



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Engineering Journal Chiang Mai University

Volume 27(2)2020 May - August 2020
ISSN 0857-2178

Content

การประยุกต์ใช้กฎความสัมพันธ์ในการปรับปรุงการจัดเก็บอะไหล่ซ่อมเครื่องชงกาแฟ..... (Application of Association Rules for Spare Parts Storage Improvement in Coffee Machine Repair Shop) สุดาลักษณ์ สักวดี และ วิมลสิน เหล่าศิริถาวร	1-15
Seasonal Variation of Water Quality and Microcystin Concentration in Kandawgyi Lake, Yangon City, Myanmar..... Khine Lwin Aye, Tomoaki Itayama, Tan Duc Nguyen, Kyaing, Kyi Pyar Shwe, Niwoti Whangchai, Reunkaew Praphrute and Akihide Tada	16-27
การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของพลตอบสนองอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบเนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง..... (Numerical Investigation of Responses of Tunnel Segmental Lining Due to Adjacent Loaded Pile) สมชาย จิราวัฒน์การ กฤษดา ตระกูลจันทน์ และ พรเกษม จงประดิษฐ์	28-38
Effects of Density on Geotechnical Engineering Properties of High-Expansive Polyurethane Foam..... ธมนวรรณ สืบพงศ์ วรัช ก้องกิจกุล และ พรเทพ ม่วงสุซ่า	39-51
การวิเคราะห์เส้นทางและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระบบโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี..... (An Examination for Routing and Factors Impacting Tourism Logistics in Ubonratchathani Province) กสิณ รังสิกรรพม	52-65
การบริหารจัดการและควบคุมความเสี่ยงเชิงคุณภาพสำหรับบรรจุภัณฑ์ขวดพลาสติกที่มีการลดน้ำหนัก..... (Quality Risk Management and Control for Plastic Bottle Weight Reduction) ณัฐกานต์ ชูวงษ์วัฒน์ นกัสนวงศ์ ใสศกศิลป์ และ ประเสริฐ อัครประมพงศ์	66-77
การศึกษาผลกระทบต่อนความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่งด้วยการรังวัดดาวเทียมแบบจลนในทันที บริเวณเหมืองถ่านหินเปิด แม่เปา..... (The Study of Effects on Positioning Accuracy using Real Time Kinematic Satellite Survey in Mae Moh Open-Pit Coal Mine) ธเนศพล บุญประกอบ และ พุทธิพล คำราชย์	78-90
การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบพลีโอฟ้าและความร้อนโดยใช้เทคนิคเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน..... (Performance Improvement of Photovoltaic/Thermal Panels by Using Heat Transfer Augmentation) ธนากรณ์ สุขคะโด มักรัตน์ แวนะยี่ จันทกานต์ ทวีกุล อิบรอเฮง ปิยา นิโอะ ปุฑู ปริญา พานิชย์ และ ชยุต นันทดุสิต	91-105

Note for Authors

Paper submitted for publication in Engineering Journal CMU should consist of the following sections: Titles, Authors Names and Address, Abstract, Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusion, Acknowledgements (if any), Reference, and Appendix (if any). Articles should be as concise as possible and must be written in either Thai or English. Authors are requested to follow the Journal's style and format and should refer to current issues as a guide. Electronic template of manuscript in Thai or in English may be downloaded from <www.eng.cmu.ac.th>. Details of style and format of the required manuscript are;

Text format: The manuscript should be prepared using a word processing software such as Microsoft Word or Latex. A4 size paper is conventionally accepted. Margins in page set up must be set as follows;

Top Margin	3.0	cm.	Bottom Margin	3.0	cm.
Left Margin	2.5	cm.	Right Margin	2.5	cm.

There should be 3 sections. The first and the third sections are single column format for Titles, Authors Names and Address, Abstract and References. The second is two 7.6 cm wide columns formatted with section separation of 0.8 cm. for the remainder of the paper.

Font, Font Size & Typeface Angsana UPC font type is required for Thai text and Times New Roman font type is required for English text. Font size [Pica] for various text functions are tabulated as follows.

Text functions	English Manuscript Font = Times New Roman		Thai Manuscript Font = Angsana UPC	
	pica Size ++	Typeface	pica Size ++	Typeface
Title	20[CT]	Bold	26[CT]	Bold
Author and Co-authors	11[CT]	Bold	14[CT]	Bold
Address of Correspondence	11[CT]	Normal	14[CT]	Normal
Abstract & Reference Heading	12[CT]	Bold	16[LRJ]	Bold
Section Heading & Number	12[LJ]	Bold	16[LJ]	Bold
Subsection Heading & Number	11[LJ]	Bold	14[LJ]	Bold
Abstract & Main Texts	11[LRJ]	Normal	14[LJ]	Normal

+ CT = Central Text, LJ = Left Justified, LRJ = Left & Right Justified

Text flow: To ease manuscript preparation, some general comments are described here. Paper should not exceed 16 pages in length, including figures and tables. Charts, photographs, graphs, diagrams and tables should be of good quality and sharp. All lettering, graph lines and points on graphs should be sufficiently large. Photos should be put into a text stream using a high resolution scanner. All illustrations should be provided in camera ready form and numbered consecutively. Tables should not duplicate results presented elsewhere in the manuscript, (e.g. in graphs). Equations and complex expressions should be carefully prepared.

Units: The SI system should be used for all scientific and laboratory data. If it is necessary to quote other units, these should be added in parentheses.

Reference: Only reference cited in the text should be listed in the reference section and should be presented in a list of references following the text of the manuscript (list by sequence of appearance). The full reference should be given in a numerical list at the end of the paper. In the text, authors should refer to references by a number in square brackets on the line (e.g. Terdtoon et al [1]). Reference should be given as follows;

- [1] Ma, F., Hanna, M.A. Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 1999; 70: 1-15
- [2] Tippayawong, N., Kundhawiorn, N., Jompakdee, W. Long term durability tests of small engines fueled with bio-ethano/gasoline blends. International Symposium on Renewable Energy, 14-17 September, Kuala Lumpur, Malaysia, 2003.
- [3] Suksamai, S. Particulate contamination control using filtration technique. MEng Thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2003.
- [4] Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, Singapore, 1988.

All correspondence should be addressed directly to Editor.



การประยุกต์ใช้กฎความสัมพันธ์ในการปรับปรุง การจัดเก็บอะไหล่ซ่อมเครื่องชงกาแฟ Application of Association Rules for Spare Parts Storage Improvement in Coffee Machine Repair Shop

สุดาลักษณ์ สังวัตถุ และ วิมลีน เหล่าศิริถาวร

Sudaluck Sangwantthu and Wimalin Laosiritaworn

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: Sudaluck_bowwii@hotmail.co.th* and wimalin@hotmail.com, Tel: 0-5394-4125

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจัดการสินค้าคงคลังอะไหล่เครื่องชงกาแฟของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นบริษัทที่ประกอบธุรกิจกาแฟแบบครบวงจรตั้งแต่ การปลูกกาแฟ การจำหน่ายผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับกาแฟ การจำหน่ายเครื่องชงกาแฟ รวมไปถึงงานบริการด้านการซ่อมเครื่องชงกาแฟ เนื่องจากปัจจุบันธุรกิจดังกล่าวมีการแข่งขันทางด้านธุรกิจสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานบริการซ่อมเครื่องชงกาแฟ และ เพื่อให้สามารถซ่อมเครื่องชงกาแฟได้อย่างรวดเร็ว บริษัทจึงได้มีการซื้ออะไหล่มาเก็บไว้ในคลังเป็นจำนวนมาก โดยอะไหล่ที่เก็บในคลังนั้นมีคุณลักษณะแตกต่างกันทั้งในด้านของ รูปร่าง ขนาด และวัสดุ ที่ใช้ผลิตอะไหล่ จากการเก็บข้อมูลของคลังอะไหล่ พบว่ามีการจัดวางอะไหล่ที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากยังไม่มี การคำนึงถึงความสัมพันธ์ทำให้อะไหล่ที่มีการเบิกใช้งานร่วมกันจัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ห่างกัน ส่งผลให้ใช้เวลานานในการ ค้นหาอะไหล่ ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบการจัดวางอะไหล่ในคลังให้สอดคล้องกับการเบิกใช้งานโดยใช้ กฎความสัมพันธ์ (Association rule) ในการระบุอะไหล่ที่มักมีการเบิกใช้ร่วมกัน จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์หา ความสัมพันธ์นั้น พบว่าได้กฎความสัมพันธ์ในการเบิกใช้งานทั้งหมด 7 กฎ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบการจัดวางอะไหล่ที่มี ความสัมพันธ์กันนำมาจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กัน เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาอะไหล่ นอกจากนี้ยังได้มีการนำเทคนิคการ ควบคุมด้วยการมองเห็น (Visual Control) มาประยุกต์ใช้โดยการจัดทำป้ายชื่อ เพื่อระบุตำแหน่งที่จัดวางอะไหล่ช่วยให้ สามารถบอกตำแหน่งของอะไหล่ และลดเวลาในการค้นหาอะไหล่ได้อีกด้วย หลังจากทำการปรับปรุงการจัดวางอะไหล่ ส่งผลทำให้เวลาในการค้นหาอะไหล่ลดลง จากเดิมที่ใช้เวลาเฉลี่ย 6.09 นาที ลดลงเหลือ 1.57 นาที

คำสำคัญ: กฎความสัมพันธ์ สินค้าคงคลัง เทคนิคการควบคุมการมองเห็น

ABSTRACT

This research aims to study the inventory management of the coffee machine spare parts in a case study company who conducts total services regarding coffee including planting, distributing coffee

products, distributing coffee machines, along with coffee machine maintenance. Nowadays, this kind of business is in a highly competitive and requires fast service, particularly in coffee maintenance service. Currently large amount of spare parts were stocked in order to provide quick response to customers. Spare parts stored in the spare parts storage room are different in shape, size and material. The preliminary study revealed that the storage were unorganized. Space in storage room was allocated without consideration to the spare parts' associations and requisition. Therefore, it takes a long time to search for the spare parts needed. This study aimed to design a new spare parts allocation in the stock room by using association rule to identify spare parts that are usually used together. Seven rules were found from association rules and were used to design spare parts allocation by putting associated spare parts together in order that the spare parts are easily found. Moreover, the visual control approach was applied in this study in order to help reduce the searching time with the ability to identify positions of the spare parts. The time consumption in searching was reduced from 6.09 minutes to 1.57 minutes after implementation.

Keywords: Association, Rule Inventory, Visual Control

1. บทนำ

การประกอบธุรกิจเกี่ยวกับกาแฟในประเทศไทยได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัจจุบันคนนิยมดื่มกาแฟเพิ่มมากขึ้น โดยมีการแข่งขันกันในด้านของรสชาติและความเป็นเอกลักษณ์ของร้าน ส่งผลให้มีบริษัทที่ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับกาแฟเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างบริษัทที่ประกอบธุรกิจในการจัดจำหน่ายเครื่องชงกาแฟ เนื่องจากการขยายตัวของธุรกิจกาแฟที่สูงขึ้น อีกทั้งการเลือกซื้อเครื่องชงกาแฟนั้นมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาหลายด้าน เช่น ความน่าเชื่อถือ ราคา และการให้บริการหลังการขาย เป็นต้น ซึ่งบริษัทที่ศึกษาเป็นบริษัทที่ประกอบธุรกิจเกี่ยวกับกาแฟแบบครบวงจร เริ่มจากการปลูกกาแฟ การจำหน่ายผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับกาแฟ การจำหน่ายเครื่องชงกาแฟ รวมทั้งมีบริการซ่อมเครื่องชงกาแฟให้กับลูกค้าของบริษัท และลูกค้าทั่วไปทำให้ต้องมีการสั่งซื้ออะไหล่ของเครื่องชงกาแฟมาจัดเก็บไว้ในคลังเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเพียงพอ

จากการศึกษาพบว่าอะไหล่ของเครื่องชงกาแฟในคลังนั้นมีทั้งหมด 53 ยี่ห้อ โดยแต่ละยี่ห้อจะมีอะไหล่หลายรายการ ซึ่งสามารถนับอะไหล่ในคลังได้ทั้งหมด 2,315 รายการ โดยในปัจจุบันได้มีการจัดวางอะไหล่ตามยี่ห้อ ซึ่งในการจัดวางอะไหล่ดังกล่าวนี้ยังไม่ได้คำนึงถึง

ความสัมพันธ์ของการเบิกใช้งาน ทำให้การค้นหอะไหล่เกิดความยุ่งยาก เนื่องจากอะไหล่ที่ถูกเบิกใช้งานพร้อมกันบ่อยๆ ถูกจัดวางในตำแหน่งที่ไกลกัน หรืออะไหล่ที่มีการเบิกใช้งานบ่อยถูกจัดวางไว้ในตำแหน่งที่ยากต่อการค้นหา แม้ว่าอะไหล่จะถูกจัดวางตามยี่ห้อก็ตาม ซึ่งตำแหน่งที่จัดวางของแต่ละยี่ห้อที่มีการจัดเก็บอะไหล่ที่ปะปนกันไม่ได้แยกเป็นรายการที่ชัดเจนทำให้อะไหล่ปะปนกันจากการค้นหอะไหล่ในแต่ละครั้ง ส่งผลทำให้ใช้เวลานานในการเข้าไปค้นหอะไหล่ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาหาความสัมพันธ์ในการเบิกใช้งานอะไหล่ เพื่อจัดวางอะไหล่ในคลังในสอดคล้องกับการเบิกใช้งานพร้อมทั้งทำป้ายชื่อเพื่อทำการระบุตำแหน่งต่างๆ ในคลังอะไหล่เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าไปค้นหอะไหล่

การทำเหมืองข้อมูลเป็นการค้นหารูปแบบความสัมพันธ์ที่ซ่อนอยู่ในชุดข้อมูลขนาดใหญ่ ซึ่งต้องอาศัยขั้นตอนวิธีทางคอมพิวเตอร์ผสมกับวิธีการทางสถิติในการค้นหารูปแบบความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เกิดขึ้นในอดีต การหาความสัมพันธ์เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งในการทำเหมืองข้อมูลเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลในกลุ่มข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ เพื่อนำผลที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการวางแผนการทำงานในอนาคต

การควบคุมการมองเห็นเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมการทำงาน เพื่อช่วยให้พนักงานทุก

คนสามารถเข้าใจขั้นตอนการทำงาน รวมไปถึงความผิดปกติต่างๆ และแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้ป้ายสัญลักษณ์ เพื่อสื่อสารให้พนักงาน และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ให้สามารถดำเนินงานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ต่อเนื่องและรวดเร็ว

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา เพื่อหาแนวทางในการจัดวางอะไหล่ที่คลังจัดเก็บอะไหล่ของแผนกซ่อมเครื่องชั่งกาแฟด้วยเทคนิคการหาความสัมพันธ์ร่วมกับเทคนิคการควบคุมการมองเห็น เพื่อปรับปรุงการจัดวางอะไหล่ในคลังให้สอดคล้องกับการเบิกใช้งาน และสามารถลดเวลาในการค้นหาอะไหล่

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับกฎความสัมพันธ์

การค้นหากฎความสัมพันธ์ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อใช้ในการค้นหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างไอเท็ม ในชุดข้อมูลที่เป็นลักษณะชุดข้อมูลแบบรายการ (Transaction dataset) ซึ่งกระบวนการค้นหากฎความสัมพันธ์นี้จะถูกนำเสนอผ่านตัวแปรทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ I หมายถึง เซตของไอเท็มโดย $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ และ T หมายถึง ทรานแซกชัน (Transaction) หรือระเบียบรายการข้อมูล โดยแต่ละทรานแซกชันประกอบด้วยเซตของไอเท็ม นั่นคือ $T \subseteq I$ และทรานแซกชัน T แต่ละรายการจะสัมพันธ์กับตัวระบุ (identifier) ที่เรียกว่า TID (Transaction Identifier) นอกจากนี้แต่ละไอเท็มจะต้องมีคุณลักษณะของข้อมูลแบบตัวแปรทวิ (Binary Variable) ได้แก่ ปรากฏ หรือไม่ปรากฏ ไอเท็มเซตในฐานข้อมูล สมมุติ กำหนดให้ A เป็นไอเท็มที่เกิดขึ้นในทรานแซกชันหนึ่งๆ ซึ่งก็คือ $T \subseteq A$ กฎความสัมพันธ์จะเขียนในรูป $A \Rightarrow B$ แทนเหตุการณ์การเกิด A แล้วจะเกิดเหตุการณ์ B ร่วมกัน โดยที่ $A \subset I, B \subset I$ และ $A \cap B = \emptyset$ [1]

2.2 ขั้นตอนการหากฎความสัมพันธ์

การค้นหากฎความสัมพันธ์ มีขั้นตอน 2 ขั้นตอน คือ

2.2.1 ขั้นตอนการหา Frequent Itemset

ขั้นตอนการหาเซตของรายการหรือรายการสินค้าที่เกิดขึ้นร่วมกันบ่อยมักนิยมใช้งานในขั้นตอนนี้ด้วยอัลกอริทึม PrePost+, LCMFreq, Apriori และ FP-Growth เป็นต้น อัลกอริทึม PrePost+ เป็นอัลกอริทึมที่ทันสมัยทั้งในแง่ของการใช้งานจริง และการใช้หน่วยความจำ แม้ว่า จะเป็นอัลกอริทึมที่ทำงานได้เร็วที่สุดสำหรับชุดข้อมูลขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นมาก แต่มีข้อเสียคือใช้พื้นที่หน่วยความจำเป็นจำนวนมาก [2] ส่วนอัลกอริทึม LCMFreq สามารถทำงานได้รวดเร็วสำหรับชุดข้อมูลขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นน้อย แต่จะสามารถทำงานได้ดีสำหรับข้อมูลบางกรณีเท่านั้น ซึ่งบางกรณีจะต้องมีการตัดกิ่งเพื่อลดจำนวนการวนซ้ำ ส่งผลทำให้ทำงานช้า [3] และอัลกอริทึม Apriori เป็นขั้นตอนวิธีที่ได้รับการยอมรับ และได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก สามารถทำงานได้ดีกับฐานข้อมูลที่มีขนาดเล็ก และมีจำนวนของเซตรายการน้อย ไม่นิยมใช้กับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ เพราะต้องอ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลหลายครั้ง ทำให้ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้น และพัฒนาขั้นตอนวิธีการใหม่ เพื่อลดจำนวนการอ่านข้อมูลจากฐานข้อมูล คือ อัลกอริทึม FP-Growth เป็นขั้นตอนวิธีที่อ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลเพียง 2 ครั้ง สามารถลดระยะเวลาในการประมวลผลช่วยให้ทำงานได้เร็วขึ้น เพราะไม่ต้องสร้างกลุ่มข้อมูลทำชิง กระบวนการทำงานใช้หลักการการทำงานแบบพลวัต (Dynamic Programming) ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพเหมาะสมกับฐานข้อมูลที่มีขนาดเล็ก และใหญ่ งานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้อัลกอริทึม FP-Growth มาใช้ในการหา Frequent Itemset เวลาในการประมวลผลน้อย และมีความแม่นยำสูง [4] อัลกอริทึม FP-Growth มีขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 1


```

Input: FP-tree constructed based on Algorithm 1, using DB and a minimum support
threshold  $\zeta$ .
Output: The complete set of frequent patterns.
Method: Call FP-tree (FP-tree, null).
Procedure FPF-tree (FP-tree,  $\alpha$ )
{
1 IF Tree contains a single path  $P$ 
2 THEN for each combination (denoted as  $\beta$ ) of the nodes in the path  $P$  do
3   generate pattern  $\beta \cup \alpha$  with support = minimum support of node in  $\beta$ ;
4 ELSE for each  $\alpha$  in the header of Tree do {
5   generate pattern  $\beta = \alpha \cup \alpha$  with support =  $\alpha$ .support;
6   construct  $\beta$ 's conditional pattern base and then  $\beta$ 's conditional FP-tree
7   Tree $\beta$ ;
8   IF Tree $\beta \neq \emptyset$ 
9     THEN call FP-Tree (Tree $\beta$ ,  $\beta$ )
10  }
}

```

รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีการ FP-Growth [Han et al., 2000]

จากรูปที่ 1 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม FP-Growth ได้ดังต่อไปนี้

1) อ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลครั้งแรกเพื่อนับความถี่ของแต่ละข้อมูลแล้วนำข้อมูลที่มีค่าสนับสนุนมากกว่าค่าสนับสนุนขั้นต่ำมาเรียงลำดับตามค่าความถี่ของแต่ละข้อมูลจากมากไปหาน้อยในตาราง

2) อ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลครั้งที่สองเพื่อสร้างต้นไม้ FP-Tree โดยอ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลที่ละรายการข้อมูล จากนั้นคัดข้อมูลในรายการข้อมูลที่ไม่ปรากฏอยู่ในตารางทิ้ง แล้วเรียงข้อมูลที่เหลือตามลำดับในตาราง จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวไปสร้างโหนด(Node Tree)เพิ่มเข้าไปในใบต้นไม้ FP-Tree แล้วเชื่อมแต่ละโหนดที่เป็นข้อมูลเดียวกันเพิ่มเข้าไปในตาราง

3) สร้าง Conditional Pattern Base และสร้าง Conditional FP-Tree ของแต่ละข้อมูล เพื่อใช้ในการขั้นตอนการค้นหากลุ่มข้อมูลที่ปรากฏร่วมกันบ่อย โดยการพิจารณาจะเริ่มจากข้อมูลต่ำสุดจนถึงข้อมูลที่อยู่บนสุดในตาราง ซึ่ง Conditional Pattern Base หมายถึง เซตของข้อมูลที่เกิดขึ้นพร้อมกับข้อมูลที่กำลังพิจารณาจากต้นไม้ FP-Tree หลังจากนั้นทำการสร้างต้นไม้ FP-Tree บน Conditional Pattern Base นี้เรียกว่า Conditional FP-Tree ซึ่งเกิดจากการนำค่าความถี่ของแต่ละข้อมูลในทุกเส้นทางรวมกัน และเลือกเฉพาะข้อมูลที่มีค่าสนับสนุนขั้นต่ำจาก Conditional FP-Tree เพื่อนำไปใช้ในการสร้างกลุ่มข้อมูลที่ปรากฏร่วมกันบ่อย [5] โดยค่าสนับสนุน

จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่กำหนด โดยค่าสนับสนุนสามารถคำนวณได้จาก Support $(A \Rightarrow B) = P(A \cap B)$ ดังสมการที่ (1)

$$= \frac{\text{จำนวนทรานแซกชันที่ปรากฏรายการทั้ง A และ B}}{\text{จำนวนทรานแซกชันทั้งหมด}} \quad (1)$$

2.2.2 การสร้างกฎความสัมพันธ์

กฎความสัมพันธ์เกิดจาก Frequent Itemset ที่มีค่าความถี่มากกว่าค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่กำหนด ซึ่งถูกค้นพบในข้อที่ 2.2.1 นั้นนำมาใช้สร้างกฎความสัมพันธ์โดยเลือกเซตที่มีสมาชิกตั้งแต่ 2 ไอเท็ม ขึ้นไปกำหนดให้เป็นเซต 1 โดยที่เซต 1 จะมีเซต s เป็นสมาชิก และทุกๆ เซต S ส่งผลให้เกิดกฎ ดังสมการที่ (2)

$$S \Rightarrow (1-s) \text{ ถ้า } \frac{\text{support_count}(1)}{\text{support_count}(s)} \geq \text{minimum conf} \quad (2)$$

กฎความสัมพันธ์ที่ได้ออกมา นั้นจะต้องมีตัววัดประสิทธิภาพของกฎ นั่นคือค่าความเชื่อมั่น โดยค่าความเชื่อมั่น (Confidence) ของกฎความสัมพันธ์จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำที่กำหนด (Minimum Confidence) ซึ่งสูตรการคำนวณหาค่าความเชื่อมั่นสามารถคำนวณได้จาก Confidence $(A \Rightarrow B) = P(B|A) = P(A \cap B)/P(A)$ ดังสมการที่ (3)

$$= \frac{\text{จำนวนทรานแซกชันที่ปรากฏทั้ง A และ B}}{\text{จำนวนทรานแซกชันที่ปรากฏรายการ A}} \quad (3)$$

ดังนั้นกฎความสัมพันธ์ที่ได้ คือ กฎความสัมพันธ์ที่มีค่าสนับสนุน และค่าความเชื่อมั่นผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้ [6][7][8]

2.4 การกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำและค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำ

ในการศึกษาวิจัยในอดีตที่ผ่านมาการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำ และค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำ เพื่อค้นหากลุ่มความสัมพันธ์ของข้อมูลสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปการทบทวนวรรณกรรมในการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำและค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำเพื่อหาความสัมพันธ์

ผู้วิจัย	ปัญหา	ค่าสนับสนุน	ค่าความเชื่อมั่น	จำนวนข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์	วิธีการหาค่าสนับสนุนและค่าความเชื่อมั่น
[8]	การจัดวางอะไหล่ในคลัง	35%	80%	310	กำหนดค่าเอง
[9]	การส่งอาหาร	10%	59%	37,020	กำหนดค่าสนับสนุนเอง และกำหนดค่าความเชื่อมั่นตั้งแต่ 40%-59%
[10]	ปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพนักศึกษา	20%	90%	83	กำหนดค่าเอง
		30%	90%	60	
		32%	90%	33	
[11]	เงื่อนไขที่มีแนวโน้มเสี่ยงต่อการกระทำการทุจริต	10%	70%	3,778	กำหนดค่าเอง
[12]	พยากรณ์ภาวะแทรกซ้อนโรคอื่นหลังจากที่ผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน	10%	20%	71,604	กำหนดค่าสนับสนุนตั้งแต่ 10% - 100% และ ค่าความเชื่อมั่น 20%-100%
[13]	ปรับปรุงกระบวนการขายของอุตสาหกรรมสิ่งทอ	20%	40%	2,000	กำหนดค่าสนับสนุนตั้งแต่ 15%-30% และ ค่าความเชื่อมั่น 30%-50%
[14]	ออกแบบคุณสมบัติของผ้า	50%	-	1,800	กำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำตั้งแต่ 20%-75%

จากตารางที่ 1 พบว่าในงานวิจัยที่มีการบันทึกข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์จำนวนน้อยจะมีการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำ และ ค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำไว้สูง

เนื่องจากข้อมูลที่บันทึกมีจำนวนน้อย ดังเช่น ในงานวิจัยของ [6] ได้ทำการบันทึกข้อมูลจำนวน 310 ชุด เพื่อใช้ศึกษาหาความสัมพันธ์ ในการเบิกใช้งานอะไหล่ และนำ

ความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ได้ไปใช้ในการออกแบบการจัดวางอะไหล่ในคลัง จะมีการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำไว้ที่ 35 เปอร์เซนต์ และค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำที่ 80 ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเอง ผลจากการออกแบบการจัดวางอะไหล่พบว่าเวลาในการค้นหาอะไหล่ลดลง และในงานวิจัยที่บันทึกข้อมูล เพื่อนำมาทำการวิเคราะห์จำนวนมาก ดังเช่น ในงานวิจัย [7] และ [10] ซึ่งมีการบันทึกข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ 37,020 ชุด และ 71,604 ชุด ตามลำดับ พบว่ามีการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำ และ ค่าความเชื่อมั่น ให้มีค่าน้อยเนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมาก หากกำหนดค่าไว้สูงอาจจะทำให้ไม่ปรากฏผลของกฎความสัมพันธ์ขึ้นมาได้ โดยในงานวิจัย [10] เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลพยากรณ์ภาวะแทรกซ้อนโรคอื่น หลังจากผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน โดยกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่ 10 เปอร์เซนต์ และค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำที่ 20 เปอร์เซนต์ โดยค่าสนับสนุนและค่าความเชื่อมั่นเกิดจากการกำหนดช่วง เพื่อค้นหาค่าที่ปรากฏกฎความสัมพันธ์ของข้อมูล 20 กฎ ผลที่ได้ทำให้ทราบว่าผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน แต่ละชนิดมีภาวะโรคแทรกซ้อนที่แตกต่างกัน สามารถช่วยหาวิธีป้องกันการเกิดโรคแทรกซ้อนที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ ดังนั้นในการกำหนดค่าสนับสนุนและค่าความเชื่อมั่นจะต้องกำหนดค่าให้เหมาะสมกับข้อมูลเพราะหากกำหนดค่าน้อยไป จำนวนกฎที่ได้มีจำนวนมาก และในทางกลับกันหากกำหนดค่ามากไป จำนวนกฎที่ได้ก็จะน้อยหรือไม่สามารถหากฎความสัมพันธ์ได้ ทั้งนี้การกำหนดค่าทั้งสองจะต้องพิจารณาถึงจำนวนข้อมูลที่เก็บมาด้วย

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.1 ศึกษากระบวนการทำงานของคลังอะไหล่

ในการศึกษากระบวนการทำงานในคลังอะไหล่ นั้น เริ่มจากการสร้างแผนภูมิการไหลของกระบวนการทำงาน (Flow Process Chart) เพื่อให้เห็นถึงกระบวนการทำงานและปัญหาที่เกิดขึ้น โดยกระบวนการทำงานเริ่มต้น

จาก ขั้นตอนการรับเครื่องซงกาแพที่มีปัญหาเข้ามาซ่อม จากนั้นทำการวิเคราะห์สภาพของปัญหา เพื่อทำการเบิกอะไหล่ที่ใช้ในการซ่อมเครื่องซงกาแพ และหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการซ่อม จะเป็นขั้นตอนการส่งมอบเครื่องซงกาแพให้กับลูกค้า ทำการศึกษาในส่วนต่างๆ ของห้องคลังอะไหล่ได้แก่ ขนาดของห้อง ตำแหน่งการวางอะไหล่ สภาพแวดล้อมโดยรวมของห้องคลังอะไหล่ ณ ปัจจุบัน จากนั้นศึกษากระบวนการเบิกใช้งานอะไหล่ในปัจจุบัน และทำการเก็บข้อมูลจากใบโอนสินค้า ซึ่งเป็นเอกสารที่แผนกช่างขอโอนอะไหล่ในแผนกคลังอะไหล่ไปคลังของช่าง เพื่อนำอะไหล่ไปใช้งาน ทำการเตรียมข้อมูลให้สามารถนำไปใช้ในการหากฎความสัมพันธ์โดยจะนำใบโอนอะไหล่มาบันทึกลงในโปรแกรม Microsoft Excel

3.2 การหากฎความสัมพันธ์

ในการหาหาความสัมพันธ์จะใช้โปรแกรม RapidMiner Studio 8.1 ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยในการหาหาความสัมพันธ์ใช้อัลกอริทึม FP-Growth ในการหาความถี่ของข้อมูลกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำไว้ที่ 30 เปอร์เซนต์ และนำชุดข้อมูลที่มีความถี่ที่มีค่าสนับสนุนมากกว่าค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่กำหนดไว้มาสร้างกฎความสัมพันธ์ ซึ่งกำหนดค่าความเชื่อมั่นที่ 50 เปอร์เซนต์ ในการกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำ และค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำนั้น จากการทบทวนงานวิจัยในอดีต ในหัวข้อที่ 2.4 พบว่า งานวิจัยในอดีตที่มีการเก็บข้อมูลสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์จะมีจำนวนมากหรือน้อย ก็จะมีการกำหนดค่าขั้นต่ำของทั้ง 2 ค่านี้ให้มีค่ามากกว่า 10 เปอร์เซนต์ ขึ้นไป เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์แสดงกฎที่มีความแข็งแกร่ง และมีความเหมาะสมที่จะเลือกนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

3.3 ออกแบบการจัดวางอะไหล่ในคลัง

ในการออกแบบการจัดวางอะไหล่ในคลัง จะนำผลที่ได้จากขั้นตอนการหาหาความสัมพันธ์ของการเบิกใช้งานอะไหล่ มาทำการออกแบบการจัดวางอะไหล่ในคลังใหม่ เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการเบิกใช้งานอะไหล่ โดยอะไหล่ที่มีความสัมพันธ์กันจะนำมาจัดวางไว้ใกล้กัน

ส่วนอะไหล่ที่ไม่ปรากฏในกฎความสัมพันธ์ที่วิเคราะห์ออกมา จะถูกจัดวางในตำแหน่งที่เหมาะสม

3.4 การทำการควบคุมการมองเห็น

การทำการควบคุมการมองเห็นเป็นอีกเทคนิคหนึ่ง ที่นำมาประยุกต์ใช้ ในการเขียนป้ายสัญลักษณ์ที่ระบุตำแหน่งของอะไหล่ ซึ่งเริ่มจากการกำหนดให้ตัวอักษรภาษาอังกฤษแทนชื่อของชิ้นเหล็ก และชื่อของผู้เหล็กที่ใช้ สำหรับจัดเก็บอะไหล่ในห้องคลัง เช่น กำหนดให้ชั้นวางเหล็ก 4 ชั้นแทนด้วยตัวอักษร A โดย ให้ชั้นบนสุดเป็น A1, A2, A3 และชั้นล่างสุดเป็น A4 ตามลำดับ เป็นต้น การกำหนดชื่อของชั้นวางเหล็ก และผู้เหล็กที่เหล็กจะทำ เช่นเดียวกัน ซึ่งอาจจะแตกต่างกันที่จำนวนชั้น นอกจากนี้ ได้ทำการเขียนป้ายแสดงรหัสอะไหล่ และจำนวนของอะไหล่แต่ละรหัสติดที่ด้านข้างของกล่องที่ใช้สำหรับจัดเก็บอะไหล่ที่ไม่ถูกวางไว้ในตู้เหล็กหรือชั้นวางเหล็ก เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาอะไหล่ และการตรวจนับในครั้งต่อไป

3.5 การเปรียบเทียบเวลาก่อนและหลังทำการปรับปรุง

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับปรุงทำได้โดยการจับเวลาในการค้นหาอะไหล่ก่อน และหลังทำการปรับปรุง จากกลุ่มอะไหล่ที่มีการเบิกใช้งานบ่อย ทั้งหมด 5 กลุ่ม โดยให้พนักงานของคลังอะไหล่ 1 คน เข้าไปค้นหาอะไหล่ทั้ง 5 กลุ่ม กลุ่มละ 5 รายการ โดย ค้นหารายการละ 1 ชิ้น กำหนดให้แต่ละรอบในการเข้าไป ค้นหาจะมีการเปลี่ยนรายการอะไหล่ที่ให้เข้าไปค้นหา เช่น จับเวลาอะไหล่กลุ่ม Promac ครั้งที่ 1 กำหนดรายการอะไหล่ที่ต้องเข้าไปค้นหา 5 รายการ และในการจับเวลา ครั้งที่ 2 จะเปลี่ยนรายการอะไหล่ที่ค้นหา จับเวลาจนครบ 10 ครั้ง ในส่วนของการจับเวลาหลังทำการปรับปรุงของอะไหล่กลุ่ม Promac ครั้งที่ 1 ถึง 10 จะใช้อะไหล่รายการเดียวกันกับการจับเวลาก่อนปรับปรุง เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบเวลาก่อนและหลังทำการปรับปรุงได้

4. ผลการดำเนินการ

4.1 ผลการศึกษาระบบการทำงานคลังอะไหล่ในปัจจุบัน

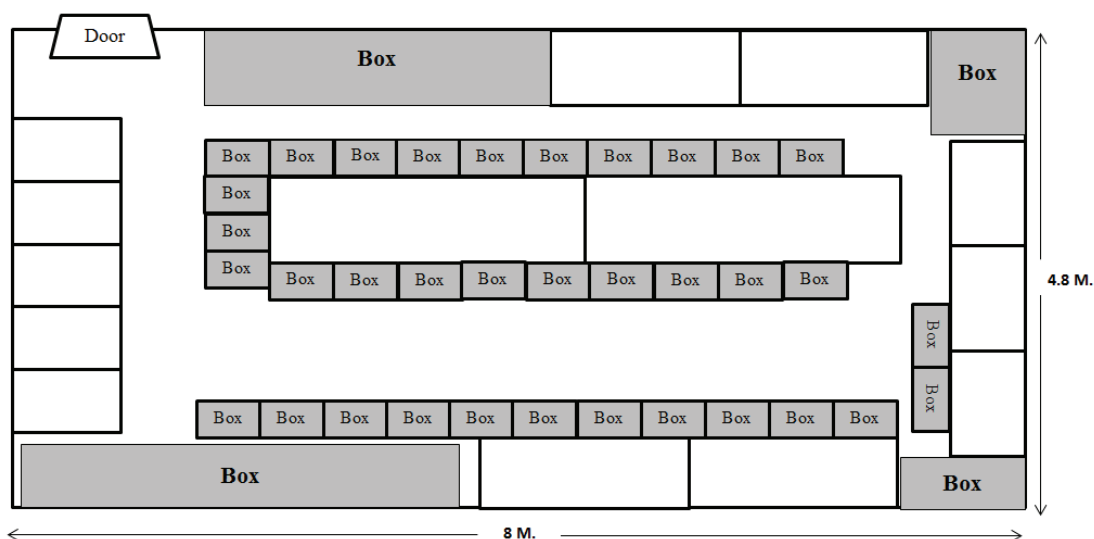
4.1.1 แผนภูมิการไหลของกระบวนการทำงาน

จากการศึกษาโดยการสร้างแผนภูมิการไหลของกระบวนการทำงาน ดังรูปที่ 2 พบว่าขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการให้ช่างวินิจฉัยอาการเสียของเครื่องรวมไปถึงอะไหล่ที่จะใช้ในการซ่อม จากนั้นจัดทำใบขอโอนสินค้าเพื่อเบิกอะไหล่มายังคลังของแผนกซ่อม โดยเข้าไปค้นหาอะไหล่ในคลัง เพื่อส่งมอบให้ช่างนำไปใช้ในกระบวนการซ่อม และส่งมอบเครื่องให้ลูกค้า เมื่อทำการซ่อมแซมเสร็จเรียบร้อย นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาเวลาในการทำงานแต่ละขั้นตอน พบว่าใช้เวลาในการค้นหาอะไหล่เวลานาน ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากการจัดวางอะไหล่ที่ไม่สอดคล้องกับการเบิกใช้งาน แม้ว่าจะเป็นพนักงานที่คุ้นชินกับงานก็ตาม ซึ่งในแต่ละวันนั้นมีการเบิกใช้งานอะไหล่ 9-10 ครั้งต่อวัน โดยในแต่ละครั้งนั้นจะมีการเบิกอะไหล่ในจำนวนที่แตกต่างกันบางครั้งของการเบิกอะไหล่มีการเบิกมากถึง 10 รายการ ส่งผลทำให้ต้องใช้เวลานานในการค้นหาอะไหล่เนื่องจากอะไหล่ไม่ได้จัดวางตามความสัมพันธ์ในการเบิกใช้งาน จึงไม่สะดวกต่อการค้นหา

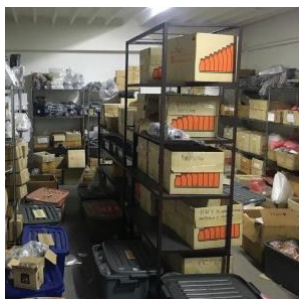
ในปัจจุบันห้องเก็บอะไหล่มีขนาด 4.8 X 8 เมตร ดังรูปที่ 3 จากผังของห้องเก็บคลังอะไหล่ แสดงให้เห็นว่ามีกล่องที่ใช้เก็บอะไหล่จำนวนมากถูกวางไว้บนพื้นรอบๆ ชั้นวาง และมีกล่องที่ใช้จัดเก็บอะไหล่กลุ่มที่มีการเคลื่อนไหวเบิกใช้งานน้อยจะถูกเรียงซ้อนกันวางชิดกับผนังรอบห้อง แสดงดังรูปที่ 4 ส่วนบนชั้นวางนั้น จะวางกลุ่มอะไหล่ที่มีการเคลื่อนไหวน้อย แต่เป็นการวางอะไหล่ที่ปะปนกันไม่ได้วางให้สอดคล้องกับการหยิบใช้งาน ทำให้เกิดความยุ่งยากในการค้นหา แสดงดังรูปที่ 5

ขั้นตอน	สัญลักษณ์	เวลา (นาท)	กระบวนการ	หมายเหตุ
1	● → □ D ▽	3.21	ช่างวินิจัยว่าจะต้องใช้อะไหล่อะไรบ้าง	
2	○ → □ D ▽	0.49	แผนช่างทำใบขอโอนมาที่แผนคลัง	
3	● → □ D ▽	0.13	เลือกใบขอโอน (รายการอะไหล่)	
4	● → □ D ▽	0.09	สั่งปรินท์ใบโอน	
5	○ → □ D ▽	6.09	ค้นหาอะไหล่	
6	● → □ D ▽	0.26	ช่างรับอะไหล่เพื่อเอาไปซ่อม	
7	● → □ D ▽	30	ช่างส่งมอบเครื่องให้ลูกค้า	
คำอธิบายสัญลักษณ์			ปฏิบัติการ ○ ขนส่ง → ตรวจสอบ □ หยุดรอ D จัดเก็บ ▽	

รูปที่ 2 แผนภูมิการไหลของกระบวนการทำงานก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 3 พังของห้องเก็บอะไหล่ก่อนการปรับปรุง



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) แสดงการวางกล่องบนพื้นรอบๆชั้นวาง
(ข) แสดงการวางกล่องซ้อนกัน



รูปที่ 5 แสดงการจัดวางอะไหล่ที่มีการเคลื่อนไหวน้อย
ไว้บนชั้นวาง

4.1.2 การเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการหาความสัมพัทธ์

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลนั้น เริ่มจากการนับรายการอะไหล่ ซึ่งพบว่ามียานวนมากถึง 2,315 รายการ ทำให้การหาความสัมพัทธ์นั้นเป็นไปได้ยาก จึงทำการแบ่งอะไหล่ออกเป็นกลุ่ม โดยมีเกณฑ์การพิจารณาแบ่งกลุ่มจากยี่ห้อ ร่วมกับคุณลักษณะของอะไหล่ ผลจากการแบ่งกลุ่มพบว่า อะไหล่สามารถแบ่งออกเป็นจำนวน 56 กลุ่ม ซึ่งแบ่งตามยี่ห้อได้ 53 กลุ่ม และแบ่งตามคุณลักษณะได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม O-ring กลุ่ม Rubber Seals และกลุ่มเบ็ดเตล็ด (เบ็ดเตล็ด คือ หัวปลี 3 ตา สายไฟ สายน้ำทิ้ง และอื่นๆ ที่เบิกใช้เพื่อสนับสนุนการทำงานของช่าง) เมื่อทำการแบ่งกลุ่มเสร็จแล้ว จึงได้ทำการบันทึกข้อมูลการเบิกใช้อะไหล่ จากใบโอนสินค้า ที่แสดงดังรูปที่ 6 โดยเก็บข้อมูลจำนวน 300 ใบ เป็นระยะเวลา 1 เดือน และบันทึกลงในโปรแกรม Microsoft Excel

CTPK 2561

Page: 1/1

ใบโอนสินค้า

วันที่ทำ: 26/07/2562

ผู้บันทึก: ๐๘12 10:06

วันที่ Date:	08/01/2561	รหัสผู้โอน	off12
เลขใบออก No:	JG61 01-0372	แยก:	HK-ENG

รหัสสินค้า	บาร์โค้ด	รายการสินค้า	รหัสออก	รหัสเข้า	เลขออก	น้ำหนัก	หน่วย	จำนวน
Code	Barcode	Name	FROM WH	TO WH	Box No.	Weight	Unit	Qty
SP-ES-1175	3967109200020	Gaggia Baby Dose Filter Holder Gaggia 1175	ENG-SPT	ENG			Pcs	1.00
SP-ES-1275	3967109220086	Gaggia baby seal Roller CR 147 (NO.30)	ENG-SPT	ENG			Pcs	1.00
SP-ES-1618	9512402014444	BE3320 140 O-RING FOR CONNECTOR-MAC	ENG-SPT	ENG			Pcs	2.00

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างใบโอนสินค้า

จากรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างใบโอนสินค้า ที่มีการโอนอะไหล่จากคลังอะไหล่ไปยังคลังของช่าง โดยรายการอะไหล่ที่ถูกโอนมีทั้งหมด 3 รายการ ได้แก่ Rubber Seal, Gaggia และ O-ring ซึ่งจะนำข้อมูลการโอนอะไหล่ไปบันทึกข้อมูลในตารางให้เป็น ID 1 แสดงดังตารางที่ 2

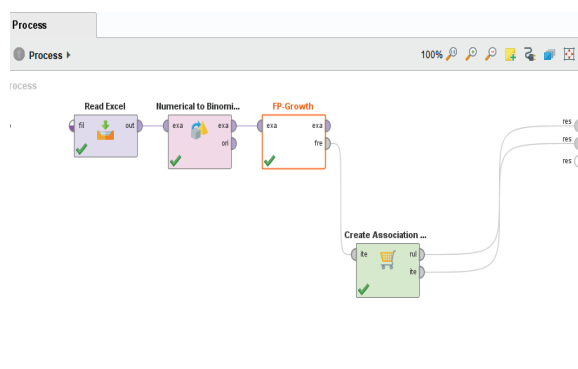
ตารางที่ 2 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลสำหรับการหาความสัมพัทธ์

Id	O-ring	Rubber Seals	Oscar	Promac	Gaggia	...	Nuova
1	1	1	0	0	1		0
2	0	1	0	0	0		0
3	0	0	0	1	0		1
4	1	0	0	0	0		0
...							
300	0	0	1	0	1		1

จากตารางที่ 2 แสดงการเก็บข้อมูลจากใบโอนสินค้า ซึ่ง ID 1 หมายถึง ใบโอนใบที่ 1 มีการเบิกใช้อะไหล่กลุ่ม O-ring, Rubber Seal และ Gaggia โดยจะทำการบันทึกค่าเป็น 1 ลงในตารางแม้ว่าจะมีการเบิกใช้ O-ring มากกว่า 1 รายการก็ตาม ส่วนกลุ่มอื่นๆ ที่ไม่ได้มีการเบิกใช้ให้บันทึกเป็น 0 จากการเก็บข้อมูล พบว่ามีอะไหล่บางกลุ่มที่ไม่มีการเบิกใช้งานในช่วงระยะเวลาที่เก็บข้อมูล จึงได้ทำการตัดกลุ่มเหล่านั้นออกไป ทำให้เหลืออะไหล่จำนวน 36 กลุ่ม และได้สอบถามผู้เชี่ยวชาญพบว่ากลุ่มอะไหล่ที่ไม่ปรากฏการเบิกใช้งานในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลนั้นในหนึ่งปีจะมีการเบิกใช้เพียง 1 ครั้ง หรือไม่มีการเบิกใช้เลย เนื่องจากเป็นรายการอะไหล่ ของเครื่องชงกาแฟรุ่นเก่า ทำให้หลายๆ ครั้งจะเบิกใช้ จากนั้นนำอะไหล่จำนวน 36 กลุ่มไปทำการวิเคราะห์ เพื่อหาความสัมพัทธ์ในการเบิกใช้งานอะไหล่ต่อไป

4.2 การหาความสัมพัทธ์

การสร้างกระบวนการทำงาน โดยใช้โปรแกรม RapidMiner Studio 8.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากฐานข้อมูล เพื่อค้นหารูปแบบความสัมพัทธ์ที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลที่มีปริมาณมาก ในการหาความสัมพัทธ์ ดังรูปที่ 7 เกิดจากการนำโอเพอร์เรเตอร์มาเชื่อมต่อกัน เพื่อให้ได้กระบวนการทำงานที่ใช้ในการหาความสัมพัทธ์ โอเพอร์เรเตอร์ หมายถึงการทำงานบางอย่างที่เฉพาะเจาะจง เช่น โอเพอร์เรเตอร์ Read Excel เป็นโอเพอร์เรเตอร์ ที่ใช้สำหรับนำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการทำงาน เป็นต้น



รูปที่ 7 กระบวนการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

จากรูปที่ 7 โอเพอเรเตอร์ ที่ใช้งานวิจัยนี้ ประกอบด้วย โอเพอเรเตอร์ Read Excel เพื่อใช้สำหรับ นำข้อมูลที่เก็บมาในรูปแบบของไฟล์ Excel เข้าสู่ โปรแกรม RapidMiner จากนั้นต่อเข้ากับโอเพอเรเตอร์ Numerical to binominal เพื่อแปลงข้อมูลตัวเลขให้เป็นข้อมูลประเภท Binomial ซึ่งข้อมูลที่เก็บมานั้นจะถูกแปลงจาก 1 ให้เป็น TRUE และแปลงจาก 0 ให้เป็น FALSE ถัดมาใช้โอเพอเรเตอร์ FP - Growth เพื่อหา Frequent Itemset โดยกำหนดค่าสนับสนุนขั้นต่ำที่ 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเก็บข้อมูลการเบิกอะไหล่เพียง 300 ใบ ทำให้ความถี่ในการเบิกอะไหล่ร่วมกันมีไม่มากนักจึงทำให้ไม่สามารถกำหนดค่าให้สูงจนเกินไป เพราะผู้วิจัยได้ทดลองกำหนดค่าสนับสนุนให้สูงกว่านี้แล้วพบว่า ผลลัพธ์ของกฎความสัมพันธ์ที่ได้น้อยเกินไป จนไม่สามารถที่จะนำมาจัดคลังอะไหล่ได้ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดง Frequent Itemset ของข้อมูล

No.	Size	Support	Item 1	Item 2
1	1	0.693	O-ring	
2	1	0.690	Rubber Seals	
3	1	0.457	Oscar	
4	1	0.420	Promac	
5	1	0.417	La nuova	
6	1	0.403	Rancilio	
7	1	0.380	Cuadra	
8	1	0.380	Gaggia	
9	1	0.337	เบ็ดเตล็ด	
10	2	0.500	O-ring	Rubber Seals

ตารางที่ 3 (ต่อ) แสดง Frequent Itemset ของข้อมูล

No.	Size	Support	Item 1	Item 2
11	2	0.327	O-ring	Oscar
12	2	0.310	O-ring	Promac
13	2	0.347	Rubber Seals	Oscar
14	2	0.300	Rubber Seals	Promac
15	2	0.300	Rubber Seals	La nuova

จากตารางที่ 3 แสดงผล Frequent Itemset ที่ได้จากการใช้โอเพอเรเตอร์ FP-Growth ในการหาชุดข้อมูลที่เกิดขึ้นบ่อยพบว่า Frequent Itemset มีขนาด 1 ไอเท็ม ซึ่งมีทั้งหมด 9 รายการ โดยพบว่า O-ring มีค่าสนับสนุน 0.693 หรือ 69.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความถี่ในการเบิกใช้มากที่สุด และ Frequent Itemset ที่มีขนาด 2 ไอเท็ม ซึ่งมีทั้งหมด 6 รายการ พบว่า O-ring กับ Rubber Seals มีค่าสนับสนุน 0.5 หรือ 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากต้องการให้โปรแกรมแสดงค่าความเชื่อมั่นว่าจะมีโอกาสที่อะไหล่จะมีการเบิกใช้งานร่วมกัน 50 เปอร์เซ็นต์

