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบกับการคำนวณออกแบบตามมาตรฐาน AISC (2005) พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the vertical cyclic loading behavior of the inclined concrete-filled steel tubular columns (hereinafter, CFST columns). A total 12 specimens were tested. All test specimens are 75×75 mm square tube section and 500 mm length. The main parameters varied in the test are thickness of steel tube (1.8 and 3.0 mm), filled concrete (without concrete and 20 MPa concrete) and inclined angle (0° , 4° and 9°). The experimental results showed that all specimens were failed due to local buckling. The results also exhibited that in CFST columns, the infilled concrete provided a greater compressive strength to the steel tube section up to its ultimate strength. The compressive strength decreased slightly with the increasing of the inclined angle. Besides, it could be seen that the tensile strength was not affected by infilled concrete, the tensile strength only relied on the yield strength of steel tubular columns. In addition, comparison of the compressive and the tensile strength, between the tested results and those from AISC (2005) standard were presented with good agreement.

Keywords: Concrete-filled steel tube, Inclined column, Cyclic loading



รูปที่ 1 เสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต (หน้าตัดสี่เหลี่ยมและวงกลม)

2. กำลังรับแรงของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต

2.1 กำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต

จากข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ AISC ปี ค.ศ. 2005 [10] ซึ่งมาตรฐานการออกแบบนี้ไม่คิดผลของมุมเอียงของเสา โดยกำหนดขนาดของเนื้อที่หน้าตัดเหล็กโครงสร้าง (A_s) ต้องไม่น้อยกว่า 1% ของเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g) อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t) ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมต้องไม่เกิน $2.26\sqrt{E/F_y}$ กำลังครากของเหล็ก $F_y \leq 525$ MPa กำลังของคอนกรีต $21 \leq f'_c \leq 70$ MPa สำหรับคอนกรีตธรรมดา และ $21 \leq f'_c \leq 42$ MPa สำหรับคอนกรีตมวลเบา อัตราส่วนการออกแบบกำลังของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีตคล้ายกับกำลังของเสาเหล็กธรรมดา เพียงแต่ออกแบบโดยพิจารณากำลังของวัสดุเหล็กและคอนกรีตร่วมกัน โดยกำลังรับแรงอัดของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีตสำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม สามารถคำนวณได้ดังนี้

กรณีที่ $P_e < 0.44P_0$

$$P_n = 0.877P_e \quad (1)$$

กรณีที่ $P_e \geq 0.44P_0$

$$P_n = P_0 \left[0.658^{\left(\frac{P_0}{P_e} \right)} \right] \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } P_0 = A_s F_y + 0.85 A_c f'_c \quad (3)$$

$$P_e = \pi^2 (EI_{eff}) / (KL)^2 \quad (4)$$

$$EI_{eff} = E_s I_s + C_1 E_c I_c \quad (5)$$

$$C_1 = 0.1 + 2 \left(\frac{A_s}{A_c + A_s} \right) \leq 0.3 \quad (6)$$

โดยที่ A_s และ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเหล็กกลวงและคอนกรีต F_y และ f'_c คือ กำลังครากของเสาเหล็กกลวง และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต EI_{eff} คือ สติเฟนสประสิทธิภาพของหน้าตัดประกอบ E_s และ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กและคอนกรีต I_s และ I_c คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเหล็กและคอนกรีต K คือ ตัวคูณความยาวประสิทธิภาพ L คือ ความยาวที่ปราศจากการยึดรั้งด้านข้าง

2.2 กำลังรับแรงดึงของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต

จากข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ AISC ปี ค.ศ. 2005 ได้ระบุให้กำลังรับแรงดึงของเสาเหล็กกลวงกรอกคอนกรีต สามารถคำนวณได้จาก

$$P_n = A_s F_y \quad (7)$$

3. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบเป็นเสาสั้นทั้งหมด 12 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 1 ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่

- กาลังอัดคอนกรท : ไมกรอกคอนกรท และ 20 MPa
- ความหนาเสาเหลกกลวง : 1.8 และ 3.0 มม.
- มุมเอียงของเสา : 0° 4° และ 9°
ในการใชสัณณคณแสดงดวอยางทดสอบ
- สัณณคณดวที่ 1 “T” แสดงความหนาหน้าดัดเสาเหลกกลวงของดวอยางทดสอบ

- สัณณคณดวที่ 2 “C” แสดงกาลังอัดคอนกรทที่กรอกกลงไปในเหลกกลวง
- สัณณคณดวที่ 3 “A” แสดงมุมเอียงของดวอยางทดสอบ

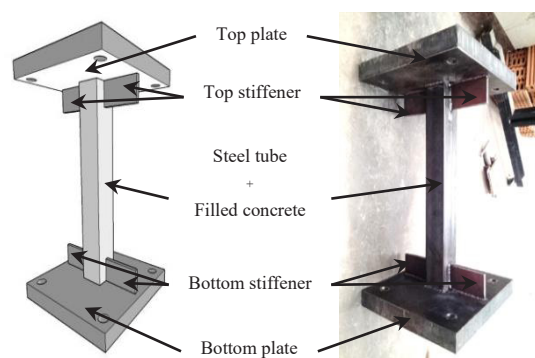
เสน T1.8C20A4 หมายถึง ดวอยางนนี้มีความหนาของหน้าดัดเหลก 1.8 มม. กรอกคอนกรทกาลังอัด 20 MPa และมุมเอียงของดวอยางเทากับ 4°

ตารางที่ 1 ดวอยางทดสอบ

No.	Specimen	Dimension $b \times b \times t$ (mm.)	θ (°)	Concrete strength (MPa)
1	T1.8C0A0	75 × 75 × 1.8	0	Empty
2	T1.8C0A4	75 × 75 × 1.8	4	Empty
3	T1.8C0A9	75 × 75 × 1.8	9	Empty
4	T1.8C20A0	75 × 75 × 1.8	0	23
5	T1.8C20A4	75 × 75 × 1.8	4	23
6	T1.8C20A9	75 × 75 × 1.8	9	23
7	T3.0C0A0	75 × 75 × 3.0	0	Empty
8	T3.0C0A4	75 × 75 × 3.0	4	Empty
9	T3.0C0A9	75 × 75 × 3.0	9	Empty
10	T3.0C20A0	75 × 75 × 3.0	0	23
11	T3.0C20A4	75 × 75 × 3.0	4	23
12	T3.0C20A9	75 × 75 × 3.0	9	23

3.2 การเตรยมดวอยางทดสอบ

ในการทดสอบจะกรอกคอนกรทลงไปในเหลกกลวงโดยทำการจเขเข้าเพื่อปกองกันไมใหเกิดโพรงภายในและการแยกตัวของคอนกรทซึ่งมีผลตอพฤติกรรมของเสา พรอมกับเก็บกอนดวอยางคอนกรทเพื่อหากาลังอัดเหลกของคอนกรท หลังจากนั้นทำการบมจนคอนกรทมีอายุครบ 28 วัน แลวนำดวอยางมาเชื่อมติดกับแผนเหลกฐาน (plate) และแผนเสริมความแรง (stiffener) บริเวณปลายบนและปลายลาของดวอยางทดสอบ แสดงดงรูปที่ 2 หลังจากนั้นทำการติดตั้งดวอยางทดสอบบนเครองทดสอบ Universal ขนาด 200 ตัน โดยทำการยึดรั้งทั้งปลายบนและปลายลาของดวอยางทดสอบใหมีลักษณะเป็นการยึดแนน (fixed) ทำการติดตั้งแถบวัดความเครียด (strain gauge) และเกววัดระยะ (transducer) ทั้ง 3 ทิศทางไดแก ระยะเคลื่อนในแนวราบ 2 ทิศทาง และระยะเคลื่อนในแนวตั้ง แสดงดงรูปที่ 3



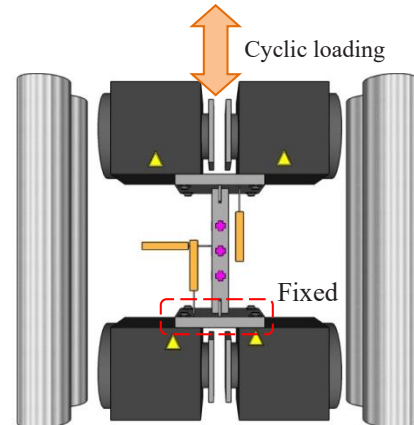
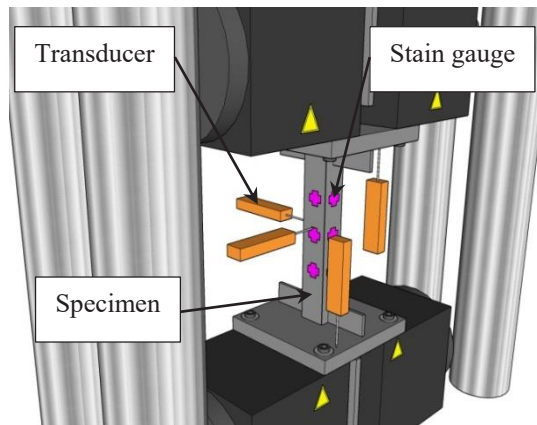
รูปที่ 2 ดวอยางทดสอบเสา CFST

3.3 รูปแบบของเสาเอียง

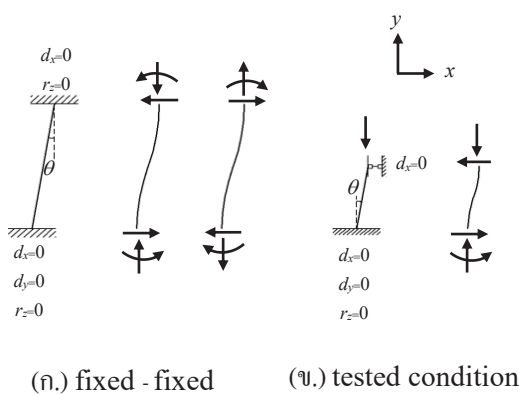
สำหรับเสาเอียงในโครงสร้างที่ไม่มีการเซ (non-sway structure) ไดทำการระบุเงื่อนไขการยึดรั้งแสดงดงรูปที่ 4 จะสังเกตไดว่ามีทั้งแรงดัด (bending) และแรงเฉือน (shearing) ทั้งที่เกิดขึ้นจากแรงอัดและแรงดึงโดยที่ความยาวครึ่งหนึ่งของเสาดงรูปที่ 4(ข) จะใชเป็นรูปแบบ

ของเสา CFST ที่ใช้ในการทดสอบนี้ โดยเงื่อนไขการยึดรั้งที่ปลายล่างของเสาตัวอย่างจะเป็นแบบ fixed ที่ปลาย

บนจะให้แรงกระทำในแนวดิ่ง (แกน y) และจำกัดการเคลื่อนที่ตามแนวราบ (แกน x) [7]



รูปที่ 3 รูปแบบการทดสอบและติดตั้งเครื่องมือวัด



รูปที่ 4 รูปแบบของเสาเอียง

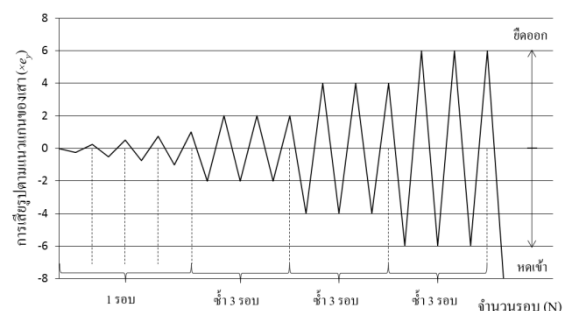
3.4 การทดสอบโดยการให้แรงสลับทิศ

ในการทดสอบจะให้แรงกระทำตามแนวแกน โดยให้แรงอัดสลับกับการให้แรงดึง (cyclic loading) ซึ่งจะทำให้เกิดการเสียรูปแบบหดเข้าและยืดออก โดยการทดสอบจะกำหนดระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่งเป็นอัตราส่วนของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก (e_y) แสดงดังสมการที่ 8

$$e_y = \frac{F_y}{E} \times L \quad (8)$$

โดยที่ e_y คือ ระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก (มม.) F_y คือ หน่วยแรงดึงคราก (MPa) E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเหล็กกลวง (MPa) และ L คือ ความยาวตัวอย่างทดสอบ (มม.)

การควบคุมการเคลื่อนที่ในการทดสอบนั้น จะให้การเคลื่อนที่ที่ 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 เท่าของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก e_y กระทำ 1 รอบ และเพิ่มเป็น 3 รอบที่ 2, 4, 6, 8 เท่าของระยะการเคลื่อนที่ทั้งหมดเมื่อเหล็กคราก e_y ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการวิบัติ แสดงดังรูปที่ 5

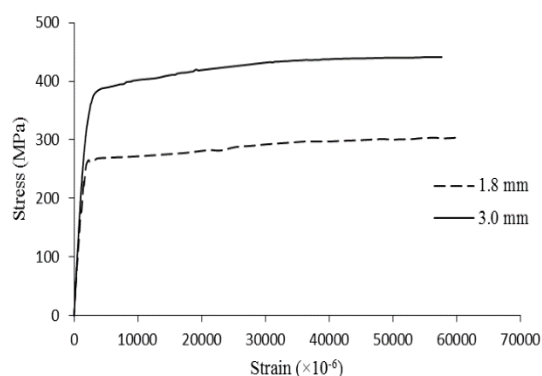


รูปที่ 5 รูปแบบการให้แรงตามระยะการยืดหด

4. ผลการทดสอบ

4.1 กำลังวัสดุ

ทดสอบแรงดึงของเหล็กหนา 1.8 และ 3.0 มม. ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.107-2533 [11] ได้กำลังกำลังดึงคราก (yield strength) เท่ากับ 264 และ 382 MPa ตามลำดับ และกำลังดึงประลัย (ultimate strength) เท่ากับ 305 และ 441 MPa ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6 และกำลังอัดคอนกรีตซึ่งออกแบบไว้ที่ 20 MPa โดยกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 23 MPa

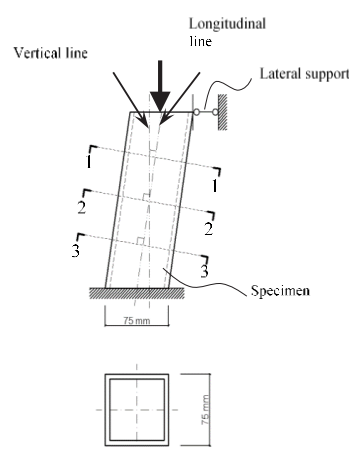


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

4.2 รูปแบบการวิบัติ

จากผลการทดสอบเสา CFST ที่ทดสอบโดยการให้ระยะยึด-หัดตามแนวแกน พบว่า เสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต จะรับน้ำหนักจนเกิดทั้งการครากของเสาเหล็กกลวง และเกิดการโก่งเดาะ ที่มีลักษณะตั้งฉากกับทิศทางตามแนวยาว (longitudinal direction) โดยหน้าตัดเสาตัวอย่างถูกกดอัดจนเสียรูป โดยตัวอย่างทั้งหมดจะเกิดการวิบัติที่บริเวณปลายบนหรือปลายล่าง ห่างจากแผ่นเสริมความแข็งแรงเล็กน้อย เนื่องจากบริเวณนี้มีหน่วยแรงสูงกว่าบริเวณอื่น โดยที่ตัวอย่างที่เป็นเหล็กกลวงจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่แบบเข้าด้านในและออกด้านนอก ส่วนตัวอย่างที่กรอกคอนกรีตจะเกิดการโก่งเดาะแบบออกด้านนอกอย่างเดียว เนื่องจากเกิดการเบ่งตัวของคอนกรีตด้านในเมื่อรับแรงกดอัด ซึ่งรูปแบบการวิบัติจะแสดงดังรูปที่ 8

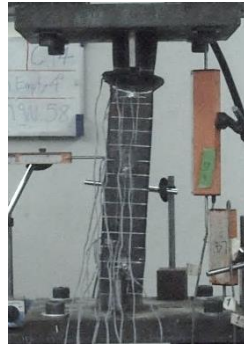
โดยพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับเส้นตามแนวยาว (longitudinal line) จะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง [7] ซึ่งจะใช้ในการคำนวณตามมาตรฐาน AISC (2005) (สมการที่ (3) (6) และ (7)) เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ เช่นตัวอย่างรูปตัดที่ 1-1 ในรูปที่ 7 ตัวอย่างที่เป็นเสาตรง เสาที่เอียง 4° และเสาที่เอียง 9° มีพื้นที่หน้าตัด 75×75 มม. 75×74.8 มม. และ 75×74 มม. ตามลำดับ โดยพบว่ามุมเอียงมีผลต่อพื้นที่หน้าตัดที่ใช้ในการรับแรงของเสา ซึ่งมีผลทำให้กำลังรับแรงของเสาลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง



รูปที่ 7 แบบจำลองของเสา CFST



(ก) T1.8C0A0



(ข) T1.8C0A4



(ค) T1.8C0A9



(ง) T1.8C20A0



(จ) T1.8C20A4



(ฉ) T1.8C20A9



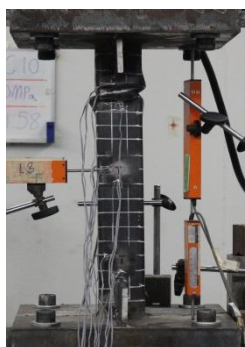
(ช) T3.0C0A0



(ซ) T3.0C0A4



(ฌ) T3.0C0A9



(ญ) T3.0C20A0



(ฎ) T3.0C20A4



(ฏ) T3.0C20A9

รูปที่ 8 รูปแบบของการวิบัติ

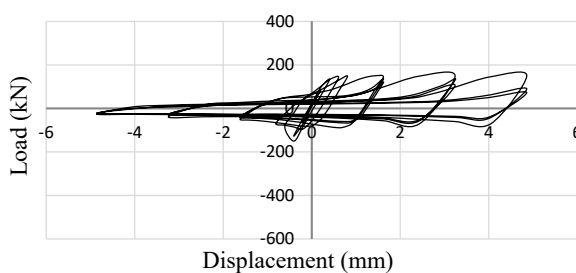
4.3 พฤติกรรมการรับแรงสลับทิศ และเส้นโค้ง Envelope

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงสลับทิศกับการเสียรูปของเสาตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 9 จะสังเกตได้ว่า ในช่วงแรกเมื่อเสาตัวอย่างยังไม่เกิดการโก่งเดาะนั้น หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเสาเหล็กกลวงยังไม่เกินกว่าหน่วยแรงที่ขีดจำกัดยืดหยุ่น (proportional limit) และหน่วยแรงที่เกิดในคอนกรีตต่ำกว่าหน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต พฤติกรรมจะเป็นแบบยืดหยุ่น เสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีตจะมีกำลังรับแรงอัดจะน้อยกว่าตัวอย่างเสาที่กรอกคอนกรีต เนื่องจากเสาเหล็กกลวงจะต้องรับน้ำหนักโดยที่ไม่มีคอนกรีตมาช่วยรับ จึงทำให้เสาตัวอย่างรับน้ำหนักจนเกิดการครากของเสาเหล็กกลวง จากนั้นกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างจะลดลงเรื่อย ๆ ในส่วนของกำลังรับแรงดึงของเสาตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นจนถึงกำลังรับแรงดึงครากของเสาเหล็กกลวง ซึ่งในส่วนนี้เสาเหล็กกลวงจะเป็นตัวรับแรงซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาของเสาเหล็ก

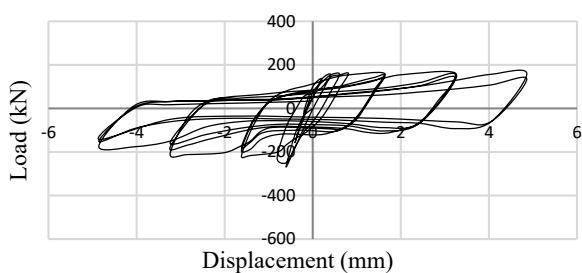
ในส่วนเสาตัวอย่างที่กรอกคอนกรีต จะสังเกตเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างจะสูงกว่าเสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตจะช่วยเสาเหล็กกลวงในการรับแรงอัด ซึ่งคอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดที่ดี

และยังช่วยชะลอหรือลดความรุนแรงของการโก่งเดาะของเสาเหล็กกลวงได้ โดยเสาตัวอย่างจะมีกำลังรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีกำลังถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต หรืออาจจะสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากผลของการโอบรัดของเสาเหล็กกลวง โดยเสาเหล็กกลวงจะจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีตเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงกดอัด และช่วยชะลอการแตกออกของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะต้องขึ้นอยู่กับความหนาของเสาเหล็กกลวงด้วย แสดงดังรูปที่ 10 (ก, ง) ในส่วนของกำลังรับแรงดึงจะเหมือนกับเสาตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงดึงครากของเสาเหล็กกลวง

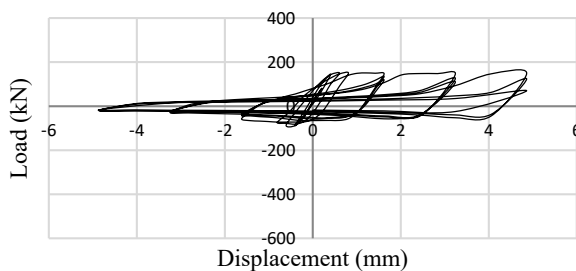
โดยในส่วนของเสาตัวอย่างที่เอียง จะสังเกตได้ว่าเสาตัวอย่างที่กรอกและไม่กรอกคอนกรีต จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าเสาตรงเล็กน้อย โดยเสาที่มีความเอียงมากขึ้นก็จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยลง เนื่องจากพื้นที่ที่หน้าตัดในการรับแรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง สำหรับกำลังรับแรงดึงในเสาตัวอย่าง การเพิ่มขึ้นของมุมเอียงไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญแต่อย่างใด ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก, ข)



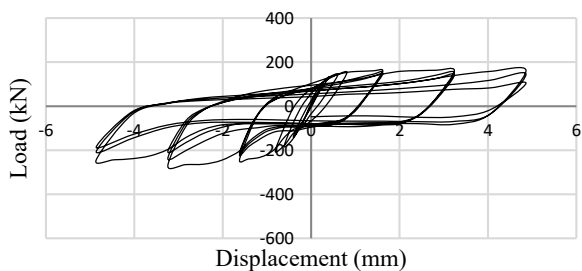
(ก) T1.8C0A0



(ข) T1.8C20A4

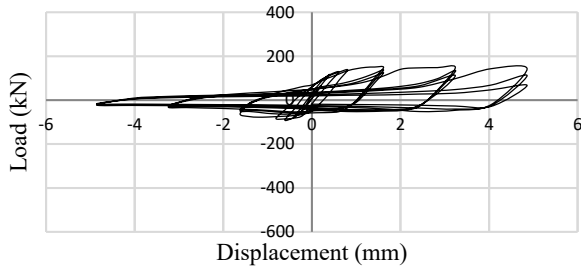


(ค) T1.8C0A4

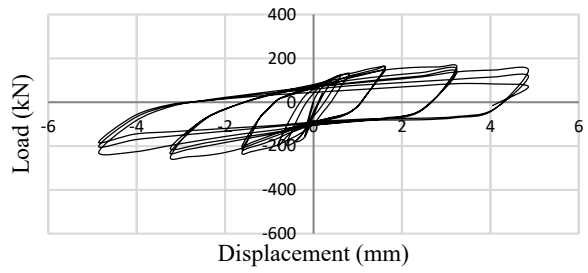


(ง) T1.8C20A0

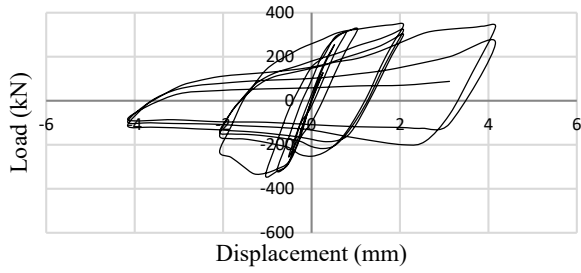
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงสลับทิศกับการเสียรูปของเสา CFST



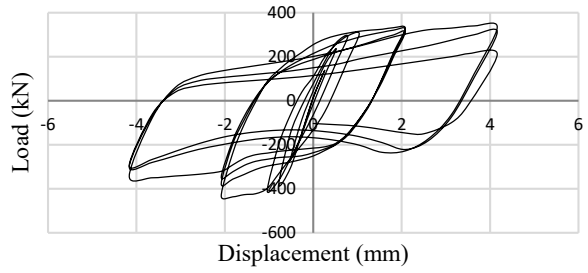
(จ) T1.8C0A9



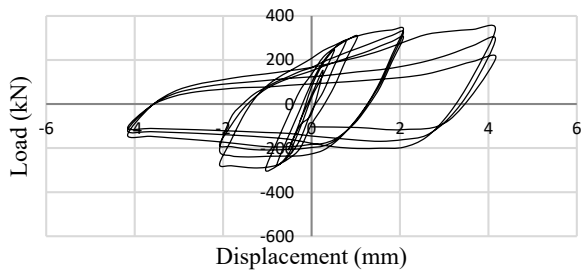
(ข) T1.8C20A9



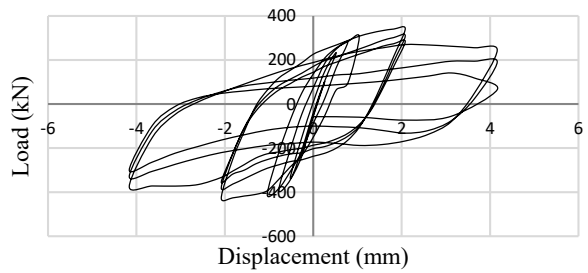
(ง) T3.0C0A0



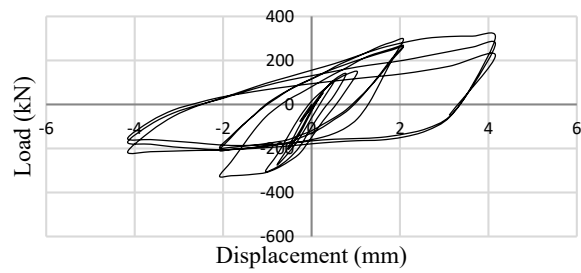
(ฉ) T3.0C20A0



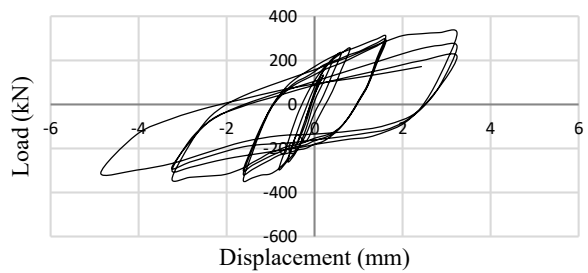
(ค) T3.0C0A4



(ญ) T3.0C20A4

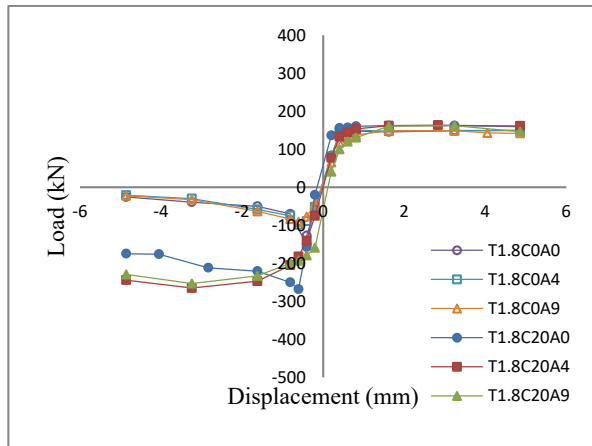


(ฉ) T3.0C0A9

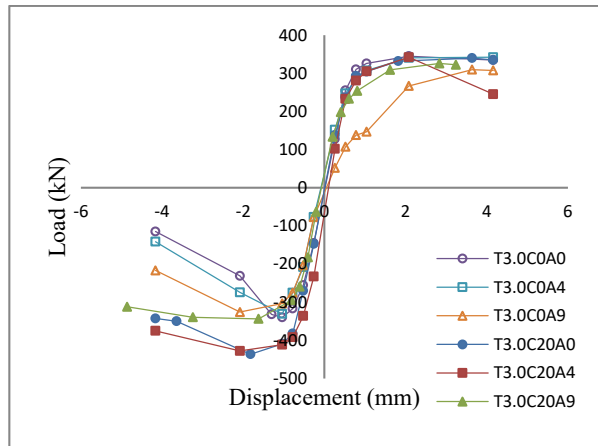


(ฎ) T3.0C20A9

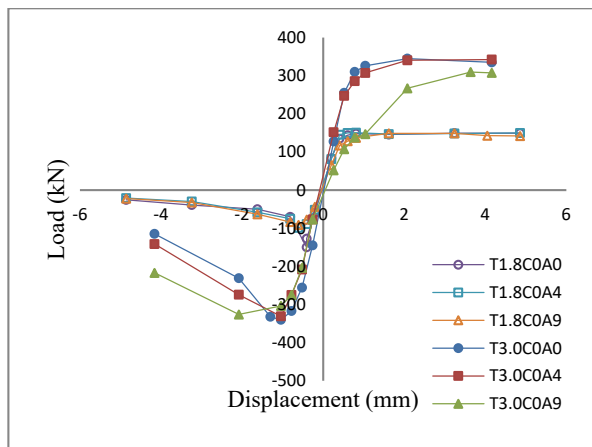
รูปที่ 9 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงสลับทิศกับการเสียรูปของเสา CFST



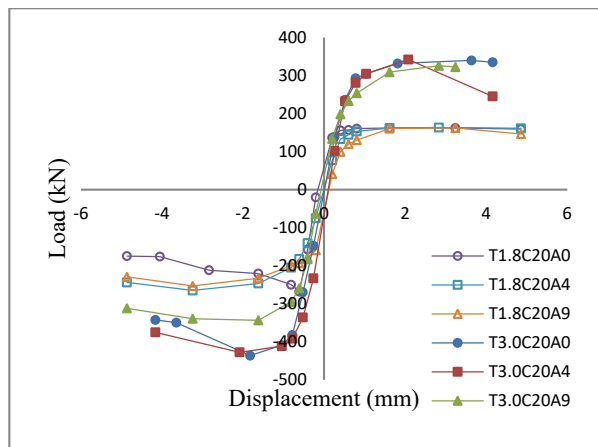
(ก) ตัวอย่างความหนา 1.8 มม. ที่กรอกและไม่กรอก



(ข) ตัวอย่างความหนา 3.0 มม. ที่กรอกและไม่กรอก



(ค) ตัวอย่างความหนา 1.8 และ 3.0 มม. ที่ไม่กรอก



(ง) ตัวอย่างความหนา 1.8 และ 3.0 มม. ที่กรอกคอนกรีต

รูปที่ 10 เส้นโค้ง Envelope

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากมาตรฐานการออกแบบ AISC (2005)

No.	Specimen	Compressive Strength			Tensile Strength		
		Test (kN)	AISC (2005) (kN)	AISC/Test (kN)	Test (kN)	AISC (2005) (kN)	AISC/Test (kN)
1	T1.8C0A0	124	138	1.110	149	140	0.937
2	T1.8C0A4	99	138	1.391	151	140	0.929
3	T1.8C0A9	91	138	1.512	149	140	0.939
4	T1.8C20A0	263	232	0.881	162	140	0.861
5	T1.8C20A4	260	232	0.892	163	140	0.856
6	T1.8C20A9	253	232	0.916	162	140	0.862
7	T3.0C0A0	340	330	0.969	340	337	0.992
8	T3.0C0A4	330	329	0.998	342	337	0.986
9	T3.0C0A9	325	329	1.013	309	337	1.092
10	T3.0C20A0	428	417	0.975	340	337	0.992
11	T3.0C20A4	427	417	0.977	342	337	0.986
12	T3.0C20A9	343	417	1.216	326	337	1.035
Mean				0.988	0.962		
Standard deviation				0.193	0.070		

5. บทสรุป

1) ความหนาของเสาเหล็กกลวงมีผลทำให้มีกำลังรับแรงดึงสูงขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งเสาเหล็กกลวงหนา 3.0 มม. จะสามารถรับแรงดึงได้สูงกว่าเสาเหล็กกลวงที่หนา 1.8 มม. โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังคราก (yield stress) ของเสาเหล็กกลวง

2) การกรอกคอนกรีตข้างในเสาเหล็กกลวง ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่กรอกคอนกรีต ซึ่งการกรอกคอนกรีตจะช่วยชะลอการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาเหล็กกลวงได้ โดยกำลังรับแรงอัดจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตที่กรอกลงไป ทั้งนี้การกรอกคอนกรีตจะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงดึง

3) มุมเอียงมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างที่เป็นเสาตรง (0°) จะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าตัวอย่างที่เอียง 4° และ 9° ตามลำดับ ทั้งตัวอย่างที่กรอกคอนกรีตและไม่กรอกคอนกรีต เนื่องจากตัวอย่างที่เอียงมีขนาดหน้าตัดรับแรงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียง

- ตัวอย่างเสาเหล็กกลวงหนา 1.8 มม. ที่ไม่กรอกคอนกรีต มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 20 และ 8% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ
- ตัวอย่างเสาเหล็กกลวงหนา 3.0 มม. ที่ไม่กรอกคอนกรีต มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 3 และ

2% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ

- ตัวอย่างเสา CFTS หนา 1.8 มม. มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 1 และ 3% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ
- ตัวอย่างเสา CFTS หนา 3.0 มม. มีกำลังรับแรงอัดลดลงประมาณ 1 และ 20% เมื่อมุมเอียงเพิ่มจาก 0° - 4° และ 4° - 9° ตามลำดับ

4) เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISC (2005) กับผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 2

5) เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการคำนวณตามมาตรฐาน AISC-ASD/LRFD (2005) พบว่าวิธี ASD ให้ค่าที่ปลอดภัย โดยที่วิธี LRFD ส่วนใหญ่ให้ค่าที่ปลอดภัย ยกเว้นตัวอย่างเสา T1.8C0A4 และ T1.8C0A9 ที่ได้ค่ามากกว่าการทดสอบ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยจึงขอใคร่แสดงความขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนวัสดุ สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ และทุนสนับสนุนงานวิจัยจากศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (R000011338)

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุคนธ์เมธ จิตรมหันตกุล. รอยเลื่อนและแผ่นดินไหว จ.เชียงใหม่, 2557. [ออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.geothai.net>
- [2] Schneider, S.P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*, 1998; 124(10): 1125-38.
- [3] กมลรัตน์ ฤทธิ์รักษา และจักษดา ชำรงวุฒิ. พฤติกรรมทางโครงสร้างของเสาท่อเหล็กหน้าตัดกลมกรอกคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, 8-11 กรกฎาคม, จังหวัดชลบุรี, ประเทศไทย, 2558.
- [4] Liu, D., Gho, W.M. and Yuan, J. Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003; 59: 1499-1515

- [5] Han, L.H. Test on stub columns of concrete-filled RHS section. *Journal of Constructional Steel Research*, 2002; 58 (3): 353-72.
- [6] Lee, S.H., Kim, H.S., Bang, J.S., Won, Y.A. and Choi, S.M. Structural characteristics of welded built-up square concrete filled tubular stub columns associated with concrete strength. *Procedia Engineering*, 2011; 14, 1140-1148.
- [7] จั๊กขดา ชำรงวุฒิ, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. Tubed concrete column square tubed concrete columns and composite column design equations. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา, 2552.
- [8] Han, L.H., Ren, Q.X. and Li, W. Test on inclined, tapered and STS concrete-filled steel tubular (CFST) stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010; 66: 1186-95.
- [9] ณัฐชนก เอื้อตรงจิตต์, ชินพัฒน์ บัวชาติ และชยานนท์ หรรษภักญ์ โณ. เสาเหล็กกลวงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสกรอกคอนกรีตรับแรงสลับทิศในแนวแกน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, 14-16 พฤษภาคม, จังหวัดขอนแก่น, 2557.
- [10] ANSI/ AISC 360-05. Specification for structural steel buildings. Chicago (USA): American Institute of Steel Construction (AISC), An American National Standard, 2005.
- [11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มาตรฐานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวง มอก. 107-2553. กระทรวงอุตสาหกรรมกรุงเทพมหานคร, 2553.



การออกแบบครีบบแบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้งแบบหมุน

ระดับอุตสาหกรรม

Design of 3-segment Flights within an Industrial Rotary Dryer

สุชาดา สิทธิจงสถาพร

Suchada Sitjongsataporn

ศูนย์ออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์และการประมวลสัญญาณ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Centre of Electronic Systems Design and Signal Processing (CESdSP)

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering

Mahanakorn University of Technology, 10530, Thailand

E-mail: ssuchada@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบเพื่อหาขนาดของครีบบสามเหลี่ยมที่เหมาะสมภายในท่ออบแห้งแบบหมุนระดับอุตสาหกรรมสำหรับการอบแห้งแบบโปรยได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการออกแบบจะใช้พื้นฐานตรีโกณมิติและพีชคณิตร่วมกับการตั้งสมมติฐานจากการใช้งานจริงเพื่อให้สัมพันธ์กับขนาดของวัสดุที่นำมาใช้ในการอบแห้งแบบโปรยภายในท่ออบแห้งและระยะโปรยสูงสุดของอนุภาคของแข็งที่ตกจากปลายครีบบขณะท่ออบแห้ง ซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคของแข็งได้สัมผัสกับลมร้อนในระหว่างที่ของแข็งตกลงมา บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบคำนวณครีบบสามเหลี่ยมอย่างง่าย แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของครีบบสามเหลี่ยมที่ได้มีการนำเสนอมาแล้ว โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยการใช้สูตรคำนวณอย่างง่ายสามารถออกแบบได้ใกล้เคียงกับในบทความที่ได้นำเสนอมาแล้ว ผลที่ได้จากการออกแบบนั้นเมื่อนำไปคำนวณเปรียบเทียบกับตัวอย่างของครีบบสามเหลี่ยมที่มีการใช้งานในปัจจุบัน โดยแบ่งตามขนาดของอนุภาคของแข็งชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกัน พบว่า กรณีที่ของแข็งมีขนาดระหว่าง 1-10 มม. นั้นสามารถคำนวณขนาดของครีบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้ง ด้วยวิธีการออกแบบที่นำเสนอ โดยมิเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยสูงสุด เท่ากับ 3.04% ส่วนกรณีที่ของแข็งมีขนาดน้อยกว่า 1 มม. สามารถคำนวณขนาดของครีบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้ง ที่ได้จากวิธีการออกแบบที่นำเสนอ โดยมิเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยสูงสุด เท่ากับ 2.08% ซึ่งทั้งสองกรณีสามารถคำนวณขนาดของครีบบสามเหลี่ยมภายในท่ออบแห้งได้ใกล้เคียงกับขนาดของครีบบสามเหลี่ยมในระดับอุตสาหกรรมที่มีใช้งาน

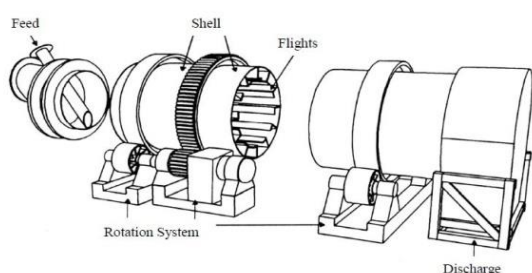
ABSTRACT

This paper presents a design of 3-segment flights within an industrial rotary dryer for the thermal efficiency of showering drying. The proposed assumption of design is based on trigonometry and linear algebra related with the size of materials used in the showering drying of solids within rotary drum dryer and the length of particle fall which the materials are in contact with the hot air

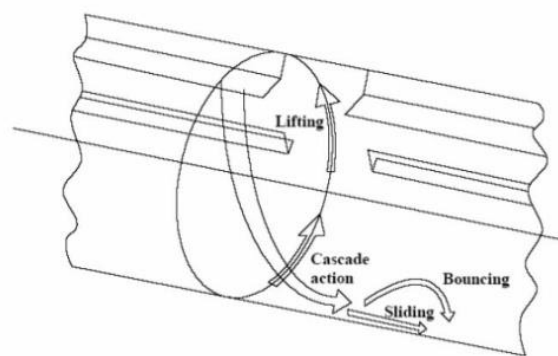
during the fall. The objective is to present the method of calculation in order to easily understand the basic concept of design compared with the previous methods. Some examples of calculation are presented with the different sizes of materials in details. In case of the size of materials between 1 to 10 mm., the calculation for 3-segment flights of rotary dryer by the proposed design shows that the percent error of length of particle fall is of 3.04%. In the similar fashion, when the size of materials lower than 1 mm., then the calculation using the proposed method for 3-segment flights shows that the percent error of length of particle fall is of 2.08%. The results of proposed design show that can be calculated in comparison with the 3-segment flights of the conventional rotary dryer.

1. บทนำ

การอบแห้งแบบท่อหมุนที่ใช้หลักการโปรยของแข็งหรือวัสดุเปื่อยด้วยการตกของแข็งที่อยู่ภายในท่อหมุนแล้วโปรยลงสู่ด้านล่างโดยการให้ลมร้อน (hot air) เคลื่อนที่ผ่านตลอดความยาวท่อ ลมร้อนจะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของแข็งเปื่อยกับลมร้อนและพัดพาให้ของแข็งเคลื่อนที่ผ่านท่อหมุนได้ โครงสร้างหลักของเครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน (Rotary drum dryer) ประกอบด้วยท่อทรงกระบอกหมุนทำมุมเอียงที่เหมาะสมกับแนวระดับเพื่อให้ของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ต่อมาทำการป้อนของแข็งเปื่อยเข้าทางปลายข้างหนึ่งของท่อทรงกระบอกซึ่งของแข็งเมื่อมีการสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลผ่านท่อทรงกระบอกทำให้เกิดการระเหยความชื้นภายในของแข็งเปื่อยได้



รูปที่ 1 ชุดเครื่องอบแห้งแบบท่อหมุน [1]



รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในท่อหมุน [5]

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบท่อหมุนโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของแข็งเปื่อยภายในท่อหมุนและการถ่ายเทความร้อนและมวล (Heat and mass transfer) ซึ่งจัดเป็นสิ่งที่จำเป็นในการทำงานของเครื่องอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

ครีป (Flights) เป็นอุปกรณ์ภายในท่อหมุนที่ใช้ในการตกของแข็ง ในขณะที่ท่อหมุนนั้น ครีปที่ติดอยู่บริเวณผนังท่อหมุนด้านในจะทำการตกของแข็งแล้วยกขึ้นแล้วโปรยลงสู่ด้านล่างตามแรงโน้มถ่วง เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนของของแข็งกับลมร้อนที่ไหลผ่านในท่อหมุน การทำให้แห้งโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ของแข็งในขณะที่โปรยลงมาสัมผัสกับลมร้อน

บทความต่างๆ [2] [3] และ [4] ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยท่อหมุนโดยนำเสนอโมเดลคณิตศาสตร์และการจำลองการทำงานของเกี่ยวกับการอบแห้งของท่อหมุนโดยรวมในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพโดย

ในบทความเหล่านี้จะอ้างอิงจากการใช้งานครีบบนสองเชกเมนต์

บทความ [5] ได้นำเสนอการศึกษาทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) และคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการทำให้แห้ง (drying) ของอนุภาคภายในท่อหมุนระดับอุตสาหกรรมสำหรับเม็ดปุ๋ยขนาดเล็ก (granulated fertilizers) และบทความ [6] ได้นำเสนอการออกแบบครีบบนสามเชกเมนต์ของท่อหมุนโดยใช้มุมระหว่างครีบบนสองเชกเมนต์ติดกันมาใช้ในการออกแบบ ร่วมกับการกำหนดหาระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง นำมาคำนวณโดยใช้เรขาคณิตวิเคราะห์ โดยทำการทดลองกับการทำให้อนุภาคของเม็ดสารดูดความชื้นที่มีขนาดเล็กมาก

วัตถุประสงค์ในการนำเสนอบทความนี้ เพื่อที่จะหาสูตรคำนวณอย่างง่ายในการออกแบบครีบบนสามเชกเมนต์อย่างคร่าวๆที่สามารถนำไปใช้ในกรณีที่มีขนาดของอนุภาคของแข็งที่ต้องการทำให้แห้งนั้นมีหลากหลายขนาด เนื่องจากสมการที่ได้จากบทความ [6] ในการออกแบบครีบบนสามเชกเมนต์นั้นมีความยุ่งยากในการนำมาใช้และทำความเข้าใจในการออกแบบ ผู้เขียนจึงต้องการนำเสนอการออกแบบโดยอ้างอิงจากบทความ [5] และ [6] แต่นำมาปรับใช้เพื่อหาสูตรคำนวณอย่างง่ายโดยใช้ร่วมกับการกำหนดสมมติฐานจากการใช้งานจริง เพื่อให้ผู้สนใจหรือผู้ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมสามารถทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบครีบบนสามเชกเมนต์อย่างคร่าวๆและนำไปปรับใช้เมื่อมีการวางแผนในการปรับปรุงการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบคำนวณครีบบนสามเชกเมนต์อย่างง่าย แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของครีบบนสามเชกเมนต์ที่ได้มีการนำเสนอมาแล้ว โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยการใช้สูตรคำนวณอย่างง่ายสามารถออกแบบได้ใกล้เคียงกับในบทความที่ได้นำเสนอมาแล้ว

บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบขนาดของครีบบนที่ใช้ในการตากหรือเคลื่อนย้ายอนุภาคของแข็งเพื่อให้ของแข็งได้สัมผัสกับลมร้อนได้มากที่สุดเพื่อให้เกิดการทำ

ให้แห้งได้อย่างรวดเร็ว การออกแบบจะใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติและพีชคณิตร่วมกับการตั้งสมมติฐานที่ใช้ในการทำงานให้สัมพันธ์กับขนาดของของแข็งที่ต้องการทำให้แห้ง

2. ลักษณะการเคลื่อนที่ของของแข็งในขณะท่อหมุน

2.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง

ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจะขึ้นอยู่กับ การออกแบบครีบบนท่อหมุนร่วมกับเงื่อนไขในการทำงาน [5] โดยจะเป็นการทำงานร่วมกันอย่างซับซ้อนของอนุภาคของแข็งที่ครีบบนตกขึ้น ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนย้าย (sliding) หมุน (rolling) กระดอน (bouncing) และตกลงมา แล้วกระจายตัวออกเป็น ทอดๆ (spreading cascade) ในขณะที่ผ่านมาลมร้อนแล้วตกลงมาที่ด้านล่างของท่อหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2

2.2 โมเดลการอบแห้งที่เกิดขึ้นในขณะท่อหมุน

แบ่งได้เป็น 2 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้

- แอคทีฟเฟส (Active phase) เป็นช่วงที่อนุภาคของแข็งขณะโปรยลงมาจากครีบบนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมร้อน

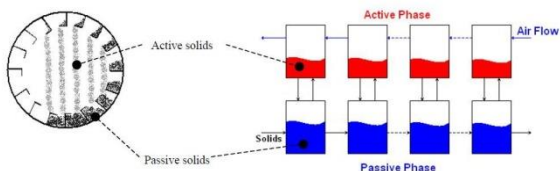
- พาสซีฟเฟส (Passive phase) เป็นช่วงที่ของแข็งกองอยู่ที่ด้านล่างของท่อหมุนรวมทั้งของแข็งที่อยู่ภายในครีบบนขณะตกขึ้น

2.3 ลักษณะของน้ำหนักรับรูดหรือโหลดภายในท่ออบแห้ง

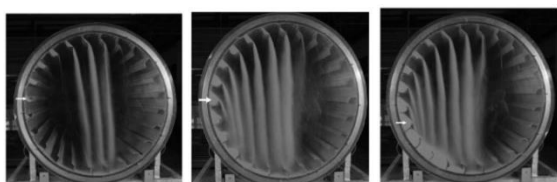
ลักษณะของน้ำหนักรับรูดหรือโหลดที่เกิดขึ้นภายในท่ออบแห้ง [7] แบ่งได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (under loading) ระดับกลาง (intermediate loading) และระดับสูง (over loading) โดยนิยามการทำงานของท่ออบแห้งมีเงื่อนไขตามลักษณะโหลดที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับความจุของครีบบนและประสิทธิภาพการทำงานของท่ออบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยลักษณะโหลดระดับสูงนั้นพบว่ามีการแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำ เพราะ

ปริมาณอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่อยู่ในครีบริบตั้งแต่ตำแหน่ง 6 นาฬิกา ในขณะที่ลักษณะโหลระดับต่ำ พบว่าปริมาณของแข็งในท่อหมุนมีจำนวนน้อย ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการสร้างลมร้อน

ลักษณะโหลระดับกลางเป็นระดับของโหลที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคของแข็งและลมร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่จะอยู่ในขณะโปรยลงมาเพื่อสัมผัสลมร้อนเริ่มตั้งแต่ตำแหน่ง 9 นาฬิกาและโปรยเสร็จสิ้นในตำแหน่ง 12 นาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4 ข)



รูปที่ 3 โมเดลการรอบแห้งขณะท่อหมุน [8]



ก) ระดับต่ำ ข) ระดับกลาง ค) ระดับสูง

รูปที่ 4 ลักษณะของโหลภายในท่ออบแห้งขณะหมุนแบบตามเข็มนาฬิกาโดยลูกศรสีขาวแสดงตำแหน่ง 9 นาฬิกา [7]

2.4 ระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง

ระยะของการโปรยอนุภาคของแข็ง (Y_f) คำนวณได้ [5] ดังนี้

$$Y_f = \frac{Y_0 + \sqrt{R^2 - X_0^2}}{\cos(\omega)} \quad (1)$$

เมื่อ R เป็น รัศมีของท่อหมุน และ ω เป็นมุมยกของท่อหมุนจากพื้น ระยะ Y_0 เป็นระยะจากจุดพิกัดที่จุดศูนย์กลางของแกนท่อหมุนและรัศมี X_0 เป็นรัศมีวงกลมที่กำหนดเมื่อปลายครีบริบอยู่ที่ตำแหน่งสมมติในขณะท่อหมุน

3. สมมติฐานที่ใช้ออกแบบเชกเมนต์ของครีบริบสามเชกเมนต์

บทความนี้นำเสนอการคำนวณเพื่อหาความยาวของเชกเมนต์ทั้งสามของครีบริบ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5, 6 และ 7 ภายใต้สมมติฐานเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังต่อไปนี้

1) สมมติให้ระยะโปรยสูงสุดของของแข็ง (Y_f) มีค่าโดยประมาณ เป็นร้อยละ 85 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน

2) กรณีที่อนุภาคของแข็งที่โหลในท่อหมุนเป็นชนิดเดียวกัน

2.1) อนุภาคของแข็งมีขนาดระหว่าง 1-10 มม,

ก. สมมติให้ความยาวเชกเมนต์ L_3 มีค่าเริ่มต้นที่ 50 มม.

ข. สมมติให้ความยาวของเชกเมนต์ L_2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเป็นจำนวน 3 เท่าของความยาวของเชกเมนต์ L_3

2.2) อนุภาคของแข็งมีขนาดน้อยกว่า 1 มม,

ก. สมมติให้ความยาวเชกเมนต์ L_3 มีค่าเริ่มต้นที่ 15 มม.