การสร้างกระบวนการทำงาน ในขั้นตอนสุดท้ายใช้โอเพอเรเตอร์ Create Association Rule ในการสร้างกฎความสัมพันธ์จาก Frequent Itemset ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า โดยกำหนดค่าความเชื่อมั่นขั้นต่ำ ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการหาความสัมพันธ์ของอะไหล่ที่ถูกเบิกใช้งาน แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กฎความสัมพันธ์ของรายการอะไหล่ที่ถูกเบิกใช้งาน

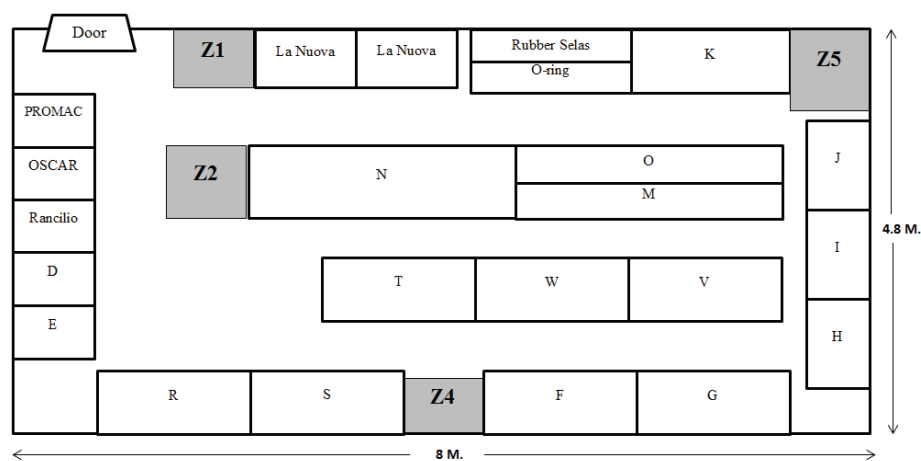
No	Premises	Conclusion	Support	Confidence
1	Rubber Seals	O-ring	0.500	0.725
2	O-ring	Rubber Seals	0.500	0.721
3	OSCAR	Rubber Seals	0.347	0.759
4	OSCAR	O-ring	0.327	0.715
5	PROMAC	O-ring	0.310	0.738
6	OSCAR	O-ring	0.300	0.715
7	La Nuova	Rubber Seals	0.300	0.720

จากตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ในการเบิกใช้งานอะไหล่ โดยในหัวตาราง premises หมายถึง รายการอะไหล่ที่ถูกเบิกก่อน conclusion หมายถึง รายการอะไหล่ที่ถูกเบิกตามมา เมื่อมีการเบิกอะไหล่ก่อนหน้านั้น และจากกฎที่ 1 สามารถอธิบายได้ว่า อะไหล่ Rubber Seal กับ O-ring มักจะถูกเบิกใช้งานร่วมกันด้วยความถี่ 50 เปอร์เซ็นต์ และ มีโอกาส 72.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อการเบิก Rubber Seals มักจะมีการเบิก O-ring ตามมาด้วย

4.3 ออกแบบการจัดวางอะไหล่ในคลัง

นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์หากฎความสัมพันธ์มาใช้ในการจัดวางอะไหล่ในคลังใหม่ เพื่อให้สอดคล้องกับการเบิกใช้งานได้ผล ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงผังของห้องเก็บ

อะไหล่ที่ถูกออกแบบมาจากกฎความสัมพันธ์ของรายการอะไหล่ทั้ง 7 กฎ จากตารางที่ 4 โดยคลังใหม่นี้ได้ทำการเคลื่อนย้ายเฉพาะตำแหน่งอะไหล่เท่านั้น



รูปที่ 8 ผังของห้องเก็บอะไหล่หลังทำการปรับปรุง

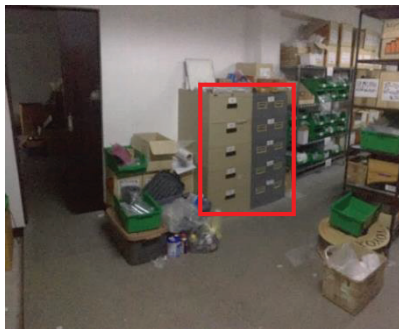
จากรูปที่ 8 แสดงผังของห้องเก็บอะไหล่หลังจากทำการปรับปรุง โดยนำกฎที่แสดงดังตารางที่ 4 มาใช้ในการออกแบบการจัดวางอะไหล่ จากกฎที่ 1 กับ 2 พบว่า Rubber Seals กับ O-ring มีค่าสนับสนุนมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าอะไหล่ทั้งสองชนิดนี้มีความถี่ในการเบิกใช้งานร่วมกันมากที่สุด ดังนั้นจึงได้นำอะไหล่ทั้งสองชนิดนี้วางบนชั้นเหล็กเดียวกัน จากนั้นได้พิจารณาต่อพบว่า Rubber Seals กับ O-ring มีความสัมพันธ์กับ PROMAC และ OSCAR ซึ่งแสดงดังกฎที่ 3, 4, 5 และ 6 จึงได้นำอะไหล่ทั้งสองชนิดนี้มาเก็บไว้ในตู้เหล็กใกล้กับประตูของห้อง ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับ Rubber Seals และ O-ring ทำให้สามารถค้นหาอะไหล่ได้สะดวก



รูปที่ 9 การจัดเก็บอะไหล่ PROMAC และ OSCAR

ในกฎที่ 7 พบว่า La Nuova กับ Rubber Seals มีความสัมพันธ์กัน แต่อยู่ในระดับที่น้อยกว่า PROMAC และ OSCAR จึงได้ทำการวางแผนจัดเก็บ La Nuova ไว้ในตู้เหล็ก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ถัดจากตู้เหล็กของ PROMAC และ OSCAR ตามลำดับ แต่เนื่องจากบริษัทการศึกษาได้มีการนำตู้เหล็ก 2 ตู้เข้ามาเพิ่มในตำแหน่งที่

ใกล้กับประตู ซึ่งติดกับตำแหน่งของ Rubber Seals แสดงดังรูปที่ 10 และไม่สามารถย้ายอะไหล่ PROMAC กับ OSCAR ที่มีความสัมพันธ์กับอะไหล่ Rubber Seals ในระดับที่มากกว่าอะไหล่ La Nuova ได้เพราะได้ทำการระบุตำแหน่งรหัสของอะไหล่ของ PROMAC และ OSCAR เรียบร้อยแล้ว จึงได้เปลี่ยนแปลงตำแหน่งการจัดวาง La Nuova ไปเก็บไว้ในตู้เหล็กทั้ง 2 ตู้ที่เพิ่มเข้ามาแทน ซึ่งสอดคล้องกับกฎความสัมพันธ์กฎที่ 7 อีกทั้งอะไหล่กลุ่ม La Nuova มีปริมาณมาก, หลากหลายขนาด และอะไหล่บางตัวมีน้ำหนักมาก จึงทำให้ตำแหน่งที่เลือกจัดวางอะไหล่กลุ่ม La Nuova เป็นตำแหน่งที่เหมาะสมทำให้ง่ายต่อการค้นหา และเคลื่อนย้ายอะไหล่



รูปที่ 10 การจัดเก็บอะไหล่กลุ่ม La nuova

ในขณะที่รายการอะไหล่อื่นๆ ที่ไม่ได้อยู่ในกฎความสัมพันธ์จะถูกจัดวางไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 11 และในส่วนพื้นที่ Z ที่แสดงในรูปที่ 8 เป็นตำแหน่งที่ใช้จัดเก็บอะไหล่ที่ไม่มีการเคลื่อนไหวหรือมีการเคลื่อนไหวในรอบปีน้อย โดยจะทำการเก็บอะไหล่กลุ่มนี้ไว้ในกล่องและวางซ้อนกันขึ้นเป็นชั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 11 การจัดเก็บอะไหล่ที่ไม่อยู่ในกฎความสัมพันธ์



รูปที่ 12 การจัดเก็บอะไหล่พื้นที่ Z

4.4 การทำการควบคุมการมองเห็น

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้การควบคุมการมองเห็นเข้ามาช่วย แสดงดังรูปที่ 13 โดยการเขียนป้ายระบุชื่อของชั้นวาง และตู้เหล็กในแต่ละชั้น ส่งผลทำให้สามารถระบุตำแหน่งอะไหล่ได้ นอกจากนี้ได้ทำการเขียนรหัสอะไหล่และจำนวนของอะไหล่ แต่ละรหัสไว้ที่บริเวณข้างกล่องที่ใช้สำหรับจัดเก็บอะไหล่ ทำให้ง่ายต่อการค้นหาอะไหล่



(ก)

(ข)

รูปที่ 13 (ก) ตัวอย่างการติดป้ายชื่อเพื่อกำหนดตำแหน่งในคลังอะไหล่

(ข) การเขียนรหัสอะไหล่และจำนวนอะไหล่ไว้บริเวณข้างกล่อง

ส่วนการเก็บอะไหล่แต่ละตำแหน่งนั้นอะไหล่จะถูกบรรจุไว้ในถุงพลาสติกใสแบบซิปล็อก แสดงดังรูปที่ 14 โดยจะปิดปากถุงด้วยกระดาษที่มีการระบุรหัสอะไหล่และจำนวนอะไหล่ที่บรรจุอยู่ในถุง เมื่อมีการนำอะไหล่ไปใช้งานจะมีการเปิดถุงพลาสติกทำให้กระดาษที่ปิดทับปากถุงขาด ดังนั้นเมื่อมีการใช้งานอะไหล่รายการนี้ในครั้งต่อไปให้หยิบจากถุงที่เคยใช้นี้จนกว่าจะหมด แล้วจึงเริ่มเปิดใช้ถุงใหม่ ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้ง่ายต่อการนับจำนวนอะไหล่

ในครั้งต่อไป ทำให้ประหยัดเวลา นอกจากนี้อะไหล่แต่ละตัวจะติดบาร์โค้ด เพื่อบอกราคาและมีเลขอินวอยซ์ที่ระบุไว้ เพื่อบอกลำดับการเข้ามาในคลังของอะไหล่ และวิธีการตรวจสอบอะไหล่มาก่อนหลังสามารถนำเลขอินวอยซ์ไปค้นหา เพื่อดูวันที่ทำการรับอะไหล่เข้ามาในคลังได้

อะไหล่ที่เข้ามาใหม่จะทำการนับก่อนนำไปบรรจุลงในถุงพลาสติกแบบซิปล็อค แล้วปิดปากถุงด้วยกระดาษที่เขียนระบุรหัสอะไหล่ และจำนวนอะไหล่ที่ถูกบรรจุในถุง และจะนำไปวางไว้ในตำแหน่งของอะไหล่ที่ได้มีการกำหนดไว้ หากในกรณีที่อะไหล่มีขนาดใหญ่หรือมีน้ำหนักมากจะเก็บอะไหล่ประเภทนี้ไว้ใกล้กับประตูเพื่อให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย



(ก)



(ข)

รูปที่ 14 (ก) ตัวอย่างถุงเก็บอะไหล่ที่ยังไม่มีการนำอะไหล่ไปใช้

(ข) ตัวอย่างถุงเก็บอะไหล่ที่ถูกเปิดเพื่อนำอะไหล่ใช้งาน

4.5 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังทำการปรับปรุง

การจับเวลา ก่อน และหลังทำการปรับปรุงนั้นได้ทำการจับเวลาในการค้นหาอะไหล่ 5 กลุ่ม อะไหล่ที่มีการเบิกใช้งานบ่อยที่สุด โดยเลือกจากการเก็บข้อมูลของใบโอนอะไหล่ ผลการจับเวลา ก่อนและหลังปรับปรุงแสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 แสดงเวลาการค้นหาอะไหล่ก่อนการปรับปรุง

อะไหล่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
Promac	9.58	6.17	5.59	6.57	7.31	7.39	6.58	7.28	9.11	8.57	7.42
Oscar	6.18	10.29	7.52	8.28	8.30	11.43	6.55	8.13	8.17	7.50	8.24
La nuova	8.09	11.36	4.23	5.54	6.38	8.49	6.19	6.26	9.57	7.52	7.36
O-ring	3.28	2.54	2.20	5.59	4.38	2.37	3.48	3.33	3.18	3.51	3.39
Rubber	4.10	3.50	4.52	2.44	3.30	5.10	4.34	3.49	4.21	5.53	4.05
Selas											
เฉลี่ยรวม											6.09

ผลการจับเวลาในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเราให้พนักงาน 1 คน เข้าไปค้นหาอะไหล่กลุ่ม Promac จำนวน 5 รายการ ใช้เวลาเฉลี่ยทั้งหมดในการค้นหาเท่ากับ 7.42 นาที

ตารางที่ 6 แสดงเวลาการค้นหาอะไหล่หลังการปรับปรุง

อะไหล่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
Promac	2.33	2.11	2.18	2.09	1.59	2.14	2.18	2.09	1.54	2.28	2.05
Oscar	1.59	1.45	1.58	2.03	1.48	1.54	1.32	2.13	1.29	1.48	1.59
La nuova	2.07	1.59	2.38	2.10	2.19	2.46	2.21	2.19	2.26	2.00	2.14
O-ring	1.32	1.41	1.28	1.29	0.55	0.59	1.10	1.23	0.56	1.48	1.08
Rubber	1.12	1.08	1.32	0.59	1.27	1.12	1.52	0.44	1.04	0.51	1.00
Selas											
เฉลี่ยรวม											1.57

ผลการจับเวลาในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้พนักงาน 1 คน เข้าไปค้นหาอะไหล่กลุ่ม Promac จำนวน 5 รายการ ใช้เวลาเฉลี่ยทั้งหมดในการค้นหาเท่ากับ 2.05 นาที แสดงให้เห็นว่า เวลาที่ใช้ในการค้นหาอะไหล่ลดลง

หลังจากทำการปรับปรุงการจัดวางอะไหล่ให้สอดคล้องกับการเบิกใช้งานสามารถสร้างแผนภูมิการไหลของกระบวนการหลังการปรับปรุง แสดงดังรูปที่ 15 พบว่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาอะไหล่ลดลง จากเดิมใช้เวลา 6.09 นาที ลดลงเหลือ 1.57 นาที เนื่องจากได้จัดวางอะไหล่ตามความสัมพันธ์ และแสดงป้ายชื่อระบุตำแหน่งของอะไหล่แต่ละรายการอย่างชัดเจน ในการเบิกใช้งานจึงทำให้สะดวกต่อการค้นหา

ขั้นตอน	สัญลักษณ์	เวลา (นาท)	กระบวนการ	หมายเหตุ
1	● → □ D ▽	3.21	ช่างวินิจัยว่าจะต้องใช้อะไหล่อะไรบ้าง	
2	○ → □ D ▽	0.49	แผนช่างทำใบขอโอนมาที่แผนคลัง	
3	● → □ D ▽	0.13	เลือกใบขอโอน (รายการอะไหล่)	
4	● → □ D ▽	0.09	สั่งปรินใบโอน	
5	○ → □ D ▽	1.57	ค้นหาอะไหล่	
6	● → □ D ▽	0.26	ช่างรับอะไหล่เพื่อเอาไปซ่อม	
7	● → □ D ▽	30	ช่างส่งมอบเครื่องให้ลูกค้า	
คำอธิบายสัญลักษณ์			ปฏิบัติการ ○ ขนส่ง → ตรวจสอบ □ หยุดรอ □ จัดเก็บ ▽	

รูปที่ 15 แผนภูมิการไหลของกระบวนการทำงานหลังการปรับปรุง

5. สรุปผลการดำเนินการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการหาความสัมพันธ์ของการเบิกใช้อะไหล่ในคลัง เพื่อทำการจัดวางอะไหล่ในคลังให้สอดคล้องกับการเบิกใช้งานของอะไหล่ ส่งผลทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาอะไหล่ ซึ่งแต่เดิมก่อนการทำการปรับปรุง อะไหล่ถูกจัดวางไว้ตามยี่ห้อในส่วนต่างๆของห้อง และการวางอะไหล่ยังไม่ได้มีการคำนึงถึงความสัมพันธ์ในการเบิกใช้งาน อีกทั้งยังพบว่ารายการอะไหล่ที่ถูกเบิกใช้ร่วมกันบ่อยมักจะถูกจัดวางไว้ในจุดที่ไกลกัน เป็นผลทำให้ต้องใช้เวลานานในการค้นหาอะไหล่

ผลที่ได้จากการนำกฎความสัมพันธ์ของการเบิกใช้อะไหล่ในคลังมาทำการออกแบบการจัดวางอะไหล่ร่วมกับเทคนิคการควบคุมการมองเห็น พบว่าเวลาในการค้นหาอะไหล่ลดลง จากเดิมที่ใช้เวลา 6.09 นาที ลดลงเหลือเพียง 1.57 นาที

ทั้งนี้ในการทดลองแต่ละขั้นตอนใช้เวลาก่อนข้างนานในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะหาความสัมพันธ์ในการเบิกใช้งานอะไหล่ก่อน เพื่อช่วยในการจัดวางอะไหล่ในคลังให้ง่ายต่อการค้นหาอะไหล่ อย่างไรก็ตามในอนาคตอาจมี

การศึกษาหาความสำคัญของอะไหล่ด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบ เอบีซี การจัดกลุ่มข้อมูล (Clustering) และการจำแนกประเภทข้อมูล (Classification) ร่วมด้วย แล้วเลือกกลุ่มอะไหล่ที่สำคัญที่สุดมาทำการคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมของแต่ละรายการอะไหล่เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดการคลังอะไหล่ต่อไป

6. ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตหากมีอะไหล่ใหม่เข้ามาควรจะทำการศึกษาการหาความสัมพันธ์ใหม่ เพื่อปรับเปลี่ยนการจัดวางอะไหล่ให้สอดคล้องกับการเบิกใช้งานที่อาจจะมีเปลี่ยนแปลงในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทกรณิศึกษาและพนักงาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปทำการศึกษาวิจัยและให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิวัฒน์ ชินนาทศิริกุล. การทำเหมืองข้อมูล ตอน การหาความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วย Apriori algorithm. 2558. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: [http://www.wiwatchin.com/page/article/Apriori algorithm.pdf](http://www.wiwatchin.com/page/article/Apriori%20algorithm.pdf).
- [2] Deng, Z.H. and Lv, S.L. PrePost+: An efficient N-lists-based Algorithm for Mining Frequent Itemsets via Children–Parent Equivalence Pruning. *Expert Systems with Applications*, 2015; 42(13): 5424-5432.
- [3] Uno, T., Kiyomi, M. and Arimura, H. LCM Ver. 2: Efficient Mining Algorithms for Frequent/Closed/Maximal Itemsets. The IEEE ICDM Workshop on Frequent Itemset Mining Implementations, November 1, Brighton, UK, 2004; 1-11.
- [4] ัญญาพร ชื่นมัจฉา. การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์สำหรับข้อมูลการสั่งซื้อสินค้า โดยใช้เทคนิคเอพเพ็กโตร. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยศรีประทุม, 2559.
- [5] พูลละห์ ค้อมอง. ขั้นตอนวิธีการสำหรับการค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกันบ่อยโดยรองรับรายการข้อมูลที่คล้ายคลึงกัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553.
- [6] สายชล สันตบุรณทอง. การทำเหมืองข้อมูล เล่ม 1: การค้นหาความรู้จากข้อมูล. จามจุรีโปรดักส์ จำกัด, กรุงเทพมหานคร, 2560.
- [7] โกเมศ อัมพวัน. วิธีการหาความสัมพันธ์แบบใหม่โดยค้นไม่แสดงรายการความถี่. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [8] Lasiritaworn, W. S., Singtorn, N. and Tapeng, P. Spare parts storage improvement with association rules. The World Congress on Engineering and Computer Science 2016 Vol II WCECS 2016, October 19-21, San Francisco, USA, 2016.
- [9] จิระนันต์ เจริญรัตน์. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการสั่งอาหารด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล กรณีศึกษาร้านอาหารบ้านฟ้าโปร่ง จ.สกลนคร. การประชุมวิชาการระดับชาติราชชมงคลสุรินทร์วิชาการครั้งที่ 8 วิจัยเพื่อประเทศไทย 4.0, 22-23 ธันวาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, 2559.
- [10] นุชราภรณ์ มัทธนะชัย, วรรจิต มาลัยวงศ์, เสมอแข สมหอม และ ัญญา ดันตรานนท์. ความสัมพันธ์ของรายวิชาที่มีผลต่อการพัฒนาคุณภาพนักศึกษาโดยใช้อัลกอริทึมเอพเพ็กโตร. การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3, 22 ธันวาคม, กำแพงเพชร, 2559; 456.
- [11] ชัยศิริ สนิทพลกลาง. การทำเหมืองข้อมูลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในห้องครัว. *วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม*. 2018; 28(4): 36-42.
- [12] ชฎิกกร์ ทรายหอม, วิชา เจริญภักดิ์ และ วิทยา พรพัชรพงศ์. การพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ภาวะแทรกซ้อนของโรคอื่นในผู้ป่วยโรคเบาหวานโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล: กรณีศึกษาโรงพยาบาลปทุมธานี. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมศาสตร์ ครั้งที่ 4, 26-27 พฤศจิกายน, นนทบุรี, 2557.
- [13] Istrat, V. and Lalić, N. Association Rules as a Decision Making Model in the Textile Industry. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2017; 25(4):8-14.
- [14] Yildirim, P., Birant, D. and Alpyildiz, T. Discovering the Relationships Between Yarn and Fabric Properties Using Association Rule Mining. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2017; 25(6): 4788-4804.
- [15] Han, J., Pei, J. and Yin, Y. Mining Frequent Patterns without Candidate Generation. *ACM Sigmod Record*, 2000; 29(2): 1-12.



Seasonal Variation of Water Quality and Microcystin Concentration in Kandawgyi Lake, Yangon City, Myanmar

Khine Lwin Aye¹, Tomoaki Itayama¹, Tan Duc Nguyen¹, Kyaing², Kyi Pyar Shwe²,
Niwooti Whangchai³, Reunkaew Praphrute⁴, Akihide Tada^{1*}

¹Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki, Japan

²Department of Civil Engineering, Yangon Technological University, Yangon, Myanmar

³Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

⁴Institute of Product Quality and Standardization, Maejo University, Chiang Mai, Thailand

*Corresponding Author: E-mail address: atada @ nagasaki-u.ac.jp

ABSTRACT

This study is the first report on seasonal variations in water quality parameters and cyanotoxin microcystin (MC) concentration during one year in Kandawgyi Lake, Yangon City, Myanmar. Water quality parameters were measured and water samples were collected once a month from August 2018 to June 2019 at four observation sites (St-1~4). The seasonal changes of DO, pH and water temperature and turbidity were similar among the four observation sites. The observed DO values were always over the saturation levels due to the high photosynthetic activity in the hypereutrophic lake. However, chlorophyll-a as a surrogate of phytoplankton biomass was correlated negatively with DO. The multivariate linear regression model (linear model) analysis suggested that Kandawgyi lake was in the N-limitation state. Also, the lower N:P ratio (< 10) of lake water supported this fact. The linear model analysis elucidated the dependency on the water temperature for the three MC variants. The highest concentration of MC-YR and MC-LR at a lower temperature of less than 29°C was observed. The higher value of MC-RR in concentration was found at the temperature ranged was 29°C to 31°C than other temperature ranges. In terms of seasonal variation, MC-LR, which is more toxic than MC-RR and MC-YR, tended to show higher concentration in cool-season of Yangon city. It is known that the production ratio of MC variants is depending on the species or genetic variants of toxic cyanobacteria producing MCs. Therefore the seasonal variations of MC variants suggested the seasonal succession of toxic cyanobacteria. Moreover, it was thought that the variations of MC variants among the sites could be involved by the low mixing condition of the lake water. Therefore, this result has shown that lake monitoring with sufficient frequency and observation points in lakes with low water mixing is essential for monitoring water safety.

Keywords: hypereutrophication, toxic cyanobacteria, microcystin, temperature, nutrients

1. INTRODUCTION

Lakes or reservoirs in the urban area of developing countries frequently face severe deterioration of the water quality due to the discharging of untreated wastewater into water bodies [1]. Kandawgyi Lake's view and sampling details were presented in Figure 1 and Table 1. It is located in Yangon city of Myanmar. The lake and the parking surroundings are the most famous recreation places in Yangon. The lake has seven major inlets and one outlet. The domestic wastewater discharged to each channel through

inlet. As a result, every time look the algae bloom. Hence it is apparent that the lake is in the eutrophic or hypertrophic state.

The blooms ruin the lake view for tourists, and it frequently generates a strong odor for the surroundings [2]. It is easily recognized from such a situation of Kandawgyi Lake that the bloom is consisting of cyanobacteria. The lake may have suitable conditions that the toxic cyanobacteria bloom occurs in terms of rich nutrients (N and P), light condition and temperature condition [3]. However, no

investigation has been conducted to elucidate the actual eutrophication state and the character of the algal bloom of Kandawgyi Lake yet though it is a noticeable lake in the largest city of Myanmar. Hence, we need to survey the lake intensively. In particular, we have to focus on cyanotoxin microcystins (MCs) with the substantial hepatotoxicity, because many articles already reported that abundant MCs were detected in algal blooms in eutrophic or hypereutrophic lakes and reservoirs [4, 5, 6]. MCs have been the hazards for water safeness in the world [7, 8, 9].

In addition, some researchers reported that the lower N:P ratio in water bodies is a favorable condition for cyanobacterial bloom consisting of *Microcystis* sp. producing MCs [10,11]. Therefore, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the lake water have to be measured. Furthermore, we have to consider the variants of MCs in the lake, because there were 90 kinds of analogous compounds of MCs, which have different toxicity levels [11]. In many studies, MC-LR (leucine-arginine), MC-YR (tyrosine-arginine) and MC-RR (arginine-arginine) in the variants of MCs were mainly measured [6, 8, 10]. In particular, MC-LR has been used as the guideline value of MC in drinking water by WHO [9]. Moreover, it is necessary to compare the water quality parameters and MCs in considering the differences of precipitation and temperature during three seasons that rainy season, summer season and cool season in Myanmar. In particular, the nutrient loading from the surroundings could be increased in the rainy season. Moreover, the temperature is one of the most significant factors for the growth of cyanobacteria and toxin production [3, 7]. Therefore, in this study, we aimed to elucidate the relation between microcystins and influencing factors N, P and temperature in Kandawgyi lake by the monthly survey of lake. It was expected that the result was useful for baseline data for water quality management.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Field Survey and Sample Collection

The map of the study area shows in Figure 1, and the general features of the study area (Kandawgyi Lake) describe as Table-1[2]. The field observation conducted from August 2018 to

June 2019. Four observation sites were selected far from inlet points to avoid the direct discharge of domestic wastewater effect from a point source. Moreover, observation sites were selected regarding the flow direction. The water temperature, turbidity, pH and DO were measured by using a multi-item water quality measurement sensors (Model– AAQ1183, JFE ALEC Co. Ltd ;) at four sites St.1, St.2, St.3, and St.4 (see Figure 1). For the entire observation period, the collection time of each site conducted the same time and procedures. For St-1 (start 13:21 ~ end 13:31), St-2 (start 13:34 ~ end 13:44, St-3 (start 13:47 ~ end 13:58) and St-4 (start 14:03 ~ end 14:13). Surface water samples were collected from about 20 ~ 30 cm depth from the surface to avoid the bloom. The water samples were kept in a cool box with enough ice packs for transporting to the laboratory. The samples for TN, TP, and MCs were frozen until the analysis.

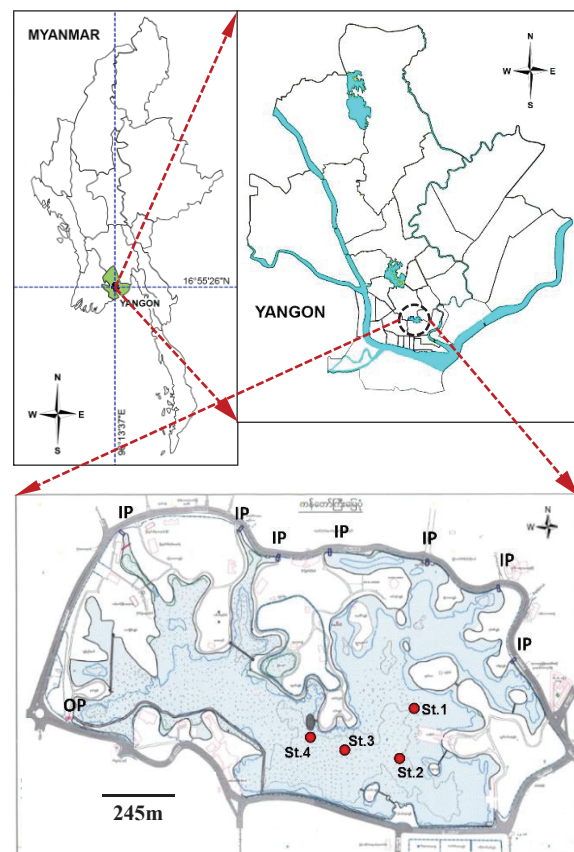


Figure 1 Maps of study area

Table 1 Limnological features of Kandawgyi Lake

Constructed Year	1879
Latitude	16°47'43.75"N
Longitude	96°9'59" E
Average Depth of Lake	1.83 m
Maximum Depth	3.66 m
Water Surface Area	0.6475 km ²
Catchment Area	1.421 km ²

2.2 Water Quality Analysis

The concentration of TN and TP in the unfiltered samples was measured with three repeats using the potassium persulfate method [12]. Chlorophyll-a (Chl-a) was extracted from the cell residue on a GF/C filter using 90% hot methanol and quantified spectrometrically [13]. The Chl-a measurement for samples from August ~ February was repeated twice, and that for samples from April ~ June was repeated three times.

2.3 Microcystin Analysis

The MCs analysis was carried out based on acetic acid extraction and HPLC [14, 15, 16]. 100% acetic acid of a particular grade (Merck, USA) of 1 ml was added to 20 ml samples and shook it for 30min. Then, the ultra-sonication of each sample for 5 min was repeated until the complete cell disruption. The cell debris was removed from the sample water after the cell disruption by 47 mm GF/C filter (Whatman Co., USA) before they pass through the solid phase extraction (SPE) column. The cartridge of SPE of 60mg/3ml capacity (Strata-X, Phenomenex Inc., USA) was washed by 100% methanol of 5ml (HPLC grade, Merck.) and Milli-Q water of 20 ml twice with 5 ml/min.

The sample water was passed through the washed SPE cartridge with 5 ml/min, and then the column was washed by 20% methanol of 5ml and Milli-Q water of 15 ml (twice). Finally, MCs were eluted from the SPE cartridge to a test tube by 100% methanol of 3 ml. It was dried 30 minutes with N₂ gas flow (100 ml/min) with heating (60~70°C). The dried samples were dissolved into 75% methanol of 0.5 ml, and then

it was filtrated by membrane filter with 0.22 µm pore size (Nylon, Starlab Scientific, Germany) to transfer each HPLC vial. Standard solutions of MC-LR, -YR and -RR (Enzo Life Science Inc., USA) were also prepared for the quantification.

HPLC (Agilent 1200 series, USA) was used for the quantification of MCs with C-18 column (Agilent, Zorbax, Eclipse, 5 µm, 3 mm × 150 mm). The column temperature was set at 40 °C and a diode-array detector at 238 nm. Solvent A is distilled water containing 0.05% (v/v) trifluoroacetic acid (TFA, HPLC grade, Sigma Aldrich, Co. LTD, USA) and Solvent B is acetonitrile (HPLC grade, Merck Co., Germany). The ratio of mobile phase 'A' and 'B' was changed from 70 %: 30% to 100% of 'A' solution (acetonitrile) for 44 min in the linear gradient method. The injection volume is 10 µL. Three kinds of microcystin variants (RR, YR, and LR) were detected at 238nm. Each peak was identified by the retention time of each standard.

2.4 Statistical Analysis

All statistical computations were performed by using R (version 3. 4. 3), which is a language and environment for statistical computing [17]. In particular, to evaluate the influencing factors on Chla and MCs, a multivariate linear regression model was used. We wrote the multivariate linear regression model as a linear model hereafter. In the analysis, the z-scores of explanatory variables were applied to compare the magnitude of the effect in the explanatory variables, which have different average and standard deviation [18, 19]. The z-score calculation method was shown in Appendix 2. Moreover, the Akaike Information Criteria (AIC) was used for model selection [19]. A linear model with a smaller AIC is generally identified as a better model. The statistically significance level was classified based on the null hypothesis rejection probability p-value as follows:

$$**** < 0.001 < *** < 0.01 < ** < 0.05$$

Then, $p < 0.05$ was adopted as a statistically significant level in this study.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Seasonal variations of Water Quality Parameters

Figure 2 presents the variation of water temperature, DO, pH, and turbidity, which were measured from 13:20 to 14:10. All numeric data are presented in Table A2 in Appendix 3. The

water temperature of each site presented similar seasonal fluctuation with the temperature range between 28°C and 34°C. The observed dissolved oxygen (DO) between 10.2 mg/L and 19.9 mg/L was apparently over the saturation level in consideration with the water temperature. The high DO value means high photosynthetic activity [20, 21]. In this survey, we observed a high pH value between 8.7 and 10.8, and it also indicated the high activity of the phytoplankton photosynthesis [20, 21]. Chl-a showed monthly fluctuation between 97 µg/L and 417 µg/L in concentration at four observation sites as illustrated in Figure 3 (and see Table A3 in Appendix 3). The lowest value of Chl-a was observed in September and the highest value was recorded on the 1st of June. A positive correlation between DO and Chl-a as a surrogate of phytoplankton biomass was expected, but Pearson's correlation was a negative value ($r = -0.593$, $p < 0.01$). This result suggested that much organic matter, produced by phytoplankton, could be degraded by active bacteria which consumed a lot of DO. Especially, Chl-a in June 2019 showed the noticeable raising, as illustrated in Figure 3. However, the DO showed the decrement. The climate condition was rain at this time (see Table A1 of Appendix 1), then the turbidity value was the highest value of 95 F.T.U, as shown in Figure 2(d). Thus, the DO was dropped because the low light condition limits the photosynthetic activity. On the other hand, as the turbidity has a clear positive correlation with Chl-a ($r = 0.686$, $p < 0.001$), it was suggested that the significant part of the changes of the turbidity depended on the phytoplankton growth.

The marker IP shown in the map of Figure 1 indicates the inlet points. In this survey, we frequently saw that the grey or black colored water flowed into the lake at these inlet points during the rainy season. The northern part of the basin of the lake is a commercial area where many restaurants and hotels have been operated. The wastewater from these buildings has flowed into the lake without any treatment, according to the information of the Yangon City Development Committee (YCDC). The untreated wastewater flowing from the drainage channels to the inlet points in the lake during the rainy season was involved in the nutrient loading. On the other hand, as the rain was very few in cool-season and summer season, we never saw the flowing water in the drainage channels. Nevertheless, the

increments of TN and TP of the lake water in the rainy season were not so clear as shown in Figure 4(a-b). It is difficult to discuss further the sources of nutrients N and P to the lake until hydrological and hydraulic studies will be conducted. Thus, we used TN and TP as the surrogates of comprehensive nutrients N and P loads according to a common technique in limnology [21]. TN was varied between 1.6 mg-N/L and 3.2 mg-N/L as illustrated in Figure 4 (see Table A2 in Appendix 3). The average TN: TP ratio of 3.9 was calculated from Table A2. The variation pattern of TN was similar to the Chl-a. However, the temporal change of TP ranged from 0.20 mg-P/L to 0.87 mg-P/L and did not show a clear correspondence with changes in Chl-a.

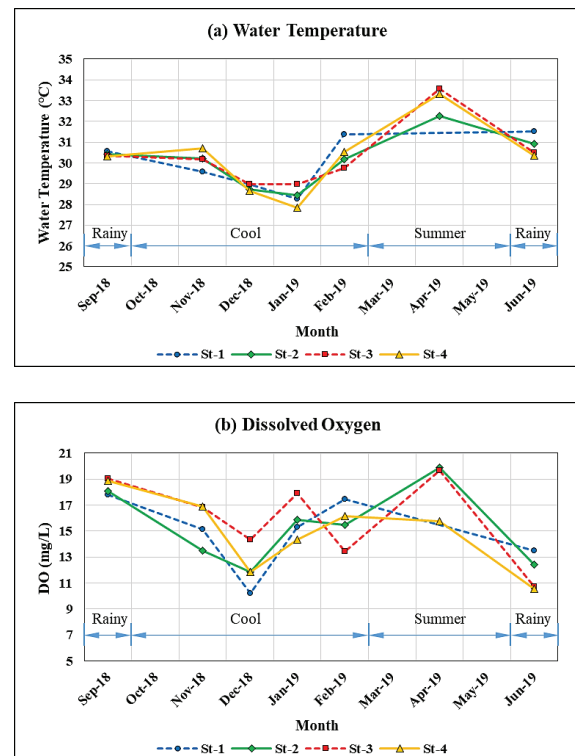


Figure 2 (a-d) Seasonal variations of water quality parameters

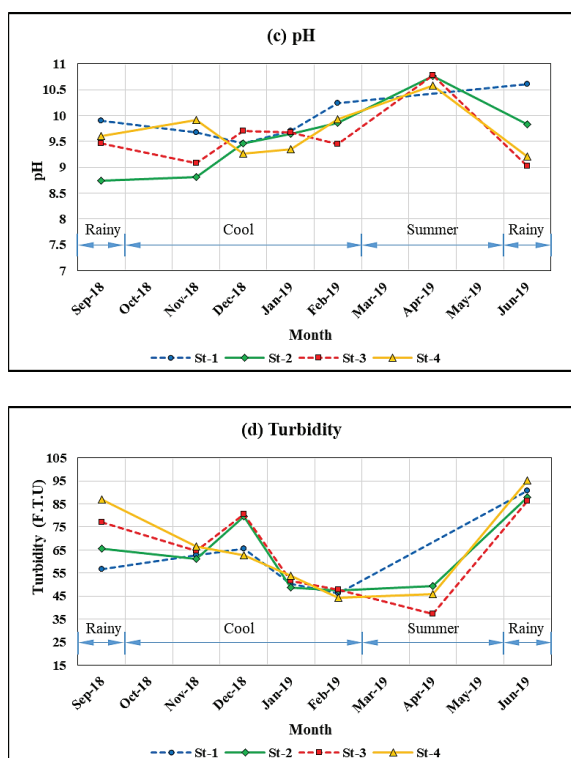


Figure 2 (cont) (a-d) Seasonal variations of water quality parameters

Linear model analysis was used to clarify the effect of temperature and nutrients N and P for the change of Chl-a. Here, TN, TP, temperature, and Chl-a were logarithmically converted. Besides, the respective z-score was calculated to compare the effect of TN, TP and temperature from the magnitude of each regression coefficient (see Appendix 2) [18]. The summary result of the linear model is presented in Table 2. In model 1, the coefficient of z-log (TN) was more significant than the others, and the p-value less than 0.1 was calculated. Therefore, it was thought that TN relatively affected the Chl-a despite statistically no significant of the linear model ($p = 0.169$).

On the other hand, the effects of z-log (TP) and water temperature were not completely significant. Selecting only z-log (TN) as explanatory variables, the AIC value for the regression decreased as shown in model 2 of Table 2 [19]. It means that TN mainly affected to the increment of phytoplankton biomass (Chl-a). Thus, it was suggested that the limiting factor for the growth of the phytoplankton was nitrogen (N) in Kandawgyi Lake.

Moreover, the fact that TN: TP ratio of the lake water was 3.9 confirms that the lake was the nitrogen limitation state [22, 23]. In such cases, it

is preferable to calculate the trophic state index (TSI) from the average value of not TP but Chl-a shown in Table A2. As a result, a value of 83 was obtained as TSI of Kandawgyi Lake. This value completely indicated that the lake was a hypereutrophic state [24].

3.2 Seasonal variations of microcystin variants

Three MC variants, MC-RR, MC-YR and MC-LR were detected in each site during the observation period. The order of the averaged concentration of MC variants was MC-RR (24.5 $\mu\text{g/L}$), MC-LR (7.3 $\mu\text{g/L}$) and MC-YR (4.3 $\mu\text{g/L}$) (see Table A2 in Appendix 3). Figure 5 illustrated the fluctuations of the total of the three MCs at each site, respectively. Whereas the changes of Chl-a at the four observation sites almost synchronized, MCs fluctuated with the different patterns among the sites. Furthermore, the ratios among MC-RR, MC-YR and MC-LR showed the natural seasonal fluctuations at the four observation sites as illustrated in Figure 6(a-d). In particular, MC-RR was always the highest percentage in the three MCs except for in December 2018 at St-4 and April 2019 at St-1.

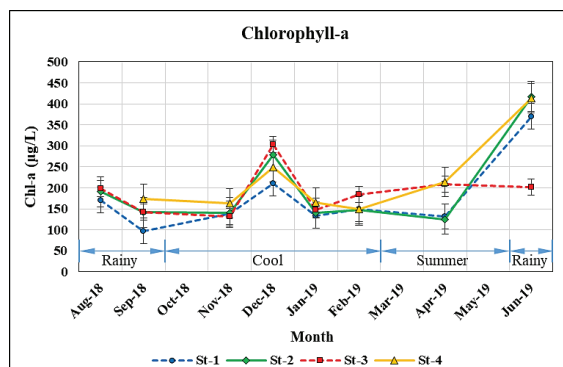


Figure 3 Seasonal variations of Chl-a

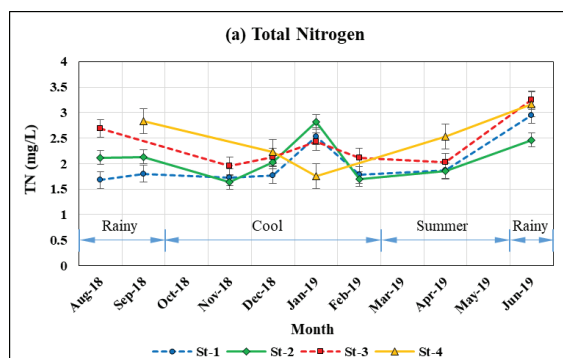


Figure 4 (a-b) Seasonal variations of TN and TP

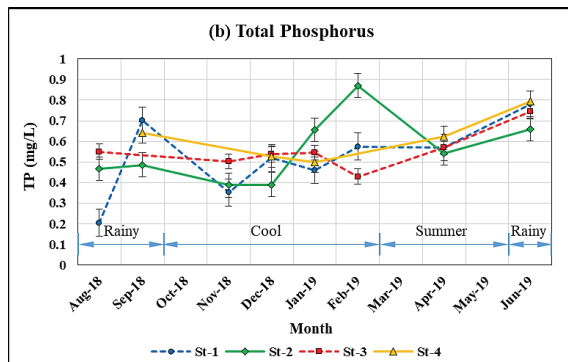


Figure 4 (cont) (a-b) Seasonal variations of TN and TP

Table 2 Linear models for Chl-a

Model 1. $\log\text{Chl-a} \sim z\text{-logTP} + z\text{-logTN} + z\text{-Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
$z\text{-log(TP)}$	0.007	0.046	0.158	0.876
$z\text{-log(TN)}$	0.082	0.045	1.831	0.084
$z\text{-Temp}$	0.009	0.027	0.315	0.757

F statistics: 1.88, p-value: 0.169, AIC: -10.862

Model 2. $\log\text{Chl-a} \sim z\text{-logTN}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
$z\text{-log(TN)}$	0.085	0.035	2.454	0.023*

F-statistic: 6.02, p-value: 0.023, AIC: -14.657

It was illuminated that MC-LR, which is more toxic than MC-RR and MC-YR [8], tended to show higher concentration in cool season and summer season as shown in Figure 6 (a-d). In order to clearly present the effect of temperature, Figure 7(a-c) illustrated each bar plot of the temperature effect on the concentration of MC-RR, MC-YR and MC-LR, respectively. The concentration of MC-RR was the highest in the temperature range of M ($29^{\circ}\text{C} \sim 31^{\circ}\text{C}$). MC-YR and MC-LR showed the highest concentration in the temperature range of L ($<29^{\circ}\text{C}$). However, all three MC variants showed the lowest concentration in the temperature range of H ($>31^{\circ}\text{C}$). It is thought that nutrients N and P affect MC production cyanobacteria [9, 10].

Thus, three explanatory variables TN, TP and water temperature were selected for the linear model analysis in order to elucidate the influencing factors on the change of the concentration of each MC variant in the lake. Here, $z\text{-log(TN)}$ and $z\text{-log(TP)}$ were used as well as the linear model analysis for Chl-a. The objective variables, MC-RR, MC-YR, and MC-LR were also logarithmically converted. In addition, the water temperature was converted to

a category variable using the same categorization in Figure 7. Then, the model selection method based on AIC was again applied to find a better model [19]. In Table 3(a-c), the results of the linear model analysis on MC-RR, MC-YR, and MC-LR were presented. Table 3(a) showed that water temperature within the range of M ($29 \sim 31^{\circ}\text{C}$) has a significant positive effect on MC-RR concentration though both TN and TP were no contribution factors.

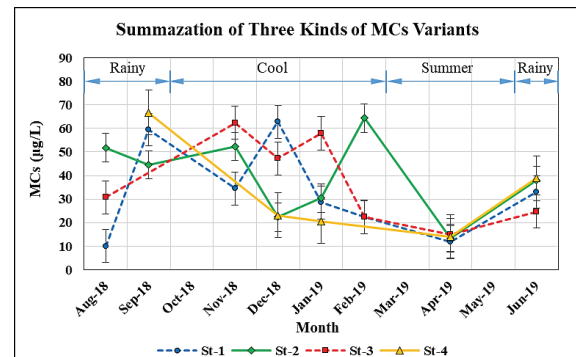


Figure 5 Seasonal variations of microcystin concentration at four observation sites

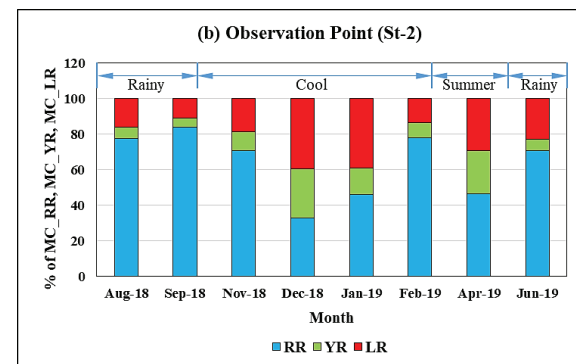
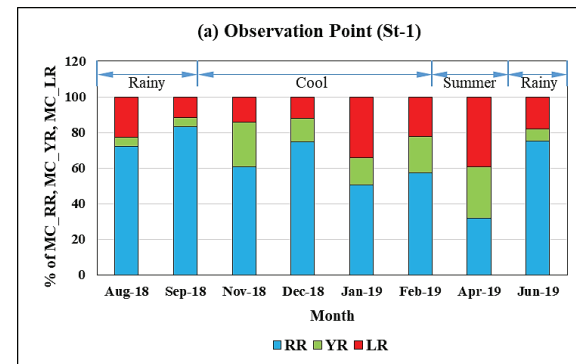


Figure 6 (a-d) Spatial and Temporal Changes of RR, YR&LR (%)

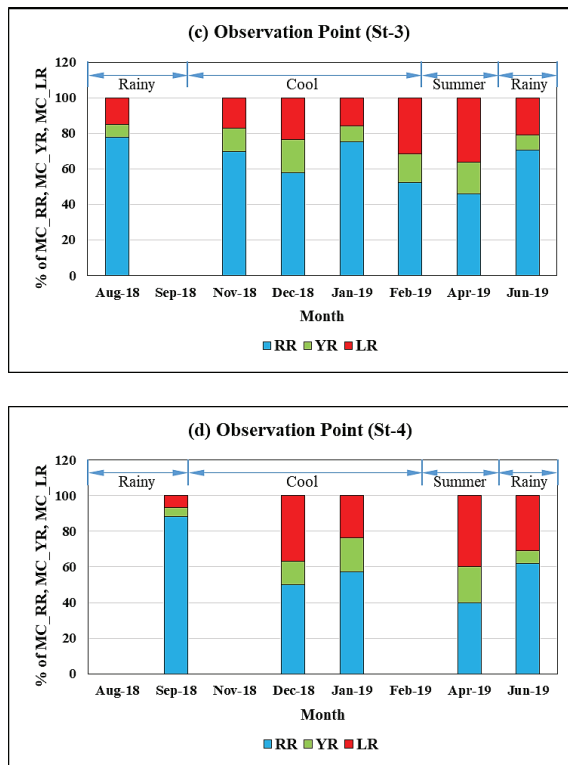


Figure 6 (cont) (a-d) Spatial and Temporal Changes of RR, YR&LR (%)

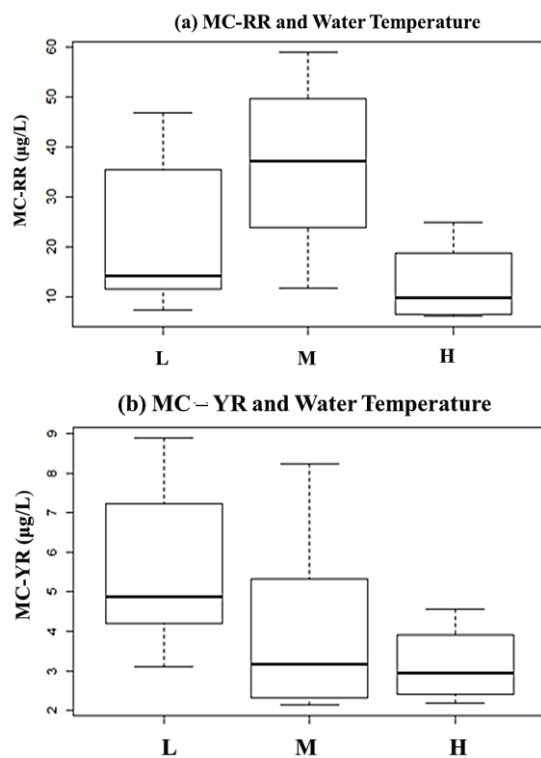


Figure 7 (a-c) Effect of water temperature on MC variants, L: water temperature <29°C, M: 29°C < water temperature <31°C, H: water temperature >31°C

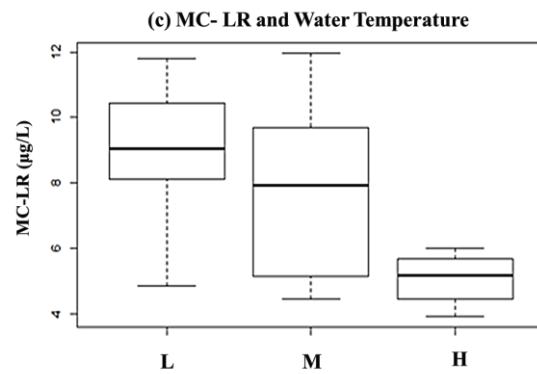


Figure 7 (cont) (a-c) Effect of water temperature on MC variants, L: water temperature <29°C, M: 29°C < water temperature <31°C, H: water temperature >31°C

As presented in Table 3(b-c), the water temperature of the range of L significantly affected MC-YR and MC-LR in concentration. According to recent researches, it was found that MC production ability per cell decreased as the temperature increased [25, 26]. The result was consistent with our results. However, in another research, MCs production increased with the high temperature (32°C) in the non-axenic culture of *Microcystis aeruginosa* [26]. In contrast, the opposite result was obtained about the axenic culture [27]. Since the non-axenic condition is a natural condition for the lake water, it seemed that this result didn't support our survey results. In addition, we need to consider the seasonal succession of several toxic cyanobacteria species in a natural lake. Each strain in toxin-producing *Microcystis sp.* is known to produce different amounts of MC variants [28, 29].

Furthermore, a result from survey research in England elucidated that the ratios among MC variants produced from four toxic cyanobacteria species (*Microcystis sp.*, *Oscillatoria sp.*, *Anabaena sp.*, and *Aphanizomenon sp.*) were different each other [30]. Therefore, it was reasonably thought that the observed variation of the ration among MC variants could be due to the seasonal succession of toxic cyanobacteria species. Changes of the nutrients N and P generally relate to the species succession in the lake ecosystem [29]. However, no significant contributions ($p>0.05$) of both TN and TP for MCs were clearly found in Table 3(a-c). It is well known that the low N:P ratio is a favorable condition for the growth of *Microcystis sp.* [23].

Nevertheless, the effect of P can be saturated because Kandawgyi Lake is in the hypereutrophic state with a very low N:P ratio of 3.9.

On the other hand, we already elucidated that N loading promoted the increment of the biomass of phytoplankton in this lake, and the temperature effect on the growth of phytoplankton was not significant. Besides, the result of the linear model analysis suggested that the composition of toxic cyanobacteria species, which related the composition of MC variants, was determined by not nutrients N and P but temperature. This finding is not only interesting from the viewpoints of limnology but also important from the viewpoints of lake water quality management because the changes of toxic cyanobacteria and MC variants composition directly linked to the safe of the lake water as already mentioned [9, 10, 11]. In a further study, we need to directly clarify the seasonal variation of species composition of toxic cyanobacteria [30].

Table 3 Results of the linear model analysis for MC variants.

(a) Linear models for MC-RR

Model 1: $\log\text{MC-RR} \sim z\text{-logTN} + z\text{-logTP} + \text{Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
z-logTN	0.012	0.074	0.161	0.874
z-logTP	-0.049	0.077	-0.644	0.528
Temp-L	0.191	0.175	1.091	0.291
Temp-M	0.474	0.161	2.941	0.009**

F-statistic: 2.53, p-value: 0.078 AIC = 11.303

Model 2. $\log\text{MC-RR} \sim \text{Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
Temp-L	0.223	0.159	1.402	0.177
Temp-M	0.474	0.154	3.079	0.006**

F-statistic: 5.24, p-value: 0.015 AIC = 7.927

(b) Linear models for MC-YR

Model 1. $\log\text{MC-YR} \sim z\text{-logTN} + z\text{-logTP} + \text{Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
z-logTN	-0.059	0.036	-1.655	0.116
z-logTP	-0.070	0.038	-1.866	0.079
Temp-L	0.211	0.086	2.464	0.025*
Temp-M	0.083	0.079	1.059	0.304

F-statistic: 6.65, p-value: 0.002 AIC = -20.294

Table 3 (cont) Results of the linear model analysis for MC variants.

Model 2. $\log\text{MC-YR} \sim \text{Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
Temp-L	0.238	0.105	2.263	0.036*
Temp-M	0.065	0.102	0.637	0.532

F-statistic: 3.38, p-value: 0.056 AIC = -10.264

(c) Linear models for MC-LR

Model 1. $\log\text{MC-LR} \sim z\text{-logTN} + z\text{-logTP} + \text{Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
z-logTN	0.029	0.036	0.805	0.432
z-logTP	-0.043	0.038	-1.139	0.270
Temp-L	0.209	0.085	2.445	0.026*
Temp-M	0.167	0.078	2.132	0.048*

F-statistic: 2.56, p-value: 0.077 AIC = -20.323

Model 2. $\log\text{MC-LR} \sim \text{Temp}$

Variable	Estimate	SE	t-value	p
Temp-L	0.241	0.079	3.030	0.007**
Temp-M	0.172	0.077	2.238	0.037*

F-statistic: 4.61, p-value: 0.023 AIC = -22.673

Estimate of categorical variable Temp = L (M) shows an additive effect for each objective variable measured from the effect at Temp = H [25].

Moreover, it was thought that the variations of MC variants among the four sites could be involved by the low mixing condition of the lake water. The differences of MC variants among the four sites, of course, indicated the differences of the community of toxic cyanobacteria among the sites as already discussed. The four observation sites in Figure 1 were expected to show the averaged and representative dynamic character about the water quality parameters because the sites were apart from each inlet point (IP) of the drainage channels as nutrients sources (see Figure 2 and Figure 3). However, the seasonal variation of MC variants resulted from the seasonal succession of toxic cyanobacteria, was almost independently caused at each site despite the continuous water body among the sites as shown in Figure 5. This is another significant finding in this study. Hence, it is important to monitor the safeness of lake water with sufficient frequency and observation points, in case of lakes with a low degree of water mixing such as Kandawgyi Lake. Of course, preliminary

hydrological and hydrological studies are a prerequisite for the optimal determination of location and frequency.

4. CONCLUSIONS

The seasonal variation of water quality parameters and microcystin (MC) concentration in the Kandawgyi Lake were studied. The lake was identified in the hypereutrophic state due to the very high Chl-a of 196 µg/L on average, and in the N-limitation state with the lower N:P ratio of 3.9. MC concentration was quantified for the lake water samples at each site, and three MC variants MC-RR, MC-LR and MC-YR were detected. The order of the averaged concentration of MC variants was MC-RR (24.5 µg/L), MC-LR (7.3 µg/L) and MC-YR (4.3 µg/L). Each concentration of MC variants was depended on not TN and TP but temperature, though Chl-a, as a surrogate of phytoplankton biomass, was affected by not temperature but TN. In particular, the lower concentration of three MC variants was measured in higher temperature conditions

(>31°C). Moreover, the variations of MC variants among the sites could be involved by the low mixing condition of the lake water, because it was thought that the seasonal changes of MC variants were due to the succession of toxic cyanobacteria independent in each site.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors sincerely appreciate to Yangon City Development Committee (YCDC), because they permitted our survey and access for several unpublished information on Kandawgyi Lake and the basin. Moreover, we sincerely acknowledge international research team members who supported to collect the water samples and experimental works in this study. Also, we would like to thank our friend Dr. Rameshprabu Ramaraj, for valuable comments and English grammatically collections.

This work is as part of the Ph.D. study, and the authors gratefully acknowledge the Japanese Government (Monbukagakusho: MEXT) scholarship organization.

REFERENCES

- [1] Yunlonga, S., Jinsonga, Z., Jiab, Z., Lic, W., Aiminc, C., and Yid, T. Spatial and Temporal Variations of Water Quality and Trophic Status in Xili Reservoir: a Subtropics Drinking Water Reservoir of Southeast China. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017; 100(1).
- [2] Soe, P. E. Study on the Eutrophication Status of Kandawgyi Lake, Yangon Technological University, Master Thesis, 2013.
- [3] Cuvin-Aralar, M. L., Fastner, J., Focken, U., Becker, K. and Aralar, E. V. Microcystins in Natural Blooms and Laboratory Cultured *Microcystis Aeruginosa* from Laguna de Bay, Philippines. *Systematic and Applied Microbiology*, 2002; 25(2): 179-182.
- [4] Jacoby, J. M., Collier, D. C., Welch, E. B., Harby, F. J. and Caryton, M. Environmental Factors Associated with a Toxic Bloom of *Microcystis Aeruginosa*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 2000; 57: 231-240.
- [5] Joung, S. H., Oh, H. M., Ko, S. R. and Ahn, C. Y. Correlations Between Environmental Factors and Toxic and Non-Toxic Microcystis Dynamics During Bloom in Daechung Reservoir, Korea. *Harmful Algae*, 2011; 10: 188-193.
- [6] Lee, T. A., Rollwagen-Bollens, G., Bollens, S. M. and Faber-Hammond, J. J. Environmental Influence on Cyanobacteria Abundance and Microcystin Toxin Production in a Shallow Temperate Lake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015; 114: 318-325.
- [7] De Figueiredo, D. R., Azeiteiro, U. M., Esteves, S. M., Goncalves, F. J. M. and Pereira, M. J. Microcystin-Producing Blooms—A Serious Global Public Health Issue. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004; 59: 151-163.
- [8] Gupta, N., Pant, S. C., Vijayaraghavan, R. and Rao, P. V. L. Comparative Toxicity Evaluation of Cyanobacterial Cyclic Peptide Toxin Microcystin Variants (LR, RR, YR) in Mice. *Toxicology*, 2003; 188: 285-296.
- [9] Xie, L. Q., Xie, P. and Tang, H. J. Enhancement of Dissolved Phosphorus Release from Sediment to Lake Water by Microcystis Blooms—An Enclosure Experiment in a Hyper-Eutrophic, Subtropical Chinese Lake. *Environmental Pollution*, 2003; 122: 391-399.

- [10] Xie, L. Q., Xie, P., Li, S. X., Tang, H. J. and Liu, H. The Low TN: TP Ratio, A Cause, or a Result of Microcystis Blooms?. *Water Research*. 2003; 37: 2073–2080.
- [11] Prommana, R., Peerapornpisal, Y., Whangchai, N., Morrison, L. F., Metcalf, J. S., Ruangyuttikarn, W., Towpoma, A. and Codd, G. A. Microcystins in Cyanobacterial Blooms from Two Freshwater Prawn (*Macrobrachium Rosenbergii*) Ponds in Northern Thailand. *Science Asia*, 2006; 32: 365-370.
- [12] American Public Health Association. In Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 20th Eds, APHA: Washington, DC, 1998.
- [13] Saijo, Y. Methods for the Quantitative Determination of Chlorophyll. *Journal of Limnology*, 1975; 36: 103–109.
- [14] Fastner, J., Codd, G. A., Metcalf, J. S., Wölk, P., Wiedner, C., Utkilen, H. An International Comparison Exercise for the Determination of Purified Microcystin-LR and Microcystins in Cyanobacterial Field Material. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2002; 374: 437–444.
- [15] Lawton, L., Edwards, C. and Codd, G. A. Extraction and High-Performance Liquid Chromatographic Method for the Determination of Microcystins in Raw and Treated Waters. *The Analyst*, 1994; 119: 1525–1530.
- [16] Meriluoto, J. and Codd, G. A. Toxic Cyanobacterial Monitoring and Cyanotoxin Analysis. Abo Akademi University Press, Abo, Finland, 2005; 149.
- [17] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017. [online] available: <https://www.R-project.org/>.
- [18] Kleinbaum, D. G., Kupper, L. L., Muller, K. E. and Nizam, A. Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods. 3rd Edition, Duxbury Press, Toronto, 1998.
- [19] Parzen, E., Tanabe, K. and Kitagawa, G. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. Springer, New York, 1998; 199-215.
- [20] Stumm, W. and Morgan, J. J. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. 3rdEds, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [21] Wetzel, R. G. Limnology: Lake and River Ecosystems, 3rdEds, Academic Press, 2001.
- [22] Sakamoto, M. Primary Production by Phytoplankton Community in Some Japanese Lakes and Its Dependence on Lake Depth. *Journal of Arch Hydrobiology*, 1966; 62: 1–28.
- [23] Simith, V. H. The Nitrogen and Phosphorus Dependence of Algal Biomass in Lakes: An Empirical and Theoretical Analysis. *Limnology and Oceanography*, 1982; 27(6): 1101-1112.
- [24] Carlson R E. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, vol. 1977; 22(2): 361–369.
- [25] Bui, T., Dao, T. S., Vo, T. G. and Lurling, M. Warming Affects Growth Rates and Microcystin Production in Tropical Bloom-Forming Microcystis Strains. *Toxins*, 2018; 10(3): 123.
- [26] Peng, G., Martin, R. M., Dearth, S. P., Sun, X., Boyer, G. L., Campagna, S. R., Lin, S. and Wilhelm, S. W. Seasonally Relevant Cool Temperatures Interact with N Chemistry to Increase Microcystins Produced in Lab Cultures of *Microcystis Aeruginosa* NIES-843. *Environmental Science & Technology*, 2018; 52 (7): 4127–4136.
- [27] Dziallas, C., Grossart, H. P. Increasing Oxygen Radicals and Water Temperature Select for Toxic *Microcystis* sp. *Plos One*, 2011; 6(9).
- [28] Su, X., Xue, Q., Steinman, A. D., Zhao, Y. and Liqiang Xie, L. Spatiotemporal Dynamics of Microcystin Variants and Relationships with Environmental Parameters in Lake Taihu. China, *Toxins*, 2015; 7 (8): 3224-3244.
- [29] Watanabe, M. F., Oishi, S., Harda, K., Matsuura, K., Kawai, H. and Suzuki, M. Toxins Contained in *Microcystis* Species of Cyanobacteria (Blue-Green Algae). *Toxicon*, 1988; 26(11): 1017-1025.
- [30] Andrew, D. T., Monika, D.-R., Alison, O. N., Coates, L., Lewis, A., and Katy, K. Analysis of Microcystins in Cyanobacterial Blooms from Freshwater Bodies in England. *Toxins*, 2018; 10(39).

APPENDIX

Appendix 1

Table A1 Weather Conditions at Observation Date

Date	Maximum Air Temp(°C)	Minimum Air Temp(°C)	Rainfall (mm)	Remarks
18/08/2018	31	22	3	Rain
21/09/2018	32.2	19.5	12	Rain
11/11/2018	32.5	20	11	Rain
15/12/2018	31.6	18.5	0	Cloudy
13/01/2019	33	19.2	0	Fair
25/02/2019	35.8	19.5	0	Fair
06/04/2019	39.2	20.5	0	Fair
01/06/2019	33.3	26	1	Rain

Appendix 2

z-score of valuable X

$$z - X = \frac{X - \text{mean}(X)}{SD(X)}$$

z-score of logarithmic transformed valuable X

$$z - \log(X) = \frac{\log(X) - \text{mean}(\log(X))}{SD(\log(X))}$$

where mean(X) shows the average and SD(X) shows the standard deviation.

Appendix 3

Table A2 Overall mean and standard deviation of water temperature, Chl-a, TN, TP and MCs

Variables	Mean±SD
Water Temperature (°C)	30.2±1.41
Chl-a (µg/L)	196.3±82.9
Turbidity (F.T.U)	64.39±17.4
TN (mg-N/L)	2.21±0.48
TP (mg-P/L)	0.56±0.14
MC-RR (µg/L)	24.5±16.3
MC-YR (µg/L)	4.3±2.3
MC-LR (µg/L)	7.3±2.6

Table A3 Measurement Data of Water Temperature, TN, TP, Chl-a, MC-RR, MC-YR and MC-LR

Notice: N.A (data not available)

Month	Sites	Water Temp. (°C)	TN (mg-N/L) Mean±SD	TP (mg-P/L) Mean±SD	Chl-a (µg/L) Mean±SD	Turb. (F.T.U.)	MC-RR (µg/L)	MC-YR (µg/L)	MC-LR (µg/L)
Aug	St-1	N.A	1.68±0.05	0.20±0.07	171.0±3.1	N.A	7.28	0.54	2.28
	St-2	N.A	2.12±0.09	0.47±0.03	191.1±6.2	N.A	40.13	3.31	8.33
	St-3	N.A	2.69±0.04	0.55±0.01	198.6±9.1	N.A	24.00	2.18	4.62
	St-4	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Sep	St-1	30.56	1.80±0.06	0.70±0.32	97.3±9.1	56.76	49.56	2.97	6.89
	St-2	30.43	2.13±0.08	0.49±0.02	141.7±6.1	65.61	37.29	2.33	4.86
	St-3	30.35	N.A	N.A	141.6±1.2	77.04	N.A	N.A	N.A
	St-4	30.31	2.83±0.16	0.64±0.02	173.7±4.2	87.05	58.87	3.36	4.45

Table A3 (cont) Measurement Data of Water Temperature, TN, TP, Chl-a, MC-RR, MC-YR and MC-LR

Notice: N.A (data not available)

Month	Sites	Water Temp. (°C)	TN (mg-N/L) Mean±SD	TP (mg-P/L) Mean±SD	Chl-a (µg/L) Mean±SD	Turb. (F.T. U.)	MC-RR (µg/L)	MC-YR (µg/L)	MC-LR (µg/L)
Nov	St-1	29.57	1.73±0.14	0.35±0.01	138.7±1.3	62.63	20.91	8.67	4.89
	St-2	30.22	1.64±0.11	0.39±0.00	141.1±2.1	61.15	37.05	5.60	9.69
	St-3	30.16	1.77±0.07	0.50±0.02	132.1±2.1	64.54	43.37	8.24	10.70
	St-4	30.70	N.A	N.A	163.3±0.7	66.40	N.A	N.A	N.A
Dec	St-1	28.98	2.03±0.12	0.52±0.01	210.7±67.2	65.73	46.86	8.24	7.71
	St-2	28.72	2.13±0.31	0.39±0.01	277.7±1.2	79.50	7.32	6.22	8.76
	St-3	28.99	1.95±0.14	0.54±0.06	302.2±22.5	80.61	27.23	8.88	11.17
	St-4	28.65	2.23±0.03	0.53±0.01	248.0±7.9	62.68	11.59	3.10	8.52
Jan	St-1	28.27	2.53±0.17	0.46±0.02	134.1±0.0	50.38	14.42	4.40	9.71
	St-2	28.44	2.82±0.08	0.66±0.00	140.3±1.1	48.74	13.96	4.62	11.81
	St-3	28.98	2.43±0.39	0.55±0.02	147.1±4.2	51.63	43.48	5.12	9.30
	St-4	27.86	1.76±0.14	0.50±0.00	165.6±5.0	53.96	11.73	4.00	4.84
Feb	St-1	31.38	1.78±0.12	0.57±0.01	149.7±21.6	46.33	12.76	4.56	4.99
	St-2	30.17	1.69±0.42	0.87±0.01	147.1±1.3	47.33	50.32	5.34	8.73
	St-3	29.74	2.12±0.18	0.43±0.02	184.1±7.4	47.72	11.70	3.63	7.13
	St-4	30.54	N.A	N.A	149.5±4.0	44.37	N.A	N.A	N.A
April	St-1	N.A	1.86±0.07	0.57±0.01	132.1±54.7	N.A	3.76	3.46	4.68
	St-2	32.26	1.86±0.05	0.54±0.01	125.5±14.8	49.28	6.25	3.25	3.92
	St-3	33.57	2.03±0.29	0.57±0.02	209.3±38.7	37.28	6.80	2.64	5.37
	St-4	33.32	2.53±0.60	0.62±0.17	213.9±4.66	45.82	5.56	2.90	5.55
June	St-1	31.50	2.95±0.51	0.78±0.02	370.3±231.4	90.78	24.89	2.18	5.98
	St-2	30.93	2.47±0.40	0.66±0.02	417.1±92.5	87.84	26.84	2.31	8.72
	St-3	30.51	3.24±0.35	0.75±0.02	202.0±128.1	86.41	17.39	2.15	5.14
	St-4	30.35	3.17±0.48	0.79±0.02	412.9±58.3	95.33	23.94	2.90	11.95

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของผลตอบสนองของอุโมงค์ แบบชิ้นส่วนประกอบเนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง Numerical Investigation of Responses of Tunnel Segmental Lining Due to Adjacent Loaded Pile

สมชาย จิราวัฒน์การ กฤษดา ตระกูลจันนาค พรเกษม จงประดิษฐ์*

Somchai Jirawattanakran, Kisada Trakoonjannak and Pornkasem Jongpradist*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology
Thonburi, Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

*E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th, Telephone Number: 0-2470-9305

บทคัดย่อ

บทความนี้วิเคราะห์ผลกระทบของเสาเข็มรับแรงต่อผลตอบสนองในอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบที่อยู่ข้างเคียง โดยให้ความสำคัญแก่การเปรียบเทียบระหว่างการจำลองอุโมงค์เป็นแบบผนังต่อเนื่องกับแบบชิ้นส่วนประกอบ และปัจจัยอิทธิพลต่างๆ โดยเฉพาะตำแหน่งชิ้นส่วนคีย์เซกเมนต์สัมพัทธ์กับตำแหน่งของปลายเสาเข็ม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าผลตอบสนองในอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบแตกต่างกับของอุโมงค์ที่จำลองแบบต่อเนื่อง โดยการเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีค่ามากกว่าการเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่องทั้งในขั้นตอนหลังการก่อสร้างและมีเสาเข็มรับแรงอยู่ด้านข้าง ในทางตรงกันข้ามแรงภายในของโครงสร้างผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีค่าน้อยกว่าแรงภายในโครงสร้างผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง พฤติกรรมดังกล่าวมีสาเหตุจากผลกระทบของข้อต่อ ส่งผลให้ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น นอกจากนี้ตำแหน่งของชิ้นส่วนคีย์เซกเมนต์ของผนังอุโมงค์ที่สัมพัทธ์กับตำแหน่งของปลายเสาเข็ม มีบทบาทสำคัญต่อการเสียรูปโดยรวม เฉพาะที่ และแรงภายในของผนังอุโมงค์

คำสำคัญ: ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วน เสาเข็ม อุโมงค์ ผลกระทบ

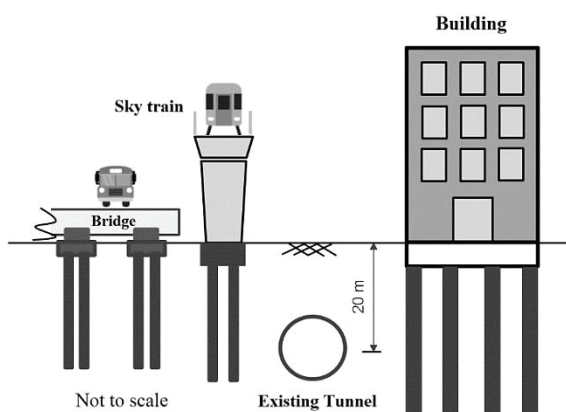
ABSTRACT

This present study analyses the impacts of pile under loading on the responses of existing tunnel segmental lining. The main focus is the comparison between modelling the tunnel as continuous and segmental linings. Key influencing parameters, particularly the relative position of key segment with respect to the pile tip, are also investigated. The results show that the responses of the segmental and continuous linings are different. The deformation of tunnel segmental lining is greater than that of the tunnel continuous lining, both after tunneling step and loaded pile step. By contrast, the structural forces of tunnel segmental lining are smaller than those of the tunnel continuous lining. The effects of segments and joints can be clearly seen. The joints result to the higher flexibility of the tunnel lining. Moreover, the positions of key segment of tunnel lining plays an important role on the overall and localized tunnel deformations as well as the distribution of structural forces.

Keyword: Segmental lining, pile, tunnel, impact

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การก่อสร้างใต้ดินได้รับความนิยมมากขึ้นตามความต้องการพื้นที่ในเขตชุมชนเมือง เช่นรากฐานของอาคารขนาดใหญ่ รากฐานของโครงสร้างคมนาคม และอุโมงค์สำหรับทั้งการขนส่งและสาธารณูปโภคต่างๆ ดังนั้นโครงสร้างเหล่านี้จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะก่อสร้างขึ้นในบริเวณใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 1 เนื่องจากการมีอยู่ของอุโมงค์ การก่อสร้างเสาเข็มใหม่ ในบริเวณใกล้เคียงอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอุโมงค์ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการก่อสร้างรากฐานที่ส่งผลกระทบต่อการเสียดรูปและแรงภายในของอุโมงค์จึงเป็นสิ่งสำคัญ การศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่อิทธิพลของการขุดอุโมงค์บริเวณใกล้เคียงกับโครงสร้างของเสาเข็มที่มีอยู่ [1-6] แต่การศึกษาค้นคว้าของอุโมงค์เนื่องจากผลกระทบของเสาเข็มรับแรงที่อยู่บริเวณข้างเคียงมีอยู่อย่างจำกัด การศึกษาผลกระทบของเสาเข็มในบริเวณใกล้เคียงต่ออุโมงค์เดิมที่มีอยู่เกือบทั้งหมดเป็นของโครงการก่อสร้างในลอนดอน [7-11] ถึงแม้การศึกษาเหล่านี้มีทั้งการตรวจวัดและการวิเคราะห์ แต่เป็นการพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นเฉพาะในแต่ละกรณี ไม่ได้ศึกษาถึงกลไกที่อยู่เบื้องหลังการปฏิสัมพันธ์ระหว่างเสาเข็ม-ดิน-อุโมงค์



รูปที่ 1 การก่อสร้างฐานรากบริเวณใกล้เคียงกับโครงสร้างอุโมงค์

กลไกและพฤติกรรมการเสียดรูปอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียงถูกตรวจสอบโดยละเอียดในงานวิจัยของ Lueprasert [12] ว่ากลไกหลักคือการเคลื่อนตัวของดินรอบๆ อุโมงค์ อย่างไรก็ตามยังคงพิจารณาผนังอุโมงค์โดยจำลองอุโมงค์เป็นลักษณะท่อต่อเนื่อง ในสภาพจริงผนังอุโมงค์ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนยึดติดด้วยข้อต่อ ในวงแหวนหนึ่งวงจะประกอบไปด้วย 6-8 ชิ้นส่วน ได้แก่ คีล์เซ็กเมนต์ 1 ชิ้น เซ็กเมนต์ที่อยู่ติดกับคีล์เซ็กเมนต์ 2 ชิ้น และเซ็กเมนต์มาตรฐาน 3-5 ชิ้น โดยชิ้นส่วนคีล์เซ็กเมนต์เป็นชิ้นส่วนที่เล็กที่สุดจึงกลายเป็นจุดที่วิกฤตของวงแหวนอุโมงค์

การศึกษาเมื่อไม่นานมานี้ ระบุว่าเมื่อพิจารณาผนังอุโมงค์เป็นแบบชิ้นส่วนประกอบและแบบต่อเนื่อง [13-15] การวิเคราะห์ในช่วงระหว่างการก่อสร้างจะทำให้พฤติกรรมการเสียดรูปของผนังอุโมงค์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการพิจารณาผนังอุโมงค์เป็นแบบต่อเนื่องในงานศึกษาที่ผ่านมาอาจไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นกับผนังอุโมงค์ที่ในความเป็นจริงเป็นแบบชิ้นส่วนได้เพียงพอ

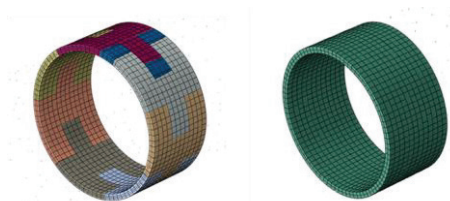
การศึกษานี้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงต่อผนังอุโมงค์ที่มีอยู่เปรียบเทียบกับพฤติกรรมของผนังอุโมงค์ระหว่างการจำลองเป็นแบบชิ้นส่วนประกอบและแบบต่อเนื่อง ตรวจสอบในแง่ของการเสียดรูปและแรงภายใน (โมเมนต์คดและแรงตามแนวแกน) นอกจากนี้พิจารณาผลกระทบของตำแหน่งของคีล์เซ็กเมนต์ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งปลายเข็มด้วย

2. วิธีการศึกษา

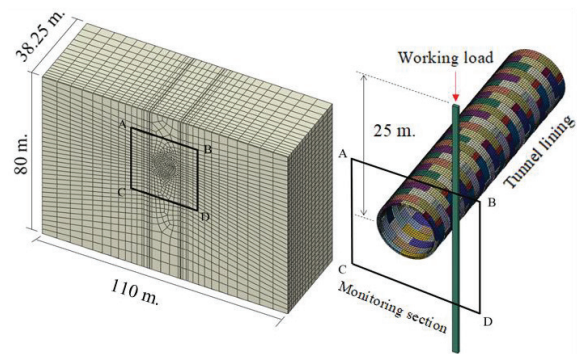
2.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้หลักการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element, FE) แบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาของ Blom [16] เป็นต้นแบบ และพิจารณาเสาเข็มอยู่ด้านข้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร รับแรงเท่ากับแรงที่ขอมให้ การวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ โดยส่วน

แรกเป็นการจำลองสภาพการขุดอุโมงค์ ในส่วนนี้เปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์และการตรวจวัดภาคสนาม [16] เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ ส่วนที่สองศึกษาผลกระทบของเสาเข็มรับแรงข้างเคียงต่อผนังอุโมงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของผนังอุโมงค์ที่จำลองต่างกัน โดยแบบจำลองของผนังอุโมงค์จะแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบและแบบต่อเนื่องดังแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งผนังอุโมงค์ทั้งสองแบบจะมีความหนาและคุณสมบัติเหมือนกัน โดยแบบจำลองของเสาเข็มคอนกรีตที่ใช้ในการพิจารณามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร จะถูกแปลงหน้าตัดของเสาเข็มเป็นเสาเข็มสี่เหลี่ยมที่มีขนาด 0.886×0.443 เมตร (เมื่อพิจารณาระนาบสมมาตร) เพื่อสะดวกต่อการขึ้นโครงตาข่าย (Mesh) ของแบบจำลอง โดยมีมิติของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความกว้าง 110 เมตร ($\approx 11.6D_T$) สูง 80 เมตร ($\approx 8.5D_T$) และ ลึก 38.25 เมตร ($\approx 4D_T$) ตามทิศทางแกน x, y, z ตามลำดับ เมื่อ D_T คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ซึ่งเท่ากับ 9.45 เมตร ซึ่งมีขอบเขตเงื่อนไขที่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ [17] โดยอาศัยหลักการระนาบสมมาตรดังรูปที่ 3 ความลึกจากผิวดินถึงจุดศูนย์กลางอุโมงค์ 25 เมตร ความยาวเสาเข็มแปรเปลี่ยนตามตำแหน่งปลายเสาเข็ม แม้ว่าการศึกษารั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของเสาเข็มเดี่ยวที่อยู่ด้านหนึ่งของอุโมงค์ แต่ก็จำเป็นต้องขึ้นจำนวนโครงตาข่ายทั้งสองด้านให้มีจำนวนโครงตาข่ายที่เท่ากันดังแสดงดังรูปที่ 3 เพื่อให้การกระจายตัวของแรงภายในในผนังอุโมงค์มีความสมมาตร



(ก) ผนังอุโมงค์แบบข้อต่อ (ข) ผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง
รูปที่ 2 ลักษณะแบบจำลองของผนังอุโมงค์



รูปที่ 3 ตัวอย่างแบบจำลอง FE 3 มิติในการวิเคราะห์

2.2 ชั้นดินและพารามิเตอร์ของวัสดุ

พฤติกรรมของอุโมงค์และเสาเข็มสมมติให้เป็นอีลาสติคเชิงเส้น ใช้ลักษณะชั้นดิน และค่าพารามิเตอร์ของอุโมงค์จากโครงการ Botlek Railway Tunnel (BRT) ประเทศเนเธอร์แลนด์ อ้างอิงจาก Blom [16] โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของอุโมงค์ [16]

Parameter	Value	Unit
External radius, r	4.725	m.
Lining thickness, d	0.4	m.
Young's modulus, E_c	40000	MPa
Ring width, w	1.5	m.
Poisson's Ratio, ν_c	0.2	-

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ชั้นดิน [16]

Parameter	Value	Unit
Unit weight of saturated soil, γ_{sw}	18	kN/m ³
Unit weight of unsaturated soil, γ_{sd}	16	kN/m ³
Unit weight of water, γ_w	10	kN/m ³
Elastic modulus, E_s	38	MPa
Poisson's Ratio, ν_s	0.3	-

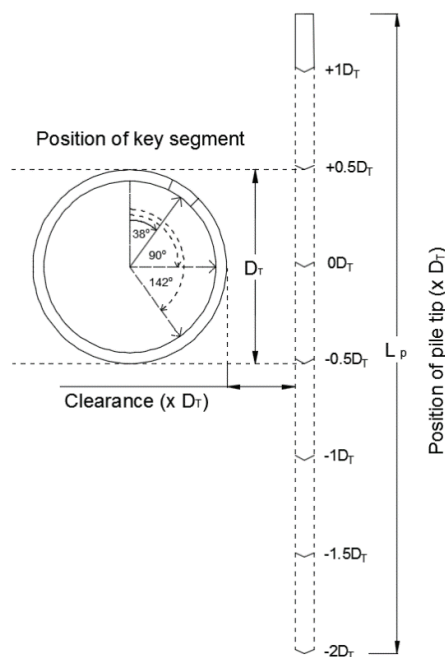
ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติวัสดุของเสาเข็ม [18]

Parameter	Values	Dimensions
Young's modulus, E_{cp}	30000	MPa
Unit weight of concrete, γ_c	24	kN/m ³
Poisson's Ratio, ν_c	0.2	-

พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการศึกษานี้ แสดงดังตารางที่ 4 ในการวิเคราะห์พิจารณาระยะห่างในแนวราบคงที่ แต่แปรเปลี่ยนตำแหน่งของปลายเสาเข็มระหว่าง $+1D_T$ ถึง $-2D_T$ (+ หมายถึงอยู่เหนือระดับ spring line และ - หมายถึงอยู่ใต้ระดับ spring line) เนื่องจากผลการศึกษา ก่อนหน้าพบว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มในช่วงดังกล่าว จะส่งผลกระทบต่อผนังอุโมงค์ [18] นอกจากนี้ สำหรับผนังอุโมงค์ส่วนประกอบ (แบบข้อต่อ) จะพิจารณา ตำแหน่งของชิ้นส่วนคีย์เซกเมนต์ที่วัดจากยอดอุโมงค์ (crown) ตามเข็มนาฬิกาเป็นมุม 38 90 และ 142 องศา ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวแปรอิทธิพลในการวิเคราะห์ของอุโมงค์ และเสาเข็มเดี่ยว

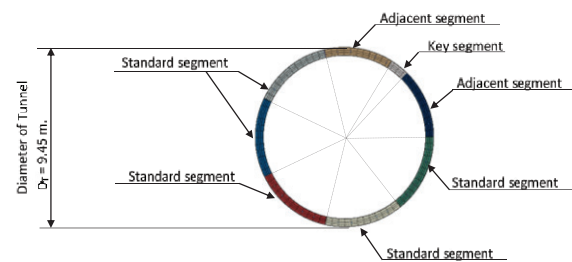
Parameter	Variation
Position of pile tip	$+1D_T$ to $-2D_T$
Clearance	$0.12D_T$
Position of key segment	$38^\circ, 90^\circ, 142^\circ$



รูปที่ 4 ตำแหน่งของคีย์เซกเมนต์และเสาเข็มข้างเคียง

สำหรับผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ (แบบข้อต่อ) จะประกอบไปด้วย 8 ชิ้นส่วนดังรูปที่ 5 และชิ้นส่วน

จะ ประกอบกันแบบ Stagger-jointed โดยมี Segmental joints และ Ring joints เชื่อมต่อ ด้วยปฏิสัมพันธ์แบบ Cartesian และพฤติกรรมเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นด้วยค่า stiffness, $k = 1 \times 10^5 \text{ N/mm}$ [16] สำหรับภายใต้แรงดึง และระหว่างชิ้นส่วนที่ติดกัน จำลองการถ่ายแรงแบบ Contact ภายใต้แรงอัดซึ่งประกอบไปด้วย 2 ทิศทาง คือทิศทางตั้งฉากให้พฤติกรรมแบบ Hard contact และแนวสัมผัสมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็น 0.4 โดยใช้คุณสมบัติจากการศึกษาก่อนหน้า [19] ทั้งนี้รายละเอียดปฏิสัมพันธ์ที่ใช้ในงานนี้แสดงใน Scientific Manual ของ ABAQUS [20]



รูปที่ 5 ตำแหน่งชิ้นส่วนประกอบของอุโมงค์

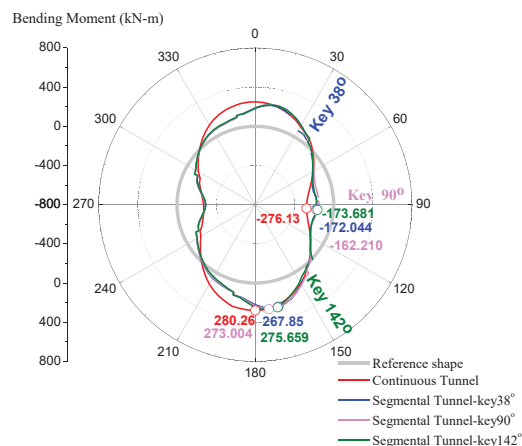
2.3 เงื่อนไขการวิเคราะห์

เนื่องด้วยวัตถุประสงค์คือตรวจสอบการตอบสนองของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง ขั้นตอนแรกจึงเป็นการจำลองสภาพความเค้นของดินก่อนที่จะมีเสาเข็ม หลังจากจำลองสภาพความเค้นในที่ดินแล้ว จำลองการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยการลบเอลิเมนต์ของดินในอุโมงค์ออกแล้วใส่เอลิเมนต์ของผนังอุโมงค์เข้ามา เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้ได้กำหนดให้การเคลื่อนตัวเท่ากับศูนย์เพื่อการเริ่มวัดค่าการเคลื่อนตัว ดังนั้นการเสียรูปของผนังอุโมงค์จึงเป็นผลจากเสาเข็มรับแรง (ในขั้นต่อไป) เท่านั้น อย่างไรก็ตามค่าแรงภายในไม่ได้กำหนดให้เริ่มต้นด้วยศูนย์ใหม่ ขั้นตอนที่สองคือการมีอยู่ของเสาเข็มและให้น้ำหนักกระทำตามแนวแกนต่อเสาเข็ม โดยให้น้ำหนักกระทำต่อเสาเข็มเท่ากับค่าแรงที่ใช้งาน (Working load)

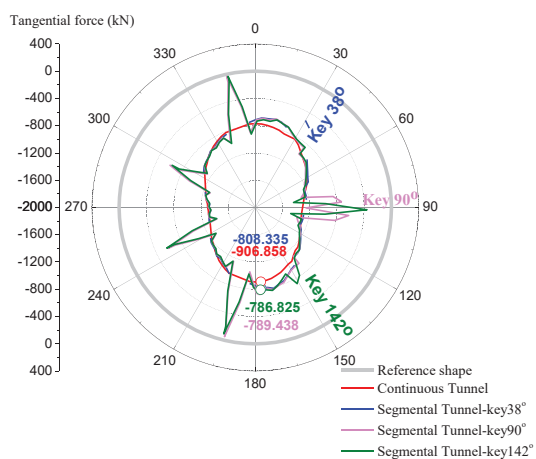
3. การวิเคราะห์และผลการศึกษา

3.1 ผลตอบสนองของผนังอุโมงค์ในขั้นตอนการก่อสร้าง

รูปที่ 6 แสดงค่าโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ทั้งสองแบบ ผลแสดงเป็นเส้นที่แยกออกเป็นส่วนๆ (ตำแหน่งของเส้นที่ไม่ต่อเนื่องบ่งบอกตำแหน่งของข้อต่อ) ในขณะที่เส้นที่มีความต่อเนื่องเป็นของของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์แสดงว่าการกระจายตัวของค่าโมเมนต์ดัดและค่าแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่องมีลักษณะสมมาตร ในขณะที่ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีการกระจายตัวแบบไม่สมมาตร เนื่องจากผลกระทบของข้อต่อ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Michael [21]



(ก) ค่าโมเมนต์ดัด



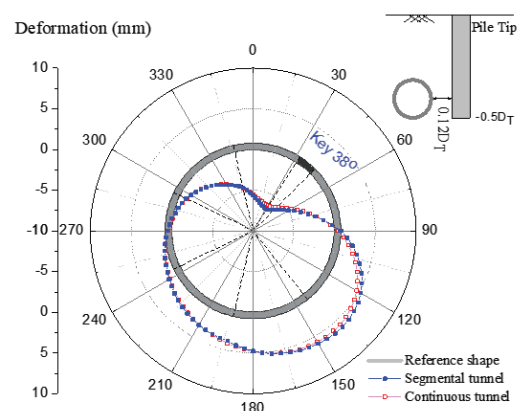
(ข) ค่าแรงตามแนวแกน

รูปที่ 6 แรงภายในของผนังอุโมงค์ในขั้นตอนการก่อสร้าง

นอกจากนี้ค่าโมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีค่าน้อยกว่าของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการมีข้อต่อจึงส่งผลทำให้ผนังอุโมงค์เกิดความยืดหยุ่นสูงกว่า ในขณะที่เดียวกันพบว่าผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบให้ค่าแรงตามแนวแกนน้อยกว่าผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง สามารถเห็นได้ชัดเจนที่ตำแหน่งส่วนยอด (crown) และส่วนล่าง (invert) ของอุโมงค์

3.2 ผลตอบสนองของผนังอุโมงค์ในขั้นตอนเสาเข็มรับแรง

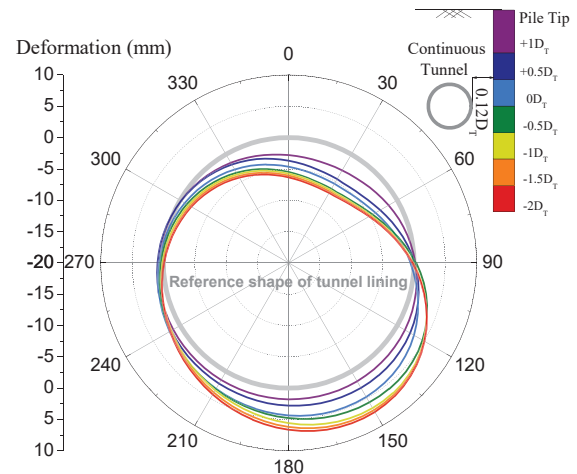
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบการเสียรูปของอุโมงค์เนื่องจากเสาเข็มรับแรงข้างเคียง โดยตำแหน่งของปลายเสาเข็มอยู่ต่ำกว่าแกนอุโมงค์เป็นระยะ 0.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอุโมงค์ ($-0.5D_T$) ลักษณะการเสียรูปของผนังอุโมงค์ทั้งสองรูปแบบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีการเสียรูปที่มากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ตำแหน่งส่วนด้านขวาของส่วนยอดอุโมงค์มีการเสียรูปเข้าภายในอุโมงค์และด้านขวาของอุโมงค์ส่วนล่างมีการเสียรูปออกภายนอกของอุโมงค์เมื่อเทียบกับรูปร่างเดิม สาเหตุที่ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีการเสียรูปโดยรวมมากกว่านั้น เกิดจากการมีข้อต่อ



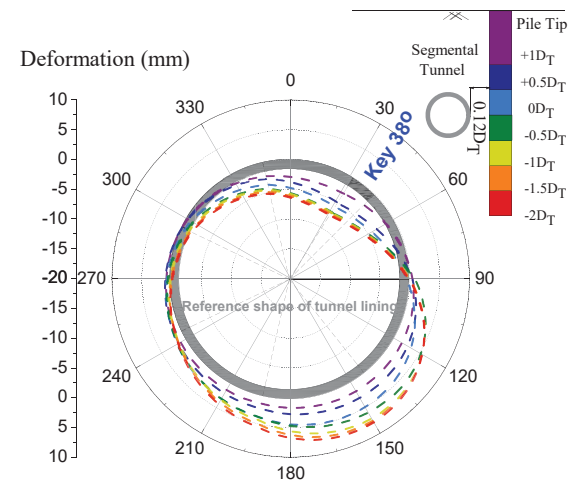
รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการเสียรูปของโครงสร้างผนังอุโมงค์ในขั้นตอนการใส่เสาเข็มรับแรง

การเสีรูปตามวงรอบของอุโมงค์จากเสาเข็มรับแรงที่ความยาวต่าง ๆ (รับน้ำหนักต่างกัน) สำหรับผนังอุโมงค์ทั้งสองรูปแบบและการมีตำแหน่งชั้นส่วนคีย์เช็กเมนต์ที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 8 โดยไม่พิจารณาการเสีรูปของอุโมงค์ในขั้นตอนการก่อสร้าง พบว่าการเคลื่อนที่และการบิดเบี้ยวของอุโมงค์มีลักษณะแบบไม่สมมาตรซึ่งสังเกตได้ชัดเจน รูปที่ 8(ก) แสดงการเสีรูปของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง และ 8(ข) สำหรับแบบชั้นส่วนประกอบ (กรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 38 องศา) เมื่อพิจารณากรณีปลายเสาเข็มต่างๆ พบว่าตำแหน่งส่วนด้านขวาของส่วนยอดอุโมงค์ (ด้านใกล้กับเสาเข็ม) เกิดการเคลื่อนที่ลงและยุบเข้าหาศูนย์กลางอุโมงค์ (หนีออกจากเสาเข็ม) ในขณะที่ตำแหน่งส่วนด้านขวาของอุโมงค์ส่วนล่างเกิดการเคลื่อนที่ลงและยืดหนีศูนย์กลางอุโมงค์ (เข้าหาเสาเข็ม) สำหรับด้านซ้ายของอุโมงค์ (ด้านที่อยู่ห่างจากเสาเข็ม) สังเกตได้ว่าการเคลื่อนที่ที่เพียงเล็กน้อย การเสีรูปของผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่อง รูปที่ 8(ก) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lueprasert [17] และแบบชั้นส่วนประกอบ รูปที่ 8(ข) มีลักษณะการเสีรูปเป็นวงรีหรือรูปไตที่มีแกนหลักเอียง และการเสีรูปของผนังอุโมงค์โดยรวมทั้งสองแบบมากขึ้นตามความลึกของปลายเสาเข็ม

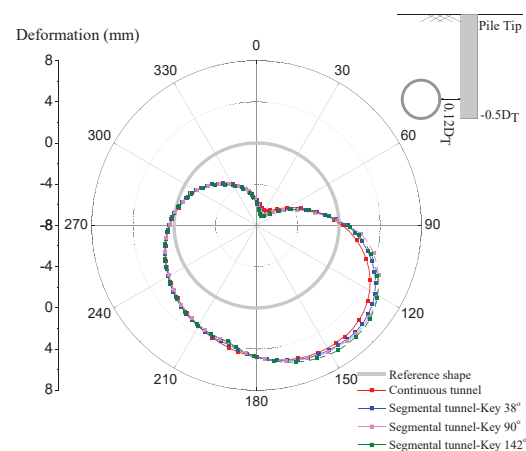
รูปที่ 8(ค) แสดงการเสีรูปของผนังอุโมงค์กรณีปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ $-0.5D_T$ จากรูปจะเห็นว่าลักษณะการเสีรูปของทุกกรณีมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน สังเกตได้ว่าผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบชั้นส่วนประกอบเกิดการเสีรูปแบบบิดตัวสูงสุด ที่ตำแหน่งประมาณ 150 องศา และการเสีรูปแบบหดตัวสูงสุด ที่ตำแหน่งประมาณ 30 องศา อย่างไรก็ตามเมื่อตรวจสอบอย่างละเอียดพบว่าผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบกรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา มีการเสีรูปโดยรวมมากที่สุด (การเสีรูปแบบบิดตัวและแบบหดตัว) และกรณีคีย์เช็กเมนต์ที่ 38 องศา มีการเสีรูปโดยรวมมากกว่า 90 องศา ทั้งนี้ในกรณีที่ตำแหน่งคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา ส่งผลให้คีย์เช็กเมนต์อยู่ใกล้ปลายเสาเข็ม ($-0.5D_T$) มากที่สุด



(ก) ผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง



(ข) ผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบ



(ค) ผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบชั้นส่วนประกอบ

ที่มีตำแหน่งของคีย์เช็กเมนต์ต่างกัน

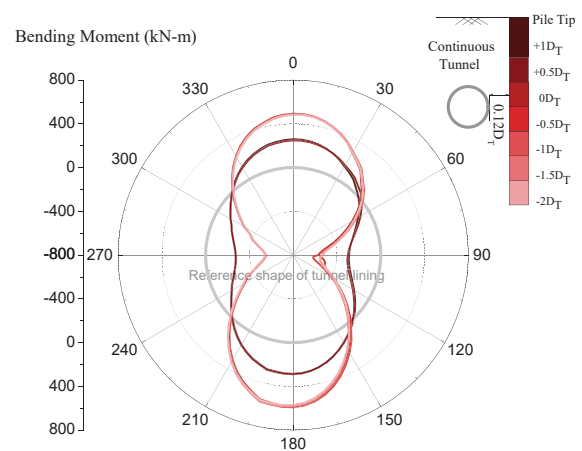
รูปที่ 8 การเสีรูปของผนังอุโมงค์ในขั้นตอน
เสาเข็มรับแรง

นอกจากนี้พบว่าสำหรับกรณีที่ตั้งตำแหน่งของปลายเสาเข็มเปลี่ยนไปเป็นตำแหน่งอื่น ทำให้พฤติกรรมการเสถียรของอุโมงค์แตกต่างกันไป เมื่อขึ้นส่วนคีย์เช็กเมนต์อยู่ใกล้กับตำแหน่งของปลายเสาเข็มส่งผลให้พฤติกรรมการเสถียรของผนังอุโมงค์แบบขึ้นส่วนประกอบมีค่าสูงสุดขึ้นขึ้นว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มกับขึ้นส่วนคีย์เช็กเมนต์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสถียรอุโมงค์

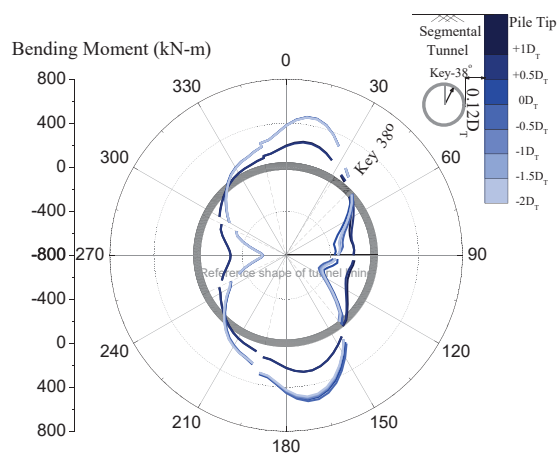
รูปที่ 9 แสดงถึงค่าโมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบขึ้นส่วนประกอบที่เกิดจากเสาเข็มรับแรง โดยพิจารณาถึงความยาวเสาเข็มต่าง ๆ (ให้น้ำหนักตามแนวแกนต่อเสาเข็มที่แตกต่างกัน) จากรูปจะเห็นว่าค่าโมเมนต์ดัดส่วนหลังคาและฐานอุโมงค์เป็นค่าบวก ในขณะที่ตรง spring line ทั้งสองฝั่งเป็นค่าลบ เมื่อเสาเข็มรับแรงยาวขึ้น (แรงที่รับมากขึ้นด้วย) ค่าโมเมนต์ทั้งบวกและลบมีค่ามากขึ้น (แบบไม่คิดเครื่องหมาย) เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่าเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ในช่วงเหนือ spring line การเปลี่ยนแปลงมีค่าเล็กน้อย การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเกิดขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ระดับ $0D_T$ (ระดับ spring line) และเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ลึกลงไปหลังจากนั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงแบบมีนัยยะอีกต่อไปดังแสดงในรูป 9(ก)