ข. สมมติให้ความยาวเชกเมนต์ L_2 เท่ากับความยาวเชกเมนต์ L_3

3) กรณีที่อนุภาคของแข็งที่โหลในท่อหมุนมีหลายขนาดแตกต่างกัน

ก. สมมติให้ความยาวของเชกเมนต์ L_3 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดสูงสุดของอนุภาคของแข็งที่โหลเข้าในท่อหมุน

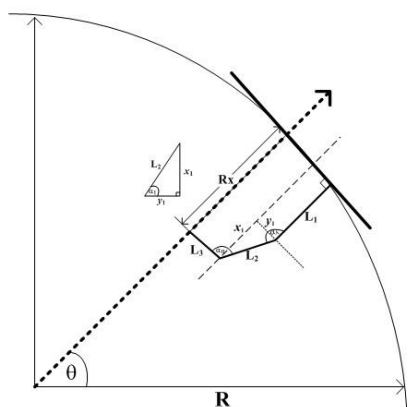
ข. สมมติให้ความยาวของเชกเมนต์ L_2 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเป็นจำนวน 1.5 เท่าของความยาวของเชกเมนต์ L_3

4) สมมติให้ผลรวมของครีบริบทั้งสามเชกเมนต์จะต้องใกล้เคียงหรือโดยประมาณ 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน

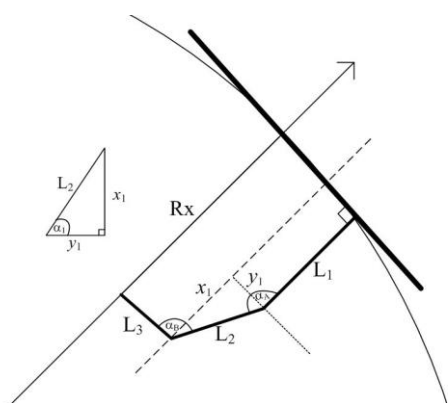
4. การออกแบบครีบบนสามเหลี่ยมที่นำเสนอ

การออกแบบครีบบนสามเหลี่ยมที่นำเสนอการใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติและพีชคณิต โดยลักษณะครีบบนสามเหลี่ยม (Flights with three segments) ได้แก่ L_1 , L_2 และ L_3 คัดตั้งที่ผนังด้านในของท่อหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 โดยมีเงื่อนไขลักษณะของครีบบนสามเหลี่ยมที่มีการโปรยของอนุภาคของแข็งได้ ดังแสดงในรูปที่ 7

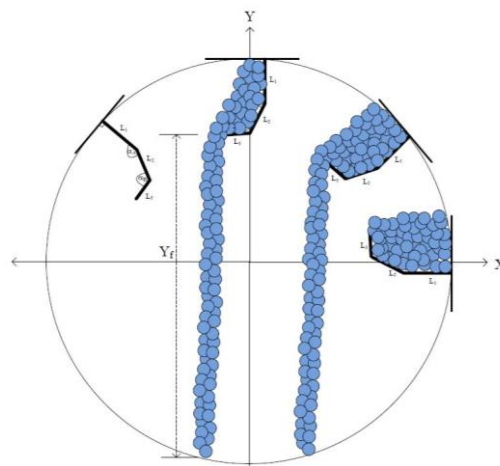
ความยาวของครีบบนสามเหลี่ยม L_1 , L_2 และ L_3 โดยมีมุม α_A เป็นมุมระหว่างเซกเมนต์ L_1 และ L_2 ส่วนมุม α_B เป็นมุมระหว่างเซกเมนต์ L_2 และ L_3 ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยใช้พื้นฐานทางตรีโกณมิติและพีชคณิต



รูปที่ 5 มุมมองการออกแบบครีบบนสามเหลี่ยมที่นำเสนอ



รูปที่ 6 การออกแบบครีบบนสามเหลี่ยมที่นำเสนอ



รูปที่ 7 เงื่อนไขที่ใช้นำเสนอในการออกแบบครีบบนสามเหลี่ยม

เราสามารถกำหนดสมการได้ดังนี้

$$x_1 = L_2 \sin(\alpha_1) \text{ and } y_1 = L_2 \cos(\alpha_1) \quad (2)$$

เมื่อ $\alpha_1 = \alpha_A - 90^\circ$ โดยที่ α_1 เป็นมุมสมมติระหว่าง y_1 และ L_2

4.1 พื้นที่ภายในครีบบนสามเหลี่ยม

จากรูปที่ 6 สมมติให้พื้นที่สูงสุดในครีบบนสามเหลี่ยม (A_F) ได้จากผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู (A_1) และพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า (B_1) ดังนี้

$$A_F = A_1 + B_1 \quad (3)$$

$$A_1 = \frac{1}{2} [L_1 + (L_1 + x_1)] \cdot y_1 \quad (4)$$

$$B_1 = (L_1 + x_1) \cdot L_3 \quad (5)$$

ดังนั้นพื้นที่ A_1 และ B_1 สามารถคำนวณได้จากการแทนสมการที่ (2) ใน สมการที่ (4) และ (5) จะได้

$$\begin{aligned} \therefore A_1 &= \frac{1}{2} [L_1 + (L_1 + \{L_2 \sin(\alpha_1)\})] \\ &\quad \cdot L_2 \cos(\alpha_1) \\ &= L_1 L_2 \cos(\alpha_1) + \frac{1}{2} L_2^2 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) \quad (6) \end{aligned}$$

$$\therefore B_1 = L_3 \cdot (L_1 + L_2 \sin(\alpha_1))$$

$$= L_1 L_3 + L_2 L_3 \sin(\alpha_1) \quad (7)$$

4.2 ระยะโปรยเมื่ออนุภาคของแข็งตกจากคิริบสามเซกเมนต์

จากรูปที่ 7 สมมติให้ระยะโปรยสูงสุดของของแข็งที่ตกจากปลายคิริบในตำแหน่ง 12 นาฬิกา ลงมาที่พื้นด้านล่างขณะท่อหมุน โดยเป็นระยะที่ของแข็งได้สัมผัสกับลมร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

สมมติค่าเหล่านี้ในรูปที่ 5 และ 7 เมื่อมุม $\theta = 90^\circ$

$$X_o = 0, \quad \text{and} \quad Y_o = R_o$$

$$R_o = R - R_x, \quad \text{and} \quad R_x = x_1 + L_1$$

เมื่อ $x_1 = L_2 \sin(\alpha_1)$ จากสมการที่ (2) แล้วแทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (1) ดังนั้นระยะโปรยของแข็งสูงสุดที่สัมพันธ์กับความยาวคิริบสามสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \therefore Y_f &= \frac{R_o + R}{\cos(\omega)} = \frac{\{R - (L_1 + x_1)\} + R}{\cos(\omega)} \\ &= \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)} \end{aligned} \quad (8)$$

4.3 ปริมาตรภายในคิริบสามเซกเมนต์

ปริมาตรภายในคิริบสามเซกเมนต์ (V_F) สามารถหาได้จาก

$$V_F = \frac{N_f}{2} (A_F \cdot L) \quad (9)$$

เมื่อ L เป็นความยาวของท่อหมุน และ N_f เป็นจำนวนคิริบทั้งหมดภายในท่อหมุนตลอดทั้งความยาวของท่อหมุน และเมื่อ $\frac{N_f}{D} \approx 6.56 - 9.84$ [9] โดย D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน

4.4 ปริมาตรภายในคิริบสามเซกเมนต์ที่ใช้บรรทุกอนุภาคของแข็งขณะท่อหมุน

เงื่อนไขที่ใช้เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพขณะท่อหมุน [9] มีดังนี้

1) ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคของแข็งที่ต้องการอบแห้งขณะท่อหมุน จะต้องอยู่ระหว่าง 10-15% ของปริมาตรทั้งหมดของท่อหมุน

2) ปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคของแข็งที่อยู่บนคิริบสามเซกเมนต์ขณะท่อหมุน จะต้องอยู่ระหว่าง 10-15% ของปริมาตรทั้งหมดของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในท่อขณะหมุน

จากเงื่อนไขข้างต้น ดังนั้นปริมาตรภายในคิริบสามเซกเมนต์ขณะท่อหมุนเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (V_{eff}) กำหนดได้จาก

$$V_{eff} = 0.15(0.15V_d) = 0.15(0.15\pi R^2 L) \quad (10)$$

เมื่อ L เป็นความยาวของท่อหมุน V_d เป็นปริมาตรทั้งหมดของท่อหมุน และ R เป็นรัศมีของท่อหมุนโดย มีเงื่อนไขว่า $V_F > 2V_{eff}$

5. ผลการคำนวณของกรณีศึกษา

5.1 กรณีศึกษาที่ 1

ทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของคิริบสามเซกเมนต์ L_1 , L_2 และ L_3 โดยใช้ข้อมูลจากบทความ [5] ดังนี้

ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เป็นเม็ดปุ๋ย = 0.0031 ม. เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน (D) = 3 ม. รัศมี (R) = 1.5 ม. และมุม $\omega = 2.5^\circ$ มุม $\alpha_1 = 55^\circ$ จำนวนคิริบทั้งหมดตลอดความยาวท่อหมุน (N_f) = 16 ความยาวท่อหมุน (L) = 30 ม. โดยแสดงวิธีคำนวณ ดังนี้

1) ในกรณีนี้อนุภาคเป็นของแข็งชนิดเดียวกันที่มีขนาดระหว่าง 0.001-0.010 ม. จากสมมติฐานที่ให้ ความยาวเซกเมนต์ $L_3 = 0.050$ ม. และความยาวเซกเมนต์ L_2 เป็นสามเท่าของ L_3 ดังนั้น $L_2 = 0.150$ ม.

2) คำนวณหา L_1 จากสมมติฐานที่ให้ระยะโปรยสูงสุดของของแข็ง (Y_f) มีค่าโดยประมาณเป็นร้อยละ 85 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน แล้วแทนในสมการที่ (8) เพื่อคำนวณหา L_1 ดังนี้

$$Y_f = 0.85 \cdot D = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)}$$

$$\therefore L_1 = 2R - 0.85D \cos(\omega) - L_2 \sin(\alpha_1) = 0.330$$

ดังนั้น ความยาวเชกเมนต์ $L_1 = 0.330$ ม.

3) คำนวณหาระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง Y_f โดยแทนค่า L_1 และ L_2 ในสมการที่ (8)

$$\therefore Y_f = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)} = 2.55 \text{ ม.}$$

4) คำนวณหาพื้นที่สูงสุดในครึ่งสามเชกเมนต์ (A_f) โดยแทนสมการที่ (6) และ (7) ในสมการที่ (3) จะได้

$$\therefore A_f = L_1 L_3 + L_2 L_3 \sin(\alpha_1) + L_1 L_2 \cos(\alpha_1) + \frac{1}{2} L_2^2 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) = 0.0563 \text{ ม.}^2$$

5) คำนวณหาปริมาตรภายในครึ่งสามเชกเมนต์ V_f จากสมการที่ (9) จะได้

$$\therefore V_f = \frac{N_f}{2} (A_f \cdot L) = 13.50 \text{ ม.}^3.$$

สรุปผลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของครึ่งทั้งสามเชกเมนต์กรณีท่อนุภาคของแข็งเป็นเม็ดปุยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0031 ม. ด้วยการออกแบบที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับขนาดของครึ่งทั้งสามเชกเมนต์ในบทความ [5] ดังแสดงในตารางที่ 1 จะได้ $V_{eff} = 4.77 \text{ ม.}^3$ และ V_f ที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่า สองเท่าของ V_{eff} เป็นจริงตามเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น และเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยที่ได้ (Y_f^{err}) เท่ากับ $\frac{|2.63 - 2.55|}{2.63} \times 100 = 3.04\%$

5.2 กรณีศึกษาที่ 2

ทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของครึ่งสามเชกเมนต์ L_1 , L_2 และ L_3 โดยใช้ข้อมูลจากบทความ [6] ดังนี้

ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เป็นเม็ดสารดูดความชื้น (Adsorbent beads) = 0.0007 ม. เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน (D) = 0.387 ม. รัศมี (R) = 0.1935 ม. มุม $\omega = 2.5^\circ$ มุม $\alpha_1 = 45^\circ$, จำนวนครึ่งทั้งหมดตลอดความยาวท่อหมุน (N_f) = 12 ความยาวท่อหมุน (L) = 1.21 ม. โดยแสดงวิธีคำนวณ ดังนี้

1) ในกรณีท่อนุภาคเป็นของแข็งชนิดเดียวกันที่มีขนาดน้อยกว่า 0.001 ม. จากสมมติฐานที่ให้ความยาวเชกเมนต์ $L_3 = 0.015$ ม. และความยาวเชกเมนต์ L_2 เท่ากับ L_3 ดังนั้น $L_2 = 0.015$ ม.

2) คำนวณหา L_1 จากสมมติฐานที่ให้ระยะโปรยสูงสุดของของแข็ง (Y_f) มีค่าโดยประมาณ เป็นร้อยละ 85 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อหมุน แล้วแทนในสมการที่ (8) เพื่อคำนวณหา L_1 ดังนี้

$$Y_f = 0.85 \cdot D = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)}$$

$$\therefore L_1 = 2R - 0.85D \cos \omega - L_2 \sin(\alpha_1) = 0.048 \text{ ม.}$$

ดังนั้น ความยาวเชกเมนต์ $L_1 = 0.048$ ม.

3) คำนวณหาระยะโปรยของอนุภาคของแข็ง Y_f โดยแทนค่า L_1 และ L_2 ในสมการที่ (8)

$$\therefore Y_f = \frac{2R - L_1 - L_2 \sin(\alpha_1)}{\cos(\omega)} = 0.3290 \text{ ม.}$$

4) คำนวณหาพื้นที่สูงสุดในครึ่งสามเชกเมนต์ (A_f) โดยแทนสมการที่ (6) และ (7) ในสมการที่ (3) จะได้

$$\therefore A_f = L_1 L_3 + L_2 L_3 \sin(\alpha_1) + L_1 L_2 \cos(\alpha_1) + \frac{1}{2} L_2^2 \sin(\alpha_1) \cos(\alpha_1) = 0.00144 \text{ ม.}^2$$

5) คำนวณหาปริมาตรภายในครึ่งสามเชกเมนต์ V_f จากสมการที่ (9) จะได้

$$\therefore V_f = \frac{N_f}{2} (A_f \cdot L) = 0.01045 \text{ ม.}^3.$$

สรุปผลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของครึ่งทั้งสามเชกเมนต์ในกรณีท่อนุภาคของแข็งเป็นเม็ดสารดูดความชื้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0007 ม. เปรียบเทียบกับการออกแบบที่ได้นำเสนอกับขนาดของครึ่งทั้งสามเชกเมนต์ในบทความ [6] เมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กมากและท่อหมุนอบแห้งมีขนาดเล็กผลที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2 จะได้ $V_{eff} = 0.0032 \text{ ม.}^3$ และ V_f ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าสองเท่าของ V_{eff} เป็นจริงตามเงื่อนไขที่

กำหนดข้างต้นและ เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยที่ได้ (Y_f^{err}) เท่ากับ $\frac{|0.336-0.329|}{0.336} \times 100 = 2.08\%$

ตารางที่ 1 ผลที่ได้จากการออกแบบเปรียบเทียบกับข้อมูลจากบทความ [5] โดยขนาดอนุภาค = 0.0031 ม. และ $D=3$ ม., $\omega = 2.5^\circ$, $N_f=16$, $L=30$ ม.

รายละเอียด	บทความ [2]	จากการออกแบบ	รายละเอียด	บทความ [2]	จากการออกแบบ
L_1 (m)	0.220	0.330	α_A / α_1	$145^\circ/55^\circ$	$145^\circ/55^\circ$
L_2 (m)	0.190	0.150	α_B / α_2	$125^\circ/35^\circ$	$125^\circ/35^\circ$
L_3 (m)	0.050	0.050	A_F (m ²)	0.0512	0.0563
Y_f (m)	2.63	2.55	V_F (m ³)	12.30	13.50

ตารางที่ 2 ผลที่ได้จากการออกแบบเปรียบเทียบกับข้อมูลจากบทความ [6] โดยขนาดอนุภาค = 0.7 มม. และ $D = 0.387$ ม. และ $\omega = 2.5^\circ$, $N_f = 12$, $L = 1.21$ ม.

รายละเอียด	บทความ [6]	จากการออกแบบ	รายละเอียด	บทความ [6]	จากการออกแบบ
L_1 (m)	0.041	0.048	α_A / α_1	$135^\circ/45^\circ$	$135^\circ/45^\circ$
L_2 (m)	0.015	0.015	α_B / α_2	$135^\circ/45^\circ$	$135^\circ/45^\circ$
L_3 (m)	0.015	0.015	A_F (m ²)	0.00126	0.00144
Y_f (m)	0.336	0.329	V_F (m ³)	0.00915	0.01045

6. สรุปผล

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบครีบสามเชกเมนต์สำหรับท่อหมุนอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้พื้นฐานตรีโกณและสมมติฐานที่สัมพันธ์กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทำงาน โดยมีระยะโปรยสูงสุดของอนุภาคของแข็งที่ตกจากปลายครีบในตำแหน่ง 12 นาฬิกาของพื้นที่ด้านล่างของท่อหมุน ซึ่งเป็นระยะที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบและการคำนวณครีบสามเชกเมนต์อย่างง่าย แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับขนาดของครีบสามเชกเมนต์ที่ได้มีการนำเสนอมาแล้ว โดยวิธีการที่นำเสนอด้วยการใช้สูตรคำนวณอย่างง่ายนำมาใช้คำนวณด้วยข้อมูลจากบทความที่ [5] และ [6] ดังแสดงผล

ในตารางที่ 1 และ 2 การคำนวณเมื่ออนุภาคของแข็งมีขนาดที่แตกต่างกัน

โดยกรณีศึกษาที่ 1 พบว่า กรณีที่ของแข็งมีขนาดระหว่าง 1-10 มม. สามารถคำนวณขนาดของครีบสามเชกเมนต์ภายในท่อหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ม. ด้วยวิธีการออกแบบที่นำเสนอ ดังนี้ 0.330 ม. 0.150 ม. และ 0.05 ม. โดยมีระยะโปรยสูงสุดเท่ากับ 2.55 ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของครีบสามเชกเมนต์ในท่อหมุนระดับอุตสาหกรรมที่มีใช้งานในปัจจุบัน ซึ่งมีขนาด 0.220 ม. 0.190 ม. และ 0.05 ม. โดยมีระยะโปรยสูงสุดเท่ากับ 2.63 ม. ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยที่ได้ (Y_f^{err}) เท่ากับ 3.04%

กรณีศึกษาที่ 2 พบว่า กรณีที่ของแข็งมีขนาดน้อยกว่า 1 มม. สามารถคำนวณขนาดของครีบสามเชกเมนต์ภายในท่อหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.387 ม. ที่ได้จากรีออกแบบที่นำเสนอ ดังนี้ 0.048 ม. 0.015 ม. และ 0.015 ม. โดยมีระยะโปรยสูงสุดเท่ากับ 0.329 ม. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของครีบสามเชกเมนต์ในท่อหมุนระดับอุตสาหกรรมที่มีใช้งาน ซึ่งมีขนาด 0.041 ม. 0.015 ม. และ 0.015 ม. โดยมีระยะโปรยสูงสุดเท่ากับ 0.336 ม. ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดของระยะโปรยที่ได้ (Y_f^{err}) เท่ากับ 2.08%

สรุปได้ว่าครีบสามเชกเมนต์ภายในท่อหมุนที่ออกแบบสามารถออกแบบได้ใกล้เคียงกับครีบสามเชกเมนต์ในบทความที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยการใช้การคำนวณอย่างง่ายและผลที่ได้จากการออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีใช้งานจริง พบว่า ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Silva, M.G., Lira, T.S., Arruda, E.B., Murata V.V. and Barrozo, M.A.S. Modelling of fertilizer drying in a rotar dryer: Parametric sensitivity analysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2012; 29(02): 359-369.

- [2] Abbasfard, H., Rafsanjani, H.H, Ghader, S. and Ghanbari, M. Mathematical modeling and simulation of an industrial rotary dryer: A case study of ammonium nitrate plant. *Powder Technology*, 2013; 239: 499-505.
- [3] Linga, A. and Sai, P.S.T. Studies on drying kinetics of solids in a rotary dryer. *Thermal Issues in Emerging Technologies (ThETA)*, 2010; 389-394.
- [4] Lobato, F.S., Steffen, V.Jr., Arruda, E.B. and Barrozo, M.A. Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008; 135: 1-8.
- [5] Fernandes, N.J., Ataide, C.H. and Barrozo, M.A.S. Modeling and experimental study of hydrodynamic and drying characteristics of an industrial rotary dryer. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2009; 26(2): 331-341.
- [6] Revol, D., Briens, C.L. and Chabagno, J.M. The design of flights in rotary dryers. *Power Technology*, 2001; 121: 230-238.
- [7] Ajayi, O.O. Multiscale modelling of industrial flighted rotary dryers. PhD thesis, James Cook University, 2011.
- [8] Lee, A., Sheehan, M.E. and Schneider, P.A. Solids transport in rotary sugar dryer. *Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT)*, 2004; 26.
- [9] Friedman, S.J., Marshal, W.R. Studies in rotary drying. *Chemical Engineering Progress*, 1949; 45: 482-573,



การลดของเสียในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนหน้าจอ โทรศัพท์มือถือ โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง Defect Reduction In Mobile Phone Display Component Assembly Process By Applying The Design Of Experiments

วิทยา สุมะลี* และ ระพี กาญจนะ

Wittaya Sumali* and Rapee Kanchana

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก (คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi 39 moo 1, Rangsit-Nakhonnayok Rd. (Klong 6), Thanyaburi Pathum Thani 12110

*E-mail: wittaya.sumali@hotmail.com, +668 7035 5721, Fax. Number 662 549 3442

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อลดการเสียรูปของกรอบยึดในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนหน้าจอโทรศัพท์มือถือ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมคุณภาพเชิงสถิติและการออกแบบการทดลอง ขั้นตอนการดำเนินงานเริ่มต้นจากการใช้แผนภูมิเหตุและผลวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ส่งผลต่อการเสียรูปของกรอบยึด โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญ และพิจารณาเลือกปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญ 5 ลำดับแรกมาทำการศึกษาและวิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานด้วยการออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาปัจจัยละ 2 ระดับ และทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ปัจจัยที่ทำการศึกษาทั้ง 5 ปัจจัยได้แก่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรอง ที่ระดับ 100.0 mm/s และ 140.0 mm/s, องศาของมุมแท่นรองที่ระดับ 3.0 mm และ 5.0 mm, องศาของทิศทางแผ่นฟิล์มหลังจากการแยกจากกรอบยึดที่ระดับ 90° และ 45°, ระยะกรอบยึดที่ยึดออกจากแท่นรองเพื่อรอหัวจับหยิบที่ระดับ 0.0 mm และ 5.0 mm และระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึด 0.025 mm และ 0.045 mm ผลการทดลองจาก Plackett-Burman พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเสียรูปของกรอบยึดที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรองและระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึด หลังจากนั้นนำปัจจัยทั้ง 2 พิจารณาด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 3^k Factorial Design โดยกำหนดปัจจัยเป็น 3 ระดับคือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรองที่ระดับ 100.0 mm/s, 120.0 mm/s, 140.0 mm/s และระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึด 0.025 mm, 0.035 mm, 0.045 mm ผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือที่ระดับความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรองเท่ากับ 140.0 mm/s และที่ระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึดเท่ากับ 0.045 mm สามารถลดปริมาณของเสียจากเดิมร้อยละ 8.65 เหลือเพียงร้อยละ 3.29 ส่งผลให้สามารถลดมูลค่าความสูญเสียได้ร้อยละ 5.25

คำสำคัญ: การเสียรูปของกรอบยึด, การออกแบบการทดลอง Plackett-Burman, 3^k Factorial Design

ABSTRACT

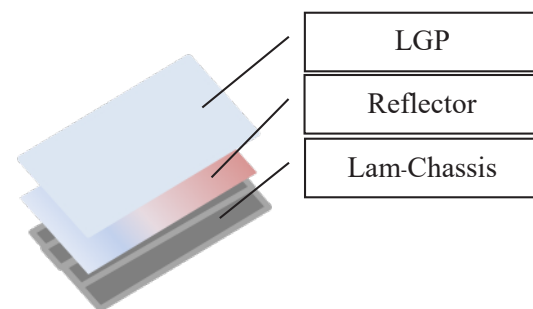
The objective of this research was to reduce the deformation of shading sheet in the mobile phone display component assembly process with the application of statistical process control and design of experiments techniques. The research methodologies began with identifying the possible root cause of deformation problem with cause and effect diagram and experts brainstorming. The top five important factors were selected and analyzed by Plackett-Burman design with 2 levels and 2 replicates at a significant level of 0.05. The five factors were studied in this research included feeding speed of pickers; 100.0 mm/s and 140.0 mm/s, angle of edge of feeding table; 3.0 mm and 5.0 mm, angle of plate from feeding table; 90° and 45°, distance of shading sheet from the edge of feeding table; 0.0 mm and 5.0 mm, and height between picker and feeding table; 0.025 mm and 0.045 mm. The experimental result from Plackett-Burman design illustrated that only two factors; feeding speed of pickers and height between picker and feeding table gave a statistically significant impact on deformation at a significant level of 0.05. Then 3k factorial design with response optimizer were consequently applied to analyzed feeding speed of pickers at 100.0, 120.0, 140.0 mm/s and height between pickers and feeding table at 0.025, 0.035, 0.045 mm. The optimal level of feeding speed of pickers and height between pickers and feeding table were 140.0 mm/s and 0.045 mm., respectively. After implementation, the deformation of shading sheet decreased from 8.65% to 3.29% leading to company's loss value reduction with 5.25%

Keyword: Deformation, Design of Experiments, Plackett-Burman, 3^k Factorial Design

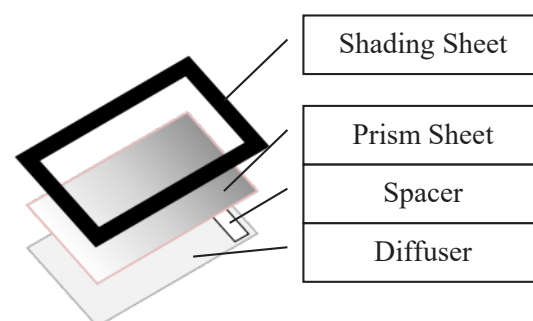
1. บทนำ

โทรศัพท์มือถือโดยเฉพาะอย่างยิ่งรุ่นสมาร์ตโฟนเป็นหนึ่งในอุปกรณ์สื่อสารที่ได้รับความนิยมและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว องค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญของสมาร์ตโฟนก็คือหน้าจอ (Display) การผลิตหน้าจอโดยส่วนใหญ่จะเป็นหน้าจอที่เรียกว่า “Back light” เป็นหน้าจอที่ใช้แสงจากหลอด LED เพื่อให้ความสว่างแก่ผู้ใช้งาน ในการประกอบวัตถุดิบต่างๆ เข้าด้วยกันโดยทั่วไปจะใช้เครื่องจักร โดยการนำแผ่นฟิล์มชนิดต่างๆ มาประกอบกันทีละชั้นๆ จนกระทั่งได้ตามข้อกำหนดที่ได้ออกแบบไว้ กระบวนการประกอบจะแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการประกอบย่อย และ กระบวนการประกอบหลัก ลักษณะคล้ายคลึงกันคือใช้หุ่นยนต์ในการประกอบเหมือนกัน โดยจะประกอบแผ่นฟิล์มทีละแผ่นตามขั้นตอนที่กำหนด เพียงแค่วัตถุดิบที่นำมาประกอบจะเป็นคนละชนิดกันเท่านั้น ซึ่งกระบวนการประกอบย่อยจะประกอบด้วย LGP, Reflector และ Lam-chassis ดังรูปที่ 1 ส่วนกระบวนการประกอบหลักจะ

ประกอบด้วย Diffuser, Spacer, Prism sheet และ Shading sheet ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 กระบวนการประกอบย่อย

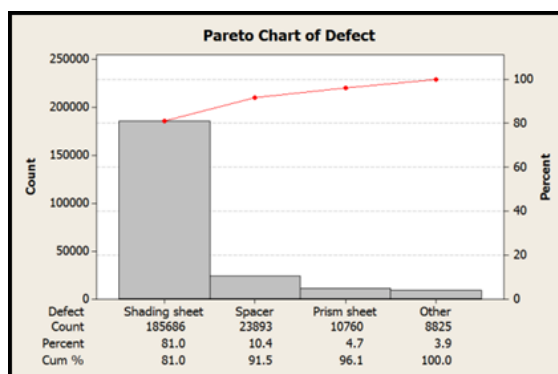


รูปที่ 2 กระบวนการประกอบหลัก

ในการทดลองครั้งนี้ เป็นการศึกษาการประกอบ หน้าจอสมาร์ตโฟนของบริษัทการศึกษา ผลิตรุ่นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ โดยสนใจเฉพาะกระบวนการการประกอบ

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง และมี ปริมาณของเสียสูง เมื่อเทียบกับกระบวนการประกอบย่อย โดยวัตถุดิบจะมีทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ แผ่นดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) แผ่นสเปเซอร์ (Spacer) แผ่นปริซึมชีท (Prism Sheet) และกรอบชีด(Shading Sheet) แต่ละ ชนิดจะมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป โดยอาศัยคุณสมบัติ และคุณลักษณะเฉพาะตัวของตัววัตถุดิบเอง

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าสาเหตุที่เกิดข้อบกพร่องมาก ที่สุดคือกรอบชีด (Shading sheet) คิดเป็น 81.03% ปริมาณของเสียทั้งหมด เนื่องจากตัววัตถุดิบมีลักษณะเป็น กรอบกาว ทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่าย



รูปที่ 3 ปริมาณของเสียในกระบวนการการประกอบหลัก

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของเสียต่อเดือนในกระบวนการ ประกอบกรอบ ตั้งแต่ เมษายน 2558 ถึง สิงหาคม 2558

วัตถุดิบ	ของเสียเฉลี่ย (ชิ้น)/เดือน	%ของเสียเฉลี่ย/ เดือน
Diffuser	1,765	0.41%
Spacer	4,779	1.11%
Prism Sheet	2,152	0.50%
Shading Sheet	37,137	8.65%

จากการเก็บข้อมูลตั้งแต่เมษายน 2558 ถึง สิงหาคม 2558 พบว่า กรอบชีด (Shading sheet) มีปริมาณของ เสียสูงถึง 37,137 ชิ้นต่อเดือน จากจำนวนการผลิต

ทั้งหมด 429,108 ชิ้นต่อเดือน คิดเป็นอัตราส่วนของเสียที่ เกิดขึ้นจากปัญหากรอบชีด (Shading sheet) มีค่าเท่ากับ 8.65% ดังตารางที่ 1

จากปัญหาดังกล่าวทำให้กระบวนการผลิตมีต้นทุนที่ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สิ่งที่จะทำให้องค์กรอยู่ในสภาวะขาดทุนได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะลดปริมาณของการเสีย รูปของกรอบชีดลงให้ได้อย่างน้อย 50.0% จากปริมาณ ของเสียเฉลี่ยต่อเดือนเดิมที่ 8.65%

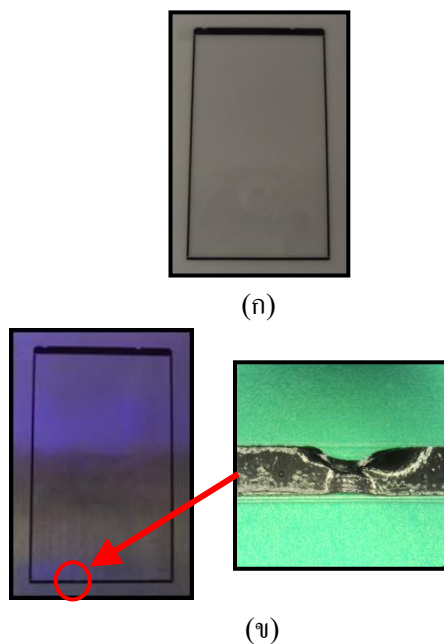
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การ ออก แบบ การ ทด ลอง (Design of Experiments: DOE) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่นำมาใช้ ในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตสินค้าได้ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการ เปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) เมื่อค่าปัจจัย (Factor) เปลี่ยนแปลงไปนั้นมีผล ทำให้ตัวแปรตอบสนองเปลี่ยนแปลงหรือไม่และอย่างไร เมื่อทราบความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วสามารถออกแบบค่า ของปัจจัยให้ตรงกับค่าที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนอง เป็นไปตามที่ต้องการ [1] เทคนิคการทดลองแบบ แฟกทอเรียล ที่นิยมนำไปประยุกต์ในการหาสภาวะที่ เหมาะสมในวงการอุตสาหกรรม ได้แก่การทดลอง 2^k แฟกทอเรียลแบบเพิ่มจุดกึ่งกลาง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ เมื่อพื้นฐานของการทดลองแบบแฟกทอเรียลมีจำนวนการ ทดลองที่ไม่มากนัก สามารถสรุปผลการศึกษาด้วย นัยสำคัญทางสถิติและง่ายต่อความเข้าใจเพื่อนำไปใช้ใน เชิงปฏิบัติ [1] ดังตัวอย่าง การลดของเสียในกระบวนการ ขึ้นรูปด้วยความร้อนถาดบรรจุสารคัดสค์ 2.5 [2] ซึ่งนำ ปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญ 3 อันดับแรกมาทำการพิจารณา โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิง แฟกทอเรียล 2^k (2^k Factorial Design) ซึ่งได้ทดลอง แบบ 23 ออกแบบให้ใช้ Full Factorial และทำซ้ำ 2 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองสามารถลดของเสียจากเดิม 3.53% เหลือ เพียง 0.93%

นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้ในการศึกษาการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแลกเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก [3] โดยใช้หลักการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่เพิ่มจุดกึ่งกลางประกอบด้วย 3 ปัจจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้นำมาหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่เหมาะสม (Response Optimizer) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า น้ำหนักแลกเกอร์ต่อพื้นที่ 8.5 กรัมต่อตารางเมตร อุณหภูมิบ่ม 125 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้บ่ม 13 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมมากที่สุด

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ลักษณะของกรอบยัดที่มีลักษณะที่ดีและตัวอย่างลักษณะของการเสียรูปของกรอบยัดจะแสดงดังรูปที่ 4

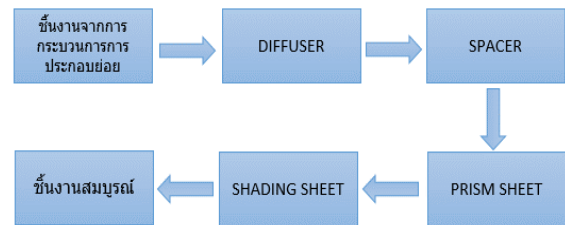


รูปที่ 4 ลักษณะของกรอบยัด; (ก) ลักษณะกรอบยัดที่ดี, (ข) ลักษณะกรอบยัดเสียรูป

3.1 การคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

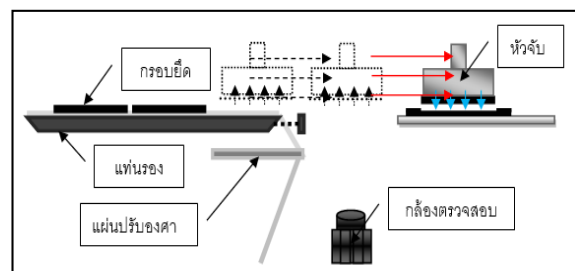
ปัญหาในการวิจัยครั้งนี้คือ การเสียรูปของกรอบยัดปัจจัยต่าง ๆ ถูกนำมารวบรวม โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

กระบวนการประกอบหลักสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 5 ซึ่งสถานีกรอบยัด (Shading sheet) จะเป็นสถานีสุดท้ายก่อนเป็นชิ้นงานสมบูรณ์ (Finish goods)

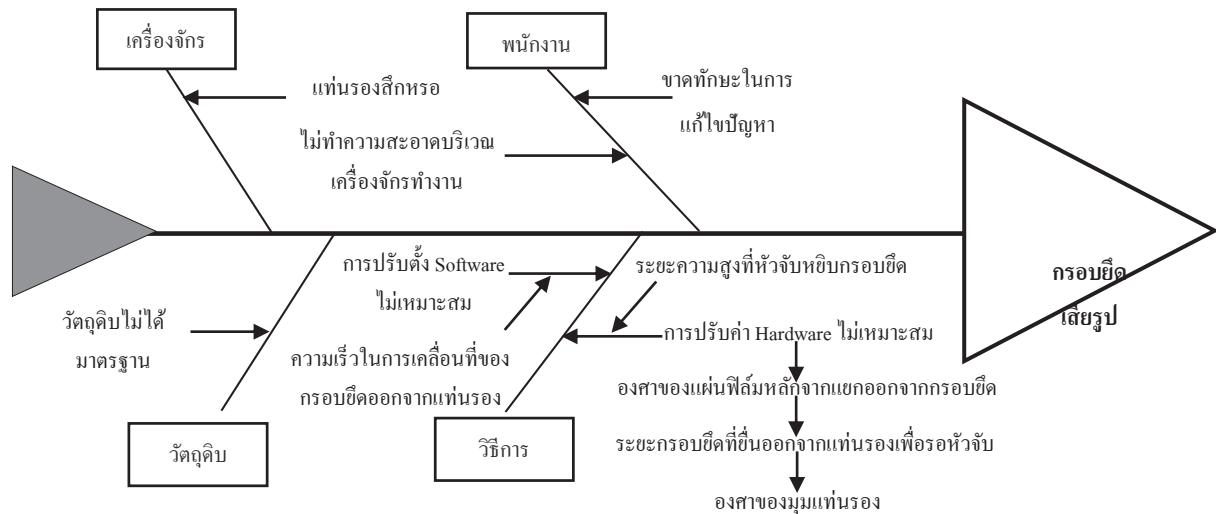


รูปที่ 5 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการประกอบหลัก

เริ่มจากหัวจับจะเคลื่อนที่ลงมาหีบจับกรอบยัดในตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ โดยที่กรอบยัดและหัวจับจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วที่เท่ากันอย่างสม่ำเสมอ หัวจับจะใช้มดูลในการหีบจับกรอบยัดเพื่อแยกกรอบยัดออกจากแผ่นฟิล์ม หลังจากนั้นหัวจับที่มีกรอบยัดจะเคลื่อนที่ไปด้านหลัง เพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของกรอบยัดว่าเป็นตามภาพมาตรฐานที่ควรจะเป็นหรือไม่ หากภาพขณะนั้นมีลักษณะตามที่กำหนด หัวจับจะสามารถทำคำสั่งต่อไปได้ แต่ถ้าหากมีลักษณะไม่ได้ตามมาตรฐาน เครื่องจักรจะมีการร้องเตือน (Alarm) ออกมา หลังจากสิ้นสุดการตรวจสอบคุณภาพของกรอบยัดแล้ว (ในกรณีที่กรอบยัดได้ตามมาตรฐาน) หัวจับจะนำกรอบยัดมาวางบน Lam-Chassis เป็นอันจบกระบวนการ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนของการประกอบกรอบยัดลงบนชิ้นงาน



รูปที่ 7 สาเหตุและปัจจัยที่สามารถส่งผลต่อการเสียรูปของกรอบขึ้น

จากนั้นวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการลดการเสียรูปของกรอบขึ้น เมื่อได้ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมแล้วให้นำผลลัพธ์ที่ได้ไปทดสอบในกระบวนการผลิตและเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

การคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น เป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดการเสียรูปของกรอบขึ้น ขั้นตอนนี้มีการระดมความคิดเห็นจากทีมงานวิศวกรที่มีประสบการณ์และมีความเชี่ยวชาญในกระบวนการผลิต เพื่อร่วมกันวิเคราะห์ค้นหาสาเหตุ ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียด้วยแผนผังก้างปลา ดังรูปที่ 7 หลังจากกรองปัจจัยเบื้องต้น (Screening Factor) แล้ว ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปของกรอบขึ้นจะถูกออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค Plackett-Burman

โดยจะทำการศึกษา 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (Low) และระดับสูง (high) เพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ เมื่อสามารถกำหนดระดับปัจจัยได้ครบถ้วนแล้ว จากนั้นจะนำปัจจัยมาทำการทดลองตามข้อมูลที่กำหนด ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial design) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม การทดลองจะกำหนดระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (Low) ระดับกลาง (Medium) และระดับสูง (High)

ทั้งนี้ระดับของปัจจัยที่ได้ทำการทดลองเบื้องต้นมา กำหนดค่าระดับกลาง

3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองและหาสถานะที่เหมาะสม (Response optimizer)

จากการทดลองจากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ (3^k Factorial design) จะนำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วย Response Optimizer เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมกับการเกิดของเสียอันเนื่องมาจากการเสียรูป ในกระบวนการการประกอบกรอบ โดยศึกษา ระดับปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

3.3 การเปรียบเทียบผลก่อนและหลังปรับปรุง

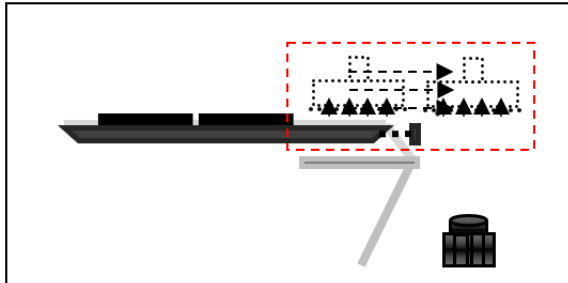
ในขั้นตอนนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองมาทำการทดลองจริง โดยจะเริ่มทดลองจริงในเดือนเมษายน 2559 เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยต่อเดือน ตั้งแต่เดือนเมษายน 2558 ถึง สิงหาคม 2558 เท่ากับ 8.65%

4. ผลการดำเนินการวิจัย

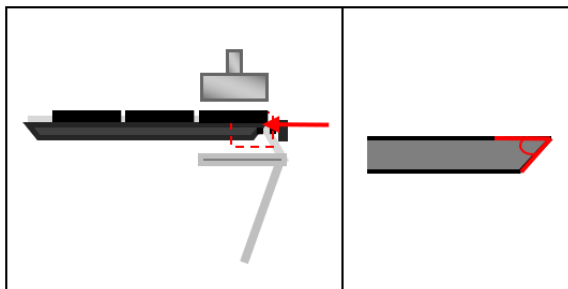
4.1 ผลการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

หลังจากมีการระดมสมองและวิเคราะห์หาสาเหตุ ร่วมกับทีมวิศวกรผู้มีประสบการณ์ในด้านการออกแบบและกระบวนการผลิต ในกรณีศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียรูปของกรอบขึ้น จากผังเหตุและผล (Cause

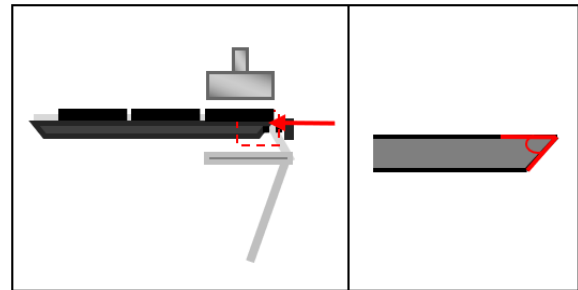
and Effect Diagram) พบว่ามีทั้งหมด 5 ปัจจัยที่น่าจะมีอิทธิพลต่อการเสียรูปอย่างมีนัยสำคัญ โดยทั้ง 5 ปัจจัยจะแสดงดังรูปที่ 8 ถึง 12



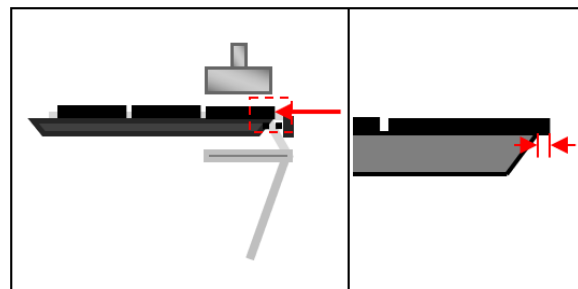
รูปที่ 8 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรอง



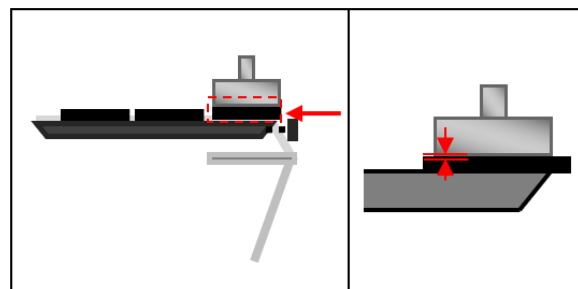
รูปที่ 9 องศาของมุมแท่นรองหลังจากแยกออกจากกรอบยึด



รูปที่ 10 องศาทิศทางแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 11 ระยะกรอบยึดที่ยื่นออกจากแท่นรองเพื่อรอหัวจับหยิบ



รูปที่ 12 ระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึด

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
		ระดับต่ำ (Low)	ระดับสูง (High)	หน่วย (Unit)
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรอง	A	100.0	140.0	มิลลิเมตร/วินาที
องศาของมุมแท่นรอง	B	3.0	5.0	มิลลิเมตร
องศาของทิศทางแผ่นฟิล์มหลังจากแยกจากกรอบยึด	C	90.0	45.0	องศา
ระยะกรอบยึดที่ยื่นออกจากแท่นรอง เพื่อรอหัวจับหยิบ	D	0.0	5.0	มิลลิเมตร
ระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึด	E	0.025	0.045	มิลลิเมตร

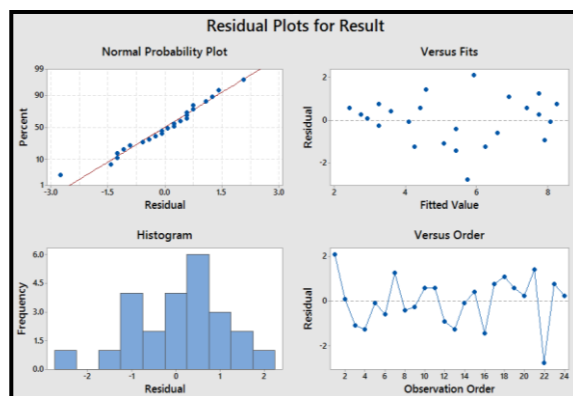
หลังจากมีการระดมความคิดเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสียรูปของกรอบยึดเบื้องต้นพบว่า ปัจจัยที่มี

ความสำคัญมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังตารางที่ 2 แสดงระดับของปัจจัยนั้นๆ (โดยทั่วไปสถานการณ์ประกอบกรอบยึดจะ

ใช้ค่าต่าง ๆ ในช่วงที่มีการระบุตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้จริง ณ ปัจจุบัน) เพื่อให้หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเสียรูปของกรอบยึดโดยนำมาดำเนินการทดลองเบื้องต้นโดยใช้การทดลองแบบ Plackett-Burman เพื่อทดสอบถึงความมีนัยสำคัญของปัจจัยที่ระดับ 0.05 โดยขั้นตอนการทดสอบ จะประกอบด้วย 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และทดลองซ้ำที่ระดับปัจจัยต่าง ๆ เป็นจำนวน 2 Replicate จำนวนที่ใช้ทดสอบทั้งหมดรวม 24 ครั้ง ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman

ลำดับ	A	B	C	D	E	จำนวนของเสีย (ชิ้น)
1	140	3	45	0	0.025	4
2	140	5	90	5	0.025	3
3	100	5	45	0	0.045	8
4	140	3	45	5	0.025	4
5	140	5	90	5	0.045	5
6	140	5	45	0	0.045	6
7	100	5	45	5	0.025	3
8	100	3	45	5	0.045	8
9	100	3	90	5	0.045	9
10	140	3	90	0	0.045	4
11	100	5	90	0	0.025	5
12	100	3	90	0	0.025	8
13	140	3	45	0	0.025	3
14	140	5	90	5	0.025	3
15	100	5	45	0	0.045	8
16	140	3	45	5	0.025	3
17	140	5	90	5	0.045	4
18	140	5	45	0	0.045	3
19	100	5	45	5	0.025	5
20	100	3	45	5	0.045	9
21	100	3	90	5	0.045	7
22	140	3	90	0	0.045	4
23	100	5	90	0	0.025	8
24	100	3	90	0	0.025	6



รูปที่ 13 การตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลของการทดลองแบบ Plackett-Burman

จากรูปที่ 13 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูล (ด้านซ้ายบนของรูป) ข้อมูลอยู่ใกล้เคียงกับเส้นปกติ จุดตัดจะเรียงตัวกันเป็นแนวเส้นตรง และลักษณะการเกิดจุดจะต้องไม่กระจุกเป็นกลุ่มๆ สามารถอนุมานได้ว่า ข้อมูลนี้มีความเหมาะสม และจากกราฟ Versus Fitted Value (ด้านขวาบน) เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยดูจากการกระจายของจุดที่แทนข้อมูล ซึ่งจากลักษณะของกราฟสามารถอธิบายได้ว่า มีการกระจายอย่างเป็นอิสระต่อกัน สำหรับข้อมูลจากกราฟ Versus Order (ด้านขวาล่าง) เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ซึ่งพบว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

จากตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีเพียงสองปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ แสดงว่าทั้ง 2 ปัจจัย มีผลต่อปริมาณ ของเสียในกระบวนการประกอบกรอบยึดที่ระดับมีนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเสียในกระบวนการ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Plackett-Burman ของปัจจัยทั้ง 5

Factorial Regression: Result versus Blocks, A, B, C, D, E					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	81.000	13.5000	8.55	0.000
Blocks	1	0.667	0.6667	0.42	0.524
Linear	5	80.333	16.0667	10.18	0.000
A	1	60.167	60.1667	38.12	0.000
B	1	2.667	2.6667	1.69	0.211
C	1	0.167	0.1667	0.11	0.749
D	1	0.667	0.6667	0.42	0.524
E	1	16.667	16.6667	10.56	0.005
Error	17	26.833	1.5784		
Total	23	107.833			

ประกอบคือความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรอง (A) และระยะความสูงที่หัวจับหีบกรอบยึด (E)

4.2 ผลการทดลองแบบ 3^k Factorial design

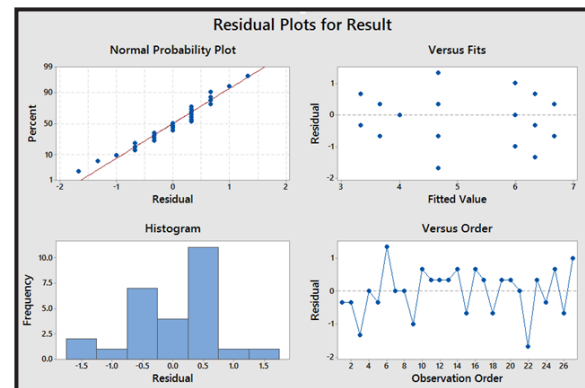
เมื่อทราบปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของเสียในกระบวนการประกอบกรอบ แล้วได้ดำเนินการทดลองโดยใช้การทดลองแบบ 3^k Factorial Design ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปัจจัยและคุณลักษณะปัจจัยป้อนเข้า

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย			หน่วย
		ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง	
1. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรอง	(A)	100.0	120.0	140.0	มิลลิเมตร/วินาที
2. ระยะความสูงที่หัวจับหีบกรอบยึด	(E)	0.025	0.035	0.045	มิลลิเมตร

จากรูปที่ 14 จะเห็นได้การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) (ด้านซ้ายบน) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงแบบปกติ และการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) (ด้านบนขวา) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) และผลการตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) (ด้านล่างขวา) พบว่า ค่าส่วน

ตกค้าง (Residuals) มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ามีรูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูปที่ 14 การตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลการทดลองแบบ 3^k Factorial design

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์การทดสอบแบบ 3^k Factorial design

General Factorial Regression: Result versus A, B						
Factor Information						
Factor	Levels	Values				
A	3	100, 120, 140				
B	3	0.025, 0.035, 0.045				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	8	39.185	4.8981	6.96	0.000	
Linear	4	34.593	8.6481	12.29	0.000	
A	2	7.630	3.8148	5.42	0.014	
B	2	26.963	13.4815	19.16	0.000	
2-Way Interactions	4	4.593	1.1481	1.63	0.210	
A*B	4	4.593	1.1481	1.63	0.210	
Error	18	12.667	0.7037			
Total	26	51.852				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0.838870	75.57%	64.71%	45.04%			

จากตารางที่ 6 พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยช็อคออกจากแท่นรอง (A) และระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรวยช็อค (E) แต่ละปัจจัยมีค่า P-Value น้อยกว่า $\alpha = 0.05$ จึงสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยทั้งสองมีผลปริมาณของเสียในกระบวนการประกอบกรวยช็อค ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

4.3 ผลการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม (Response Optimizer)

จากการวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของทั้ง 2 ปัจจัย พบว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรวยช็อคออกจากแท่นรองเท่ากับ 140.0 มิลลิเมตร/วินาที และระยะความสูงของหัวจับเท่ากับ 0.045 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 15

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ผลที่เหมาะสม

Response Optimization: Result

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Result	Minimum		3	7	1	1

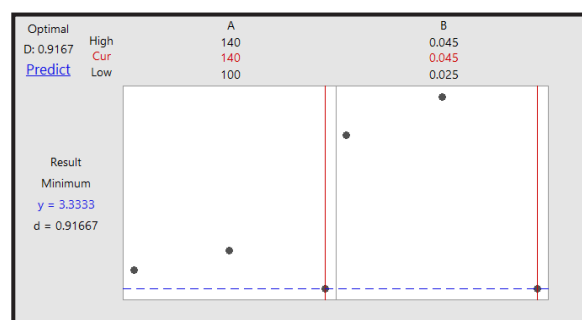
Solution

Solution	A	B	Result Fit	Composite Desirability
1	140	0.045	3.33333	0.916667

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
A	140
B	0.045

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Result	3.333	0.484	(2.316, 4.351)	(1.298, 5.368)



รูปที่ 15 ค่าการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมที่กำหนด

4.4 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง

เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าจุดเหมาะสมที่ได้จากผลการวิจัยเป็นสภาวะการทำงานใหม่ที่ดีกว่าเดิมจึงนำค่าที่ได้มาทดสอบใช้จริงเป็นระยะเวลา 1 เดือน และนำข้อมูลจำนวนของเสียก่อนการทำวิจัยมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของเสียหลังการทำวิจัย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจำนวนของเสียของการทำงานในสภาวะเดิม กับจำนวนของเสียของการทำงานในสภาวะใหม่สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบผลก่อน-หลังปรับปรุง

หัวข้อ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	% การปรับปรุง
ยอดการผลิต เฉลี่ย (ชิ้น)	426,267	410,835	-
ของเสียเฉลี่ย (ชิ้น)	36,404	13,520	-
มูลค่าของเสียเฉลี่ย (บาท/เดือน)	125,596	46,644	-
% ของเสียเฉลี่ย	8.54%	3.29%	5.25%

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าสภาพการดำเนินงานก่อนปรับปรุง ช่วงเดือนเมษายน 2558 ถึง เดือนมีนาคม 2559 นั้นมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการผลิตเท่ากับ 426,267 ชิ้นต่อเดือนและมีปริมาณของเสียเฉลี่ยที่ 36,404 ชิ้นต่อเดือน คิดเป็นอัตราของเสียเฉลี่ยที่ 8.54% คิดเป็นมูลค่าความสูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 125,596 บาทต่อเดือน ซึ่งหลังจากการปรับปรุงโดยปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรองเท่ากับ 140.0 มิลลิเมตร/วินาที และระยะความสูงของหัวจับเท่ากับ 0.045 มิลลิเมตร ผลที่ได้พบว่าอัตราของเสียเฉลี่ยลดลงจาก 8.54% เป็น 3.29% สามารถลดลง 5.25% หรือราวๆ 80,000 บาทต่อเดือนเลยทีเดียว

5. สรุปผลการทดลอง

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการการผลิต จากการทดลองเบื้องต้นโดยใช้การทดลองแบบ Plackett-Burman คือความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรอง ระยะความสูงที่หัวจับหยิบกรอบยึด การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการนำ

ปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญมาทำการออกแบบการทดลอง 3^k Factorial design เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Response Optimization) พบว่าถ้าต้องการให้ค่าจำนวนของเสียเกิดน้อยที่สุดจะต้องควบคุมปัจจัยดังนี้ค่าของความเร็วในการเคลื่อนที่ของกรอบยึดออกจากแท่นรองเท่ากับ 140.0 มิลลิเมตร/วินาที ระยะความสูงของหัวจับเท่ากับ 0.045 มิลลิเมตรเมื่อพิจารณาทั้ง 2 ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญพร้อมกับดำเนินการพบว่าจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นในสถานการณ์การประกอบกรอบยึด มีค่าเท่ากับ 3.29% ซึ่งบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ที่ 4.32% (ลดลง 50% จาก 8.65% ที่เป็น % ของเสียเดิม)

6. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษา มีการผลิตชิ้นส่วนหน้าจอสมาร์ตโฟนหลายรุ่น หลายโมเดล โดยแต่ละรุ่นจะใช้ชนิดของวัสดุที่แตกต่างกัน แต่ลักษณะการประกอบยังคงประกอบโดยใช้เครื่องจักรเหมือนกัน ซึ่งสามารถนำวิธีการออกแบบการทดลอง ไปใช้ในการหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีเป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำที่ดีตลอดมา และขอขอบคุณ คุณพงศ์ชนิส นาคัน และ คุณอิสราภาพสินวร ที่มีส่วนร่วมในการวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้น ขอขอบคุณกำลังใจดี ๆ จากบิดามารดา และสุดท้ายขอขอบคุณผู้ทำให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Montgomery, C. D. Design and Analysis of Experiment. John Wylie & Sons, Singapore, 1991.
- [2] ชาญณรงค์ อินทรชู และระพี กาญจนะ. การลดของเสียในกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนจากถาดฮาร์ดดิสก์ 2.5 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง. วารสารวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตราชภัฏธนบุรี, 2556; 116 – 126.
- [3] ทศพล เกียรติเจริญผล. การออกแบบการทดลองแบบแฟลทอเรียล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบแลกเกอร์บนแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก. Ladkrabang Engineering Journal, 2009; 26: 60 - 65.