รูปที่ 9(ข) แสดงค่าโมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์แบบขึ้นส่วนประกอบกรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 38 องศา (ตำแหน่งของเส้นที่ไม่ต่อเนื่องบ่งบอกตำแหน่งของข้อต่อ) จากรูปเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของปลายเสาเข็มที่มากขึ้นเช่นกัน โดยการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเกิดขึ้นเมื่อปลายเสาเข็มลึกจาก $+0.5D_T$ เป็น $0D_T$ ผลค่าการกระจายตัวของโมเมนต์ดัดมีลักษณะแตกต่างกับงานชุดอุโมงค์ Mashimo และ Ishimura [22] โดยรวมจะเห็นได้ว่าค่าโมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์แบบขึ้นส่วนประกอบนี้มีค่าน้อยกว่ากรณีของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง

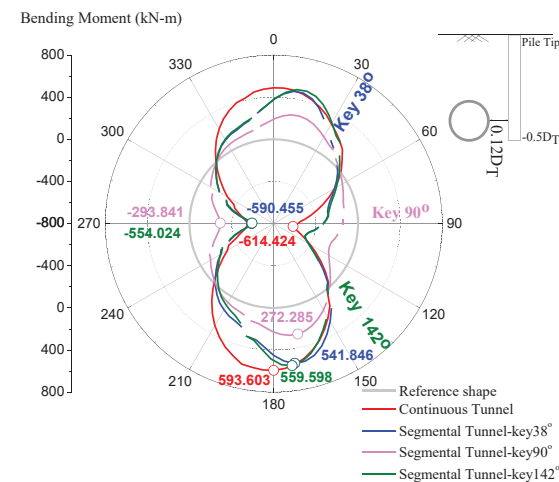
รูปที่ 9(ค) แสดงค่าโมเมนต์ดัดของอุโมงค์สำหรับกรณีผนังอุโมงค์แบบขึ้นส่วนประกอบ และผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง ที่ตำแหน่งของปลายเสาเข็มเดียวกัน



(ก) ผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง



(ข) ผนังอุโมงค์แบบขึ้นส่วนประกอบ



(ค) ผนังอุโมงค์ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบขึ้นส่วนประกอบ

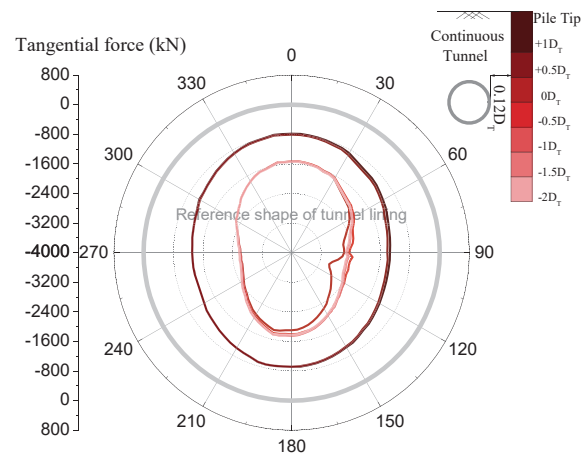
รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดของผนังอุโมงค์
ในขั้นตอนการเสาเข็มรับแรง

สังเกตได้ว่าการกระจายตัวของค่าโมเมนต์คดของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่องมีลักษณะค่อนข้างสมมาตรเนื่องจากการขึ้นตอนก่อสร้างอุโมงค์ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงจากการมีเสาเข็มรับแรงอยู่ด้านข้างไม่ได้มากเมื่อเทียบกับค่าที่มีอยู่เดิมจากการขุดอุโมงค์ ในขณะที่ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีการกระจายตัวของค่าโมเมนต์คดแบบไม่สมมาตรชัดเจน และมีค่าน้อยกว่าผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ค่าโมเมนต์คดของกรณีที่ใช้เข็มค้ำยันอยู่ที่ 90 องศา มีค่าน้อยสุด (ทั้งค่าลบและบวก) น่าจะเป็นเพราะเกิดการเสียดสีของผนังอุโมงค์สูงสุด ณ ตำแหน่ง spring line ซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ใช้เข็มค้ำยันที่ 90 องศา

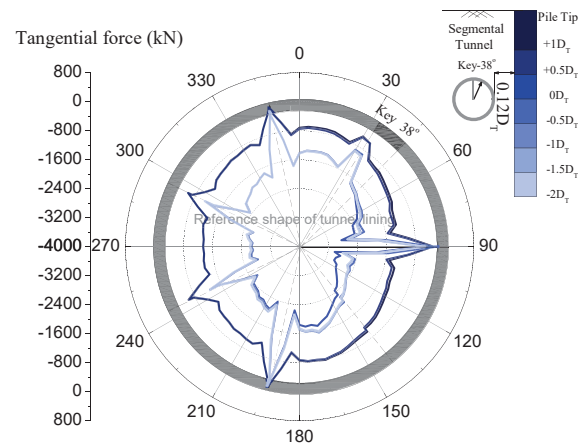
นอกจากนี้สำหรับกรณีที่ตำแหน่งของปลายเสาเข็มเปลี่ยนไปเป็นตำแหน่งอื่น พบว่าค่าโมเมนต์คดมีค่าแตกต่างกันไป และมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของปลายเสาเข็มที่มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปลายเสาเข็มอยู่ที่ตำแหน่ง $0D_T$ ส่งผลให้ค่าเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ซึ่งยืนยันว่าตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่สัมพันธ์กับตำแหน่งที่ใช้เข็มค้ำยันมีผลกระทบต่อค่าโมเมนต์คด

รูปที่ 10 แสดงถึงค่าแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ทั้งสองแบบที่เกิดจากเสาเข็มรับแรง จากผลที่แสดงพบว่าการกระจายตัวของค่าแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่องมีลักษณะสมมาตรและเมื่อตำแหน่งของปลายเสาเข็มมีความลึกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงตามแนวแกนมีค่ามากขึ้นตามความลึกของปลายเสาเข็ม ซึ่งสังเกตได้ชัดเจนดังรูปที่ 10(ก) สำหรับผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบมีการกระจายตัวของค่าแรงตามแนวแกนเป็นลักษณะที่ไม่สมมาตรและค่าแรงตามแนวแกนมีค่ามากขึ้นตามความลึกของปลายเสาเข็มเช่นกัน ดังในรูปที่ 10(ข)

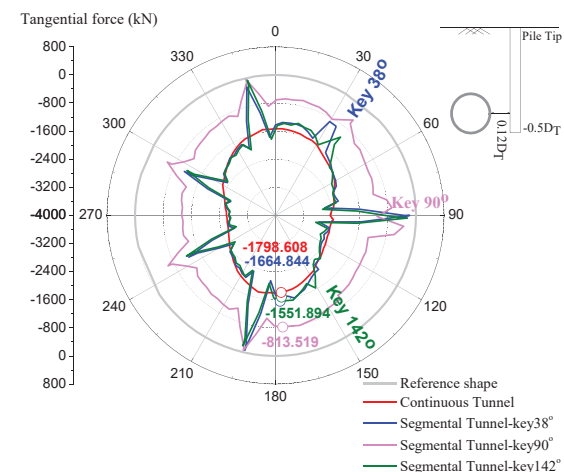
รูปที่ 10(ค) แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ทั้งแบบชิ้นส่วนประกอบและแบบต่อเนื่อง โดยพิจารณาที่ตำแหน่งของปลายเสาเข็มและระยะห่างระหว่างขอบอุโมงค์กับขอบเสาเข็มเดียวกัน สังเกตได้ว่าโดยรวมผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบให้ค่าแรงตามแนวแกนน้อยกว่าผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง



(ก) ผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง



(ข) ผนังอุโมงค์แบบชิ้นส่วนประกอบ



(ค) เปรียบเทียบระหว่างผนังอุโมงค์ทั้ง 2 แบบ และที่มี

ตำแหน่งของค้ำยันที่แตกต่างกัน

รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์ในขั้นตอนการใส่เสาเข็มรับแรง

ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนที่ตำแหน่งส่วนยอด (Crown) และส่วนล่าง (Invert) ของอุโมงค์อย่างไรก็ตามเนื่องจากไม่มีความต่อเนื่องที่ข้อต่อ ถึงแม้แรงในแนวแกนที่ส่งถ่ายในชั้นส่วนจะมีค่าน้อย แต่กลับมีค่ามาก ณ บริเวณใกล้รอยต่อ (Localization) หรือขอบชั้นส่วนเช็กเมนต์

จากการตรวจสอบพบว่าผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบที่มีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา มีค่าแรงตามแนวแกนมากที่สุดและกรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 90 องศา มีค่าแรงตามแนวแกนน้อยที่สุด ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าโมเมนต์คัตที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของคีย์เช็กเมนต์ส่งผลให้ผลตอบสนองของผนังอุโมงค์จากเสาเข็มรับแรงด้านข้างต่างกันออกไป

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ตรวจสอบผลกระทบของเสาเข็มรับแรงต่อโครงสร้างอุโมงค์ที่อยู่ข้างเคียง ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข แบบไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบของเสาเข็มเดี่ยวที่อยู่ด้านหนึ่งของอุโมงค์ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเสียรูปของผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบมีค่ามากกว่าของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่องทั้งภายใต้ขั้นตอนการก่อสร้างอุโมงค์และเสาเข็มรับแรง นอกจากนี้การเสียรูปจะมีค่ามากเมื่อคีย์เช็กเมนต์อยู่ใกล้กับปลายเสาเข็ม เช่น เมื่อพิจารณาปลายเสาเข็มในระดับเดียวกันที่ $-0.5D_T$ (ระดับฐานอุโมงค์) พบว่าผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบกรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา มีค่าการ

เสียรูปโดยรวมมากที่สุด เนื่องจากตำแหน่งคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 142 องศา อยู่ใกล้ปลายเสาเข็ม ($-0.5D_T$) มากที่สุด ตามด้วยกรณีคีย์เช็กเมนต์ที่ 38, 90 องศา และผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง ตามลำดับ

2) โมเมนต์คัตและแรงตามแนวแกนของผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบมีค่าน้อยกว่าผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่อง เช่น เมื่อพิจารณากรณีปลายเสาเข็มในระดับเดียวกัน ที่ $-0.5D_T$ พบว่าค่าโมเมนต์คัต (ทั้งค่าบวกและลบ) มีค่าเป็น 593.603 kN-m และ 614.424 kN-m และแรงตามแนวแกน (1,798.608 N) ของผนังอุโมงค์แบบต่อเนื่องมีค่ามากกว่าผนังอุโมงค์แบบชั้นส่วนประกอบกรณีคีย์เช็กเมนต์อยู่ที่ 38 องศา มีค่าโมเมนต์คัต (ทั้งค่าบวกและลบ) มีค่าเป็น 541.846 kN-m และ 590.455 kN-m และแรงตามแนวแกน (1,664.844 N)

3) นอกจากวิธีการจำลองคาออุโมงค์เป็นแบบต่อเนื่องหรือแบบชั้นส่วนแล้ว ตำแหน่งของปลายเสาเข็มที่สัมพันธ์กับตำแหน่งคีย์เช็กเมนต์มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสียรูปและแรงภายในของโครงสร้างอุโมงค์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เลขที่ทุน CE-KMUTT-6302

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mroueh, H. and Shahrou, I. Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Interaction Between Tunneling and Pile Foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002; 26: 217–230.
- [2] Kitiyodom, P., Matsumoto, T. and Kawaguchi, K. A Simplified Analysis Method for Piled Raft foundations Subjected to Ground Movements Induced by Tunnelling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005; 29: 1485–1507.
- [3] Lee, Y. J. and Bassett, R. H. Influence Zones for 2D Pile-Soil-Tunnelling Interaction Based on Model Test and Numerical Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005; 22: 325–342.

- [4] Liu, H. Y., Small, J. C. and Carter, J. P. Full 3D Modelling for Effects of Tunnelling on Existing Support Systems in the Sydney Region. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008; 23: 399–420.
- [5] Lee, C. J. Three-dimensional Numerical Analyses of the Response of a Single Pile and Pile Groups to Tunnelling in Weak Weathered Rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012; 32: 132–142.
- [6] Jongpradist, P., Kaewsri, T., Sawatparnich, A., Suwansawat, S., Youwai, S., Kongkitkul, W. and Sunitsakul, J. Development of Tunneling Influence Zones for Adjacent Pile Foundations by Numerical Analyses. *Tunnelling and Underground. Space Technology*, 2013; 34: 96–109.
- [7] Benton, L. J. and Phillips, A. The Behaviour of Two Tunnels Beneath a Building on Piled Foundation, Deformation of soils and displacements of structures. 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, Italy, 1991; 2: 665–668.
- [8] Higgins, K. G., Chudleigh, I. and St John, H. D. An Example of Pile Tunnel Interaction Problems. International Symposium, IS-Tokyo '99, 19-21 July, Tokyo, Japan, 1999; 99–103.
- [9] Chapman, T., Nicholson, D. and Luby, D. Use of the Observational Method for the Construction of Piles Next to Tunnels. International Conference on Response of Buildings to Excavation Induced Ground Movements, 17 - 18 July, Imperial College, London, UK, 2001.
- [10] Schroeder, F.C. The Influence of Bored Piles on Existing Tunnels: A Case Study. *Ground Engineering*, 2002; 35(7): 32–34.
- [11] Schroeder, F. C. and Potts, D. M., The Influence of Pile Group Loading on Existing Tunnels. *Geotechnique*, 2014; 54: 351-362.
- [12] Lueprasert, P., Jongpradist, P., Jongpradist, P. and Suwansawat, S., Numerical Investigation of Tunnel Deformation due to Adjacent Loaded Pile and Pile-Soil-Tunnel Interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017; 70: 166-181.
- [13] Huang, H., Zhang, D., Hu, Q. and Zhang, J. Model Test Study of Soil Variation Impact on Shield Tunnel Segment Structure. *American Society of Civil Engineers*, 2011; 1109-1116.
- [14] Lee, K. M., Hou, X. Y., Ge, X. W. An Analytical Solution for a Jointed Shield-Driven Tunnel Lining. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001; 25: 365-390.
- [15] Ye, F., Gou, C. F., Sun, H. D., Liu, Y. P., and Zhou, Z. Model Test Study on Effective Ratio of Segment Transverse Bending Rigidity of Shield Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014; 41: 193-205.
- [16] Blom, C. B. M. Design Philosophy of Concrete Linings for Tunnels in Soft Soils. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, 2002.
- [17] Mroueh, H. and Shahrour, I. A Simplified 3D Model for Tunnel Construction Using Tunnel Boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008; 23: 38–45
- [18] Lueprasert, P., Jongpradist, P., Charoenpak, K., Chaipanna, P. and Suwansawat, S. Three Dimensional Finite Element Analysis for Preliminary Establishment of Tunnel Influence Zone Subject to Pile Loading. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 2015; 9(2): 209-223.
- [19] Chaipanna, P. and Jongpradist, P. 3D Response Analysis of a Shield Tunnel Segmental Lining During Construction and a Parametric Study Using the Ground-Spring Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019; 90: 369-382.
- [20] SIMULIA ABAQUS 2016 Documentation. Version 2016, ABAQUS Inc., 2015. [online] available: www.simulia.com
- [21] Kavvadas, M., Litsas, D., Vazaios, I. and Fortsakis, P. Development of a 3D Finite Element Model for Shield EPB Tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014; 65: 22–34.

- [22] Mashimo, H. and Ishimura, T. Evaluation of the Load on Shield Tunnel Lining in Gravel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003; 18(2–3): 233–41.



อิทธิพลของความหนาแน่นที่มีต่อ สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูง

Effects of Density on Geotechnical Engineering Properties of High-Expansive Polyurethane Foam

ธมนวรรณ สืบพงศ์¹ วรช ก้องกิจกุล^{2,*} และ พรเทพ ม่วงสุขำ³

Tamonwan Seubpong¹, Warat Kongkitkul^{2,*} and Pornthep Muangsukhum³

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

³บริษัท เคมีคอนสตรัคชั่น จำกัด 157 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160

^{1,2}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha Uthit Rd., Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

³ChemiConstruction Co., Ltd., 157 Phet Kasem Rd., Nong Khang Phlu, Nong Khaem, Bangkok 10160, Thailand

*E-mail: warat.kon@kmutt.ac.th, Tel: 0-2470-9304, Fax: 0-2427-9063

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงชนิดสองส่วนประกอบ ตัวอย่างที่ใช้ถูกเตรียมให้มีความหนาแน่นแตกต่างกัน สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีที่ได้ศึกษามีดังนี้ 1. กำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) 2. อัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (ν_{sec}) 3. โมดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) 4. ความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร (ϵ_{cyN}) 5. ความเค้นครากแนวตั้งเมื่ออัดตัวในหนึ่งมิติ (σ_y) และ 6. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้น ค่า σ_u , ค่า E_{50} , ค่า ϵ_{cyN} และ ค่า σ_y จะเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม ค่า ν_{sec} และค่า k จะลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเท่ากัน ค่า ν_{sec} จะลดลงกับระดับความเค้นแนวตั้งที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่า ϵ_{cyN} จะเพิ่มขึ้นกับทั้งค่าอัตราส่วนความเค้นวัฏจักรและจำนวนรอบวัฏจักร สมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีดังกล่าวสามารถทำนายได้จากค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนจากสมการเชิงประจักษ์ที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: โฟมโพลียูรีเทน ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด การซึมผ่านของน้ำ การเสียรูปคงเหลือ

ABSTRACT

This research studies various geotechnical engineering properties of a high-expansive polyurethane (PU) foam. This PU foam was of a two-component type. Test samples were prepared at various densities. The following properties were studied: i) uniaxial unconfined compressive strength (σ_u); ii) secant Poisson's ratio (ν_{sec}); iii) secant modulus (E_{50}); iv) cyclic residual strain (ϵ_{cyN}); v) yield vertical stress in one-dimensional compression (σ_y); and vi) coefficient of permeability (k). It is found that, with increasing of the density of PU foam, the values of σ_u , E_{50} , ϵ_{cyN} , and σ_y increase, while the values of ν_{sec} and k decrease. In addition, when considering at the same PU foam's density, the value of ν_{sec} decreases with an increase in the vertical stress level, while the value of ϵ_{cyN} increases with cyclic

stress ratio (CSR) and number of cycle (N_c). Regression analyses were performed to develop empirical formulae to predict these properties from a given PU foam's density.

Keywords: Polyurethane foam, Density, Compressive strength, Permeability, Residual deformation

1. บทนำ

ชั้นดินบริเวณพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความหนามาก [1] เมื่อก่อสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาที่ต้องถ่ายน้ำหนักลงสู่พื้นดินโดยตรง อาทิ ถนน พื้นโรงงาน ลานจอดรถ จะเกิดการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำในชั้นดินเหนียว การทรุดตัวบางครั้งอาจจะไม่เท่ากัน หรือไม่สม่ำเสมอ ในปัจจุบัน มีการแก้ไขโดยการฉีดโฟมโพลียูรีเทนซึ่งมีอัตราการขยายตัวสูงมาก [2, 3] ลงไปได้โครงสร้างดังกล่าวเพื่อแทนที่ช่องว่าง และ/หรือยกโครงสร้างให้มีระดับสูงขึ้น วิธีการฉีดโฟมโพลียูรีเทนนี้ทำโดย ผสมโพลีออลและไอโซไซยานาตที่อยู่ในสถานะของเหลว ณ ขณะที่ออกมาจากหัวฉีดซึ่งจะกระจายสารผสมลงไปในบริเวณใต้โครงสร้างที่วางอยู่บนผิวดิน โดยไม่จำเป็นต้องรื้อโครงสร้างเดิมออก เมื่อโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวก็จะสร้างแรงยกเพื่อปรับระดับโครงสร้างที่วางอยู่บนผิวดินให้มีค่าระดับตามที่ต้องการ [2] วิธีการดังกล่าวสามารถดำเนินการได้ง่ายและประหยัด [4-6] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงและลดอัตราส่วนช่องว่างในดินได้อีกด้วย [4, 7]

โฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงเกิดจากปฏิกิริยาคลายความร้อนระหว่างโพลีออลและไอโซไซยานาตที่ผสมกันในสัดส่วนปริมาตรเฉพาะตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ โฟมโพลียูรีเทนนั้น มีอัตราการขยายตัวเชิงปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่า 20 เท่าของปริมาตรเริ่มต้นเมื่อขยายตัวอย่างอิสระ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในการสร้างโฟมโพลียูรีเทน โดยทั่วไปคือ 30 วินาที ถึง 2 นาที ซึ่งถือเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก [4] โดยระยะเวลาการทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอนุภาคของเรซินซึ่งได้รับผลกระทบมาจากอุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา [5] อนึ่ง โฟมโพลียูรีเทนเป็นวัสดุที่มีความเป็นกรดต่ำถึงปานกลาง และไวรังสี

อัลตราไวโอเลตและสารเคมีสังเคราะห์บางประเภท เช่น อะซิโตน ซึ่งมักจะไม่นพบในดิน [2, 3]

โฟมสามารถแบ่งประเภทได้เป็น 2 ชนิด จากโครงสร้างระดับจุลภาค กล่าวคือ 1. โฟมแบบโครงสร้างเปิด (Open-cell foam) และ 2. โฟมแบบโครงสร้างปิด (Closed-cell foam) โฟมแบบโครงสร้างเปิดจะมีลักษณะที่ช่องว่างของโครงสร้างนั้นติดกัน ส่วนโฟมแบบโครงสร้างปิดจะมีลักษณะที่ช่องว่างไม่เชื่อมต่อกัน [8] ซึ่งโฟมแบบโครงสร้างปิดนี้มีความแข็งแรงและดูดซับพลังงานได้มากกว่าโฟมแบบโครงสร้างเปิด [8, 9] โฟมที่ใช้ในงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีโดยทั่วไปที่ใช้สาร 2 ชนิด มาผสมกัน เช่น โฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงนั้น มักเป็นโฟมแบบโครงสร้างปิด [3,10]

ที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของโฟมโพลียูรีเทนกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งส่วนมากสนใจศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเมื่อรับแรงอัด อาทิ Gibson and Ashby [11] ได้แสดงพฤติกรรมการเสียรูปของโฟมหลายชนิด ทั้งโฟมแบบโครงสร้างเปิดและโฟมแบบโครงสร้างปิด และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของโครงสร้างระดับจุลภาคกับสมบัติของวัสดุ รูปแบบการวิบัติต่างๆ ของโฟมภายใต้การรับแรงอัด และพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของโฟมกับโครงสร้างระดับจุลภาคสำหรับแต่ละรูปแบบการวิบัติ Saha et al. [12] ได้ศึกษาพฤติกรรมของโฟมโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่างกัน 2 ค่า โดยทำการทดสอบกำลังอัดอัตราด้วยอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดและการดูดซับพลังงานมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด และความหนาแน่นของโฟมเป็นอย่างมาก การศึกษาโดย Buzzi et al. [2] Yu et al. [4] และ Wei et al. [13] ได้สรุปว่า ความเค้นครากของโฟมโพลียูรีเทนมีค่าขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น Valentino [10] ได้ศึกษาพฤติกรรมของโฟมโพลียูรีเทน 2 ชนิดที่เป็นที่

นิยมสำหรับงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีและพบว่า ความแน่นที่จุดวัดและยังโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเป็นอย่างมาก โดยมีความสัมพันธ์กันแบบเอกซ์โพเนนเชียล

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเห็นได้ว่าสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทน และความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเหล่านั้นกับความหนาแน่นยังคงอยู่ในวงจำกัด ซึ่งส่วนใหญ่จะสนใจเพียงแค่ค่ากำลังอัดเท่านั้น นอกจากนี้ การฉีดโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูงในงานวิศวกรรมเทคนิคธรณีมักจะดำเนินการ โดยที่ไม่ได้มีการออกแบบเบื้องต้น โดยมากมักทำโดยอาศัยพื้นฐานจากประสบการณ์เท่านั้น เสมือนเป็นการลองผิดลองถูก งานวิจัยนี้จึงดำเนินการทดสอบโฟมโพลียูรีเทนชนิดสองส่วนผสม เตรียมที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกันระหว่าง $100 - 200 \text{ kg/m}^3$ เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนต่อสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณี ซึ่งประกอบไปด้วย 1. ค่ากำลังรับแรงอัดในทิศทางเดียว 2. อัตราส่วนปัวซองของซีแคนท์ 3. โมดูลัสซีแคนท์ 4. ความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร 5. พฤติกรรมการอัดตัวในหนึ่งมิติ และ 6. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีต่างๆ ดังที่กล่าวไปข้างต้นกับค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนโดยได้นำเสนอออกมาในรูปแบบสมการเชิงประจักษ์เพื่อใช้ทำนายสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีต่างๆ เมื่อทราบค่าความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน

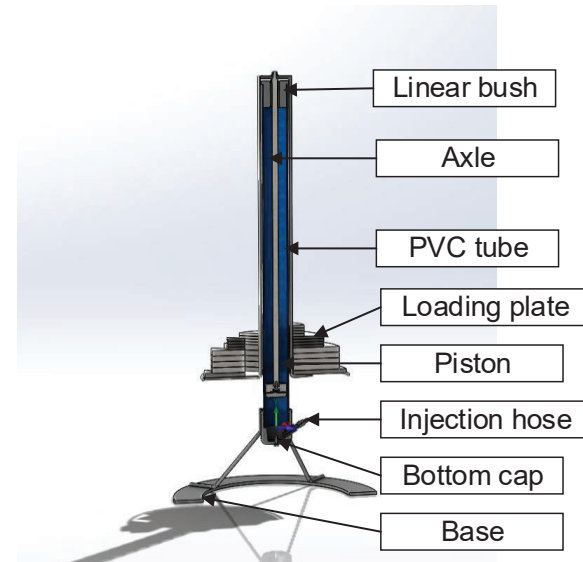
2. วัสดุ

2.1 โฟมโพลียูรีเทน

โฟมโพลียูรีเทนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นชนิดสองส่วนผสม (Two-component) โดยเป็นส่วนผสมระหว่างโพลีออล (Polyol) และไอโซไซยาเนต (Isocyanate) ที่อยู่ในสภาพของเหลว เมื่อสารสองชนิดดังกล่าวผสมกันจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการขยายตัวที่รวดเร็ว โดยที่

ปริมาตรสามารถขยายตัวเพิ่มขึ้นได้ถึง 30 เท่า เมื่อเทียบกับปริมาตรเริ่มต้น

2.2 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ



รูปที่ 1 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้

การเตรียมตัวอย่างโฟมโพลียูรีเทนในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ 2 ส่วนประกอบกัน กล่าวคือ 1. เครื่องมือฉีดสารเคมี และ 2. เครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบ (รูปที่ 1) เครื่องมือส่วนแรกเป็นเครื่องมือนำเข้าจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการงานก่อสร้างจริง ส่วนเครื่องมือส่วนที่ 2 ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้ เครื่องมือส่วนที่ 2 นี้สามารถจำลองสถานการณ์เมื่อฉีดโฟมโพลียูรีเทนลงไปในใต้โครงสร้าง โดยที่โฟมโพลียูรีเทนที่มีสถานะเริ่มต้นเป็นของเหลว จะถูกฉีดเข้าไปในท่อพีวีซีที่มีลูกสูบอยู่ด้านในซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวแกนของท่อพีวีซี ภายในของท่อพีวีซีจะเคลือบด้วยสารหล่อลื่นบางๆ เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างลูกสูบกับพื้นผิวภายในของท่อพีวีซี ในขณะที่ลูกสูบมีการเคลื่อนตัว ลูกสูบเชื่อมต่อกับโครงเหล็กภายนอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่าโดยมีแกนกลางร่วมกัน โครงเหล็กภายนอกสามารถยกขึ้นในแนวดิ่งพร้อมกับลูกสูบที่อยู่ด้านในท่อพีวีซี ส่วนล่างของโครงเหล็กสามารถรองรับแผ่นน้ำหนักที่จะถ่ายเป็นแรงกดไปที่ลูกสูบ เครื่องมือนี้จึง

สามารถเตรียมตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันโดยผันแปรน้ำหนักกดทับได้ รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่เตรียมได้จากเครื่องมือดังกล่าว



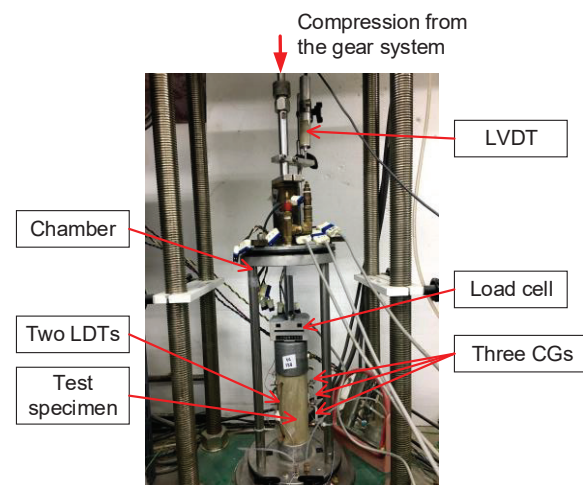
รูปที่ 2 ตัวอย่างของโพลีเอทิลีนรูปทรงกระบอกที่เตรียมจากเครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบ

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว

การทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวทำเพื่อกำหนดรับแรงอัดในทิศทางเดียว (Compressive strength, σ_u) โมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus, E_{50}) และอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (Secant Poisson's ratio, ν_{sec}) จากการให้น้ำหนักกระทำแบบต่อเนื่องกับตัวอย่างโพลีเอทิลีน นอกจากนี้ ยังได้ทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวโดยให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรเพื่อหาค่าความเครียดคงค้าง (Cyclic residual strain, ϵ_{cyn}) งานวิจัยนี้ใช้เครื่องกดตัวอย่างที่มีระบบควบคุม วัดค่าเก็บและบันทึกผลอัตโนมัติ โดยใช้เซลล์วัดแรง (Load cell) สำหรับการวัดแรงกดที่กระทำต่อตัวอย่าง ใช้เซ็นเซอร์วัดระยะกระจัด (Linear variable differential transformer, LVDT) วัดการเสียรูปในแนวแกนของตัวอย่าง ใช้ทรานส์ดิวเซอร์วัดระยะกระจัดตามแนวแกนเฉพาะจุด (Local deformation transducer, LDT)

วัดการเสียรูปของตัวอย่างตามแนวแกนที่เป็นอิสระจากการเสียรูปที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณหัวตัวอย่าง (Bedding errors) และใช้ทรานส์ดิวเซอร์วัดระยะกระจัดตามแนวราบเฉพาะจุด (Clip gauge, CG) วัดการเสียรูปด้านข้างของตัวอย่าง งานวิจัยนี้ได้ใช้ LDT จำนวน 1 คู่ และ CG จำนวน 3 อัน รายละเอียดการติดตั้งเครื่องมือวัดที่กล่าวมาข้างต้นแสดงในรูปที่ 3 สัญญาณที่ได้จากเครื่องมือวัดจะถูกขยายด้วยเครื่องขยายสัญญาณความเครียด (Strain amplifier) แล้วจึงถูกอ่านและบันทึกลงในคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติ ตัวอย่างโพลีเอทิลีนที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวเตรียมจากตัวอย่างที่ได้จากเครื่องมือเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอกแบบชุดลูกสูบ (รูปที่ 2) โดยนำไปกลึงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 75 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับ



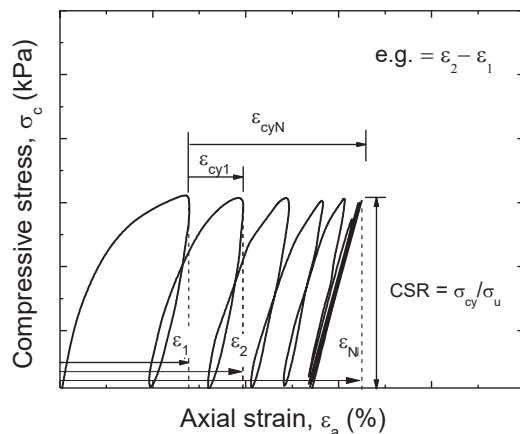
รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องมือวัดต่างๆ สำหรับการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว

3.1.1 การให้น้ำหนักกระทำแบบต่อเนื่อง

ในการกดตัวอย่างแบบให้น้ำหนักกระทำแบบต่อเนื่องนั้น ได้ควบคุมอัตราการกดให้เท่ากับ 1.3 mm/min ตั้งแต่เริ่มต้นไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D695-08 [14]

3.1.2 การให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร

การทดสอบแบบนี้ทำเพื่อหาค่าความเครียดคงค้างเมื่อตัวอย่างโฟมโพลียูรีเทนรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร (ε_{cyN}) ความสัมพันธ์ระหว่าง ε_{cyN} กับจำนวนรอบวัฏจักร (Number of cycle, N_c) ที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ทำนายการทรุดตัวของโฟมโพลียูรีเทนเมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกจรจากการใช้งานจริงได้



รูปที่ 4 นิยามของความเครียดคงค้างเมื่อให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร

รูปที่ 4 แสดงนิยามของค่า ε_{cyN} จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัด (Compressive stress, σ_c) และความเครียดแนวแกน (Axial strain, ε_a) ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียว จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ค่า ε_{cyN} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

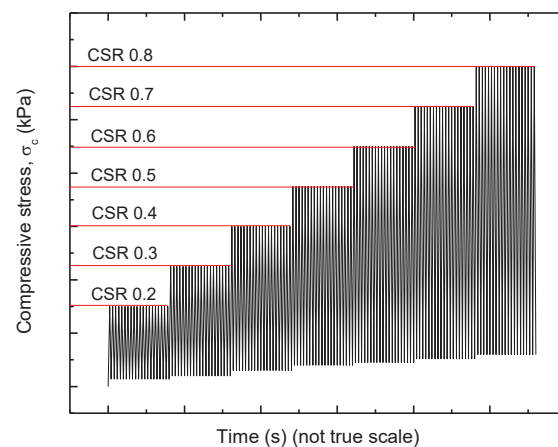
$$\varepsilon_{cyN} = \varepsilon_{N+1} - \varepsilon_1 \quad (1)$$

โดยที่ ε_{cyN} คือความเครียดแนวแกนคงค้างเมื่อครบรอบวัฏจักรที่ N (ไม่รวมรอบที่ 1), ε_1 คือความเครียดแนวแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นในรอบที่ 1 และ ε_{N+1} คือความเครียดแนวแกนสูงสุดที่เกิดขึ้นในรอบที่ $N+1$ เช่น $\varepsilon_{cy1} = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ เป็นต้น ในการให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรจะทำการผันแปรค่าความเค้นอัดสูงสุดระหว่างชุดวัฏจักรที่ต่างกันไป โดยอ้างอิงกับค่าอัตราส่วนความเค้น

วัฏจักร (Cyclic stress ratio, CSR) ซึ่งแสดงในสมการที่ (2)

$$CSR = \frac{\sigma_{cy}}{\sigma_u} \quad (2)$$

โดยที่ σ_{cy} คือ ค่าความเค้นอัดแนวแกนสูงสุดในแต่ละชุดวัฏจักร และ σ_u คือ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดทิศทางเดียวอย่างต่อเนื่อง ในการทดสอบจะผันแปรค่า CSR จาก 0.2 ถึง 0.8 ระหว่างชุดวัฏจักรที่ต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ค่าความเค้นแนวแกนต่ำสุดในแต่ละชุดวัฏจักรมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของค่า σ_{cy} สำหรับชุดวัฏจักรนั้น [15] ในแต่ละชุดวัฏจักรจะให้น้ำหนักกระทำซ้ำจำนวน 20 รอบ



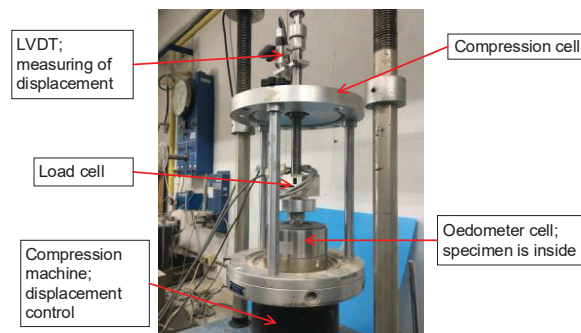
รูปที่ 5 รูปแบบการให้น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร

3.2 การทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

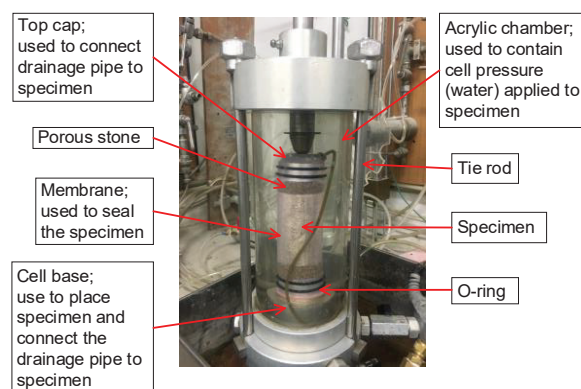
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติเพื่อหาค่าความเค้นครากในแนวตั้ง (Yield vertical stress, σ_y) รูปที่ 6 แสดงรายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ การทดสอบนี้ทำแบบใช้อัตราความเครียดคงที่ (Constant-Rate-of-Strain, CRS) เท่ากับร้อยละ 0.87 ต่อวินาที ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเท่ากับ 60 มิลลิเมตรและ 20 มิลลิเมตรตามลำดับ

3.3 การทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ ด้วยวิธีกำแพงยืดหยุ่น (Flexible-wall) ตามมาตรฐาน ASTM D5084-16a [16] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of permeability, k) ของโพลิยูรีเทน รูปที่ 7 แสดงรายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 35 มิลลิเมตรและ 70 มิลลิเมตร ตามลำดับ การทดสอบทำโดยให้แรงดันไฮดรอลิกเพื่อให้ผิวเมมเบรนแนบกับตัวอย่าง เมื่อตัวอย่างอยู่ในสถานะสมดุลแล้วจึงให้แรงดันน้ำในโพรงบริเวณหัวและท้ายตัวอย่างแตกต่างกัน 5 kPa เพื่อให้น้ำไหลผ่านเข้าออกตัวอย่าง การทดสอบนี้ใช้บิวเรต (Burette) ที่เชื่อมต่อเข้ากับทรานส์ดิวเซอร์วัดแรงดันที่ไม่เท่ากัน (Differential pressure transducer, DPT) เพื่อวัดปริมาตรน้ำที่ไหลเข้าออกตัวอย่างแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

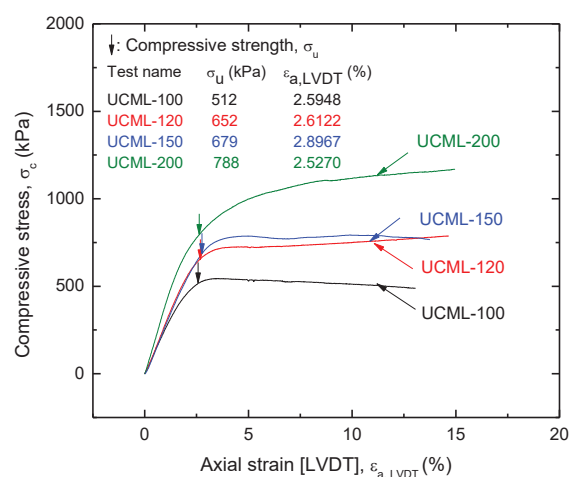


รูปที่ 7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านของน้ำแบบกำแพงยืดหยุ่น

4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Compressive stress, σ_c) กับความเครียดแนวแกน (Axial strain, ϵ_a) ของตัวอย่างโพลิยูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าโพลิยูรีเทนที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีกำลังรับแรงอัดที่มากกว่า จากรูปที่ 8 จะสามารถนิยามหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength, σ_u) ได้ จาก จุดบนความสัมพันธ์ $\sigma_c - \epsilon_a$ เมื่อแสดงบนแกนล็อกการิทึม ($\log \sigma_c - \log \epsilon_a$) ที่มีความโค้งมากที่สุดหรือมีรัศมีความโค้ง (Radius of curvature, ρ) น้อยที่สุด ค่า σ_u ที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวระบุด้วยลูกศรในรูปที่ 8 นอกจากนี้ จะสังเกตได้ว่าค่า σ_u สอดคล้องกับค่า σ_c ที่ค่า ϵ_a เท่ากับร้อยละ 2.5 โดยประมาณ นอกจากนี้ โพลิยูรีเทนยังได้แสดงพฤติกรรมแบบแข็งตัวด้วยความเครียด (Strain hardening) อย่างต่อเนื่อง กล่าวคือ ค่า σ_c มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้กระทั่งเมื่อถึงจุดที่ $\sigma_c = \sigma_u$ ไปแล้ว อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า σ_c กับค่า ϵ_a มีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่อถึงจุดนี้ไปแล้ว



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแนวแกนของโพลิยูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

ค่าโมดูลัสซีแคนท์ (Secant modulus, E_{50}) สามารถหาได้จาก $E_{50} = (\sigma_u/2)/\epsilon_{50}$ เมื่อ ϵ_{50} คือค่าความเครียดแนวแกนบนความสัมพันธ์ $\sigma_c - \epsilon_a$ ที่สอดคล้องกับค่าของ $\sigma_u/2$

ตารางที่ 1 ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว และโมดูลัสซีแคนท์ จากการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบต่อเนื่อง

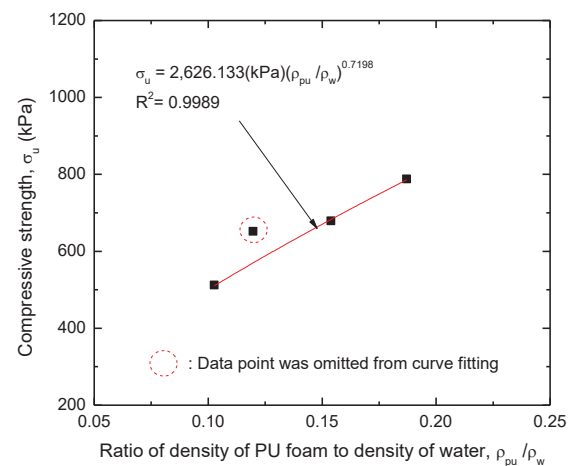
Test name	Density, ρ_{pu} (kg/m ³)	Compressive strength, σ_u (kPa)	Secant modulus, E_{50} (MPa)
UCML-100	102.70	512	26
UCML-120	119.69	652	28
UCML-150	153.86	679	27
UCML-200	187.06	788	39

ตารางที่ 1 แสดงค่า σ_u และ E_{50} สำหรับโฟมโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจากการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบต่อเนื่อง จากตารางนี้จะเห็นได้ว่าค่า σ_u และค่า E_{50} ของโฟมโพลียูรีเทนที่กลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 100 kg/m³ นั้นน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันของกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m³ นั้นมากที่สุด จึงสรุปได้ว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้น ค่า σ_u และค่า E_{50} จะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อนำค่า σ_u และค่า E_{50} มาสร้างความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ (ρ_{pu}/ρ_w) จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ จากรูปทั้งสองนี้จะเห็นได้ว่า ค่า σ_u และค่า E_{50} เพิ่มขึ้นกับค่า ρ_{pu}/ρ_w แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ถดถอย (Regression) ได้ด้วยสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

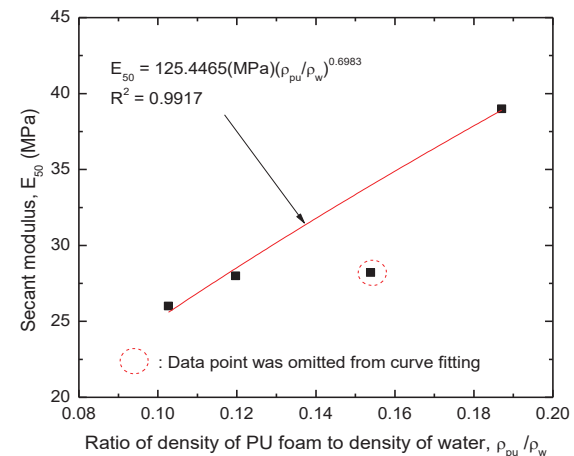
$$\sigma_u \text{ (kPa)} = 2,626.1330(\rho_{pu}/\rho_w)^{0.7198} \quad (3)$$

$$E_{50} \text{ (MPa)} = 125.4485(\rho_{pu}/\rho_w)^{0.6983} \quad (4)$$

เมื่อ ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1,000 kg/m³ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายค่า σ_u ที่ได้ งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้สมการที่ 3 เพื่อทำนายค่า σ_u ของโฟมโพลียูรีเทนและเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากการศึกษาของ Priddy and Newman [7], Valentino et al. [10] และ DRR [17]



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดทิศทางเดียวกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสซีแคนท์กับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ

ผลการเปรียบเทียบเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 11(ก) ซึ่งจะเห็นว่า ผลการทำนายมีค่าสูงเกินกว่าค่าจริงที่วัดได้ค่อนข้างมาก ทั้งนี้ความแตกต่างเกิดขึ้นจากสาเหตุดังนี้ 1. อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน และ 2. อัตราความเครียดที่ใช้ในการกดตัวอย่าง

ไม่เท่ากันดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 2 โดยที่ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่าง (Correction factor) มีค่าตาม ASTM C 39/C 39M-12 [18]

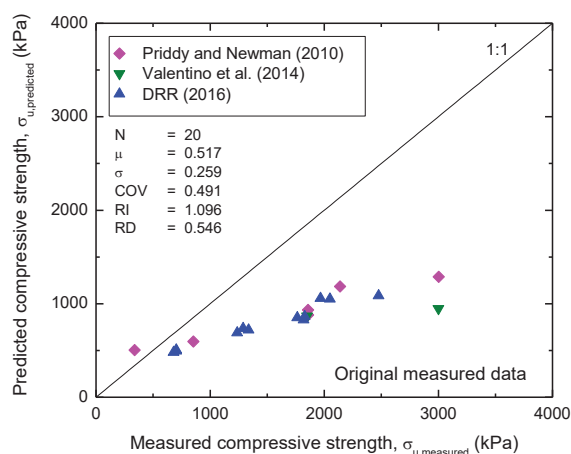
ตารางที่ 2 รายละเอียดของรูปทรง ขนาดตัวอย่าง และอัตราความเครียดในการกดตัวอย่าง

Data source	Shape	Specimen's dimensions (mm) ¹⁾	Aspect ratio ²⁾	Correction factor ³⁾	Strain rate (%/min)
This study	Cylindrical	70 × 150	2	1	0.87
Priddy and Newman (2010)	Cylindrical	102.6 × 102.6	1	0.91	9.75
Valentino et al. (2014)	Cylindrical	60 × 60	1	0.91	9.84
DRR (2016)	Rectangular	56 × 56 × 26	0.5	0.8333, 0.55	0.38

¹⁾ D × H (cylindrical) and W × L × H (rectangular)

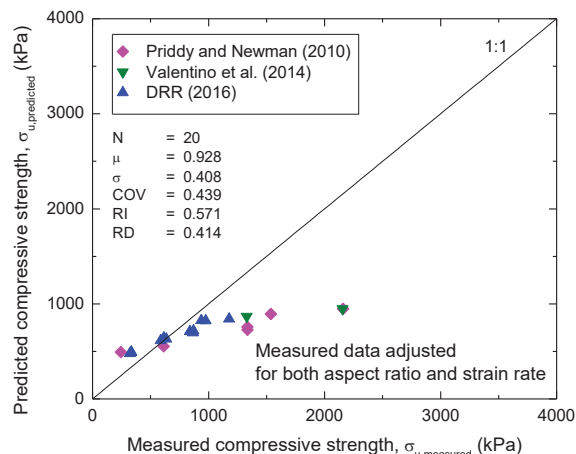
²⁾ H/D (cylindrical) and H/W (rectangular)

³⁾ from ASTM C 39/C 39M-12 [18]



(ก)

รูปที่ 11 ผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) ด้วยสมการที่ 3. (ก) กรณีที่ใช้ค่า σ_u ต้นฉบับ และ (ข) กรณีที่ปรับแก้ค่า σ_u สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและอัตราความเครียดที่ไม่เท่ากัน



(ข)

รูปที่ 11 (ต่อ) ผลการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) ด้วยสมการที่ 3. (ก) กรณีที่ใช้ค่า σ_u ต้นฉบับ และ (ข) กรณีที่ปรับแก้ค่า σ_u สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและอัตราความเครียดที่ไม่เท่ากัน

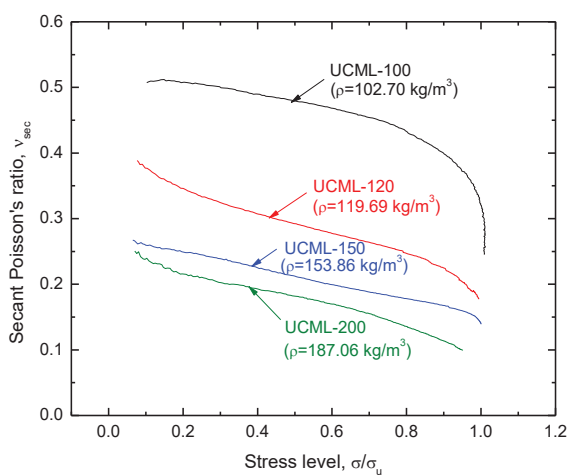
นอกจากนี้ พฤติกรรมของโฟมโพลียูรีเทนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราความเครียดอย่างมีนัยยะสำคัญ Tatsuoka et al.

[19] ได้เสนอว่าค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกระโดด ($\Delta\sigma$) ต่อความเค้นปัจจุบัน (σ) มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างอัตราความเครียดไม่คืนกลับภายหลังการกระโดดของความเค้น ($\dot{\epsilon}_{after}^{ir}$) ต่ออัตราความเครียดไม่คืนกลับก่อนหน้าการกระโดดของความเค้น ($\dot{\epsilon}_{before}^{ir}$) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \beta \log_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}_{after}^{ir}}{\dot{\epsilon}_{before}^{ir}} \right) \quad (5)$$

ค่า β คือสัมประสิทธิ์ความไวต่ออัตราความเครียด (Rate-sensitivity coefficient) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.2 สำหรับวัสดุจำพวกโพลิเมอร์ [20]

รูปที่ 11(ข) แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า σ_u ที่ได้จากการทำงานกับค่า σ_u ที่วัดได้จริงจากการทดสอบเมื่อได้ทำการปรับแก้สำหรับอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างและอัตราความเครียดที่ใช้ในการกดตัวอย่างที่ไม่เท่ากันแล้ว จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า ผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากกว่าเดิมเป็นอันมาก ถึงแม้ว่าจะมีข้อมูลบางจุดที่ผลการทำนายไม่สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากการทดลองอยู่บ้าง แต่ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากวิธีการนิยามค่ากำลังรับแรงอัดในทิศทางเดียว (σ_u) มีความแตกต่างกับวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

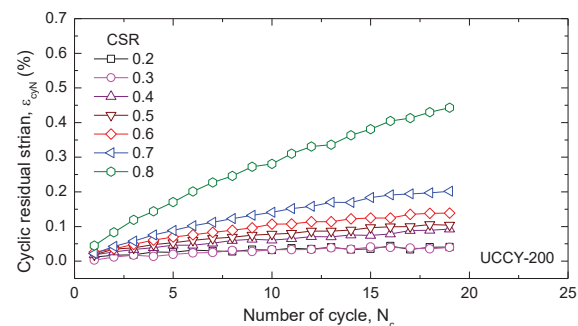


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์กับระดับความเค้นสำหรับโฟมโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

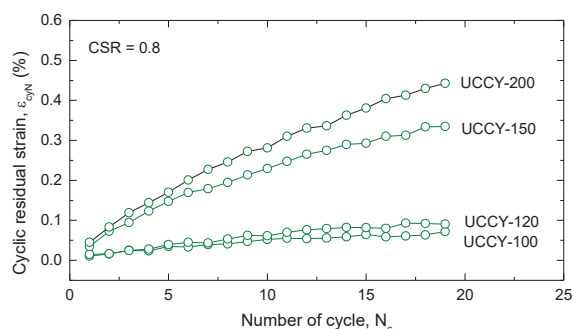
รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (Secant Poisson's ratio, v_{sec}) กับระดับความเค้น (Stress level, σ/σ_u) โดยที่ค่า v_{sec} หาได้โดย $v_{sec} = -\epsilon_{h,CG}/\epsilon_{a,LDT}$ หรือเท่ากับค่าบวกของค่าความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดเริ่มต้นกับจุดตามความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวราบ (Horizontal strain, ϵ_h) และ ϵ_a จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า 1. เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นเท่ากัน ค่า v_{sec} จะลดลงเมื่อค่า σ/σ_u เพิ่มขึ้น และ 2. เมื่อพิจารณาที่ค่า σ/σ_u เท่ากัน ค่า v_{sec} จะลดลงเมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่า v_{sec} นั้นขึ้นอยู่กับค่า σ/σ_u และความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน พฤติกรรมดังกล่าวของโฟมโพลียูรีเทนมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wei et al. [13] งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการเชิงประจักษ์ที่มีรูปแบบดังสมการที่ 6 ในการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมดังกล่าว

$$v_{sec} = [A - B(\sigma/\sigma_u)] + C \exp[-(p_{pu}/p_w)/D] \quad (6)$$

โดยที่ A, B, C, และ D มีค่าเท่ากับ 0.2544, 0.1416, 65.1932 และ 0.0190 ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรกับจำนวนรอบวัฏจักรที่ค่า CSR ต่างๆ ตั้งแต่ 0.2 ถึง 0.8 สำหรับโฟมโพลียูรีเทนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m³



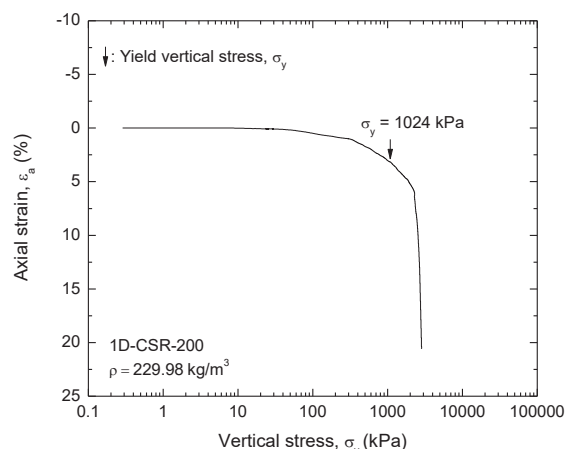
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างเมื่อรับ น้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรกับจำนวนรอบวัฏจักรที่ค่า CSR เท่ากับ 0.8 สำหรับโพลียูรีเทนทุกกลุ่ม ความหนาแน่น

4.2 ผลการทดสอบแรงอัดทิศทางเดียวแบบวัฏจักร

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic residual strain, ϵ_{cyN}) กับจำนวนรอบวัฏจักร (N_c) ที่ค่า CSR เท่ากับ 0.2 ถึง 0.8 ของโพลียูรีเทนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3 จะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{cyN} ที่ CSR เท่ากับ 0.2 ถึง 0.5 ไม่ได้เพิ่มขึ้นกับ N_c อย่างมีนัยยะสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า ϵ_{cyN} จะเริ่มพัฒนาอย่างมีนัยยะสำคัญก็ต่อเมื่อค่า CSR มากกว่า 0.5 หรือเมื่อค่าน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของค่า σ_y ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการพัฒนา ϵ_{cyN} เมื่อค่า CSR เท่ากับ 0.6, 0.7 และ 0.8 เท่านั้น เมื่อพิจารณาที่ค่า CSR ดังกล่าวจะสังเกตได้ว่า ค่า ϵ_{cyN} ขึ้นอยู่กับทั้งค่า N_c และค่า CSR กล่าวคือ ค่า ϵ_{cyN} จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า N_c และค่า CSR เพิ่มขึ้น รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ_{cyN} กับค่า N_c ที่ค่า CSR เท่ากับ 0.8 สำหรับโพลียูรีเทนทุกกลุ่มความหนาแน่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า ϵ_{cyN} ยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโพลียูรีเทนด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าค่า ϵ_{cyN} ขึ้นอยู่กับค่า N_c , ค่า CSR และค่าความหนาแน่นของโพลียูรีเทน (ρ_{pu}) งานวิจัยนี้ได้ใช้สมการเชิงประจักษ์ที่มีรูปแบบดังสมการที่ 7 ในการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์สำหรับพฤติกรรมดังกล่าว

$$\epsilon_{cyN}(\%) = A(\text{CSR})^{3.9234}(N_c)^{0.5892} \quad (7ก)$$

$$A = 47.285(\%) (\rho_{pu}/\rho_w) \quad (7ข)$$

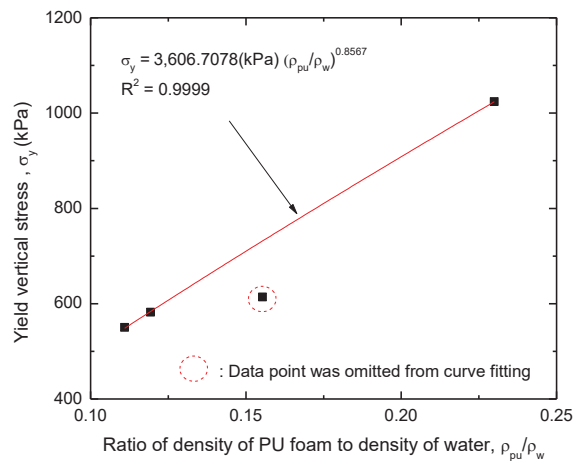


รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวแกนกับความเค้นแนวดิ่งจากการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติสำหรับโพลียูรีเทนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3

4.3 ผลการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϵ_a กับความเค้นในแนวดิ่ง (Vertical stress, σ_v) จากการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติสำหรับโพลียูรีเทนกลุ่มความหนาแน่นเท่ากับ 200 kg/m^3 ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่า ϵ_a จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า σ_v เกินค่าความเค้นครากในแนวดิ่ง (Yield vertical stress, σ_y) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นิยามค่า σ_y จากจุดบนความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(\epsilon_a)$ กับ $\log(\sigma_v)$ ที่มีความโค้งมากที่สุดหรือจุดที่รัศมีความโค้ง (Radius of curvature, ρ) น้อยที่สุด เมื่อนำค่า σ_y ที่นิยามได้สำหรับทุกกลุ่มความหนาแน่นของโพลียูรีเทนมาแสดงกับค่า ρ_{pu}/ρ_w จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า σ_y เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโพลียูรีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นโดยลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นดังสมการที่ 8

$$\sigma_y(\text{kPa}) = 3,606.7078(\text{kPa})(\rho_{pu}/\rho_w)^{0.8567} \quad (8)$$

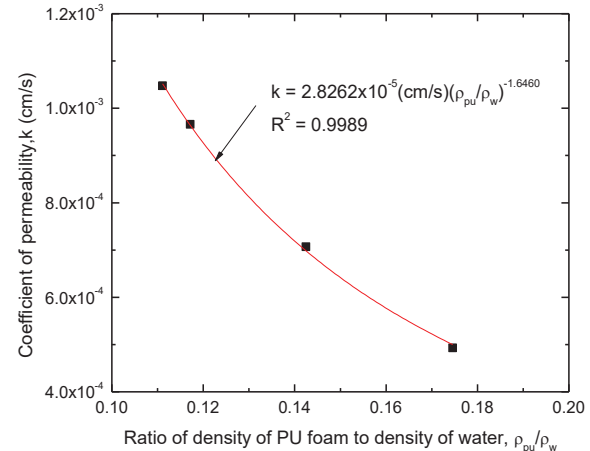


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นครากแนวตั้งกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำจากการทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ

4.4 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (Coefficient of permeability, k) ของโฟมโพลียูรีเทนที่ได้จากการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-4} cm/s (10^{-5} ถึง 10^{-6} m/s) ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าโฟมโพลียูรีเทนเป็นวัสดุที่มีการซึมผ่านน้ำต่ำถึงปานกลาง [21] เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับค่า ρ_{pu}/ρ_w ดังแสดงในรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าค่า k ลดลงเมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้นดังสมการที่ 9

$$k(\text{cm/s}) = 2.8262 \times 10^{-5} (\text{cm/s}) (\rho_{pu}/\rho_w)^{-1.6460} \quad (9)$$



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำกับอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนกับความหนาแน่นของน้ำ

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้นำเสนออิทธิพลของความหนาแน่นต่อสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีของโฟมโพลียูรีเทนขยายตัวสูง การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบแรงอัดในทิศทางเดียว การทดสอบการอัดตัวในหนึ่งมิติ และการทดสอบการซึมผ่านของน้ำ จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ค่ากำลังรับแรงอัดทิศทางเดียว (σ_u) และค่าโมดูลัสซีแคนท์ (E_{50}) เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน (ρ_{pu}) เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ค่าอัตราส่วนปัวซองซีแคนท์ (ν_{sec}) มีค่าลดลงเมื่อค่า ρ_{pu} และระดับความเค้น (σ/σ_u) เพิ่มขึ้น
2. เมื่ออัตราส่วนความเค้นวัฏจักร (CSR) มีค่าน้อยกว่า 0.5 การพัฒนาความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรนั้นไม่มีนัยยะสำคัญ แต่เมื่อค่า CSR มากกว่า 0.5 ความเครียดคงค้างเมื่อรับน้ำหนักกระทำแบบวัฏจักรจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ρ_{pu} ค่า CSR และจำนวนรอบวัฏจักร (N_c) เพิ่มขึ้น
3. เมื่อโฟมโพลียูรีเทนถูกอัดตัวในหนึ่งมิติ ค่าความเค้นครากในแนวตั้ง (σ_y) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า ρ_{pu} เพิ่มขึ้น
4. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ (k) ลดลงเมื่อค่า ρ_{pu} เพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการเชิงประจักษ์เพื่อทำนายค่าสมบัติทางวิศวกรรมเทคนิคธรณีดินที่ได้กล่าวมาข้างต้นเมื่อทราบความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทน ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อไปสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมโดยคำนึงถึงความหนาแน่นของโฟมโพลียูรีเทนที่เพียงพอต่อสมบัติที่ต้องการ จึงจะสามารถทำให้การใช้งานโฟมโพลียูรีเทนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อการพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภายใต้โครงการการสร้างความเข้มแข็งให้กับหน่วยวิจัยในภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. ประจำปีงบประมาณ 2561 (CE-KMUTT 6118)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Soralump, S. (2004). Geotechnical engineering problems and tentative solutions in Thailand, paper presented in *the Young Geotechnical Engineering Conference*, Taipei, Taiwan.
- [2] Buzzi, O., Fityus, S. and Sloan, W.S. Structure and Properties of Expanding Polyurethane Foam in the Context of Foundation Remediation in Expansive Soil. *Mechanics of Materials*, 2008; 40: 1012-1021.
- [3] Buzzi, O., Fityus, S. and Sloan, W. S. Use of Expanding Polyurethane Resin to Remediate Expansive Soil Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010; 47: 623-634.
- [4] Yu, L., Wang, R. and Skirrow, R. The Application of Polyurethane Grout in Roadway Settlements Issues. The Canadian Geotechnical Conference 2013, Canada.
- [5] Chelat, D., Jais, I. B. Mohd., Razali, R. and Tawaf, M. K. Performance Comparison Between Polyurethane Injection Pile and Slab System Against Lightweight Concrete as a Ground Improvement Using Finite Element Analysis. *Journal of Applied Sciences Research*, 2015; 11: 11-16.
- [6] Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mohtotti, D., Mutalib, A. A. and Badri, K. H. The Use of Polyurethane for Structural and Infrastructural Engineering Applications: A State-of-the-Art Review. *Construction and Building Materials*, 2018; 190: 995-1014.
- [7] Priddy, L. P. and Newman, J. K. (2010). Full-scale Field Testing for Verification of Mechanical Properties of Polyurethane Foams for Use as Backfill in PCC Repairs. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010; 22: 245-252.
- [8] Efstathiou, K. Synthesis and Characterization of a Polyurethane Prepolymer for the Development of a Novel Acrylate-Based Polymer Foam. Budapest University of Technology and Economics (BME), 2011; 1-57.
- [9] Queheillalt, D. T., Katsumura, Y. and Wadley, H. N. G. Synthesis of Stochastic Open Cell Ni-based Foams. *Scripta Materialia*, 2004; 50: 313-317.
- [10] Valentino, R., Romeo, E. and Stevanoni, D. An Experimental Study on the Mechanical Behaviour of Two Polyurethane Resins Used for Geotechnical Applications. *Mechanics of Materials*, 2014; 71: 201-113.
- [11] Gibson, L. J. and Ashby, M. F. Cellular Solids. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997.
- [12] Saha, M. C., Mahfuz, H., Chakravarty, U. K., Uddin, M., Kabir, Md. E. and Jeelani, S. Effect of Density, Microstructure, and Strain Rate on Compression Behavior of Polymeric Foams. *Materials Science and Engineering*, 2005; A406: 328-336.
- [13] Wei, Y., Wang, F., Gao, X. and Zhong, Y. Microstructure and Fatigue Performance of Polyurethane Grout Materials Under Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017; 29: 1-8.
- [14] ASTM D 695-08. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastic. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [15] AASHTO T 307-99. Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. American Association of State Highway and Transportation Officials.

- [16] ASTM D 5084-16a. Standard Test Method for Measurement of Hydraulic conductivity of Saturated Porous Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [17] กรมทางหลวงชนบท. การแก้ไขปัญหาคาการทรุดตัวของเชิงลาดสะพานด้วยโพลียูรีเทนโฟม (PU-Foam). สำนักบำรุงทาง, กรมทางหลวงชนบท, 2559.
- [18] ASTM C 39/ C 39M-12. Standard Test Method for Compressive strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] Tatsuoka, F., Di Benedetto, H., Enomoto, T., Kawabe S. and Kongkitkul, W. Various Viscosity Types of Geomaterials in Shear and Their Mathematical Expression. *Soils and Foundations*, 2008; 48: 41-60.
- [20] Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. and Hirakawa, D. Creep Rupture Curve for Simultaneous Creep Deformation and Degradation of Geosynthetic Reinforcement. *Geosynthetics International*, 2007; 14: 189-200.
- [21] Terzaghi, K., Peck. R. B. and Mesri, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley, J. and Sons, T. (Ed.), Canada, USA, 1996; 73.



การวิเคราะห์เส้นทางและปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบโลจิสติกส์ เพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี **An Examination for Routing and Factors Impacting Tourism Logistics in Ubonratchathani Province**

กสิน รังสิกรรพุม*

Kasin Ransikarbun¹

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 34190

Department of Industrial Engineering, Ubonratchathani University, 34190, Thailand

*E-mail : kasinphd@gmail.com, Tel:0-4535-3300

บทคัดย่อ

การท่องเที่ยวมีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจโดยรวมและในระดับท้องถิ่นของหลายๆ ประเทศรวมถึงประเทศไทย โดยในการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์โลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวซึ่งถือเป็นศาสตร์ใหม่ศาสตร์หนึ่งที่ได้เริ่มมีการศึกษามากขึ้นจากหลายๆ ภาคส่วน โดยเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือต่างๆ ที่ช่วยในการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ในภาคการผลิตและอุตสาหกรรมมาใช้ปรับปรุงและพัฒนาการเดินทางและการท่องเที่ยวในภาคบริการให้ดีขึ้น โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความพอใจของกลุ่มตัวอย่างนักท่องเที่ยวที่มาเที่ยวที่จังหวัดอุบลราชธานีรวมถึงสถานที่ต่างๆ โดยมีการเก็บข้อมูลจำนวน 202 ตัวอย่างและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม ซึ่งใช้ทั้งการวิเคราะห์แบบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ จากนั้นจึงใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบสอบถามในการศึกษาเส้นทางเดินทาง โดยการประยุกต์ใช้โมเดลการเดินทางของคนขาย เพื่อเสนอแนะเส้นทางในการท่องเที่ยวภายใต้สมมุติฐานช่วงเวลาจำกัดในจังหวัดอุบลราชธานี ผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปขยายผลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวต่อไป

คำสำคัญ: การวิจัยแบบผสม ปัญหาการเดินทางของคนขาย โลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยว จังหวัดอุบลราชธานี

ABSTRACT

Tourism nowadays plays a key role in both macro and micro economics for many countries including Thailand. In this study, we particularly examine a new discipline gaining popular from multi-disciplinarians called tourism logistics, which deals with applying techniques proved successful from industrial/production logistics to service/tourism sector. Initially, we investigate factors that impact satisfaction of tourists traveling to Ubonratchathani province including tourist locations by collecting 202 samples and analyzed using mixed methods research, which evaluates data based on both quantitative and qualitative aspects. Next, by using information related to preferred locations initially analyzed from the first part, we further analyze travel routings based on the mathematical model of travelling salesman problem (TSP) under limited time and provide suggestions for optimal routes in Ubonratchathani province. The outcome from this study can expectedly be used to enhance an effectiveness of tourism-logistic management in the future.

Keywords: Mixed methods research, Travelling salesman problem (TSP), Tourism logistics, Ubonratchathani province

1. บทนำ

การท่องเที่ยวถือเป็นส่วนหนึ่งในกลยุทธ์หลักของการพัฒนาประเทศในหลายๆประเทศ เพราะมีบทบาทสำคัญทั้งในระบบเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ (macro) และระบบเศรษฐกิจในระดับท้องถิ่น (micro) ซึ่งสามารถเพิ่มรายได้ให้กับประเทศ โดยประเทศไทยเองมีความพร้อมในแหล่งท่องเที่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของแต่ละท้องถิ่น และมีชื่อเสียงในระดับโลกซึ่งนับเป็นข้อได้เปรียบ และเป็นเหตุผลที่ทำให้นักท่องเที่ยวจำนวนมากเดินทางมาท่องเที่ยวในประเทศไทย รวมทั้งการเดินทางท่องเที่ยวภายในประเทศของคนไทยเอง ที่มีอัตราเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลดีต่อเศรษฐกิจของประเทศและเกิดการหมุนเวียนของเงินตราภายในประเทศ โดยสอดคล้องกับนโยบายการส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมท่องเที่ยวของประเทศไทยที่ใช้การท่องเที่ยวเป็นหนึ่งในกลไกหลักในแผนการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน [1-4]

โดยภาพรวมการเดินทางท่องเที่ยวของจังหวัดอุบลราชธานี ปี พ.ศ. 2558 มีจำนวนผู้มาเยี่ยมเยือนทั้งสิ้น 2,666,113 คน คิดเป็นร้อยละ 7.63 ของจำนวนผู้มาเยี่ยมเยือนในระดับภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีรายได้จากการท่องเที่ยวทั้งหมด 5,664.72 ล้านบาท โดยจากการสำรวจพฤติกรรมการเดินทางท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานีพบว่ามีความต้องการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวและกิจกรรมการท่องเที่ยว ให้มีความหลากหลาย สร้างอัตลักษณ์หรือจุดเด่น เพื่อดึงดูดนักท่องเที่ยวเช่น เส้นทางท่องเที่ยววัฒนธรรมลุ่มน้ำโขง เส้นทางท่องเที่ยวสายวัฒนธรรมอีสาน เป็นต้น นอกจากนี้จากข้อมูลแผนพัฒนากลุ่มจังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง ปี 2563-2564 มีการสนับสนุนโครงการในประเด็นยุทธศาสตร์ในการขยายตลาดการท่องเที่ยวเชิงคุณภาพในหลายๆโครงการ เช่นการปรับปรุงก่อสร้างเส้นทางคมนาคมเชื่อมโยงการท่องเที่ยวร่วมกับประเทศเพื่อนบ้าน การพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานและสิ่งอำนวยความสะดวกให้ได้มาตรฐานและอื่นๆ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถด้านการท่องเที่ยวของกลุ่มจังหวัดทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [5]

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเรื่องระบบโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยว (Tourism logistics - TL) ในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี โดยแนวคิดเรื่องโลจิสติกส์สำหรับการท่องเที่ยวเป็นการประยุกต์ใช้การจัดการของโลจิสติกส์เพื่อการขนส่งในภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในภาคบริการ โดยครอบคลุมถึงเรื่องการเชื่อมต่อในการเดินทางและการบริการที่พักระหว่างทางต่างๆ ซึ่งมีการเชื่อมโยงถึงการผลิตสินค้ามาขายนักท่องเที่ยว รวมถึงแหล่งวัตถุดิบในการผลิตสินค้าให้นักท่องเที่ยวเป็นต้น [5] โดยแสดงวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยได้ดังนี้ 1) เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์ปัจจุบันและปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี โดยใช้แบบสอบถาม (survey/questionnaire) ในการทำความเข้าใจปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความพอใจของนักท่องเที่ยว และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม (mixed methods research) โดยพิจารณาข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพพร้อมๆ กัน และ 2) เพื่อวิเคราะห์และแนะนำเส้นทางการเดินทางในช่วงเวลาที่กำหนดสำหรับนักท่องเที่ยว โดยใช้ข้อมูลสถานที่ที่ได้จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้น โดยเป็นการประยุกต์ใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) จากการประยุกต์ปัญหาการเดินทางของคนขาย (Travelling Salesman Problem - TSP) ในงานวิจัย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การจัดการโลจิสติกส์ (Logistics Management)

บทความทางด้านการบริหารจัดการระบบขนส่งและโลจิสติกส์รวมถึงการจัดการสินค้าคงคลังถูกใช้อย่างแพร่หลายในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมในห่วงโซ่อุปทานซึ่งหมายถึงกระบวนการวางแผน การลงมือและการควบคุมที่มีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพในทุกขั้นตอนการผลิต การขนส่งและการส่งมอบสินค้า โดยพิจารณากระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการจัดเก็บวัตถุดิบ (raw material) วัตถุดิบสำเร็จรูป (work in process) และสินค้าที่ผลิตเสร็จ (finished goods) ตลอดจนการ

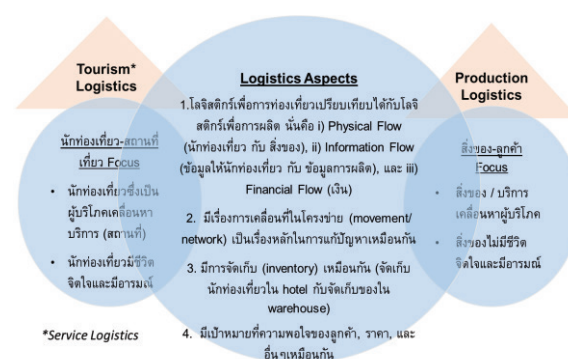
กระจายสินค้า การจัดการขนส่ง และการส่งมอบสินค้าให้ลูกค้า ทั้งนี้จุดมุ่งหมายหลักคือเพื่อให้ค่าใช้จ่ายต้นทุนต่ำสุด (efficiency) และตอบสนองอย่างรวดเร็วให้ลูกค้า (responsiveness) [6, 26] โดยการจัดการโลจิสติกส์ได้ถูกศึกษาและตีความหลากหลาย เช่นหมายถึงกระบวนการเคลื่อนย้ายสินค้าหรือบริการทั้งภาคการผลิตและภาคบริการ โดยโลจิสติกส์มีขอบข่ายความรับผิดชอบสูงซึ่งขึ้นซึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเท่านั้นแต่รวมถึงกิจกรรมโลจิสติกส์ที่เกี่ยวข้องไปทุกกิจกรรม [7] การจัดการโลจิสติกส์ยังหมายถึงส่วนหนึ่งของกระบวนการซัพพลายเชน (supply chain) เพื่อช่วยในการวางแผนการสนับสนุนการควบคุมการไหลอย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิผล [8] และครอบคลุมระบบที่เกี่ยวข้องกับช่องทางการจำหน่ายสินค้าหรือบริการ ซึ่งเป็นกิจกรรมเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายสินค้าและบริการจากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภค โดยที่กิจกรรมเหล่านี้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำไรหากสามารถลดต้นทุน และเพิ่มระดับการให้บริการเพื่อให้ผู้บริโภคได้รับความพึงพอใจเพิ่มมากขึ้น [9-10] เป็นต้น

ทั้งนี้ได้มีการศึกษาการจัดการโลจิสติกส์ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการเพิ่มศักยภาพทางเศรษฐกิจอย่างแพร่หลายทั้งในมุมมองของทางด้านการบริหาร (management) และทางวิศวกรรมที่เน้นการจัดการในภาคอุตสาหกรรม (industrial engineering) อย่างไรก็ตามจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการศึกษาที่เน้นการจัดการทางโลจิสติกส์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของภาคการผลิต โดยเป็นส่วนน้อยที่เน้นทางด้านภาคการบริการ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือภาคการท่องเที่ยว

2.2 โลจิสติกส์ด้านการท่องเที่ยว (Tourism Logistics)

โลจิสติกส์ด้านการท่องเที่ยวถือเป็นศาสตร์ใหม่โดยเป็นการนำแนวคิดและนำความสำเร็จทางด้านการจัดการโลจิสติกส์ในเชิงธุรกิจที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายเพื่อเข้ามาใช้กับแนวคิดด้านการบริการในการจัดการท่องเที่ยว ซึ่งเกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายแขนงทั้งการจัดการท่องเที่ยว (tourism management) และการ

จัดการโลจิสติกส์ (logistics management) โดยพิจารณารูปแบบการจัดการโลจิสติกส์ทางด้านการท่องเที่ยวที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำความเข้าใจถึงห่วงโซ่อุปทานของการท่องเที่ยวเนื่องจากแนวคิดและรูปแบบการจัดการโลจิสติกส์เป็นการบริหารจัดการการไหลเวียนภายในห่วงโซ่อุปทานที่ประกอบด้วยการจัดการทางกายภาพ (physical) การเงิน (financial) และสารสนเทศ (information) เพื่อให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด [11-13] โดยมุมมองด้านโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวสามารถมองได้หลายมุมที่เกี่ยวข้องกับนักวิชาการทางด้านโลจิสติกส์ ด้านการจัดการการท่องเที่ยว หรือด้านเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างระหว่างโลจิสติกส์การท่องเที่ยวและโลจิสติกส์การผลิตได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่าการไหลของ physical flow จะเปลี่ยนจากตัวหลักที่เป็นสินค้าในภาคการผลิตเป็นการไหลของนักท่องเที่ยวในภาคการบริการการท่องเที่ยว



รูปที่ 1 แสดงความแตกต่างระหว่าง production logistics กับ tourism logistics (ปรับใช้จาก [14])

นอกจากนี้ได้มีการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบทกับการขนส่งนักท่องเที่ยว อย่างไรก็ตามปัจจัยเหล่านี้ควรถูกนำมาปรับใช้โดยเพิ่มมุมมองเกี่ยวกับเรื่องของโลจิสติกส์ [14-18] และควรนำมาศึกษาถึงผลกระทบซึ่งอาจจะมากหรือน้อยตามประเภทของการท่องเที่ยวและพื้นที่ที่ทำการศึกษา ยกตัวอย่างเช่นการศึกษาจากทาง European Commission-EC [19] ซึ่งพิจารณาเรื่องการ

พัฒนาแหล่งท่องเที่ยวชุมชนนอกเมืองใหญ่ โดยจัดทำคู่มือการพัฒนาคุณภาพแหล่งท่องเที่ยวโดยครอบคลุมการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวนอกเมือง แหล่งท่องเที่ยวใจกลางเมือง และแหล่งท่องเที่ยวทางทะเล ซึ่งแบ่งจุดเด่นของแต่ละหมู่บ้านในแต่ละประเทศกรณีศึกษาตามการไหลเวียนทางด้านกายภาพ (physical) การเงิน (financial) และสารสนเทศ (information) เป็นต้น

3. เครื่องมือและระเบียบการทำวิจัย

3.1 การสร้างแบบสอบถาม (Survey)

เครื่องมือแรกที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและสร้างแบบสอบถามสำหรับเก็บข้อมูลจากนักท่องเที่ยวที่เดินทางมาท่องเที่ยวจังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นคำถามปลายปิด และคำถามปลายเปิดรวมทั้งหมด 20 คำถาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 แบบสอบถามแบบปลายปิด

แบบสอบถามแบบปลายปิด หรือ Closed-ended Form ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยคำถามและตัวเลือกรวม 15 ข้อ (ข้อ 1-15) ซึ่งเป็นตัวเลือกที่สร้างขึ้นจากการเก็บข้อมูลในการทบทวนวรรณกรรมต่างๆ โดยมีสามส่วนหลักในงานวิจัยนี้คือ

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปทางประชากรศาสตร์ เช่น เพศ อายุ รายได้เฉลี่ยต่อเดือน และภูมิลำเนา รวม 6 ข้อ

ส่วนที่ 2 ข้อมูลด้านพฤติกรรมการท่องเที่ยวของนักท่องเที่ยว เช่นการใช้จ่ายในการท่องเที่ยว การหาข้อมูลในการเลือกสถานที่ท่องเที่ยว รวม 8 ข้อ

ส่วนที่ 3 ข้อมูลที่เป็นการวัดระดับความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่เกี่ยวข้องกับการจัดการโลจิสติกส์ด้านการท่องเที่ยวทั้งหมดรวม 15 ปีจจัยรวม 1 ข้อ โดยเป็นปีจจัยที่มีการศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรม [20-21] จำนวน 12 ปีจจัยและเพิ่มเติมโดยผู้ทำวิจัยอีก 3 ปีจจัย โดยคำถามเป็นแบบมาตรวัดของลิเคิร์ต (Likert Scale) โดยมี 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด

3.1.2 แบบสอบถามแบบปลายเปิด

แบบสอบถามแบบปลายเปิด หรือ Open-ended Form ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้ตอบคำถาม สามารถเขียนตอบหรือแสดงความคิดเห็นได้อย่างอิสระซึ่งประกอบด้วยคำถามจำนวน 5 ข้อ โดยเป็นคำถามปลายเปิดเกี่ยวกับการเลือกลำดับความสำคัญของปีจจัย (ranking) ที่คาดว่าจะมีผลกระทบกับโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยว การเลือกสถานที่ท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี และข้อเสนอแนะในการพัฒนาและปรับปรุงแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี

ทั้งนี้ ผู้ทำวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามจากการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ และทำการหาค่าความเชื่อมั่นแบบ Cronbach [22] ดังแสดงในสมการที่ (1) ซึ่งพบว่าอยู่ที่ค่า 0.93 ซึ่งตีความได้ว่าแบบสอบถามที่ใช้มีความเที่ยงตรง (validity) และมีความเชื่อมั่น (Reliability) สูงมาก นอกจากนี้ได้ทำการกำหนดกลุ่มตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลแบบสุ่ม (Random) โดยใช้สูตรการคำนวณขนาดตัวอย่างของ Cochran [26] โดยกำหนดสัดส่วนที่ต้องการจะสุ่มร้อยละ 85 และพิจารณาความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ตามสมการที่ (2) ซึ่งคำนวณกลุ่มตัวอย่างของผู้บริโภคได้เท่ากับ 195.5 ตัวอย่าง โดยในการเก็บข้อมูลจริง ได้ทำการเก็บทั้งสิ้น 202 ตัวอย่าง

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s^2} \right) \quad (1)$$

โดยที่ α แทนค่าความเชื่อมั่น; K แทนจำนวนข้อคำถามที่สนใจ; s_i^2 แทนผลรวมความแปรปรวนแต่ละข้อ และ s^2 แทนความแปรปรวนของคะแนนรวม

$$N = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (2)$$

โดยที่ N คือจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ; P คือสัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม; Z คือค่าการกระจายแบบปกติมาตรฐานที่ 0.05; d คือค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้

3.2 การวิเคราะห์การวิจัยแบบผสม (Mixed Methods)

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม (mixed methods research) ในงานวิจัยนี้เป็นการใช้ทั้งการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) เพื่อวิเคราะห์ผลพร้อมๆ กัน (concurrent) ทั้งนี้การวิเคราะห์แบบการวิจัยแบบผสมจะใช้หลักการการผสมผสาน (mix) การวิเคราะห์กันโดยอาจจะเกิดในช่วงที่มีการเก็บข้อมูล (data collection) และ/หรือช่วงที่มีการวิเคราะห์ข้อมูล (data analyses) โดยมุมมองของการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกได้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (quantitative analysis) เช่น การวิเคราะห์สถิติเชิงบรรยาย ในขณะที่การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) เช่น การสัมภาษณ์ การใช้ open questions เป็นต้น

นอกจากนี้โมเดลในการทำการวิจัยแบบผสมแบ่งได้เป็นสองแบบหลักๆ [23-24] นั่นคือแบบ sequential diagram เช่นการทำการวิเคราะห์แบบ 1) ‘QUAN -> qual’ (ทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลด้วย quantitative จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลต่อด้วย qualitative) หรือแบบ 2) ‘QUAL -> quan’ (ทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลด้วย qualitative จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลต่อด้วย quantitative) นอกจากนี้ แบบ concurrent diagram เป็นการวิเคราะห์ในลักษณะที่เป็น ‘QUAN + QUAL’ โดยทำการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลทั้งแบบ quantitative และ qualitative ไปพร้อมๆ กัน แล้วจึงเปรียบเทียบผลระหว่างกัน ดังที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3 โมเดลปัญหาการเดินทางของคนขาย (TSP)

ส่วนต่อมาของงานวิจัย เป็นการนำผลการวิเคราะห์ปัจจัยและสถานที่จากแบบสอบถามส่วนแรก รวมถึงข้อมูลระยะเวลาและระยะทางเพื่อทำการวิเคราะห์เส้นทางในการเดินทางของนักท่องเที่ยว โดยประยุกต์ใช้โมเดล TSP สำหรับ n สถานที่ โดยปัญหา TSP คือการหาระยะทางของการเดินทางที่น้อยที่สุด โดยที่แต่ละเมืองจะถูกไปเยือนครั้งหนึ่งแล้วกลับมาที่เมืองเริ่มต้นที่ออกเดินทาง ซึ่งอธิบาย

ได้ดังนี้

3.3.1 ดัชนี

Set I: สถานที่เริ่มต้น $i; i = 1, \dots, n$

Set J: สถานที่ปลายทาง $j; j = 1, \dots, n$

3.3.2 พารามิเตอร์

d_{ij} คือระยะทาง หรือระยะเวลาในการเดินทางจากสถานที่ i ไปสถานที่ j ; โดย $d_{ij} = \infty$ เมื่อ $i = j$

n คือจำนวนสถานที่ทั้งหมดในเส้นทาง

3.3.3 ตัวแปรตัดสินใจ

X_{ij} คือตัวแปร binary สำหรับสถานที่ที่เดินทางไป ($X_{ij} = 1$) หรือสถานที่ที่ไม่เดินทางไป ($X_{ij} = 0$)

U_i คือตัวแปร Auxiliary สำหรับสถานที่เริ่มต้น i

U_j คือตัวแปร Auxiliary สถานที่ปลายทาง j

3.3.4 ฟังก์ชันเป้าหมาย

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij} \quad (3)$$

3.3.5 สมการข้อจำกัด

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad ; \forall i=1, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad ; \forall j=1, \dots, n \quad (5)$$

$$U_i - U_j + nX_{ij} \leq n-1 \quad ; \forall i=2, \dots, n \\ ; \forall j=2, \dots, n \\ ; i \neq j \quad (6)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad ; \forall i, j \quad (7)$$

$$U_j \geq 0 \quad ; \forall j \quad (8)$$

ทั้งนี้ ฟังก์ชันเป้าหมายที่ (3) แสดงวัตถุประสงค์คือ ระยะทางหรือเวลาทั้งหมดในการเดินทางที่น้อยที่สุด สมการข้อจำกัดที่ (4) คือข้อจำกัดว่าการเดินทางออกจากสถานที่ i ใดๆ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 (นั่นคือ ออกจากสถานที่ ใดๆ ได้เพียงหนึ่งครั้ง) ในขณะที่สมการข้อจำกัดที่ (5) คือ ข้อจำกัดว่าการเดินทางเข้าสถานที่ j ใดๆ ได้เพียงหนึ่งครั้ง สมการข้อจำกัดที่ (6) เป็นสมการป้องกันการเกิดการเดินทางย่อย (subtour) โดยที่การเกิดการเดินทางย่อย

หมายถึงการเดินทางที่เริ่มต้นจากสถานที่ใดๆ แล้วเดินทางไม่ครบทุกเมืองที่ต้องการทำให้เกิดการเดินทางย้อนขึ้น นอกจากนี้ผลการซื้อจำกัดที่ (7)-(8) แสดงข้อจำกัดเกี่ยวกับตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาคำตอบจากโมเดล TSP ได้โดยใช้วิธี Exact และวิธี Heuristics

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ปัจจัย

ผลการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างของนักท่องเที่ยวที่ตอบแบบสอบถาม จำนวน 202 ตัวอย่างในช่วงเดือน ม.ค. – พ.ค. 2560 โดยทำการเก็บข้อมูลตามแหล่งเชื่อมต่อการเดินทาง (เช่น สนามบิน สถานีรถไฟ บริษัทขนส่ง) และจากแหล่งท่องเที่ยวหลักๆ ในจังหวัดอุบลราชธานี โดยสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

4.1.1 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามส่วนที่ 1 (ข้อมูลทั่วไป) รวม 6 ข้อ

- ผู้ตอบแบบสอบถามเป็นเพศชายร้อยละ 45 และเพศหญิงร้อยละ 55
- ผู้ตอบแบบสอบถามที่มีอายุ 20-29 ปี คิดเป็นร้อยละ 47.0 รองลงมาคืออายุน้อยกว่า 19 ปีคิดเป็นร้อยละ 18.2 อายุ 30-39 ปีคิดเป็นร้อยละ 14.6 อายุระหว่าง 40-49 ปีคิดเป็นร้อยละ 10.6 อายุระหว่าง 50-60 ปี คิดเป็นร้อยละ 6.6 และอายุมากกว่า 60 ปีคิดเป็นร้อยละ 3.0
- ผู้ตอบแบบสอบถามมีการศึกษาระดับปริญญาตรีคิดเป็นร้อยละ 50.8 รองลงมาคือการศึกษาในระดับต่ำกว่าปริญญาตรีคิดเป็นร้อยละ 38.2 และการศึกษาในระดับสูงกว่าปริญญาตรีคิดเป็นร้อยละ 11.0 ตามลำดับ
- ผู้ตอบแบบสอบถามมีอาชีพนักศึกษาคิดเป็นร้อยละ 37.1 รองลงมาคือธุรกิจส่วนตัวคิดเป็นร้อยละ 16.9 อาชีพพนักงานบริษัทเอกชนคิดเป็นร้อยละ 16.3 อาชีพข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจคิดเป็นร้อยละ 12.5 อาชีพรับจ้างทั่วไปคิดเป็นร้อยละ 9.6 และอาชีพอื่นๆ ร้อยละ 5.1
- ผู้ตอบแบบสอบถามมีรายได้ไม่เกิน 10,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 46.7 มีรายได้ 10,001-20,000 บาท คิดเป็นร้อยละ 24.3 รายได้ระหว่าง 20,001-30,000 บาท

คิดเป็นร้อยละ 13.6 รายได้ 50,000 บาทขึ้นไปคิดเป็นร้อยละ 9.5 รายได้ระหว่าง 30,001-40,000 บาท และระหว่าง 40,001-50,000 บาท อย่างละร้อยละ 3.0

- ผู้ตอบแบบสอบถามมาจากจังหวัดอื่นๆ (เช่น ยโสธร อำนาจเจริญ บุรีรัมย์ หนองคาย) คิดเป็นร้อยละ 54.1 รองลงมาคือจังหวัดอุบลราชธานีหรือคนในพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 36.2 เป็นชาวต่างชาติคิดเป็นร้อยละ 6.1 และมาจากกรุงเทพมหานครคิดเป็นร้อยละ 3.6 ตามลำดับ

4.1.2 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามส่วนที่ 2 (พฤติกรรมการเดินทางและท่องเที่ยว) รวม 8 ข้อ

- ผู้ตอบแบบสอบถามมีประสบการณ์เดินทางมาท่องเที่ยว 2-10 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 82.2 รองลงมาคือมาเที่ยวครั้งแรกคิดเป็นร้อยละ 12.6 และมาเที่ยวมากกว่า 10 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 5.2 ตามลำดับ
- ผู้ตอบแบบสอบถามได้รับข้อมูลข่าวสารจากประสบการณ์ส่วนตัวหรือคนใกล้ชิดคิดเป็นร้อยละ 43.7 รองลงมาคือจากสื่ออินเทอร์เน็ตคิดเป็นร้อยละ 33.2 นิตยสารท่องเที่ยวคิดเป็นร้อยละ 7.7 โทรทัศน์/วิทยุ คิดเป็นร้อยละ 6.6 อื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 4.5 และป้ายโฆษณาหรือหนังสือพิมพ์คิดเป็นร้อยละ 4.2 ตามลำดับ
- ผู้ตอบแบบสอบถามเดินทางมาโดยใช้รถยนต์ส่วนตัวคิดเป็นร้อยละ 51.3 รองลงมาคือรถประจำทางคิดเป็นร้อยละ 20.9 อื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 17.0 รถเช่าคิดเป็นร้อยละ 3.9 และรถรับจ้างและรถแท็กซี่คิดเป็นร้อยละ 3.5
- ผู้ตอบแบบสอบถามใช้ระยะเวลาในการเที่ยว 1 วันคิดเป็นร้อยละ 37.9 รองลงมาใช้ระยะเวลาในการเที่ยว 2 วันคิดเป็นร้อยละ 30.8 ระยะเวลาในการเที่ยว 3-7 วันคิดเป็นร้อยละ 19.7 และระยะเวลาในการท่องเที่ยวมากกว่า 1 สัปดาห์คิดเป็นร้อยละ 11.6 ตามลำดับ
- ผู้ตอบแบบสอบถามเดินทางมาเที่ยวกับเพื่อนคิดเป็นร้อยละ 44.3 เดินทางมากับครอบครัวคิดเป็นร้อยละ 36.3 มาคนเดียวร้อยละ 12.4 มากับบริษัทและมากับทัวร์ร้อยละ 3.0 และ อื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 1.0 ตามลำดับ
- ผู้ตอบแบบสอบถามวางแผนการใช้จ่ายเงินในการท่องเที่ยวไม่น้อยกว่า 3,000 บาทคิดเป็นร้อยละ 44.0

การใช้จ่ายเงินระหว่าง 3,000-4,000 บาทคิดเป็นร้อยละ 23.0 มากกว่า 5,000 บาทคิดเป็นร้อยละ 18.0 และ 4,000-5,000 บาทคิดเป็นร้อยละ 15.0 ตามลำดับ

- ผู้ตอบแบบสอบถามเดินทางมาพักผ่อนคิดเป็นร้อยละ 55.9 เดินทางมาทำงานและท่องเที่ยวร้อยละ 28.4
- เพื่อเดินทางต่อไปยังจังหวัดใกล้เคียงคิดเป็นร้อยละ 5.9 อื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 5.5 และเพื่อเดินทางต่อไปยังประเทศใกล้เคียงคิดเป็นร้อยละ 4.2 ตามลำดับ

4.1.3 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามส่วนที่ 3 (ความพึงพอใจของนักท่องเที่ยว)

ผลจากการวิเคราะห์ความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวต่อองค์ประกอบของโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี โดยแยกตาม 15 ปัจจัยแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งภาพรวมอยู่ที่ระดับคะแนนเฉลี่ย 3.81 จาก 5 ในระดับพอใจมาก ทั้งนี้ปัจจัยที่ได้ระดับคะแนนความพึงพอใจสูงสุดคือปัจจัยที่ 1 (ประเภทยานพาหนะที่มีให้เลือก) และ 9 (การดึงดูดนักท่องเที่ยว) ในขณะที่ปัจจัยที่ได้รับความพึงพอใจน้อยที่สุดคือปัจจัยที่ 8 (การใช้พลังงานทดแทน) และ 14 (การจัดโปรแกรมขึ้นท่องเที่ยวของจังหวัด)

นอกจากนี้ หากทำการวิเคราะห์โดยแยกระดับความพึงพอใจแบ่งตามภูมิฐานะ ตามอายุ และตามระดับการศึกษาแล้ว พบว่าคะแนนความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวชาวต่างชาติ (3.73) และจากจังหวัด กทม. (3.58) มีน้อยกว่าความพึงพอใจของคนในพื้นที่ (3.87) และพื้นที่จังหวัดใกล้เคียง (3.77) นอกจากนี้พบว่าผู้สูงอายุตั้งแต่ 40 ปีขึ้นไป โดยเฉพาะช่วงอายุ 50-59 มีความพึงพอใจ (3.53) น้อยที่สุดกว่ากลุ่มอายุอื่นๆ (> 3.67) และพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามที่มีการศึกษาสูงกว่าระดับปริญญาตรีมีความพอใจ (3.77) น้อยกว่ากลุ่มที่การศึกษาต่ำกว่า (> 3.82) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยงานที่มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงปัจจัยโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวควรพิจารณาถึงกลุ่มนักท่องเที่ยวนอกพื้นที่ กลุ่มผู้สูงอายุ และกลุ่มที่มีการศึกษาในระดับสูงกว่าปริญญาตรี ซึ่งอาจมีประสบการณ์ในการเดินทางที่อื่นๆ

ตารางที่ 1 แสดงความพึงพอใจต่อปัจจัยโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวในอุบลราชธานีจากมากไปน้อย

เลข อ้างอิง ปัจจัย	ปัจจัยปัจจัยโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยว	ค่าเฉลี่ย (มากไป น้อย)
1	ประเภทยานพาหนะที่มีให้เลือก, เส้นทางที่เปิดเดินทางและการบริการ	4.07
9	การดึงดูดนักท่องเที่ยว, สถานที่ท่องเที่ยวสำคัญ, เทศกาล	4.07
7	ความปลอดภัยในการเดินทาง ปราศจากอุบัติเหตุ	3.96
2	สถานที่และเวลาจำหน่ายตั๋ว ที่ตั้งสนามบิน ขส. สถานีรถไฟ	3.94
3	การให้ข้อมูลข่าวสารที่ถูกต้องแม่นยำ รวดเร็วในการช่วยวางแผนเดินทาง	3.93
15	สภาพแวดล้อมของสถานที่พัก	3.88
10	ถนนที่อำนวยความสะดวกให้คนเดินเท้า, การมีถนนคนเดิน	3.83
13	ความเหมาะสมกับค่าใช้จ่ายในการเดินทาง	3.79
11	สถานที่จัดไว้สำหรับซื้อของฝาก, จุดพักรถ	3.78
12	การจัดเส้นทางผ่านสถานที่น่าสนใจในการเดินทาง การจัดกิจกรรมบนยานพาหนะ	3.73
4	ตารางเวลาในการเดินทางหรืออื่นๆ, การตรงต่อเวลา	3.70
6	การจัดให้บริการ ความสะอาดสบายในการเดินทาง เช่น เบาะนั่ง ช่องเก็บขยะ	3.68
5	การเอาใจใส่นักท่องเที่ยว ความสะอาดและถูกสุขลักษณะของห้องน้ำตามจุดเดินทาง	3.66
8	การใช้พลังงานทดแทน พลังงานสะอาดในการเดินทาง การไม่ก่อให้เกิดเสียงดัง	3.59
14	การจัดโปรแกรมขึ้นท่องเที่ยวของจังหวัด	3.59
ค่าเฉลี่ยรวม		3.81

4.1.4 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามจัดลำดับและปลายเปิด

ในส่วนของการถามปลายเปิด โดยเน้นที่การเลือกลำดับความสำคัญของปัจจัยสามลำดับแรกๆ ที่ผู้ตอบแบบสอบถามแต่ละคนคิดว่าสำคัญมากที่สุดในการให้บริการจากด้านทางผู้ปลายทาง (โลจิสติกส์) ด้านการท่องเที่ยว จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการนับ

ของบอร์ดา (Borda count [25]) โดยลำดับที่เลือกลำดับแรกคะแนนสูงกว่าลำดับที่เลือกรองลงมาและลำดับที่สามซึ่งคำนวณเป็นค่าน้ำหนักของปัจจัยได้ดังตารางที่ 2 โดยปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด 3 ปัจจัยแรกคือปัจจัยที่ 7 (ความปลอดภัยในการเดินทางที่ปราศจากอุบัติเหตุ) ปัจจัยที่ 1 (ประเภทยานพาหนะที่มีให้เลือกและเส้นทางที่เปิดเดินทาง) และปัจจัยที่ 3 (การให้ข้อมูลข่าวสารที่ถูกต้องแม่นยำ และรวดเร็วในการวางแผนเดินทาง) ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญปัจจัยด้านโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวในอุบลราชธานีจากมากไปน้อย