ประสิทธิภาพด้านทานแผ่นดินไหวของโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายในที่ใช้เหล็กเส้นความเหนียวสูง

Seismic Performance of Reinforced Concrete Interior Frames Using Super Ductile Reinforcing Steel Bar

รัฐพล เกติยศ^{*1} และ ชยานนท์ หรรณภูมิโย²

Rattapon Ketiyot¹ and Chayanon Hansapinyo²

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

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

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

E-mail: ^{*}1rattapon.ste7@rmutl.ac.th, ²chayanon@eng.cmu.ac.th

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบตัวอย่างส่วนย่อยโครงคาน-เสาภายในอาคารที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ภายใต้แรงสลับทิศ จำนวน 2 ตัวอย่างที่ใช้เหล็กเส้นเสริมตามยาวที่มีคุณภาพแตกต่างกัน ได้แก่ เหล็กเส้นเสริมข้ออ้อยทั่วไป ชั้นคุณภาพ SD40 และเหล็กเส้นข้ออ้อยที่มีสมบัติเหนียวพิเศษ ชั้นคุณภาพ SD40s ในการศึกษาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานแผ่นดินไหวของตัวอย่างทดสอบโครงคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าความเครียดที่จุดคราก (ϵ_y) และที่จุด Hardening (ϵ_{sh}) ของเหล็กเสริมมีผลต่อค่าการเสียรูปที่จุดครากและแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ ด้านอัตราส่วนกำลังสูงสุดของชิ้นส่วนคอนกรีตที่เสริมเหล็กสมบัติเหนียวพิเศษต่อชิ้นส่วน โครงคอนกรีตที่เสริมเหล็กชั้นคุณภาพปกติมีค่าเท่ากับ 1.02 ซึ่งใกล้เคียงและสอดคล้องกับอัตราส่วนกำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s กับเหล็กเสริมปกติชั้นคุณภาพ SD40 ด้านสมบัติของอัตราส่วนความเหนียวและความสามารถในการสลายพลังงานของตัวอย่างทดสอบพบว่า ตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

ABSTRACT

This paper presents the experimental result of two monotonic reinforced concrete under reversal cyclic loading of two monolithic reinforced concrete beam-column as interior frames using different grades of longitudinal reinforcing steel rebars in each specimens. The longitudinal bars were divided into two groups i.e. the conventional deformed rebar (SD40) and the modern rebars, super ductile rebar (SD40s). The seismic performance of the concrete specimens with the modern rebar was compared with that of test specimen with conventional one. The results revealed that the yield strain (ϵ_y) and hardening strain (ϵ_{sh}) of each grades of longitudinal bars directly affected the yield displacements and post-yield trend of lateral load versus displacement relationship of concrete specimens. Furthermore, the loading capacity ratio of concrete specimens with SD40s longitudinal bar against test specimen with the conventional bar was 1.02 and observed be close to the ratio of yield strength of bare bar from uniaxial tensile test of bare bars. For ductility factor and energy dissipation of both specimens, the results were very similar.

Keywords: Super ductile bar, seismic performance, cyclic loading

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่า สมบัติของเหล็กเสริมคอนกรีตมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมและประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะแรงกระทำที่มีรูปแบบทางพลศาสตร์ เช่น แรงแผ่นดินไหว ที่มีขนาดของแรงเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดและสลับทิศ ในการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว สมบัติทางกลของเหล็กเสริมเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความเหนียวให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบันใช้เหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งเป็นเหล็กที่นิยมใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม หลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ อ.แม่ลาว จ. เชียงราย ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งทำให้อาคารในพื้นที่เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเสริมสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทยได้นำเสนอผลิตภัณฑ์ใหม่สู่ตลาด เพื่อเพิ่มความสามารถในการเสียรูปและคงกำลังของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้แก่ เหล็กเสริมที่มีความเหนียวพิเศษ ชั้นคุณภาพ SD40s (super ductile bar หรือ seismic bar) ซึ่งเป็นเหล็กเสริมที่ถูกปรับปรุงในกระบวนการผลิตให้มีค่าการยืดตัว (elongation) สูงกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน มอก.24-2548 [1]

ในปัจจุบันสำหรับการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่พิเศษ อาคารสูง และอาคารที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว มีแนวโน้มที่จะเลือกใช้เหล็กเสริมชนิดใหม่ในงานโครงสร้างคอนกรีต เพื่อประโยชน์ทั้งในด้านวิศวกรรมและด้านการตลาดของโครงการ กล่าวคือ ทั้งวิศวกรและผู้บริโภคส่วนใหญ่มีความเชื่อว่า การใช้เหล็กเสริมความเหนียวพิเศษ จะช่วยปรับปรุงสมบัติต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารดังกล่าวให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 จากการศึกษาที่ผ่านมา [2-5] แสดงให้เห็นว่าสมบัติของเหล็กเสริมมีผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตในช่วงหลังจุดยืดหยุ่น อย่างไรก็ตาม การศึกษาประสิทธิภาพการ

ต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กเสริมความเหนียวสูงในปัจจุบันมีค่อนข้างจำกัด รวมทั้งพฤติกรรมของชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กไม่ได้ขึ้นอยู่กับสมบัติของเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสมบัติของคอนกรีตและปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งอยู่ในรูปแบบของแรงยึดเหนี่ยวอีกด้วย

จากเหตุผลที่กล่าวมา บทความนี้ได้นำเสนอพฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสาภายในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กความเหนียวพิเศษเป็นเหล็กเสริมตามยาว เปรียบเทียบกับการใช้เหล็กเสริมทั่วไปภายใต้แรงแบบวัฏจักรซึ่งเทียบเท่ากับแรงแผ่นดินไหว ในการศึกษาได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้าง ได้แก่ กำลังของจุดต่อ (strength) ค่าความเหนียว (ductility) การเสื่อมลดของค่าแข็งเกร็งและกำลัง (stiffness and strength degradation) การดูดซับพลังงาน (energy dissipation) พฤติกรรมความเครียดของเหล็กเสริม (strain profile) และแบบฉบับการวิบัติ (mode of failure)

2. วิธีวิจัย

ในการศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งจำลองพฤติกรรมแรงคัตของส่วนประกอบอาคารส่วนจุดต่อคาน-เสาภายในอาคาร ในขณะที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดในการศึกษา ใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดเท่ากับ 44.03 MPa ในส่วนของเหล็กเสริมตามขวางใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SR24 มีกำลังที่จุดครากเท่ากับ 372 MPa ในส่วนคุณสมบัติของเหล็กเสริมตามยาวจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุ (uniaxial tensile test) แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สำหรับในรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม

จากการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมตามยาวพบว่า กำลังที่จุดครากของเหล็ก SD40 และ SD40s มีค่า

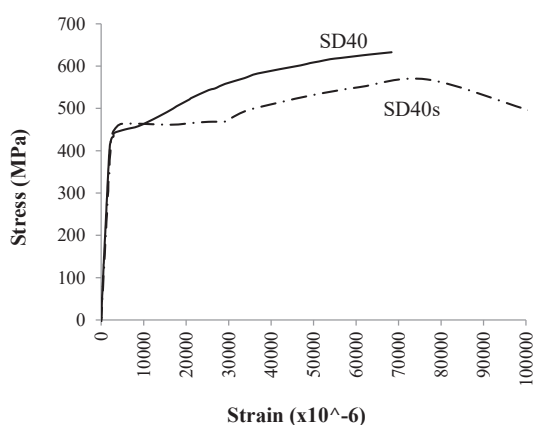
เท่ากับ 454 และ 468 MPa ตามลำดับ ร้อยละการยืดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 16 และ 20 สำหรับเหล็กเสริม SD40 และ SD40s ตามลำดับ ในส่วนของค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็ก SD40s มีระยะการยืดสูงกว่าเหล็ก SD40 นอกจากนี้ยังพบว่าความยาวของความเครียดที่มีค่าความเค้นครากคงที่ (Yield Plateau Strain) ของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 มีค่าต่ำกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s ซึ่งแสดงจากค่าความเครียดที่จุด Hardening (ϵ_{sh}) ของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 จะมีค่าต่ำกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s

ตารางที่ 1 สมบัติของเหล็กเสริมตามยาว

ชั้นคุณภาพ	กำลังดึงที่จุดคราก, σ_y (MPa)	มอดูลัสยืดหยุ่น, E_s (MPa)	กำลังประลัย, σ_u (MPa)	ค่าการยืดตัว (%)
SD40	454	215,746	632	16
SD40s	468	188,332	568	20

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติของเหล็กเสริม

ชั้นคุณภาพ	ความเครียดที่จุดคราก, $\epsilon_y \times 10^{-6}$	ความเครียดที่จุด Hardening, $\epsilon_{sh} \times 10^{-6}$	มอดูลัสพลาสติก, E_p (MPa)
SD40	2,104	8,887	2,696
SD40s	2,485	29,476	1,348



รูปที่ 1 ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริม

2.2 ตัวอย่างทดสอบ

การศึกษาได้สร้างชิ้นส่วนทดสอบจุดต่อภายในคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ออกแบบชิ้นส่วนคานและเสาตาม ACI 318-14 [6] และออกแบบจุดต่อตาม ACI 352R-02 [7] โดยกำหนดโครงสร้างให้มีพฤติกรรมเป็นเสาแข็ง-คานอ่อนตามวิธีออกแบบ capacity โดย Hollings [8-9] ซึ่งเป็นผู้นำเสนอวิธีการนี้ ขนาดโครงสร้างที่ใช้ในการศึกษาเท่ากับ 2/3 เท่าของขนาดจริงสำหรับอาคารสูงปานกลางโดยประมาณ (อาคารพาณิชย์ ความสูงไม่เกิน 4 ชั้น) จำนวน 2 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งตามชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมตามยาวในตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ เหล็กเสริมปกติ (SD40) และเหล็กเสริมเหนียวพิเศษ (SD40s) สำหรับตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP ตามลำดับ ตัวอย่างทั้งสองมีมิติของโครงสร้างคอนกรีต ปริมาณเหล็กและรายละเอียดการเสริมเหล็กในทุกชิ้นส่วนเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2

การติดตั้งของชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 3 กำหนดให้ปลายคานทั้ง 2 ด้านมีสภาวะยึดรั้งแบบหมอนอิสระและเคลื่อนที่ได้ 1 มิติ (linked support) ที่ตำแหน่งฐานเสาด้านล่างกำหนดให้มีสภาวะยึดรั้งแบบหมอนอิสระ (pinned support) ส่วนที่ปลายเสาด้านบนถูกปล่อยให้มีการเคลื่อนที่โดยอิสระ (free-end) และจำลองบรรทุกน้ำหนักกระทำในแนวราบแบบสลับทิศที่ตำแหน่งปลายเสาด้านบนในการทดสอบได้กำหนดแรงในแนวแกนให้กระทำกับเสาตลอดการทดสอบ เท่ากับ ร้อยละ 10 ของกำลังรับแรงอัดเสา ($0.1A_c f'_c$)

ในตารางที่ 2 แสดง มิติและปริมาณเหล็กเสริมของชิ้นส่วนคานและเสา สำหรับตารางที่ 3 และ 4 แสดงดัชนีและกำลังของชิ้นส่วนคาน เสาและจุดต่อ ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของแรงเฉือนของคาน (R) และแรงเฉือนระหว่างชั้น (H) ที่สามารถรับได้ สำหรับค่าอัตราส่วนกำลังรับโมเมนต์ระนาบต่อกำลังรับแรงเฉือนระนาบของหน้าตัด ($M_n/a_b V_n$) ใช้สำหรับประเมินลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1.0 แสดงว่าหน้าตัดมีค่ากำลังรับโมเมนต์ระนาบมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนระนาบ

เป็นผลให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะวิบัติในลักษณะของแรงเฉือน ในส่วนกำลังแรงรับเฉือนของจุดต่อพิจารณาตาม ACI352R-02 ซึ่งค่า b_j คือความกว้างประสิทธิผลของจุดต่อ และ γ คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของจุดต่อ ในการศึกษาออกแบบให้เกิดการวิบัติในชิ้นส่วนคานก่อน

การวิบัติในชิ้นส่วนอื่น ๆ จากการออกแบบพบว่า ค่าแรงเฉือนจากการคำนวณระหว่างชั้นสูงสุด (H_{cal}) ของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าเท่ากับ 43.25 และ 40.30 kN ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติของชิ้นส่วนคอนกรีต

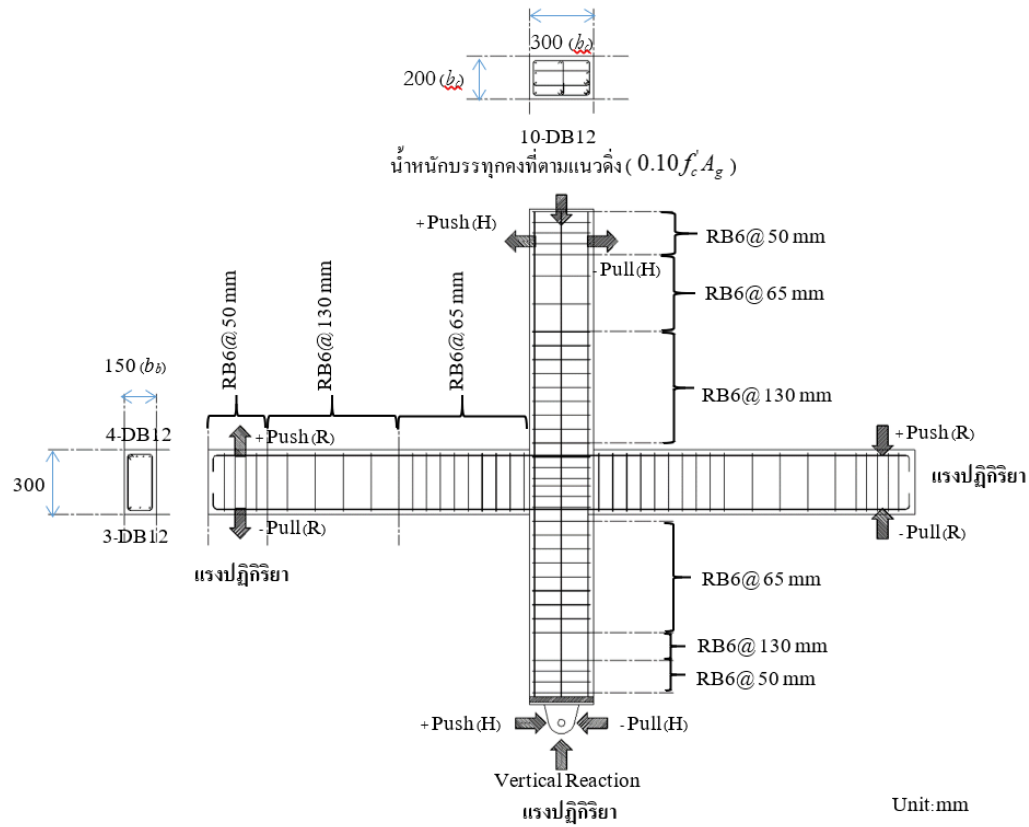
ตัวอย่าง	คาน				เสา		
	มิติ ($b_b \times h_b$) (mm)	ปริมาณเหล็กเสริม ตามยาว		ปริมาณเหล็ก เสริมตาม ขวาง	มิติ ($b_c \times h_c$) (mm)	ปริมาณ เหล็กเสริม ตามยาว	ปริมาณ เหล็กเสริม ตามขวาง
		ด้านบน	ด้านล่าง				
M-SD40-EXP	150 × 300	4-DB12	3-DB12	RB6 @ 65 mm.	200 × 300	10-DB12	RB6 @ 65 mm.
M-SD40s-EXP	150 × 300	4-DB12	3-DB12	RB6 @ 65 mm.	200 × 300	10-DB12	RB6 @ 65 mm.

ตารางที่ 3 คำนวณทางโครงสร้างของคาน

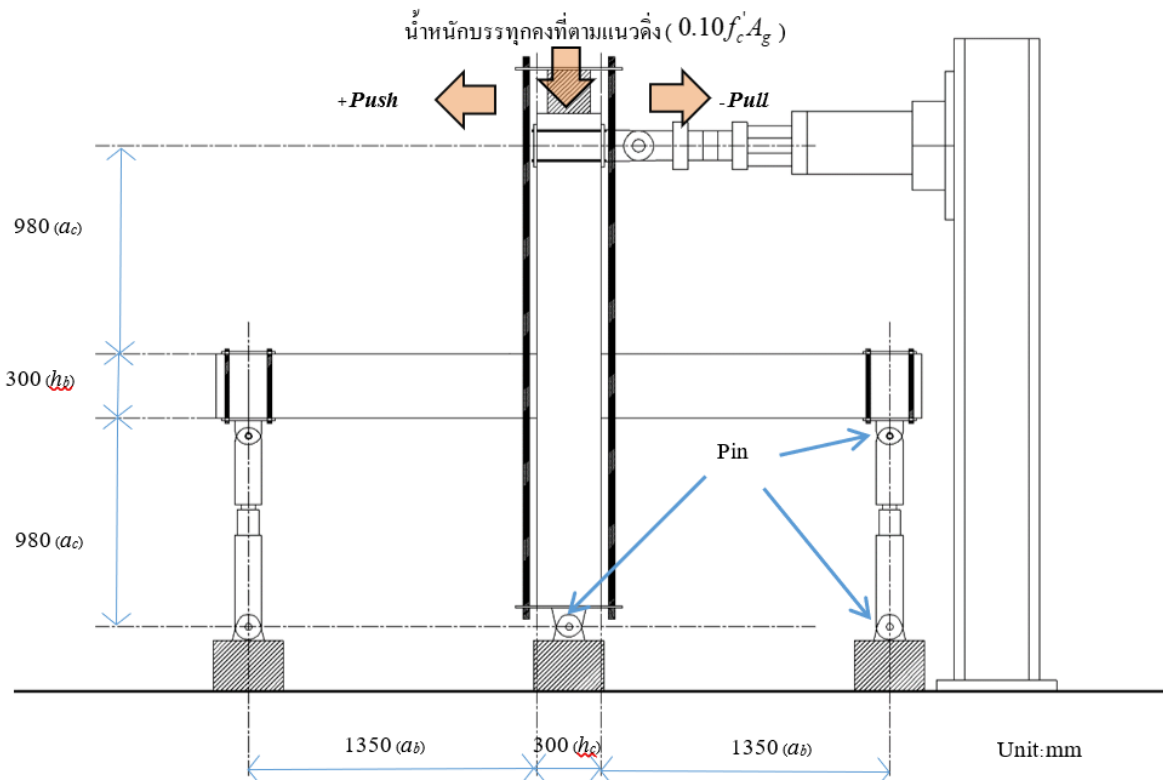
ตัวอย่าง	ความยาว, a_b (mm.)	$\frac{a_b}{h_b}$	M_n^+ (kN-m)	M_n^- (kN-m)	V_n (kN)	$\frac{M_n^+}{a_b V_n}$	$\frac{M_n^-}{a_b V_n}$	R_{max} (kN)	H_{b-max} (kN)
M-SD40-EXP	1,350	4.50	44	56	172	0.159	0.215	32.59	43.25
M-SD40s-EXP	1,350	4.50	41	55	172	0.164	0.220	30.37	40.30

ตารางที่ 4 คำนวณทางโครงสร้างของเสาและจุดต่อ

ตัวอย่าง	เสา						จุดต่อ		
	ความยาว, a_c (mm)	$\frac{a_b}{h_c}$	M_n (kN-m)	V_n (kN)	$\frac{M_n}{a_b V_n}$	H_{c-max} (kN)	γ (Type 2)	b_j (mm.)	H_{j-max} (kN)
M-SD40-EXP	980	3.27	67	192	0.334	68.37	15	200	495.67
M-SD40s-EXP	980	3.27	67	192	0.345	68.37	15	200	495.67



รูปที่ 2 รายละเอียดเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ



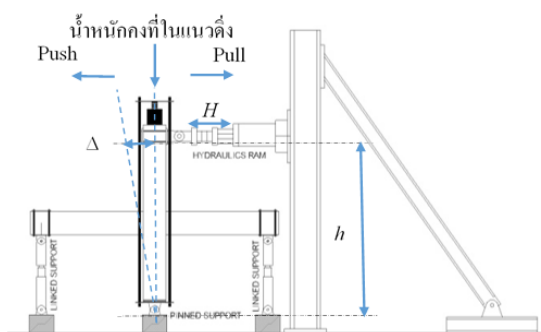
รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

2.3 การควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

ในการทดสอบ ได้ควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสัมพัทธ์ (inter-story drift ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนตัวที่ปลายเสา (Δ) กับความสูงของเสา (h) ดังแสดงในรูปที่ 4 สำหรับการคำนวณอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์แสดงในสมการที่ (1)

$$\text{Drift Ratio, } \theta = \frac{\Delta}{h} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่ θ = อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์
 Δ = การเคลื่อนตัวในแนวนอน
 h = ความสูงของเสา



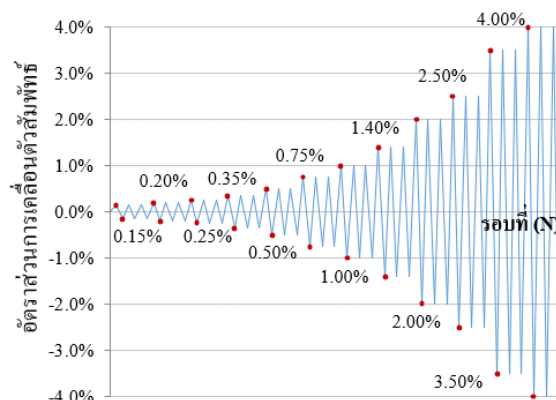
รูปที่ 4 การตรวจสอบค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

ในการศึกษา กำหนดการเคลื่อนตัวในแนวนอนที่ด้านบนของเสาเป็นแบบกึ่งสถิตแบบสลับทิศ ตามข้อกำหนด ACI T1.1-01[10] ในแต่ละระดับการเคลื่อนตัวจะทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 รอบ เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพด้านกำลังของโครงสร้าง จากนั้นจึงเพิ่มระดับการเคลื่อนตัวในระดับต่อไปจนกระทั่งชิ้นส่วนเกิดการวิบัติหรือค่าระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับร้อยละ 4.0 ในรูปที่ 5 แสดงจำนวนรอบและระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ที่ใช้ในการทดสอบ

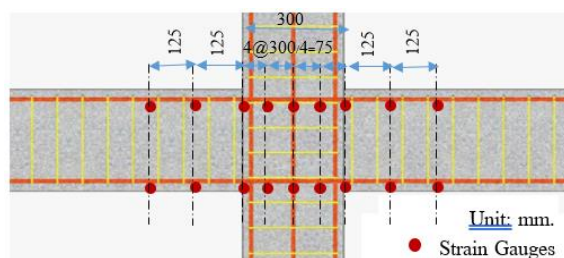
2.4 การตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวของคาน

ในการศึกษาทำการติดตั้งแถบวัดค่าความเครียด (strain gauges) บนเหล็กเสริมตามยาวของคานเพื่อวัด

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียดในระหว่างการทดสอบ ซึ่งติดตั้งบนเหล็กเสริมตามยาวด้านบนและด้านล่างของหน้าตัดคาน บริเวณปลายคานหน้าเสาภายในระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน (effective beam depth, d) ผ่านจุดต่อระหว่าง คาน-เสา ดังรูปที่ 6 แสดงตำแหน่งในการติดตั้งแถบวัดค่าความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของคาน



รูปที่ 5 การควบคุมอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์



รูปที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้งแถบวัดค่าความเครียดบนเหล็กเสริมตามยาวของคาน

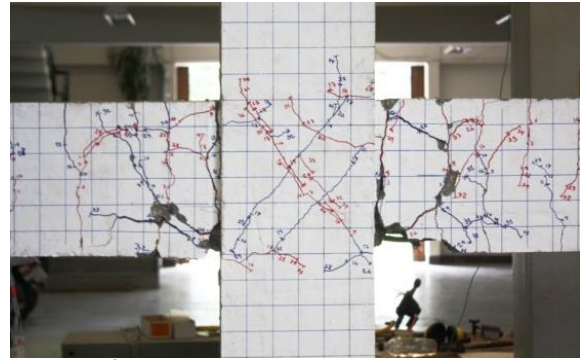
3. ผลการทดสอบ

3.1 ลักษณะการวิบัติ (Failure Mode)

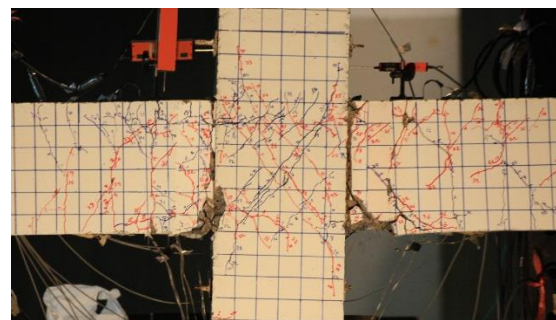
ในระหว่างการทดสอบทิศทางของรอยร้าวในตัวอย่างทดสอบทั้งสองมีพฤติกรรมคล้ายกันเนื่องจากมีรายละเอียดการเสริมเหล็กเหมือนกัน ในการทดสอบที่ระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่าง 0.15%-0.50% ปรากฏรอยร้าวแรงดัดเริ่มต้น (flexural crack) กระจายภายในระยะความลึกประสิทธิภาพของคาน (d) ที่บริเวณปลายคานต่อกับเสา เมื่อเพิ่มระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ รอยร้าวแรงดัดดังกล่าว จะขยายแนวให้ยาวเพิ่มขึ้นตลอด

ความลึกของคาน เมื่อถึงระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 0.50% ปรากฏรอยร้าวทแยง (diagonal crack) ที่จุดต่อคาน-เสา ในระหว่างการทดสอบพบรอยร้าวแรงคดจำนวนมากกระจุกตัวที่บริเวณปลายคานหน้าเสาและเกิดรอยร้าวแรงคดกระจายไปทั่วขึ้นส่วนคาน เมื่อเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นถึงระดับ 3.50% คอนกรีตที่ด้านบนและล่างของหน้าตัดคาน บริเวณ หน้าเสาถูกบดแตกละเอียด (crushing) จนสามารถเห็นเหล็กเสริมได้ เมื่อระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น 4.00% เหล็กเสริมตามยาวด้านท้องคานบริเวณหน้าเสาเกิดการวิบัติจากการโก่งเดาะ (buckling) เป็นสาเหตุทำให้กำลังของโครงสร้างทั้งระบบลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ รอยร้าวแรงคดของเสาปรากฏอยู่ด้านบนและด้านล่างจุดต่อคาน-เสา เพียงเล็กน้อย

ในรูปที่ 7 และ 8 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP ตามลำดับ จากรูปแบบของการวิบัติของทั้งสองตัวอย่างพบว่ามีข้อแตกต่างของแนวรอยร้าวคอนกรีตและระดับการแตกของคอนกรีต ตัวอย่างเช่น การวิบัติของตัวอย่าง M-SD40-EXP (รูปที่ 7) ปรากฏการแตกละเอียดของคอนกรีตมีจำกัดอยู่ในบริเวณโครงสร้างคานหน้าเสาเท่านั้นและพบรอยแตกบนจุดต่อเป็นรอยแตกทแยงหลักอย่างชัดเจนซึ่งเป็นตัวแทนของแบบฉบับการวิบัติในแนวที่เป็นค้ำยันรับแรงอัด (strut mechanism) สำหรับการวิบัติของตัวอย่าง M-SD40s-EXP (รูปที่ 8) พบการแตกอัดของคอนกรีตที่หน้าตัดคานและบริเวณจุดต่อที่ติดกับปลายท้องคาน และการกระจายของรอยแตกบนจุดต่อซึ่งปรากฏรอยแตกทแยงจำนวนมากซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมการวิบัติทั้งแบบแรงอัดใน ค้ำยัน และแรงยึดเหนี่ยว (strut and truss/bond mechanism)



รูปที่ 7 การวิบัติของตัวอย่าง M-SD40-EXP (ระดับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00%)



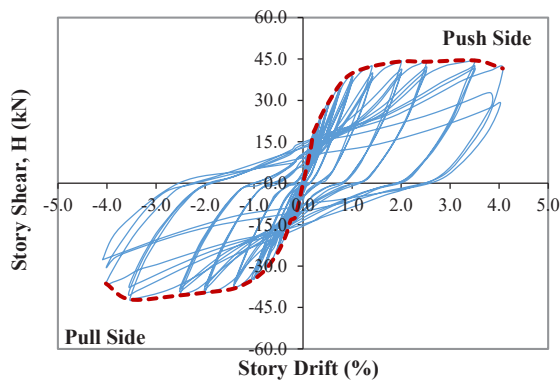
รูปที่ 8 การวิบัติของตัวอย่าง M-SD40s-EXP (ระดับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00%)

3.2 พฤติกรรมการวนซ้ำ (Hysteretic) และเส้นโค้งขอบนอก (Envelope Curve)

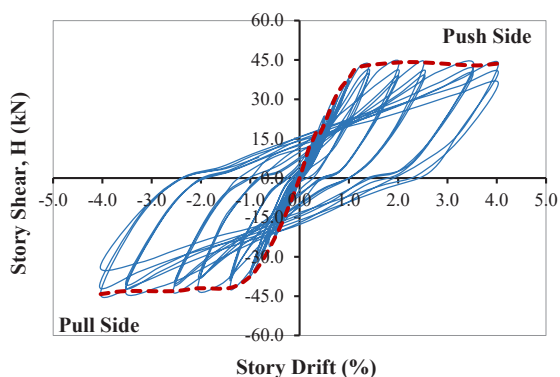
รูปที่ 9 และ 10 แสดงพฤติกรรมการวนซ้ำและเส้นโค้งขอบนอกของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP ตามลำดับ พฤติกรรมแบบฮิสเทรีซิสของตัวอย่างทดสอบทั้งสามอยู่ภายในระดับการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ $\pm 0.50\%$ ถึง $\pm 1.00\%$ หลังจากนั้น เส้นโค้งขอบนอกมีกำลังต้านทานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและพื้นที่ในวงรอบของลูปวนซ้ำ (hysteresis loop) มีขนาดเพิ่มขึ้น แสดงถึงการครากของเหล็กตามยาวในคาน รอยร้าวของคอนกรีตที่จุดต่าง ๆ ของคานและจุดต่อต่างช่วยกันสลายพลังงาน (energy dissipation) ได้ดี เหล็กปลอกสามารถป้องกันการวิบัติแบบเฉือนทั้งในจุดต่อและคานได้ ในระหว่างการทดสอบทั้งสองตัวอย่างไม่ปรากฏพฤติกรรมอัดแน่น (Pinching) สำหรับแนวโน้มของกราฟขอบนอก หลังจากจุดครากของชิ้นส่วนทั้งสอง พบว่า ที่ระดับอัตราการ

เคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 4.00% พฤติกรรมเส้นโค้งขอบนอกลดลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม จากพฤติกรรมการรวนซ้ำของรอบที่ 3 พบว่ากำลังต้านทานของหน้าตัดลดลงเหลือต่ำกว่า 85% จึงถือได้ว่าขึ้นทดสอบเกิดการวิบัติแล้ว

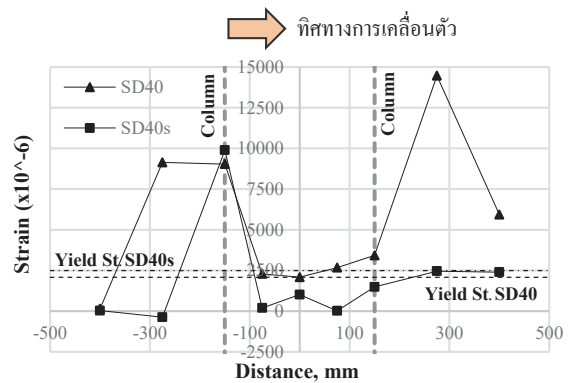
จากผลการทดสอบตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP จะเห็นได้ว่าพฤติกรรม hysteretic และลักษณะของเส้นโค้ง envelope มีความคล้ายกันจะแตกต่างกันเพียงแนวโน้มของเส้นโค้ง envelope ที่ระดับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ 4.00% พฤติกรรมด้านกำลังของตัวอย่าง M-SD40-EXP มีแนวโน้มลดลงแต่สำหรับตัวอย่าง M-SD40s-EXP มีแนวโน้มของกำลังที่คงที่ เนื่องจากช่วงความยาวของความเครียดที่มีหน่วยแรงครากคงที่ (yield plateau strain) ของเหล็กเสริมสองชั้นคุณภาพที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 9 พฤติกรรม Hysteretic
ตัวอย่าง M-SD40-EXP



รูปที่ 10 พฤติกรรม Hysteretic
ตัวอย่าง M-SD40s-EXP



รูปที่ 11 ความเครียดของเหล็กเสริมบนตามยาวของหน้าตัดคานที่ระดับอัตราการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ -2.50%

จากข้อมูลของการกระจายระดับความเครียดของเหล็กเส้น SD40 และ SD40s ภายในชิ้นส่วนทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า ที่บริเวณหน้าเสาติดกับคาน ระดับความเครียดของเหล็กทั้งสองชั้นคุณภาพมีค่าใกล้เคียงกัน ($8,000-10,000 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1 พบว่าที่ระดับความเครียดดังกล่าวเหล็ก SD40 มีหน่วยแรงมากกว่าเหล็ก SD40s ที่ยังอยู่ในช่วงหน่วยแรงครากคงที่ ซึ่งแรงภายในของโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริม SD40s มีค่าต่ำกว่าเหล็กเสริม SD40 ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงทำให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเหล็กเสริมล่างของหน้าตัดคานโดยแรงอัดภายในเหล็กเสริมของตัวอย่าง M-SD40-EXP ก่อนตัวอย่าง M-SD40s-EXP

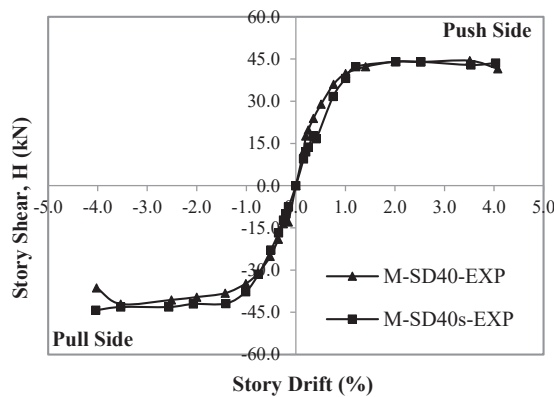
3.3 กำลังสูงสุด (Ultimate Strength)

ในรูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบของเส้น envelope ของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนระหว่างชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของทั้ง 2 ตัวอย่าง จากผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่ากำลังสูงสุดจากการทดสอบ (H_{EXP}) ทั้งสองทิศทางของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังสูงสุดเฉลี่ยของ ตัวอย่าง M-SD40s-EXP กับตัวอย่าง M-SD40-EXP มีค่าเท่ากับ 1.02 ซึ่งค่าอัตราส่วนกำลังสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนกำลังครากของเหล็กเส้นเสริมที่มีค่าเท่ากับ 1.03

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กำลังครากของเหล็กเสริมมีผลโดยตรงต่อกำลังสูงสุดของโครงสร้างคอนกรีต เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังสูงสุดจากการทดสอบกับค่าจากการออกแบบพบว่า ค่ากำลังทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ค่ากำลังสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	H_{EXP} (kN) Push/Pull	H_{cal} (kN)	$\frac{H_{EXP}}{H_{cal}}$
M-SD40-EXP	44.43/42.08	43.25	1.03/0.97
M-SD40s-EXP	44.03/44.24	40.30	1.09/1.10



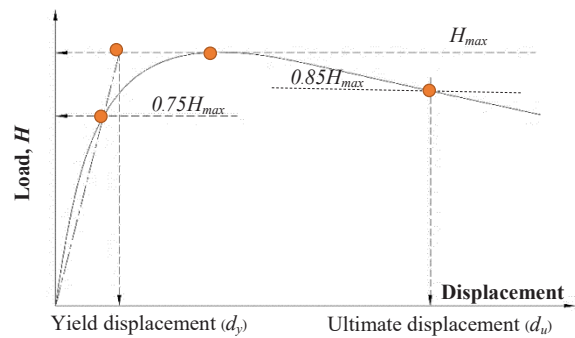
รูปที่ 12 เส้นโค้งรอบนอก (backbone curve)

3.4 ความเหนียว (Ductility Factor, μ)

ค่าความเหนียวเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญเพื่อประเมินสมรรถนะในการเสีรูปของโครงสร้างคอนกรีตแบบอินทาสติคขณะเกิดแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการเสีรูปที่จุดคราก (yield deformation, d_y) กับการเสีรูปที่จุดประลัย (ultimate deformation, d_u) สำหรับการประเมินตำแหน่งการเสีรูปที่จุดครากและจุดประลัยในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการประเมินจากการศึกษาของ Park [11] ดังแสดงในรูปที่ 13

ตารางที่ 4 ค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่าง	ทิศทาง	ตำแหน่งการเสีรูป		μ
		d_u (%)	d_y (%)	
M-SD40-EXP	Push	4.00+	0.90	4.00+
	Pull	4.00+	1.00	4.00+
M-SD40s-EXP	Push	4.00+	1.00	4.00+
	Pull	4.00+	1.00	4.00+



รูปที่ 13 ค่าความเหนียวของตัวอย่างทดสอบ

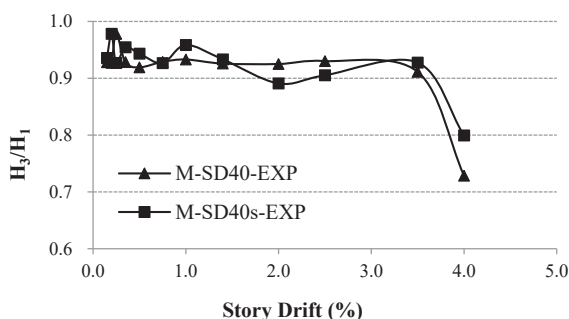
ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ความเหนียวของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าใกล้เคียง 4.00 ในทั้งสองตัวอย่าง เมื่อพิจารณาในส่วนของการเสีรูปที่จุดครากของตัวอย่างพบว่า ตำแหน่งจุดครากของตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีค่าเฉลี่ยที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เท่ากับ 0.95% และ 1.00% ตามลำดับ สอดคล้องกับความเครียดของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ที่มีค่าน้อยกว่าเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40s ดังแสดงในตารางที่ 2

3.5 ความเสื่อมถอยของกำลัง (Strength Degradation)

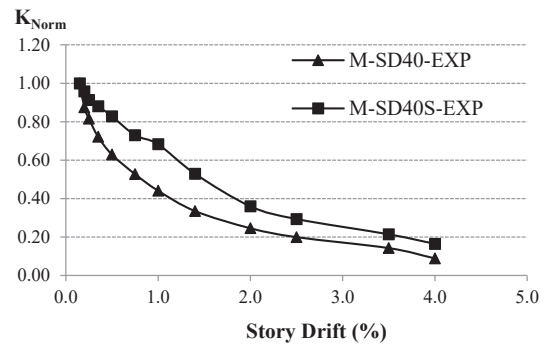
น้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำแบบวัฏจักรในอัตราเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระดับเดียวกัน 3 ครั้ง เป็นสาเหตุให้กำลังต้านทานในรอบถัดมาลดลงจากค่ากำลังต้านทานในรอบแรก รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมถอยของกำลังเทียบกับกำลังสูงสุดในรอบแรกกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในรอบที่ 3 (H_3/H_1) จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าทั้งสองตัวอย่างแสดงค่าการเสื่อมถอยของกำลังในระดับที่ใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าการเสื่อมของกำลังน้อยกว่า 15% อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นถึงระดับ 4.00% พบว่าตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีกำลังคงเหลือเท่ากับ 73% และ 80% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากำลังคงเหลือของตัวอย่าง M-SD40s-EXP ทำได้ดีกว่า M-SD40-EXP ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในระดับที่โครงสร้างเกิดการวิบัติ

3.6 ความเสื่อมถอยของความแข็งแกร่ง (Stiffness Degradation)

โดยทั่วไป ค่าความแข็งแกร่ง (stiffness) ของโครงสร้างจะลดลงเมื่อระดับอัตราเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ หรือมีการเคลื่อนตัวแบบสลับทิศ เนื่องจากการเสียหายของโครงสร้างจะสะสมมากขึ้น การตรวจสอบความเสื่อมถอยของความแข็งแกร่งในการศึกษานี้ ใช้ค่าความแข็งแกร่งโดยวิธี Secant (secant stiffness, K_{sec}) ในรอบสุดท้ายของค่าอัตราเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในแต่ละระดับ (รอบที่ 3) และพิจารณาอัตราส่วนความแข็งแกร่งเปรียบเทียบ (normalized stiffness, K_{Norm}) โดยเปรียบเทียบเทียบค่าความแข็งแกร่งที่อัตราเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในระดับต่างๆ กับค่าความแข็งแกร่งในรอบสุดท้ายของอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ในระดับแรกคือ 0.15% ซึ่งถือเป็นค่าความแข็งแกร่งเริ่มต้น (initial secant stiffness) จากการทดสอบพบว่า การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแกร่งของตัวอย่าง M-SD40-EXP มีมากกว่าตัวอย่าง M-SD40s-EXP ในช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่ำกว่า 2.00% และเมื่อการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสู่ระดับ 2.50% การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแกร่งของทั้งสองตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันจนกระทั่งจบการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 15 ที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระดับสุดท้าย พบว่าตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีความแข็งแกร่งคงเหลือเท่ากับ 16.4% และ 8.9% ตามลำดับ



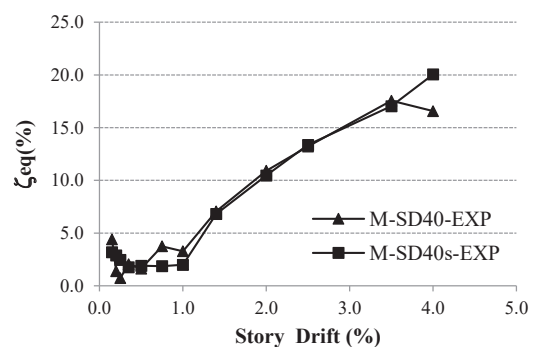
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมถอยของกำลังเฉลี่ยกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมถอยของค่าความแข็งแกร่งกับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์

3.7 อัตราส่วนความหน่วงหนืดเทียบเท่า (Equivalent Damping Ratio)

ในการศึกษานี้ ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) ตามการศึกษาของ Chopra [12] เป็นตัวแทนในการประเมินสมรรถนะในการสลายพลังงานจากการทดสอบพบว่า การสลายพลังงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเคลื่อนตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเสียหายเกิดสะสมมากขึ้น ในรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่า ตัวอย่าง M-SD40-EXP และ M-SD40s-EXP มีอัตราส่วนความหน่วงหนืดเทียบเท่าที่ใกล้เคียงกันแต่จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันในระดับการเคลื่อนตัวที่ 4.00% ซึ่งอัตราส่วนความหน่วงหนืดเทียบเท่าของตัวอย่าง M-SD40-EXP มีแนวโน้มลดลง แต่ตัวอย่าง M-SD40s-EXP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 16 อัตราส่วนส่วนความหน่วงหนืดเทียบเท่า

4. สรุป

บทความนี้ นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพต้านทานแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่ใช้เหล็กความเหนียวสูงชันคุณภาพ SD40s กับเหล็กเสริมปกติชันคุณภาพ SD40 เป็นเหล็กเสริมตามยาว โดยทดสอบโครงสร้างคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายในอาคาร ภายใต้แรงวัฏจักรตามมาตรฐาน ACI T1.1-01 จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาวมีผลโดยตรงต่อกำลังสูงสุดของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต แสดงให้เห็นจากอัตราส่วนกำลังสูงสุดเฉลี่ยของ ตัวอย่าง M-SD40s-EXP กับตัวอย่าง M-SD40-EXP ซึ่งมีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกับอัตราส่วนกำลังครากของเหล็กเส้นเสริมชันคุณภาพ SD40s กับเหล็กเส้นเสริมชันคุณภาพ SD40
- ลักษณะการแตกร้าวของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่าง M-SD40-EXP ปรากฏรอยแตกบนจุดต่อปรากฏรอยแตกทแยงหลักอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นตัวแทนของพฤติกรรมวิบัติในแนวรับแรงอัด (Strut Mechanism) สำหรับการวิบัติของตัวอย่าง M-SD40s-EXP แสดงการกระจายของรอยแตกบนจุดต่อซึ่งปรากฏรอยแตกทแยงจำนวนมากซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมการวิบัติทั้งแบบแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยว (Strut and Truss/Bond Mechanism)
- ระดับความเครียดที่จุดครากและระดับความเครียดที่จุด Hardening ของเหล็กเสริมตามยาวมีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต

- ค่าความเหนียวของโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมตามยาวชันคุณภาพ SD40 มีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมตามยาวชันคุณภาพ SD40s อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตหลังจากจุดครากพบว่า ตำแหน่งของค่าความเครียดที่จุด hardening ของเหล็กเสริมตามยาวมีผลต่อพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและการเคลื่อนตัวในแนวราบของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังจากจุดครากของตัวอย่างทดสอบ
- ความเสื่อมถอยของกำลังของตัวอย่างคอนกรีตทั้งสองมีระดับที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นถึงระดับ 4.00% พบว่ากำลังคงเหลือของตัวอย่าง M-SD40s-EXP มีค่ามากกว่า M-SD40-EXP
- ในช่วงอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ต่ำกว่า 2.00% การเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง M-SD40-EXP มากกว่าตัวอย่าง M-SD40s-EXP อย่างไรก็ตาม ค่าการเสื่อมถอยของค่าความแข็งแรงของทั้งสองตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นสู่ระดับ 2.50% จนกระทั่งจบการทดสอบที่อัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระดับสุดท้าย พบว่า ค่าความแข็งแรงคงเหลือของตัวอย่าง M-SD40-EXP สูงกว่าตัวอย่าง M-SD40s-EXP
- ความสามารถในการสลายพลังงานของชิ้นส่วนคอนกรีตที่ใช้เหล็กเสริมตามยาวชันคุณภาพ SD40 และชันคุณภาพ SD40s มีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] มอก. 24-2548. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548.
- [2] Andres, L., Hooman, T., Santiago, P. and Jeffrey, M.R. High-performance steel bars and fibers as concrete reinforcement for seismic-resistant frames. *Advances in Civil Engineering*, 2012.
- [3] Tavallali, H. Cyclic response of concrete beams reinforced with ultrahigh strength steel. Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University, 2011.

- [4] Rautenberg, J. M. Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel. Doctoral dissertation, Purdue University West Lafayette, 2011.
- [5] Rautenberg, J. M., Pujol, S., Tavallali, H. and Lepage, A. Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel. *ACI Structural Journal*, 2013; 110(2): 307-317.
- [6] ACI committee 318. ACI 318-14: Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute, Detroit, 2014.
- [7] ACI-ASCE Committee 352. ACI 352R-02: Recommendations for design of beam-column connection in monolithic reinforced concrete structures. American Concrete Institute, Detroit, 2002.
- [8] Hollings, J.P. reinforced concrete seismic design. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1968; 2(3): 217-250.
- [9] Hollings, J.P. A reinforced concrete building in Wellington. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1968; 2(4): 420-442.
- [10] ACI Innovation Task Group 1 and Collaborators. ACI T1.1-01: Acceptance criteria for moment frames based on structural testing. American Concrete Institute, Detroit, 2001.
- [11] Park, R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1989; 22(3): 155-166.
- [12] Chopra, A. K. Dynamic of structures-theory and applications to earthquake engineering. 4th edition, Pearson, New Jersey, 2011.



การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง ระบบสายพานลำเลียงถ่านหินลิกไนต์ Efficiency Improvement of Lignite Belt Conveyor Relocation Project

สิริพงศ์ สังข์เจริญ* และ อรรถพล สมุทรกุลปดี

Siripong Sungcharean* and Uttapol Samutkupt

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University
239 HuayKaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

*E-mail: siripong.sun@egat.co.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการเคลื่อนย้ายตำแหน่งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินลิกไนต์เป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการดังกล่าวจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้อาจสามารถในการลำเลียงถ่านหินลิกไนต์ให้กับโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพียงพอต่อความต้องการ แต่เนื่องจากการดำเนินการที่ผ่านมาได้มีการใช้ระยะเวลาในการดำเนินการของกระบวนการดังกล่าวในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน จึงมีความจำเป็นที่ต้องประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลในการประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานของกระบวนการดังกล่าว โดยเริ่มจากการหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน รวมทั้งตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแผนงาน และประมาณการระยะเวลาทั้งหมดของกระบวนการดังกล่าว ผลการศึกษาที่ความเชื่อมั่น 95% ระยะเวลาเฉลี่ยในการดำเนินโครงการฯ อยู่ระหว่าง 172.51 ถึง 175.25 ชั่วโมง ซึ่งจากการพิจารณาพบว่าการดำเนินการด้วยวิธีการเดิมจะล่าช้า จึงมีการนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการดังกล่าว 2 วิธี คือ ปรับลดระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมที่มีระยะเวลาในการดำเนินงานไม่คงที่และนำบางกิจกรรมออกไปดำเนินการนอกแผนงานเฉพาะในส่วนของการย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน ถังการซื้อเครื่องไม่ถ่านหินเพิ่ม ซึ่งแนวทางที่เหมาะสมที่สุดได้แก่การลดระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมที่มีระยะเวลาในการดำเนินงานไม่คงที่และนำบางกิจกรรมออกไปดำเนินการนอกแผนงาน เนื่องจากไม่ต้องใช้งบประมาณในการลงทุนซื้อเครื่องจักรเพิ่ม ทั้งนี้ที่ความเชื่อมั่น 95% ระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้ในการดำเนินโครงการฯ คือ 134 ชั่วโมง และมีโอกาสที่จะใช้ระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ อยู่ระหว่าง 132.32 ถึง 135.60 ชั่วโมง

คำสำคัญ: ระบบสายพานลำเลียงถ่านหินลิกไนต์, เทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล แม่เมาะ

ABSTRACT

Procedure of Lignite Belt Conveyor Relocation and Installation Project is important for electricity generation currently in Mae Moh Power Plant. Then, we have to increase the efficiency to reduce the procedure time of Lignite Belt Conveyor Relocation and Installation Project. According to the previous recorded data of the relocation and installation time of Lignite Belt Conveyor System, the

operating time of each process is not inconstant. Then, we applied the Monte Carlo simulation to determine the operating time and work diagram in relocating and installing the Lignite Belt Conveyor System by collecting the data to estimate the average, standard deviation, characteristic of the information distribution. The result showed that the operating time of the whole process at 95% confidence was between 172.51 hours to 175.25 hours. We offered two ways to reduce time; reducing the operating time of the inconstant works and eliminating the unimportant works or buying new crusher machine to reduce the operating time of crusher machine procedure in Lignite Belt Conveyor Relocation and Installation Project. The suitable offer was that reduced the operating time of the inconstant works and eliminates the unimportant works because there was no requirement about the budget. Anyhow, the average at 95% confidence operating time was 134 hours and the operating time of the whole process was between 132.32 hours to 135.60 hours.

Keywords: Lignite Belt Conveyor Relocation and Installation Project, Monte Carlo simulation, Mae Moh

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โครงการย้าย และติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินของเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เป็นโครงการที่ใช้ในการขยับระบบสายพานลำเลียงถ่านหินให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมกับพื้นที่การทำเหมือง เนื่องจากการทำเหมืองจะทำให้พื้นที่หน้างานมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเหมืองแม่เมาะผลิตถ่านหินจาก 2 พื้นที่ทำเหมืองด้วยระบบสายพานลำเลียงถ่านหิน 3 และ 2 ระบบตามลำดับ ทั้งนี้ด้วยข้อจำกัดของโรงไฟฟ้าแม่เมาะทำให้ต้องกำหนดคุณภาพของถ่านหินให้เหมาะสม ส่งผลให้เหมืองแม่เมาะต้องนำถ่านหินจากทั้งสองพื้นที่ทำเหมืองมาผสมกันก่อนที่จะส่งให้กับ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ดังนั้นการจะส่งถ่านหินต้องใช้ระบบสายพานลำเลียงถ่านหินเป็นคู่

ในอดีตโครงการฯ ดังกล่าวจะมีขึ้นโดยเฉลี่ยปีละครั้ง แต่เนื่องจากปัจจุบันมีข้อจำกัดของพื้นที่ทำให้ต้องขยับระบบสายพานลำเลียงถ่านหินเพื่อเปิดหน้าดิน ขุดถ่านหิน และการขยับเครื่องจักรให้เข้าใกล้พื้นที่ขุดถ่านหินมากที่สุดทำให้จำนวนโครงการฯ เพิ่มขึ้นเป็นปีละ 4 ถึง 5 ครั้ง ซึ่งในระหว่างการทำงานของโครงการฯ ต้องหยุดระบบสายพานลำเลียงถ่านหินเพื่อดำเนินการส่งผลให้กระบวนการส่งถ่านหินที่ต้องผสมถ่านหินจาก 2 พื้นที่ทำเหมืองต้องหยุดลงอีกทั้งยังส่งผลกระทบในด้านอื่นๆ ดังนี้

1. ส่งผลกระทบต่อภาระงานถ่านหินขึ้นจากพื้นที่ทำเหมือง และส่งผลกระทบต่อภาระผสมถ่านหิน ให้ได้ตาม

คุณภาพ ในช่วงเวลาที่มีการย้ายระบบสายพานลำเลียงถ่านหิน

2. ส่งผลกระทบต่อภาระการวางแผนการใช้งานและการบำรุงรักษาเครื่องจักร

3. ส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในงานย้ายระบบสายพานลำเลียงถ่านหิน

ดังนั้นเพื่อเป็นการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิธีการทำงานของโครงการย้ายและติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินอย่างละเอียด เพื่อหาสายงานวิกฤตและแนวทางในการลดระยะเวลาการดำเนินงานของโครงการฯ ซึ่งที่ผ่านมาในการดำเนินงานมีกิจกรรมในโครงการฯ ทั้งที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานเท่ากันทุกครั้ง (คงที่) และไม่เท่ากันในแต่ละครั้ง (ไม่คงที่) ทำให้ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ แต่ละครั้งไม่เท่ากัน หลังจากนั้นจะใช้เป็นแนวทางในการวางแผนและควบคุมโครงการย้ายและติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินในอนาคต

ทั้งนี้สาเหตุที่เลือกใช้การจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลนั้น เนื่องจากการดำเนินการที่ผ่านมามีการใช้ระยะเวลาในการดำเนินการของกระบวนการดังกล่าวในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน จึงต้องการสุ่มตัวเลขเพื่อใช้แทนระยะเวลาของงานที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานไม่คงที่ภายใต้ข้อมูลที่ได้อาจการเก็บข้อมูลจริง เพื่อจำลองว่าหากดำเนินโครงการฯ ซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง จะมีผลออกมาอย่างไร มีสายงานใดบ้างที่เป็นสายงานวิกฤต เพื่อใช้หาแนวทางในการลดระยะเวลาของโครงการฯ ต่อไป

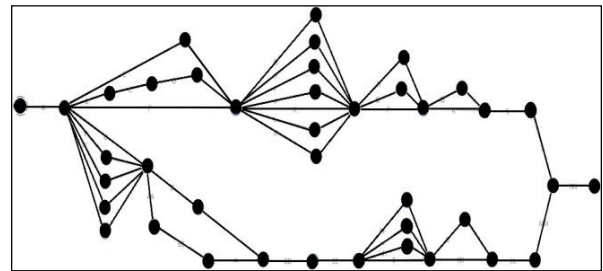
2. ความเป็นมาของการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล

เทคนิควิธีมอนติคาร์โลมีการนำมาใช้งานตั้งแต่ช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 17 แต่ถูกพัฒนาอย่างจริงจังในปี ค.ศ. 1944 เพื่อใช้หาผลของการแพร่อย่างสุ่มของนิวตรอนในวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของโครงการแมนฮัตตัน ซึ่งเป็นโครงการวิจัยและสร้างระเบิดปรมาณู ส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นในระหว่างการวิจัย โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง และสร้างตัวแปรจากตัวเลขสุ่ม (Random Number) ให้มีความคล้ายคลึงกับสถานการณ์จริงและดำเนินการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอน นำมาใช้เป็นตัวแทนเพื่ออธิบายข้อสรุปหรือปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ผลลัพธ์ที่ได้มีความไม่แน่นอนซึ่งในปัจจุบันสามารถใช้งานได้ง่ายเนื่องจากสามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งได้ การใช้การจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลมาสร้างแบบจำลองจะทำให้แบบจำลองที่ได้เป็นแบบจำลองสถานการณ์ความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นวิธีพยากรณ์เชิงปริมาณที่มีการแจกแจงแบบไม่ต่อเนื่อง เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในโครงการหรือระบบงานที่มีลักษณะไม่แน่นอน Hammersley, J.M. & Handcomd, D.C. (1964) [1]

ศศิพร (2559) [2] ทำการศึกษาการกำหนดนโยบายวัตถุดิบคงคลังที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล กรณีศึกษา บริษัทเคมีภัณฑ์ทำความสะอาดและเคมีภัณฑ์สำหรับระบบบำบัดน้ำ เพื่อหานโยบายการจัดการวัตถุดิบคงคลังที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมต่ำที่สุด ซึ่งจากการจำลองสถานการณ์และประมวลผลพบว่านโยบายแบบใหม่ที่ปรับปรุงจากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ข้อมูลจากนโยบายแบบเก่าสามารถลดต้นทุนรวมได้ถึง 11.04% โดยไม่เกิดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบ

3. การประมาณการระยะเวลาการย้ายและติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินด้วยเทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล

ดำเนินการศึกษาข้อมูลทั่วไปรวมทั้งเก็บข้อมูลของโครงการฯ ที่ผ่านมา สามารถจัดเรียงกิจกรรมรวมทั้งเขียนแผนงานของโครงการฯ ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบแผนงานของโครงการฯ ที่ได้หลังจากจัดเรียงกิจกรรมตามเงื่อนไขของแต่ละกิจกรรม

จากแผนงานของโครงการฯ ที่ได้พบว่าแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

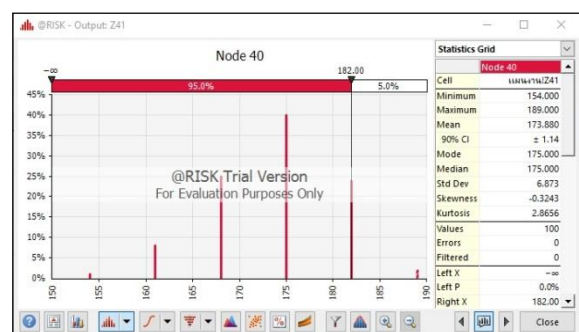
1. ส่วนของงานย้ายและติดตั้งระบบสายพาน (สายงานเส้นบนในรูปที่ 1)
2. ส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องม่ถ่าน (สายงานเส้นล่างในรูปที่ 1)

หลังจากนั้นนำเทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลมาใช้ประมวลผลระยะเวลาของโครงการฯ โดยหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมของกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ในแต่ละครั้ง รวมทั้งตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลและนำค่าที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นซึ่งในที่นี้ใช้โปรแกรม @risk ในการประมวลผลข้อมูล ซึ่งจะได้ลักษณะของข้อมูลตามรูปที่ 2

รหัส	งานก่อนหน้า	Mean	SD	Curve	T@risk	1				RiskSintab
A	-	14			14	14.01	Node 1	0		0
B	A	4.67	1.69	Lognormal	4.67	4.67	Node 2	14		14.01
C	B	7			7	7	Node 3	4		4
D	C	4.5	2.49	Lognormal	4.5	4.5	Node 4	14		14
E	A	8.94	3.41	Lognormal	8.94	8.94	Node 5	7		7
F	A	15.3	7.36	Weibull	7.111689	7.111689	Node 6	15.6		15.6
G	E, D, F	35			35	35	Node 7	29.6		29.61
H	E, D, F	7			7	7	Node 8	4.67		4.67
I	E, D, F	9.13	3.77	Lognormal	9.13	9.13	Node 9	7		7
J	E, D, F	18.7	19.9	Weibull	19.33942	19.33942	Node 10	4.5		4.5
K	E, D, F	11.7	9.26	Lognormal	11.7	11.7	Node 11	8.94		8.94
L	E, D, F	7			7	7	Node 12	30.17		30.18
M	E, D, F	8.17	3.5	Lognormal	8.17	8.17	Node 13	7		7
N	G, H, I, J, K, L, M	14			14	14	Node 14	14		14
O	G, H, I, J, K, L, M	14			14	14	Node 15	14		14

รูปที่ 2 ตัวอย่างลักษณะการจัดเก็บข้อมูลในแบบจำลองก่อนที่จะประมวลผลระยะเวลาของแผนงานของโครงการฯ

หลังจากให้โปรแกรมทำการประมวลผลระยะเวลาในการดำเนินงานของแผนงานของโครงการย้าย และติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินแล้ว ใน 1 รอบ ของการประมวลผล โปรแกรมจะทำการจำลองแผนงานฯ โดยในส่วนของกิจกรรมที่มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมที่ไม่คงที่ โปรแกรมจะทำการสุ่มเลือกระยะเวลาให้โดยอ้างอิงกับค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการกระจายตัวของข้อมูลนั้นๆ แล้วสรุปออกมาเป็นระยะเวลาที่ใช้ในแผนงานของโครงการฯ ดังนั้นในข้างต้นที่กำหนดให้ประมวลผลจำนวน 100 รอบ ก็จะได้ระยะเวลาของแผนงานของโครงการฯ 100 ครั้ง ซึ่งโปรแกรมก็จะสรุปออกมาได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟที่ได้จากการประมวลผลระยะเวลาของโครงการฯ

ซึ่งจากกราฟสรุปได้ว่าระยะเวลาที่ใช้สำหรับแผนงานของโครงการย้าย และติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ 189 ชั่วโมง (27 วัน), น้อยที่สุด 154 ชั่วโมง (22 วัน) และระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้คือ 174 ชั่วโมง (25 วัน) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 6.87 นอกจากนี้กราฟที่ได้ในรูปที่ 3 แล้ว โปรแกรมยังระบุกิจกรรมวิกฤตที่เกิดขึ้นภายในโครงการฯ ตามรูปที่ 4

@RISK Detailed Statistics					
Name	Description	Cell	Minimum	Maximum	Mean
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#21)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#22)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#23)	แผนงาน!G43	0	0.01	0.0032
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#24)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#25)	แผนงาน!G43	0	0.01	0.0068
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#26)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#27)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#28)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#29)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#30)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#31)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#32)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#33)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#34)	แผนงาน!G43	0	0.01	0.0025
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#35)	แผนงาน!G43	0	0.01	0.0075
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#36)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#37)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#38)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#39)	แผนงาน!G43	0	0	0
Diff / RiskSimtable	Output (Sim#40)	แผนงาน!G43	0.01	0.01	0.01

รูปที่ 4 กิจกรรมวิกฤตที่ได้จากการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากรูปที่ 3 กราฟที่ได้นั้น ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่า จากการสุ่มระยะเวลาการดำเนินงานของโครงการฯ จำนวน 100 ครั้ง มีระยะเวลาเฉลี่ยในการดำเนินโครงการฯ อยู่ที่ 174 ชั่วโมง (25 วัน) มีโอกาสที่จะใช้ระยะเวลาในการดำเนินโครงการอยู่ระหว่าง 154 ชั่วโมง (22 วัน) ถึง 182 ชั่วโมง (26 วัน) อยู่ที่ 95% และมีโอกาสที่จะใช้ระยะเวลาในการดำเนินโครงการมากกว่านี้ (182 ชั่วโมง) เพียง 5% และจากแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นที่ความเชื่อมั่น 95% สามารถคำนวณหาช่วงของระยะเวลาดำเนินการของโครงการได้จาก

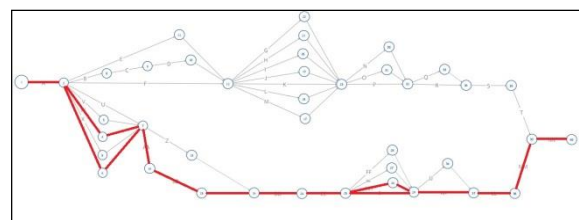
$$\text{Half Width} = t_{(\alpha/2, n-1)} s / n^{1/2}$$

โดย $t_{(\alpha/2, n-1)} = 1.98$ (คำนวณจาก Excel)
 $s = 6.87$ (จากการประมวลผล)
 $n = 99$
 จะได้ Half Width = 1.37

จากค่า Half Width ที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก แสดงว่าการสุ่มจำนวน 100 ครั้งมีความเหมาะสม ดังนั้นจากการคำนวณจะได้ช่วงของระยะเวลาดำเนินการของโครงการมีค่าเป็น 173.88 ± 1.37 หรือมีค่าอยู่ระหว่าง

172.51 ถึง 175.25 ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่า ถ้าในกระบวนการทำงานของโครงการฯ มีความผิดปกติเกิดขึ้น ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ มากที่สุดไม่เกิน 175.25 ชั่วโมง และขณะเดียวกันค่าเฉลี่ยของระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ น้อยที่สุดไม่เกิน 172.51 ชั่วโมง

เมื่อนำกิจกรรมวิกฤตที่ได้จากการประมวลผลโดยโปรแกรมมาเขียนลงในแผนงานจะได้ลักษณะของแผนงานตามรูปที่ 5

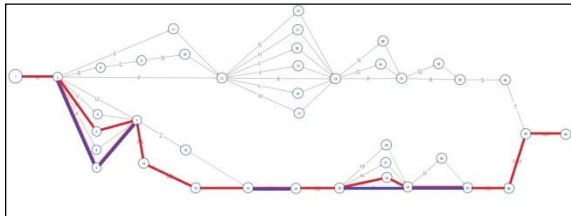


รูปที่ 5 รูปแบบสายงานวิกฤตของโครงการฯ

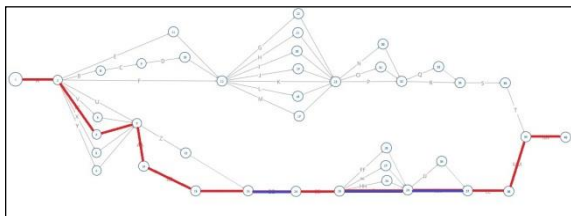
จากรูปที่ 5 ทำให้ทราบได้ว่ากิจกรรมวิกฤตนั้นอยู่ในส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน ดังนั้นในเบื้องต้นหากต้องการที่จะลดระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ ต้องปรับระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมวิกฤตที่มีระยะเวลาในการดำเนินงานไม่คงที่ ให้ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมลดลง เริ่มจากการดำเนินการตรวจสอบกิจกรรมต่างๆ ในส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่านซึ่งมีทั้งหมดจำนวน 13 กิจกรรม ซึ่งเป็นกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมคงที่จำนวน 9 กิจกรรม และเป็นกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่จำนวน 4 กิจกรรม ซึ่งจะเห็นได้ว่าในโครงการที่มีกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่นั้น สามารถเกิดกิจกรรมวิกฤตและสายงานวิกฤตได้มาก เพราะสายงานวิกฤตจะخابไปตามกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมมากที่สุดของโครงการนั้นๆ ดังนั้นหากเป็นโครงการที่มีขนาดใหญ่และมีกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่จำนวนมากๆ การหาสายงานวิกฤตก็จะทำได้ยาก และสายงานวิกฤตที่ได้ก็ไม่สามารถใช้ในการอ้างอิงระยะเวลาของ

โครงการนั้นๆ ในครั้งต่อไปได้อีก ทั้งนี้จำนวนกิจกรรมวิกฤตที่หาได้ในแต่ละครั้งอาจมีความแตกต่างกัน เมื่อนำไปใช้ในการวางแผนการดำเนินงานของโครงการ จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น

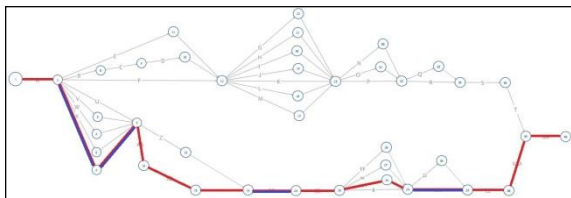
การใช้แบบจำลองที่อ้างอิงเทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลกับโครงการฯ ผลที่ได้คือสายงานวิกฤตอยู่ในส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน มีกิจกรรมวิกฤตจำนวน 13 กิจกรรม มี 4 กิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ และจาก 4 กิจกรรมดังกล่าว มี 2 กิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมซ้อนทับกิจกรรมอื่น ซึ่งมีผลต่อสายงานวิกฤตสามารถทำให้สายงานวิกฤตเกิดขึ้นได้ถึง 4 รูปแบบดังนี้



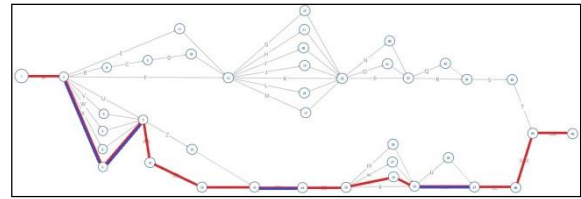
รูปที่ 6 รูปแบบสายงานวิกฤตแบบที่ 1



รูปที่ 7 รูปแบบสายงานวิกฤตแบบที่ 2



รูปที่ 8 รูปแบบสายงานวิกฤตแบบที่ 3



รูปที่ 9 รูปแบบสายงานวิกฤตแบบที่ 4

ดังนั้นหากต้องการลดระยะเวลาดำเนินงานของโครงการฯ จะต้องปรับปรุงสายงานวิกฤตทั้ง 4 สายงานในข้างต้นให้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมน้อยที่สุด โดยเบื้องต้นควรเริ่มจากปรับปรุงในส่วนของกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้การดำเนินงานของโครงการฯ แต่ละครั้งใช้ระยะเวลาไม่เท่ากัน

4. การปรับปรุงประสิทธิภาพการย้ายและติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินลิกไนต์ (เฉพาะในส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน)

จากแบบจำลองทำให้ได้ระยะเวลาการทำงานของโครงการที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ 189 ชั่วโมง (27 วัน) และมีระยะเวลาเฉลี่ยที่ 174 ชั่วโมง (25 วัน) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เป็นไปได้มากที่สุดของการดำเนินโครงการฯ โดยที่ไม่ได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนวิธีการใดๆ อีกทั้งยังสามารถลดระยะเวลาของโครงการฯ ได้อีกหากมีการปรับเปลี่ยนวิธีการดำเนินงานของแต่ละกิจกรรม เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างทำให้ทราบถึงเวลาที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้คือ 154 ชั่วโมง (22 วัน)

เนื่องจากโครงการฯ นี้มีงานอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนของงานย้ายและติดตั้งระบบสายพาน และส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน และจากข้อมูลกิจกรรมหลายกิจกรรมในโครงการฯ มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่จึงมีโอกาสที่สายงานวิกฤตจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการดำเนินโครงการฯ แต่ละครั้ง

ในส่วนของการวิจัยนี้จะขอเสนอการลดระยะเวลาของโครงการฯ ในส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน เนื่องจากเป็นสายงานวิกฤตที่เกิดขึ้นจริงในปัจจุบันซึ่ง

จะใช้ 3 วิธีในการปรับปรุงระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ ประกอบด้วย

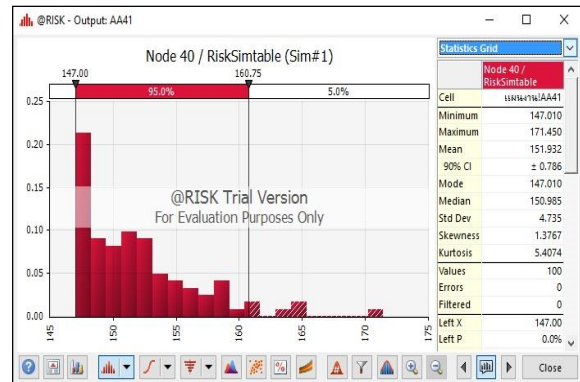
1. ปรับปรุงระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมที่เป็นกิจกรรมวิกฤตที่มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่
2. ขยายบางกิจกรรมที่อยู่ในสายงานวิกฤตที่สามารถดำเนินงานก่อนหรือหลังการดำเนินงานของโครงการฯ ออกจากแผนงานของโครงการฯ
3. ปรับปรุงการดำเนินงานของโครงการฯ โดยการซื้อเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถดำเนินงานโดยใช้ระยะเวลาน้อยกว่าเดิมและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3. ปรับปรุงการดำเนินงานของโครงการฯ โดยการซื้อเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เพิ่มเติม เพื่อให้สามารถดำเนินงานโดยใช้ระยะเวลาน้อยกว่าเดิมและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4.1 ลดระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมวิกฤตที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ซึ่งประกอบด้วย 4 กิจกรรม (ข้อมูลได้จากการประมวลผลของแบบจำลอง) โดยจะดำเนินการปรับระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมของ 4 กิจกรรม

- ปรับพื้นที่บริเวณที่ติดตั้ง Crusher เดิม
- ยก Truck Ramp ติดตั้ง
- ติดตั้ง CR ใหม่ พร้อมอุปกรณ์
- ปูพื้นคอนกรีตใต้ CR

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลพบว่าสามารถปรับบางกิจกรรมให้ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมน้อยลงได้ ซึ่งเมื่อได้ระยะเวลาของกิจกรรมที่ปรับแล้ว จะนำไปใช้ในแบบจำลองอีกครั้ง และเมื่อประมวลผลข้อมูลจะได้ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เป็นดังรูปที่ 10



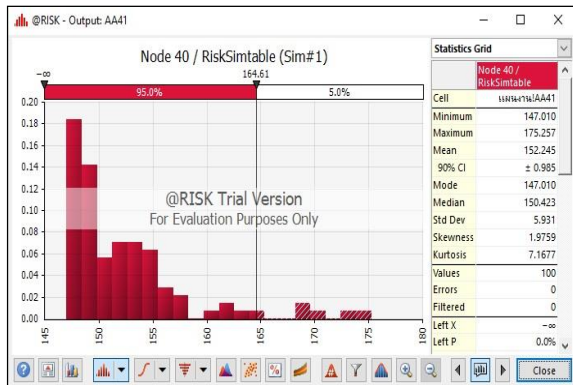
รูปที่ 10 ข้อมูลการลดระยะเวลาของโครงการฯ โดยปรับเวลาเฉพาะกิจกรรมวิกฤตจำนวน 4 กิจกรรม

พบว่าระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มากที่สุดคือ 171 ชั่วโมง (25 วัน), น้อยที่สุด 147 ชั่วโมง (21 วัน) และระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้คือ 152 ชั่วโมง (22 วัน) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 4.725 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมตามข้างต้นแล้วทำให้ช่วงของระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมเปลี่ยนไป โดยมีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาน้อยลง ซึ่งจากการจำลอง 100 ครั้ง มีการใช้เวลา 147 ชั่วโมง (21 วัน) มากครั้งที่ที่สุด

4.2 ลดระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมวิกฤตที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ในส่วนของการย้ายเครื่องม่ถ่านซึ่งประกอบด้วย 6 กิจกรรม

- ถอดรื้อระบบไฟฟ้าผสมถ่าน
- ปรับพื้นที่บริเวณที่ติดตั้ง Crusher เดิม
- ยก Truck Ramp ติดตั้ง
- ติดตั้ง CR ใหม่ พร้อมอุปกรณ์
- ปูพื้นคอนกรีตใต้ CR
- Function Route Controller Test

โดยจะมีการปรับระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมเพิ่มจากที่เดิมอีก 2 กิจกรรม (ซึ่งทั้งหมดเป็นกิจกรรมที่มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่) ซึ่งเมื่อได้ระยะเวลาของกิจกรรมที่ปรับแล้วจะนำไปใช้ในแบบจำลอง และเมื่อประมวลผลข้อมูลจะได้ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เป็นดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ข้อมูลการลดระยะเวลาของโครงการฯ โดยปรับ
เวลาเฉพาะกิจกรรมวิกฤตจำนวน 6 กิจกรรม

พบว่าระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มากที่สุดคือ 175 ชั่วโมง (25 วัน), น้อยที่สุด 147 ชั่วโมง (21 วัน) และระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้คือ 153 ชั่วโมง (22 วัน) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 5.931 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมตามข้างต้นแล้วทำให้ช่วงของระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมเปลี่ยนไป โดยมีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาน้อยลง ซึ่งจากการจำลอง 100 ครั้ง มีการใช้เวลา 147 ชั่วโมง (21 วัน) มากครั้งที่สูงสุดการปรับระยะเวลาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ มีความใกล้เคียงกับการลดระยะเวลาในข้อ 4.1 ซึ่งสรุปได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมวลผล
ระยะเวลาของการดำเนินงานของโครงการฯ

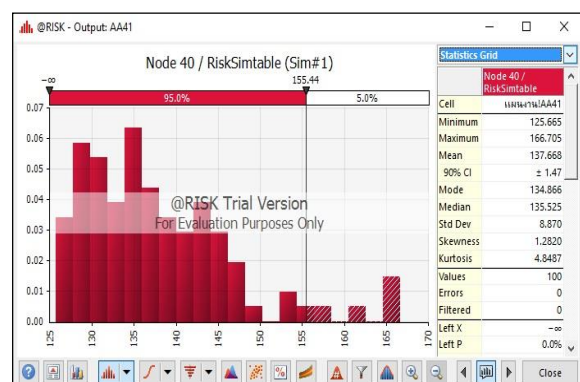
รายการ (ระยะเวลา)	ปรับ 4 กิจกรรม ชั่วโมง (วัน)	ปรับ 6 กิจกรรม ชั่วโมง (วัน)
มากที่สุด	171 (25)	175 (25)
น้อยที่สุด	147 (21)	147 (21)
เฉลี่ย	152 (22)	153 (22)
ส่วนได้มากที่สุด	147 (21)	147 (21)
Max. ที่ความ เชื่อมั่น 95%	161 (23)	165 (24)

จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้บริหารโครงการสามารถเลือกที่จะใช้วิธีใดก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในด้านต่างๆ แต่ด้วยเป้าหมายที่ต้องการลดระยะเวลาในการดำเนินโครงการให้ได้มากที่สุด จึงควรที่จะปรับระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมของทุกๆ กิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาไม่คงที่ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการดำเนินงานของโครงการฯ ต่อไป

4.3 นำบางกิจกรรมในส่วนของการโยกย้ายเครื่องไม่ถ่าน ที่สามารถดำเนินการก่อนหรือหลังได้ออกจากสายงาน วิกฤตจำนวน 5 กิจกรรม

- ปรับพื้นที่บริเวณที่ติดตั้ง Crusher เดิม
- ขนย้ายและประกอบ Boom Crane 150 ตัน
- ถอดแยกและขนย้าย Boom Crane 150 ตันฯ
- ปูพื้นคอนกรีตได้ CR
- เคลียร์เศษวัสดุ

โดยจะนำกิจกรรมทั้ง 5 ออกจากแผนงานของโครงการฯ และปรับค่าในแบบจำลอง และเมื่อประมวลผลข้อมูลจะได้ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เป็นดังรูปที่ 12



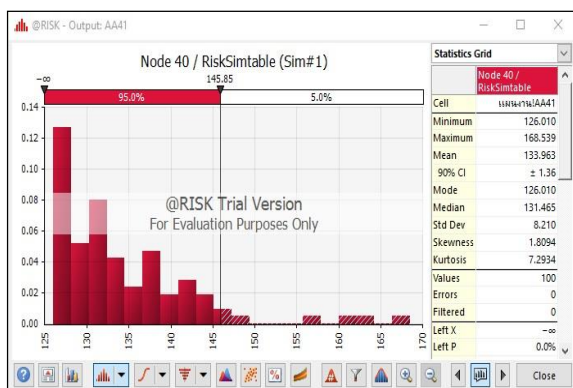
รูปที่ 12 ข้อมูลการลดระยะเวลาของโครงการฯ โดยตัด
กิจกรรมที่สามารถดำเนินการนอกโครงการฯ ได้
ออกจากโครงการฯ จำนวน 5 กิจกรรม

พบว่า ระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มากที่สุดคือ 167 ชั่วโมง (24 วัน), น้อยที่สุด 126 ชั่วโมง (18 วัน) และระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้คือ 137 ชั่วโมง (20 วัน) มีค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 8.870 ซึ่งเมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมตามข้างต้นแล้วทำให้ช่วงของระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมเปลี่ยนไป โดยมีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาน้อยลง ซึ่งจากการจำลอง 100 ครั้ง มีการใช้เวลา 135 ชั่วโมง (20 วัน) มากครั้งที่สุด

4.4 ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมวิกฤตที่ใช้ระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ในส่วนของการย้ายเครื่องม้อ่านซึ่งประกอบด้วย 6 กิจกรรม และนำบางกิจกรรมในส่วนของการย้ายเครื่องม้อ่านที่สามารถดำเนินการก่อนหรือหลังได้ออกจากสายงานวิกฤต

เมื่อดำเนินการตามข้างต้นจะได้ข้อมูลในแบบจำลอง และเมื่อประมวลผลข้อมูลจะได้ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เป็นดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ข้อมูลการกระจายระยะเวลาของโครงการฯ

โดยปรับระยะเวลาของกิจกรรมจำนวน 6 กิจกรรม และปรับบางกิจกรรมออกจำนวน 5 กิจกรรม

พบว่า ระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มากที่สุด คือ 169 ชั่วโมง (25 วัน), น้อยที่สุด 126 ชั่วโมง (18 วัน) และระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้คือ 134 ชั่วโมง (20 วัน) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 8.210 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมตามข้างต้นแล้วทำให้ช่วงของระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมเปลี่ยนไป โดยมีแนวโน้มที่จะใช้ระยะเวลาน้อยลง ซึ่งจากการจำลอง 100 ครั้ง มีการใช้เวลา 126 ชั่วโมง (18 วัน) มากครั้งที่สุด

การปรับระยะเวลาในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ มีความใกล้เคียงกับการลดระยะเวลาในข้อ 4.3 ซึ่งสรุปได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมวลผลระยะเวลาของการดำเนินงานของโครงการฯ

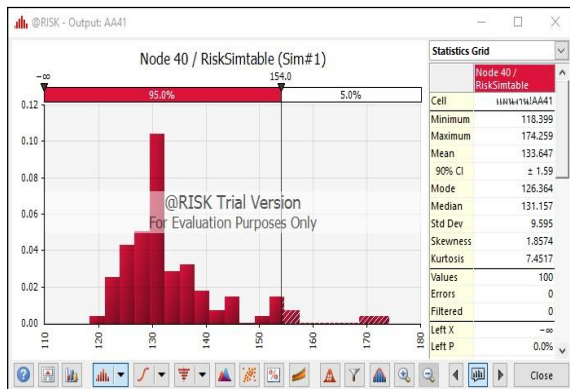
รายการ (ระยะเวลา)	นำกิจกรรมออก 5 กิจกรรม ชั่วโมง (วัน)	ปรับและนำออก 5 กิจกรรม ชั่วโมง (วัน)
มากที่สุด	167 (24)	169 (25)
น้อยที่สุด	126 (18)	126 (18)
เฉลี่ย	137 (20)	134 (20)
สูงที่สุด	135 (20)	126 (18)
Max. ที่ความ เชื่อมั่น 95%	156 (23)	146 (21)

จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้บริหารโครงการสามารถเลือกที่จะใช้วิธีใดก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในด้านต่างๆ แต่ด้วยเป้าหมายที่ต้องการลดระยะเวลาในการดำเนินโครงการให้ได้มากที่สุด จึงควรที่จะปรับระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมของทุกๆ กิจกรรมที่ใช้ระยะเวลาไม่คงที่และนำบางกิจกรรมที่สามารถดำเนินการก่อนหรือหลังโครงการฯ ออกจากการดำเนินงานของโครงการฯ เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการดำเนินงานของโครงการฯ ต่อไป

4.5 ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ โดยการจัดซื้อเครื่องม้อ่านเพิ่ม

การจัดซื้อเครื่องม้อ่านเพิ่มจะทำให้สามารถดำเนินการย้ายเครื่องม้อ่านไปยังบริเวณทำงานใหม่ได้ก่อนที่จะดำเนินโครงการฯ (ดำเนินการติดตั้งก่อนหยุดระบบสายพาน) ซึ่งเมื่อดำเนินการตามข้างต้นและนำข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในแบบจำลอง โดยกำหนดระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมของกิจกรรมในส่วนของการย้ายเครื่องม้อ่านเป็น 0 ชั่วโมง

เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาใช้ในแบบจำลอง โดยกำหนดระยะเวลาของกิจกรรมในส่วนงานของโครงไม่ถ่านให้เป็น 0 ชั่วโมง (นำออกจากแผนงาน) และเมื่อประมวลผลข้อมูลจะได้ระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ เป็นดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ข้อมูลการลดระยะเวลาของโครงการฯ โดยปรับระยะเวลาของกิจกรรมในส่วนงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่านเมื่อดำเนินการซื้อเครื่องไม่ถ่านเพิ่ม

พบว่า ระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มากที่สุดคือ 174 ชั่วโมง (25 วัน), น้อยที่สุด 119 ชั่วโมง (17 วัน) และระยะเวลาเฉลี่ยที่ต้องใช้คือ 134 ชั่วโมง (20 วัน) มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 9.595 ซึ่งจากการจำลอง 100 ครั้ง มีการใช้เวลา 127 ชั่วโมง (19 วัน) มากครั้งที่สุด

การปรับระยะเวลาในครั้งนี้จะต้องมีการลงทุนซื้อเครื่องไม่ถ่านเพิ่มเติมซึ่งมีมูลค่าประมาณ 100 ล้านบาท เมื่อนำระยะเวลาที่ได้จากการประมวลผลโดยแบบจำลองมาเทียบกับการลดระยะเวลาในข้อ 4.4 ซึ่งสรุปได้ตามตารางที่ 3

จะเห็นว่าระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แต่การซื้อเครื่องไม่ถ่านเพิ่มจะทำให้เกิดข้อดีในด้านอื่นๆ ตามมานอกจากสามารถดำเนินโครงการฯ ได้เร็วขึ้น เช่น ประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ดีขึ้น สามารถนำเครื่องไม่ถ่านเข้าซ่อมบำรุงได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านระยะเวลา ลดปัญหาเครื่องไม่ถ่านชำรุด ทั้งนี้หากนำไปวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมโดยใช้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิอัตรา

ผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน จะได้มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิ 76.74 ล้านบาท ซึ่งมีค่าเป็นบวก มีอัตราผลตอบแทนภายในอยู่ที่ 5% ซึ่งมากกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินฝาก และมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 16 ปี ซึ่งคืนทุนก่อนที่เครื่องไม่ถ่านจะหมดอายุการใช้งาน ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าการซื้อเครื่องไม่ถ่านเพิ่มก็เป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ หากต้องการที่จะลดระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการประมวลผลระยะเวลาของการดำเนินงานของโครงการฯ

รายการ (ระยะเวลา)	ปรับและนำออก 5 กิจกรรม ชั่วโมง (วัน)	ซื้อเครื่องไม่ถ่าน เพิ่ม ชั่วโมง (วัน)
มากที่สุด	169 (25)	174 (25)
น้อยที่สุด	126 (18)	119 (17)
เฉลี่ย	134 (20)	134 (20)
สุ่มได้มากที่สุด	126 (18)	127 (19)
Max. ที่ความ เชื่อมั่น 95%	146 (21)	154 (22)

ทั้งนี้จากแบบจำลองตามข้อ 4.4 ที่ความเชื่อมั่น 95% สามารถคำนวณหาช่วงของระยะเวลาดำเนินการของโครงการได้จาก

$$\text{Half Width} = t_{(\alpha/2, n-1)} s / n^{1/2}$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } t_{(\alpha/2, n-1)} &= 1.98 \text{ (คำนวณจาก Excel)} \\ s &= 8.21 \text{ (จากการประมวลผล)} \\ n &= 99 \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ Half Width} = 1.64$$

จากค่า Half Width ที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก แสดงว่าการสุ่มจำนวน 100 ครั้งมีความเหมาะสม ดังนั้นจากการคำนวณจะได้ช่วงของระยะเวลาดำเนินการของโครงการมีค่าเป็น 133.96 ± 1.64 หรือมีค่าอยู่ระหว่าง 132.32 ถึง 135.60 ชั่วโมง

5. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยพบว่าการสร้างแบบจำลองโดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลโดยใช้โปรแกรม @risk สามารถใช้ในการประมาณระยะเวลาการดำเนินงานของโครงการฯ ซึ่งมีกิจกรรมในโครงการฯ ที่มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ได้ อีกทั้งยังสามารถทราบถึงสายงานและกิจกรรมวิกฤต และเมื่อนำกิจกรรมวิกฤตที่ได้ไปปรับระยะเวลาในการดำเนินงานพบว่าสามารถลดระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการลงได้โดยไม่ต้องปรับลดระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมที่มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่ทั้งหมด ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการอื่นๆ ที่มีกิจกรรมจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถปรับลดระยะเวลาในการดำเนินงานได้ทั้งหมด จากการประมวลผลพบว่าวิธีที่ดีที่สุดในการลดระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ คือ การปรับลดระยะเวลาในการดำเนินงานของกิจกรรมที่มีระยะเวลาในการดำเนินกิจกรรมไม่คงที่และนำบางกิจกรรมที่สามารถตัดออกจากโครงการฯ ได้ออกไป (ในส่วนของงานย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่าน) ซึ่งเมื่อจำลองระยะเวลาจากการประมวลผล 100 ครั้งพบว่า ระยะเวลาในการดำเนินโครงการฯ มากที่สุดคือ 169 ชั่วโมง (25 วัน), น้อยที่สุด 126 ชั่วโมง (18 วัน) มีการใช้เวลา 126 ชั่วโมง (18 วัน) มากครั้งที่สุด และระยะเวลาเฉลี่ยที่ความเชื่อมั่น 95% จะมีค่าอยู่ระหว่าง 132.32 ถึง 135.60 ชั่วโมง

6. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการในส่วนของการย้ายและติดตั้งเครื่องไม่ถ่านเท่านั้น ซึ่งเมื่อดำเนินการแล้วจะทำให้สายงานและกิจกรรมวิกฤตย้ายไปอยู่ในส่วนของงานย้ายและติดตั้งระบบสายพาน ซึ่งจะมีข้อจำกัดในการดำเนินกิจกรรมแตกต่างกันไป ดังนั้นหากต้องการปรับลดระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการฯ ให้ได้มากที่สุดต้องดำเนินการในส่วนของการย้ายและติดตั้งระบบสายพานลำเลียงด้วย อีกทั้งหากต้องการให้ระยะเวลาในการดำเนินการของโครงการฯ ลดลงอีกสามารถเร่งโครงการฯ ได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการทำงาน (ล่วงเวลา) เนื่องจากการวิจัยนี้คือระยะเวลาในการทำงานปกติของ กฟผ. ซึ่งอยู่ที่ 7 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นหากมีการเพิ่มระยะเวลาในการทำงานของแต่ละวัน จะทำให้ระยะเวลาโดยรวมของโครงการฯ (คิดเป็นวัน) ลดลงไปอีก

7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการ กฟผ.-มช., การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูลระยะเวลาในการดำเนินงานของโครงการย้าย และติดตั้งระบบสายพานลำเลียงถ่านหินลิกไนต์เพื่อทำการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hammersley, J.M. and Handcomd, D.C. Monte Carlo Method. Chapman and Hall Ltd., London, 1964.
- [2] ศศิพร สร้อยระย้า. การกำหนดนโยบายวัตถุดิบคงคลังที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล กรณีศึกษา บริษัทเคมีภัณฑ์ทำความสะอาดและเคมีภัณฑ์สำหรับระบบบำบัดน้ำ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2559; 23(2): 47-59.

การประเมินประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็ว แบบอัตโนมัติบนเส้นทางเขา Performance Evaluation of Automatic Speed Enforcement Camera on Mountainous Road

ชนิดา ใสสุทธา* และ นพดล กรประเสริฐ

Chanida Saisuksaard* 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 : toon_m_@hotmail.com, Telephone: 086-9145651

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพมาตรการการควบคุมความเร็วของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติสำหรับผู้ขับขี่บนเส้นทางในเขตทางเขา ทางหลวงหมายเลข 118 เส้นทางเชียงราย-เชียงใหม่ ช่วงถนนคอยนางแก้ว-คอยสะเก็ด ซึ่งมีการติดตั้งระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติตลอดสายทาง ระยะทาง 36 กิโลเมตร จำนวน 5 จุด เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุทางถนน งานวิจัยนี้ได้แบ่งการประเมินประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การประเมินสำรวจความเร็วของผู้ขับขี่ก่อนและหลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติเป็นระยะเวลา 1 เดือน และการประเมินปัจจัยด้านจิตวิทยาของผู้ขับขี่ที่มีผลต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่บนเส้นทางเขาตามทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน โดยใช้แบบสอบถาม จากผลการศึกษา พบว่า มาตรการการควบคุมความเร็วด้วยกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ ทำให้ผู้ขับขี่ใช้ความเร็วในการขับขี่ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยภายหลังการติดตั้งระบบ ๑ ความเร็วของรถยนต์ส่วนบุคคล ลดลงร้อยละ 7.7 และความเร็วของรถโดยสาร ลดลงร้อยละ 8.8 และเมื่อวิเคราะห์ปัจจัยด้านจิตวิทยาของผู้ขับขี่ที่มีผลต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็ว พบว่า ปัจจัยการรับรู้ความสามารถในการควบคุมพฤติกรรมมีผลมากที่สุดต่อการใช้ความเร็วบนทางเขา ดังนั้นมาตรการการบังคับใช้กฎหมายโดยอาศัยการควบคุมความเร็วด้วยกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ นับเป็นการปิดโอกาสให้ผู้ขับขี่สามารถแสดงพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้ผู้ขับขี่มีความตั้งใจลดความเร็วในการขับขี่ลง

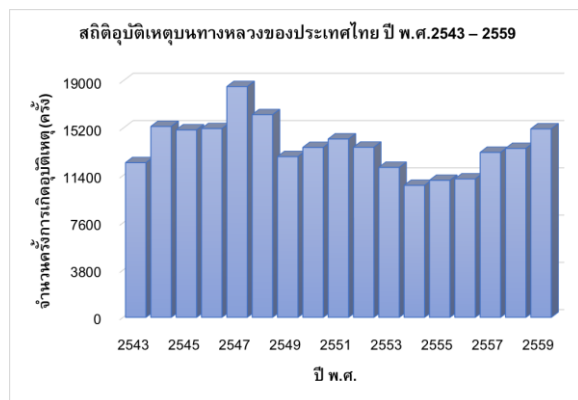
ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the performance of speed control measure by the use of automatic speed enforcement cameras along Highway 118 (Chiang Rai - Chiang Mai). Five cameras were installed along the 36-kilometer road section between Doi Nangkaew and Doi Saked to reduce the risk of road traffic accidents. This study is divided into two-folds. Part one investigates the driving speed during 1-month before and 1-month after the installation of automatic speed enforcement cameras. Part two examines the psychological factors that most influence driving speed on mountain roads using the Theory of Planned Behavior. The statistical results showed that automatic speed cameras can significantly reduce the speed of vehicles. The average driving speed of passenger cars is reduced by 7.7%, while that of buses is reduced by 8.8%. Further, the analytical results

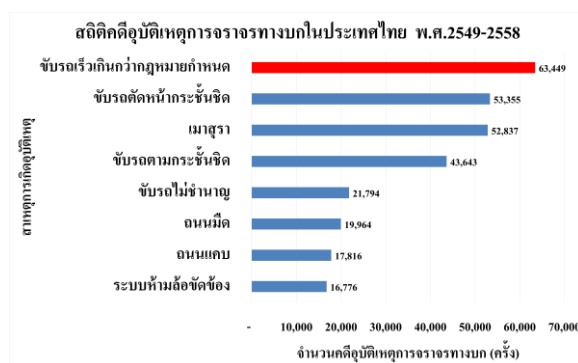
revealed that the most influential psychological factor toward speeding behavior is the Perceived Behavioral Control, which indicates that drivers on this mountainous road overspeed whenever it is possible and they can perceive such risks. Therefore, the proposed speed control measure using automatic speed enforcement cameras is the proper measure to close the opportunity gap of the driving risks. This results in the safe driving intention to follow the speed control.