เลข อ้างอิง ปัจจัย	ปัจจัยปัจจัยโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยว	น้ำหนัก (มากไป น้อย)
7	ความปลอดภัยในการเดินทาง ปราศจากอุบัติเหตุ	0.15
1	ประเภทยานพาหนะที่มีให้เลือก, เส้นทางที่เปิดเดินทางและการบริการ	0.13
3	การให้ข้อมูลข่าวสารที่ถูกต้องแม่นยำ รวดเร็วในการช่วยวางแผนเดินทาง	0.11
9	การดึงดูดนักท่องเที่ยว, สถานที่ท่องเที่ยวสำคัญ, เทศกาล	0.11
5	การเอาใจใส่นักท่องเที่ยว ความสะอาดและถูกสุขลักษณะของห้องน้ำตามจุดเดินทาง	0.10
4	ตารางเวลาในการเดินทางหรืออื่นๆ, การตรงต่อเวลา	0.08
15	สภาพแวดล้อมของสถานที่พัก	0.06
2	สถานที่และเวลาจำหน่ายตั๋ว ที่ตั้งสนามบิน ขบขส. สถานีรถไฟ	0.05
6	การจัดให้บริการ ความสะอาดสบายในการเดินทาง เช่น เบาะนั่ง ช่องหยึดเท้า	0.05
11	สถานที่จัดไว้สำหรับซื้อของฝาก, จุดพักรถ	0.04
13	ความเหมาะสมกับค่าใช้จ่ายในการเดินทาง	0.04
14	การจัดโปรแกรมชั้นท่องเที่ยวของจังหวัด	0.04
10	ถนนที่อำนวยความสะดวกให้คนเดินเท้า, การมีถนนคนเดิน	0.03
8	การใช้พลังงานทดแทน พลังงานสะอาดในการเดินทาง การไม่ก่อให้เกิดเสียงดัง	0.01
12	การจัดเส้นทางผ่านสถานที่ที่น่าสนใจในการเดินทาง การจัดกิจกรรมบนยานพาหนะ	0.01
ผลรวมค่าน้ำหนัก		1.00

นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์ส่วนของข้อเสนอแนะ โดยทำการวิเคราะห์เนื้อหา (content analysis) พบว่ามีปัญหาที่เจอและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงการจัดการระบบการบริการจากต้นทางสู่ปลายทาง (โลจิสติกส์) เพื่อการท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานี โดยสามารถวิเคราะห์ได้เป็น 7 ประเภทหลักๆ (clusters) ดังตารางที่ 3 ซึ่งปัญหาที่ผู้ตอบแบบสอบถามอยากให้การแก้ไขมากที่สุดตามหลักการพาเรโต (80/20) คือเรื่องของความสะดวกในการเดินทางด้วยตนเองระหว่างสถานที่รวมถึงสภาพถนน (ร้อยละ 50.8) เรื่องความสะอาดของสถานที่ (ร้อยละ 13.3) เรื่องการเชื่อมโยงของการขนส่ง (ร้อยละ 13.3) และเรื่องข้อมูลข่าวสารช่วยในการเดินทาง (ร้อยละ 5.5) ตามลำดับ

โดยผลการวิเคราะห์การเลือกสถานที่ท่องเที่ยวที่ประทับใจในจังหวัดอุบลราชธานีจากคำถามปลายเปิดพบว่า 10 อันดับแรกคือ เขื่อนสิรินธร (ร้อยละ 11.99) ผาแต้ม (ร้อยละ 10.55) สามพันโบก (ร้อยละ 7.95) หาดคูเดื่อ (ร้อยละ 5.78) วัดภูพร้าว (ร้อยละ 5.35) วัดพระธาตุหนองบัว (ร้อยละ 4.77) ผาชนะใด (ร้อยละ 2.89) หุ่นศรีเมือง (ร้อยละ 2.75) ค่านช่องเม็ก (ร้อยละ 2.60) และวัดถ้ำคูหาสวรรค์ (ร้อยละ 2.60) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดง cluster ข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุง

Cluster	หัวข้อ (Theme) ข้อเสนอแนะการปรับปรุง	ร้อยละ (มากไปน้อย)
1	ความสะดวกในการเดินทางด้วยตนเองระหว่างสถานที่ เช่น สภาพถนน การมีสถานที่จอดรถเพียงพอ	50.8
2	ความสะอาดของห้องน้ำและที่พักต่างๆ ควรมีจำนวนที่เพียงพอกับนักท่องเที่ยว	13.3
3	การเชื่อมโยงการขนส่งสาธารณะ	13.3
4	อื่นๆ	10.2
5	ข้อมูลข่าวสาร การเดินทางที่ชัดเจน	5.5
6	จำนวนตัวเลือกและข้อมูลเกี่ยวกับร้านอาหารและโรงแรมที่พัก	3.9
7	เพิ่มการกำจัดขยะ/ จำนวนถังขยะ	3.1

4.2 ผลการวิเคราะห์เส้นทางที่ดีที่สุดด้วย TSP

จากข้อมูลผลการเลือกสถานที่ท่องเที่ยวที่ประทับใจ ในจังหวัดอุบลราชธานี 10 อันดับแรกที่ได้จากการ วิเคราะห์แบบสอบถามข้างต้น ขั้นตอนต่อมาเป็นการ วิเคราะห์เส้นทางโดยประยุกต์ใช้โมเดลปัญหา TSP

ภายใต้ระยะเวลาเดินทางจำกัด โดยตารางที่ 4 แสดงข้อมูล ตารางจุดเริ่มต้น-จุดสิ้นสุด (Origin-Destination : OD Matrix) ซึ่งทำการเก็บข้อมูลในหน่วยกิโลเมตร โดย จุดเริ่มต้นและสิ้นสุดคือ A สถานีรถไฟ; B บริษัทขนส่ง; และ C สนามบินนานาชาติอุบลราชธานี ตามลำดับ

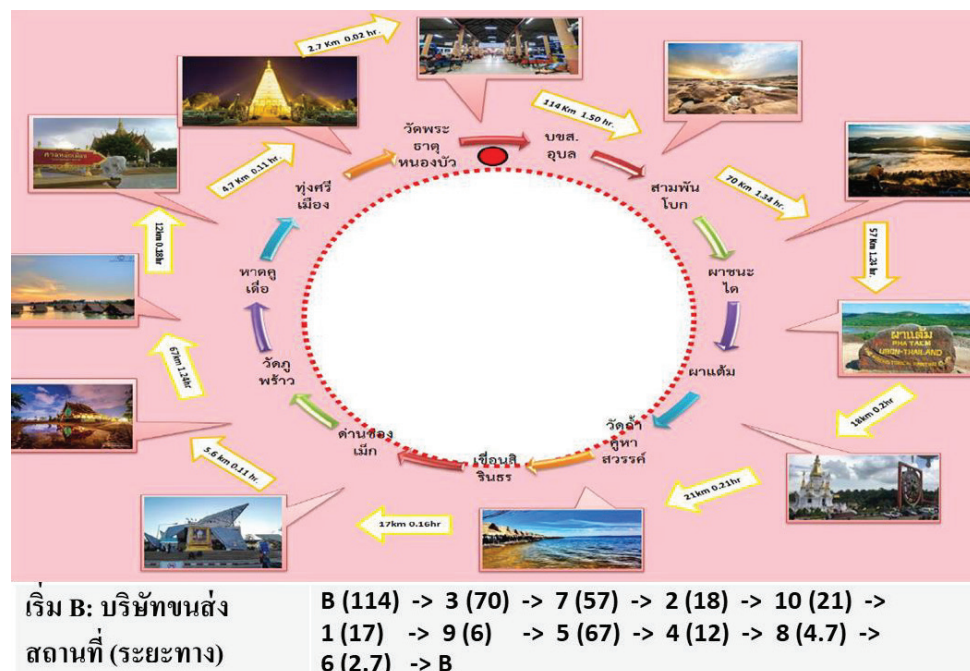
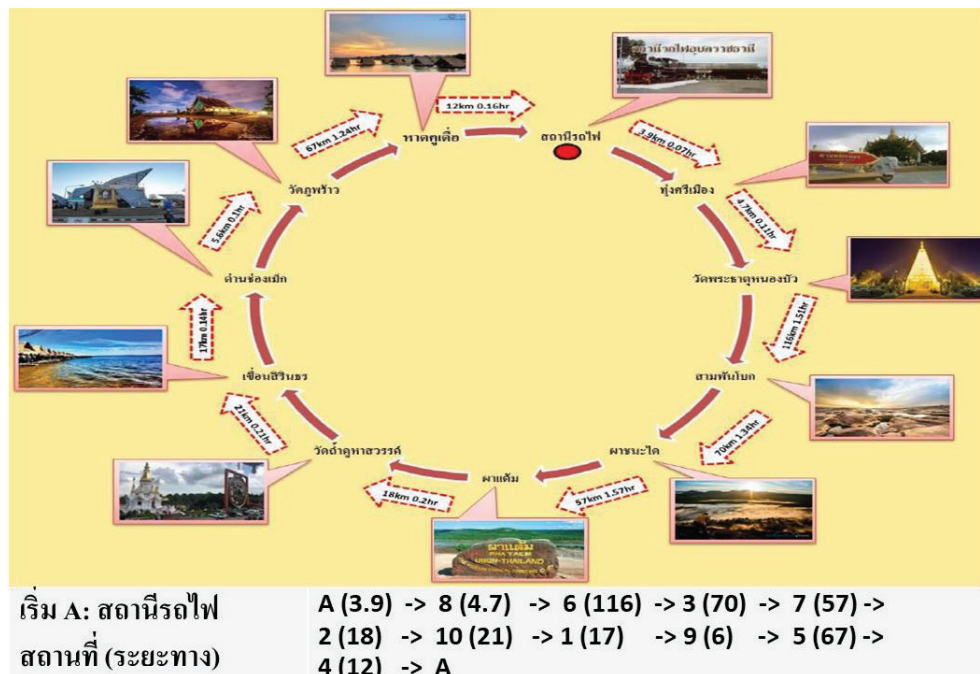
ตารางที่ 4 แสดงระยะทาง O-D matrix ในหน่วยกิโลเมตรในการเดินทางจากจุดเริ่มต้นไปยังสถานที่ท่องเที่ยวทั้ง 10 แห่ง

	A*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A*	0	73	87	121	12	88	8.4	138	3.9	87	75
1	73	0	38	97	81	15	79	86	75	17	21
2	87	38	0	68	99	42	97	57	93	44	18
3	121	97	68	0	126	101	116	70	119	103	78
4	12	81	99	126	0	67	97	101	12	98	86
5	88	15	42	101	67	0	95	143	93	6	28
6	8.4	79	97	116	97	95	0	143	4.7	93	81
7	138	86	57	70	101	143	143	0	141	92	66
8	3.9	75	93	119	12	93	4.7	141	0	90	78
9	87	17	44	103	98	6	93	92	90	0	27
10	75	21	18	78	86	28	81	66	78	27	0
	B*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B*	0	77	92	114	13	90	2.7	141	5.9	92	79
1	77	0	38	97	81	15	79	86	75	17	21
2	92	38	0	68	99	42	97	57	93	44	18
3	114	97	68	0	126	101	116	70	119	103	78
4	13	81	99	126	0	67	97	101	12	98	86
5	90	15	42	101	67	0	95	143	93	6	28
6	2.7	79	97	116	97	95	0	143	4.7	93	81
7	141	86	57	70	101	143	143	0	141	92	66
8	5.9	75	93	119	12	93	4.7	141	0	90	78
9	92	17	44	103	98	6	93	92	90	0	27
10	79	21	18	78	86	28	81	66	78	27	0
	C*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C*	0	74	90	115	14	88	5.9	142	3	89	77
1	74	0	38	97	81	15	79	86	75	17	21
2	90	38	0	68	99	42	97	57	93	44	18
3	115	97	68	0	126	101	116	70	119	103	78
4	14	81	99	126	0	67	97	101	12	98	86
5	88	15	42	101	67	0	95	143	93	6	28
6	5.9	79	97	116	97	95	0	143	4.7	93	81
7	142	86	57	70	101	143	143	0	141	92	66
8	3	75	93	119	12	93	4.7	141	0	90	78
9	89	17	44	103	98	6	93	92	90	0	27
10	77	21	18	78	86	28	81	66	78	27	0

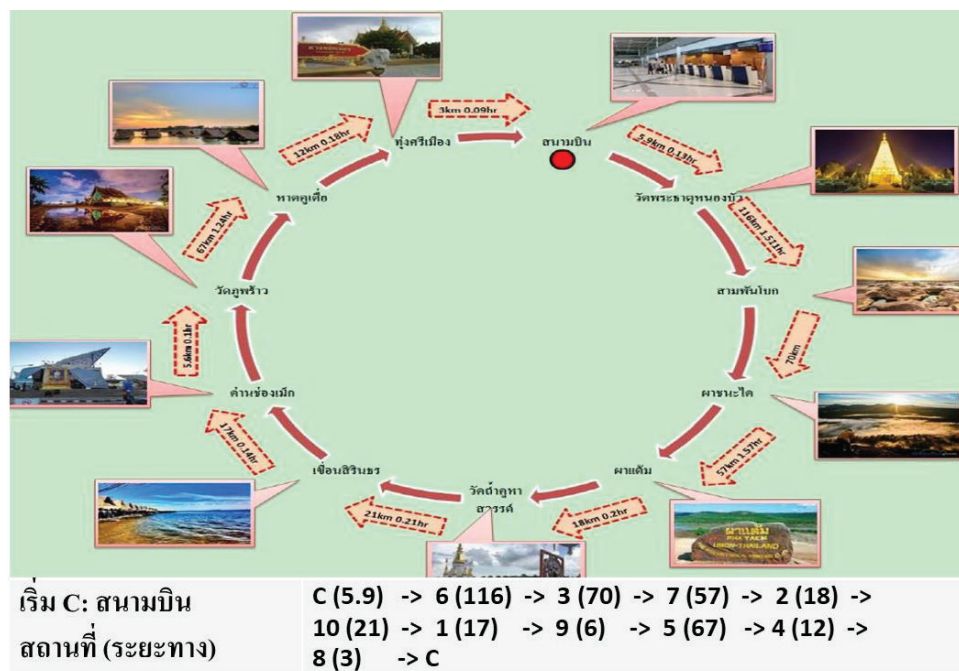
หมายเหตุ A* คือจุดเริ่มต้นและปลายทางของสถานีรถไฟ; B* คือจุดเริ่มต้นและปลายทางของบริษัทขนส่ง; C* คือจุดเริ่มต้นและ ปลายทางของสนามบินอุบลราชธานี; Code 1. เขื่อนสิรินธร 2. ผาแต้ม 3. สามพันโบก 4. หาดกุเอื้อ 5. วัดภูพร้าว 6. วัดพระธาตุ หนองบัว 7. ผาชนะไค 8. หุ่นศรีเมือง 9. ด่านช่องเม็ก และ 10. วัดถ้ำภูผาสวรรค์ ตามลำดับ

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ด้วย TSP โดยใช้โปรแกรม Excel Solver แสดงได้ดังรูปที่ 2 สำหรับเส้นทางการท่องเที่ยวที่ใช้ระยะทางน้อยที่สุดเมื่อเริ่มเดินทางและสิ้นสุดจากจุด A สถานีรถไฟ พบว่าระยะทางทั้งหมดในการเดินทางน้อยที่สุดคือ 392.6 กิโลเมตร นอกจากนี้

เมื่อเปลี่ยนจุดเริ่มและจุดสิ้นสุดเป็นจุด B (บริษัทขนส่ง – บขส.) พบว่าระยะทางที่น้อยที่สุดคือ 389.4 กิโลเมตร และจุด C (สนามบินนานาชาติอุบลราชธานี) คือ 392.9 กิโลเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 2 แสดงผลการจัดเส้นทางและระยะทางในการเดินทาง



รูปที่ 2 (ต่อ) แสดงผลการจัดเส้นทางและระยะทางในการเดินทาง

นอกจากนี้ หากทำการวิเคราะห์การเดินทางภายใต้เวลาจำกัด โดยทำการแปลงข้อมูล O-D matrix ของระยะทางจากหน่วยกิโลเมตรข้างต้น เป็นข้อมูลเวลาเดินทางในหน่วยชั่วโมง โดยใช้โปรแกรม Google Map จะพบว่าเส้นทางการเดินทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุดไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นทางที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด เมื่อพิจารณาสภาพการจราจรด้วย ในช่วงเวลานั้นๆ

ผลการวิเคราะห์ โดยมีสมมุติฐานคือหยุดพักแต่ละสถานที่ท่องเที่ยวเป็นเวลาแห่งละ 2 ชั่วโมง และการเดินทางและท่องเที่ยวในแต่ละวันไม่เกิน 8 ชั่วโมง พบว่าสามารถแนะนำการจัดเส้นทางเดินทางสำหรับกรณีที่มีเวลาท่องเที่ยว 1 วัน และ 2 วันได้ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยมีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ A หรือ B หรือ C ยกตัวอย่าง เช่นการเดินทางท่องเที่ยวหนึ่งแห่งใน 1 วันจากจุดเริ่มต้นไป 3 (สามพันโบก) ใช้เวลา 2.1 ชั่วโมง โดยทำการหยุดพัก 2 ชั่วโมง จากนั้นเดินทางกลับอีก 2.1 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 6.2 ชั่วโมง เช่นเดียวกันการเดินทางสองแห่งใน 1 วันจากจุดเริ่มต้นไป 1 (เขื่อนสิรินธร) ใช้เวลา 1.1 ชั่วโมง โดยหยุดพัก 2 ชั่วโมง จากนั้นไป 2 (ผาแต้ม) ใช้เวลา 0.7 ชั่วโมง หยุดพัก 2 ชั่วโมง และเดินทางกลับอีก 1.5 ชั่วโมง

รวมทั้งสิ้น 7.3 ชั่วโมง เป็นต้น โดยสามารถวิเคราะห์ลักษณะการเดินทางสำหรับ 2 วันได้ในทำนองเดียวกัน เช่นจากจุดเริ่มต้นไป 1 (เขื่อนสิรินธร) ใช้เวลา 1.1 ชั่วโมง โดยหยุดพัก 2 ชั่วโมง จากนั้นไป 2 (ผาแต้ม) ใช้เวลา 0.7 ชั่วโมง หยุดพัก 2 ชั่วโมง จากนั้นไป 3 (ตามพันโบก) ใช้เวลา 1 ชั่วโมง พัก 2 ชั่วโมง และไป 4 (หาดคูเคื่อ) ใช้เวลา 2 ชั่วโมง พัก 2 ชั่วโมง และไป 8 (ทุ่งศรีเมือง) ใช้เวลา 0.3 ชั่วโมง พัก 2 ชั่วโมง และเดินทางกลับอีก 0.1 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 15.2 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการจัดเส้นทางภายใต้เวลาเดินทางจำกัด

เวลาทั้งหมด	การจัดเส้นทาง (เวลาเดินทาง + เวลาหยุดพัก)
1 วัน	จุดเริ่ม – 3 – จุดสิ้นสุด
1 วัน	จุดเริ่ม – 1 – 2 – จุดสิ้นสุด
1 วัน	จุดเริ่ม – 9 – 5 – 1 – จุดสิ้นสุด
2 วัน	จุดเริ่ม – 1 – 2 – 3 – 4 – 8 – จุดสิ้นสุด
2 วัน	จุดเริ่ม – 9 – 5 – 1 – 8 – 6 – 4 – จุดสิ้นสุด

หมายเหตุ : จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด คือ A หรือ B หรือ C

5. บทสรุปและงานวิจัยในอนาคต

ในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดการโลจิสติกส์ด้านการท่องเที่ยวโดยใช้กรณีศึกษาของจังหวัดอุบลราชธานี โดยเป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือต่างๆ ที่ช่วยในการพัฒนาระบบโลจิสติกส์ในภาคอุตสาหกรรมมาใช้ปรับปรุงและพัฒนาการท่องเที่ยวให้ดีขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ปัญหาแยกเป็นสองส่วน วัตถุประสงค์คือ 1) ศึกษาเกี่ยวกับความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวโดยพิจารณาจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโลจิสติกส์ด้านการท่องเที่ยว และ 2) ศึกษาการแนะนำเส้นทางท่องเที่ยวโดยใช้ข้อมูลสถานที่ในจังหวัดอุบลราชธานี ที่ได้จากส่วนแรกของงานวิจัย ซึ่งผลการศึกษาโดยการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม (mixed methods) สรุปผลได้ดังนี้

- นักท่องเที่ยวส่วนใหญ่มีทั้งเพศหญิงและเพศชาย จำนวนใกล้เคียงกัน มีช่วงอายุระหว่าง 20-29 ปี อาชีพ นิสิต/นักศึกษา มีระดับการศึกษาปริญญาตรี มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนไม่เกิน 10,000 บาท และภูมิลำเนาอยู่ในจังหวัดอื่นๆ เช่น ชัยภูมิ อำนาจเจริญ บุรีรัมย์ หนองคาย นครพนม ร้อยเอ็ด ศรีสะเกษ เป็นต้น

- ผลการศึกษาถึงพฤติกรรมการท่องเที่ยวของนักท่องเที่ยวในจังหวัดอุบลราชธานีพบว่าส่วนใหญ่เดินทางมาท่องเที่ยวมากกว่า 1 ครั้งแต่น้อยกว่า 10 ครั้ง ใช้เวลาท่องเที่ยว 2 วัน ได้รับข้อมูลข่าวสารการท่องเที่ยวจากคนใกล้ชิดหรือประสบการณ์ส่วนตัว มาเกี่ยวกับครอบครัว โดยเดินทางด้วยรถยนต์ วางแผนค่าใช้จ่ายในการท่องเที่ยวต่อครั้งน้อยกว่า 3,000 บาท และวัตถุประสงค์หลักของการเดินทางท่องเที่ยวคือมาเพื่อพักผ่อน

- ด้านความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวที่มีต่อ

องค์ประกอบและการจัดการ โลจิสติกส์การจังหวัดอุบลราชธานี พบว่านักท่องเที่ยวมีความพึงพอใจต่อองค์ประกอบของโลจิสติกส์การท่องเที่ยวในภาพรวมในระดับพอใจมาก (ค่าเฉลี่ย 3.81) เมื่อพิจารณาเป็นรายปัจจัยพบว่าสามปัจจัยที่นักท่องเที่ยวให้ความสำคัญและมีความพึงพอใจมากที่สุดคือ ปัจจัยในด้านประเภทยานพาหนะที่มีให้เลือก รวมถึงเส้นทางที่เปิดเส้นทางและการบริการ (ค่าเฉลี่ย 4.07) ความปลอดภัยในการเดินทางที่ปราศจากอุบัติเหตุ (ค่าเฉลี่ย 3.96) และสถานที่ตั้งสนามบิน ขส. สถานีรถไฟ (ค่าเฉลี่ย 3.94) ส่วนปัจจัยที่นักท่องเที่ยวให้ความสำคัญโดยมีความพึงพอใจน้อยที่สุดคือ การจัดให้บริการความสะดวกสบายในการเดินทาง (ค่าเฉลี่ย 3.68) การเอาใจใส่นักท่องเที่ยว และความสะอาดตามจุดเดินทาง (ค่าเฉลี่ย 3.66) และการจัดโปรโมชันท่องเที่ยวของจังหวัดและการใช้พลังงานทดแทนในการ (ค่าเฉลี่ย 3.59)

นอกจากนี้ผลการวิจัยจากการใช้แบบจำลองโมเดลปัญหาของ TSP สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดเส้นทางท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการเดินทางโดยใช้สมมุติฐานเวลาการเดินทางโดยรถยนต์ด้วย Google Map อย่างไรก็ดีตามสำหรับงานวิจัยในอนาคต เป็นที่น่าสนใจที่จะทำการวิเคราะห์ผลร่วมกับบริษัททัวร์ เพื่อเข้าใจข้อจำกัดและเพิ่มเงื่อนไขของโมเดลได้เป็นต้น นอกจากนี้สามารถทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกับโลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยวในเชิงลึกโดยใช้เครื่องมือทางด้านการวิเคราะห์การตัดสินใจภายใต้หลายปัจจัย (Multi-Criteria Decision Making : MCDM) ได้ด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] เถลิงศักดิ์ ชัยชาญ. การจัดการโลจิสติกส์สำหรับการท่องเที่ยวในอำเภอวังน้ำเขียวจังหวัดนครราชสีมา. *Suranaree Journal of Social Science*, 2012; 6: 17-33.

- [2] เศรษฐวิทย์ พรหมสิทธิ์ และ นราศรี ไวนิชกุล. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการจัดการโลจิสติกส์การท่องเที่ยวในเขตกรุงเทพมหานคร. *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2559; 35(4): 139-147.
- [3] ณภัทร ทิพย์ศรี ขจีโณม เจริญตระกูล และคณะ. การจัดการโลจิสติกส์การท่องเที่ยวของธุรกิจนำเที่ยวในจังหวัดเชียงราย. *วารสารการบริการและการท่องเที่ยวไทย*, 2558; 10(2): 60-70.
- [4] การพัฒนาศักยภาพการท่องเที่ยวไทย. สำนักพัฒนาเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2541.
- [5] แผนพัฒนาภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง ปี 2563-2564. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.osmnortheast-sl.moi.go.th/plan_develop.php
- [6] รวพิรุณ ภูเจริญไพศาล. การกระจายช่องทางการตลาดและโลจิสติกส์. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [7] กมลชนก สุทธิวัฒนาฤทธิ และคณะ. การจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์. สำนักพิมพ์ท็อปแมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร, 2547.
- [8] กานาย อภิปรักษ์กุล. โลจิสติกส์เพื่อการผลิตและการจัดการดำเนินงาน. บริษัท โฟกัสมีเดียแอนด์พับลิชชิง จำกัด, กรุงเทพมหานคร, 2547.
- [9] กฤษณ์ วัฒนศิริพร. การจัดการโลจิสติกส์. 2550. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.engineeringtoday.net/magazine/>
- [10] พงษ์ชัย อธิคมรัตนกุล. การจัดการโลจิสติกส์. 2551. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://pongchai.blogspot.com/>
- [11] Winston, W. Operations Research Application and Algorithm. Thomson Brooks/Cole, 2004.
- [12] Ransikarbum, K., Ha, S., Ma, J., and Kim, N. Multi-Objective Optimization Model for Production Planning of the Build Chamber Utilization in Fused Deposition Modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017; 43, pp. 35-46.
- [13] Ransikarbum, K. and Mason, S. Multiple-objective Analysis of Integrated Relief Supply and Network Restoration in Humanitarian Logistics Operations. *International Journal of Production Research*, 2016; 54(1): 49-68
- [14] Tourism Logistics. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.tourismlogistics.com>.
- [15] ชัยวัช ทองอินทร์. กระบวนทัศน์ของการจัดการโลจิสติกส์สำหรับอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวไทย, 2549. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.thailog.org/research.html>.
- [16] MICE. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki/>.
- [17] พิมพ์ หิรัญกิตติ อุดม สายะพันธุ์ และคณะ. พฤติกรรมการท่องเที่ยวเชิงเกษตรของนักท่องเที่ยวชาวไทย. *สุทธิปริทัศน์*, 2557; 28(88): 362-384.
- [18] มิ่งสรรพ ขาวสอาด และคณะ. การพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงบูรณาการที่ยั่งยืนในกลุ่มแม่น้ำโขง 3: การเปรียบเทียบเชิงโลจิสติกส์. สถาบันวิจัยสังคมมหาลย์เชียงใหม่, 2551.
- [19] European Union Action in the Tourism Sector improving support measures for sustainable tourism. 2002. [Online] Available: <https://www.pik-potsdam.de/avec/peyresq2003/talks/0917/sillence>.
- [20] คมสัน สุริยะ. แนวคิดเรื่องโลจิสติกส์สำหรับการท่องเที่ยว (Tourism logistics). 2551. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.tourismlogistics.com/>.
- [21] Lumsdon, L.M. and Page, S.J. Tourism and transport. Routledge, 2007.

- [22] Eisinga, R., Te Grotenhuis, M. and Pelzer, B. The Reliability of a Two-Item Scale: Pearson, Cronbach, or Spearman-Brown?. *International journal of public health*, 2013; 58(4): 637-642.
- [23] Terrell, S.R. Mixed-methods Research Methodologies. *The qualitative report*, 2012; 17(1): 254-280.
- [24] Gay, L.R., Mills, G.E. and Airasian, P.W. Educational Research: Competencies for Analysis and Applications. 8th edited, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2006.
- [25] กสิณ รังสิกรรพุม. เอกสารประกอบคำสอนวิชา Multi-Criteria Decision Making. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2560.
- [26] อัจจิมา เชิดชม และปณิธาน พิรพัฒนา. การปรับปรุงระบบบริหารจัดการคลังสินค้าเพื่อกำหนดตำแหน่งในการจัดเก็บสินค้า: กรณีศึกษาศูนย์กระจายสินค้าในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 2562; 21(2): 65-74



การบริหารจัดการและควบคุมความเสี่ยงเชิงคุณภาพ สำหรับบรรจุภัณฑ์ขวดพลาสติกที่มีการลดน้ำหนัก Quality Risk Management and Control for Plastic Bottle Weight Reduction

ณัฐกานต์ ชูวงษ์วัฒนะ* นภัสสวงศ์ โอโสทธิลป์ และ ประเสริฐ อัครประมพงศ์

Nattakarn Chuwongwattana, Napassavong Osothsilp and Prasert Akkharapathompong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand

E-mail: Nattakarn.C@student.chula.ac.th*, napassavong.o@chula.ac.th and prasert.a@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การลดน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ขวดพลาสติกเพื่อประหยัดต้นทุนวัตถุดิบนั้น ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์บางลง เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการบรรจุผ่านกระบวนการต่างๆที่มีแรงกระทำต่อขวด ทำให้เกิดข้อบกพร่องที่ไม่คาดคิดจำนวนมากขึ้นบนบรรจุภัณฑ์พลาสติกนั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาประเด็นข้อบกพร่อง ประเมินและบริหารจัดการความเสี่ยงเชิงคุณภาพเบื้องต้น รวมทั้งดำเนินการจัดการลดข้อบกพร่องเชิงคุณภาพที่เกิดขึ้นจากการใช้บรรจุภัณฑ์ลดน้ำหนักในกระบวนการบรรจุ เพื่อให้องค์กรบรรลุเป้าหมายการลดต้นทุนอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ระดับคุณภาพที่องค์กรและลูกค้ายอมรับได้ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง ใช้เทคนิคเครื่องมือการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของกระบวนการและผลกระทบ และการออกแบบการทดลองแบบ Faced Central Composite (FCC) เพื่อหาปัจจัยหลักและค่าปรับตั้งที่เหมาะสมต่อการใช้บรรจุภัณฑ์ลดน้ำหนักในกระบวนการบรรจุ ซึ่งผลการดำเนินงานวิจัยสามารถลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการใช้ขวดบรรจุภัณฑ์ลดน้ำหนักได้ โดยก่อนปรับปรุงพบสัดส่วนข้อบกพร่อง 11% และหลังปรับปรุงพบสัดส่วนข้อบกพร่องเพียง 0.06% สามารถลดจำนวนข้อบกพร่องในกระบวนการบรรจุได้ถึง 99%

คำสำคัญ: ขวดลดน้ำหนัก แรงในการปิดฝา การประเมินความเสี่ยง การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ แผนผังก้างปลา การออกแบบการทดลอง แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

ABSTRACT

Reducing weight of plastic bottle help to reduce production costs, the plastic bottles become thinner due to less plastic content. Resulting in defects that occurs when the packaging light weight is carried in the filling line. In this research, the objectives are to do the risk analysis and assessment to evaluate the defects that might happen and to reduce the defects caused by the use of packaging light weight in the mouthwash filling process. The researcher used the principle of risk analysis and assessment, Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA) and Faced Central Composite (FCC) design of experiment to find the main factors and the appropriate settings to reduce defects that generated by the use of light weight mouthwash bottles in the filling process. The result of this research can reduce

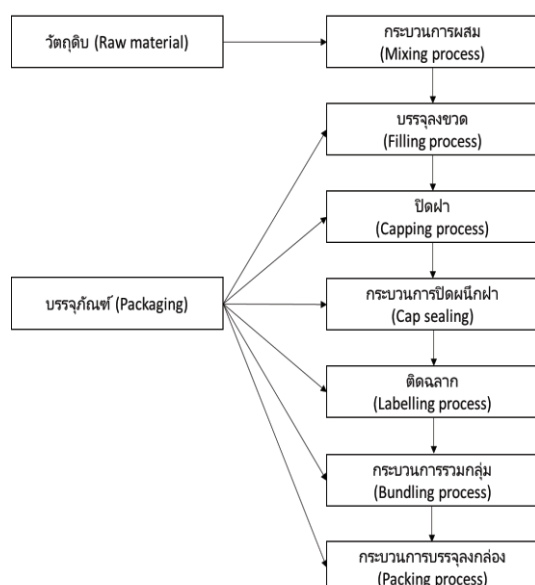
the percentage of defect causing by the use light weight packaging in filling process from 11% to 0.06% that mean the defects is decreased 99% in the filling process.

Keywords: Bottle weight reduction, Closing torque, Risk analysis and assessment, Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA), Fishbone diagram, Design of Experiment(DOE), Faced Central Composite (FCC)

1. บทนำ

โรงงานกรณีศึกษาทำการลดต้นทุนบรรจุภัณฑ์ โดยการลดปริมาณพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปขวดพลาสติก ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาได้ทดลองใช้กับผลิตภัณฑ์ขวดพลาสติกของน้ำยาบ้วนปากขนาด 1 ลิตรเป็นอันดับแรก โดยลดน้ำหนักขวดพลาสติกประเภท PET จากเดิมหนัก 68 กรัม ลดลงเหลือ 62 กรัม ในการลดน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ขวดพลาสติกลงนั้น ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์บางลง เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการบรรจุผ่านกระบวนการต่างๆที่มีแรงกระทำต่อขวด ทำให้อาจเกิดข้อบกพร่องขึ้นบนบรรจุภัณฑ์พลาสติกนั้นได้

กระบวนการบรรจุน้ำยาบ้วนปาก เป็นกระบวนการบรรจุแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย 5 กระบวนการ ดังนี้ 1. กระบวนการบรรจุและปิดฝา 2.กระบวนการปิดผนึกฝาด้วยฟิล์ม 3.กระบวนการติดฉลาก 4.กระบวนการรวมกลุ่ม 5.กระบวนการแพ็คเกจกล่อง แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการบรรจุน้ำยาบ้วนปาก
ของโรงงานกรณีศึกษา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อค้นหา ประเมินความเสี่ยงเชิงคุณภาพ บริหารจัดการความเสี่ยงและลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการใช้ขวดพลาสติกลดน้ำหนักในกระบวนการบรรจุน้ำยาบ้วนปาก รวมทั้งหาค่าปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมต่อการนำขวดลดน้ำหนัก ไปใช้บรรจุผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีคุณภาพอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยง (Risk analysis and assessment) และใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เพื่อหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ไขข้อบกพร่อง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 การระบุประเด็นความเสี่ยงและประเมิน

มีขั้นตอนในการระบุและประเมินความเสี่ยง[1][2] ดังนี้

- 1) รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์สภาพแวดล้อมการเปลี่ยนแปลง เพื่อบ่งชี้เหตุการณ์ที่มีความเสี่ยง รวบรวมเป็นรายการความเสี่ยงองค์การ (Risk register)
- 2) ให้คะแนนความเป็นไปได้ (likelihood) และผลกระทบ (Impact) ของความเสี่ยงนั้น โดยมีระดับคะแนนของทั้ง 2 เกณฑ์ ดังรูปที่ 2

ระดับคะแนน	1	2	3	4	5
ผลกระทบของความเสี่ยง (Impact)	ต่ำ				สูง
โอกาสหรือความเป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น (Likelihood)	น้อยครั้ง				บ่อยครั้ง

รูปที่ 2 ระดับคะแนนของเกณฑ์การพิจารณาระดับ
ความเสี่ยง

ตารางที่ 1 เกณฑ์มาตรฐานระดับโอกาสที่จะเกิดความเสียหาย (likelihood)

ระดับ	โอกาสที่เกิด	คำอธิบาย
5	สูงมาก	โอกาสเกิดสูงมาก จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นเกินกว่าระดับที่ยอมรับได้
4	สูง	โอกาสเกิดอยู่ในระดับสูง เกิดขึ้นได้บ่อย แต่จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นก่อนไปทางมากของเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 75-100%AQL
3	ปานกลาง	โอกาสเกิดอยู่ในระดับปานกลาง เกิดขึ้นได้บ้าง เป็นบางโอกาส จำนวนของเสียอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ 50-75%AQL
2	น้อย	โอกาสเกิดน้อยครั้ง จำนวนของเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยอยู่ในช่วง 25-50%AQL
1	น้อยมาก	โอกาสเกิดไม่มี หรือ เกิดน้อยมาก เกิดขึ้นได้เฉพาะสถานการณ์ผิดปกติ จำนวนของเสียอยู่ในช่วง 0-25%AQL

ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานระดับความรุนแรงของผลกระทบจากความเสียหาย (Impact)

ระดับ	ผลกระทบ	คำอธิบาย
5	รุนแรงที่สุด	องค์กรไม่สามารถยอมรับผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ เช่น ส่งผลต่อภาพลักษณ์ขององค์กร ผลกระทบด้านการเงินในระดับรุนแรง เกิดของเสียขึ้นต้องรีเจกของทั้งล็อต เป็นต้น
4	ค่อนข้างรุนแรง	ผลกระทบค่อนข้างรุนแรง เช่น เครื่องจักรหยุด /ระลอการทำงาน ผลกระทบส่งผลกระทบต่อการใช้งานของผลิตภัณฑ์
3	ปานกลาง	เสียเวลาในการดำเนินงานค่อนข้างมาก ผลกระทบที่เกิดขึ้นต้องมีการควบคุมเป็นพิเศษ งานลืมนั้นต้องถูกนำมาตรวจสอบ 100%
2	น้อย	เสียเวลาในการดำเนินงานน้อย งานลืมนั้นถูกนำมาตรวจสอบเพียงบางส่วน
1	น้อยมาก	ส่งผลกระทบน้อยมาก ผลกระทบที่เกิดขึ้นไม่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องกับการดำเนินงานและคุณภาพของสินค้า

3) จัดระดับความเสี่ยงโดยพิจารณาจากผลคูณของคะแนนความเป็นไปได้และผลกระทบซึ่งระดับความเสี่ยงแบ่งออกเป็น 4 ระดับดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงระดับความเสี่ยง

ระดับความเสี่ยง	ระดับคะแนน	ความหมาย
สูงมาก	20-25	ระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ จำเป็นต้องเร่งจัดการแก้ไขทันที
สูง	10-19	ระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้ โดยต้องจัดการความเสี่ยงเพื่อให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ต่อไป
ปานกลาง	4-9	ระดับที่ยอมรับได้แต่ต้องควบคุมเพื่อป้องกันไม่ให้ความเสี่ยงเคลื่อนย้ายไปยังระดับที่ยอมรับไม่ได้
น้อย	1-3	ระดับที่ยอมรับได้โดยไม่ต้องควบคุมความเสี่ยง ไม่ต้องมีการจัดการเพิ่มเติม

4) หาแนวทางในการจัดการความเสี่ยงที่อยู่ในระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้

2.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลอง คือ การดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบและมีการควบคุม มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลหลักและอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจ ประโยชน์ของ DOE คือ เป็นเครื่องมือที่ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง ในขณะที่ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญ เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองตามเป้าหมายที่ต้องการ [3]

3. การดำเนินการวิจัย

ก่อนการนำขวดน้ำยาบัวบานปากลดน้ำหนักมาใช้ในกระบวนการบรรจุ คณะทีมงานดำเนินงานวิจัยได้ระดมสมองเพื่อทำการค้นหาและประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุ แสดงผลการประเมินความเสี่ยง ดังนี้

ตารางที่ 4 ความเสี่ยงและผลการประเมินระดับความเสี่ยง

ความเสี่ยง	โอกาสเกิด (L)	ผลกระทบ (I)	คะแนนความเสี่ยง (L x I)	ระดับความเสี่ยง
ขวดบวมจากการขนส่ง	1	3	3	น้อย
ขวดเป็นรอยขีดข่วนขนาดมากกว่า 10mm ²	2	1	2	น้อย
คอขวดบวม หรือ ขุ่นจากการปิดฝา	1	4	4	ปานกลาง
ขวดบิดเป็นรอย จากการปิดฝา	5	3	15	สูง
ฉลากเกิดฟองอากาศ	5	2	10	สูง
ฉลากขยับ	3	2	6	ปานกลาง
ฉลากเพี้ยน	3	3	9	ปานกลาง
ขวดบวมจากเครื่องรีเจ็ค	3	3	9	ปานกลาง
ขวดบวมจากเครื่อง Auto case packer	1	3	3	น้อย
ขวดบวมจากการเรียงซ้อนแพเลต	1	3	3	น้อย

จากตารางที่ 4 ผลจากการประเมินความเสี่ยงแสดงให้เห็นว่าการนำขวดน้ำยาบ้วนปากลดน้ำหนักเข้าไปใช้ในกระบวนการบรรจุมีความเสี่ยงที่จะเกิดข้อบกพร่องขวดเป็นรอยจากขั้นตอนการปิดฝา และฉลากเป็นฟองอากาศในขั้นตอนการติดฉลาก

3.1 การกำหนดข้อบกพร่อง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบขวดลดน้ำหนักเข้าไปเดินในกระบวนการบรรจุแบบต่อเนื่อง เป็นเวลา 30 นาที สุ่มตัวอย่างมาตรวจสอบสอยจำนวน 200 ขวด พบว่ามีข้อบกพร่องการเกิดขวดเป็นรอย และฉลากเป็นฟองอากาศเกิดขึ้นเกินกว่าจำนวนที่ยอมรับได้ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดสอบเดินขวดน้ำยาบ้วนปากลดน้ำหนักในกระบวนการบรรจุจริง

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ลักษณะข้อบกพร่อง	% ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น	% ข้อบกพร่องที่ยอมรับได้ AOQL
ขั้นตอนการปิดฝา (Capping process)	ขวดเป็นรอย	11.0%	4.7%
ขั้นตอนติดฉลาก (Labelling process)	ฉลากเป็นฟองอากาศ	15.0%	4.7 %

ในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยและคณะทำงานเลือกข้อบกพร่องขวดเป็นรอยมาดำเนินการทดลองแก้ไขในงานวิจัยนี้ก่อน เนื่องจากคณะทำงานวิจัยได้ลงความเห็นว่างข้อบกพร่องนี้เกิดขึ้นในกระบวนการปิดฝา ซึ่งเป็นขั้นตอนช่วงต้นของกระบวนการบรรจุก่อนส่งไปยังขั้นตอนการติดฉลาก และขวดเป็นรอยนี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลไปยังขั้นตอนการติดฉลากได้ ดังนั้นจึงควรทำการแก้ไขข้อบกพร่องขวดเป็นรอยในขั้นตอนการปิดฝาก่อน เพื่อลดปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องในขั้นตอนการติดฉลากต่อไป ส่วนข้อบกพร่องฉลากเป็นฟองอากาศ ในขั้นตอนการติดฉลาก ผู้วิจัยจะดำเนินการแก้ไขในงานวิจัยขั้นต่อไป โดยลักษณะข้อบกพร่องขวดเป็นรอยที่เกิดขึ้นอธิบายดังตารางที่ 6 ดังนี้

ตารางที่ 6 คำอธิบายประเภทของข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์จากการใช้ขวดลดน้ำหนัก

ข้อบกพร่อง	คำอธิบาย	ลักษณะตัวอย่าง
ขวดเป็นรอย	เกิดรอยบวมที่ขวดลักษณะเป็นเส้นตามมุมของขวด 2-4 จุดต่อขวด	

3.2 การวัดและวิเคราะห์หาสาเหตุของข้อบกพร่อง

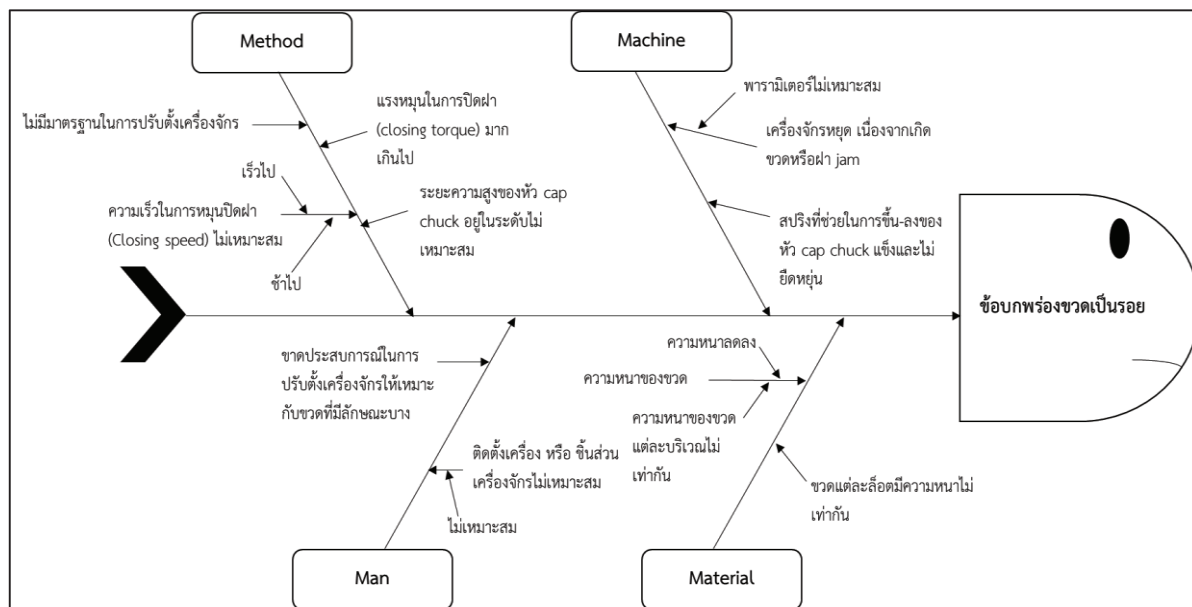
ในการวัดและวิเคราะห์หาสาเหตุของข้อบกพร่อง เริ่มจากการระดมสมองของคณะทีมงานที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญในกระบวนการบรรจุน้ำยาบ้วนปาก ช่วยกันวิเคราะห์หาสาเหตุของข้อบกพร่องโดยอาศัยเครื่องมือในการวิเคราะห์ คือ แผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) โดยแบ่งการวิเคราะห์สาเหตุออกเป็น 5 หมวดหมู่ คือ 4M1E ได้แก่ สาเหตุจากคน (Man) สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine) สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material) สาเหตุจากวิธีปฏิบัติ (Method) และสาเหตุจากสภาพแวดล้อม (Environment) [4]

ผู้วิจัยและคณะทีมงานระดมสมองวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดขวดเป็นรอยจากกระบวนการปิดฝา โดยอาศัยแผนผังก้างปลาในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. สาเหตุจากคน (Man) ได้แก่ ขาดประสบการณ์ในการปรับตั้งเครื่องจักรให้เหมาะสมกับขวดที่มี

ลักษณะบาง ติดตั้งอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนประกอบของเครื่องจักรไม่เหมาะสม

2. สาเหตุจากเครื่องจักร (Machine) ได้แก่ สปริงเดิมของหัว cap chuck แข็งไม่ยืดหยุ่น ทำให้มีแรงกดขวดมากเกินไป และเครื่องจักรหยุดเนื่องจากการแถมของขวดหรือฝา
3. สาเหตุจากวัตถุดิบ (Material) ได้แก่ ขวดที่มีความหนาลดลง ความหนาของขวดแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ขวดแต่ละล็อตมีความหนาไม่เท่ากัน
4. สาเหตุจากวิธีปฏิบัติ (Method) ได้แก่ ไม่มีมาตรฐานในการปรับตั้งเครื่องจักรกับขวดน้ำยาบ้วนปากลดน้ำหนัก ค่าแรงในการปิดฝา (Closing torque) มากเกินไป ค่าความเร็วในการปิดฝา (Closing speed) มากเกินไป ระดับความสูงของ cap chuck ไม่เหมาะสม



รูปที่ 3 แผนผังก้างปลาของข้อบกพร่องขวดเป็นรอยจากการปิดฝา

จากสาเหตุที่วิเคราะห์แผนผังก้างปลา ทีมงานลงคะแนนความเห็นเห็นว่าสาเหตุที่เป็นปัจจัยหลักมาจากวิธีการปฏิบัติ เนื่องจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ไม่เหมาะสมมากที่สุด จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดหรือค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของเครื่องจักรมาทำ

การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของกระบวนการและผลกระทบ (Process Failure Mode and Effect Analysis, PFMEA) อ้างอิงตามมาตรฐาน AIAG เพื่อจัดลำดับความสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยพิจารณาจากผลรวมของลำดับความเสี่ยง (RPN : Risk

Priority Number) ซึ่งจะคัดเลือกปัจจัยที่มีค่าลำดับความเสี่ยง (RPN) สูง มาใช้ในการดำเนินการแก้ไขข้อบกพร่อง และหาค่าที่เหมาะสม

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

แต่ละเกณฑ์มีคะแนน 1-10 ตามระดับจากน้อยไปมาก ซึ่ง

S คือ ค่าความรุนแรงของข้อขัดข้อง (Severity of Failure)

คะแนน = 1 คือ ความรุนแรงน้อยที่สุดของผลกระทบเมื่อเกิดข้อบกพร่องขึ้น

คะแนน = 10 คือ ความรุนแรงมากที่สุดของผลกระทบเมื่อเกิดข้อบกพร่องขึ้น

O คือ ความถี่ในการเกิดสาเหตุของข้อขัดข้อง (Occurrence)

คะแนน = 1 คือ ความถี่น้อยที่สุดของการเกิดข้อบกพร่องขึ้น

คะแนน = 10 คือ ความถี่มากที่สุดของการเกิดข้อบกพร่องขึ้น

และ D คือ ความเป็นไปได้ในการตรวจพบได้ (Detection)

คะแนน = 1 คือ ความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องได้ดีที่สุด

คะแนน = 10 คือ ความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่องได้แย่ที่สุด

ได้ผลการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของกระบวนการและผลกระทบ (PFMEA) ของขวดเป็นรอย ดังตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 ผลวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (PFMEA) ของข้อบกพร่องขวดเป็นรอย

พารามิเตอร์	สภาพข้อบกพร่อง	ผลกระทบ	S	O	D	RPN
ตำแหน่ง star wheel	ปรับตำแหน่งไม่ดีทำให้ชนกันขวด	ขวดขัดกันหรือชนกับขอบ star wheel เป็นรอย	7	1	7	49
Cap Chuck	ยางจับฝาที่ cap chuck เสื่อม	ฝาปิดไม่สนิทหรือปิดไม่ตรงทำให้บิดขวดเป็นรอย	7	1	2	14
แรงในการปิดฝา	ค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม	ขวดบิดเป็นรอย	7	3	8	168
ความเร็วในการปิดฝา	ค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสม	ขวดบิดเป็นรอย	7	3	8	168

ในการเลือกปัจจัยนำเข้าที่จะนำมาดำเนินงานวิจัยนั้น อ้างอิงตามมาตรฐาน AIAG จะพิจารณาจากข้อบกพร่องที่มีความรุนแรงมาก (คะแนน 9-10) มาวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาก่อน จากนั้นจึงเลือกจาก RPN ที่สูง (ค่า RPN มากกว่า 100 คะแนน) มาดำเนินการวิเคราะห์และแก้ไขก่อน แต่ถ้ามีค่า RPN และ ค่าความรุนแรง (S) เท่ากัน จะเลือกข้อบกพร่องที่มีความเป็นไปได้ในการเกิดมากกว่ามาดำเนินการแก้ไข ดังนั้นจากตารางที่ 7 ปัจจัยที่จะทำการศึกษาผลกระทบต่อการเกิดขวดเป็นรอยของขวดน้ำยาบ้วนปากลดน้ำหนักระบวนการปิดฝา คือ แรงที่ใช้ในการปิดฝา (Closing Torque) และ ความเร็วในการปิดฝา (Closing speed)

4. การปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง

4.1 ปัจจัยนำเข้า

จากการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของกระบวนการและผลกระทบ (PFMEA) ของข้อบกพร่องขวดเป็นรอยในตารางที่ 5 ปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในทดลอง

แก้ไขข้อบกพร่องขาดเป็นรอยในขั้นตอนปิดฝา มี 2 ปัจจัย คือ แรงในการปิดฝา (closing torque) และ ความเร็วในการหมุนปิดฝา (closing speed) และมีระดับของปัจจัยนำเข้า 3 ระดับ ดังตารางที่ 8-9

ตารางที่ 8 ปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัยที่นำมาศึกษา	หน่วย
แรงที่ใช้ในการปิดฝา (Closing Torque)	Nm
ความเร็วในการปิดฝา (Closing speed)	rpm

ตารางที่ 9 ระดับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนำเข้าที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย		
	ต่ำ (-)	กลาง (0)	สูง (+)
แรงในการปิดฝา (closing torque), Nm	1.2	1.4	1.6
ความเร็วในการปิดฝา (Closing speed), rpm	110	120	130

4.2 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองของการปรับปรุงนี้ คือ สัดส่วนการเกิดขาดเป็นรอยจากขั้นตอนการปิดฝา

4.3 รูปแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้เลือกใช้การออกแบบการทดลองส่วนประสมกลาง (CCD) แบบ face centered เนื่องจากปัจจัยนำเข้าทั้งสองนั้นสามารถปรับระดับปัจจัยได้เพียง 3 ระดับเท่านั้น โดยมีระดับ $\alpha = \pm 1$ การกำหนดระดับของปัจจัยนำเข้า อาศัยข้อมูลการปรับตั้งจากผู้เชี่ยวชาญหรือพนักงานฝ่ายผลิต[5] ได้ระดับของปัจจัยนำเข้ดั่งแสดงในตารางที่ 9 เมทริกซ์การออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เมทริกซ์การออกแบบการทดลอง

Std Order	Run Order	A	B
5	1	1.2	120
2	2	1.6	110

ตารางที่ 10 (ต่อ) เมทริกซ์การออกแบบการทดลอง

Std Order	Run Order	A	B
1	3	1.2	110
6	4	1.6	120
12	5	1.4	120
9	6	1.4	120
8	7	1.4	130
7	8	1.4	110
13	9	1.4	120
4	10	1.6	130
11	11	1.4	120
3	12	1.2	130
10	13	1.4	120

กำหนดให้

A คือ แรงที่ใช้ในการปิดฝา (Closing torque, Nm)

B คือ ความเร็วในการปิดฝา (Closing speed, rpm)

ผู้วิจัยใช้ขนาดตัวอย่างจำนวน 200 ชิ้นงานต่อ 1 การทดลอง ซึ่งจะใช้จำนวนชิ้นงานทั้งหมด 2,600 ชิ้นงาน สำหรับการทดลองทั้งหมด 13 รูปแบบที่กำลังของการทดสอบ (Power of test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95%

4.4 ผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 11 โดยแต่ละการทดลองใช้เวลาเดิน 30 นาที ทำการสุ่มตัวอย่าง 200 ขวด เพื่อตรวจสอบดูสัดส่วนของเสียขาดเป็นรอย

ตารางที่ 11 ผลการทดลอง

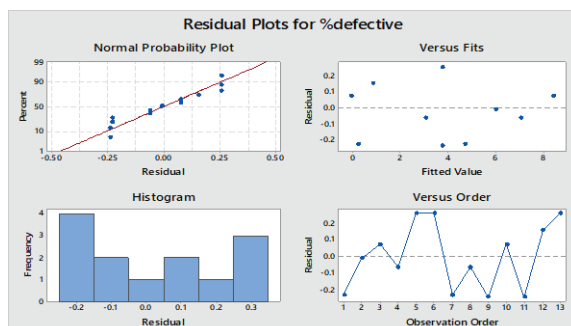
การทดลอง	ปัจจัยนำเข้า		ปัจจัยตอบสนอง
	A (kgf.cm)	B (rpm)	สัดส่วนของเสียขาดเป็นรอย (%)
1	1.2	120	0.0
2	1.6	110	6.0
3	1.2	110	0.0
4	1.6	120	7.0
5	1.4	120	4.0
6	1.4	120	4.0
7	1.4	130	4.5
8	1.4	110	3.0

ตารางที่ 11 (ต่อ) ผลการทดลอง

การทดลอง	ปัจจัยนำเข้า		ปัจจัยตอบสนอง
	A (kgf.cm)	B (rpm)	สัดส่วนของเสีย เป็นรอย (%)
9	1.4	120	3.5
10	1.6	130	8.5
11	1.4	120	3.5
12	1.2	130	1.0
13	1.4	120	4.0

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในตารางที่ 11 ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยการตรวจสอบสมมติฐาน 3 ข้อ คือ สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานความเป็นอิสระ และสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าส่วนตกค้างระหว่างค่าจริงและค่าฟิต ซึ่งสามารถใช้โปรแกรม Minitab 18 ในการทดสอบสมมติฐานต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 4 การกระจายตัวค่าส่วนตกค้างของสัดส่วนของเสีย
ขาดเป็นรอย

1. การตรวจสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ เป็นการตรวจสอบว่าค่าส่วนตกค้างมีคุณสมบัติการแจกแจงแบบปกติ โดยดูจากกราฟ Probability Plot ว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้มีการกระจายตัวในลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มใกล้เคียงเส้นตรงหรือไม่ และสามารถพิจารณาจากค่า P-value ของการทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งผลการตรวจสอบการแจกแจง

ปกติของค่าส่วนตกค้างแสดงได้ตามรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง มีค่า P-value เท่ากับ 0.352 สรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. การตรวจสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง โดยพิจารณาจากค่าส่วนตกค้างของข้อมูลกับลำดับในการทดลอง ซึ่งกราฟส่วนตกค้างกับลำดับการทดลองดังรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายอย่างสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเป็นอิสระต่อกัน

3. การตรวจสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล ทำได้โดยการพิจารณาจากข้อมูลส่วนตกค้างกับค่าฟิตของตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่ากราฟส่วนตกค้างกับค่าตัวแปรตอบสนองไม่มีรูปแบบที่แน่นอน สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนของข้อมูล

จากการทดสอบสมมติฐานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างที่ได้จากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของข้อมูล สรุปได้ว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ได้

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab 18 แสดงได้ดังรูปที่ 5

Response Surface Regression: %defective versus A, B					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	74.8415	14.9683	224.73	0.000
Linear	2	74.2083	37.1042	557.08	0.000
A	1	70.0417	70.0417	1051.60	0.000
B	1	4.1667	4.1667	62.56	0.000
Square	2	0.0706	0.0353	0.53	0.610
A*A	1	0.0248	0.0248	0.37	0.561
B*B	1	0.0665	0.0665	1.00	0.351
2-Way Interaction	1	0.5625	0.5625	8.45	0.023
A*B	1	0.5625	0.5625	8.45	0.023
Error	7	0.4662	0.0666		
Lack-of-Fit	3	0.1662	0.0554	0.74	0.582
Pure Error	4	0.3000	0.0750		
Total	12	75.3077			

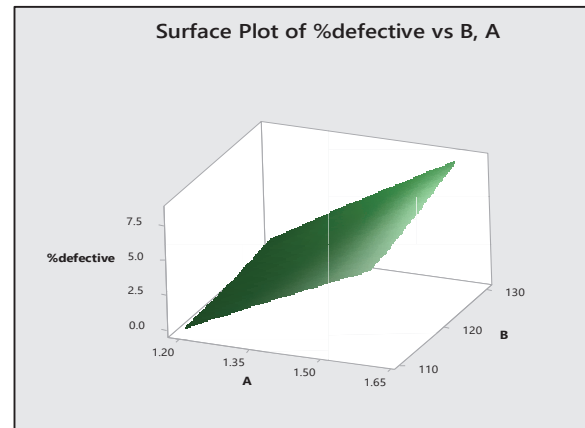
Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.258080	99.38%	98.94%	97.73%

รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดขูดเป็นรอย

จากรูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดรอยที่ขูดในกระบวนการปิดฝา โดยพิจารณาได้จากค่า P-value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสองนั้นคือ แรงในการปิดฝา (A) และความเร็วในการปิดฝา(B) ส่งผลต่อการเกิดรอยที่ขูดในกระบวนการปิดฝาย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 โดยปัจจัยทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องขูดเป็นรอยดังสมการที่ 2 จากนั้นผู้วิจัยจึงได้พิจารณาความสมรูปของสมการนี้กับข้อมูลจากค่า R-square (adjusted) ซึ่งมีค่าสูงเท่ากับ 99.06% จึงสรุปได้ว่าสมการความสัมพันธ์นี้มีความสมรูปกับข้อมูลสามารถใช้อธิบายความผันแปรข้อมูลสัดส่วนของเสียขูดเป็นรอยได้

และรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าเทอมที่มีนัยสำคัญต่อ ค่าสัดส่วนของเสียขูดเป็นรอยคือ ผลหลักของค่าแรงในการปิดฝา และความเร็วในการปิดฝา และอันตรกิริยาของปัจจัยทั้งสอง

จากการวิเคราะห์ด้านเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

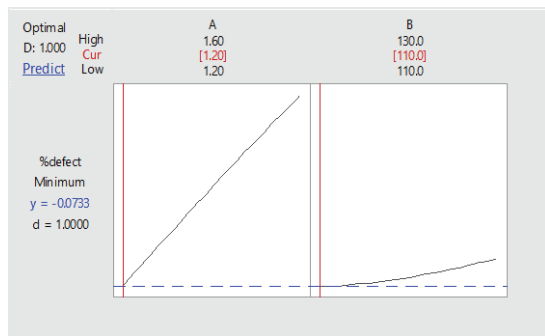
$$\%Defective = 3.8 + 3.417A + 0.833B + 0.375A*B \quad (2)$$


รูปที่ 6 แผนภูมิพื้นผิวดตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนอง

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถอธิบายได้ว่า ปัจจัยนำเข้าทั้งสอง คือ แรงที่ใช้ในการปิด (Closing torque) และ ความเร็วของการปิดฝา (Closing speed) มีผลต่อการเกิดของเสียขูดเป็นรอยจากขั้นตอนการปิดฝา โดยที่ถ้าแรงและความเร็วในการปิดฝามาก จะส่งผลให้มีแรงหมุนปิดฝามากกว่าที่ตัวขูดจะต้านทานได้ทำให้ขูดบิดไปตามแรงและเมื่อปิดฝาเสร็จขูดก็คืนตัวกลับมาทำให้เกิดรอยที่ขูด ส่วนอันตรกิริยาของทั้งสองปัจจัยแปรผันตรงต่อการเกิดของเสียขูดเป็นรอยเช่นกัน แต่จากรูปที่ 6 อธิบายเพิ่มเติมได้ว่าเมื่อความเร็วในการปิดฝาเพิ่มขึ้นแต่แรงในการปิดฝาดำ จะมีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเสียขูดเป็นรายน้อยกว่าเมื่อใช้ความเร็วในการปิดฝาเพิ่มขึ้นที่แรงในการปิดฝาส่ง ดังนั้นเพื่อลดแรงที่กระทำกับตัวขูดและลดรอยที่เกิดขึ้นบนขูดจากการบิดจึงต้องใช้ค่าแรงปิดฝาและความเร็วในการปิดฝาค่าน้อยที่สุดที่ยังสามารถทำให้ฝาบิดสนิทได้

4.7 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ

เมื่อได้ปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญจึงทำการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งเครื่องจักร ที่จะทำให้เกิดสัดส่วนของเสียที่น้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรม Minitab ฟังก์ชัน Response Optimization [6] ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการหาค่าสถานะที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่า

ปัจจัย

ซึ่งได้ค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้งของแต่ละปัจจัย คือ ค่าแรงในการปิดฝา (Closing torque) เท่ากับ 1.2 Nm. และค่าความเร็วในการปิดฝา (Closing speed) เท่ากับ 110 rpm

5. การติดตามควบคุมกระบวนการหลังการปรับปรุง

เพื่อเป็นการทดสอบยืนยันผลว่าค่าระดับของปัจจัยนำเข้านี้สามารถลดสัดส่วนของเสียได้ จึงได้ทำการทดลอง โดยมีขั้นตอนปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักรให้ได้ตามสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง
2. ทดลองผลิตจริงกับขวดน้ำยาบ้วนปากขนาด 1 ลิตร ทั้งหมด 40 ชั่วโมง หรือ 40 ล็อต ซึ่งมีจำนวนขวดทั้งหมดเท่ากับ 216,000 ขวด
3. เก็บข้อมูลอย่างสุ่มจากทุกล็อต โดยจะสุ่มเก็บล็อตละ 200 ขวด

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบสัดส่วนของเสียขวดเป็นรอย

ล็อต	% ขวดเป็นรอย	ล็อต	% ขวดเป็นรอย
1	0	21	0
2	0	22	0
3	0	23	0
4	0	24	0
5	0	25	0
6	0	26	0

ตารางที่ 12 (ต่อ) ผลการทดสอบสัดส่วนของเสียขวดเป็นรอย

ล็อต	% ขวดเป็นรอย	ล็อต	% ขวดเป็นรอย
7	1	27	1
8	0	28	0
9	0	29	0
10	0	30	0
11	0	31	0
12	0	32	0
13	0	33	0.5
14	0	34	0
15	0	35	0
16	0	36	0
17	0	37	0
18	0	38	0
19	0	39	0
20	0	40	0

ทดสอบสมมติฐานของการเปรียบเทียบค่าสัดส่วน เพื่อทดสอบว่าสัดส่วนข้อบกพร่องขวดเป็นรอยหลังปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าสัดส่วนข้อบกพร่องขวดเป็นรอยก่อนปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้ Two Proportions Test [7] ซึ่งมีสมมติฐานที่ทำการทดสอบเป็นดังนี้

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_1: p_1 > p_2$$

โดยที่

p_1 คือ สัดส่วนของเสียจากขวดบดเป็นรอยก่อนปรับปรุงกระบวนการ

p_2 คือ สัดส่วนของเสียจากขวดบดเป็นรอยหลังปรับปรุงกระบวนการ

Test and CI for Two Proportions

Method

p₁: proportion where Sample 1 = Event
p₂: proportion where Sample 2 = Event
Difference: p₁ - p₂

Descriptive Statistics

Sample	N	Event	Sample p
Sample 1	200	22	0.110000
Sample 2	8000	5	0.000625

Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
0.109375	(0.066008, 0.152742)

CI based on normal approximation

Test

Null hypothesis H₀: p₁ - p₂ = 0
Alternative hypothesis H_a: p₁ - p₂ ≠ 0

Method	Z-Value	P-Value
Normal approximation	4.94	0.000
Fisher's exact		0.000

รูปที่ 8 ผลการทดสอบความแตกต่างสัดส่วนปัญหาก่อน และหลังปรับปรุงกระบวนการปิดฝา

จากรูปที่ 8 ค่า p-Value จากการทดสอบมีค่า <0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ (α) = 0.05 ดังนั้นจึงปฏิเสธ H₀ ที่ว่าสัดส่วนก่อนปรับปรุงเท่ากับหลังปรับปรุงกระบวนการ จึงสรุปได้ว่าสัดส่วนหลังการปรับปรุงกระบวนการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากการทดลองผลิตงานจริงหลังการดำเนินการทดสอบโดยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าสัดส่วนของเสียขวดเป็นรอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0625% เทียบกับก่อนปรับปรุงที่มีสัดส่วนของเสียขวดเป็นรอยเท่ากับ 11% ซึ่งสามารถลดของเสียขวดบิดเป็นรอยได้จากก่อนดำเนินการปรับตั้งค่าที่เหมาะสมได้

ในการควบคุมค่าปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยและเพื่อให้มั่นใจว่าผลลัพธ์ที่ดีขึ้นเป็นไปอย่างยั่งยืน ผู้วิจัยและทีมงานจึงได้จัดทำเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานเพื่อใช้ในการควบคุมค่าการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าเพื่อให้พนักงานปฏิบัติงานดำเนินงานได้อย่างถูกต้อง

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากการนำบรรจุภัณฑ์ที่มีการลดน้ำหนักพลาสติกของขวดน้ำยาบ้วนปากมาใช้ในการกระบวนการบรรจุ และดำเนินการจัดการลดข้อบกพร่องเชิงคุณภาพที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อบกพร่องกับผลิตภัณฑ์ในกระบวนการบรรจุโดยการระดมความคิดเห็นจากผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการบรรจุเพื่อกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการดำเนินการทดลองเพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการนำขวดน้ำยาบ้วนปากลดน้ำหนักไปใช้ในกระบวนการบรรจุพบว่า มีของเสียเรื่องขวดเป็นรอยเกิดขึ้นจากกระบวนการปิดฝา หลังจากได้ทำการระดมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญทำให้ได้ปัจจัยที่จะทำการทดลองเพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการปิดฝา 2 ปัจจัย ได้แก่ แรงในการปิดฝา (Closing torque) และ ความเร็วในการปิดฝา (Closing speed) จากการดำเนินการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Face Central Composite (FCC) พบว่าปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อการเกิดข้อบกพร่องขวดเป็นรอยในขั้นตอนการปิดฝาในกระบวนการบรรจุน้ำยาบ้วนปาก และค่าปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมในการเดินขวดน้ำยาบ้วนปากขนาด 1 ลิตร เพื่อให้มีจำนวนขวดเป็นรายน้อยที่สุดคือ มีแรงในการปิดฝาเท่ากับ 1.2 kgf.cm และ ความเร็วในการปิดฝาเท่ากับ 110 rpm สามารถลดจำนวนขวดเป็นรอยได้จากการสุ่มตัวอย่าง 200 ขวดในกระบวนการบรรจุก่อนและหลังปรับปรุง โดยก่อนปรับปรุงพบจำนวนขวดเป็นรอย 11% และหลังปรับปรุงพบจำนวนขวดเป็นรอยเพียง 0.06% ลดจำนวนของเสียขวดเป็นรอยจากขั้นตอนการปิดฝาในกระบวนการบรรจุได้ถึง 99%

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการจัดการความเสี่ยง สวทช. คู่มือบริหารความเสี่ยง สวทช. ตามกรอบมาตรฐานการบริหารความเสี่ยง. ISO 3100:2009, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2560.
- [2] สุพรรณิการ์ ธรรมนิทัศน์. การประยุกต์ใช้มาตรฐานการบริหารความเสี่ยงสำหรับองค์กรอุตสาหกรรมการผลิต. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

- [3] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2545.
- [4] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, New York, 2009.
- [5] จุฑามาศ รัตนกุล. การลดข้อบกพร่องของกระบวนการบรรจุภัณฑ์แปรรูปซูชิแช่แข็ง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [6] ภูธิป อินทรักษ์. การลดเวลาสูญเสียในกระบวนการติดฉลาก. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [7] จูติมา ฤทธิ์ประเสริฐศรี. การลดเวลาสูญเสียในกระบวนการผลิตน้ำจิ้มโดยใช้แนวคิดลีน ซิกซ์ ซิกมา. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.



การศึกษาผลกระทบต่อความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่ง ด้วยการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในทันที บริเวณเหมืองถ่านหินเปิดแม่เมาะ

The Study of Effects on Positioning Accuracy Using Real Time Kinematic Satellite Survey in Mae Moh Open-Pit Coal Mine

ธนศพล บุญประกอบ^{1,2*} และ พุทธิพล ดำรงชัย¹

Thanatepol Boonprakob^{1,2*} and Puttipol Dumrongchai¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

² การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220

¹ Chiang Mai University, 52000, Thailand

² Electricity Generator Authority of Thailand (Mae Moh Mine), Lampang, 52220

* E-mail: thanatepol.boon@egat.co.th, Telephone: 0910096544, Fax: 054254323

บทคัดย่อ

การรังวัดด้วยดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกด้วยเทคนิคจลน์ในทันทีอาจเกิดความคลาดเคลื่อนทางพิกัดตำแหน่งอันเป็นผลกระทบจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ระยะห่าง ระดับความสูงต่างระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมจรและสถานีถาวร งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบดังกล่าว โดยได้จัดทำหาค่าทดสอบให้กระจายอยู่ในบริเวณเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แบ่งเป็นกลุ่มหมุดที่กำหนดระยะห่างทางราบ และกลุ่มที่กำหนดระยะห่างทางตั้งจากสถานีฐาน การรังวัดแบบจลน์ในทันทีบนหมุดทดสอบจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงจากการรังวัดดาวเทียมแบบสถิต พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบเท่ากับ 2.3 ซม. และทางตั้ง 3.1 ซม. ผลการคำนวณนี้ทำให้ทราบว่าระยะห่างระหว่างสถานีมีผลกระทบต่อความถูกต้องของค่าพิกัด นอกจากนั้นแล้วความชื้นและอุณหภูมิในอากาศยังส่งผลต่อการรับสัญญาณดาวเทียมกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก

คำสำคัญ: ดาวเทียมกำหนดตำแหน่ง จลน์ในทันที เหมืองถ่านหินลิคไนด์แม่เมาะ ระยะเส้นฐาน ความคลาดเคลื่อนพิกัดตำแหน่ง

ABSTRACT

The satellite survey using Real-time kinematic (RTK) positioning method may have some errors occurred due to the effects of the climate changes overtime and baseline lengths between GNSS (Global Navigation Satellite System) base station and rover. This study aims to investigate the effects. The test points were established around Mae Moh mine's pit, Lampang province. The test points were separated into 2 groups, increment horizontal and vertical distances. The RTK and GNSS surveyings were operated in rainy season, winter, and summer. The measured values were compared with the standard values acquired by static positioning method. The results revealed that the root-mean-square errors were 2.3 cm and 3.1 cm for horizontal and vertical coordinates, respectively. The results showed the distance

between the two stations affected the accuracy of coordinates. In addition, the air humidity and temperature were obstacle for receiving GNSS signals.

Keywords: GNSS positioning, RTK, Mae Moh lignite coal mine, Baseline length, Position error

1. บทนำ

งานรังวัดปริมาตรดินที่ถูกขุดขนในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เป็นงานในลักษณะการรังวัดจุดบนภูมิประเทศซึ่งข้อมูลที่รังวัดมาจะยึดโยงอยู่กับหมุดหลักฐานบริเวณหน้างานขุดที่กำหนด พิกัดโดยการรังวัดด้วยดาวเทียมกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก ดังนั้นหมุดหลักฐานจำเป็นต้องมีค่าพิกัดทางอ้อมหรือที่ถูกต้องที่สุด เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของปริมาตรและการคิดคำนวณค่าใช้จ่าย เหมืองแม่เมาะใช้เทคนิคการรังวัดแบบสถิต (Static survey) ซึ่งถือเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องสูงสุด แต่ใช้เวลาดำเนินการนานและไม่สามารถทราบพิกัดได้ทันทีเนื่องจากวิธีดังกล่าวต้องนำข้อมูลไปผ่านโปรแกรมประมวลผลเฉพาะ [1] อย่างไรก็ตามในการรังวัดเพื่อหาปริมาตรจะต้องดำเนินการเป็นประจำทุกเดือนเพื่อนำมาคิดคำนวณเป็นจำนวนเงินที่ กฟผ. จะต้องจ่ายให้แก่ผู้รับจ้างขุดขนดินและถ่านหิน

ดังนั้น กฟผ. จึงมีแผนงานที่จะพัฒนาการทำงานให้มีประสิทธิภาพและรวดเร็วขึ้นโดยการใช้เทคโนโลยีการสำรวจรังวัดสมัยใหม่ จึงต้องการศึกษาเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic Survey หรือเขียนย่อว่า RTK) ซึ่งทำให้ได้ค่าพิกัดในทันทีแต่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งเพียงพอที่จะนำมาใช้แทนการรังวัดแบบสถิตได้ นอกจากนั้นเทคโนโลยีการสำรวจสมัยใหม่อื่นๆที่ กฟผ. มีแผนงานที่จะนำมาใช้ในการสำรวจรังวัดเพื่อหาปริมาตรขุดขนดินและถ่านหิน เช่น เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner หรือเขียนว่า TLS) และอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle หรือเขียนว่า UAV) ล้วนอาศัยเทคนิค RTK ในกระบวนการทำงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่ง เช่น สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ระยะห่าง และระดับความสูงต่างระหว่าง

สถานีรับสัญญาณดาวเทียมจรและสถานีถาวร ในการรังวัดแบบจลน์ในทันที

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

การสำรวจโดยใช้อุปกรณ์สำรวจแบบเดิมในการรังวัดเพื่อหาปริมาตรขุดขนดินและถ่านหิน ยกตัวอย่างเช่น กล้องประมวลผลสำหรับกำหนดตำแหน่งทางราบ และกล้องระดับสำหรับหาความสูงต่ำของพื้นดิน เป็นต้น นอกจากจะใช้เวลาในการดำเนินงานมาก ยังใช้จำนวนคนมาก ซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายของแรงงานคนที่มากขึ้นด้วย การเข้ามามีบทบาทของเทคโนโลยีดาวเทียมในงานสำรวจรังวัดในการกำหนดตำแหน่งจึงได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว หลายภาคส่วนหลายองค์กรเริ่มปรับตัวมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทำให้ลดเวลา ลดจำนวนคนและค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก แต่เดิมนั้นเทคโนโลยีดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกมีเพียงระบบดาวเทียมเดียว คือ ระบบจีพีเอส (Global Positioning System หรือ GPS)

ปัจจุบันได้มีระบบดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกอื่นๆ ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกัน เช่น กาลิเลโอ (Galileo) ของสหภาพยุโรป โกลนาส (GLONASS) ของสหพันธรัฐรัสเซีย และ เปย์โด (Beidou) ของสาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น ทำให้ในปัจจุบันเราเรียกระบบดาวเทียมเหล่านี้รวมกันว่าระบบดาวเทียมกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Navigation Satellite System หรือเขียนย่อว่า GNSS) การมีดาวเทียมจำนวนมากบนท้องฟ้าส่งผลให้การรังวัดด้วยดาวเทียมมีความถูกต้องสูงขึ้น สามารถรังวัดได้รวดเร็วและรับสัญญาณได้เกือบจะครอบคลุมทั่วโลก การรังวัดด้วยดาวเทียมเพื่อให้ได้ค่าพิกัดของตำแหน่งสามารถคำนวณได้จากสัญญาณรหัสดิจิทัล (Digit code) และสัญญาณแบบเฟส (Phase) ซึ่งดาวเทียมในระบบต่างๆของ GNSS ก็จะมีคลื่นความถี่ของสัญญาณแตกต่างกัน

หลักการคล้ายคลึงกัน ในงานวิจัยนี้จะขอลำถึงเพียงสมการพื้นฐานแบบเฟสที่เป็นที่คุ้นเคยของสัญญาณจีพีเอสดังต่อไปนี้

2.1 สมการความแตกต่างเฟสของคลื่นส่ง

การได้มาซึ่งค่าพิกัดบนพื้นโลกนั้นมาจากการวัดระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณบนพื้นโลกบนพื้นฐานของสมการความแตกต่างเฟสของคลื่นส่ง โดยการนับจำนวนลูกคลื่นทั้งหมดระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ ให้ความถูกต้องจะสูงกว่าการใช้รหัสดิจิทัลเนื่องจากความยาวคลื่นที่สั้นกว่า แต่การนับจำนวนลูกคลื่นนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากคลื่นไม่มีรูปแบบ ไม่ทราบจุดเริ่มต้นและสิ้นสุด เครื่องรับสัญญาณจะสามารถวัดได้เพียงความต่างเฟส การหาจำนวนลูกคลื่นต้องอาศัยการรับข้อมูลจำนวนมากมาประมวลผลทางสถิติแสดงได้ดังสมการที่ (1) [1,2]

$$\lambda \Phi_r^s(t_r, t_e) = p_r^s(t_r, t_e) - (\delta t_r - \delta t_s)c + \lambda N_r^s - \delta_{ion} + \delta_{tro} + \delta_{tide} + \delta_{mul} + \delta_{rel} + \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ Φ_r^s คือ ระยะความแตกต่างเฟสของการจับคู่สัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียม s และสัญญาณเสมือนที่ผลิตออกมาจากเครื่องรับสัญญาณ r , λ คือ ความยาวคลื่น N_r^s คือ จำนวนลูกคลื่นเต็มลูก t_e คือ เวลาขณะคลื่นถูกส่งออกจากดาวเทียม t_r คือ เวลาขณะคลื่นมาถึงเครื่องรับ c คือ ความเร็วแสง δt_s คือ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม δt_r คือ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ δ_{ion} คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ δ_{tide} คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและมหาสมุทร δ_{mul} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี และ ϵ คือ ค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ

2.2 การรังวัดดาวเทียมแบบสัมพัทธ์

การรังวัดดาวเทียมเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่ถูกต้องแม่นยำจะต้องเป็นการกำหนดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative positioning) ที่ใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อยสองเครื่องรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกัน โดยที่เครื่องที่หนึ่งวางไว้บนตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัด

เรียกว่าสถานีฐาน (Base station) และอีกเครื่องหนึ่งวางไว้บนตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัดเรียกว่าสถานีจร (Rover) เมื่อนำข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 มาประมวลผลร่วมกันจะได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง การรังวัดแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งที่นิยมใช้มีและดำเนินการในเมืองแม่มาะ มีดังนี้ [1,3]

2.2.1 การรังวัดแบบสถิต

การรังวัดแบบสถิต (Static survey) เป็นการรังวัดแบบสัมพัทธ์ โดยทั่วไปจะรับสัญญาณ 1 – 2 ชั่วโมง อาจน้อยหรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานี จำนวนดาวเทียม และลักษณะทางเรขาคณิตดาวเทียม โดยจะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง อย่างต่อเนื่องภายหลังจากรับสัญญาณเสร็จ ข้อมูลจะถูกประมวลผลโดยซอฟต์แวร์เฉพาะ ได้ผลออกมาเป็นพิกัดตำแหน่ง การรังวัดแบบสถิตเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องตำแหน่งต้องสูงที่สุด โดยทั่วไปประมาณ 0.5 – 1.0 เซนติเมตร [4] สำหรับเส้นฐานที่มีความยาวไม่ไม่เกิน 20 กิโลเมตร ในกรณีใช้ระยะเวลารับสัญญาณสั้นๆ ประมาณ 10 – 20 นาที และต้องปรับให้ความถี่ในการรับสัญญาณสูงกว่าเดิมเพื่อรับข้อมูลมากขึ้นในเวลาที่สั้นลง เราจะเรียกว่าการการรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Fast static survey) มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งประมาณ 1.0 – 3.0 เซนติเมตร

2.2.3 การรังวัดแบบจลน์ในทันที

การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real time kinematic survey หรือ RTK survey) ต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมจำนวน 5 ดวง เป็นอย่างน้อย เครื่องรับสัญญาณที่นำมาใช้ต้องรับได้ 2 ความถี่ เหมาะกับงานที่ต้องการรังวัดจุดจำนวนมาก และต้องการค่าพิกัดทันที วิธีการนี้มีจุดเด่นที่สถานีฐานจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลและทำการส่งข้อมูลค่าปรับแก้ไปยังสถานีจรผ่านระบบอินเทอร์เน็ต หรือสัญญาณวิทยุ ภายในเครื่องควบคุมของสถานีจรจะบรรจุซอฟต์แวร์ในการประมวลผลค่าปรับแก้ร่วมกับข้อมูลที่รับจากดาวเทียม ท้ายที่สุดจะได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องประมาณ 1 - 5 เซนติเมตร

2.3 ความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียม

สมการในการคำนวณระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณและดาวเทียม จะปรากฏปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากสภาพอากาศและความคลาดเคลื่อนอื่นๆ [5] ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เต็มไปด้วยแก๊สต่างๆ เมื่อได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์จะเกิดประจุกระจายอยู่ โดยมีความหนาแน่นประจุแปรผันไปตามระดับความสูงเหนือโลก เมื่อคลื่นเดินทางประจุเหล่านี้ระยะที่คำนวณได้จะสั้นลงหากวัดด้วยเฟส แต่จะยาวขึ้นหากใช้รหัสดิจิทัล ส่วนชั้นโทรโพสเฟียร์ก็มีประจุเช่นกัน แต่เป็นกลาง มีอิทธิพลทำให้คลื่นเคลื่อนที่ช้าลงซึ่งทำให้ระยะที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ความคลาดเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และความชื้น ในเส้นทางที่คลื่นเดินทางผ่าน อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียมสามารถกำจัดออกไปได้อย่างมากโดยการใช้เทคนิคการวัดแบบสามพัทธ์ หากระหว่างสถานีฐาน และสถานีจรใกล้เคียงกัน [6] ดังนั้นหากต้องการทำงานรังวัดด้วยความละเอียดถูกต้องระยะห่างระหว่างสถานีไม่ควรเกิน 20 กิโลเมตร ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งของเทคนิคการรังวัดแบบ RTK [7]

2.4 การหาค่าระดับความสูงโดยใช้แบบจำลองยิออซด์

การรังวัดด้วยดาวเทียมให้ความสูงเหนือทรงรีซึ่งเป็นความสูงที่อ้างอิงผิวทรงรี World Geodetic System 1984 หรือเขียนย่อว่า WGS84 ดังนั้นหากต้องการความสูงภูมิประเทศที่แท้จริงหรือความสูงอ้างอิงระดับทะเลปานกลาง จะต้องใช้แบบจำลองยิออซด์เพื่อแปลงความสูงเหนือทรงรีให้เป็นความสูงภูมิประเทศ ยิออซด์คือพื้นผิวระดับอ้างอิงมาตรฐานหรือผิวศักยภาพความถ่วงของโลก มีความสำคัญต่อการกำหนดค่าระดับความสูงต่ำทางภูมิประเทศ การมีแบบจำลองยิออซด์จะทำให้สามารถคำนวณหาความสูงของภูมิประเทศนั้นๆ ได้อย่างง่ายดาย โดยการแปลงค่าความสูงเหนือทรงรีอ้างอิงที่รังวัดจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมร่วมกับแบบจำลองยิออซด์

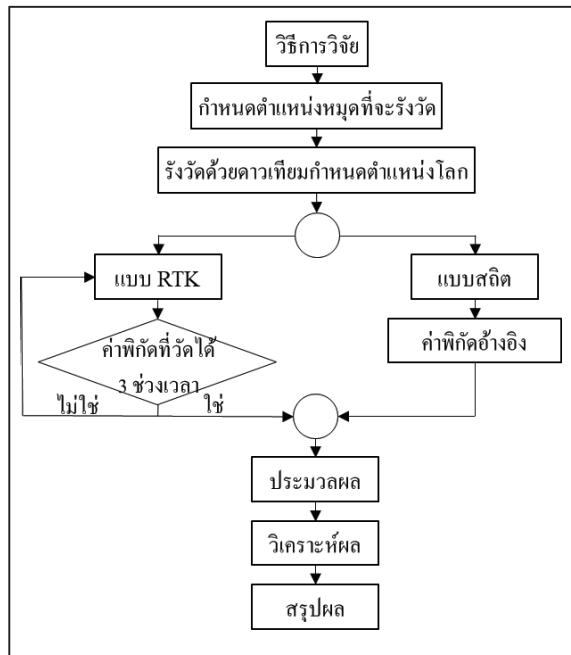
ความสัมพันธ์ระหว่างผิวโลกจริง ยิออซด์ และผิวทรงรีอ้างอิง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$H_p = h_p - N_p \quad (2)$$

โดย H_p คือ ระดับความสูงภูมิประเทศ (Orthometric Height), h_p คือ ความสูงเหนือทรงรีอ้างอิงที่ได้จาก GNSS, N_p คือ ความสูงยิออซด์ (ความแตกต่างระหว่างยิออซด์ และผิวทรงรี) ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงความถูกต้องแบบจำลองยิออซด์ท้องถิ่นของประเทศไทยที่มีชื่อว่า THAI12H [8,9] เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าความสูงตามสมการที่ (2) ซึ่งจะทำให้ความถูกต้องทางดิ่งประมาณ 2 เซนติเมตรสำหรับพื้นที่บริเวณเหมืองแม่เมาะ แทนการหาความสูงด้วยวิธีการเดินระดับด้วยกล้องระดับซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลาดำเนินการค่อนข้างมาก

3. วิธีการวิจัย

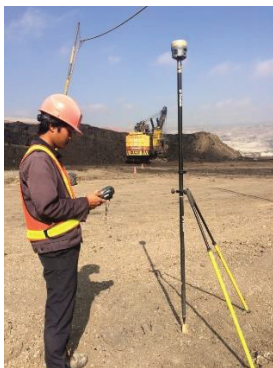
การรังวัดแบบ RTK ต้องอาศัยการประมวลผลข้อมูลจากสถานีจรร่วมกับข้อมูลจากสถานีฐานระยะห่างระหว่างสถานีทั้งทางราบและทางดิ่งอาจมีผลต่อสัญญาณและข้อมูลที่ส่งมา ซึ่งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเกินกว่าจะยอมรับได้ จำเป็นต้องได้รับการศึกษาก่อนนำมาใช้งาน งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีกระบวนการในการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟังงานขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย [1]

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 [10] จำนวน 1 ตัว เป็นอุปกรณ์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในงานวิจัย โดยทำหน้าที่เป็นสถานีรับสัญญาณแบบจลเคลื่อนย้ายตำแหน่งเพื่อทำการรังวัดบนหมุดทดสอบต่างๆ ที่กำหนดไว้ สำหรับสถานีฐานเลือกใช้ GNSS Trimble NetR9 [11] ซึ่งติดตั้งอยู่บนขอบบ่อเหมือง โดยอุปกรณ์ทั้งสองได้รับความอนุเคราะห์จากทางแผนกรังวัด การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีสมรรถนะของเครื่องมือ ดังตารางที่ 1



(ก) Trimble R10

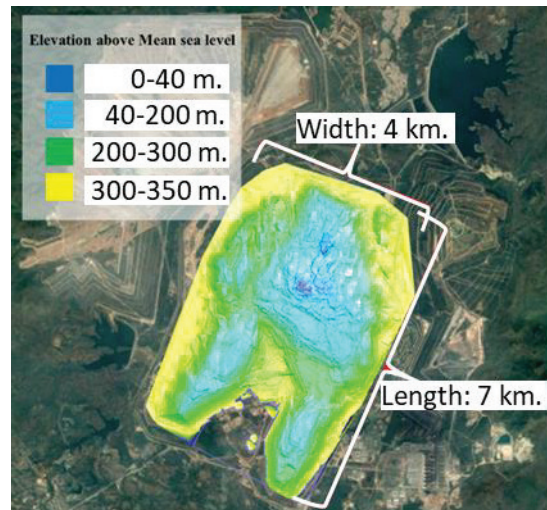


(ข) Trimble NetR9

รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 1 สมรรถนะของ Trimble R10 [10,11]

ความถูกต้องของการรังวัด	R10	NetR9
แบบสถิตทางราบ	±3mm +0.5 ppm	±3mm +0.1 ppm
แบบสถิตทางตั้ง	±5mm +0.5 ppm	±3.5mm +0.4 ppm
แบบ RTK ทางราบ	±8mm +1 ppm	±8mm +1 ppm
แบบ RTK ทางตั้ง	±15mm +1 ppm	±15mm +1 ppm



รูปที่ 3 ขนาดของเหมืองแม่เมาะ [1]

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนและพิกัดตำแหน่ง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใน [1] และ [12] แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างสถานีจร และสถานีฐานมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแปรผันตรงกับความคลาดเคลื่อน แสดงได้ดังสมการ 3

$$\text{Error}_i = a_0^i + a_1^i(V) + a_2^i(H) \quad (3)$$

โดย Error คือความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK เทียบกับค่าจริงจากการรังวัดด้วย

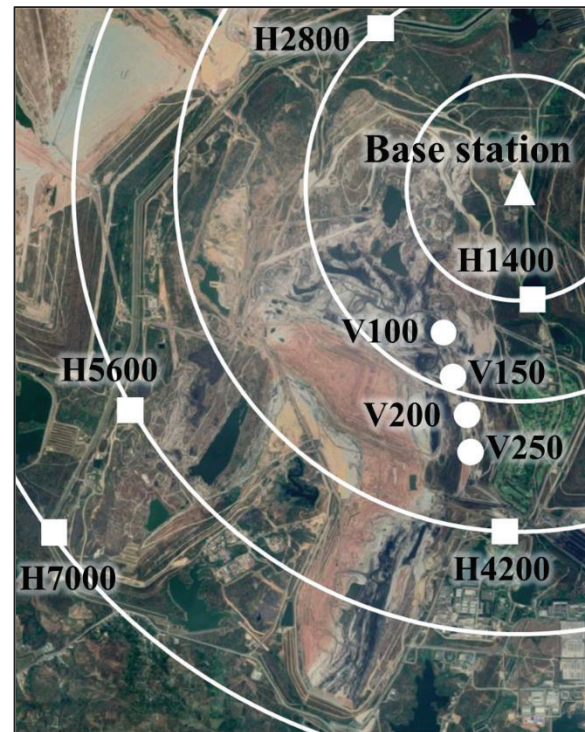
ดาวเทียมแบบสถิต, a_0 คือ พารามิเตอร์ของสมการ, a_1 คือ พารามิเตอร์หน้าตัวแปร V , a_2 คือ พารามิเตอร์หน้าตัวแปร H , V คือระยะห่างทางตั้ง หรือความต่างระดับระหว่างตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีจร, H คือระยะห่างทางราบ หรือระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีจร, t คือ ช่วงเวลาที่ทำการรังวัดเก็บข้อมูลซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลาระหว่างวันที่ 20 ก.ย. ถึงวันที่ 22 ก.ย. พ.ศ. 2561 ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน ช่วงที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 17 ธ.ค. ถึงวันที่ 25 ธ.ค. พ.ศ. 2561 ซึ่งเป็นช่วงฤดูหนาว และช่วงที่ 3 ทำการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 20 เม.ย. ถึงวันที่ 21 เม.ย. พ.ศ. 2562 ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน

3.3 ตำแหน่งหมุดและการรังวัดค่าพิกัดที่ใช้งานวิจัย

ตำแหน่งหมุดที่จะรังวัด หรือหมุดทดสอบ จะต้องทำการกำหนดขึ้นโดยพิจารณาจากการทำงานรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ซึ่งมีการใช้งานในบ่อเหมืองเป็นจำนวนมาก แสดงได้ดังรูปที่ 3 ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดหมุดให้กระจายครอบคลุมพื้นที่เพื่อให้ได้ข้อมูลความสัมพันธ์และปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความถูกต้องเชิงพิกัดอย่างครบถ้วน หมุดทดสอบถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4 คือ ชุดหมุดทางราบมีจำนวน 5 หมุด วางบนตำแหน่งที่มีระยะห่างทางราบจากสถานีฐานตามที่กำหนดคือ 1.4, 2.8, 4.2, 5.6 และ 7.0 กิโลเมตรและมีค่าระดับใกล้เคียงกันมากที่สุดซึ่งส่วนใหญ่จะวางไว้บริเวณผิวดิน ส่วนชุดหมุดทางตั้งมีจำนวน 4 หมุด วางบนตำแหน่งที่มีค่าระดับตามที่กำหนด คือ 250, 200, 150 และ 100 เมตร

การกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบตามที่ได้กล่าวไปในย่อหน้าที่แล้ว เป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดสับสนสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างทางราบและตั้ง ในการกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบ แบบจำลองความสูงเชิงเลข และแผนการชุดเหมืองถูกนำมาใช้พิจารณาหาตำแหน่งหมุดด้วย หมุดทดสอบทางตั้งจะทำการกำหนดให้มีระยะห่างทางตั้งจากสถานีฐานประมาณ 150, 200, 250 และ 300 เมตร โดยพิจารณาดำเนินงานจากเส้นชั้นความสูง อย่างไรก็ตามเหมืองแม่เมาะมีสภาพภูมิประเทศที่มีความสูงต่ำค่อนข้างมากและ

ยากต่อการเดินทางเข้าถึงตำแหน่งที่ตั้งของหมุดทดสอบ จึงใช้ระยะเวลาค่อนข้างมากในการเดินทางไปยังหมุดทดสอบเหล่านี้



รูปที่ 4 ตำแหน่งหมุดทางราบ (สี่เหลี่ยม) และทางตั้ง (วงกลม)

เนื่องจากมีกิจกรรมต่างๆ ในเหมืองเกิดขึ้นตลอดเวลา อาจทำให้หมุดทดสอบได้รับการรบกวน จึงจำเป็นต้องเลือกตำแหน่งที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางภูมิประเทศตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งต้องอาศัยแผนการทำเหมืองประกอบการตัดสินใจ ตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้จะสามารถถอดค่าพิกัดออกมาได้โดยใช้โปรแกรมด้านการสำรวจเป็นพิกัดคร่าวๆ การนำไปกำหนดตำแหน่งบนพื้นที่จริงทำได้โดยใช้ฟังก์ชันนำวิถีภายในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อวางหมุดทดสอบ

การรังวัดดาวเทียมจะทำบนหมุดทดสอบทุกหมุด กำหนดให้ค่ามาตรฐานสำหรับใช้ประเมินความถูกต้องได้มาจากการรังวัดแบบสถิตซึ่งทำการรับสัญญาณอย่างน้อย 45 นาที และนำข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ และสถานีถาวร มาประมวลผลร่วมกันโดยใช้โปรแกรม

ประมวลผล Trimble Business Center (TBC) [13] หลังจากนั้นทำการรังวัดแบบ RTK โดยรับสัญญาณประมาณ 5 นาที รังวัดหมุมละ 10 ครั้ง และจะทำการรังวัด 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงฤดูฝน ช่วงฤดูหนาว และช่วงฤดูร้อน นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเพื่อศึกษาผลกระทบจากสภาพอากาศและอุณหภูมิขณะทำการรังวัด

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

หลังจากทำการรังวัดเก็บข้อมูลภาคสนามเสร็จสิ้นค่าพิกัดของหมุดทดสอบแต่ละหมุดที่ได้จากการรังวัดแบบ RTK ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการรังวัดแบบสถิติผลที่ได้คือค่าความแตกต่างพิกัด โดยถือว่าค่าความแตกต่างนี้คือค่าความคลาดเคลื่อนพิกัดทางราบและทางตั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3 โดยที่ผลการคำนวณในช่วงที่ 1 และ 2 อ้างอิงจาก [1]

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพิกัดทางราบ

หมุดทดสอบ	ระยะห่างทางราบ (ม.)	ความคลาดเคลื่อน (ซม.)								
		ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน)			ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว)			ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน)		
		E	N	Elev	E	N	Elev	E	N	Elev
H1400	1447.472	2.4	0.3	0.6	0.7	1.5	1.3	1.5	0.5	0.5
H2800	2832.324	0.5	0.7	1.7	0.8	0.9	0.9	3.5	1.2	0.5
H4200	4198.578	2.6	1.5	3.4	3.0	2.6	1.4	0.8	2.2	0.8
H5600	5599.208	4.2	1.2	4.2	3.3	2.9	2.2	2.8	3.9	4.2
H7000	7021.518	4.3	0.6	2.2	1.4	0.9	1.5	0.7	0.3	1.0

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพิกัดทางตั้ง

หมุดทดสอบ	ระยะห่างทางตั้ง (ม.)	ความคลาดเคลื่อน (ซม.)								
		ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน)			ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว)			ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน)		
		E	N	Elev	E	N	Elev	E	N	Elev
V250	90.206	1.3	3.4	2.8	0.6	3.5	0.7	1.1	3.0	1.2
V200	139.211	0.9	2.3	6.3	1.2	1.5	5.1	0.8	0.2	6.4
V150	190.798	1.2	1.5	4.9	3.1	2.7	0.7	4.1	4.6	0.7
V100	236.307	1.5	2.0	4.3	1.9	0.4	1.7	1.1	2.6	2.3

เมื่อนำทั้ง 3 ช่วงเวลา มาประมวลผลร่วมกัน พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบเฉลี่ย 1.9 ซม. ทางตั้งเฉลี่ย 2.4 ซม. ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square หรือ RMS) ของพิกัดทางราบเท่ากับ 2.3 ซม. และทางตั้ง 3.1 ซม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation

หรือ SD) ของหมุดพิกัดทางราบคือ 1.3 ซม. และทางตั้ง 2.0 ซม. ดังแสดงในตารางที่ 4

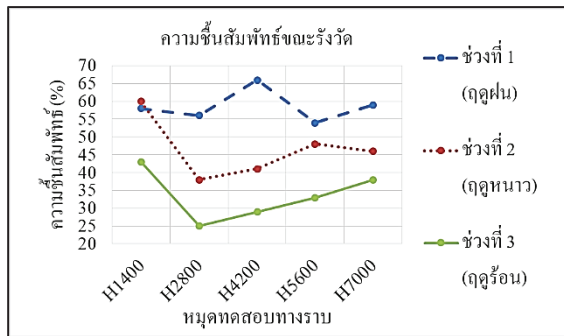
ตารางที่ 4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าพิกัดหมุดทดสอบ

การประมวลผลหมุดทดสอบ (หมุดทดสอบทางราบ และทางตั้ง)		ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	
		ทางราบ (N,E)	ทางตั้ง (Elev.)
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ซม.)	ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน)	1.8	3.4
	ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว)	1.8	1.7
	ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน)	2.0	2.0
	ทั้ง 3 ช่วง	1.9	2.4
ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) (ซม.)	ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน)	2.2	3.9
	ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว)	2.1	2.3
	ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน)	2.5	2.8
	ทั้ง 3 ช่วง	2.3	3.1
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) (ซม.)	ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน)	1.3	1.9
	ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว)	1.1	1.6
	ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน)	1.5	2.0
	ทั้ง 3 ช่วง	1.3	2.0