1. บทนำ

สำนักงานอำนวยการความปลอดภัยของกรมทางหลวงได้สรุปสถิติอุบัติเหตุบนทางหลวงของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 ถึง พ.ศ. 2559 พบว่า จำนวนครั้งของการเกิดอุบัติเหตุมีมากกว่า 10,000 ครั้งต่อปี [1] ซึ่งถือว่าเป็นอัตราการเกิดอุบัติเหตุที่สูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 และในหลายปีที่ผ่านมา สาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุบนทางหลวงสูงที่สุด มาจากการขับรถเร็วเกินอัตราที่กำหนด ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของสำนักงานตำรวจแห่งชาติ [2] พบว่า สาเหตุของคดีอุบัติเหตุจราจรในประเทศไทยอันดับ 1 เกี่ยวกับการใช้ความเร็วเกินกว่ากฎหมายกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 สถิติอุบัติเหตุบนทางหลวงของประเทศไทย [1]



รูปที่ 2 สถิติสาเหตุอุบัติเหตุจราจรในประเทศไทย [2]

นอกจากนั้น จากระบบ HAIMS ของสำนักงานอำนวยการความปลอดภัย กรมทางหลวง ปี พ.ศ. 2557 [3] จำนวนการเสียชีวิตจากการใช้ความเร็วมีมากถึงร้อยละ 69 สอดคล้องกับการสำรวจความคิดเห็นผู้ขับขี่รถยนต์ โดยมูลนิธิไทยโรดส์และเครือข่าย [4] พบว่า 1 ใน 3 ของผู้ขับขี่รถยนต์ยอมรับว่าเคยขับรถเร็ว และร้อยละ 80 ขาดความรู้เกี่ยวกับอัตราความเร็วที่กฎหมายกำหนด ดังนั้น ปัญหาการใช้ความเร็วเกินอัตราที่กฎหมายกำหนด เป็นปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมาก

จังหวัดเชียงใหม่เป็นจังหวัดหนึ่งที่มีลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นภูเขาและป่าละเมาะ คิดเป็นร้อยละ 80 ของพื้นที่ จึงทำให้มีถนนที่ตัดผ่านภูเขาจำนวนมาก และบางเส้นทางเป็นเส้นทางสัญจรหลักระหว่างจังหวัด เช่น เส้นทางดอยสะเก็ด (เชียงใหม่ - เชียงราย) เส้นทางดอยขุนตาล (เชียงใหม่ - ลำปาง) และเส้นทางเชียงใหม่ - แม่ฮ่องสอน เป็นต้น ทำให้จังหวัดเชียงใหม่มีการเกิดอุบัติเหตุบนทางเขาขึ้นบ่อยครั้ง

เส้นทางทางหลวงหมายเลข 118 เชื่อมระหว่างดอยนางแก้ว-ดอยสะเก็ด (เชียงราย - เชียงใหม่) ดังแสดงในรูปที่ 3 ถูกจัดอันดับเป็นช่วงสายทางอันตรายที่ต้องใช้ความระมัดระวังในการขับขี่มาก ตามข้อมูลของสำนักงานอำนวยการความปลอดภัย กรมทางหลวง [5] ซึ่งเป็นสายทางที่มีค่าความลาดชันเกิน 7 เปอร์เซ็นต์ และเป็นทางโค้งต่อเนื่องระยะทางตั้งแต่ 3 กิโลเมตรขึ้นไป

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เกิดอุบัติเหตุรุนแรงครั้งใหญ่ 3 ครั้ง ได้แก่ ในปี พ.ศ. 2550 อุบัติเหตุคึกคะนองจากจังหวัดจันทบุรี มีผู้เสียชีวิต 21 ราย ต่อมาในปี พ.ศ. 2553 อุบัติเหตุรถบรรทุกชนนักเรียนจากจังหวัดพิจิตร มีผู้เสียชีวิต 3 ราย และบาดเจ็บจำนวนมาก และล่าสุดในปี พ.ศ. 2558 เกิดอุบัติเหตุรถบรรทุกชนนักท่องเที่ยวชาวมาเลเซีย มีผู้เสียชีวิต 14

รายและบาดเจ็บอีก 12 ราย จากข้อมูลอุบัติเหตุ พบว่าสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการใช้ความเร็วในการขับขี่ที่สูงและความไม่คุ้นชินเส้นทางของผู้ขับขี่ ทำให้ไม่สามารถควบคุมรถได้ในขณะขับขี่ นำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุ



รูปที่ 3 เส้นทางส่วนหนึ่งของทางหลวงหมายเลข 118

ในอดีตที่ผ่านมา เส้นทางทางหลวงหมายเลข 118 ได้มีการตั้งจุดตรวจจับความเร็วโดยเจ้าหน้าที่ในช่วงเทศกาลต่าง ๆ เช่น เทศกาลปีใหม่ เทศกาลสงกรานต์ เป็นต้น เพื่อลดปัญหาการเกิดอุบัติเหตุและการใช้ความเร็วที่สูง โดยในปี พ.ศ. 2559 ที่ผ่านมา ด้วยความร่วมมือของภาคีเครือข่ายความปลอดภัยทางถนน ในจังหวัดเชียงใหม่ได้นำเทคโนโลยีระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติมาติดตั้งเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบังคับใช้กฎหมายควบคุมความเร็วของผู้ขับขี่บนเส้นทางนี้ โดยได้ดำเนินการติดตั้งระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ จำนวนทั้งสิ้น 5 ตัว บริเวณจุดเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ ได้แก่ หลักกิโลเมตรที่ 50+400, 43+050, 35+800, 21+700 และ 15+600 ตามเส้นทางช่วงดอยนางแก้ว - ดอยสะเก็ด รวมระยะทาง 36 กิโลเมตร

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของมาตรการการควบคุมความเร็วของผู้ขับขี่ด้วยกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติบนถนนในเขตทางเขา เส้นทางทางหลวงหมายเลข 118 ดอยนางแก้ว - ดอยสะเก็ด (เชียงใหม่ - เชียงใหม่) โดยทำการสำรวจพฤติกรรมการใช้ความเร็วและทัศนคติเชิงจิตวิทยาที่มีผลต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วของผู้ขับขี่บนถนนทางเขา

เพื่อเป็นแนวทางในการเสนอแนะมาตรการควบคุมความเร็วในการขับขี่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วนตามส่วนงานของการศึกษา ได้แก่ การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่ และการศึกษาเกี่ยวกับทัศนคติที่มีผลต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการขับขี่

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการขับขี่ ครอบคลุมถึง นิยามของความเร็ว กฎหมายการใช้ความเร็วในการขับขี่บนทางหลวง การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วของยานพาหนะ เครื่องมืออุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว และระบบการทำงานของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

2.1.1 นิยามความเร็วของยานพาหนะและกฎหมายใช้ความเร็วบนทางหลวง

ความเร็วของยานพาหนะบนถนน [6, 7, 8] หมายถึง อัตราส่วนการเคลื่อนที่ในหน่วยระยะทางต่อเวลา สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$s = \frac{d}{t} \quad (1)$$

โดยที่ s = ความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
 d = ระยะทางที่เคลื่อนที่ (กิโลเมตร)
 t = เวลาที่ใช้ในการเดินทาง (ชั่วโมง)

โดยข้อมูลความเร็วของยานพาหนะบนถนน สามารถวัดประเมินได้ 2 วิธี ได้แก่ ค่าเฉลี่ยความเร็วที่จุด และค่าเฉลี่ยความเร็วที่รถแล่นผ่านพื้นที่ช่วงถนน

ความเร็วที่จุด คือความเร็วของยานพาหนะ ณ ขณะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งหรือจุดสังเกตในช่วงเวลาที่กำหนด ส่วนความเร็วที่รถแล่นผ่านพื้นที่ช่วงถนน คือความเร็วของยานพาหนะที่ครอบครองช่วงบริเวณที่พิจารณา โดยการวัดความเร็วของยานพาหนะด้วยกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติเป็นการวัดความเร็วที่จุด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

ส่วนการกำหนดขีดจำกัดความเร็วบนทางหลวงนั้น พระราชบัญญัติทางหลวง พ.ศ. 2535 [9] ได้กำหนดไว้ ดังนี้

- รถยนต์ หรือรถจักรยานยนต์ ให้ใช้ความเร็วไม่เกิน 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- รถยนต์ขณะที่ลากจูงรถพ่วง หรือรถยนต์สามล้อ ให้ใช้ความเร็วไม่เกิน 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
- รถบรรทุก และรถโดยสาร ให้ใช้ความเร็วไม่เกิน 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

2.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วของยานพาหนะ

การศึกษวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วมีความสำคัญในการออกแบบและประเมินทางหลวง การศึกษาความปลอดภัยของยานพาหนะ รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพของสิ่งอำนวยความสะดวกและมาตรการจำกัดความเร็ว โดยปกติจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลความเร็ว [10]

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการจำกัดความเร็ว โดยปกติจะอาศัยการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วของยานพาหนะก่อนและหลังการติดตั้งระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ โดยอาศัยการทดสอบสมมติฐานด้วยการทดสอบ t-test ว่าความเร็วของยานพาหนะของ 2 กลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (2)

$$t = \frac{\overline{X}_B - \overline{X}_A}{\sqrt{\frac{S_B^2}{N_B} + \frac{S_A^2}{N_A}}} \quad (2)$$

โดยที่ t = ค่าสถิติจากกลุ่มตัวอย่าง

$\overline{X}_B$ และ $\overline{X}_A$ = ความเร็วเฉลี่ยของชุดข้อมูลก่อนและหลังมีมาตรการจำกัดความเร็ว ตามลำดับ

S_B และ S_A = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลก่อนและหลังมีมาตรการจำกัดความเร็ว ตามลำดับ

N_B และ N_A = จำนวนข้อมูลความเร็วที่สำรวจก่อนและหลังมีมาตรการจำกัดความเร็ว ตามลำดับ

2.1.3 อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วยานพาหนะ

เครื่องมืออุปกรณ์ตรวจจับความเร็วยานพาหนะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการทำงาน ดังนี้

- อุปกรณ์ประเภทวัดความเร็วด้วยมือ (Manual Speed Measurement) ได้แก่ นาฬิกาจับเวลา กล้องวิดีโอ ปืนเรดาร์ ซึ่งมีข้อดี คือ ค่าใช้จ่ายไม่สูง สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน แต่ข้อเสีย คือ ความน่าเชื่อถือของการตรวจวัด ความถูกต้องแม่นยำของการตรวจวัด และระยะเวลาการปฏิบัติงานที่มีอยู่อย่างจำกัด โดยทั่วไปเจ้าหน้าที่จะใช้ปืนเรดาร์ในการสุ่มตรวจจับความเร็ว ซึ่งไม่สามารถตรวจจับได้หลายคันในเวลาเดียวกัน และไม่สามารถตรวจจับในเวลากลางคืนได้

- อุปกรณ์ประเภทวัดความเร็วแบบอัตโนมัติ (Automatic Speed Measurement) ได้แก่ กล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการตรวจจับความเร็วโดยกล้องจะบันทึกถ่ายภาพยานพาหนะ ประมวลผลความเร็วที่จับได้โดยอัตโนมัติ และส่งข้อมูลไปเก็บไว้ที่ชุดประมวลผลเพื่อทำการวิเคราะห์คัดกรองข้อมูล ซึ่งกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กล้องตรวจจับความเร็วแบบเคลื่อนที่ กล้องตรวจจับความเร็วแบบอยู่กับที่ และกล้องตรวจจับความเร็วแบบ 2 จุด

จะเห็นได้ว่า เครื่องมืออุปกรณ์ตรวจจับความเร็วยานพาหนะแบบวัดความเร็วอัตโนมัติ สามารถตรวจจับความเร็วได้ตลอดทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน และตรวจจับพร้อมกันได้หลายคันในหลายช่องจราจร

2.1.4 ระบบการทำงานของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติดังตัวอย่างที่ติดตั้งบนทางหลวงหมายเลข 118 ดอยนางแก้ว - ดอยสะเก็ด (เชียงใหม่ - เชียงใหม่) มีส่วนประกอบที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย

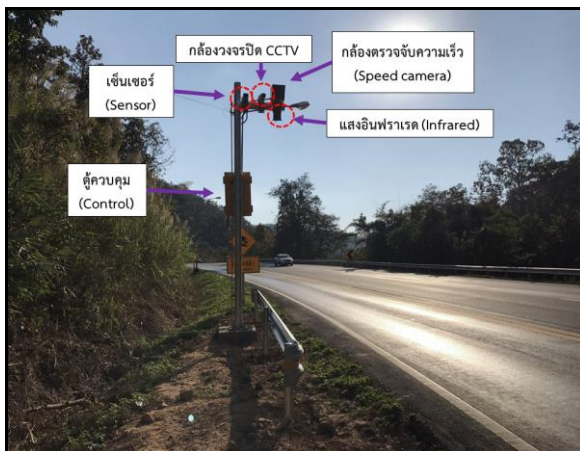
- กล้องตรวจจับความเร็ว (Speed camera) ทำหน้าที่จับภาพยานพาหนะ เพื่อประมวลค่าความเร็วของยานพาหนะ

- แสงอินฟราเรด (Infrared) ทำหน้าที่ช่วยปรับความสว่างของภาพระหว่างการตรวจจับความเร็วของยานพาหนะในช่วงกลางคืน เพื่อให้ภาพมีความคมชัดขึ้น

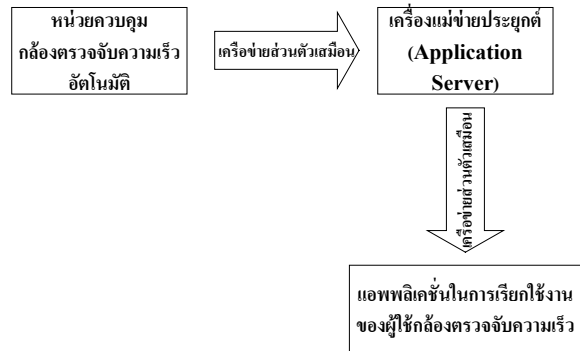
- กล้องบันทึกภาพ (CCTV) ทำหน้าที่ตรวจจับภาพของยานพาหนะที่แล่นผ่าน และจับภาพทะเบียนรถ (License plate) ด้วยระบบเซ็นเซอร์ (Sensors)

- ตัวควบคุมระบบตรวจจับความเร็ว (Control unit) ทำหน้าที่เก็บบันทึกข้อมูลเพื่อส่งต่อไปยังที่ควบคุม ซึ่งสามารถออกไปส่งต่อไป

ขั้นตอนการทำงานของระบบตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ แสดงไว้ดังรูปที่ 5 เริ่มจากหน่วยควบคุมกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ (Speed Enforcement Control Unit) ถ่ายบันทึกภาพด้วยเรดาร์ ส่งผ่านข้อมูลภาพผ่านระบบ Virtual Private Network หรือ VPN (เครือข่ายส่วนตัวเสมือน) แล้วไปเก็บบันทึกไว้ที่ Server ซึ่งจะบันทึกภาพจากกล้อง CCTV และรายละเอียดข้อมูลของยานพาหนะและความเร็วลงในฐานข้อมูล จากนั้นข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกลงในฐานข้อมูลจะสามารถนำออกมาเรียกใช้ได้ โดยการกรองข้อมูลของผู้ฝ่าฝืน



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทำงานของระบบตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ

2.1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับความเร็วด้วยกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ปัญหาเกี่ยวกับอุบัติเหตุทางถนน เป็นปัญหาหลักของหลายประเทศ โดยสาเหตุหลักที่สำคัญมาจากการใช้ความเร็วในขณะขับขี่ที่สูง ดังนั้นในหลายประเทศจึงมีการออกมาตรการต่าง ๆ มาใช้ในการแก้ปัญหา หนึ่งในนั้น คือ มาตรการการตรวจจับความเร็วด้วยกล้องอัตโนมัติ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ เพราะเป็นการลดจำนวนบุคลากรในการตรวจจับความเร็ว โดยในหลายประเทศได้มีการวิจัยไว้

ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Liu [11] วิเคราะห์ผลกระทบของการจำกัดความเร็วของสองอุปกรณ์การบังคับใช้กฎหมายที่แตกต่างกัน คือ กล้อง และอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่ (Radar) งานวิจัยท้ายที่สุดสรุปว่า อุปกรณ์ตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่ (Radar) ให้ผลความเร็วจำกัดที่แน่นอน แต่ความคงทนค่อนข้างต่ำ ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยศึกษาว่าผลกระทบของกล้องตรวจจับความเร็วมีประสิทธิผลต่อการจำกัดความเร็วมากที่สุด เนื่องจากกล้องไม่เพียงจะช่วยทำให้ความเร็วในการขับขี่ลดลง แต่ยังมีผลถึงความต่อเนื่องของการจำกัดความเร็ว เช่นเดียวกับงานวิจัยการใช้กล้องตรวจจับความเร็วบนทางด่วนในประเทศจีน [12] เปรียบเทียบกับ ป้ายเตือน และสัญญาณพบว่า มีประสิทธิภาพช่วยทำให้ความเร็วลดลง อย่างไรก็ตาม การใช้กล้องตรวจจับความเร็วไม่ได้มีเพียงข้อดีเท่านั้น ยังมีข้อเสียคือ ความเร็วของการขับขี่จะลดลงต่ำกว่าขีดจำกัดความเร็ว เมื่อพวกเขาเข้าสู่สัญญาณเตือนล่วงหน้า และ

เมื่อขับต่อไปก็จะเร่งความเร็วทันทีหลังจากผ่านตำแหน่ง บังคับใช้ จึงมีงานวิจัย [13] เสนอว่า ต้องผสมผสาน ระหว่างกล้องที่ติดตั้งถาวรกับกล้องที่สามารถเคลื่อนย้าย ได้พร้อมกัน

งานวิจัยในประเทศนิวซีแลนด์ [14] ประเมินผลของการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วก่อนและหลังการติดตั้ง จำนวน 24 พื้นที่ในไครสต์เชิร์ช ประเทศนิวซีแลนด์ โดยเปรียบเทียบจากอัตราการเกิดอุบัติเหตุ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Zhang [15] ศึกษาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการบังคับใช้ความเร็วอัตโนมัติด้วยอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่ (Radar Gun) ที่ติดตั้งต่างกัน คือ อุปกรณ์ตรวจจับความเร็วแบบโครงถัก (Cantilevers) ตรวจจับความเร็วจากด้านบน และอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วแบบติดตั้งด้านข้างถนน (Roadside) จากการศึกษาพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วแบบโครงถัก จะช่วยลดความเร็วลงได้ในช่วงระยะ 1.6 กิโลเมตร ถึง 2 กิโลเมตร จากตำแหน่งที่ติดตั้ง ส่วนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วด้านข้างถนน จะช่วยลดความเร็วลงได้ในช่วงระยะ 1 กิโลเมตร

ประเทศไทย สวปด.ร่วมกับ ธเนศ และคณะ [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับมาตรการการควบคุมความเร็วในการขับขี่ ด้วยกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ บนถนนสายหลักเขตเทศบาลนคร ขอนแก่น พบว่ามาตรการการควบคุมความเร็วด้วยกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ สามารถลดการใช้ความเร็วในการขับขี่ของผู้ขับขี่ได้

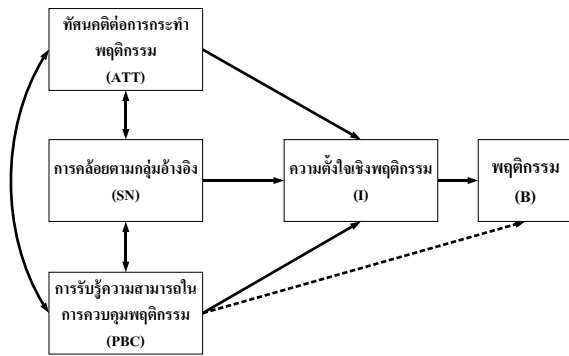
จากงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในหลายประเทศมีความตื่นตัวในการใช้มาตรการจำกัดความเร็วของผู้ขับขี่ โดยผลักดันให้มีการประยุกต์นำเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมมาช่วยสนับสนุนการใช้มาตรการการควบคุมความเร็วของยานพาหนะ โดยการบังคับใช้การจำกัดความเร็วโดยอัตโนมัติ

2.2 ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน (Theory of Planned Behavior)

ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผนถูกพัฒนาโดย Icek Ajzen [17] เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัจจัยสาเหตุ

ของพฤติกรรมของบุคคลของ Ajzen และ Fishbein แนวคิดของทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน กล่าวไว้ว่า การแสดงพฤติกรรมของบุคคลจะเกิดจากการขึ้นนำโดยความเชื่อ 3 ประการ ได้แก่ ความเชื่อเกี่ยวกับพฤติกรรม (Behavioral Beliefs) ความเชื่อเกี่ยวกับกลุ่มอ้างอิง (Normative Beliefs) และ ความเชื่อเกี่ยวกับความสามารถในการควบคุม (Control Beliefs) ในด้านความเชื่อเกี่ยวกับพฤติกรรม ทฤษฎีนี้พบว่า ถ้าบุคคลมีความเชื่อว่าการกระทำพฤติกรรมใดแล้วจะได้รับผลทางบวก ก็จะมีแนวโน้มที่จะมีทัศนคติที่ดีต่อพฤติกรรมนั้น ในทางตรงข้าม หากมีความเชื่อว่าการกระทำพฤติกรรมนั้นแล้วจะได้รับผลในทางลบ ก็จะมีแนวโน้มที่จะมีทัศนคติที่ไม่ดีต่อพฤติกรรมนั้น และเมื่อมีทัศนคติทางบวกก็จะเกิดเจตนาหรือตั้งใจ (Intension) ที่จะแสดงพฤติกรรมนั้น ในด้านความเชื่อเกี่ยวกับกลุ่มอ้างอิง ถ้าบุคคลได้รับรู้ว่าคนที่มีความสำคัญต่อเขาได้กระทำพฤติกรรมนั้น หรือต้องการให้เขากระทำพฤติกรรมนั้น ก็จะมีแนวโน้มที่จะคล้อยตาม และกระทำตาม และในด้านความเชื่อเกี่ยวกับการรับรู้การควบคุมพฤติกรรม ถ้าบุคคลเชื่อว่า มีความสามารถที่จะกระทำพฤติกรรมในสภาพการณ์นั้นได้ และสามารถควบคุมให้เกิดผลดังตั้งใจ เขาก็จะมีแนวโน้มที่จะทำพฤติกรรมนั้น [18] ซึ่งแนวคิดทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน ดังในรูปที่ 6 กล่าวคือ ความตั้งใจในการแสดงพฤติกรรม ขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 กลุ่ม ดังนี้

- 1) ปัจจัยส่วนบุคคล คือ ทัศนคติที่มีต่อพฤติกรรมของแต่ละคน (Attitude, ATT)
- 2) ปัจจัยทางสังคม คือ การคล้อยตามกลุ่มบุคคล (Subjective Norm, SN) เช่น ครอบครัว เพื่อน เป็นต้น
- 3) ปัจจัยควบคุม คือ การรับรู้ความสามารถในการควบคุมพฤติกรรม (Perceived Behavioral Control, PBC)



รูปที่ 6 แนวคิดทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน [17]

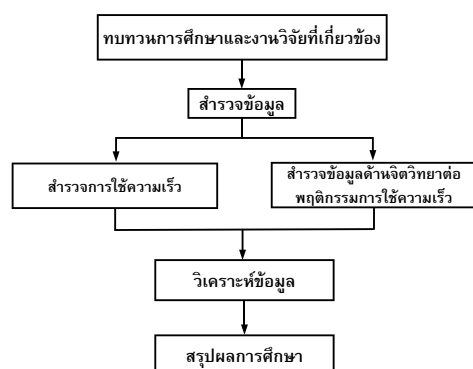
ในหลายประเทศมีการนำทฤษฎีพฤติกรรมตามแผนไปวิเคราะห์กับพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่ โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจที่จะแสดงพฤติกรรม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อิทธิพลของปัจจัยด้านจิตวิทยาที่มีต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่

ผู้วิจัย	วัตถุประสงค์	ปัจจัยที่พิจารณา	ปัจจัยที่มีอิทธิพล
พงษ์พันธ์ แทนเกษม และคณะ [19]	ศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยทางจิตวิทยาที่ส่งผลต่อความตั้งใจในการใช้ความเร็วสูงในเขตเมืองในอนุภูมิภาคกลุ่มแม่น้ำโขง	TPB	ATT, SN และ PBC
พงษ์พัฒน์ มากาส และคณะ [20]	ศึกษาวัฒนธรรมความปลอดภัยจากการสำรวจข้อมูลทัศนคติและความคิดเห็นเกี่ยวกับพฤติกรรมเสี่ยงในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่	TPB	ATT, SN และ PBC
Mehmood [21]	วิเคราะห์ทัศนคติและความเชื่อของผู้ขับขี่ต่อการใช้ความเร็วของผู้ขับขี่ในเมือง Al Ain	ทัศนคติ, ความเชื่อของผู้ขับขี่, พฤติกรรมความเร็วของตัวเอง และปัจจัยทางประชากรศาสตร์	ทัศนคติ, ความเชื่อและการรายงานพฤติกรรมความเร็วของตัวเอง
Zhu, Zhang, and Bao [22]	ศึกษาพฤติกรรมขับขี่ด้วยความเร็วในปักกิ่งเพื่อให้เข้าใจถึงทัศนคติ บรรทัดฐานทางสังคม ปัจจัยควบคุมพฤติกรรม และความตั้งใจเชิงพฤติกรรม	TPB และ พฤติกรรมในอดีต	ทัศนคติ และ พฤติกรรมในอดีต

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการวิจัย โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการใช้ความเร็วก่อนและหลังการติดตั้งระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ รวมทั้งศึกษาทัศนคติเชิงจิตวิทยาที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็ว โดยกำหนดพื้นที่บนทางหลวงหมายเลข 118 เส้นทางสัญจรดอยนางแก้ว - ดอยสะเก็ด (เชียงใหม่ - เชียงใหม่) เป็นกรณีศึกษา มีกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยกลุ่มผู้ขับขี่รถยนต์ รถโดยสาร และรถบรรทุก ที่สัญจรบนเส้นทางทางหลวง หมายเลข 118 ผ่านระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติจำนวน 5 จุด ได้แก่ หลักกิโลเมตรที่ 50+400, 43+050, 35+800, 21+700 และ 15+600 ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนที่จุดติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วฯ ทล. 118

3.2 การสำรวจข้อมูล

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษา ประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการสำรวจข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

3.2.1 การสำรวจข้อมูลการใช้ความเร็วของยานพาหนะ

ข้อมูลการใช้ความเร็วของยานพาหนะรวบรวมโดย อาศัยการสำรวจข้อมูลความเร็วในภาคสนาม ทั้งก่อนและ หลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติ โดยสำรวจ เก็บข้อมูลความเร็วของยานพาหนะแบบความเร็วที่จุดของ ยานพาหนะบนช่วงถนน ณ ตำแหน่งจุดติดตั้งกล้องฯ โดย อาศัยปืนวัดความเร็วแบบเรดาร์ (Radar Gun) แบ่งเก็บ ประเภทยานพาหนะเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล รถบรรทุก และรถโดยสาร โดยเปรียบเทียบข้อมูล ความเร็วของยานพาหนะก่อนทำการติดตั้ง 1 เดือน และ ภายหลังทำการติดตั้งกล้อง 1 เดือน ซึ่งแสดงถึงการ เปลี่ยนแปลงความเร็วของยานพาหนะในช่วงก่อนและหลัง การติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็ว

3.2.2 การสำรวจข้อมูลทัศนคติเชิงจิตวิทยาที่ส่งผลต่อ พฤติกรรมการใช้ความเร็วของผู้ขับขี่

ข้อมูลเชิงจิตวิทยาที่อธิบายปัจจัยสาเหตุที่ส่งผลต่อ พฤติกรรมการใช้ความเร็วของผู้ขับขี่บนถนนในเขตทาง เขา รวบรวมโดยการสำรวจแบบสอบถามจากผู้สัญจรผ่าน เส้นทางทางหลวงหมายเลข 118 คอยนางแก้ว-คอยสะเก็ด (เชียงราย-เชียงใหม่) โดยสัมภาษณ์ผู้ขับขี่กลุ่มตัวอย่าง 400 คนตามบริเวณจุดพักรถ เช่น ปั้มน้ำมัน เป็นต้น

ประกอบด้วยผู้ขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคล รถตู้โดยสาร รถโดยสาร และรถบรรทุก

แบบสอบถามที่ใช้ทำการออกแบบโดยอาศัยทฤษฎี พฤติกรรมตามแผน (Theory of Planned Behavior, TPB) ในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาสาเหตุปัจจัยที่แท้จริงที่ ส่งผลต่อพฤติกรรมการขับขี่ด้วยความเร็ว โดย แบบสอบถามที่ใช้ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม เช่น เพศ อายุ ประสบการณ์ในการขับขี่ เป็นต้น ส่วนที่ 2 ปัจจัยด้าน ทัศนคติเชิงจิตวิทยา ความเชื่อ และทัศนคติเกี่ยวกับ พฤติกรรมการขับเร็ว

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตาม ข้อมูลที่สำรวจ ได้แก่

3.3.1 ข้อมูลการใช้ความเร็วของยานพาหนะ

ข้อมูลความเร็วของยานพาหนะที่ได้นำไปวิเคราะห์ หาค่าสถิติของข้อมูลในแต่ละจุดติดตั้งกล้องตรวจจับ ความเร็วแบบอัตโนมัติ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูล ความเร็วของกลุ่มตัวอย่างก่อนและหลังการติดตั้งกล้อง ตรวจจับความเร็วฯ เพื่อทดสอบสมมติฐาน ของ ประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติใน การลดความเร็วของผู้ขับขี่ โดยใช้สถิติการตรวจสอบ สมมติฐาน t-test

H_0 : ผลต่างของความเร็วเฉลี่ยในการขับขี่ก่อนและ หลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วเท่ากัน

H_1 : ผลต่างของความเร็วเฉลี่ยในการขับขี่ก่อนและ หลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วมากกว่า ศูนย์

3.3.2 ข้อมูลทัศนคติเชิงจิตวิทยาที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการ ใช้ความเร็วของผู้ขับขี่

การวิเคราะห์ทัศนคติเชิงจิตวิทยาต่อพฤติกรรมการ ใช้ ความเร็วในการขับขี่ตามทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน เป็น การวิเคราะห์ทำนายความตั้งใจของผู้ขับขี่ในการแสดง พฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่มากกว่าอัตรา

ความเร็วที่กำหนด ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Linear Regression)

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการสำรวจข้อมูลการใช้ความเร็วของยานพาหนะ

ผลการสำรวจความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในการขับบริเวณจุดติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วอัตโนมัติทั้ง 5 จุด เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ โดยแบ่งยานพาหนะออกเป็น 3 ประเภท ประกอบด้วย รถยนต์ส่วนบุคคล รถโดยสาร และรถบรรทุก

4.1.1 ผลการสำรวจความเร็ว ก่อนและหลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ผลการสำรวจความเร็ว แสดงด้วยข้อมูลความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงก่อนติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ 1 เดือน และหลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ 1 เดือน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจความเร็วเฉลี่ย ก่อนและหลังติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ตำแหน่งติดตั้ง	ประเภทยานพาหนะ	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)		
		ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
50+400	รถยนต์	74.7	69.8	-6.4%
	รถโดยสาร	56.2	49.4	-12.1%
	รถบรรทุก	54.1	56.1	+3.6%
43+050	รถยนต์	70.4	65.8	-6.6%
	รถโดยสาร	60.8	56.8	-6.5%
	รถบรรทุก	59.1	52.9	-10.4%
35+800	รถยนต์	83.1	73.1	-11.9%
	รถโดยสาร	73.7	65.9	-10.5%
	รถบรรทุก	70.	63.2	-10.0%
21+700	รถยนต์	68.9	64.9	-5.8%
	รถโดยสาร	63.7	62.9	-1.3%
	รถบรรทุก	64.7	59.3	-8.3%
	รถบรรทุก	58.3	55.8	-4.2%
	รถบรรทุก	58.3	55.8	-4.2%

ตารางที่ 2 (ต่อ) ผลการสำรวจความเร็วเฉลี่ย ก่อนและหลังติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ตำแหน่งติดตั้ง	ประเภทยานพาหนะ	ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)		
		ก่อน	หลัง	เปลี่ยนแปลง
15+600	รถยนต์	86.9	80.5	-7.3%
	รถโดยสาร	71.5	69.2	-3.2%
	รถบรรทุก	58.3	55.8	-4.2%
ทุกพื้นที่	รถยนต์	78.1	72.1	-7.7%
	รถโดยสาร	65.4	59.6	-8.8%
	รถบรรทุก	62.4	57.6	-7.7%

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาความเร็วเฉลี่ยช่วงก่อนการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ พบว่าความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นรถโดยสาร และรถบรรทุก ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับขีดจำกัดความเร็วบนทางหลวงตาม พ.ร.บ.ทางหลวง พ.ศ. 2535 พบว่า ความเร็วเฉลี่ยของรถยนต์ส่วนใหญ่ไม่เกินขีดจำกัดความเร็วที่กฎหมายกำหนดในเขตทางหลวง (90 กม./ชม.) ความเร็วเฉลี่ยของรถโดยสารและรถบรรทุกส่วนใหญ่ต่ำกว่าขีดจำกัดความเร็วที่กฎหมายกำหนดในเขตทางหลวง (80 กม./ชม.) แต่เนื่องจากเส้นทางทางหลวงหมายเลข 118 เป็นทางราบสลับทางเขา จึงไม่มีขีดจำกัดความเร็วที่กฎหมายกำหนดที่ชัดเจน หากพิจารณาแบ่งตามตำแหน่งจุดติดตั้งกล้อง ฯ พบว่า บริเวณหลักกิโลเมตร ที่ 15+600 เป็นพื้นที่ที่ยานพาหนะมีค่าความเร็วเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของถนน กล่าวคือ เป็นถนนมีจำนวน 2 ช่องจราจรต่อทิศทาง แบ่งแยกทิศทางจราจรด้วยเกาะกลางถนนแบบขุบ

ส่วน ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยหลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ พบว่าความเร็วเฉลี่ยของทุกจุดสำรวจมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลาก่อนการติดตั้งกล้อง ฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร็วเฉลี่ยของรถโดยสารลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 8.8 รองลงมาเป็นรถบรรทุกเฉลี่ยลดลงร้อยละ 7.7 และรถยนต์ส่วนบุคคลเฉลี่ยลดลงร้อยละ 7.7

4.1.2 ผลการเปรียบเทียบเพื่อทดสอบสมมติฐานประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ผลการเปรียบเทียบเพื่อทดสอบสมมติฐานประสิทธิภาพของกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติภายใต้สมมติฐาน กล้องตรวจจับความเร็วสามารถช่วยลดความเร็วในการขับขี่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และยอมรับสมมติฐานรอง (H_1) ก็ต่อเมื่อค่า Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.05 ผลการทดสอบสมมติฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความเร็วก่อนและหลังการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ พบว่า กล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ มีผลต่อการลดความเร็วในการขับขี่ของผู้ขับขี่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบสอบถามเกี่ยวกับพฤติกรรมในการใช้ความเร็ว

4.2.1 คุณลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของผู้ตอบแบบสอบถาม

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่สำรวจเป็นเพศชายมากกว่าเพศหญิง 2 เท่า มีอายุในช่วงวัยทำงานจนถึงวัยสูงอายุ กลุ่มตัวอย่างผู้ขับขี่ส่วนใหญ่เป็นผู้ประกอบอาชีพธุรกิจส่วนตัวและรับจ้างทั่วไป มีระดับการศึกษาขั้นต่ำว่าจนถึงระดับปริญญาตรี และประเภทยานพาหนะของกลุ่มตัวอย่างที่สอบถามโดยส่วนใหญ่เป็นรถยนต์ส่วนบุคคล

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความเร็วก่อนและหลังติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ

ตำแหน่งติดตั้ง	ช่วงเวลาสำรวจ	จำนวนตัวอย่าง	ความเร็ว (กม./ชม.)		t-value	Sig.
			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
50+400	ก่อนติดตั้ง	244	72.9	12.0	4.99*	0.00
	หลังติดตั้ง	272	67.8	11.0		
43+050	ก่อนติดตั้ง	258	68.6	11.7	4.24*	0.00
	หลังติดตั้ง	245	64.5	9.9		
35+800	ก่อนติดตั้ง	267	80.7	13.0	8.39*	0.00
	หลังติดตั้ง	240	71.8	10.8		
21+700	ก่อนติดตั้ง	321	68.3	8.9	5.89*	0.00
	หลังติดตั้ง	282	64.2	7.9		
15+600	ก่อนติดตั้ง	516	83.5	19.7	4.60*	0.00
	หลังติดตั้ง	456	78.2	16.2		
รวม	ก่อนติดตั้ง	1606	76.0	16.0	10.54*	0.00
	หลังติดตั้ง	1495	70.4	13.5		

* นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4 อิทธิพลของปัจจัยด้านจิตวิทยาที่มีต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่

ตัวแปร		จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ	ชาย	275	68.6
	หญิง	125	31.4
อายุ	ต่ำกว่า 23 ปี	21	5.2
	23-40 ปี	217	54.1
	มากกว่า 41 ปี	162	40.6
อาชีพ	ข้าราชการ/พนักงานรัฐ	82	20.4
	พนักงานเอกชน	80	20.0
	นักศึกษา	27	6.7
	ธุรกิจส่วนตัว	93	23.2
	รับจ้างทั่วไป	100	24.9
	อื่นๆ	18	4.7
ระดับการศึกษา	ต่ำกว่าปริญญาตรี	185	46.4
	ปริญญาตรี	194	48.4
	สูงกว่าปริญญาตรี	21	5.2
ประเภทยานพาหนะที่ขับขี่	รถจักรยานยนต์	18	4.7
	รถยนต์ส่วนบุคคล	272	67.8
	รถตู้โดยสาร	37	9.2
	รถโดยสาร	23	5.7
	รถบรรทุก	50	12.5

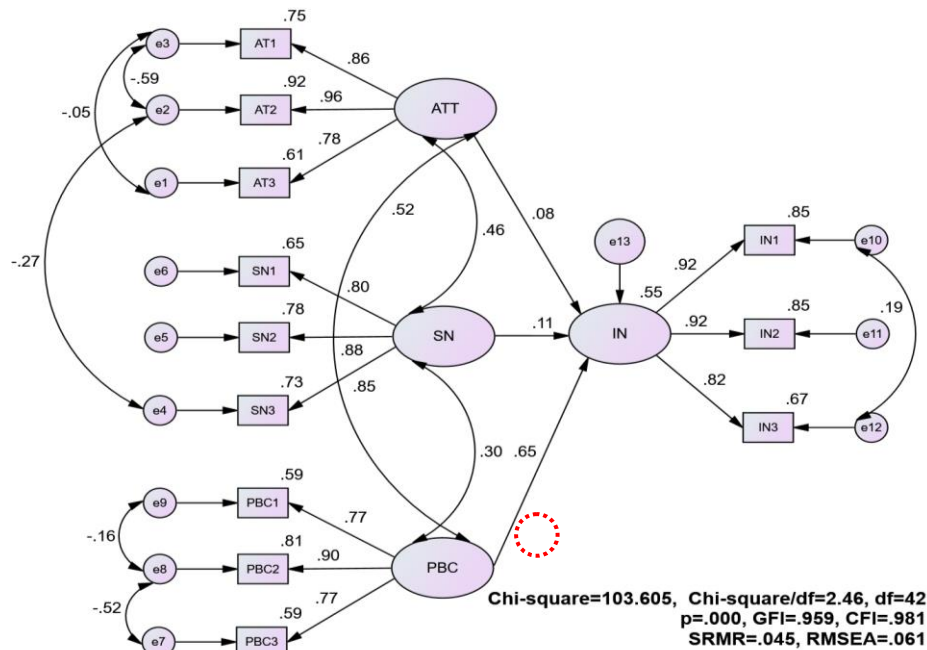
4.2.2 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมที่มีผลต่อการใช้ความเร็วบนทางเขาด้วยทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน

จากกระบวนการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุโดยอาศัยทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน (Theory of Planned Behavior) ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาคัดเลือกตัวแปรอิสระแต่ละตัวด้วยการตรวจสอบความมีนัยสำคัญ และหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระทั้งสาม ได้แก่ ทศนคติต่อการกระทำพฤติกรรม (ATT), การคล้อยตามกลุ่ม

อ้างอิง (SN) และการรับรู้ความสามารถในการควบคุมพฤติกรรม (PBC) กับตัวแปรตาม ได้แก่ ความตั้งใจในการใช้ความเร็วมากกว่าอัตราที่กำหนด (I) ได้ค่าอิทธิพลระหว่างตัวแปรในแบบจำลอง พบว่า การวิเคราะห์ในภาพรวมต่อความตั้งใจในการใช้ความเร็วมากกว่าอัตราที่กำหนด โดยใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้างอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปร ตามทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 9

จากแบบจำลองเชิงโครงสร้างในรูปที่ 9 พบว่า ปัจจัย ATT, SN และ PBC ล้วนมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อความตั้งใจในการใช้ความเร็วเกินอัตราที่กำหนด เมื่อวิเคราะห์ค่าความสอดคล้องของแบบจำลอง ได้แก่ ค่า Chi-square/df, GFI, CFI, SRMR, และ RMSEA มีค่าผ่านเกณฑ์แนะนำตาม Hair [23] แต่ปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่บนทางเขา ได้แก่ การรับรู้ความสามารถในการควบคุมพฤติกรรม (PBC)

ปัจจัยการรับรู้ความสามารถในการควบคุมพฤติกรรมแสดงให้เห็นว่า การใช้ความเร็วสูงในการขับขี่บนถนนทางหลวงหมายเลข 118 นั้นขึ้นอยู่กับรับรู้ความสามารถของผู้ขับขี่ กล่าวคือ ถ้าผู้ขับขี่มีโอกาสหรือสภาวะแวดล้อมที่เอื้ออำนวยให้กระทำพฤติกรรมขับรถเร็ว ผู้ขับขี่จะทำพฤติกรรมมากขึ้น แต่ถ้ามีมาตรการที่ปิดกั้นโอกาสหรือสภาวะแวดล้อมไม่เอื้ออำนวยให้กระทำพฤติกรรมขับรถเร็ว ผู้ขับขี่ก็จะไม่ทำพฤติกรรมนั้น ดังนั้นเมื่อมีการติดตั้งกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ ทำให้ผู้ขับขี่แสดงพฤติกรรมการใช้ความเร็วในการขับขี่ได้ยากขึ้น ส่งผลให้ผู้ขับขี่ลดความเร็วในการขับขี่



รูปที่ 9 แบบจำลองเชิงโครงสร้างแบบปรับค่ามาตรฐาน

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของมาตรการการควบคุมความเร็วโดยใช้กล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติบนถนนในเขตทางเขา ทางหลวงหมายเลข 118 คอยนางแก้ว-คอยสะเกิด (เชียงราย-เชียงใหม่) สรุปผลการศึกษาได้ว่า ระบบกล้องตรวจจับความเร็วแบบอัตโนมัติ ช่วยทำให้ผู้ขับขี่ตระหนักถึงความเร็วที่เหมาะสมในการขับขี่ และลดความเร็วในการขับขี่ลงจากเดิมที่อาจขับขี่ด้วยความเร็วเกินกว่าที่กำหนด

ส่วนการศึกษасаเหตุปัจจัยที่มีผลต่อการใช้ความเร็วบนถนนทางเขาด้วยทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้ความเร็วในการขับขี่บนทางเขา คือ การรับรู้ความสามารถในการควบคุมพฤติกรรมของผู้ขับขี่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า มาตรการบังคับให้ผู้ขับขี่ปฏิบัติตามกฎจราจรช่วยลดความเร็วเป็นการควบคุมโอกาสในการขับขี่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งมาตรการเชิงบังคับจะช่วยปิดกั้นไม่ให้เกิดพฤติกรรมเสี่ยงในการใช้ความเร็วเกินกำหนด นำไปสู่การลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุและความรุนแรงของการเกิดอุบัติเหตุบนถนนสายทางนี้ได้ แต่อย่างไร

ก็ตาม การควบคุมพฤติกรรมการใช้ความเร็วสำหรับการศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาผลของมาตรการในระยะสั้น ซึ่งจำเป็นต้องมีมาตรการเสริมในด้านการปรับเปลี่ยนทัศนคติและยกระดับบรรทัดฐานทางสังคมให้ปลอดภัยขึ้น เพื่อให้เกิดเป็นวัฒนธรรมความปลอดภัยในการใช้ความเร็วที่ยั่งยืนในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ขอพระคุณ สำนักงานสนับสนุนการป้องกันอุบัติเหตุจราจร (สอจร.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานความปลอดภัย กรมทางหลวง. สถิติอุบัติเหตุ. แหล่งที่มา [ระบบออนไลน์]: <http://bhs.doh.go.th/statistic/overall>.
- [2] สำนักงานสถิติแห่งชาติ (สสช). อุบัติเหตุจราจรทางบก. แหล่งที่มา [ระบบออนไลน์]: <http://service.nso.go.th/nso/web/statseries/statseries21.html>.
- [3] กระทรวงคมนาคม. กรมทางหลวงรายงานอุบัติเหตุบนถนนทางหลวงประจำเดือนกันยายน 2557. แหล่งที่มา [ระบบออนไลน์]: http://dip.mot.go.th/MOTC/News_MOTC/public/show_file.jsp?motc_number=262/2557&motc_yy=2557.
- [4] มูลนิธิไทยโรดส์ และศูนย์วิจัยอุบัติเหตุแห่งประเทศไทย สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. การจัดการความเร็วเพื่อความปลอดภัยทางถนนสำหรับประเทศไทยทิศทางและความท้าทายในครึ่งทศวรรษถัดไป. 2559 แหล่งที่มา, [ระบบออนไลน์]: <http://trso.thairoads.org/resources/5760>.
- [5] สำนักงานความปลอดภัย กรมทางหลวง. 101 ช่วงสายทาง ที่ต้องใช้ความระมัดระวังในการเดินทางของรถโดยสารและรถบรรทุก. 2559, แหล่งที่มา [ระบบออนไลน์]: http://www.news.mot.go.th/motc/portal/graph/index_doh3.html.
- [6] สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์. วิศวกรรมขนส่ง. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2551.
- [7] Roess, R. P., Prassas, E. S. and McShane, W. R. Traffic engineering (4th ed.). Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2011.
- [8] วรพล คำกรเกิด. การตรวจสอบความเร็วปลอดภัยสำหรับการขับขี่รถโดยสารขนาดใหญ่บนเส้นทางภูเขา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554; 18(3), 27 – 34.
- [9] พระราชบัญญัติทางหลวง พ.ศ.2535. ราชกิจจานุเบกษา, 2535; 109(52).
- [10] ศูนย์วิจัยอุบัติเหตุแห่งประเทศไทย สถาบันวิจัยแห่งเอเชีย. การใช้ความเร็วในการขับขี่ที่ปลอดภัย, ศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.), 2551.
- [11] Liu, S., Sun, X. and He, Y. Analysis of Speed Limit Effect of Automatic Enforcement. In *ICLEM 2010: Logistics for Sustained Economic Development: Infrastructure, Information, Integration*, 2010; 1836-1843.
- [12] Lu, F. and Cheng, Z. Study on the Effects of Speed Camera. *ICCTP 2010 Integrated Transportation Systems Green, Intelligent, Reliable*, 2010; 824-831.
- [13] Yang, M., Ma, J., Chen, Q. and Yang, Y. Deterrent Effect of Fixed-Site Speed Enforcement on Freeways. *CICTP 2016: Green and Multimodal Transportation and Logistics*, 2016; 1609-1614.
- [14] Tay, R. Do speed cameras improve road safety. In *Traffic and transportation studies: international conference on traffic and transportation studies*. Beijing, China, 2000; 44: 44-51.
- [15] Zhang, X., Liu, P., Huang, F. and Yu, H. Evaluation of the Speed Reduction Effects of Automated Speed Enforcements on Freeways. In *ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems*, 2011; 2061-2071.
- [16] ธเนศ เสถียรนาม, ศโรช บุญศิริพันธ์, วิชุดา เสถียรนาม และพงษ์พันธ์ แทนเกษม. การศึกษามาตรการควบคุมความเร็วในการขับขี่ด้วยกล้องตรวจจับ ความเร็วอัตโนมัติ: กรณีศึกษาถนนสายหลักในเขตเทศบาลนครขอนแก่น ระยะที่ 1, ศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.), 2558.
- [17] Ajzen, I. The theory of planned behavior. *Organizational behavior and human decision processes*, 1991; 50(2): 179-211.

- [18] พิชามณญ์ อุดลวิทย์. ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแบ่งปันความรู้ตามทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน. *วารสารนักบริหารมหาวิทยาลัยกรุงเทพ*, 2554; 31(1): 226 – 230.
- [19] พงษ์พันธ์ แทนเกษม ธเนศและวิชุดา เกลียรนาม. วัฒนธรรมการขับรถยนต์มีผลต่อความตั้งใจในการใช้ความเร็วสูงในเขตเมือง กรณีศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง เมืองขอนแก่น ประเทศไทย, เมืองเวียงจันทน์ สปป.ลาว และเมืองพนมเปญ ประเทศกัมพูชา. การประชุมวิชาการขนส่งแห่งชาติ ครั้งที่ 10, 18 ธันวาคม, โรงแรม ดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่, 2558; 15-16.
- [20] พงษ์พัฒน์ มาภากศ, นพดล กรประเสริฐและปรีดา พิชยาพันธ์. การประเมินวัฒนธรรมความปลอดภัยบนถนนของผู้ใช้รถใช้ถนนในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่. *Proceeding of 8th ATRANS Symposium: Young Researcher's forum 2015*, กรุงเทพมหานคร, 2015; 301-307.
- [21] Mehmood, A. Determinants of Speeding Behavior of Drivers in Al Ain (United Arab Emirates). *Journal of Transportation Engineering*, 2009; 135(10): 721-729.
- [22] Zhu, L., Zhang, Z., and Bao, Z. Speeding Behaviors in Beijing Based on the Theory of Planned Behavior. *Third International Conference on Transportation Engineering (ICTE)*, 2011; 547-554.
- [23] Hair, J. F., Anderson, R. E., Babin, B. J., and Black, W. C. *Multivariate data analysis: A global perspective* Upper Saddle River. NJ: *Pearson*, 2010; 7.



The Hybrid Neural Networks-ARIMA/X Models and ANFIS Model for PM-10 Forecasting: A Case Study of Chiang Mai, Thailand's High Season

RATI Wongsathan

Department of Electrical and Computer Engineering and
the Research Institute of North-Chiang Mai University
169 Hangdong Chiang Mai 50230, Thailand Tel. +66(81)2893400, Fax. +66(53)819998
E-mail: rati1003@gmail.com, rati@northcm.ac.th

ABSTRACT

It was demonstrated that efficient air quality models are very useful tools in forecasting air pollutants. Consequently, in this paper, the influence of exogenous variable (X) related meteorological parameters and correlated toxic gas together with the significant historical PM-10 values was analyzed to formulate the numerical hybrid PM-10 forecast model during high season (January-April) in Chiang Mai Province, northern Thailand. The hybrid model is divided into two stages, dealing firstly with nonlinear transformation through the multilayer perceptron neural network (MLPNN) and radial basis function neural network (RBFNN), and secondly with statistical estimation of the linearly stationary residuals using an autoregressive integrated moving average (ARIMA) and ARIMAX, and denoted by *h*MLPNN/RBFNN-ARIMA/X model. On the tradeoff between the accuracy using root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE), and the reliability through Akaike information criterion(AIC) for PM-10 forecasting, the *h*MLPNN-ARIMA model was identified as the optimal model whereas the *h*MLPNN-ARIMAX and the *h*RBFNN-ARIMA model were identified as the sub-optimal model. For further comparison against PM-10 forecast based an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model, it was indicated that the *h*MLPNN-ARIMA model provided slightly more accurate but clearly more reliable than that of the ANFIS including the others.

Keywords: ARIMA model, ARIMAX model, Multilayer perceptron neural networks, Radial basis function neural network, ANFIS, PM-10.

1. Introduction

Nowadays, the situation of air pollution related to particulate matter less than 10 micrometer in diameter (PM-10) is critical severity for the health of people in upper provinces of northern Thailand. Chiang Mai, the largest city in the north and second-largest city in Thailand, continuously experiences with the pollution related to PM-10. During the high season (around January-April), PM-10 level frequently exceeds the standard level of 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ specified by Thai government pollution control department (PCD). PM-10's main sources are forest fire and biomass burning. For example only Mae Chaem, one of totally 25 districts of Chiang Mai, produces and burns over 37,000 tons of corncob waste every year. Moreover, Chiang Mai is located in Chiang Mai-Lamphun basin, where smoke from neighboring Myanmar and Lao is prone to settle. The statistical of daily PM-10 behavior at the

high season during 2012-2017 monitored by two stations including the provincial hall station (the country side) and the Yuparaj Wittayalai school station (in the city moat area) indicated that the PM-10 level has reached up to 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 1) whereas in Bangkok, the capital city, the PM-10 level is only 40-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In 2014, PM-10 level has exceeded the threshold level and closely reached to the level of 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ resulting in thousands of people across Chiang Mai area being admitted to hospital for various respiratory illness. In 2015, the PM-10 situation was severely seen by touching of 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ level but also decreased in 2016 because of the climate variability and off-seasonal rains. Therefore, the existing environment may directly affect to PM-10 level.

Since the PM-10 data is usually measured and officially announced in the daily morning to warn the people but this information may not be thoroughly accessible. Consequently, people

cannot prepare to prevent themselves in advance. The temporal PM-10 forecast model should be implemented together with weather forecast in order to minimize health risks to the public. Previously, most of the PM-10 forecast models frequently use the historical PM-10 value to estimate the PM-10 including multivariate linear regression (MLR) [1] as the linear model, and Neural Networks (NN) [2] as the nonlinear model. In general, NNs performance is better than MLR, but MLR is often employed more than NNs due to its simplicity. Besides, other techniques have extensively been applied and made the comparison among them. Some of these techniques are hybrid MLR and ARIMA [2], ARIMA [3]-[4], hybrid ARIMA and NNs [3], support vector machines (SVM) [5], hybrid ARIMA and SVM [6] and etc.

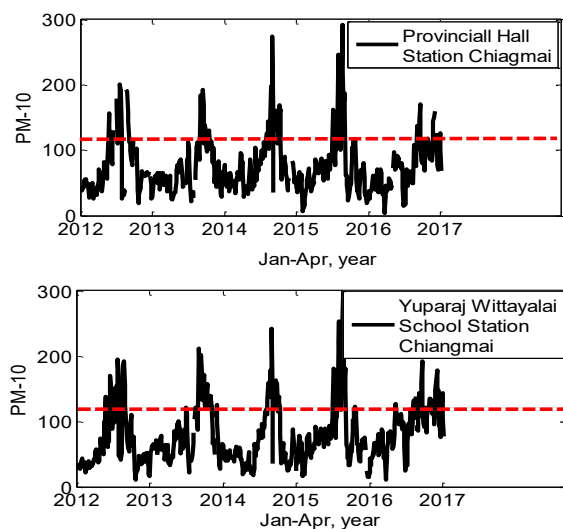


Fig.1 PM-10 time-series of Chiang Mai, January-April 2012-2017.

In the case of PM-10 researches in Chiang Mai, most of them focused on monitoring device implementation which gives more budget support funds. While, existing researches on PM-10 forecasting model still used the conventional regression techniques (e.g., simple linear regression (SLR), MLR [7], grey system model [8]), which were easy to formulate, but the results were unsatisfied. However, the author acknowledges no related research on PM-10 forecasting using nonlinear model or hybrid model except for our previous works [9]-[12] in the series. Early works on PM-10 forecast model using various NNs model such as MLPNN,

RBFNN and hybrid of RBFNN and genetic algorithm have already implemented [9]. Overall, they provided accurate forecasting results. Unfortunately, an over-fitting obtained from a learning process is the main disadvantage for NNs as well as the local-trap parameters due to the large structure of the networks, leading to a huge erroneous forecast. To improve the forecast accuracy, h ARIMA-NN model was alternately selected and employed to investigate this issue [10]. The forecasting results were demonstrated that it surpassed NNs and ARIMA, respectively. However, the forecast error is considerably high during the high season because of high disturbance and PM-10 variances itself. In this case, the h RBFNN-ARIMA model and h ARIMA-RBFNN model were proposed to tackle this problem [11]. The h RBFNN-ARIMA model was identified the best forecast model in this case. To improve the performance of the forecasting model further, the exogenous variable and the modified hybrid algorithm should be considered. Two hybrid models i.e., h ARIMAX-RBFNN model and h RBFNN-ARIMAX model were implemented [12]. The forecast results demonstrated that they outperformed the previous models [12] suggesting that the nonlinear model should be firstly captured the non-stationary non-linear component of PM-10 pattern, and the fully linearly stationary residuals can be accurately predicted by the linear model later.

Recently, the hybrid learning of NN and fuzzy inference system or ANFIS was identified as the most accurate models compared to the fuzzy logic model [13]. For PM-10 forecast, it was considered as an efficient tool due to its high accuracy [14]-[15]. However, the most suitable forecast model requires not only for its accuracy but also reliability. The aim of this work is to investigate the accuracy and simultaneous reliability of the hybrid PM-10 forecast models and to compare among them. The different h MLPNN/RBFNN-ARIMA/X forecast models were optimized through the experimental design. The ANFIS model was subsequently implemented for PM-10 forecast to compare with them. The forecasting performance were evaluated by tradeoff between accuracy and reliability through the RMSE, MAE and AIC.

2. Methodology and Method

Data was collected during 2011-2016 for both PM-10 and exogenous variables includes 4 related toxic gas variables (CO , O_3 , NO_2 , and SO_2) and 4 significant meteorological variables (GW , T , P , and H) provided by the Thailand PCD. The descriptive statistics results of these variables are presented in Table 1. They are divided into 3 parts i.e., training, validating and testing by using the data from 2011-2014, 2015 and 2016, respectively. Four different PM-10 forecast models including **Model (1)** $hMLPNN$ -

ARIMA, **Model (2)** $hRBFNN$ -ARIMA, **Model (3)** $hMLPNN$ -ARIMAX and **Model (4)** $hRBFNN$ -ARIMAX were implemented and investigated. Their forecast results were compared to existing forecast models. The model implementations was developed using the MATLAB program and all simulations were run on a 2.27 GHz Intel Pentium Core i5 processor with 6 GB of RAM laptop computer. The description of the proposed forecast models was detailed in the next Sub-Section.

Table 1 The descriptive statistics of 602 testing data of PM-10 and exogenous variables.

Measured Parameter	Symbol	Unit	Range	Min.	Max.	Mean	Variance	Relative Change
PM-10	PM	$\mu g/m^3$	260.1	29.9	290	42.65	1065	4.09
Carbon monoxide	CO	ppm	1.9	0	1.9	0.49	0.08	0.04
Ozone	O_3	ppb	59	5	64	25.68	129.5	2.19
Nitrogen dioxide	NO_2	ppb	33.6	0.2	33.8	9.43	28.18	0.83
Sulfur dioxide	SO_2	ppb	16	0	16	0.73	1.0	0.06
Wind gust	GW	km/hr	54.7	0	54.7	21.0	44.8	0.81
Temperature	T	Celsius	19.8	19.4	39.2	26.7	8.5	0.43
Pressure	P	hPa	18.4	964.4	982.8	973.5	11.8	0.64
Relative Humidity	H	-	68	24	92	64.9	136.6	2.0

2.1 The hNN-ARIMA model

The structure of NN model denoted by $NN(P, Q, 1)$ where P is the number of input nodes of the historical PM-10, PM_{t-i} , $i = 1, 2, \dots, P$, Q is the number of hidden nodes and "1" refers to single output node (Fig. 2).

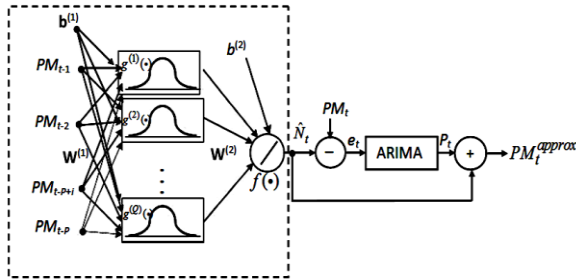


Fig.2 The PM-10 forecast based on hNN -ARIMA model.

The nonlinear solution, N_t , is filtered through the NN in the first stage. The error generated at time t , e_t , is passed through the linear model in the second stage which is statistically generated through an ARIMA procedure. Once, the correlation of residuals from this model is removed, the hNN -ARIMA model is established. Two different types of this

model i.e., the $hMLPNN$ -ARIMA and the $hRBFNN$ -ARIMA model are detailed in the next Sub-Section 2.1.1 and 2.1.2, respectively.

2.1.1 The $hMLPNN$ -ARIMA model

In the first stage, the $MLPNN(P, Q, 1)$ determines N_t which is expressed in matrix-vector form as,

$$N_t = f\left(W^{(2)} \times g\left(W^{(1)} \times PM + b^{(1)}\right) + b^{(2)}\right), \quad (1)$$

where PM is the P -column input vector of historical PM-10 data, $W^{(1)}$ and $b^{(1)}$ is the Q -by- P weight matrix and the Q -column bias vector between input-hidden layer, respectively, and $W^{(2)}$ and $b^{(2)}$ is the Q -row vector and the bias value between hidden-output layer, respectively. From the test, the sigmoid function yielded the lowest RMSE and was selected as an activation function denoted by g , and f referred to a linear transfer function. The parameter of $MLPNN$, including weights and biases, are tuned by the well-known back-propagation algorithm. The results from the optimization showed that the number of input and hidden nodes equals 1. Then, $MLPNN(1, 1, 1)$ is mathematically expressed explicitly as,

$$N_t = \left(\frac{2 \times 0.59}{1 + \exp((3.88 \times PM_{t-1} + 1.64))} - 0.59 \right) - 0.41. \quad (2)$$

The error (e) resulted from (2) is passed to ARIMA model in the second stage. A practical approach to construct the ARIMA model includes three iterative steps i.e., identification, parameter estimation and diagnostic checking. For the model identification, the unit root test by augmented Dickey-Fuller (ADF) test and Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) test proved that the data of error is non-stationary. Then, the first differencing ($d=1$) was applied and generate 1st order difference of error (Δe) time series. The autocorrelation function (ACF) and the partial autocorrelation function (PACF) plot of the sample data are the basic tools to identify the order of autoregressive (AR) process, p , and the order of moving average (MA) process, q . Then, the ARIMA(p, d, q) is expressed as,

$$\Delta e_t = \delta + \phi_1(\Delta e_{t-1}) + \phi_2(\Delta e_{t-2}) + \dots + \phi_p(\Delta e_{t-p}) + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (3)$$

where $\Delta e_t \equiv e_t - e_{t-1}$, δ is the constant, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ are the AR parameters, ε_t is the randomly error at time t and $\sim N(0, \sigma^2)$, and $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ are the MA parameters.

It is found that 1-time lag of PACF was more than the critical value that implies the p and q are basically identified as 1 and 0, respectively, therefore the tentative model was ARIMA(1,1,0). After the identification by numerical estimation, ϕ_1 equals -0.4319 at a 99% confidence interval level of statistical test. An ARIMA model is not sufficient if there are still linear correlations remain in the residuals [16]. Diagnostic checking by Box-Pierce Chi-Square test verified that ARIMA(1,1,0) is sufficient since no correlation of the residuals. Then, the forecasting PM-10 model at time t , $PM_t^{forecast}$, of the h MLPNN(1,1,1)-ARIMA(1,1,0) is expressed as,

$$PM_t^{forecast} = \left(\frac{2 \times 0.59}{1 + \exp(3.88 \times PM_{t-1}^{Actual} + 1.64)} - 0.59 \right) - 0.41 - 0.83 + e_{t-1} - 0.4319 \Delta(e_{t-1}) + \varepsilon_t \quad (4)$$

2.1.2 The hRBFNN-ARIMA model

In this hybrid model, MLPNN is replaced by RBFNN to estimate N_t in the first stage. RBFNN has a structure similar to MLPNN except for using Gaussian function as the radial basis activation function, a_i , in hidden nodes. The input variable of RBFNN is the historical PM-10 data of several days. The number of input nodes corresponding to the dimension of input vectors is determined and selected through the optimization. The number of pattern learning of the observation data (PM_t) of n samples which are fed into P input nodes and one output node of RBFNN($P, Q, 1$) generates $n-P$ types i.e., the 1st pattern consists of input $[PM_1, \dots, PM_P]$ and the output is N_{P+1} , the 2nd pattern consists of input $[PM_2, \dots, PM_{P+1}]$ and the output is N_{P+2} and the last pattern consists of input $[PM_{t-P}, \dots, PM_{t-1}]$ and the output is N_t which is expressed as,

$$N_t = \sum_{i=1}^Q w_i a_i + \beta_0, \quad (5)$$

where

$$a_i = \exp \left(- \sum_{j=1}^r (PM_{t-j} - PM_{t-j}^{approx})^2 / \alpha_i^2 \right), \quad (6)$$

PM_{t-j} is the input for j^{th} node of an input layer, PM_{t-j}^{approx} is the preceding forecast value of j^{th} input which is used as centre of Gaussian function, α_i is the spread parameter of i^{th} node in hidden layer, w_i is the weight between i^{th} node in the hidden layer and the output layer, and β_0 is the bias of the output node.

To avoid the over fitting problem, the train and test samples ratio is also first specified. The designed parameters indicated through RMSE criterion showed that the train: test ratio, the number of input and hidden nodes are 80:20, 1, and 2, respectively. Then, RBFNN was represented by RBFNN(1,2,1). Later, the unsupervised learning process as K -mean algorithm [17] solved for the centre and variance of Gaussian function. Finally, the gradient descent algorithm, the supervised learning method, adjusted the weights between hidden and output layer. The RBFNN(1,2,1) is mathematical expressed as,

$$N_t = -1.5 \times \exp - [(-0.32 \times PM_{t-1} + 0.83 - PM_{t-1}^{approx})^2] + 0.83 \times \exp - [(-0.32 \times PM_{t-1} + 0.83 - PM_{t-1}^{approx})^2] - 0.032 \quad (7)$$

The residuals from (7) were fed into ARIMA model in the second stage which was constructed similar to the previous Sub-Section 2.1.1. It was found that the ARIMA(0,1,2) is satisfied the statistical test then the $hRBRNN(1, 2,1)$ -ARIMA(0,1,2) is hold and expressed as,

$$PM_t^{forecast} = -1.5 \times \exp[-(-0.32 \times PM_{t-1} + 0.83 - PM_{t-1}^{Approx})^2] + 0.83 \times \exp[-(-0.32 \times PM_{t-1} + 0.83 - PM_{t-1}^{Approx})^2] - 0.032 + e_{t-1} - 0.17 \times (e_{t-2}^{Actual} - e_{t-2}^{Approx}) + \varepsilon_t \quad (8)$$

2.2 The hNN-ARIMAX model

The hNN -ARIMAX model is mainly composed of two stages (Fig.3). In the first stage, NN operates by using P -time lag of historical PM-10 and significant exogenous variables. The generated residuals together with the selected exogenous variables were provided as the input of ARIMAX model in second stage. Two different types of this hybrid model i.e., $hMLPNN$ -ARIMAX and $hRBFNN$ -ARIMAX were detailed in the next Sub-section 2.2.1 and 2.2.2, respectively.

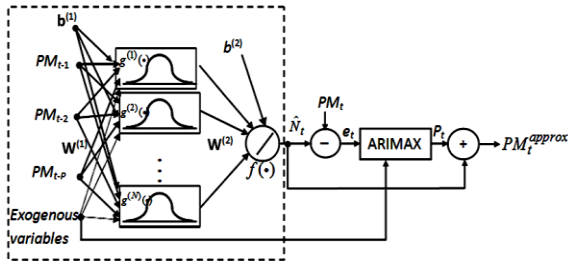


Fig. 3 The PM-10 forecast based on hNN -ARIMAX model.

2.2.1 The $hMLPNN$ -ARIMAX model

In this hybrid model, it was resulted that 3-time lag of historical PM-10 and all exogenous variables except for T variable are significant correspond to 1 hidden node. Then, the optimized MLPNN is represented by MLPNN(($X[7], 3, 1, 1$), where $X[7] = [CO, O_3, SO_2, NO_2, G, W, P, H]^T$. The residuals from the MLPNN model were fed into ARIMAX model in the second stage. The procedure of ARIMAX model is similar to that of ARIMA model. Let the L -time lag of the independent K -input variable sequences expressed by $\{X_1\}, \dots, \{X_K\}$, and the first difference of residual (Δe) from (3), the ARIMA(p, d, q) $X(K)$ is expressed as follows,

$$\Delta e_t = \delta + \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^L \mu_{j,i} X_{j,i,t-i} + \sum_{i=1}^P \varphi_i \Delta e_{t-i} + \sum_{i=0}^Q \theta_i \varepsilon_{t-i}, \quad (9)$$

where μ_i , φ_i , and θ_i denote the coefficient parameters, K , P , and Q denote the maximum time lag related to the independence sequences, residuals, and the randomly error, respectively, and δ is a constant. From the optimization, it is found that L equals 1 is sufficient. Following by the ARIMA procedure in Section 2.1, ARIMA(1,1,0) $X[7]$ was satisfied through the statistical tests. The hybrid model was then resulted by $hMLPNN((X[7], 3, 1)$ -ARIMA(1,1,0) $X[7]$ which is expressed as

$$PM_t^{forecast} = \left(\frac{2 \times 0.4354}{1 + \exp((-2W_1 \times X - 1.64))} - 0.4354 \right) - 0.318 + e_{t-1} - 0.407, \quad (10)$$

$$\times \Delta(e)_{t-1} + W_2 \times X + \varepsilon_t$$

where

$$W_1 \times X = 1.30 \times CO_{t-1} + 1.09 \times O_{3,t-1} + 0.29 \times SO_{2,t-1} - 1.96 \times NO_{2,t-1} + 0.44, \quad (11)$$

$$\times GW_{t-1} - 0.48 \times P_{t-1} - 1.89 \times H_{t-1}$$

and

$$W_2 \times X = 0.22 \times CO_{t-1} - 0.07 \times O_{3,t-1} - 0.01 \times SO_{2,t-1} + 0.95 \times NO_{2,t-1} + 0.15, \quad (12)$$

$$\times GW_{t-1} - 0.03 \times P_{t-1} + 0.52 \times H_{t-1}$$

2.2.2 The $hRBFNN$ -ARIMAX model

In this hybrid model, it was resulted that 3-time lag of historical PM-10 and all exogenous variables except for T were significances correspond to 10-selected hidden node. Then, RBFNN model is represented by RBFNN(($X[7], 3, 10, 1$)). The residuals from the RBFNN together with $X[7]$ were continuously fed into ARIMAX model in the second stage. AR(0)I(1)MA(2) $X[7]$ was satisfied from the statistical tests. Finally, the hybrid model, $hRBFNN((X[7], 3, 10, 1)$ -ARIMA(0,1,2) $X[7]$ is expressed as follow,

$$PM_t^{forecast} = \sum_{j=1}^8 \left(w_{jo} \times \exp \left(- \left(\sum_{i=1}^7 w_{ij} X_i + \sum_{k=1}^3 w_{kj} PM_{t-k} + b_j - c_j \right)^2 \right) \right) + b_o, \quad (13)$$

$$+ e_{t-1} - 0.1968 \times (e_{t-2}^{Actual} - e_{t-2}^{Approx}) + W_3 \times X + \varepsilon_t$$

where a number of w_{ij} and w_{kj} parameters from this model are not shown here, and

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_3 \times \mathbf{X} = & 1.30 \times CO_{t-1} + 1.09 \times O_{3,t-1} \\ & + 0.29 \times SO_{2,t-1} - 1.96 \times NO_{2,t-1} \\ & + 0.44 \times GW_{t-1} - 0.48 \times P_{t-1} - 1.89 \times H_{t-1} \end{aligned} \quad (14)$$

The forecast results of the proposed hybrid forecast models mentioned above were shown in the next Section with the discussions.

3. Results and discussions

The hybrid forecast models formulated in Section 2 are validated with the testing data in 2015 in order to indicate how well the model has been trained. The forecast results of the **Model (1)** $hMLPNN(1,1,1)$ -ARIMA(1,1,0), **Model (2)** $hRBFNN(1,2,1)$ -ARIMA(0,1,2), **Model (3)** $hMLPNN((X[7],3),1)$ -ARIMA(1,1,0) $X[7]$ and **Model (4)** $hRBFNN((X[7],3,1),10)$ -ARIMA(0,1,2) $X[7]$ are illustrated in Fig. 4-7, respectively. It is indicated that the hybrid forecast **Model 1-4** can estimate the high PM-10 very well. Furthermore, it is seen that **Model (4)** outperforms **Model (1)**, **Model (3)** and **Model (2)**, respectively.

By using testing data in 2016, the proposed hybrid forecast models were compared to the previous models referenced in [12] including ARIMA(4,1,3), ARIMA(4,1,3) $X[1]$, MLPNN(1,1,1), RBFNN(1,2,1), $hARIMA(4,1,3)$ -MLPNN([2,1],1,1), ARIMA(4,1,3)-RBFNN([1,2],2,1), $hRBFNN(1,2,1)$ -ARIMA(0,1,2) and $hARIMA(4,1,3)X(1)$ -RBFNN([1,3],2,1). The performance of models is assessed using MAE, RMSE, AIC and the number of model parameters (Table 2). It is found that the hNN -ARIMA/ARIMAX model gives the best forecast at the high PM-10 level as well as the overall average whereas the $hARIMA$ /ARIMAX-NN model gives the worst forecast. It indicates that the prior processing either linear or nonlinear is the significant issue. Since main pattern of the PM-10 problem is nonlinear and complex then the NN as the

nonlinear model should firstly perform and continue with the ARIMA/ARIMAX model as the linear model. However, in general, there is no any theoretical guarantee which model is better because it depends on a particular problem. For ranking the PM-10 forecast models with AIC [18] that seeks a model which has a good fit but few parameters, it is defined as,

$$AIC = n \log \left(\frac{\sum_n e_i^2}{n} \right) + 2K, \quad (15)$$

where e_i is the normally distributed residuals, n is the number of test data, and K is the total number of parameters in the model. The preferred model is the one with the minimum AIC.

Although **Model (4)** provided the most accurate forecast considered from the RMSE and MAE. However, a number of its parameters caused complexity and high computation time is not suitable and reliable in the real practice. From the model assessment through AIC, it was shown that **Model (1)**, **Model (3)** and **Model (2)** are considered as the best model whereas **Model (4)** is the worst model (Table 2). To forecast 5-day PM-10 ($PM_{10,t+1}$, $PM_{10,t+2}$, ..., and $PM_{10,t+5}$) by the **Model (1)**, hybrid MLPNN-ARIMA model, the results showed that it gives accurate and reliable for only 1-day forecast while the forecast trend increasingly saturates for 2-day to 5-day forecast. However it was seen from Table 1 that most of the variables have a wide range of relative change (ratio of variance compared to range) from 0.06 (of SO_2) to 4.09 (of PM-10). The proposed hybrid forecast model based on one rule describing the dynamic change of the input variables probably would not be sufficient to provide the most accurate forecast. To complete our work, the forecast model based on an ANFIS model was further implemented to compare the performance against the $hMLPNN$ -ARIMA model as the best model and others.

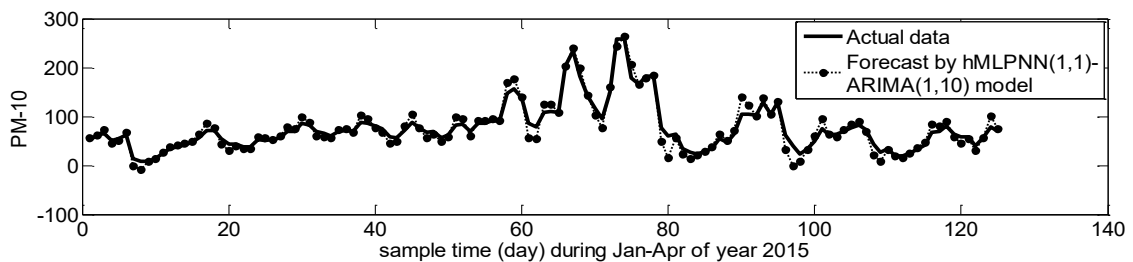


Fig. 4 The validated results from the **Model (1)**, $hMLPNN(1,1,1)$ -ARIMA(1,1,0).

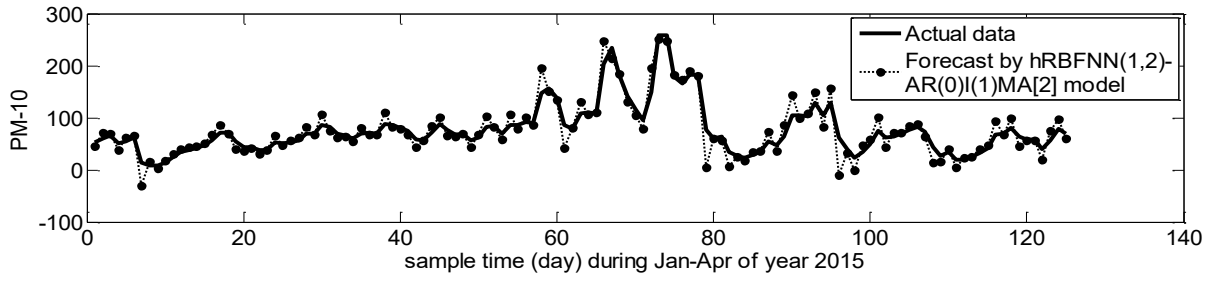


Fig. 5 The validated results from the **Model (2)**, $hRBFNN(1,2,1)$ -ARIMA(0,1,2).

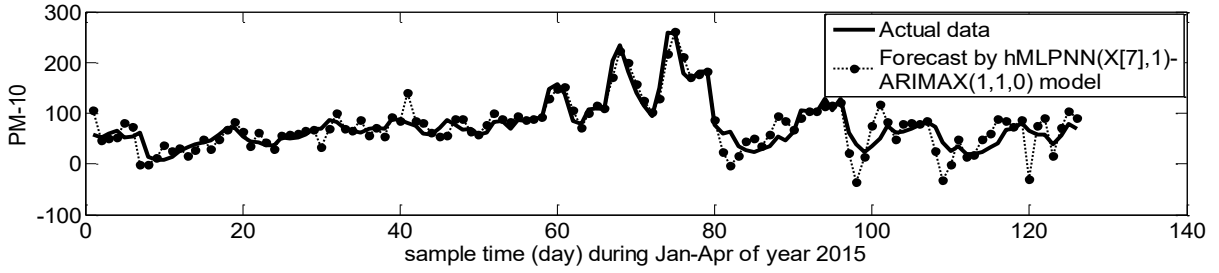


Fig. 6 The validated results from the **Model (3)**, $hMLPNN((X[7],3),1)$ -ARIMA(1,1,0) $X[7]$.

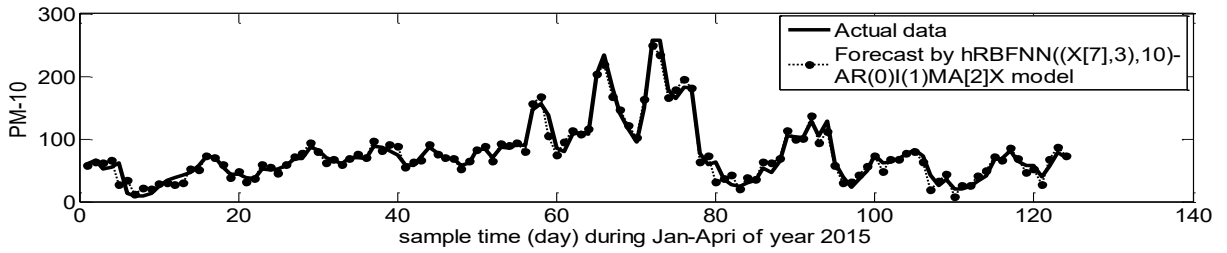


Fig. 7 The validated results from the **Model (4)**, $hRBFNN((X[7],3),10)$ -ARIMA(0,1,2) $X[7]$.

Table 2 Performance comparison of the proposed PM-10 forecast models with existing models.

Model Ranking	RMSE	MAE	AIC	The number of model parameters
1) Model (1) $hMLPNN(1,1,1)$ -ARIMA(1,1,0)	12.2	8.9	19.8	5 ($w=2, b=2, AR=1$)
2) Model (3) $hMLPNN((X[7],3),1,1)$ -ARIMAX(1,1,0)	13.8	9.3	50.1	14 ($w=11, b=2, AR=1$)
3) Model (2) $hRBFNN(1,2,1)$ -ARIMA(0,1,2)	17.3	11.7	62.1	8 ($w=4, b=3, MA[2]=1$)
4) ARIMA(4,1,3) $X(1)$	23.1	15.7	91.8	8 ($AR=4, MA=3, X=1$)
5) MLPNN(1,1,1)	25.4	16.0	93.6	4 ($w=2, b=2$)
6) ARIMA(4,1,3)	24.7	16.6	96.9	7 ($AR=4, MA=3$)
7) RBFNN(1,2,1)	25.7	16.0	100.8	7 ($w=4, b=3$)
8) $hARIMA(4,1,3)X(1)$ -MLPNN([1,1],1,1)	24.6	16.0	108.6	13 ($8, w=3, b=2$)
9) $hARIMA(4,1,3)$ -MLPNN([2,1],1,1)	25.5	15.3	112.2	13 ($7, w=4, b=2$)
10) $hARIMA(4,1,3)X(1)$ -RBFNN([1,3],2,1)	26.4	15.0	131.7	21 ($8, w=10, b=3$)
11) $hARIMA(4,1,3)$ -RBFNN([1,2],2,1)	28.2	17.9	132.7	18 ($7, w=8, b=3$)
12) Model (4) $hRBFNN((X[7],3),10,1)$ -ARIMAX(0,1,2)	9.8	7.4	230.6	122 ($w=110, b=11, 1$)

The ANFIS structure is obtained by embedding the fuzzy inference rules into the framework of adaptive networks [19]. For 5-day PM-10 forecast i.e., PM_{t+1} , ..., and PM_{t+5} , five different ANFIS models used the historical P -time lag PM-10 (PM_{t-1} , ..., and PM_{t-P}) and exogenous variables, $X = [CO, O_3, SO_2, NO_2,$

$GW, P, T, H]^T$ as the input variables and the number of membership functions (MFs) is $N_{PM(t-1)}, \dots, N_{PM(t-P)}, N_{CO}, \dots$, and N_H , respectively. It gives the output as the PM_{t+i} where $i = 0, \dots, 4$. The ANFIS model typically includes 5 layers in which nodes of the same layer have similar MF

(Fig. 8). The stepwise procedures are detailed as follows,

- Layer 1: The input variables are normalized to the range $[0, 1]$.
- Layer 2: The adaptive nodes consisted of Gaussian MFs (GMF) transforms the crisp of input variable to the degree of MF (μ) of fuzzy set $PM_{t-1} = \{NB, NS, \dots, PS, PB\}, \dots, H = \{NB, NS, \dots, PS, PB\}$ which are denoted by $\mu_{PM(t-1)_x}, \dots, \mu_{H_x}$, respectively

where x is the fuzzy variable, $x \in \{NB, NS, \dots, PS, PB\}$ and NB, NS, PS and PB are referred as negative big, negative small, positive small and positive big, respectively.

- Layer 3: The number of constructed IF-THEN rules, N_{rule} , is $N_{PM(t-1)} \times \dots \times N_{PM(t-P)} \times N_{CO} \times \dots \times N_H$. For the first-order Sugeno fuzzy, the fuzzy rule is shown for example below:
Rule i : IF PM_{t-1} is NB and ... and PM_{t-P} is NB and ..., and H is NB,

$$\text{THEN } \theta_i = p_1(PM_{t-1}) + \dots + p_P(PM_{t-P}) + \dots + p_H(H) + p_0.$$

The number of system parameters is $(N_{PM(t-1)} + \dots + N_{PM(t-P)} + N_{CO} + \dots + N_H) \times (2 + N_{rule})$ including GMFs parameters (centre, c and variance, σ^2) and consequence parameters ($p_1, \dots, p_P, \dots, p_H$, and p_0).

- Layer 4: For the rule premise evaluation, the product for T -norm (logical *and*) is chosen

and resulted the weight values as

$$w_j = \mu_{PM(t-1)_x} \times \dots \times \mu_{PM(t-P)_x} \times \dots \times \mu_{H_x}$$

(16)

where $j = 1, 2, \dots, N_{rule}$.

The consequence rules corresponding with the weight values are posed to the layer 5 for the implication evaluating.

- Layer 5: The forecast output is averagely calculated by

$$PM_{t+i} = \sum_{j=1}^{N_{rule}} w_j \theta_j / \sum_{j=1}^{N_{rule}} w_j. \quad (17)$$

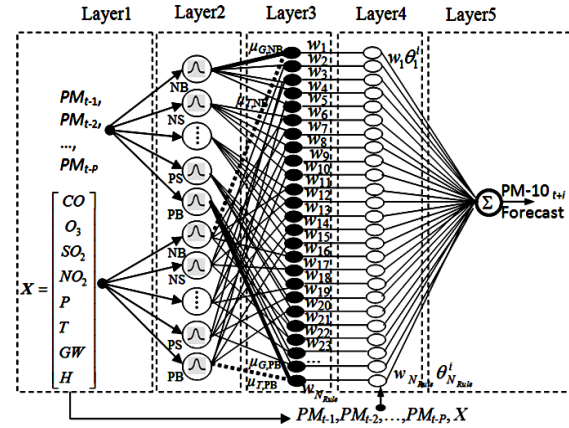


Fig. 8 The PM-10 forecast based on ANFIS model.

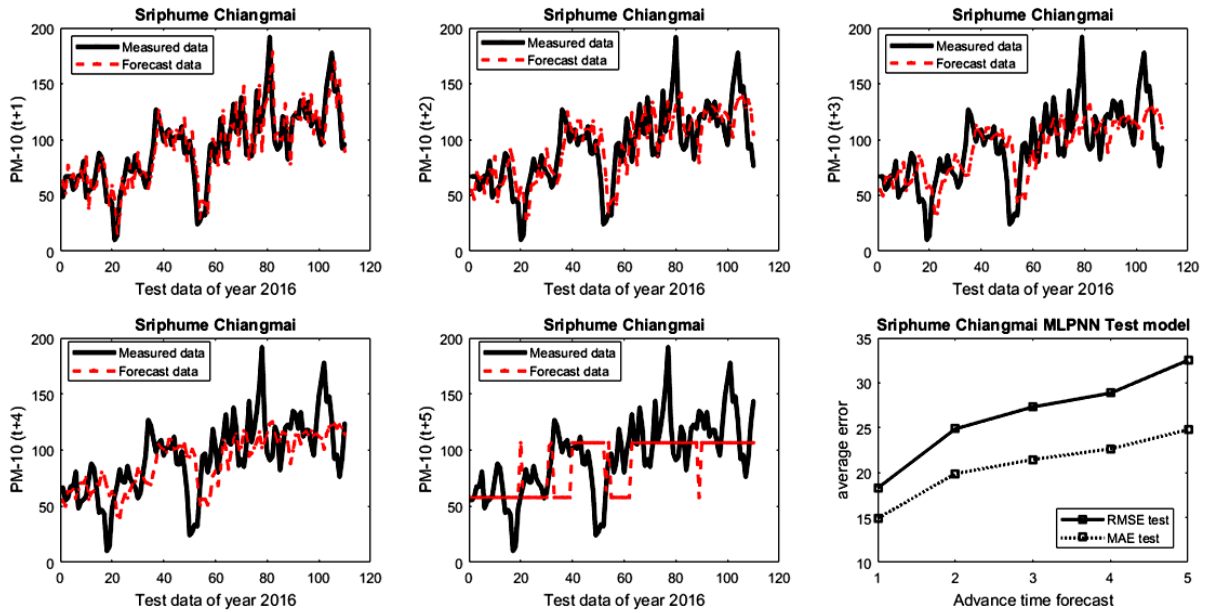


Fig. 9 A 5-day PM-10 forecast by using the optimal h MLPNN-ARIMA model.

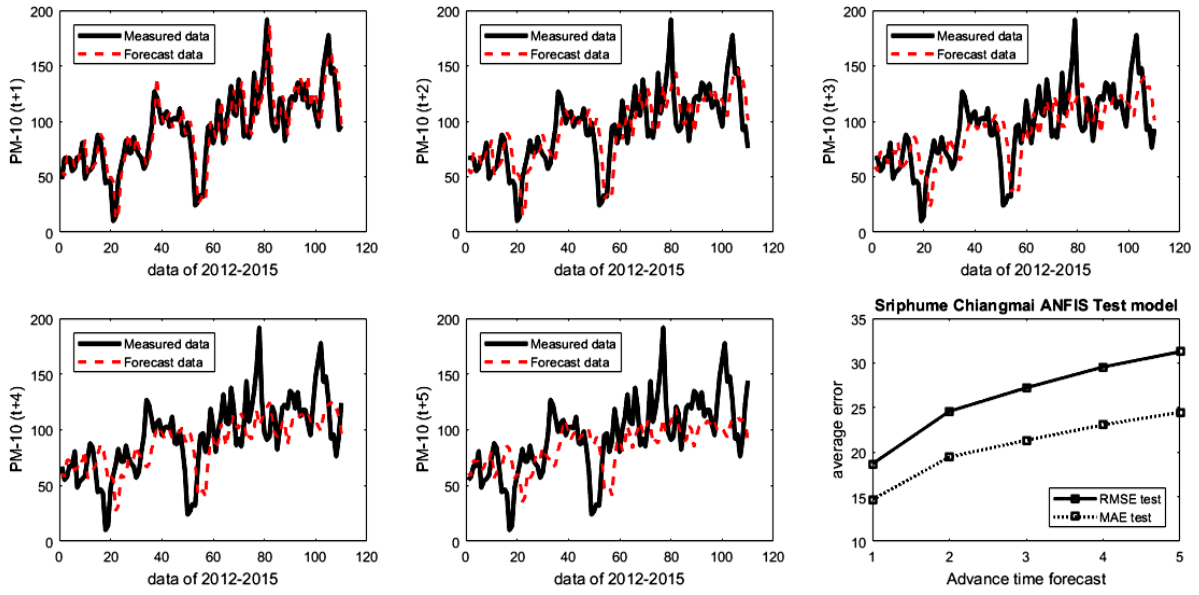


Fig. 10 A 5-day PM-10 forecast using the ANFIS model.

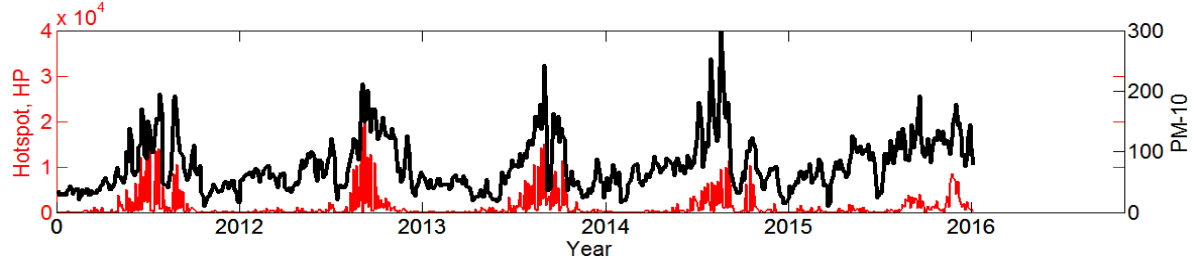


Fig. 11 The correlation between hotspots and PM-10 in the period January-April during 2012-2016 of Chiang Mai Province, Thailand.

The outputs of the adaptive nodes depend on the adjusted parameters which should be iteratively adjusted to minimize the error through the learning rule. For evaluation by ANFIS editor in MATLAB program, a large number of parameters and also the MFs can lead to very slow convergence or terminated program. To optimize the ANFIS through the experimental design, it was found that the significant variables for 1-day forecast is $\{PM_{t-1}$ and $H\}$ and for 2-5 days forecast are $\{PM_{t-1}, T\}$.

To construct the ANFIS model, the number of MFs of PM_{t-1} , H and T were set to 5 corresponds to 25 fuzzy rules. The number of system parameters according to 25 rules yields $2 \times 5 + 2 \times 5 + 3 \times 5 \times 5 = 95$ parameters which were adjusted through a hybrid learning rule combining the BP gradient descent and a least-squares method. By using the test data in 2016, the ANFIS gives the forecast performance slightly less than that of the *h*MPLNN-ARIMA (Fig.9-10) and requires more cost computation and a number of parameters. The execution time

of forecast **Model** 1-4 is less than a second since they have exactly closed-form expressions referred to (2), (8), (10) and (13), respectively. However, the different complexity in those models, **Model** 4 takes more execution time than **Model** (3), (2) and (1), respectively. While the ANFIS model related to the fuzzy IF-THEN rules transformations and has not exactly closed-form expression requires more running time of program 3-4 times that of the hybrid **Model** 1-4.

For the application, the optimal hybrid PM-10 forecast model was online embedded through some application software beneficial for the people in Chiang Mai and nearby to instantaneously get the information and prepare in advance.

4. Conclusions

This work presents the various methodologies to formulate the PM-10 forecast model during high season in Chiang Mai (Thailand). The single models including, ARIMA, ARIMAX, MLPNN and RBFNN and

the hybrid models including, $hARIMA(X)$ - MLPNN/RBFNN and $hMLPNN/RBFNN-ARIMA(X)$ were implemented. The significant historical PM-10 data, related meteorological data and correlated toxic gases were taken as the input variable. The performance of the models in terms of accuracy identified by RMSE and MAE is indicated that $hRBFNN-ARIMAX$ model performed better than the rest. However, trade-off between accuracy and reliability through AIC, it indicated that the $hMLPNN-ARIMA$ model was the optimal model whereas the $hMLPNN-ARIMAX$ and the $hRBFNN-ARIMA$ model were the sub-optimal models. The $hRBFNN-ARIMAX$ model was identified as the worst model. To further verify the forecast performance between the optimal $hMLPNN-ARIMA$ model and the ANFIS based on PM-10 forecast model, it was supported through AIC that the $hMLPNN-ARIMA$ model gives slightly more accurate than that of the ANFIS model but more reliable.

In the future, one possible extension of this research is to improve the forecast model by including hotspot as the other exogenous variable since it was demonstrated the great impacts of the burning in this area which is evident through the correlation between the hotspots, counted from Terra and Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and PM-10 level (Fig. 11). In addition, the forecast is extended for the other upper provinces in Northern Thailand where PM-10 produce great impacts on human health.

Acknowledgements

The author directly acknowledges the research fund support from the research institute of the North-Chiangmai University. In addition, we are grateful to the sub-division of Thai Meteorological Department and PCD for the collected valuable statistical data.

References

- [1] Chaloulakou, A., Grivas, G., and Spyrellis, N. Neural network and multiple regression models for PM10 prediction in Athens: A comparative assessment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003; 53:1183–1190.
- [2] Diaz-Robles, L.A., Ortega, J.C., Fu, J.S., Reed, G.D., Chow, J.C., Watson, G.J., and Moncada-Herrera, J.A. A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile. *Atmospheric Environment*, 2008; 42: 8331–8340.
- [3] Goyal, P., Chan, A.T. and Jaiswal, N. Statistical models for the prediction of respirable suspended particulate matter in urban cities. *Atmospheric Environment*, 2006; 40: 2068–2077.
- [4] Liu, P.W.G. Simulation of the daily average PM10 concentrations at Ta-Liao with Box-Jenkins time series models and multivariate analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 2009; 92(439): 2104–2113.
- [5] Sotomayor-Olmedo, A., Aceves-Fernández, M.A., Gorrostieta-Hurtado, E., Pedraza-Ortega, C., Ramos-Arreguín, C.J.M., and Vargas-Soto, J.E. Forecast urban air pollution in Mexico City by using support vector machines: A kernel performance approach. *International Journal of Intelligence Science*, 2013; 3: 126–135.
- [6] Chuentawat, R., Kerdprasop, N., and Kerdprasop, K. The forecast of PM10 pollutant by using a hybrid model. *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering*, 2017; 6(3):128-132.
- [7] Kanabkaew, T. Prediction of hourly particulate matter concentrations in Chiangmai, Thailand using MODIS aerosol optical depth and ground-based meteorological data. *Environment Asia*, 2013; 6(2): 65-70.
- [8] Amphanthong, P. and Busababodhin, P. Forecasting PM-10 in the upper northern area of Thailand with Grey system theory. *Burapha Journal*, 2015; 20(1): 65-70.
- [9] Wongsathan, R., and Seedadan, I. Prediction modeling of PM-10 in Chiangmai city moat by using artificial networks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2015; 781: 628-631.
- [10] Wongsathan, R. and Seedadan, I. A hybrid arima and neural networks model for PM-10 pollution estimation: The case of Chiang Mai city moat area. *Procedia Computer Science*, 2016; 86: 273-276.

- [11] Wongsathan, R., Seedadan, I. and Wanasri, S. Hybrid forecast model for PM-10 prediction: A case study of Chiang Mai city of Thailand during high season. *KKU Engineering Journal*, 2016; 43(S2): 203-206.
- [12] Wongsathan, R. and Chankham, S. Improvement on PM-10 forecast by using ARIMAX and hybrid ARIMAX and neural networks model for the summer season in Chiang Mai. *Procedia Computer Science*, 2016; 86: 277-280.
- [13] Wongsathan, R. Performance of hybrid fuzzy and neuro-fuzzy controller with mohga based mppt for a solar pv module on various weather conditions. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2017; 24(2): 161-175.
- [14] Prasad, K., Gorai, A.K., and Goyal, P. Development of ANFIS models for air quality forecasting and input optimization for reducing the computational cost and time. *Atmospheric Environment*, 2016; 128: 246-262.
- [15] Oprea, M., Mihalache, S.F., and Popescu, M. Computational intelligence-based PM2.5 air pollution forecasting. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2017; 12(3): 365-380.
- [16] Wang, X. A hybrid neural network and arima model for energy consumption forecasting. *Journal of computers*, 2012; 7(5): 1184-1190.
- [17] Sing, J.K., Basu, D.K., Nasipuri, M., and Kundu, M. Improved K-means algorithm in the design of RBF neural networks. *IEEE TENCON 2003: Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region*, October 15-17, 2003, Bangalore, India, 58-70.
- [18] Burnham, K.P., and Anderson, D.R. *Model Selection and Multimodel Inference*. New York: Springer-Verlag, USA, 2002.
- [19] Takagi, T., and Sugeno, M. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 1985; 15(1): 116.



การเพิ่มคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์ โดยผ่านการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และการทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก Quality Upgrading of Biodiesel from Refined Palm Oil by Catalytic Cracking with HZSM-5 and Small Diesel Engine Testing

กษวรรณ ทิพพหา¹ เรวัต คำวัน² ปญญา กรุดนาค² ชาลี ลอเวฟิน²

พลอยตะวัน มหาวันน้ำ² ธรรณิสร ดีทยา^{1,*} และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์¹

Kasawat Tippaha¹, Rawat Kumwan², Pathinya Krudnak², Chalee Lowefin²,
Ploytawan Mahawannam², Thoranis Deethayat^{1,*} and Tanongkiat Kiatsiriroat¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
Chiang Mai, 50200, Thailand

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, 50200, Thailand

*E-mail: thoranisdee@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์โดยผ่านกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีเซรามิกบอลบรรจุอยู่เพื่อช่วยรักษาอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เมื่อทำการศึกษาค่าประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้ด้วย Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS) พบว่ามี %Selectivities ของกลุ่มกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ 73.29% กลุ่มคีโตน 13.75% และกลุ่มโอเลฟิน (แก๊สโซลีน เโครซีน และดีเซล) 12.96% จากนั้นนำน้ำมันชีวภาพมากลั่นลำดับส่วนได้เป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพมากที่สุดจากการทดสอบหาค่าความร้อนและค่าความหนืดของน้ำมันดีเซลชีวภาพพบว่า มีค่าความร้อนสูงเท่ากับ 43.35 MJ/kg และค่าความหนืด เท่ากับ 4.96 cSt ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมรรถนะของน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์แบบ Indirect injection และ Direct injection พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าใกล้เคียงน้ำมันดีเซล และปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์โดยเฉลี่ยมีค่าต่ำกว่าถึง 39.17% ส่วนปริมาณการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจนมีค่าสูงกว่าเพียง 10.1% เท่านั้น

ABSTRACT

Quality upgrading of biodiesel from Refined Palm oil by thermal cracking and HZSM-5 catalytic cracking in a fixed ceramic ball bed reactor for maintaining reaction temperature was carried

out. The chemical components of the liquid organic product were also identified by Gas Chromatography-Mass Spectrometer and it could be found that the % selectivities of 72.39, 13.75 and 12.96% were Fatty Acid Methyl Ester, Ketone and Olefins (gasoline, kerosene and diesel), respectively. Fractional distillation of liquid organic product has the most green diesel. The product which was green diesel showed a calorific value of 43.35 MJ/kg and viscosity of 4.96 cSt that were better than those of biodiesel and closer to diesel oil. The green fuel was also tested in an indirect injection and a direct injection diesel engine and results were compared with the diesel oil. It could be found that the thermal efficiencies of the engines with the green diesel were close to those with diesel oil while the CO emissions were lower around 39.17% and the Nox emissions were higher around 10.1%.

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและความต้องการพลังงานเป็นเรื่องที่สำคัญ จึงมีการพัฒนาน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีมาจากปิโตรเลียม น้ำมันไบโอดีเซลถือว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพชนิดหนึ่งที่มาจากน้ำมันพืชโดยผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการนำน้ำมันมาผสมกับเอทานอล และ KOH โดยมีการให้ความร้อนจนสารมีอุณหภูมิราว 60°C จากนั้นจะปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาโดยใช้เวลานานหลายชั่วโมง [1] ปัจจุบันได้มีงานวิจัยโดยใช้คลื่นความถี่สูง หรือการใช้สนามไฟฟ้าในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีหลังสามารถแยกไบโอดีเซล และกลีเซอริน ภายในเวลาไม่กี่นาทีและใช้กำลังไฟฟ้าในกระบวนการต่ำมาก [2] น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ แต่ยังคงมีค่าความร้อนต่ำ และมีสมบัติบางประการที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในเครื่องยนต์ [1, 3, 4] ดังนั้นการพัฒนาคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจึงมีความจำเป็น

กระบวนการพัฒนาคุณภาพของน้ำมันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการแตกตัวโดยอาศัยไฮโดรเจน (Hydrogen Cracking) [5] ไฮโดรเจนจะแทนที่ออกซิเจนในโมเลกุลออกไปเพื่อให้อยู่ในรูปไอน้ำ (H₂O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แต่ปฏิกิริยานี้ต้องทำที่ความดันสูง ซึ่งต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไว (active) เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกโลหะทรานซิชัน ทำให้ใช้ต้นทุนการผลิตที่สูง จึงทำ

ให้วิธีนี้มีข้อจำกัด จากนั้นกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) ซึ่งเป็นการทำให้น้ำมันเกิดการแตกตัวเพื่อทำลายพันธะไฮโดรคาร์บอนแล้วเกิดปฏิกิริยาผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระและคาร์บอนเนียมไอออนด้วยอุณหภูมิสูง แต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวจะมีปริมาณน้อย [6] นอกจากนี้กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) [7] ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อปรับโครงสร้างทางเคมีของน้ำมัน และตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการแตกตัวเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตน้ำมันเพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพที่ดีขึ้น ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการ ส่วนใหญ่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนระดับไมโคร และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนระดับกลาง ตัวอย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมคือ ZSM-5 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกซีโอไลต์ ซึ่งจะเร่งในการแตกตัวของน้ำมันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย รวมถึงการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ ZSM-5 ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและสารอะโรมาติกมากที่สุด [8, 9] นอกจากนี้ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกซีโอไลต์อีกชนิดคือ HZSM-5 ซึ่งเป็นตัวเร่งที่จะช่วยเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสูง เกิดโค้กน้อย และสามารถแยกสลายไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กได้

มีงานวิจัยที่พัฒนาคุณภาพน้ำมันอย่างเช่น งานวิจัยของ Parvizsedghy และคณะ [10] ทำการศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันละหุ่ง

ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าน้ำมันไบโอดีเซลผ่านกระบวนการมีคุณภาพและค่าความร้อนที่สูงขึ้น งานวิจัยของ Seifi และคณะ [11] ทำการศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันดอกทานตะวันเปรียบเทียบกับเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมันดอกทานตะวัน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเมทิลเอสเทอร์น้ำมันดอกทานตะวัน ประกอบด้วย แก๊สโซลีน เโครซีน และดีเซล ในปริมาณที่มากกว่าผลิตภัณฑ์ของน้ำมันดอกทานตะวัน และงานวิจัยของ จันทนิภา เหล่าวานิชวัฒนา และคณะ [12] ทำการศึกษาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพีซีแล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยมีเชรามิกบอลบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่า การบรรจุเชรามิกบอลในเครื่องปฏิกรณ์สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ และให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุด และมีค่า %Selectivity ในการเกิดเป็นอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงโครซีนที่สูง ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่สูงขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลผ่านการแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกซีโอไลต์ที่มีข้อดีคือให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่สูงขึ้น และการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่บรรจุเชรามิกบอล สามารถเพิ่มค่าความร้อนช่วยในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ดี น้ำมันที่ถูกเพิ่มคุณภาพจะถูกนำมาทดสอบสมรรถนะในเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

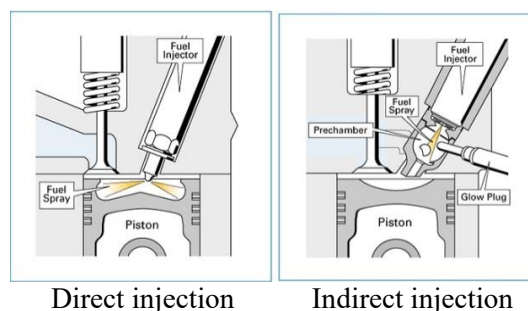
2.1 เครื่องยนต์ดีเซล [13]

ในเครื่องยนต์ดีเซล เชื้อเพลิงถูกจุดให้ลุกไหม้ด้วยความร้อนของอากาศ ซึ่งถูกอัดตัวจนมีความดันและอุณหภูมิสูง และสร้างการเคลื่อนที่ขึ้นลงของลูกสูบภายในกระบอกสูบ ลูกสูบจะต่อกับกลไกที่ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงซึ่งเรียกกันว่าก้านสูบ โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของ

ก้านสูบจะต่อกับข้อเหวี่ยงของเพลาคือเหวี่ยง เพื่อถ่ายทอดกำลังงานที่เครื่องยนต์ผลิตขึ้นมาใช้ประโยชน์

ในเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ เพลาคือเหวี่ยงหมุนครบ 2 รอบ โดยลูกสูบเลื่อนขึ้น 2 ครั้ง เลื่อนลง 2 ครั้ง ถือเป็นการทำงานครบ 1 วัฏจักร ชนิดของระบบเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลแบ่งการออกแบบห้องเผาไหม้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

- 1) ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแบบโดยตรง (Direct injection, DI) เป็นระบบที่มีห้องเผาไหม้เปิดห้องเดียว และเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปโดยตรงในห้องเผาไหม้นั้น
- 2) ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงโดยมีห้องเผาไหม้ช่วย (Indirect injection, IDI) เป็นระบบที่มีห้องเผาไหม้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนและเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปในห้องเผาไหม้ก่อนซึ่งต่อกับห้องเผาไหม้หลัก



รูปที่ 1 ระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงแบบโดยตรงและระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงโดยมีห้องเผาไหม้ช่วย [14]

2.2 สมรรถนะของเครื่องยนต์ [15]

2.2.1 แรงบิดของเครื่องยนต์ (Torque)

แรงบิดของเครื่องยนต์คือตัวบ่งชี้ความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์ เป็นผลของแรงที่กระทำต่อแขนหมุน โดย

$$T = FR \quad (1)$$

เมื่อ T คือ แรงบิด, N.m
 F คือ แรงต้านการหมุนของเครื่องยนต์, N

R คือ ระยะที่แรงกระทำถึงจุดศูนย์กลางการหมุน, m

2.2.2 กำลังเบรคของเครื่องยนต์ (Brake Power)

กำลังเพลของเครื่องยนต์คือกำลังที่วัดได้จากเพลขาเหียงของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นกำลังที่นำไปใช้ประโยชน์สามารถคำนวณจาก

$$P_b = \frac{2\pi NT}{60 \times 1000} \quad (2)$$

เมื่อ P_b คือ กำลังของเพล, kW

N คือ ความเร็วรอบการหมุน, rpm

2.2.3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption; SFC)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ คือตัวแปรที่ใช้บอกความสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงให้เป็นงานที่ทำได้ จะคำนวณจาก

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad (3)$$

เมื่อ SFC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, kg/kW.h

$\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง, kg/h

2.2.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency)

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนคืออัตราส่วนของความร้อนที่ป้อนเข้าไปในที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นงานสุทธิสามารถคำนวณจาก

$$\eta_{th} = \frac{P_b \times 3600}{\dot{m}_f Q_{HHV}} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Q_{HHV} คือ ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง, MJ/kg

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบเป็นน้ำมันปาล์มรีไฟน์ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จำนวน 1 L นำมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยการผสมสารละลายเมทานอล 200 ml กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.5 g กวนและให้ความร้อน จากนั้นทำการแยกชั้นน้ำมันกับกลีเซอรินด้วยซิลิกาเจล โดยน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 6.28 cSt และมีค่าความร้อนสูงเท่ากับ 38.62 MJ/kg น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้พบว่า มีค่าความหนืดสูงและค่าความร้อนที่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล (ค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 3.73 cSt และค่าความร้อนสูงประมาณ 46.70 MJ/kg) และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบกลุ่มกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำมันไบโอดีเซล

Component	Formula	% Selectivity
Methyl tetra decanoate	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	0.448
Hexadecenoic, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	50.171
11, 14-Octadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	3.128
8-Octadecenoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	43.197
Octadecanoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	3.055

ในการเพิ่มคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 จาก Hutong Global CO., LTD ที่มีอัตราส่วน SiO₂/Al₂O₃ เท่ากับ 60 พื้นที่ผิว 340 m²/g ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อทำการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นนำน้ำมันไบโอดีเซลประมาณ 700 g บรรจุในปฏิกรณ์ตัวที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงชุดทดสอบ จากนั้นน้ำมันจะถูกทำให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) ที่อุณหภูมิ 500°C จนน้ำมันไบโอดีเซลเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของเหลว

กลายเป็นแก๊ส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ 200 ml/min จากนั้นแก๊สที่ได้จากถังปฏิกรณ์ตัวที่ 1 จะไหลผ่านเข้ามาทำปฏิกิริยาที่ปฏิกรณ์ตัวที่ 2 ที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ปริมาณ 70 g พร้อมกับเซรามิกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm เพื่อช่วยรักษาอุณหภูมิในปฏิกรณ์ขณะทำปฏิกิริยาที่ 500°C แก๊สที่ทำปฏิกิริยาแล้วจะไหลออกมาควบแน่นเป็นของเหลวที่คอนเดนเซอร์เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Liquid organic product)

3.2 กระบวนการกลั่นลำดับส่วน

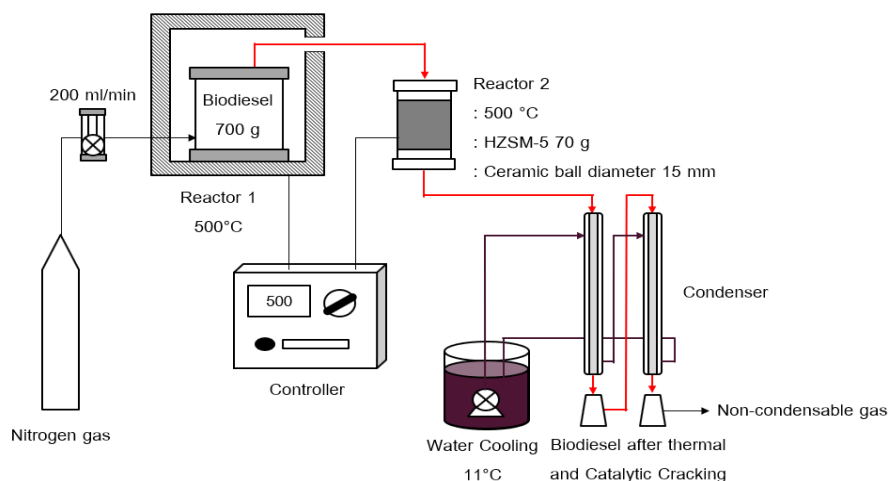
น้ำมันชีวภาพที่ได้ นำมาผ่านการกลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation) โดยควบคุมช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึง 160°C ซึ่งจุดเดือดเป็นของแก๊สโซลีน ช่วง 161°C–300°C คือจุดเดือดของเคโรซีน และช่วง 300–350°C คือจุดเดือดของดีเซล และเรียกเชื้อเพลิงเหลวหลังการกลั่นลำดับส่วนว่า น้ำมันแก๊สโซลีนชีวภาพ (Green Gasoline) น้ำมันเคโรซีนชีวภาพ (Green Kerosene) และน้ำมันดีเซลชีวภาพ (Green Diesel) ตามลำดับ

3.3 สมบัติทางกายและทางเคมี

น้ำมันชีวภาพที่ได้ จะถูกนำมาทดสอบหาค่าความร้อนจะถูกทดสอบด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (ASTM D240-64) และค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ด้วยเครื่อง Say bolt Universal Viscometer (ASTM D2161) ส่วนการศึกษาร่องรอยประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจะใช้เครื่อง Gas Chromatography - Mass Spectrometer (GC-MS, Agilent Model. G1530N)

3.4 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

น้ำมันดีเซลชีวภาพที่ได้ จะถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับการเกษตรยี่ห้อ ยันมาร์ (YANMAR) รุ่น TF 90 DI แบบ Direct injection และ รุ่น TF 75 LM แบบ Indirect injection โดยกำหนดโหลดไฟฟ้าที่ 50% และ 75% ของอัตราไฟฟ้าขนาด 7.5 kW โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นทำการวัดปริมาณแก๊สไอเสีย ได้แก่ CO และ NO_x โดยเครื่องวัดไอเสียยี่ห้อ Testo รุ่น 340



รูปที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ออกแบบและใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2 ข้อมูลของเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ (ข้อมูลจากผู้ผลิต)

รุ่น	TF 75 LM	TF 90 DI
ประเภทเครื่องยนต์	4 จังหวะ สูบฉีดระบายความร้อนด้วยน้ำ	4 จังหวะ สูบฉีดระบายความร้อนด้วยน้ำ
ระบบห้องเผาไหม้	Indirect injection	Direct injection
จำนวนกระบอกสูบ	1	1
ระบบระบายความร้อน	หม้อรังผึ้ง	หม้อรังผึ้ง
ระบบสตาร์ทเครื่องยนต์	ใช้เฟืองทด มือหมุน	ใช้เฟืองทด มือหมุน
ประเภทน้ำมันเชื้อเพลิง	ดีเซลหมุนเร็ว	ดีเซลหมุนเร็ว
ขนาดกระบอกสูบและช่วงชัก	80 x 87 มม.	85 x 87 มม.
กำลังม้าต่อเนื่อง	แรงม้า/รอบต่อนาที	8.0/2400
	กิโลวัตต์/รอบต่อนาที	5.9/2400
กำลังม้าสูงสุด	แรงม้า/รอบต่อนาที	9.0/2400
	กิโลวัตต์/รอบต่อนาที	6.6/2400
อัตราส่วนกำลังอัด	21.0: 1	16.6: 1



Indirect injection engine



Direct injection engine

รูปที่ 3 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบ

4. ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพก่อน นำมากลั่นลำดับส่วน มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ 73.29% สารประกอบจำพวกกลีโคไล 13.75% และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกไฮโดรคาร์บอน (แก๊สโซลีน เกลอซัน และดีเซล) 12.96% จากนั้นนำมากลั่นลำดับส่วนได้ผลิตภัณฑ์เป็น แก๊สโซลีนชีวภาพ 4.4%, เกลอซันชีวภาพ 4.1%, ดีเซลชีวภาพ 76.4% และอื่นๆ 15.1% ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบสมบัติของน้ำมันดีเซลชีวภาพ

เนื่องจากจะนำมาใช้ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลสำหรับการเกษตร

4.2 สมบัติทางกายภาพ

น้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าความร้อน และค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ใกล้เคียงน้ำมันดีเซลมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่ใช้สามารถเพิ่มคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลให้สูงขึ้นได้ และใกล้เคียงน้ำมันดีเซลมากขึ้นเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลที่เป็นสารตั้งต้น ผลแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของน้ำมัน

Parameter	Unit	Biofuel			
		Palm oil Refined	Biodiesel	Green Diesel	Diesel
Calorific value	MJ/kg	38.41	38.62	43.35	46.70
Viscosity at 40°C	cSt	45.47	6.28	4.96	3.73



Biodiesel



Green diesel

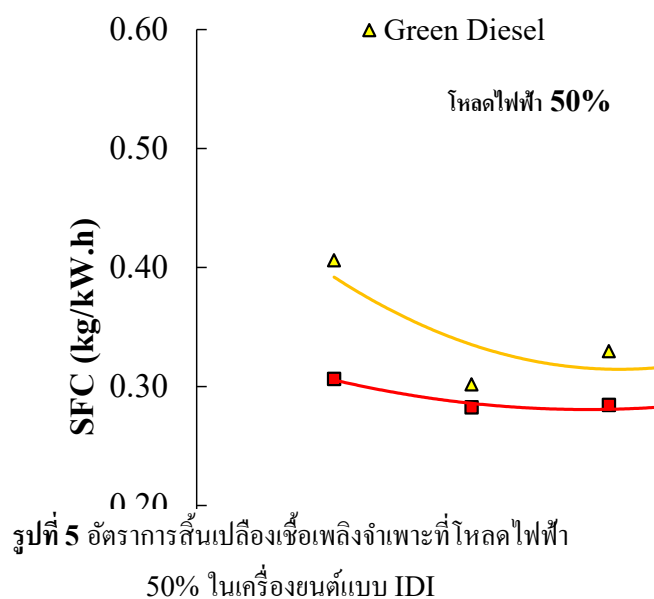
รูปที่ 4 แสดงน้ำมันไบโอดีเซล เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลชีวภาพ

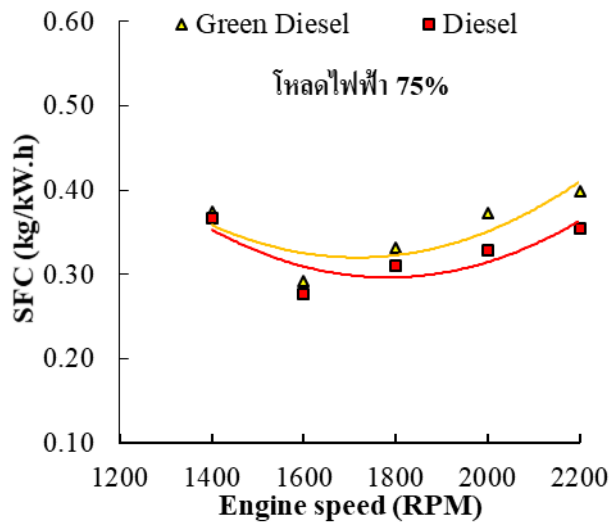
4.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์

4.3.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

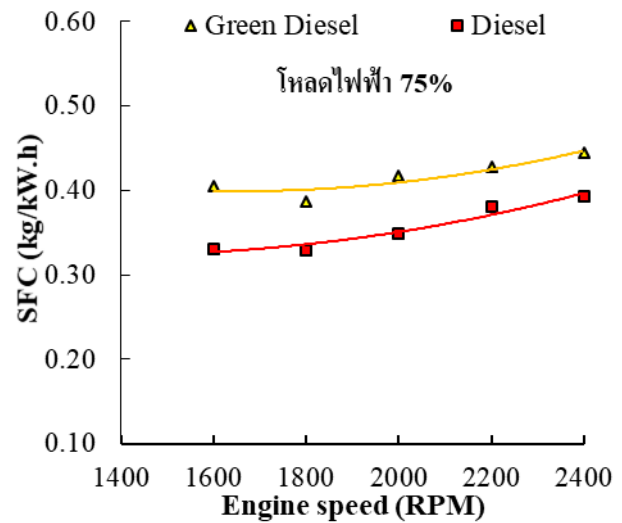
ในเครื่องยนต์แบบ Indirect injection พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ที่ความเร็วรอบต่ำจะมีค่าสูง เนื่องจากการทำงานที่ความเร็วรอบต่ำจะมีระยะเวลาการทำงานต่อหนึ่งวัฏจักรนาน จึงทำให้สูญเสียพลังงานความร้อนทางผนังกระบอกสูบและผนังห้องเผาไหม้มาก แต่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากระยะเวลาการทำงานต่อหนึ่งวัฏจักรสั้นลงจึงทำให้สูญเสียพลังงานความร้อนน้อยลง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ความเร็วรอบสูงขึ้น เนื่องจากมีผลของแรงเสียดทานที่สูงขึ้น รวมถึงจังหวะการฉีดของปั้มน้ำมันซึ่งมีค่าเหมาะสมที่ความเร็วรอบหนึ่ง และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันดีเซลชีวภาพ พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซล เนื่องจากค่าความร้อนสูงของน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าน้อยกว่า เป็นผลทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำมันต่อหน่วยที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อภาระการทำงานสูงขึ้น น้ำมันดีเซลชีวภาพมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมากกว่าน้ำมันดีเซลมากขึ้น

ส่วนเครื่องยนต์แบบ Direct injection พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับเครื่องยนต์แบบ Indirect injection โดยการจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของน้ำมันดีเซลชีวภาพสูงกว่าน้ำมันดีเซล ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ทั้งนี้มีข้อสังเกตว่าภาระที่เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าลดลงเล็กน้อย

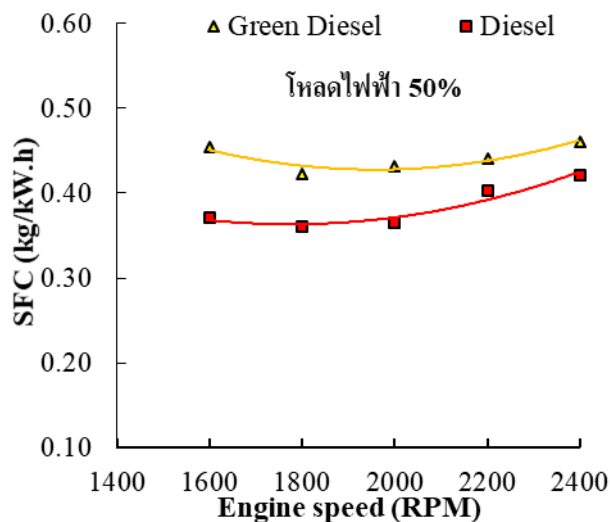




รูปที่ 6 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่โหลดไฟฟ้า 75% ในเครื่องยนต์แบบ IDI



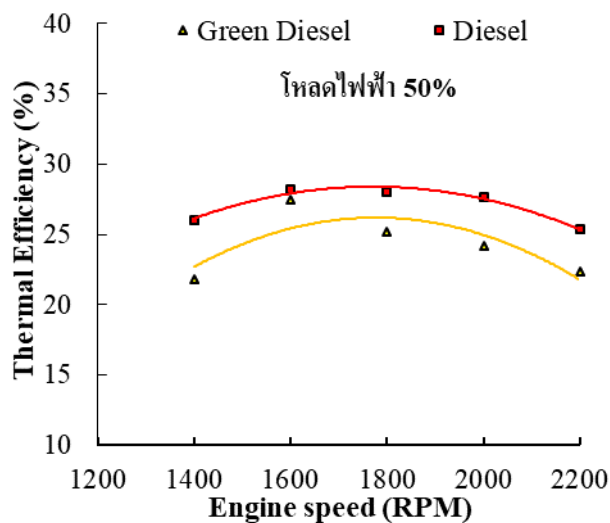
รูปที่ 8 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่โหลดไฟฟ้า 75% ในเครื่องยนต์แบบ DI



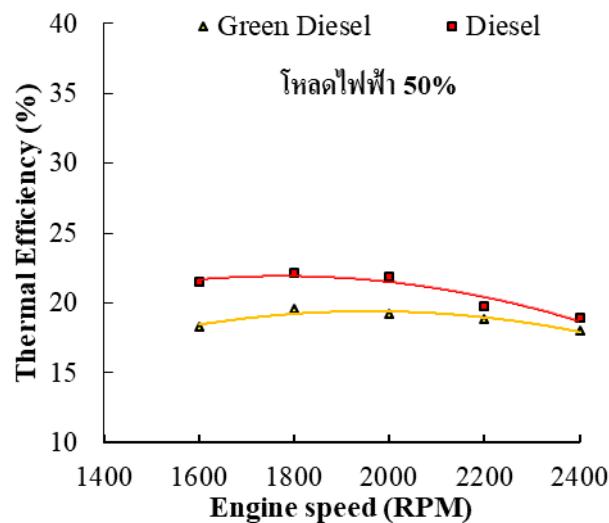
รูปที่ 7 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่โหลดไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์แบบ DI

4.3.2 ประสิทธิภาพทางความร้อน

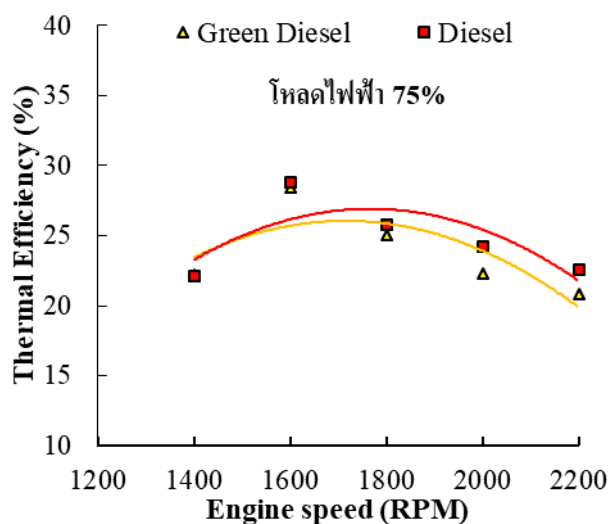
ในเครื่องยนต์แบบ Indirect injection พบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนมีแนวโน้มลดลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วรอบที่สูงขึ้นจะมีแรงเสียดทานที่มากขึ้น จึงต้องมีการฉีดเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่มากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน และเมื่อเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันดีเซลชีวภาพ พบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล โดยในช่วงที่ความเร็วรอบต่ำจะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก แต่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงกว่าและค่าความร้อนที่น้อยกว่า ผลแสดงในรูปที่ 9 และ 10



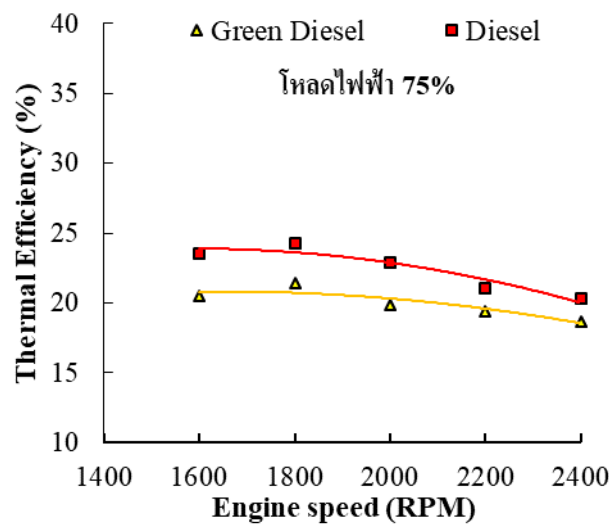
รูปที่ 9 ประสิทธิภาพทางความร้อนที่โหลดไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์แบบ IDI



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพทางความร้อนที่โหลดไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์แบบ DI



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพทางความร้อนที่โหลดไฟฟ้า 75% ในเครื่องยนต์แบบ IDI



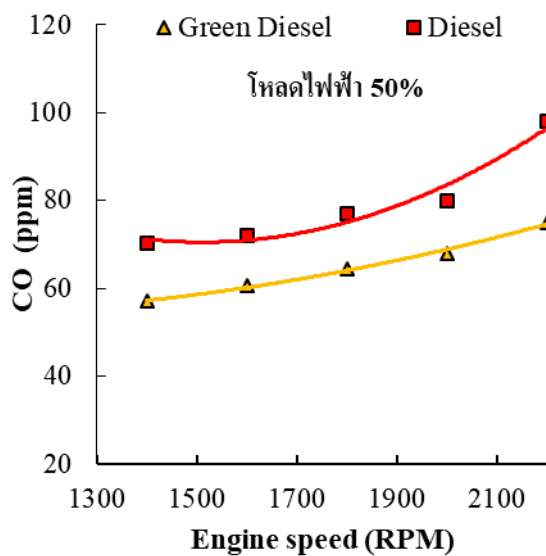
รูปที่ 12 ประสิทธิภาพทางความร้อนที่โหลดไฟฟ้า 75% ในเครื่องยนต์แบบ DI

ส่วนเครื่องยนต์แบบ Direct injection พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกับเครื่องยนต์แบบ Indirect injection แต่จะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีการใช้เชื้อเพลิงมากกว่า แสดงในรูปที่ 11 และ 12

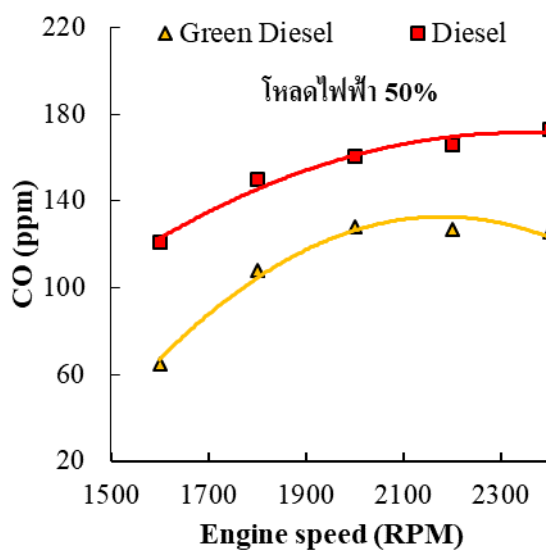
4.3.3 ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นทั้งในเครื่องยนต์แบบ Indirect injection และ Direct injection เนื่องจากมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ และเมื่อเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำดีเซลชีวภาพพบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซลในทุกความเร็วรอบ เนื่องจากมีออกซิเจน (O_2) เป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง ทำให้ช่วยในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า [16] โดยปริมาณ

การปล่อย CO เฉลี่ยในเครื่องยนต์ IDI ของน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่า ประมาณ 65.2 ppm ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่า 79.4 ppm ซึ่งถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่างกันถึง 21.78% ส่วนในเครื่องยนต์ DI มีค่าเฉลี่ยประมาณ 110.8 ppm ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่า 154.2 ppm ซึ่งต่างกันประมาณ 39.17% ทำให้เห็นว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสามารถลดปริมาณการปล่อยมลพิษได้อย่างมาก แสดงในรูปที่ 13 และ 14



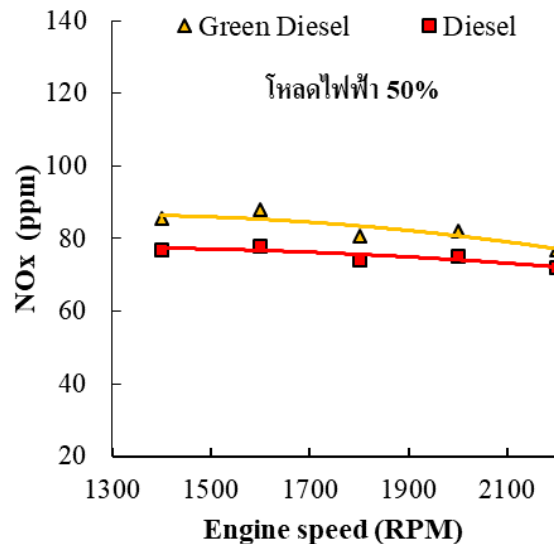
รูปที่ 13 ปริมาณการปล่อย CO ที่โหลไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์ แบบ IDI



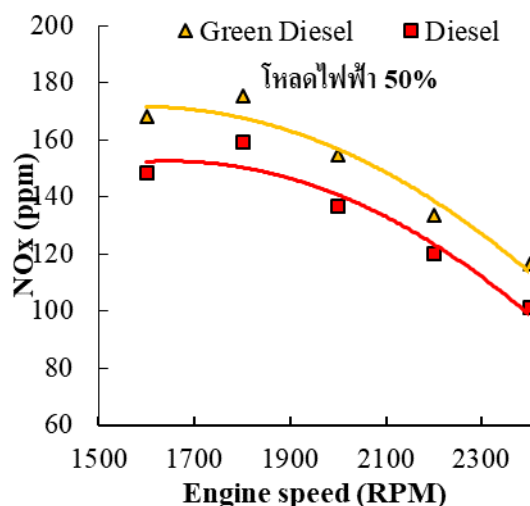
รูปที่ 14 ปริมาณการปล่อย CO ที่โหลไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์ แบบ DI

4.3.4 ปริมาณการปล่อยออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx)

ปริมาณไอเสีย NOx มีแนวโน้มลดลงตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น ทั้งในเครื่องยนต์แบบ Indirect injection และ Direct injection และเมื่อเทียบระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำดีเซลชีวภาพพบว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าสูงกว่าน้ำมันดีเซลเนื่องจากมีออกซิเจน (O_2) เป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงทำให้ทำปฏิกิริยากับอากาศที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบทำให้เกิดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ทั้งหมด [17] โดยปริมาณการปล่อย NOx เฉลี่ยในเครื่องยนต์ IDI ของน้ำมันดีเซลชีวภาพมีค่าประมาณ 82.8 ppm ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่า 75.2 ppm ซึ่งถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่างกันเพียง 10.1% เท่านั้น ส่วนในเครื่องยนต์ DI มีค่าเฉลี่ยประมาณ 150 ppm ในขณะที่น้ำมันดีเซลมีค่า 133.2 ppm ซึ่งต่างกันประมาณ 12.61% เท่านั้น ทำให้เห็นว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงน้ำมันดีเซลและมีปริมาณปล่อยแก๊ส NOx ที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลอีกด้วยแสดงในรูปที่ 15 และ 16



รูปที่ 15 ปริมาณการปล่อย NOx ที่โหลไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์ แบบ IDI



รูปที่ 16 ปริมาณการปล่อย NOx ที่โหลไฟฟ้า 50% ในเครื่องยนต์ แบบ DI

5. สรุปผลการวิจัย

น้ำมันไบโอดีเซลที่มาจากน้ำมันปาล์มรีไฟน์แล้วพัฒนาคุณภาพด้วยกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพเมื่อนำมากลั่นลำดับส่วนเกิดเป็นน้ำมันดีเซลชีวภาพมากที่สุด และนำน้ำมันดีเซลชีวภาพมาหาค่าความร้อนและค่าความหนืดพบว่ามีความร้อนที่สูงกว่าน้ำมันไบโอดีเซล ส่วนค่าความหนืดมีค่าต่ำกว่า และมีค่า

ใกล้เคียงน้ำมันดีเซลมากขึ้น คือมีค่าความร้อนสูงเท่ากับ 43.35 MJ/kg และค่าความหนืดเท่ากับ 4.96 cSt

ส่วนการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์ น้ำมันดีเซลชีวภาพมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมากกว่าน้ำมันดีเซลเพียงเล็กน้อย ซึ่งมองในด้านการใช้พลังงานทดแทนจะสามารถลดปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลลงได้มากถึง 100% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ใกล้เคียงน้ำมันดีเซลมาก

ในการทดสอบปริมาณการปล่อยแก๊ส CO และ NOx พบว่ามีปริมาณการปล่อยแก๊ส CO ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลมาก ส่วนปริมาณการปล่อย NOx ก็สูงกว่าเพียงเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพสามารถช่วยลดปัญหาการปล่อยมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธิปดินทร์ แสงสว่าง, พิพัฒน์ พิษขจรโยธิน และจิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ. การศึกษาสมรรถนะมลพิษและอัตราการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซลแบบ IDI ที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบ-ดีเซลเป็นเชื้อเพลิง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2552; 16(1):28-38.
- [2] ศุภกฤษณ์ งามเมือง, ธณิศวรร ติทายาท และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. กระบวนการผลิตและการประเมินต้นทุนไบโอดีเซลที่ผ่านการเร่งปฏิกิริยาคายสนามไฟฟ้า และการทำความสะอาดแบบแห้ง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2560; 24(2):176-184.
- [3] ธิปดินทร์ แสงสว่าง, พิพัฒน์ พิษขจรโยธิน และจิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แบบ IDI. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2553; 17(3): 50-64.
- [4] Knothe, G., Van Gerpen, J. H. and Krah, J. The Biodiesel Handbook. AOCS Press, Champaign, Ill, 2005.
- [5] Wang, H., Yan, S., Salley, S. and Simon Ng, K. Hydrocarbon Fuels Production from Hydrocracking of Soybean Oil Using Transition Metal Carbides and Nitrides Supported on ZSM-5. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012; 51(30): 10066-10073.

- [6] Li, H., Yu P. and Shen, B. Biofuel Potential Production from Cottonseed oil: A Comparison of Non-catalytic and Catalytic Pyrolysis on Fixed-Fluidized Bed Reactor. *Fuel Processing Technology*, 2009; 90(9): 1087-1092.
- [7] Biswas, S., Biswas, P. and Kumar, A. Catalytic Cracking of Soybean Oil with Zirconium Complex Chemically Bonded to Alumina Support without Hydrogen. *International Journal of Chemical Science and Applications*, 2012; 3(2): 306-313.
- [8] Jae, J., Tompsett, G., Foster, A. Hammond, K., Auerbach, S., Lobo, R. and Huber, G. Investigation into The Sharp Selectivity of Zeolite Catalysts for Biomass Conversion. *Journal of Catalysis*, 2011; 279(2): 257-268.
- [9] Zhang, H., Cheng, Y., Vispute, T., Xiao, R. and Huber, G. Catalytic Conversion of Biomass-Derived Feedstocks into Olefin and Aromatics with ZSM-5: The Hydrogen to Carbon Effective Ratio. *Energy & Environmental Science*, 2011; 4(6): 2297.
- [10] Parvizsedghy, R., Sadrameli, S.M. and Darian, J.T. Upgraded Biofuel Diesel Production by Thermal Cracking of Castor Biodiesel. *Energy Fuel*, 2015; 30: 326–333.
- [11] Seifi, H. and Sadrameli, S.M. Improvement of Renewable Transportation Fuel Properties by Deoxygenation Process Using Thermal and Catalytic Cracking of Triglycerides and Their Methyl Esters. *Applied Thermal Engineering*, 2016; 100: 1102-1110.
- [12] จันทนิภา เหล่าวานิชวัฒนา, อรรถกร อาสนคำ, ธรณิศวรรค์ ดีทยาบท และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชใช้แล้วผ่าน HZSM-5 คัดเลือกผลิตภัณฑ์. การประชุมวิชาการ เรื่องการถ่ายทอดผลงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15, วันที่ 30-31 มีนาคม 2559, โรงแรมแอลริสอร์ท สมุย, จังหวัดสุราษฎร์ธานี, 2559;372-379.
- [13] เกียรติศักดิ์ ดวงใจ. การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันดีเซลผสมสารเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลกำเนิดไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม, 2551
- [14] Slideshare.net. Available [online]: <https://www.slideshare.net/mail2paramjeet/internal-comstion-engines>, 2017.
- [15] กิตติรัช ถนนพวงษ์ชาติ, จิรวรรณ เตย์สุวรรณ และ ธิบดีรินทร์ แสงสว่าง. สมรรถนะและมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยอ้อมที่ใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสมเอทานอลเป็นเชื้อเพลิง. การประชุมวิชาการการถ่ายทอดผลงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 12, วันที่ 14-15 มีนาคม 2556, โรงแรมอิมพีเรียลโกลเด้นไทรแองเกิ้ลริสอร์ท, จังหวัดเชียงราย, 2556; 270-274.
- [16] Ramadhas, A.S., Muraleedharan, C. and Jayaraj, S. Performance and Emission Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Methyl Esters of Rubber Seed Oil. *Renewable Energy*, 2005; 30: 1789–1800.
- [17] Cherng, Y.L., and Hsiu, A.L. Diesel Engine Performance and Emission Characteristics of Biodiesel Produced by The Peroxidation Process. *Fuel*, 2006; 85: 298–305.



การจัดตารางการผลิตโดยใช้วิธีฮิวริสติกแบบผสม

กรณีศึกษา: โรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ

Production Scheduling using Hybrid Heuristics Method: A Case Study of Ready-Mixed Concrete Plant

ปวีธิดา พัฒน่อภิพงษ์*, ปุณณมี สัจจกมล และ ไอลดา ตรีรัตน์ตระกูล

Paweetida Phatapipong*, Punnamee Sachakamol and Ailada Treerattrakoon

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร แขวงลาดยาว จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10900

Faculty of Engineering, Kasetsart University, Chatuchuk, Bangkok, 10900

Kasetsart University, 10900, Thailand

*E-mail: paweetida@gmail.com, Telephone number: 086-3826876

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการจัดตารางการผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูป ซึ่งมีขนาดความยาวแผ่น ขนาดเส้นลวด และจำนวนเส้นลวดแตกต่างกัน เนื่องจากกระบวนการผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูป ต้องผลิตภายในแม่แบบเดียวกัน ซึ่งแม่แบบมีขนาดความยาวคงที่ ประกอบกับการผลิตต้องคำนึงถึงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากร ผู้ผลิตจำเป็นต้องผลิตสินค้าเกินความต้องการของลูกค้า ทำให้ประสบปัญหาพื้นที่จัดเก็บไม่เพียงพอ ผู้วิจัยจึงเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตโดยวิธีฮิวริสติก ได้แก่ Earliest Due Date (EDD), First Come First Serve (FCFS), Shortest Processing Time (SPT), Minimum Slack Time (MST), Critical Ratio (CR) และกำหนดรายการสินค้าคงคลังเพื่อควบคุมปริมาณสินค้าคงคลัง ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของการศึกษานี้ ได้แก่ จำนวนงานล่าช้า, เวลาล่าช้ารวม, เวลาล่าช้าสูงสุด, ปริมาณสินค้าคงคลัง, ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง, พื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บสินค้าคงคลัง, ร้อยละการใช้ประโยชน์ของแม่แบบ และมูลค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้น จากนั้นเปรียบเทียบผลการจัดตารางผลิตวิธีฮิวริสติกแต่ละวิธีกับวิธีเดิม และพัฒนาการจัดตารางการผลิตวิธีใหม่คือ Shortest Processing Time (SPT) + Slack Time1 (Slack1) จากการศึกษาพบว่าวิธี SPT+Slack1 สามารถลดจำนวนงานล่าช้าได้มากที่สุดจาก 170 งาน เหลือ 95 งาน (ลดได้ร้อยละ 44.12) และลดปริมาณสินค้าคงคลังได้มากที่สุดจาก 5,085 แผ่น/วัน เหลือ 4,164 แผ่น/วัน (ลดได้ร้อยละ 21.32) ซึ่งทำให้สามารถใช้พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังภายใต้ขีดจำกัดที่โรงงานมีโดยใช้พื้นที่ร้อยละ 52.96 และประหยัดต้นทุนรวมได้ 1,278,938 บาท/ปี (ลดได้ร้อยละ 8.34)

ABSTRACT

This paper investigates production schedule of precast slab with different lengths of slab, size of wires and number of wires. Every precast slabs with various parameters need to be produced in a same mold with fixed length, which commonly caused the factory needs to produce over-demand and over-stock in the warehouse. This paper presents the heuristic approach such as Earliest Due Date (EDD), First Come First Serve (FCFS), Shortest Processing Time (SPT), Minimum Slack Time (MST), Critical Ratio (CR), and determines products list for finished goods inventory. The results compared with the current method using Key Performance Indicator (KPI) such as number of tardy Jobs, total tardiness, maximum tardiness, finished goods inventory, holding cost, utilization of warehouse, utilization of machines and loss worth of material. From the results, we development new

method is Shortest Processing Time (SPT) + Slack Time1 (Slack1) and found out that SPT+Slack1 is number of tardy jobs decreased from 170 to 95 (decreased 44.12%) and finished goods inventory decreased from 5,085 to 4,164 sheets/day (decreased 21.32%) then utilization of warehouse 52.96% and save total cost 1,278,938 baht/year (decreased 8.34%)

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างจัดเป็นอุตสาหกรรมที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจ และมีส่วนช่วยในการพัฒนาความยั่งยืนของประเทศไทย เช่น การสร้างที่พักอาศัย อาคารโรงงาน และการสร้างถนน เป็นต้น [1] ได้รายงานว่า เศรษฐกิจไทยตลอดปี 2559 ในด้านการผลิต สาขาการก่อสร้างมีการขยายตัวร้อยละ 6.1 เป็นผลจากการขยายตัวการก่อสร้างของภาครัฐร้อยละ 11.7 (โดยการก่อสร้างของภาครัฐขยายตัวร้อยละ 2.7 และการก่อสร้างของรัฐวิสาหกิจขยายตัวร้อยละ 44.0) ประกอบกับ [2] ได้สำรวจอุตสาหกรรมการก่อสร้าง พ.ศ. 2557 พบว่ามีสถานประกอบการก่อสร้างรวมทั้งสิ้น 33,057 แห่ง โดยการก่อสร้างอาคารคิดเป็นร้อยละ 53.4 ซึ่งปัจจุบันผู้ก่อสร้างมีการนำแผ่นพื้นสำเร็จรูป หรือแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป มาใช้ในการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นคอนกรีตผสมเสร็จที่ทำการหล่อมาจากโรงงาน ทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน เป็นการประหยัดเวลาในการเตรียมแบบสำหรับเทคอนกรีต และการประหยัดแรงงานเมื่อขนย้ายแผ่นพื้นสำเร็จรูปจากโรงงานผลิตถึงหน้างานสามารถติดตั้งใช้งานได้ทันที ทำให้ผู้ผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูปต้องมุ่งพัฒนาเพิ่มขีดความสามารถ และประสิทธิภาพในการผลิต ซึ่งมีส่วนช่วยให้ความสามารถในการแข่งขันให้สูงขึ้น และทำกำไรให้แก่องค์กร

การผลิตสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรม มักมีปัญหาก่อขึ้นอยู่ตลอดเวลา ทั้งปัญหาที่เกิดจากผู้ผลิต และปัญหาที่เกิดจากลูกค้า กระบวนการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพอยู่ตลอดเวลา การจัดการการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาในปัจจุบัน ไม่มีขั้นตอนการจัดตารางการผลิตที่เป็นหลักเกณฑ์แน่นอน ผู้จัดการการผลิตใช้เพียงประสบการณ์ ทำให้มีการส่งมอบงานล่าช้า ส่งผลให้ลูกค้าขาดความเชื่อมั่นต่อองค์กร และเนื่องจากกระบวนการผลิตของแผ่นพื้นสำเร็จรูป ต้องผลิตบน

แม่แบบที่มีขนาดคงที่ การผลิตต้องคำนึงถึงการใช้ประโยชน์ของทรัพยากร จึงจำเป็นต้องผลิตสินค้าเกินความต้องการของลูกค้า ประกอบกับโรงงานกรณีศึกษา ไม่มีการจัดการด้านสินค้าคงคลัง ส่งผลให้พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังไม่เพียงพอ ปัญหาดังกล่าวเราสามารถนำเทคนิคการจัดการตารางการผลิตมาช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการจัดการตารางการผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูปให้มีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยมีการกำหนดขั้นตอนการจัดการตารางการผลิตขึ้นมาใหม่ให้เป็นขั้นตอนที่ชัดเจน ใช้กฎฮิวริสติกในการจัดลำดับความสำคัญคำสั่งซื้อของลูกค้า รวมถึงกำหนดรายการสินค้าคงคลังเพื่อควบคุมปริมาณสินค้าคงคลังให้เพียงพอต่อพื้นที่จัดเก็บ จากนั้นพัฒนาเครื่องมือช่วยในการจัดการตารางการผลิตโดยชุดคำสั่ง Visual Basic for Application (VBA) บนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกเซล และพัฒนาวิธีการจัดการตารางการผลิตวิธีใหม่จากผลฮิวริสติกที่ศึกษา

2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แผ่นพื้นสำเร็จรูป (Precast Slab) แสดงดังรูปที่ 1 ผลิตจากคอนกรีตเสริมด้วยลวดอัดแรง ติดตั้งโดยการวางบนคาน เสริมเหล็กด้านบนแล้วเทคอนกรีตทับหน้า ทำให้สามารถประหยัดเวลาในการก่อสร้างเนื่องจากไม่ต้องทำไม้แบบ และไม่ต้องรอการเซ็ทตัวของคอนกรีต [3]



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์แผ่นพื้นสำเร็จรูป

การจัดเก็บแผ่นพื้นสำเร็จรูปโดยทั่วไปจะทำการวางเรียงซ้อนกันสูงขึ้น หลักการจัดเก็บคือ ต้องหาไม่รองแผ่นพื้นสำเร็จรูปตำแหน่งบริเวณที่มีหัว เนื่องจากเป็นจุดรองรับแรง หากหน้างานวางซ้อนกันโดยไม่มีไม่รองจุดรองรับ หรือรองรับไม่ถูกจุด จะทำให้แผ่นพื้นสำเร็จรูปเสียหายก่อนนำมาใช้งาน [4]

การจัดตาราง (Scheduling) เป็นกระบวนการในการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับกิจกรรม หรือการจัดเรียงกิจกรรม เพื่อให้ทำให้กิจกรรมเหล่านั้นเป็นไปตามข้อกำหนด เงื่อนไขบังคับ หรือวัตถุประสงค์ที่กำหนด [5] และงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) มาแก้ไขปัญหาการจัดตารางการผลิต โดย [6] กล่าวว่า ฮิวริสติกเป็นการค้นหาคำตอบที่มีตัวชี้แนะหรือมีแนวทางหรือมีการคาดเดาอย่างมีเหตุผลว่า กระบวนการค้นหาควรที่จะเลือกเส้นทางใดหรือสถานะใดเพื่อทำการค้นหาต่อไปให้ได้คำตอบอย่างมีประสิทธิภาพ แต่คำตอบที่ได้จากฮิวริสติกนั้น ไม่สามารถยืนยันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีฮิวริสติกที่นักวิจัยหลายท่านได้ให้ความหมายของการจัดลำดับงาน ดังต่อไปนี้ [7, 8]

- 1) First Come First Serve: FCFS หมายถึง การจัดลำดับงานให้กับงานที่เข้ามายังหน่วยผลิตก่อน
- 2) Earliest Due Date: EDD หมายถึง การจัดลำดับงานให้กับใบสั่งงานที่มีวันกำหนดส่งเร็วที่สุดก่อน
- 3) Shortest Processing Time: SPT หมายถึง การจัดลำดับงานที่มีเวลาปฏิบัติงานน้อยที่สุดก่อน
- 4) Minimum Slack Time: MST หมายถึง การจัดลำดับงานให้กับงานที่มีเวลาเหลือน้อยที่สุดก่อน และจัดลำดับงานต่อเนื่องกันไปตามลำดับของค่าเวลาเหลือน้อยไปมาก ซึ่งเวลาเหลือเขียนแทนด้วยสมการที่ (1)
- 5) Critical Ratio: CR หมายถึง การจัดลำดับงานให้กับงานที่มีอัตราวิกฤตน้อยที่สุดก่อน โดยค่าอัตราวิกฤตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$S_j = (d_j - i) - p_j \quad (1)$$

$$CR_j = \frac{(d_j - i)}{p_j} \quad (2)$$

โดยที่ d_j คือ เวลาส่งมอบของงาน j
 i คือ วันที่ผลิตปัจจุบัน
 p_j คือ เวลาผลิตของงาน j

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยพัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตขึ้นมาใหม่คือ Slack Time1 (Slack1) หมายถึง การจัดลำดับงานให้กับงานที่มีเวลาเหลือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 เท่านั้น หากงานใดมีค่า Slack มากกว่า 1 จะไม่พิจารณาในการจัดลำดับ และเก็บไว้พิจารณาในวันถัดไป

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า [9] ใช้วิธีฮิวริสติก ได้แก่ EDD และ SPT ร่วมกับแนวคิดการจัดกลุ่มงาน มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหการจัดลำดับงานผลที่ได้คือ สามารถลดเวลาการผลิตรวมที่มากที่สุด และจำนวนงานล่าช้าได้ ต่อมา [10] ใช้วิธีฮิวริสติก FCFS, EDD, SPT, Longest Processing Time (LPT), MST, EDD+LPT, EDD+MST และ [8] นำวิธีฮิวริสติก EDD, LPT, SPT, Smallest Ratio of Slack Time to Total Processing Time (Slack/TP), MST, Average Processing Time/Operation (AVPRO) และฮิวริสติกแบบผสมผสาน (Hybrid Heuristic) ในการแก้ไขปัญหาวิธีการจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตแบบตามสั่ง จากงานวิจัยของทั้งสองพบว่าการจัดตารางการผลิตโดยวิธีฮิวริสติกแบบผสมผสาน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุด [11] เสนอวิธีฮิวริสติก และวิธีโปรแกรมเลขจำนวนเต็มแบบผสมในการหาคำตอบที่ดีที่สุด สำหรับปัญหากระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งเป็นปัญหาที่ซับซ้อน พบว่าวิธีฮิวริสติกสามารถแก้ไขปัญหาคำตอบที่เป็นไปได้

3. วิธีการศึกษา

3.1 ศึกษาสภาพทั่วไปของโรงงาน และเก็บข้อมูล

ศึกษากระบวนการทำงานขององค์กร และทำการเก็บข้อมูลซึ่งมีข้อมูลดังนี้

3.1.1 ผลกระทบแผ่นพื้นสำเร็จรูป

กระบวนการผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูป จะทำการผลิตบน
รางแม่แบบ แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน
หลักดังนี้

- 1) การทำความสะอาดราง และเตรียมวัสดุอุปกรณ์
- 2) เข้าแบบรางเพื่อเตรียมเทคอนกรีตแผ่นสำเร็จ
- 3) เทคอนกรีตใส่รางที่เตรียมไว้
- 4) จัดเก็บผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2 รางแม่แบบสำหรับผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูป

3.1.2 ข้อจำกัด และปัญหาของกระบวนการผลิต

สายการผลิตสำหรับผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูปมีทั้งหมด
2 สายการผลิต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 แต่ละแม่แบบ
แบ่งออกเป็น 6 ร่อง แต่ละร่องต้องผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่
มีขนาดลวด และจำนวนเส้นลวดเท่ากัน แต่ละสายการผลิต
จะผลิตได้มากที่สุดวันละ 2 แม่แบบ ใช้เวลาผลิต 2 วัน
พื้นที่จัดเก็บแผ่นพื้นสำเร็จรูปมีพื้นที่ทั้งหมด 380 ตาราง
เมตร แต่ละกองวางแผ่นพื้นสำเร็จรูปได้ 6 แผ่น ซ้อนทับ
ได้สูงสุด 50 แผ่น โดยการจัดเก็บแต่ละกองต้องเป็นแผ่น
พื้นสำเร็จรูปชนิดเดียวกัน

ปัญหาของกระบวนการคือ มีจำนวนงานส่งมอบ
ล่าช้า และไม่มีการจัดการสินค้าคงคลังทำให้พื้นที่จัดเก็บ
สินค้าไม่เพียงพอ

ตารางที่ 1 ข้อมูลแต่ละสายการผลิต

สายการ ผลิต	ความยาวที่ผลิต (เมตร)	ความยาว แม่แบบ	จำนวน แม่แบบ
1	น้อยกว่า 3.15	40 เมตร	4
2	3.15 เมตร ขึ้นไป	60 เมตร	4

3.2 วางแผนออกแบบขั้นตอนการจัดตารางการผลิต

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ศึกษาขั้นตอนการจัดตารางการผลิต
ข้อจำกัดในกระบวนการผลิต และสภาพปัญหาของ
โรงงาน ผู้วิจัยจึงเสนอขั้นตอนการจัดตารางการผลิตเป็น
ขั้นตอนที่ชัดเจนดังนี้

- 1.) ผลิตสินค้าตามคำสั่งซื้อของลูกค้า ซึ่งมีการจัดลำดับ
ความสำคัญด้วยกฎฮิวริสติก
- 2.) หากแม่แบบที่ผลิตมีพื้นที่เหลือ จะพิจารณาผลิตสินค้า
คงคลังสำรองดังตารางที่ โดยพิจารณาตามลำดับ
- 3.) ผลิตสินค้าให้เต็มพื้นที่แม่แบบมากที่สุด

ตารางที่ 2 รายการสินค้าคงคลังสำรอง

สายการผลิต	ชนิดสินค้า		จำนวน ลวด (เส้น)
	ความยาว (เมตร)	ขนาดลวด (มิลลิเมตร)	
1	3.00	4	4
	2.00	4	4
	2.50	4	4
	2.95	4	4
	1.50	4	4
	2.45	4	4
	1.00	4	4
	2.20	4	4
	2.90	4	4
	2.15	4	4
2	4.00	4	4
	3.95	4	4
	3.50	4	4
	3.95	5	5
	3.45	4	4
	3.60	4	4
	5.00	4	4
	3.30	4	4
	4.95	4	4
	4.50	4	4

3.3 พัฒนาเครื่องมือช่วยในการจัดตารางการผลิต

ผู้วิจัยพัฒนาเครื่องมือช่วยในการจัดตารางการผลิต โดยเลือกใช้ชุดคำสั่ง VBA บนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกเซล ซึ่งชุดคำสั่ง VBA ที่พัฒนาขึ้นนี้ จะมีการทำงานในส่วนของการจัดตารางการผลิต รวมถึงข้อจำกัดต่าง ๆ ในการผลิตเหมือนโรงงานกรณีศึกษา โดยผู้ใช้งานต้องจัดลำดับงานมาก่อนแล้ว

หลักการทำงานของชุดคำสั่ง VBA คือ มีการรับค่าตัวแปรต่างๆเข้ามา เช่น ลำดับงานที่มาจากการใช้กฎฮิวริสติกวิธีต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา, รายละเอียดคำสั่งซื้อของลูกค้า, จำนวนสินค้าคงคลังที่เหลืออยู่, กำลังการผลิต เป็นต้น เพื่อนำไปประมวลผลการจัดตารางการผลิตและส่งข้อมูลกลับมาแสดงบนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกเซล ได้แก่ ตารางการผลิตในแต่ละวันว่าสินค้าใดบ้างที่ต้องผลิตผลิตที่เครื่องจักรใด และผลิตเท่าไร รวมทั้งรายงานจำนวนสินค้าคงคลังที่เหลืออยู่ในแต่ละวัน ทรัพยากรที่ใช้ไป เป็นต้น

3.4 ทดลองจัดตารางการผลิตแผนพื้นสำเร็จรูป วิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

การทดลองจัดตารางการผลิตเริ่มจากใช้กฎฮิวริสติกเพื่อจัดลำดับคำสั่งซื้อของลูกค้า ได้แก่ EDD+FCFS, SPT, MST และ CR จากนั้นเตรียมข้อมูลนำเข้าโดยกรอกรายละเอียดลงใน spread sheet บนโปรแกรมไมโครซอฟต์เอกเซล ได้แก่ ลำดับคำสั่งซื้อ, รายละเอียดคำสั่งซื้อ, ทรัพยากรการผลิตที่มีอยู่, จำนวนสินค้าคงคลัง และใช้ชุดคำสั่ง VBA ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นเพื่อประมวลผลการจัดตารางการผลิต

นำผลจากการจัดตารางการผลิตมาวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการจัดตารางการผลิต ได้แก่ จำนวนงานล่าช้า (Number of Tardy Jobs), เวลาล่าช้ารวม (Total Tardiness), เวลาล่าช้าสูงสุด (Maximum Tardiness), ปริมาณสินค้าคงคลัง (Inventory), พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังที่ใช้, ร้อยละการใช้ประโยชน์ของแม่แบบ (Utilization of Machines) และต้นทุนรวม

(Total Cost) หลังจากนั้นเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในแต่ละวิธี รวมถึงเปรียบเทียบกับวิธีเดิมของโรงงาน

3.5 พัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตวิธีใหม่

จากผลการวิเคราะห์การจัดตารางการผลิตโดยวิธีฮิวริสติกทั้ง 4 วิธี พบว่าวิธี SPT สามารถลดจำนวนงานล่าช้าได้มากที่สุด นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าการใช้วิธี MST มีแนวทางในการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยวิธี MST จะพิจารณาจัดลำดับคำสั่งซื้อไปตามลำดับของเวลาเหลือจากน้อยไปมาก ซึ่งผู้วิจัยพบว่าหากวันไหนที่มีคำสั่งซื้อน้อย วิธี MST จะพิจารณาผลิตคำสั่งซื้อทั้งหมดที่เหลืออยู่และทำให้คำสั่งซื้อที่มีวันรับสินค้าใกล้เคียงๆ เกิดการผลิต ส่งผลให้มีสินค้าอยู่ในคลังนานเกินไป ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงทดลองจัดตารางการผลิตเพิ่มเติมเพื่อหาค่า Slack ที่เหมาะสมสำหรับการจัดลำดับคำสั่งซื้อที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ผลที่ได้คือ Slack Time เท่ากับ 1

หลังจากนั้นผู้วิจัยเลือกใช้วิธี SPT ร่วมกับฮิวริสติกวิธีอื่น ๆ รวมถึงวิธี Slack1 ที่ผู้วิจัยปรับปรุงขึ้นมาใหม่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผล พบว่าวิธี SPT+Slack1 มีประสิทธิภาพในการจัดตารางการผลิตมากที่สุด

4. ผลการศึกษา

จากการทดลองจัดตารางการผลิตและทำการเปรียบเทียบผลค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการจัดตารางการผลิตแต่ละวิธี ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้กฎฮิวริสติกแต่ละวิธีกับวิธีโรงงานจากคำสั่งซื้อของลูกค้าทั้งหมด 857 งานวิธีที่ลดงานล่าช้าได้มากที่สุด ได้แก่ SPT ลดได้ 67 งาน (ร้อยละ 39.41) รองลงมาคือ EDD+FCFS, MST และ CR ซึ่งลดได้เท่ากันคือ 65 งาน (ร้อยละ 38.24)

เมื่อวิเคราะห์เวลาล่าช้ารวมพบว่า EDD+FCFS มีเวลาล่าช้ารวมต่ำที่สุดเท่ากับ 204 วัน รองลงมาคือ MST เท่ากับ 206 วัน, CR เท่ากับ 207 วัน และ SPT เท่ากับ 210 วัน ตามลำดับ ซึ่งทุกวิธีมีเวลาล่าช้ารวมที่น้อยกว่าวิธีโรงงานคือ 363 วัน แต่เมื่อวิเคราะห์เวลาล่าช้าสูงสุดพบว่า

วิธีโรงงานและวิธี EDD+FCFS, MST และ CR มีเวลาช้าสูงสุดเท่ากันคือ 4 วัน ส่วน SPT มีเวลาล่าช้าสูงสุดถึง 8 วัน

ต่อมาวิเคราะห์ปริมาณสินค้าคงคลังพบว่า ขั้นตอนการจัดตารางการผลิตวิธีเดิมของโรงงาน มีปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ย 5,085 แผ่น/วัน คิดเป็นต้นทุนการจัดเก็บเท่ากับ 167,358 บาท/ปี ซึ่งหากเปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตตามขั้นตอนที่ผู้วิจัยกำหนดและมีการจัดลำดับความสำคัญของงานด้วยวิธี EDD+FCFS, SPT, MST และ CR พบว่าทุกวิธีมีปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ยและต้นทุนการจัดเก็บลดลง โดยวิธี EDD+FCFS มีปริมาณสินค้าคงคลังน้อยที่สุดเท่ากับ 4,609 แผ่น/วัน คิดเป็นต้นทุนการจัดเก็บเท่ากับ 147,027 บาท/ปี รองลงมาคือวิธี MST มีปริมาณสินค้าคงคลังเท่ากับ 4,612 แผ่น/วัน คิดเป็นต้นทุนการจัดเก็บเท่ากับ 146,505 บาท/ปี วิธี CR มีปริมาณสินค้าคงคลังเท่ากับ 4,613 แผ่น/วัน คิดเป็นต้นทุนการจัดเก็บเท่ากับ 146,555 บาท/ปี และวิธี SPT มีปริมาณสินค้าคงคลังเท่ากับ 4,616 แผ่น/วัน คิดเป็นต้นทุนการจัดเก็บเท่ากับ 146,751 บาท/ปี ตามลำดับ

เนื่องจากโรงงานมีพื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังที่จำกัดคือ 380 ตารางเมตร เมื่อนำปริมาณสินค้าคงคลัง มาคิดเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บ โรงงานจำเป็นต้องใช้พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังเฉลี่ย 648.03 ตารางเมตร (คิดเป็นร้อยละ 170.54) ซึ่งถือว่าเกินขีดจำกัดของโรงงาน ทำให้การจัดเก็บผลิตภัณฑ์ต้องซ้อนทับกันระหว่างผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวต่างกันซึ่งเป็นวิธีการจัดเก็บที่ไม่ถูกวิธี ก่อให้เกิดความสูญเสียจากสินค้าที่ชำรุด เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตตามขั้นตอนที่ผู้วิจัยกำหนด และมีการจัดลำดับความสำคัญของงานด้วยวิธี EDD+FCFS, SPT, MST และ CR พบว่าใช้พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังเฉลี่ยภายใต้ขีดจำกัดที่โรงงานมีอยู่ โดยวิธี EDD+FCFS ใช้พื้นที่จัดเก็บน้อยที่สุดเท่ากับ 240.33 ตารางเมตร (คิดเป็นร้อยละ 63.24) รองลงมาคือวิธี CR ใช้พื้นที่จัดเก็บเท่ากับ 241.67 ตารางเมตร (คิดเป็นร้อยละ 63.60) วิธี MST

ใช้พื้นที่จัดเก็บเท่ากับ 241.70 ตารางเมตร (คิดเป็นร้อยละ 63.61) และวิธี SPT ใช้พื้นที่จัดเก็บเท่ากับ 242.82 ตารางเมตร (คิดเป็นร้อยละ 63.90)

กระบวนการผลิตแผ่นพื้นสำเร็จรูป เป็นกระบวนการที่ต้องผลิตบนแม่แบบเดียวกันซึ่งแม่แบบมีขนาดคงที่ การผลิตในแต่ละครั้งจึงต้องผลิตให้เต็มความยาวของแม่แบบให้มากที่สุดเพื่อไม่ให้เกิดความสูญเสียจากเส้นลวดที่ติดตั้งแม่แบบแล้วไม่ได้ใช้งาน และเนื่องจากขั้นตอนจัดตารางผลิตที่ผู้วิจัยกำหนด ต้องพิจารณาผลิตไล่ไปทีละแม่แบบ อาจทำให้แม่แบบใช้งานไม่ได้เต็มประสิทธิภาพ จึงมีการคำนวณร้อยละการใช้ประโยชน์ของแม่แบบ โดยวิธี EDD+FCFS, SPT, MST และ CR มีร้อยละเท่ากับ 99.4599 (คิดเป็นมูลค่าสูญเสีย 18,659 บาท/ปี), 99.4619 (คิดเป็นมูลค่าสูญเสีย 18,556 บาท/ปี), 99.4606 (คิดเป็นมูลค่าสูญเสีย 18,619 บาท/ปี) และ 99.4599 (คิดเป็นมูลค่าสูญเสีย 18,643 บาท/ปี) ตามลำดับ ส่วนวิธีของโรงงานดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่ามีการจัดเก็บสินค้าคงคลังที่ไม่ถูกวิธี ก่อให้เกิดความสูญเสียสินค้าชำรุดซึ่งคิดเป็นมูลค่าเท่ากับ 200,829 บาท/ปี ดังนั้น ต้นทุนรวมของโรงงานจะมีค่าเท่ากับ 15,334,826.02 บาท/ปี และต้นทุนรวมของวิธี EDD+FCFS, SPT, MST และ CR จะมีค่าเท่ากับ 14,034,905.60, 14,026,944.37, 14,036,684.29, 14,037,914.75 บาท/ปี ตามลำดับ โดยทุกวิธีสามารถทำให้ต้นทุนรวมลดลง ซึ่งวิธี SPT ลดได้มากที่สุด 1,307,881.65 บาท/ปี คิดเป็นร้อยละ 8.53 รองลงมาคือวิธี EDD+FCFS ลดได้ 1,299,920.42 บาท/ปี คิดเป็นร้อยละ 8.48 วิธี MST ลดได้ 1,298,141.73 บาท/ปี คิดเป็นร้อยละ 8.47 และวิธี CR ลดได้ 1,296,911.27 บาท/ปี คิดเป็นร้อยละ 8.46 ตามลำดับ

ผู้วิจัยพัฒนาวิธีการจัดตารางผลิต SPT+Slack1 ขึ้นใหม่โดยอาศัยผลจากการจัดตารางการผลิตโดยวิธีฮิวริสติก 4 วิธีข้างต้น พบว่าวิธี SPT+Slack1 มีจำนวนงานล่าช้าเท่ากับ 95 งาน เวลาล่าช้ารวมเท่ากับ 193 วัน สินค้าคงคลังเท่ากับ 4,161 แผ่น/วัน และต้นทุนการจัดเก็บสินค้า

คงคลังเท่ากับ 131,674 บาท/ปี เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตโดยวิธีฮิวริสติกทุกวิธีพบว่า วิธี SPT+Slack1 มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และหากเปรียบเทียบกับการจัดตารางการผลิตวิธีเดิมของโรงงาน

จะเห็นว่าวิธี SPT+Slack1 สามารถลดจำนวนงานล่าช้าได้ถึงร้อยละ 44.12 และต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังลดลงร้อยละ 21.32

ตารางที่ 3 ผลการจัดตารางการผลิตแต่ละวิธี

ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ	วิธีที่ใช้จัดตารางการผลิต					
	วิธีโรงงาน	EDD+FCFS	SPT	MST	CR	SPT+Slack1
จำนวนงานล่าช้า (งาน)	170	105	103	105	105	95
เวลาล่าช้ารวม (วัน)	363	204	210	206	207	193
เวลาล่าช้าสูงสุด (วัน)	4	4	8	4	4	7
ปริมาณสินค้าคงคลัง (แผ่น/วัน)	5,085	4,609	4,616	4,612	4,613	4,164
พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังที่ใช้ (ตารางเมตร/วัน)	648	240	243	242	242	201
ร้อยละการใช้พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลัง	170.54	63.24	63.90	63.61	63.60	52.96
ร้อยละการใช้ประโยชน์ของแม่แบบ	100	99.46	99.46	99.46	99.46	99.44
ต้นทุนรวม (บาท/ปี)	15,334,826	14,034,906	14,026,944	14,036,684	14,037,915	14,055,888
ประหยัดได้ (บาท/ปี)	-	1,299,920	1,307,882	1,298,142	1,296,911	1,278,938

5. สรุปการศึกษา

การดำเนินการจัดตารางผลิตตามขั้นตอนที่ผู้วิจัยกำหนด ทำให้สามารถใช้พื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังภายใต้ขีดจำกัดที่โรงงานมีอยู่โดยไม่ต้องซ้อนทับกันระหว่างผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกัน ในการจัดตารางผลิตมีการใช้กฎการจัดลำดับงานฮิวริสติก 4 วิธี ได้แก่ EDD+FCFS, SPT, MST และ CR ซึ่งทั้ง 4 วิธียังไม่มีวิธีใดที่สามารถจัดตารางการผลิตได้มีประสิทธิภาพในด้านจำนวนงานล่าช้าและปริมาณสินค้าคงคลังควบคู่กัน ผู้วิจัยจึงนำเสนอวิธีการ

จัดตารางการผลิตวิธีใหม่คือ SPT+Slack1 ซึ่งสามารถทำให้จำนวนงานล่าช้า และสินค้าคงคลังลดลงได้มากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้บริหาร รวมถึงพนักงานโรงงานกรณีศึกษาทุก ๆ ท่าน ที่อำนวยความสะดวกในสถานที่ และการให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษา งานวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักยุทธศาสตร์และการวางแผนเศรษฐกิจมหภาค. รายงานภาวะเศรษฐกิจไทยไตรมาสที่สอง ปี 2559 และแนวโน้ม ปี 2559. 2559; 36.
- [2] สำนักงานสถิติแห่งชาติ. การสำรวจอุตสาหกรรมก่อสร้าง พ.ศ. 2557. สำนักงานสถิติแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, 2559.
- [3] ศุภวิศว์ ปัญญาสกุลวงศ์ และ กฤษณ์ เข้มสระโส. มารู้จักส่วนประกอบของอาคารกันเถอะ. แหล่งที่มา [ระบบออนไลน์]: <http://www.thaihomemaster.com/showinformation.php?ID=374>, 27 มีนาคม 2560.
- [4] นิพนธ์ ลักษณะอดิศร. รู้ก่อนใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูป. แหล่งที่มา [ระบบออนไลน์]: http://www.tpa.or.th/tpanews/upload/mag_content/50/ContentFile864.pdf, 27 มีนาคม 2560.
- [5] ประเมศ ชูติมา. การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2551.
- [6] Silver, E.A. An overview of heuristic solution methods. *Journal of the Operational Research Society*, 2002; 55(9): 936-956.
- [7] วชิรพงษ์ สาลีสิงห์. การจัดลำดับงานโดยกฎความสำคัญ. *Productivity World*, 2546; 8 (44): 42-48.
- [8] สุเทพ บุตรดี, ชัยวัฒน์ นุ่มทอง และปัญญพร แพใหญ่. วิธีการจัดตารางการผลิตแบบฮิวริสติกแบบผสมเพื่อประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 24-26 ตุลาคม 2550, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา. 2550; 1421-1426.
- [9] วัศพล ชารณา, จิตติมา ชูกิจรุ่งโรจน์, มรรดา วิริยะพงษ์, เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์, ช่อแก้ว จตุรานนท์ และ เจริญชัย โจมพัฒนารักษ์. การจัดตารางการผลิตของเครื่องพิมพ์บรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษลูกฟูก. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, 17-19 ตุลาคม 2555, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, เพชรบุรี, 2555; 339-345.
- [10] ยอดดวงใจ นาคปฐม. การจัดตารางการผลิตแบบตามสั่ง สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555.
- [11] Tharmmaphornphilas, W. and N, Sareinpithak. Formula selection and scheduling for precast concrete production. *International Journal of Production Research*, 2013; 51(17): 5195-5209.



การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อ สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาครอยต่อ ระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง

A study on influence of friction welding parameters on the mechanical properties and microstructure in joining between AISI 304 stainless steel and high speed steel

นิวัฒน์ มูแกม

Niwat Mookam

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

ด.หนองแก อ.หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ 77110

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

*E-mail: niwat.moo@rmutr.ac.th

Telephone Number: 081 981 2963

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่มีต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของการต่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 และเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (HSS) ซึ่งใช้ในการผลิตเครื่องมือตัด สำหรับตัวแปรที่ทำการศึกษามี 4 ตัวแปร ประกอบด้วย แรงดันในการเสียดทาน เวลาในการเสียดทาน แรงดันในการอัดและเวลาในการอัด ผลที่พบทุกตัวแปรในการทดลองมีอิทธิพลต่อความต้านทานแรงดึง และสภาวะการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานที่เหมาะสมจากการศึกษา คือ แรงดันในการเสียดทาน 20 bar เวลาในการเสียดทาน 20 s แรงดันในการอัด 30 bar และเวลาในการอัด 30 s ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 12,214.50 N ขณะที่ผลความแข็งแรงจุลภาคของบริเวณรอยต่อจะมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 แต่น้อยกว่า HSS และยังพบเฟสของชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทาน, เหล็กกล้าความเร็วรอบสูง, เหล็กกล้าไร้สนิม, ความแข็งแรงจุลภาค

ABSTRACT

The aim of this research was to study the influence of the friction welding parameters on the mechanical properties and the microstructure of AISI 304 stainless steel and high speed steel (HSS) joint used in the cutting tool manufacturing. There were four welding variables studied in this investigation including friction pressure, friction time, forging pressure and forging time. The results

found that all variables in this experiment was influential on the tensile strength, and the optimal friction welding condition obtained from the study was 20 bar for the friction pressure, 20 seconds for the friction time, 30 bar for the forging pressure and 30 seconds for the forging time that created the maximum tensile strength of 12,214.50 N. In addition, the microhardness of interface zone was higher than AISI 304 stainless steel, but it was less than HSS, the intermetallic phase formation was found from being connected by friction welding.

Keywords: Friction welding, High-speed steel, Stainless steel, Microhardness

1. บทนำ

การผลิตชิ้นส่วนหนึ่งๆมีกรรมวิธีการผลิตที่หลากหลาย เช่น ต้องผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูป การหล่อ การกำจัดเนื้อวัสดุในส่วนที่ไม่ต้องการออกและการเชื่อมประกอบเป็นชิ้น ดังนั้นการเลือกขั้นตอนการผลิตเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของชิ้นส่วนตลอดจนต้นทุนในการผลิต [1] ซึ่งในการผลิตเครื่องมือและเครื่องมือตัด (Cutting tools) นิยมใช้เหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (HSS) ที่มีความสามารถชุบแข็งได้ดีเป็นพิเศษสามารถรักษาความคมของเครื่องมือตัดไว้ได้เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงขึ้น นำมาผลิตเครื่องมือตัดสำหรับงานตัดเฉือนโดยที่ขั้นตอนการผลิตจะต้องผ่านหลายกระบวนการเช่นกัน ได้แก่ การนำวัสดุมาขึ้นรูปเป็นคมตัดตามที่ต้องการ นำมาเจียรในลับคมตัดจากการขึ้นรูปและการปรับปรุงสมบัติที่สำคัญได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ความแกร่ง (Toughness) และความแข็งแรง (Strength) เช่น ผ่านกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้งการตกเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (Physical vapor deposition: PVD) หรือการตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical vapor deposition: CVD) [2, 3] อย่างไรก็ตามจะมีส่วนค้ำจับของเครื่องมือที่ไว้สำหรับการจับยึดเข้ากับเครื่องจักรซึ่งในส่วนดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับส่วนคมตัดและไม่ต้องการผ่านการปรับปรุงผิวตลอดจนสมบัติทางกลทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต เช่น การนำเหล็กกล้าไร้สนิมมาใช้เนื่องจากมีความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ดังนั้นสองส่วนนี้จึงจำเป็นต้องผ่านกรรมวิธีที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง คือ การเชื่อมประสานเข้าด้วยกันซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมหลอมแบบดั้งเดิมจะไม่เหมาะสมกับการนำมาต่อวัสดุต่างชนิด

เนื่องจากให้รอยเชื่อมประสานที่ไม่สมบูรณ์ จะเกิดรอยแตกร้าวในบริเวณหลอม (Fusion zone) และบริเวณกระทบร้อน (Heat affected zone) [4] ดังนั้นจึงมีการนำวิธีการแผ่นประสานเหนียวนา (Induction brazing) การแผ่นประสานความต้านทาน (Resistance brazing) มาใช้ซึ่งวิธีเหล่านี้ใช้โลหะเติมที่มีส่วนผสมของเงิน (Ag) เนื่องจากสามารถเชื่อมวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันได้ดี แต่อย่างไรก็ตามธาตุเงินที่ผสมอยู่เป็นโลหะมีค่าจึงทำให้โลหะเติมมีราคาสูงซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตและโลหะเติมมีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนักส่งผลให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลงเมื่ออุณหภูมิการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น [5-7] ซึ่งจะเกิดขึ้นได้กับเครื่องมือตัดระหว่างใช้งานที่ความเร็วรอบสูง

วิธีการต่อวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันจึงสำคัญกับขั้นตอนนี้ วิธีการหนึ่งที่สามารถเชื่อมประสานวัสดุต่างชนิดได้ดี คือ วิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน (Friction welding) ซึ่งเป็นการเชื่อมในสถานะของแข็ง (Solid-state welding) ที่ไม่จำเป็นต้องใช้โลหะเติม เป็นวิธีที่ประหยัดพลังงาน เนื่องจากในการเชื่อมประสานจะใช้พลังงานทางกลจากการหมุนของวัสดุที่นำมาเชื่อมเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่ระหว่างพื้นผิวของวัสดุจากการเสียดสีกันของผิวหน้าชิ้นงานระหว่างการหมุนภายใต้ความดันชิ้นงานจะติดกันหลังจากที่อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสสูงพอ กระบวนการสามารถเชื่อมได้อย่างรวดเร็วให้อัตราการผลิตสูงและไม่ก่อให้เกิดควันพิษจากการเชื่อมประสาน [8, 9] อย่างไรก็ตามในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานมีปัจจัยสำคัญได้แก่ ความเร็วรอบในการหมุนชิ้นงาน (Rotational speed) เวลาในการเสียดทาน (Friction time) เวลาในการอัดให้เกิดความร้อน (Forging time) แรงดันอัดชิ้นงานให้เกิดความร้อน (Forging pressure) และแรงดันอัดชิ้นงานให้

ติดกัน (Friction pressure) เป็นต้น [9-11] ซึ่งตัวแปรเงื่อนไขเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของรอยเชื่อมประสาน

บทความฉบับนี้ศึกษาการต่อวัสดุต่างชนิด (Dissimilar materials joint) ระหว่างเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (High speed steel; HSS) เข้ากับเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เกรด AISI 304 โดยใช้วิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน ศึกษาตัวแปรในกระบวนการเชื่อมประสานที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลในแง่ของความต้านทานแรงดึง ตรวจสอบความแข็งจุลภาค

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ HSS

Chemical composition (% wt.)					
C	Cr	W	V	Mn	Si
0.65-0.80	3.75-4.00	17.25-18.75	0.90-1.30	0.10-0.40	0.20-0.40

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของ AISI 304 [21]

Chemical composition (% wt.)							
C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	N
0.08	0.75	2.00	10.5	20.00	0.03	0.045	0.10

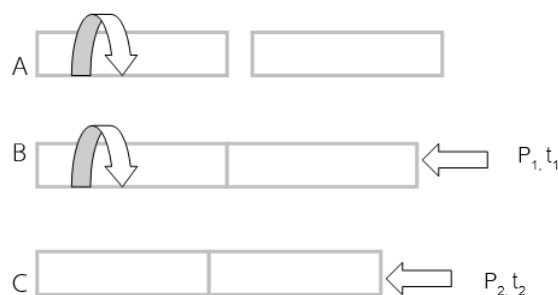
การทดลองวัสดุทั้งสองชนิดเตรียมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 90 mm นำมาเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานจากการประยุกต์ใช้เครื่อง Universal Lathe ยี่ห้อ GURUTZPE รุ่น CU 587 ซึ่งปรับแต่งและเพิ่มอุปกรณ์สร้างเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานโดยการเพิ่มชุดควบคุมแรงดัน ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน มีขั้นตอนตามลำดับแสดงดังรูปที่ 1 โดยขั้นตอน A เหล็กกล้าความเร็วรอบสูงหมุนด้วยความเร็วรอบที่ 1,400 rpm แต่สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมไม่หมุน ในขั้นตอน B ขณะเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงหมุนให้แรงดัน P_1 กับเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อให้ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองสัมผัสกันด้วยเวลา t_1 และทำให้เกิดการเสียดสีเกิดความร้อนที่ผิวหน้าสัมผัสของชิ้นงานทั้งสองระหว่างการหมุนภายใต้แรงดัน หลังจากนั้นในขั้นตอน C ทำการหยุดหมุนเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงพร้อมกับเพิ่มแรงดันที่ P_2 ด้วยเวลาเป็น t_2 อีกครั้งหนึ่ง การเชื่อมด้วยแรงเสียดทานปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) ที่ใช้ในการ

โครงสร้างจุลภาคตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีและเฟสที่เกิดขึ้น

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้สำหรับเชื่อมเสียดทาน คือ เหล็กกล้าความเร็วสูงและเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด AISI 304 ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) อื่นนอกจากเหล็กแสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ทดลองกำหนดไว้ดังตารางที่ 3 นำมาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full factorial design) โดยมีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งมีการทดลองทั้งหมด 48 การทดลอง หลังจากการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานกลึงชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องกลึง CNC ยี่ห้อ EMCO รุ่น PC TURN 50 ตามมาตรฐาน ASTM และทดสอบความต้านทานแรงดึงโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ยี่ห้อ Zwick รุ่น Z020 กำหนดความเร็วในการทดสอบที่ 4 mm/min เท่ากันทุกชิ้น



รูปที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน

ตารางที่ 3 ตัวแปรและระดับในการทดลอง

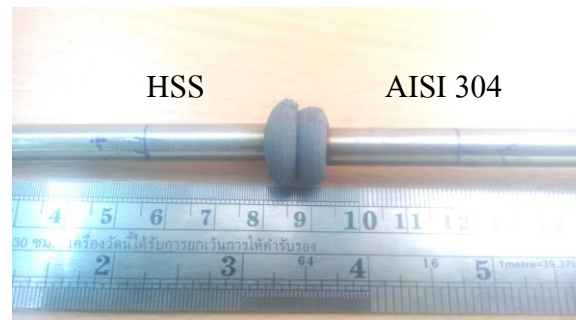
Factor (Symbol; Unit)	Level	
	Low	High
แรงดันในการเลียดทาน (P_1 ; bar)	10	20
เวลาในการเลียดทาน (t_1 ; sec)	10	20
แรงดันในการอัด (P_2 ; bar)	20	30
เวลาในการอัด (t_2 ; sec)	20	30

ส่วนชิ้นงานตัวอย่างจากปัจจัยและระดับที่ให้ความต้านทานแรงดึงสูงสุดนำมาตรวจสอบความแข็งจุลภาค โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากการเชื่อม ซึ่งต้องผ่านการตัดชิ้นงานด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าผ่านเส้นลวด (Wire-EDM) ยี่ห้อ Mitsubithi รุ่น FA 20S Advance หลังการตัดหล่อชิ้นงานตัวอย่างด้วยเรซิน ขัดผิวด้วยกระดาษทรายโดยใช้เครื่องขัดยี่ห้อ Stuers รุ่น Dap 7 และสุดท้ายจึงขัด (Polishing) ด้วยผงเพชรบนผ้าสักหลาดแล้วจึงกัดผิวชิ้นงานด้วยกรดไนตริก (HNO_3) ประมาณ 10-30 sec นำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของรอยต่อใช้ Energy dispersive spectrometer (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX การศึกษาเฟสและตัวแปรโครงสร้างผลึกใช้เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8-Discover สำหรับความแข็งจุลภาคใช้เครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ Wilson Hardness รุ่น Tukon 1102 ทดสอบภายใต้แรงกด 200 gf และเวลากด (Dwell time) ที่ 10 s

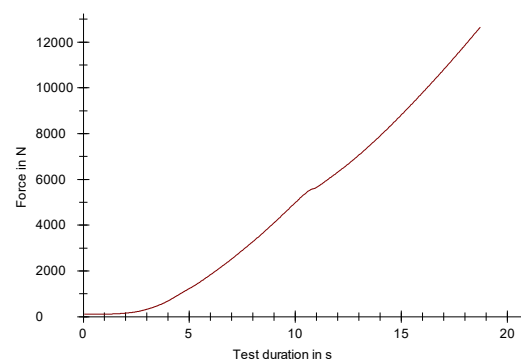
3. ผลการทดลอง

ชิ้นงานตัวอย่างจากการเชื่อมด้วยแรงเลียดทานแสดงดังรูปที่ 2 หลังการเชื่อมปรากฏเนื้อวัสดุที่ขึ้นออกมาบริเวณรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิด เนื่องจากการแปรรูป (Deformation) ของวัสดุและตัวอย่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงแสดงดังรูปที่ 3 ผลจากการทดลองตามที่

ออกแบบไว้นำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อสร้างสมการทำนายผลความต้านทานแรงดึงต่อไป



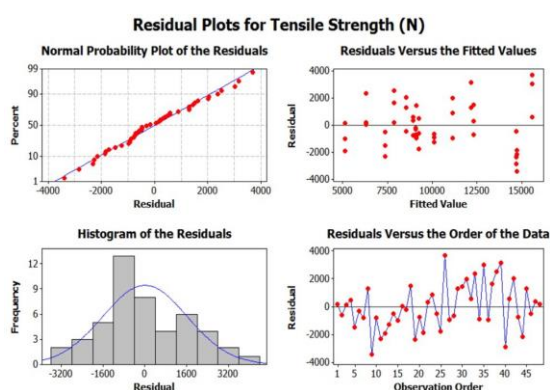
รูปที่ 2 ชิ้นงานตัวอย่างจากการเชื่อมเลียดทาน

รูปที่ 3 ตัวอย่างผลความต้านทานแรงดึงตัวแปร $t_1 = 10$ sec, $P_1 = 20$ bar, $t_2 = 20$ sec, $P_2 = 30$ bar

3.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การตรวจสอบสมมติฐานเบื้องต้นทางสถิติของข้อมูลแสดงผลการตรวจสอบดังรูปที่ 4 จากกราฟการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) แสดงการพล็อตระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลและเปอร์เซ็นต์สะสม ซึ่งเห็นได้ว่าข้อมูลทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเกาะกลุ่มกันไปในลักษณะเส้นตรงแสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีลักษณะมีการกระจายตัวแบบปกติ เช่นเดียวกับ Histogram ของส่วนตกค้างของข้อมูลสำหรับการพล็อตระหว่างส่วนตกค้างของข้อมูลและลำดับการเก็บข้อมูลพบว่า ข้อมูลมีการกระจายที่เป็นอิสระต่อกันไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มในรูปแบบใดๆ และมีการกระจายตัวแบบสุ่มและจากการพล็อตระหว่างส่วนตกค้าง

ของข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ในที่นี้คือ ความต้านทานแรงดึงสามารถสรุปได้โดยข้อมูลมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีความเป็นอิสระของข้อมูล และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวนนั้นหมายถึงข้อมูลสามารถเชื่อถือได้ ดังนั้นจากการตรวจสอบในเบื้องต้นจึงไม่มีการละเมิดสมมติฐานทางสถิติจึงนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) ต่อไป



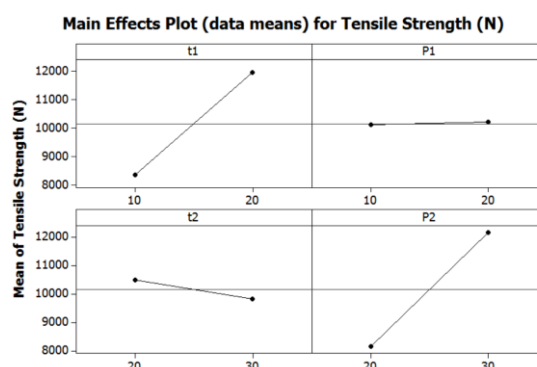
รูปที่ 4 การตรวจสอบสมมติฐานทางสถิติของข้อมูล

สำหรับการเลือกปัจจัยของความต้านทานแรงดึง แสดงผลดังตารางที่ 4 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main effects) ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่ P_1 , t_2 และ P_2 สำหรับปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่ $t_1 * P_1$ และ $t_2 * P_2$ ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมอื่นไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

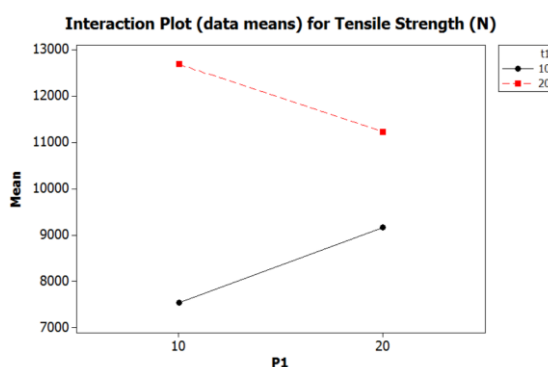
ตารางที่ 4 ANOVA สำหรับการเลือกปัจจัย

Term	Coefficient	SE Coefficient	P-Value
Constant	-28567.3	10781.5	0.012
t_1	316.8	408.1	0.443
P_1	1029.2	408.1	0.016
t_2	765.0	349.5	0.035
P_2	969.3	349.5	0.009
$t_1 * P_1$	-30.9	10.5	0.006
$t_1 * t_2$	7.0	10.5	0.508
$t_1 * P_2$	13.3	10.5	0.216
$P_1 * t_2$	-16.9	10.5	0.118
$P_1 * P_2$	-5.4	10.5	0.610
$t_2 * P_2$	-27.4	10.5	0.013

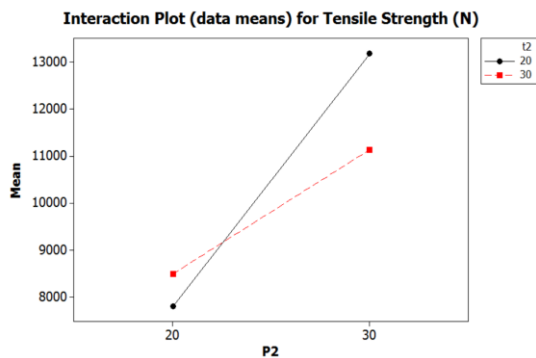
จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยและระดับผลกระทบของปัจจัยหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นการใช้เวลาในการเสียคน (t_1) ที่ระดับต่ำจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงน้อย แต่ถ้าปรับค่าที่ระดับสูงจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงเช่นเดียวกันกับการใช้แรงดันในการอัด (P_2) แต่สำหรับเวลาในการอัด (t_2) การปรับค่าที่ระดับสูงจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง โดยที่แรงในการเสียคน (P_1) ที่ระดับต่ำและสูง (10 และ 20 bar) ผลมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมประกอบ จากรูปที่ 6 และ 7 การใช้เวลาในการเสียคน (t_1) ที่ระดับสูงและแรงดันในการเสียคน (P_1) ที่ระดับต่ำส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุด กรณีเวลาในการอัด (t_2) และแรงดันในการอัด (P_2) ใช้ที่ระดับต่ำและสูงตามลำดับจึงจะทำให้มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง ดังนั้นแต่ละปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปเขียนเป็นสมการเส้นตรงต่อไป



รูปที่ 5 ผลกระทบของปัจจัยหลัก



รูปที่ 6 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง t_1 และ P_1

รูปที่ 7 ผลกระทบของปัจจัยร่วมระหว่าง t_2 และ P_2

รูปแบบสมการเส้นตรงของการทำนายค่าความต้านทานแรงดึงกรณีที่มีตัวแปรของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมในรูปแบบสมการเส้นตรงแบบเต็มรูปแบบสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 P_1 + \beta_3 t_2 + \beta_4 P_2 + \beta_5 t_1 * P_1 + \beta_6 t_1 * t_2 + \beta_7 t_1 * P_2 + \beta_8 P_1 * t_2 + \beta_9 P_1 * P_2 + \beta_{10} t_2 * P_2 \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ผลตอบสนอง β_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 10$) คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Linear coefficient) สำหรับ P และ t คือ ตัวแปรปัจจัยในการทดลอง

อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยร่วมแสดงให้เห็นผลกระทบของทุกปัจจัยในการทดลองมีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของรอยต่อ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรที่นำมาเขียนเป็นสมการเส้นตรงจากผลการวิเคราะห์ผลแสดงดังตารางที่ 5 และเขียนเป็นสมการเส้นตรงที่ใช้ในการทำนายได้ดังสมการที่ (2) เมื่อแทนค่าปัจจัย $t_1 = 20$ sec, $P_1 = 20$ bar, $t_2 = 30$ sec และ $P_2 = 30$ bar จะได้ความต้านทานแรงดึง เท่ากับ 12,214.50 N ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการทำนายความต้านทานแรงดึงแสดงดังตารางที่ 6 ทุกเทอมมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 หรือที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจึงมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการทำนายผลและเมื่อทดลองยืนยันผลจากการทำนายพบว่า ชื่นงาน

ทดสอบมีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 12,647.18 N มีความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย 3.54%

ตารางที่ 5 ANOVA ตัวแปรสำหรับสมการทำนายความต้านทานแรงดึง

Term	Coefficient	SE Coefficient	P-Value
Constant	-27817.5	7410.360	0.001
t_1	824.3	168.350	<0.001
P_1	471.7	168.350	0.008
t_2	617.4	271.460	0.028
P_2	1087.0	271.460	<0.001
$t_1 * P_1$	-30.9	10.650	0.006
$t_2 * P_2$	-27.4	10.650	0.014

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 P_1 + \beta_3 t_2 + \beta_4 P_2 + \beta_5 t_1 * P_1 + \beta_6 t_2 * P_2 \quad (2)$$

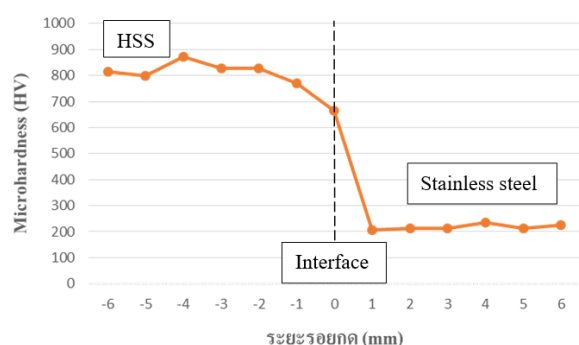
ตารางที่ 6 ANOVA สำหรับสมการทำนาย

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-Ratio	P-Value
Regression	6	4.07 E-08	6.78 E-07	19.95	<0.0001
Linear	4	3.55 E-08	7.35 E-07	21.62	<0.0001
Interaction	2	0.51 E-08	2.55 E-07	7.52	0.002
Residual error	41	1.39 E-08	0.33 E-07		
Total	47	5.46 E-08			

3.2 ความแข็งจุลภาค

ความแข็งจุลภาค (Microhardness) ของรอยต่อแสดงผลดังรูปที่ 8 ที่ระหว่างรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าความแข็งจุลภาคน้อยกว่า HSS แต่จะมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม และที่บริเวณใกล้กับรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดค่าความแข็งจุลภาคมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งเดิมของวัสดุเนื่องจากผลกระทบจากความร้อนและไกลออกไปจากรอยต่อ ความเครียดแข็ง (Work hardening) และผลกระทบ จากความร้อนเกิดขึ้นน้อยทำให้ค่าความแข็งจุลภาคมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุพื้น [12] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chander S. G. และคณะ [13] จากการต่อ AISI 304 กับ AISI 4140 จะมีความแข็งสูงบริเวณ ที่เกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic

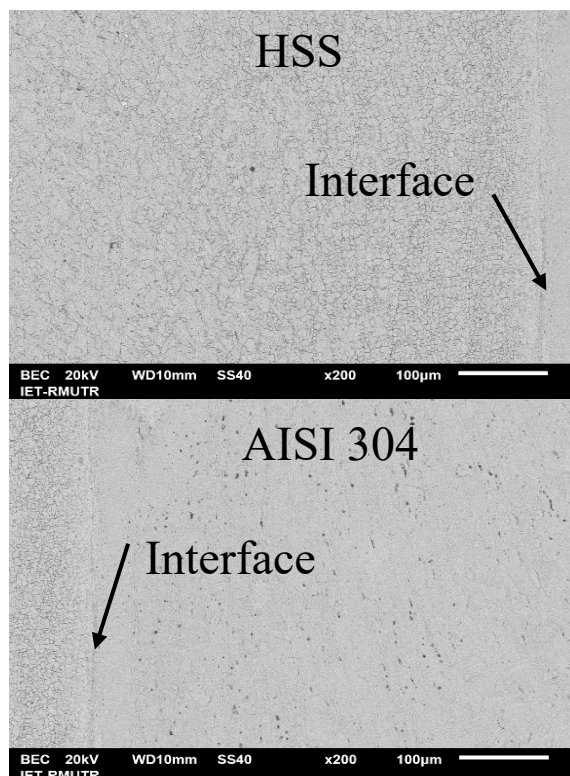
deformation) ที่ระหว่างรอยต่อซึ่งจะทำให้มีค่าความแข็งจุลภาคนอกจากวัสดุพื้นของเหล็กกล้าไร้สนิม เนื่องจากการเสียรูปแบบถาวรนำไปสู่การเกิดความเครียดแข็งที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 8 ความแข็งจุลภาคของรอยต่อ

3.3 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

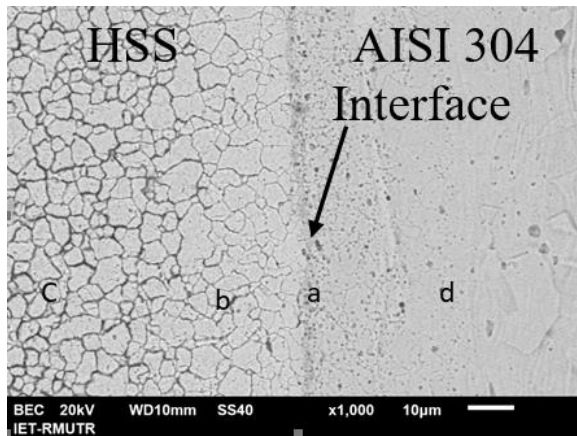
รูปที่ 9 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า บริเวณรอยต่อมีเกรนที่ละเอียดกว่าเนื้อวัสดุเดิมซึ่งเห็นได้ชัดจาก HSS ผลจากงานวิจัยของ Lee และคณะรายงานว่าขนาดเกรนตำแหน่งใกล้รอยต่อจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแต่ละบริเวณการเชื่อมและตัวแปรการเชื่อม [14] สำหรับผลกระทบจากโครงสร้างจุลภาคนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล [15] ซึ่งเป็นที่ทราบสำหรับการเกิดขึ้นของชั้นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) ที่มีความเปราะโดยธรรมชาติส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลเช่นกัน ความแข็งและเปราะของชั้นสารประกอบเชิงโลหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างสภาวะการดึงขอบของชั้นสารประกอบเชิงโลหะสามารถเกิดรอยแตกขนาดเล็ก โดยในงานวิจัยของ Seli และคณะ [16] พบว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะมีโอกาสเกิดขึ้นในกระบวนการเชื่อมเสียดทานและจะมีขนาดบางมากเนื่องจากการใช้เวลานานในการต่อในช่วงสั้นๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยในกระบวนการต่อทำให้การเชื่อมเสียดทานมีกลไกการเจริญเติบโตของสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นจากการแพร่ของธาตุได้น้อยเช่นกัน [17, 18]



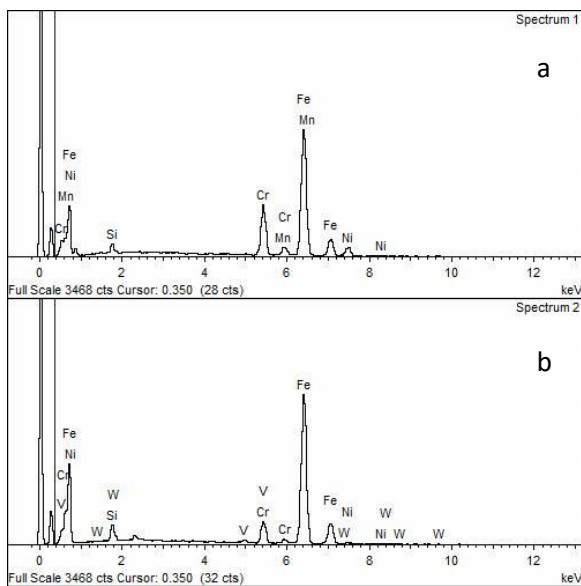
รูปที่ 9 รอยต่อระหว่างพื้นผิว

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีตำแหน่ง a, b, c และ d จากการทำ SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า จากรูปที่ 10 แสดงผลไว้ดังรูปที่ 11 โดยจุด (a) คือรอยต่อมีธาตุที่ปรากฏใกล้เคียงกับโลหะพื้นเหล็กกล้าไร้สนิมสังเกตได้จากธาตุ Mn ปรากฏอยู่เช่นเดียวกับจุด (d) ซึ่งแตกต่างกับจุด (b) และ (c) ที่ไกลออกไปจากขอบเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งไม่พบธาตุดังกล่าว จากการทำ Mapping ของธาตุที่บริเวณรอยต่อจากภาพถ่ายของ SEM ในรูปที่ 12 แสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆที่สามารถพบได้ดังรูปที่ 13 จากรูปแสดงขอบเขตของรอยต่อของวัสดุแต่ละชนิดไว้อย่างชัดเจนซึ่งจะมีการแบ่งขอบเขตรอยต่อเป็นเส้นโค้ง โดยหลักๆจะถูกแบ่งโดย Cr และ Ni พบเฉพาะบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิม รูปที่ 14 แสดงผลการ XRD ของรอยต่อในช่วงมุมการเลี้ยวเบนตั้งแต่ 25-80 เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า (Voltage) ที่ 40 kV ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Current) ที่ 40 mA และความเร็วในการสแกนเท่ากับ 0.5 sec/step พบเฟส โครงสร้าง

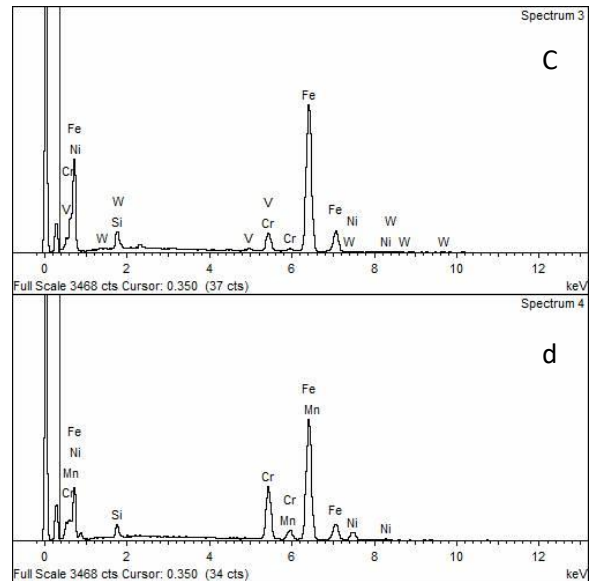
กลุ่มระนาบและตัวแปร โครงสร้างผลึกแสดงไว้ดังตารางที่ 7 โดยแต่ละเฟสมีปริมาตรต่อหน่วยเซลล์ (Unit cell volume; V) แสดงดังตารางที่ 8 อย่างไรก็ตามปริมาตรต่อหน่วยเซลล์และค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constants) สามารถเพิ่มขึ้นได้จากผลของความร้อน เนื่องจากการเจริญเติบโตของผลึกเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มอุณหภูมิ [19] ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากปริมาตรต่อหน่วยเซลล์ของสารประกอบเชิงโลหะที่พบแสดงให้เห็นสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดจาก Fe และ Ni จะมีขนาดโตกว่าชั้นสารประกอบเชิงโลหะอื่นๆ



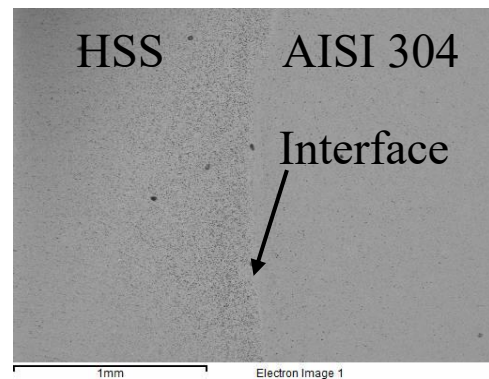
รูปที่ 10 SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



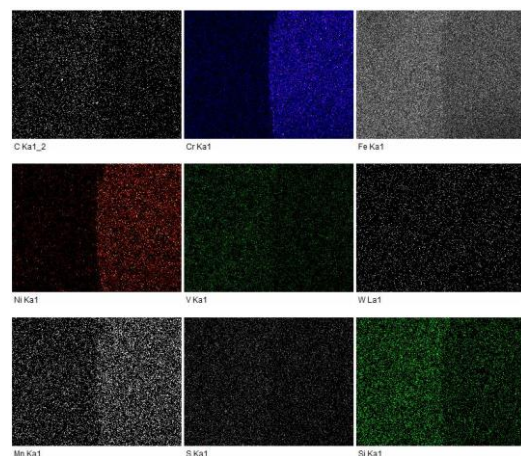
รูปที่ 11 ผลการตรวจสอบ EDS



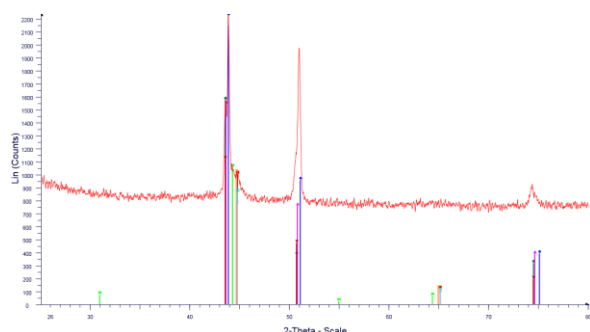
รูปที่ 11 (ต่อ) ผลการตรวจสอบ EDS



รูปที่ 12 SEM รอยต่อจากสำหรับทำ Mapping



รูปที่ 13 Mapping ของธาตุที่ระหว่างรอยต่อ



รูปที่ 14 ผลตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ตารางที่ 7 ข้อมูลเฟส โครงสร้างและตัวแปรโครงสร้างหลัก

Symbol	Phase/ Structure	Space group (No.)	Lattice parameter (Å)
	Fe/ BCC	Im-3m (229)	a=b=c = 2.86080
	Cr ₄ Ni ₁₅ W/ FCC	Fm-3m (225)	a=b=c = 3.57290
	FeNi/ FCC	Fm-3m (225)	a=b=c = 3.59750
	Fe _{0.64} Ni _{0.36} / Cubic	Pm-3m (221)	a=b=c = 3.59220
	Fe ₃ Ni ₂ / FCC	Fm-3m (225)	a=b=c = 3.59800
	Fe ₁₉ Ni/ BCC	Im-3m (229)	a=b=c = 2.86850
	MnNi/ Cubic	Pm-3m (221)	a=b=c = 2.89170

ตารางที่ 8 ปริมาตรต่อหน่วยเซลล์

Phase	Unit cell volume; V (Å ³)
Fe	23.40
Cr ₄ Ni ₁₅ W	45.60
(Fe,Ni)	46.60
Fe _{0.64} Ni _{0.36}	46.40
Fe ₃ Ni ₂	46.60
Fe ₁₉ Ni	23.60
MnNi	24.18

4. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ตัวแปรในการเชื่อมเสียดทานพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่ P1, t2 และ P2 สำหรับปัจจัยร่วม (Interaction) ที่มีผลกระทบต่อความต้านทานแรงดึง ได้แก่ t1*P1 และ t2*P2 ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และสมการทำนายความต้านทานแรงดึงมีความคลาดเคลื่อน 3.54 %

การนำไปใช้ประโยชน์สำหรับองค์ความรู้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการต่อวัสดุต่างชนิดอื่น ๆ ได้ โดยเฉพาะการต่อโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานการใช้งานจะมีข้อจำกัดเช่นกัน ได้แก่ การเกิดครีปที่ขึ้นออกมาบริเวณรอยต่อซึ่งต้องผ่านการกำจัดออกก่อนนำไปใช้งาน และกระบวนการสามารถต่อชิ้นงานที่มีรูปทรงกระบอกได้เท่านั้นจึงเกิดข้อจำกัดสำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงอื่นๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนตามสัญญาเลขที่ A-22/2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sahin, M. and Akata, H.E. Joining with friction welding of plastically deformed steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003; 142: 239–246.
- [2] Chong, C.W. Research and development of multipurpose carbide end mill. university of southern queensland faculty of engineering and surveying. Available [Online]: <https://core.ac.uk/download/pdf/11034547.pdf>.
- [3] Byrne, G., Dornfeld, D. and Denkena, B. Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2003; 52: 483–507.
- [4] Ji, H., Li, M., Lu, Y. and Wang, C. Mechanical properties and microstructures of hybrid ultrasonic resistance brazing of WC-Co/BeCu. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012; 212: 1885– 1891.

- [5] Noda, T., Shimizu, T., Shimizu, M. and Iikubo, T. Joining of TiAl and steels by induction brazing. *Materials Science and Engineering*, 1997; A239–240: 613–618.
- [6] Iamboliev, T., Valkanov, S. and Atanasova, S. Microstructure embrittlement of hard metal–steel joint obtained under induction heating diffusion bonding. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013; 37: 90–97.
- [7] Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S. and Reddy, G.M. Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding. *Materials and Design*, 2011; 32: 3036–3050.
- [8] Moat, R., Karadge, M., reuss, M., Bray, S. and Rawson. W. Phase transformations across high strength dissimilar steel inertia friction weld. *Journal of materials processing technology*, 2008; 204: 48–58.
- [9] Celik, S. and Ersozlu, I. Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels. *Materials and Design*, 2009; 30: 970–976.
- [10] Ozdemir, N., Sarsilmaz, F. and Hascalik, A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials and Design*, 2007; 28: 301–307.
- [11] Sathiya, P., Aravindan, S. and Haq, A.N. Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints. *Materials and Design*, 2008; 29: 1099–1109.
- [12] Boonseng, K., Chainarong, S. and Meengam, C. Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welding in SSM356 Aluminium Alloys. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2014; 2: 20–24.
- [13] Avinash, M., Chaitanya, G. V. K., Giri, D. K., Upadhya, S. and Muralidhara, B. K. Microstructure and mechanical behaviour of rotary friction welded titanium alloys. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 2007; 1: 641–643.
- [14] Lee, W.B. and Jung, S.B. Effect of microstructure on mechanical properties of friction-welded joints between Ti and AISI 321 stainless steel. *Materials Transactions*, 2004; 45: 2805–2811.
- [15] Boonseng, K., Chainarong, S. and Meengam, C. Microstructure and mechanical properties of friction welding in SSM356 aluminium alloys. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2014; 2: 20–24.
- [16] Seli, H., Ismail, A.I.M., Rachman, E. and Ahmad. Z.A. Mechanical evaluation and thermal modelling of friction welding of mild steel and aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010; 210: 1209–1216.
- [17] Wei, G., Guoqiang, Y., Guangyu Y. and Zhang, X. Microstructure and mechanical properties of dissimilar inertia friction welding of 7A04 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017; 695: 3267–3277.
- [18] Prasanthi, T.N., Sudha Ravikirana, C., Saroja, S., Naveen Kumar, N. and JanakiRam, G.D. Friction welding of mild steel and titanium: Optimization of process parameters and evolution of interface microstructure. *Materials and Design*, 2015; 88: 58–68.
- [19] Lawrence, K. Pawan, K. Amarendra, N. and Manoranjan, K. Rietveld analysis of XRD patterns of different sizes of nanocrystalline cobalt ferrite. *International Nano Letters*, 2013; 1–12.