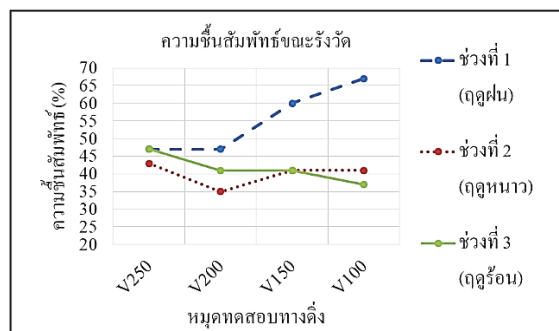
เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลา พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยพิกัดทางราบของทั้ง 3 ฤดูค่อนข้างใกล้เคียงกัน ที่น่าสนใจคือค่าพิกัดทางตั้งซึ่งพบว่าช่วงฤดูฝน มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากที่สุด (3.4 ซม.) รองมาเป็นฤดูร้อน (2.0 ซม.) และฤดูหนาวมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (1.7 ซม.) ซึ่งให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าสภาพอากาศส่งผลต่อการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK เนื่องจากสัญญาณจากดาวเทียมต้องเดินทางผ่านสภาพอากาศที่มีปริมาณความชื้นแตกต่างกันไปตามฤดู จึงได้นำข้อมูลการตรวจวัดสภาพอากาศบริเวณใกล้เคียงกับบ่อเหมืองแม่เมาะ [14] มาทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงเวลาที่ทำการรังวัดแบบ RTK แต่ละหมุดทดสอบ ทั้ง 3 ช่วง โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดบนหมุดทางตั้งในฤดูฝน มากกว่าฤดูร้อน และน้อยที่สุดในฤดูหนาวเกือบทุกหมุดทดสอบ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเหมืองแม่เมาะมีสภาพอากาศเฉพาะถิ่นที่เกิดจากไอน้ำที่ปล่อยจากปล่องโรงไฟฟ้าทำให้มีโอกาสที่ฝนจะตกได้ในพื้นที่บางส่วนของเหมืองแม่เมาะ

ในระหว่างวัน ตลอดทั้งปี จึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณตำแหน่งที่ตั้งของหมุดทดสอบแต่ละหมุด อาจจะมีค่าแตกต่างกัน นอกจากนั้นแล้ว ถึงแม้ว่าจะเป็นพื้นที่เดียวกัน แต่รับสัญญาณดาวเทียมในช่วงเวลาต่างกัน ความชื้นสัมพัทธ์ก็อาจจะแตกต่างกันได้



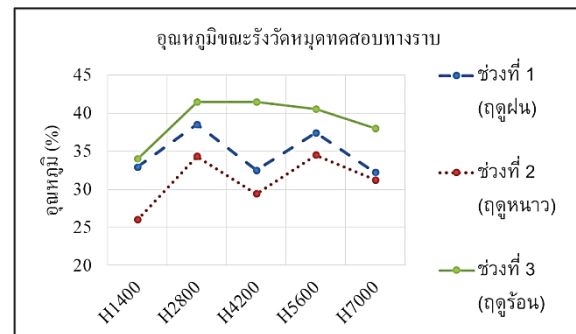
รูปที่ 5 ความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดบนหมุดทางราบ



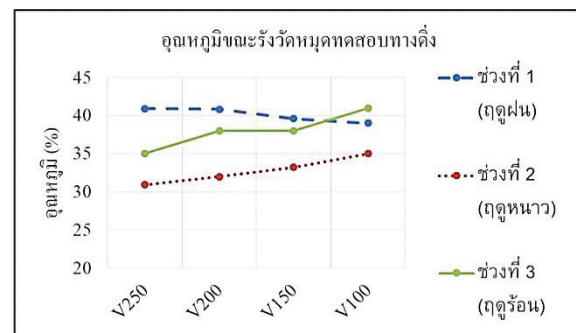
รูปที่ 6 ความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดบนหมุดทางตั้ง

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation หรือ SD) ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าช่วงฤดูร้อนค่าที่รังวัดได้จะแกว่งมากกว่าช่วงอื่นเล็กน้อย รองลงมาเป็นฤดูฝน และฤดูหนาวมีค่าที่น้อยที่สุด เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิในขณะรังวัดแต่ละหมุดของทั้ง 3 ฤดู มาพิจารณาประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิขณะทำการรังวัดของฤดูร้อนและฤดูฝน แตกต่างกันเล็กน้อย โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ทำการรังวัด แม้ว่าจะเป็นฤดูหนาวแต่อุณหภูมิภายในบ่อเหมือนที่แม่เมาะสามารถมีค่าที่สูงได้ อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เช่น ลม และก้อนเมฆ อย่างไรก็ตามในภาพรวมนั้นการรังวัดในฤดูร้อนหลายช่วงเวลามีอุณหภูมิสูงเป็นส่วนใหญ่ (34 – 42 องศา

เซลเซียส) ซึ่งตามทฤษฎีแล้วอุณหภูมิของบรรยากาศสามารถส่งผลต่อสัญญาณที่ส่งมา [15] รวมถึงแสงแดดที่ร้อนแรงอาจจะทำให้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงอาทิตย์บางช่วงคลื่นสอดแทรกเข้าไปกับคลื่นสัญญาณดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ [16] ได้ มีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 อุณหภูมิขณะรังวัดบริเวณพื้นที่ใกล้ตำแหน่ง (ก) หมุดทดสอบทางราบและ (ข) หมุดทดสอบทางตั้ง

การพิจารณาความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนทางพิกัดตำแหน่งกับระยะห่างและระดับความสูงต่างระหว่างสถานีจรและสถานีถาวร ในงานวิจัยนี้จะทำได้โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) [17] เบื้องต้น และเนื่องจากหมุดทดสอบทางตั้งไม่สามารถควบคุมให้ระยะห่างทางราบเท่ากันเนื่องจากสภาพภูมิประเทศภายในบ่อเหมือนแม่เมาะที่มีความลาดชันมากและเป็นอุปสรรคอย่างมากต่อการเข้าถึงพื้นที่ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ) เพื่อจัดสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรให้น้อยลง จึงได้วิเคราะห์ข้อมูลหมุดทดสอบ

ทางราบและหมุดทดสอบทางดิ่งร่วมกัน โดยแบ่งความคลาดเคลื่อนเป็นทางราบ (E และ N) และทางดิ่ง (Elev.) มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามฤดูกาล

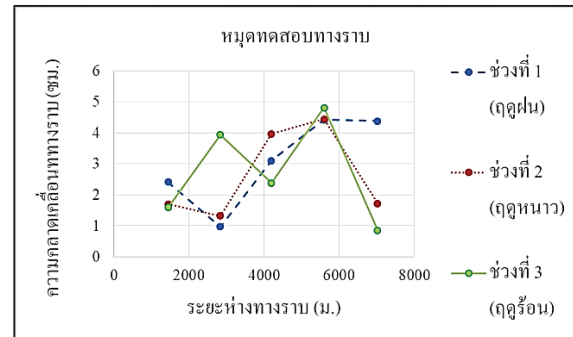
การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ จะใช้ลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (3) ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นตัวเลขสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination หรือ R^2) แสดงได้ดังตารางที่ 5 ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ตัวแปรฝั่งซ้ายของสมการหรือตัวแปรตาม คือค่าความคลาดเคลื่อน (Error) บนหมุดทดสอบ ส่วนตัวแปรฝั่งขวาของสมการหรือตัวแปรอิสระ คือระยะห่างทางดิ่ง (V) มีหน่วยเป็นเมตร ระยะห่างทางราบ (H) มีหน่วยเป็นเมตร และ a_0 มีหน่วยเป็นเซนติเมตร การจะสรุปว่าสมการหรือก็คือแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้มา มีความน่าเชื่อถือแค่ไหนสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 ที่มีขนาดใหญ่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

ตารางที่ 5 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอย

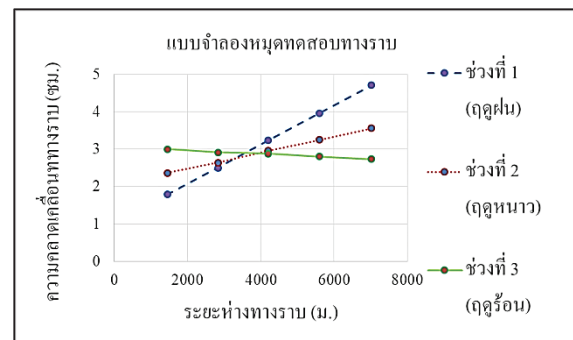
Error	ฤดู	a_0 (ซม.)	a_1 ($\times 10^{-3}$) (V)	a_2 ($\times 10^{-3}$) (H)	R^2
E,N	ฝน,หนาว,ร้อน	2.00	289.00	23.24	0.13
	ฝน	1.00	163.20	52.51	0.59
	หนาว	2.00	289.70	21.66	0.08
	ร้อน	3.00	414.10	-4.46	0.05
Elev (ซม.)	ฝน,หนาว,ร้อน	1.00	958.50	28.10	0.23
	ฝน	1.00	0.00	42.35	0.53
	หนาว	1.00	368.80	11.83	0.05
	ร้อน	0.00	849.80	31.85	0.11

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ พบว่าสมการความสัมพันธ์ของระยะห่างทั้งทางราบและทางดิ่งกับความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่ง มีค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกัน หากมีค่ามาก แสดงถึงตัวแปรอิสระ (ระยะห่างทางราบ และดิ่ง) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Error ในสมการ (3)) จากตารางที่ 5 พบว่า R^2 ในฤดูหนาวและร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ R^2 ในฤดูฝนค่อนข้างจะต่างออกไปมาก (R^2 เท่ากับ 0.5 โดยประมาณ) เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างกราฟ

ความสัมพันธ์มาเทียบกับผลการวิเคราะห์ โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 8 และ 9



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางราบกับระยะห่างทางราบ (ข) เส้นแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนทางราบจากแบบจำลอง

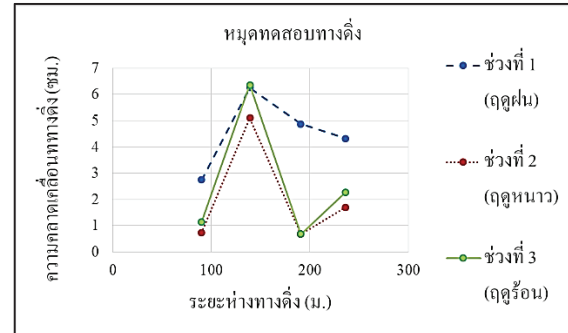
รูปที่ 8 (ก) แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพิกัดของหมุดทางราบ ซึ่งหมุดทดสอบทางราบมีการควบคุมให้ค่าระดับใกล้เคียงกัน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงมีนัยยะว่าน่าจะมาจากระยะห่างทางราบ พิจารณาจากกราฟทั้ง 3 ช่วง พบว่าความคลาดเคลื่อนทางราบ (E,N) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางราบจากสถานีฐานที่มากขึ้น

รูปที่ 8 (ข) ได้จากการแทนค่าตัวแปรอิสระลงในสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณในตารางที่ 5 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางราบอยู่ในช่วง 1-5 ซม. มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางราบจากสถานีฐานที่มากขึ้นสอดคล้องกับข้อมูลการรังวัดภาคสนามในรูปที่ 8 (ก)

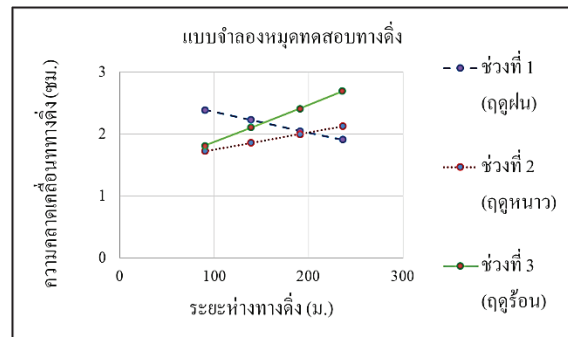
โดยข้อสังเกตที่พบคือ เส้นกราฟช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) และ 2 (ฤดูหนาว) ก่อนข้างมีลักษณะของแนวโน้มใกล้เคียงกับเป็นเส้นตรง ในขณะที่เส้นกราฟช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) เส้นกราฟมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงเท่าใดนัก อาจเป็นผลมาจากผลกระทบของอุณหภูมิที่ร้อนจัดทำให้พิกัดที่ได้มีความแปรปรวนมาก (ดูรูปที่ 7(ก)) ความสัมพันธ์เชิงเส้นในสมการที่ (3) อาจจะไม่สะท้อนถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดต่อไปในอนาคต โดยจะไม่ขอก้าวไปในงานวิจัยนี้ นอกจากนั้นแล้ว ลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 3 ช่วงเวลาแสดงให้เห็นว่ายิ่งความชื้นในอากาศสูง เช่น ช่วงที่ 1 และ 2 ลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่มีความชันมากขึ้นสะท้อนถึงความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการรังวัดดาวเทียมหากสถานีฐานห่างจากสถานีจรมากมีผลทำให้สภาพอากาศเหนือพื้นที่นั้นแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีความชื้นในบริเวณสถานีหนึ่งมากเป็นพิเศษ ก็ยิ่งทำให้เกิดความแตกต่างทางสภาพอากาศมากขึ้น ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนมากตามไปด้วย อาจเพราะเหตุนี้เมื่อนำไปวิเคราะห์ถดถอยจึงให้ค่า R^2 มีขนาดใหญ่ในช่วงฤดูฝน (ดูตารางที่ 5)

รูปที่ 9 (ก) แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งของหมุดทดสอบทางดิ่ง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในการกำหนดหมุดทดสอบทางดิ่งนี้ไม่สามารถควบคุมให้มีระยะห่างทางราบเท่ากันได้ด้วยข้อจำกัดทางภูมิประเทศของบ่อเหมืองแม่เมาะ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงอาจจะมาจากทั้งระยะห่างทางราบและทางดิ่ง พิจารณาจากกราฟทั้ง 3 ช่วงเวลา พบว่าความคลาดเคลื่อนทางพิกัดทางราบและทางดิ่ง มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางดิ่งจากสถานีฐานที่มากขึ้น ระยะห่างทางดิ่งจากสถานีฐานที่มากขึ้นส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนทางระดับ Elev. มีมากที่สุด อย่างไรก็ตามที่หมุดทดสอบทางดิ่ง V200 ซึ่งมีค่าระดับ 139.211 ม. มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้กับผนังบ่อเหมือง (ดูรูปที่ 4 ประกอบ) ซึ่งบ่อทั้งสัญญาณดาวเทียมทางฝั่งตะวันออกของเครื่องรับสัญญาณทำให้จำนวนดาวเทียมที่เครื่องสัญญาณรับได้จะน้อยกว่าหมุดทดสอบทางดิ่งที่

ตำแหน่งอื่นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเฉลี่ยมีขนาดโดยประมาณ 5 – 6 ซม.



(ก)



(ข)

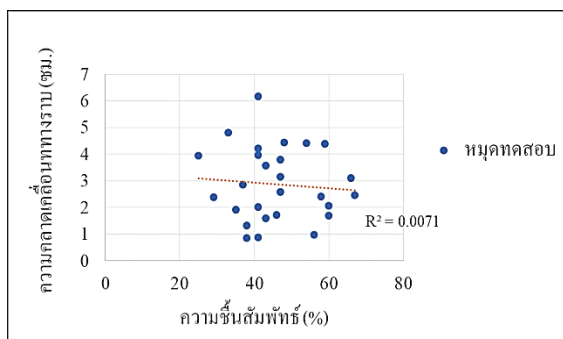
รูปที่ 9 (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งกับระยะห่างทางดิ่ง (ข) เส้นแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนทางดิ่งจากแบบจำลอง

รูปที่ 9 (ข) ได้จากการแทนค่าตัวแปรอิสระลงในสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณในตารางที่ 5 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางดิ่งอยู่ในช่วง 1-3 ซม. อย่างไรก็ตามหากไม่นำค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเฉลี่ยที่หมุดทดสอบ V200 มาพิจารณา จะทำให้ความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง (Elev.) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางดิ่งจากสถานีฐานที่มากขึ้น (ไม่ได้แสดงรูปในบทความวิจัยนี้)

ข้อสังเกตที่พบคือ ช่วงที่ 2 และ 3 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน สอดคล้องกับความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดหมุดทดสอบทางดิ่ง (แสดงดังรูปที่ 6) เป็นไปได้ว่าความชื้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง

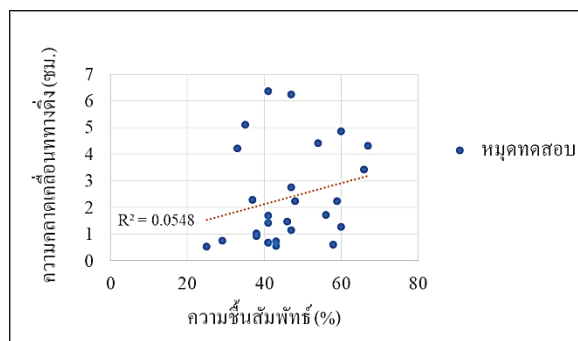
จากที่กล่าวมาข้างต้นระยะห่างทางราบและทางดิ่ง เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์แล้วกลับได้ ค่า R^2 ที่น้อยเกินกว่าจะใช้ในการทำนายความคลาดเคลื่อน ได้ และสำหรับข้อสังเกตทั้งในเรื่องของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ที่อาจมีความเกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น เมื่อได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 10 และ 11 ปรากฏว่าไม่พบแนวโน้มที่ ชัดเจนว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะมีความสัมพันธ์ ต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นทางราบหรือ ทางดิ่ง

อย่างไรก็ตามผลที่ได้ในงานวิจัยนี้ได้เป็นเพียงผลวิจัย ในเบื้องต้นเท่านั้น และจำกัดเฉพาะการเก็บข้อมูลใน สภาพแวดล้อมการทำงานของเหมืองแม่เมาะซึ่งแตกต่าง จากสถานที่อื่น อีกทั้งสภาพภูมิประเทศของเหมืองแม่เมาะ มีส่วนสำคัญที่ทำให้การวางแผนกำหนดจุดทดสอบทำได้ ยาก จำนวนหมุดทดสอบค่อนข้างน้อยส่งผลให้การ วิเคราะห์มีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่คาดหวังไว้



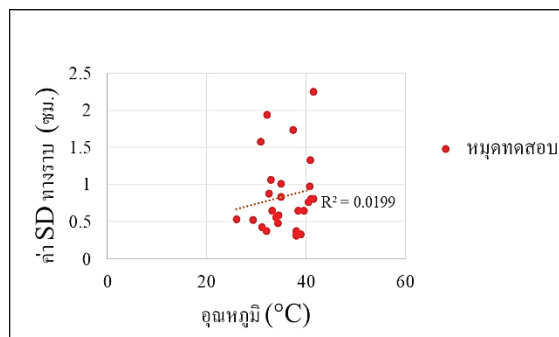
(ก)

รูปที่ 10 (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนทางราบ กับความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ความสัมพันธ์ของความ คลาดเคลื่อนทางดิ่งกับความชื้นสัมพัทธ์

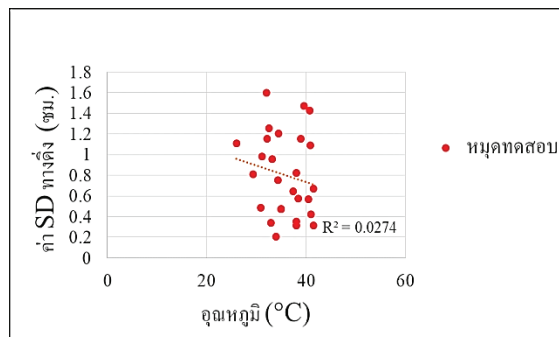


(ข)

รูปที่ 10 (ต่อ) (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน ทางราบกับความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ความสัมพันธ์ของความ คลาดเคลื่อนทางดิ่งกับความชื้นสัมพัทธ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 (ก) ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทาง ราบกับอุณหภูมิ (ข) ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานทางดิ่งกับอุณหภูมิ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบให้ มีระยะห่างทางราบและทางดิ่งห่างออกจากสถานีฐานตาม ระยะที่กำหนดไว้ โดยหมุดทดสอบกระจายตัวอยู่บริเวณ บ่อเหมืองแม่เมาะ เมื่อทำการรังวัดหมุดด้วยเทคนิคการ

รับวัดแบบ RTK ทั้ง 3 ช่วงเวลา คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และ ฤดูร้อน แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่รับวัดไว้ก่อนหน้านี้ด้วยวิธีสถิติ พบว่ามีค่าเฉลี่ยรวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในเกณฑ์การทำงานของ GNSS ในด้านการรับวัดสำรวจ ซึ่งมีขอบเขตความถูกต้องที่ 2 – 5 เซนติเมตร [18] ดังนั้นการใช้เทคนิคการรับวัดแบบ RTK ในพื้นที่เหมือนแม่เมาะจึงสามารถทำงานได้โดยจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ภายในเกณฑ์

สำหรับความชื้นในอากาศและอุณหภูมิขณะรับวัดพบว่าไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน และค่าเบี่ยงเบนในขณะที่ทำการรับวัดแบบ RTK อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนที่เป็นผลมาจากระยะห่างทางราบ และระยะห่างทางตั้ง เมื่อทำการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงพหุคูณ ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ หรือแบบจำลอง เมื่อนำไปแทนค่าข้อมูลรับวัด และสร้างกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง พบว่าพิกัดทางราบมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 1 - 5 ซม. สำหรับพิกัดทางตั้งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางตั้งอยู่ในช่วง 1 - 3 ซม. มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างจากสถานีฐานที่มากขึ้น สอดคล้องกับข้อมูลการรับวัดภาคสนาม อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะได้รับผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองขี้อายุที่ท้องถิ่นบริเวณเหมืองแม่เมาะ

การใช้งานช่วงเวลาก่อนและหลังฝนตกพบว่าบนท้องฟ้าจะมีเมฆหนาแน่นซึ่งอาจทำให้ประสบปัญหาในการรับสัญญาณ และอาจใช้เวลาในการ initialize ก่อนใช้งาน การรับวัดแบบ RTK เพียงครั้งเดียวอาจไม่ได้ค่าพิกัดที่ดีที่สุด ผู้ปฏิบัติงานควรทำการรับวัดซ้ำ ซึ่งต้องพิจารณาความเหมาะสมของลักษณะงาน หากเป็นงานในการออกหมุดอ้างอิงควรใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อให้ค่าพิกัดมี

ความถูกต้องมากที่สุด หากเป็นงานสำรวจภูมิประเทศซึ่งไม่ต้องการความถูกต้องสูงอาจสามารถใช้การรับวัดเพียงครั้งเดียวได้ ตำแหน่งในการรับวัดเพื่อออกหมุดอ้างอิงควรจะเป็นพื้นที่เปิดโล่ง แม้ว่าการรับวัดในจุดที่ไม่ห่างจากสถานีฐานมากจะให้ค่าพิกัดที่ดี แต่หากสัญญาณถูกบดบังจนไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมในตำแหน่งทางเรขาคณิตที่ดีได้ คุณภาพของค่าพิกัดที่รับวัดก็จะลดลง นอกจากนั้นในกรณีที่ต้องการรับวัดแบบ RTK แต่จุดที่จะฝังหมุดอยู่ไกลจากสถานีฐานมาก และต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนต่ำก็ควรพิจารณาใช้วิธีสถิติแทนจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีค่า r^2 ที่น้อยเกินกว่าจะใช้ในการทำนายความคลาดเคลื่อนได้ เพราะหมุดที่นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์มีจำนวนน้อย เนื่องจากข้อจำกัดทางภูมิประเทศของบ่อเหมืองแม่เมาะจึงทำให้แบบจำลองที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณแสดงความผันแปรของความคลาดเคลื่อนกับระยะห่างทางราบและทางตั้งระหว่างสถานีฐานและสถานีจรได้ไม่ดีเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามหากมีการใช้จำนวนหมุดทดสอบที่มากขึ้นและการพิจารณาปัจจัยอื่นๆ อาจสามารถปรับปรุงแบบจำลองให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้นได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณการสนับสนุนจากโครงการความร่วมมือทางการศึกษา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (โครงการ กฟผ.-มช.) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และให้คำปรึกษาในการวิจัยงานวิจัยสำเร็จคล่อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธเนศพล บุญประกอบ และ พุทธิพล ดำรงชัย. ผลกระทบของความยาวเส้นฐานต่อความถูกต้องของการสำรวจ รับวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในพื้นที่บริเวณเหมืองถ่านหินเปิดแม่เมาะ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, 10-12 กรกฎาคม, อุตรธานี, 2562; 2509-2515.

- [2] Guochang, X. GPS: Theory, Algorithms and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [3] เฉลิมชนม์ สติระพจน์. การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเบื้องต้น. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [4] บุญฤทธิ์ เขียวอร่าม และ พุทธิพล คำรังชัย. การประเมินความถูกต้องของวิธีการรังวัดเพื่อหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2562; 26(1): 59-79.
- [5] Lau, L. Investigation into the Effect of Atmospheric Particulate Matter (PM2.5 and PM10) Concentrations on GPS Signals. *sensors*, 2017; 17(3): 508/1-508/17.
- [6] Janssen, V. and Haasdyk J. Assessment of Network RTK performance using CORSnet-NSW. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNS Symposium 2011, November, Sydney, Australia, 2011.
- [7] Zhang, K., Wu, F., Wu, S., Rizos, C., Roberts, C., Ge, L., Yan, T., Gordini, C., Kealy, A., Hale, M., Ramm, P., Asmussen, H., Kinlyside, D. and Harcombe, P. Sparse or Dense: Challenges of Australian Network RTK. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNS Symposium, July, Queensland, Australia, 2006.
- [8] พุทธิพล คำรังชัย และศุภฤกษ์ ชัยชนะ. การวัดความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน บริเวณประเทศไทย. *วิศวกรรมสาร มท.*, 2555; 82: 47-59.
- [9] Dumrongchai, P., Wichienchareon, C. and Promtong, C. Local Geoid Modeling for Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 2012; 8(4): 15-26.
- [10] Trimble Navigation Limited. Trimble R10 GNSS SYSTEM datasheet, 2013. [online] available: <http://www.trimble.com/survey/trimbler10.aspx>.
- [11] Trimble Navigation Limited. Trimble NetR9 GNSS Reference Receiver datasheet, 2013. [online] available: <https://www.trimble.com/Real-Time-Networks/Trimble-NetR9.aspx>.
- [12] Allahyari, M. Accuracy Evaluation of Real-Time GNSS Survey Observations. Master of Science's thesis, Oregon State University, USA, 2016.
- [13] Trimble Navigation Limited. Technical Notes. Trimble Business Center Office Software, 2015. [online] available: <http://www.trimble.com/survey/trimble-business-center.aspx>.
- [14] สภาพอากาศประเทศไทย. ประวัติข้อมูลสภาพอากาศ. 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://th.freemeteo.com>.
- [15] Dewesoft Company. GPS Measurement and Recording-GNSS Learning Platform. 2017. [online] available: <https://dewesoft.pro/online/course/gps-measurement-and-recording-gnss>
- [16] Fernandez, E., Calero, D. and Eulalia, M. CSAC Characterization and Its Impact on GNSS Clock Augmentation Performance Guidelines. *sensors*, 2017; 17(2): 370/1-370/19.
- [17] Mikhail, E. and Ackermann, F. Observations and Least Squares. University Press of America, Washington, DC, 1976.
- [18] Zilkoski, D., D'Onofrio, J.D. and Frakes, S.J. Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoidal Heights [standard: 2 cm and 5 cm]. NOAA NOS, Silver Spring, Maryland, USA, 1997.



การเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้า และความร้อนโดยใช้เทคนิคเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อน Performance Improvement of Photovoltaic/Thermal Panels by Using Heat Transfer Augmentation

ธนกรณ์ สุขกะโต¹ มัศตาร์ แวะหะยี¹ จันทกานต์ ทวีกุล¹ อิบรอเฮง ปิยา²

นิโอะ ปูซู² ปริญญ์ พานิชย์² และ ชยุต นันทดุษิต^{1,*}

Tanakorn Sukkato¹, Makatar Wae-hayee¹, Juntakan Taweekun¹, Ibroheng Piya²,
Nioh Puzu², Parinya Panich² and Chayut Nuntadusit¹

¹สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Energy Technology Research Center, Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

*E-mail: chayut.n@gmail.com

Telephone Number: 074-287035-6, Fax Number: 074-558830

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการลดอุณหภูมิให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน ด้วยการติดตั้งโมดูลระบายความร้อนเข้ากับด้านหลังของแผง ซึ่งโมดูลระบายความร้อนนี้มีช่องบังคับการไหลแบบวอกกลับและครีบริ้วสร้างความปั่นป่วนรูปตัววีมุม 45° ติดตั้งอยู่ภายในเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน โดยน้ำที่ไหลผ่านโมดูลระบายความร้อนจะดึงความร้อนที่สะสมออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิของแผงลดลงและได้น้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ เรียกระบบดังกล่าวว่าแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนหรือแผง PV/T ในการทดสอบได้ประเมินประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อนและพลังงานสุทธิที่ผลิตได้จากแผง PV/T เปรียบเทียบกับแผง PV แบบทั่วไปที่สภาวะการใช้งานจริงและกำหนดอัตราการไหลของน้ำในระบบแผง PV/T ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s จากผลการทดสอบพบว่า แผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อนที่ 14.20-14.90% และ 40.70-44.30% ตามลำดับและมีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าแผง PV ที่ใช้อ้างอิงสูงสุดถึง 13.97%

คำสำคัญ: แผง PV/T ครีบริ้วสร้างความปั่นป่วน ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน

ABSTRACT

This research studied temperature reduction of Polycrystalline silicon photovoltaic panel with the cooling module installed at the back panel. Serpentine channel and 45° V-shaped rib turbulators were attached inside the cooling module for enhance heat transfer ability. Water flow inside the cooling module will absorb the accumulated heat in the PV panel and produced hot water for usage. This design was called Photovoltaic/Thermal or PV/T panel. In this experiment, electrical, thermal efficiencies and net energy which produce by PV/T panel were evaluated and compared with normal PV panel at the

real conditions for water flow rate of PV/T system are 0.5, 1.0 and 1.5 kg/s. The results showed the electrical and the thermal efficiencies of the PV/T were 14.20-14.90% and 40.70-44.30% respectively and more electrical power than PV panel about 13.97%

Keywords: PV/T panel, Rib turbulator, Electrical efficiency, Thermal efficiency

1. บทนำ

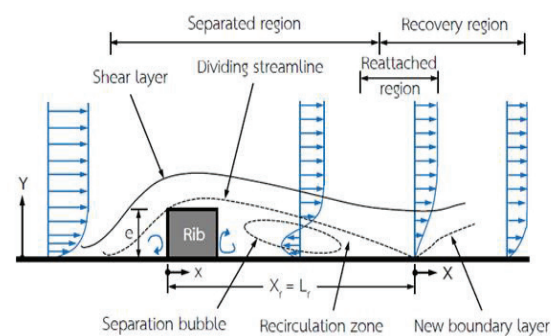
แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างมาจากสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไปแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 15% แต่เนื่องจากการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงนั้น ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะเกิดขึ้นและสะสมอยู่ในแผง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 25°C (อุณหภูมิทดสอบประสิทธิภาพตามมาตรฐาน STC) จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง แนวคิดในการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงถูกนำมาใช้เพื่อลดอุณหภูมิให้กับแผงและนำประสิทธิภาพที่หายไปนั้นกลับคืนมา ตัวอย่างงานวิจัยที่พัฒนาด้านนี้ได้แก่ การลดอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการสร้างฟิล์มน้ำหรือการพ่นละอองน้ำ และการศึกษาระบบระบายความร้อนแบบบังคับสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอากาศ เป็นต้น

นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้วนั้น การติดครีบทับเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนให้กับระบบระบายความร้อนยังเป็นส่วนสำคัญ การติดตั้งกลไกการระบายความร้อนด้วยครีบทับเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพมาก ซึ่งครีบทับคือส่วนที่ติดตั้งบนพื้นผิวเพื่อวางขวางการไหล ส่วนใหญ่นั้นจะวางขวางการไหลตามแนวราบทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้านหลังบริเวณที่ติดตั้งครีบทับเพิ่มขึ้นจนเกิดการพัฒนาระบายความร้อนโดยการใช้ครีบทับ การไหลของของไหลผ่านครีบทับทำให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นบริเวณด้านหลังของครีบทับและเกิดการไหลหมุนวน

วนเกาะติดผนังมากขึ้นส่งผลต่อการพัฒนาชั้นขอบเขต
ก่อนข้างมาก

โดยปกติการถ่ายเทความร้อนด้วยการไหลผ่านครีบริบจะขึ้นอยู่กับความสูงของครีบริบ (Rib height) ระยะห่างระหว่างครีบริบ (Pitch) มุมการติดครีบริบ (Rib Angle) รูปแบบหน้าตัดของครีบริบ (Rib profile) และช่องการไหลของครีบริบ (Rib channel) โดยตัวแปรดังกล่าวจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกัน

นอกจากนี้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนยังขึ้นอยู่กับระยะการไหลเกาะติดกับผนัง (Reattachment length, L_r) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยตำแหน่งการไหลเกาะติดกับผนังจะมีการถ่ายเทความร้อนที่สูง



รูปที่ 1 โครงสร้างการไหลผ่านคิรีบ [1]

การศึกษาที่เกี่ยวกับการติดตั้งครัวและช่องการไหล และการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากการระบายความร้อน ได้แก่

Webb และคณะ [2] ได้ทำนายผลของรูปแบบการไหลตามแนวกระแสน้ำของครีบท่อนที่ระยะพิทต่อความสูงครีบท่อน (p/e) ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าในกรณีที่มีระยะพิทต่อความสูงครีบท่อนต่ำ (p/e < 5) จะเกิดการไหลแยกตัวที่ด้านหลังของครีบท่อนแรกและหมุนวนขึ้นระหว่างครีบท่อนทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่าระยะพิทต่อความสูงครีบท่อนต่ำ จะไม่ก่อให้เกิดกระแสน้ำไหลเกาะติดผนัง (Reattachment

length) แต่ในทางตรงข้าม เมื่อระยะพิทต่อความสูงครีปเพิ่มขึ้นจะเกิดการไหลแยกตัวหมุนวนด้านหลังครีปตัวแรก และเกิดระยะการไหลเกาะติดบริเวณผนังด้วย นอกจากนั้นจากการทดสอบยังพบว่าค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่ระยะพิทต่อความสูงครีปประมาณ 10 สำหรับช่องการไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม

Park และคณะ [3] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของช่องการไหล (W/H) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลด (Pressure drop) ในการทดลองกำหนดอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหล (W/H) ที่ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 4 โดยคิดครีปทำมุม 30° , 45° , 60° และ 90° ตามลำดับที่ค่าเรย์โนลด์ส้นับเบอร์ 30,000 จากผลการทดลองพบว่า การคิดครีปทำมุม 60° ค่าการถ่ายเทความร้อนนั้น ไม่มีนัยสำคัญมากแต่ค่าความดันลดนั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของช่องการไหลเปลี่ยนจากน้อยไปมาก (0.25 ถึง 4)

Natthaporn และคณะ [4] ได้ศึกษารูปแบบครีปและลักษณะช่องการไหลที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวโดยใช้อากาศเป็นตัวกลางระบายความร้อน กำหนดอัตราส่วนความสูงครีปต่อความสูงช่องการไหล (e/D_h) และอัตราส่วนระยะพิทต่อความสูงของครีป (p/e) ที่ 0.13 และ 10 ตามลำดับ รูปแบบครีปที่ใช้ศึกษาได้แก่ ครีปแบบเอียงมุม 30° ถึง 90° ครีปรูปตัววีและรูปตัววีแบบกลับ มุม 45° และ 60° สำหรับลักษณะช่องการไหลที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ช่องการไหลแบบตรงและช่องการไหลแบบวกกลับ เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่ค่าเรย์โนลด์ส้นับเบอร์ 30,000 พบว่าครีปรูปตัววีให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าครีปแบบเอียง โดยครีปรูปตัววีมุม 60° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และสูงกว่าครีปรูปตัววีมุม 45° เพียงเล็กน้อย ในส่วนของลักษณะช่องการไหลพบว่า ช่องการไหลแบบวกกลับจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าช่องการไหลแบบตรง เนื่องจากการปะทะของของไหลกับผนังในส่วนวกกลับทำ

ให้เกิดความปั่นป่วนที่รุนแรงของกระแสการไหลส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูง

E.Skoplaki และ J.A. Palyvos [5] ได้ศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและพลังงาน พบว่าอุณหภูมิมีนัยสำคัญในขั้นตอนการแปลงพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความเข้มของแสงอาทิตย์จะทำให้ค่าประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนที่แผงโมดูล โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์ระบายความร้อนและสภาพแวดล้อม เป็นต้น

Krauter และคณะ [6] ได้ศึกษาการเพิ่มกำลังในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทดสอบปล่อยน้ำให้ไหลผ่านบริเวณผิวรับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ โมเดล M 55 จำนวน 2 แผง เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ความต่างศักย์วงจรเปิดและกำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน วางเรียงทำมุมตามละติจูดของพื้นที่ ($23^\circ N$) วัดค่าความเข้มแสงในระนาบเดียวกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปล่อยน้ำด้วยหัวฉีดจำนวน 12 หัว ที่ติดตั้งอยู่เหนือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยอัตราการไหล 2 LPM ให้น้ำไหลผ่านเป็นฟิล์มบางประมาณ 1 mm พบว่าสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่ทำงานได้มากถึง $22^\circ C$ และผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากถึง 10.3% ต่อวัน

อิสระพงศ์และคณะ [7] ได้ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์เชิงพาณิชย์ ขนาดของแผง $0.99\text{ m} \times 1.96\text{ m}$ โดยติดครีปอลูมิเนียมใต้แผงและใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอกเข้าไปในช่องใต้แผงที่หุ้มฉนวน ด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ 0.037 ถึง 0.0725 kg/s พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของแผงโมดูลนั้นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น โดยได้ทดสอบที่ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ 998.10 ถึง 1186.82 W/m^2

ได้ผลว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเมื่อมีการระบายความร้อนนั้น มีค่าสูงกว่ากรณีแผงโมดูลปกติถึง 24%

มันทนา และคณะ [8] ได้ประเมินสมรรถนะของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับทำน้ำร้อนในครัวเรือน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สองชนิดที่มีการติดตั้งระบบดูดซับความร้อนไว้ โดยชนิด A เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนและชนิด B เป็นแผงแบบอะมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งทั้งสองชนิดนั้นได้ติดตั้งท่อทองแดงที่มีน้ำไหลผ่านในท่อไว้ด้านหลังแผงเพื่อดูดซับความร้อน การทดลองกระทำที่อัตราการไหลของน้ำสองค่าคือ 0.03 และ 0.06 kg/s พบว่าค่าประสิทธิภาพทางความร้อนและไฟฟ้าของแผงชนิด A มีค่า 53.22 % และ 10.02 % ตามลำดับและสำหรับชนิด B มีค่า 42.70 % และ 4.57 % ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ได้มีการเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการระบายความร้อนหลากหลายรูปแบบ อาทิ การระบายความร้อนด้วยฟิล์มน้ำด้านหน้าแผง การระบายความร้อนโดยฉีดชุดท่อทองแดงที่มีน้ำไหลผ่านด้านหลังแผงและการติดตั้งบังคับการไหลของอากาศและใช้พัดลมระบายความร้อนโดยการออกแบบที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อสมรรถนะของระบบที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน (PV/T) โดยติดตั้งโมดูลระบายความร้อนด้วยน้ำที่มีช่องการไหลและครีบอกุญภายในเพื่อเพิ่มความสามารถในการดึงความร้อน โดยจะพิจารณาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อนและพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ของระบบแผง PV/T เปรียบเทียบกับแผง PV ในสภาวะการใช้งานจริง

2. วิธีการวิจัย

เนื่องจากแผงรับแสงอาทิตย์แบบผลิตไฟฟ้าและความร้อน หรือ แผง PV/T เป็นการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ผสานเข้ากับโมดูลระบายความร้อน (Cooling module) ที่บริเวณด้านหลังของแผง ทำให้

สามารถผลิตได้ทั้งกระแสไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และน้ำร้อนจากโมดูลระบายความร้อน โดยวิธีการคำนวณและวิธีการทดสอบนั้นจะแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีการประเมินสมรรถนะของแผง PV/T

การประเมินความสามารถในการผลิตพลังงานของแผง PV/T นั้นถูกแสดงออกในรูปของประสิทธิภาพช่วงขณะ ซึ่งเป็นการคำนวณประสิทธิภาพจากข้อมูลที่ได้จากการวัดค่า ณ เวลานั้นๆ โดยประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T และแผง PV สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{PV} = \frac{P}{I_T \times A_{PV}} \quad (1)$$

ซึ่งประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T อาจมีค่าต่ำกว่าแผง PV ได้ในช่วงเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจากน้ำที่กักเก็บไว้ส่งผลต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคุณสมบัติด้านสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) ที่มีค่าติดลบ หมายถึง การที่เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นลดลง

ในการทำงานเดียวกันประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T อาจมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ (Solar collector) เนื่องจากค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของชั้นผิวที่เคลือบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงและอีกปัจจัยหนึ่งคือค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorption factor) มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับแผ่นวัสดุที่ใช้ในการดูดกลืนรังสีของตัวเก็บความร้อนรังสีอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})}{I_T \times A_{PV}} \quad (2)$$

สำหรับการคำนวณพลังงานสุทธิของระบบนั้นจะเป็นผลรวมของพลังงานไฟฟ้าสุทธิและพลังงานความร้อนที่ระบบผลิตได้ในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{Net} = E_{el} + E_{th} \quad (3)$$

โดยพลังงานไฟฟ้าสุทธิ (E_{el}) ที่ผลิตได้จากแผง PV, PV/T สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{el} = (P - 0.9P_{pump}) \times t \quad (4)$$

โดยที่

$$P_{pump} = \dot{Q} \times \Delta P \quad (5)$$

และสามารถคำนวณพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากระบบแผง PV/T ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำร้อนจากสมการ

$$E_{th} = mC_p \Delta T \quad (6)$$

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าชั่วขณะ, P คือ กำลังไฟฟ้าของแผง PV/T หรือ PV (W), I_T คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผง (W/m^2), A_{PV} คือ พื้นที่ผิวรับแสงของแผง PV/T หรือ PV (m^2), η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะ, $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบ (kg/s), C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($J/kg \cdot ^\circ C$), T_{in} คือ อุณหภูมิน้ำเข้าโมดูลระบายความร้อน ($^\circ C$), T_{out} คือ อุณหภูมิน้ำออกโมดูลระบายความร้อน ($^\circ C$), E_{Net} คือ พลังงานสุทธิที่ผลิตได้ (J/day), E_{el} คือ พลังงานไฟฟ้าสุทธิที่ผลิตได้ซึ่งหักพลังงานในการปั๊มน้ำออกแล้ว (J/day), E_{th} คือ พลังงานความร้อนที่ผลิตได้ (J/day), t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (s), P_{pump} คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการปั๊มน้ำของระบบแผง PV/T, $\dot{Q}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำในระบบ PV/T (m^3/s), ΔP คือ ค่าการสูญเสียความดันของน้ำในระบบแผง PV/T (N/m^2), m คือ มวลของน้ำที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิ และ ΔT คือ ค่า

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำในถังเก็บน้ำร้อนตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ ($^\circ C$)

2.2 ชุดทดสอบแผง PV/T

ชุดทดสอบแผง PV/T ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อมีแสงมาตกกระทบบนที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอนขนาด $1.95 m \times 0.99 m$ กำลังไฟฟ้าสูงสุด 300 W จำนวน 2 แผง เพื่อใช้ในการงานวิจัย โดยแผงหนึ่งจะถูกติดตั้งโมดูลระบายความร้อนจำนวน 9 โมดูลที่ด้านหลังของแผงเรียกว่าแผง PV/T และอีกแผงหนึ่งไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆ เพื่อใช้เป็นแผงอ้างอิงเรียกว่าแผง PV

โมดูลระบายความร้อน ทำหน้าที่ระบายความร้อนที่สะสมอยู่ในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยน้ำจะถูกใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนและนำน้ำร้อนที่ได้ไปใช้งานต่อไป โมดูลระบายความร้อนนี้ทำจากอลูมิเนียมเกรด 5083 ที่มีความหนา 4 mm ภายในโมดูลนั้นเป็นช่องบังคับการไหลแบบวกกลับและมีครีบบังน้ำขึ้นเป็นรูปตัววีมุม 45° ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $5 mm \times 5 mm$ และมีอัตราส่วนความสูงครีบบังต่อความสูงช่องการไหลที่ 0.25 ติดตั้งอยู่ภายในช่องการไหล น้ำที่ไหลในช่องการไหลนั้นจะเกิดความปั่นป่วนทำให้ความสามารถในการดึงความร้อนออกจากแผงนั้นเพิ่มขึ้น

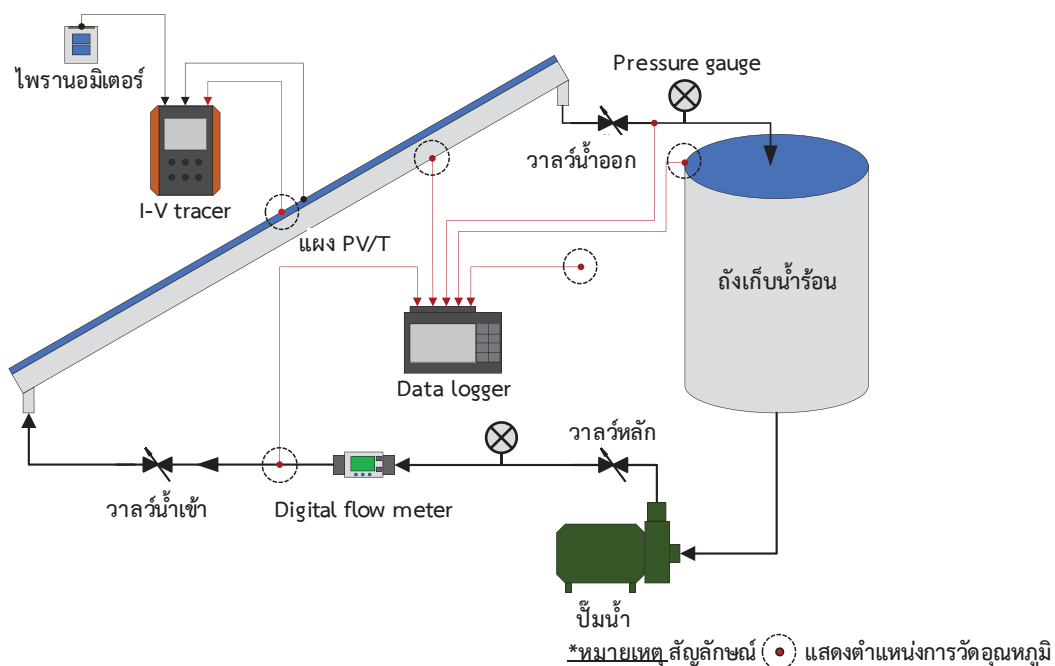
ระบบท่อและถังเก็บน้ำร้อน ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและเก็บน้ำร้อน โดยน้ำจะถูกลำเลียงจากถังเก็บขนาด 200 L ไปยังโมดูลระบายความร้อนด้วยปั๊มน้ำ น้ำจะถูกส่งออกจากปั๊มไปยังท่อน้ำเข้าซึ่งมีวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำให้เท่ากันทุกๆ โมดูล น้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะไหลออกจากโมดูลแล้วกลับไปยังถังเก็บน้ำร้อนด้วยท่อน้ำกลับ

อุปกรณ์วัดและเครื่องมือบันทึกข้อมูล กำลังไฟฟ้าที่แผงทั้ง 2 ผลิตได้ถูกวัดโดยเครื่อง I-V tracer รุ่น I-V400W ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 50 ถึง 1000 W มีค่าความถูกต้องที่ $\pm 1\%$ ความเข้มแสง ถูกวัดโดย ไพรานอมิเตอร์ รุ่น HT 304 ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 50 ถึง $1400 W/m^2$ มีค่า

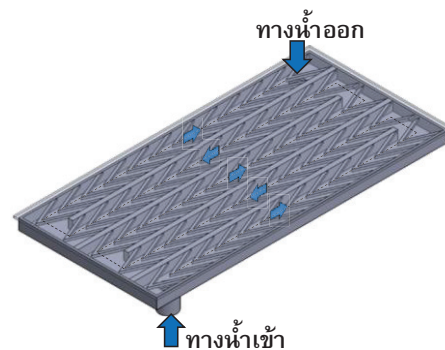
ความถูกต้องที่ $\pm 3\%$ โดยค่าทางไฟฟ้านี้จะถูกบันทึกทุกๆ 20 นาที

อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อนและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ ถูวัดโดย Thermocouple type T ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 40 ถึง 350 °C มีค่าความถูกต้องที่ ± 0.5 °C โดยข้อมูลอุณหภูมิทุกตำแหน่งจะถูกบันทึกลงใน Data logger รุ่น GL820

อัตราการไหลของน้ำ ถูวัดโดย Digital flow meter รุ่น PF3W711 ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 10 ถึง 100 LPM มีค่าความถูกต้อง $\pm 3\%$ และวัดค่าการสูญเสียความดัน โดยใช้ Pressure gauge ซึ่งมีช่วงการวัดที่ 0 ถึง 1 bar โดยแผนภาพชุดทดสอบของแผง PV/T และโมเดลของโมดูลระบายความร้อนที่ถูกติดตั้งได้แสดงดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดสอบของแผง PV/T ที่ติดตั้งครีบริบสร้างการปั่นป่วนในโมดูลระบายความร้อน



รูปที่ 3 โมเดลของโมดูลระบายความร้อนซึ่งติดตั้งครีบริบสร้างการปั่นป่วนรูปตัววีมุม 45° ในช่องบังคับการไหลแบบวกกลับ

2.3 วิธีการทดสอบ

ชุดทดสอบแผง PV/T ถูกติดตั้ง ณ คาดฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ซึ่งมีพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่ $7^{\circ}00'15.6''$ N $100^{\circ}30'65.4''$ E โดยแผงจะทำมุมเอียง 7° กับพื้นราบ ตามละติจูดของพื้นที่ การทดสอบกระทำที่อัตราการไหลของน้ำในระบบแผง PV/T 3 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s ด้วยการปรับวาล์วหลักที่ติดตั้งบริเวณทางออกของปั้มน้ำ โดยทดสอบแต่ละอัตราการไหลตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น.



รูปที่ 4 ชุดทดสอบแผง PV/T

น้ำที่อุณหภูมิ 30°C จะถูกดูดจากถังเก็บน้ำร้อนขนาด 200 L ด้วยปั้มน้ำ 1.5 kW น้ำจะถูกส่งออกจากปั้มน้ำผ่านวาล์วหลักซึ่งใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ค่า แล้วไหลต่อไปยังท่อรวมน้ำเข้าซึ่งได้แยกออกเป็นท่อน้ำเข้าย่อยๆ 9 ท่อด้วยกัน น้ำที่ผ่านท่อน้ำเข้าจะถูกส่งต่อไปยังโมดูลระบายความร้อนทั้ง 9 โมดูลที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่เข้าสู่โมดูลระบายความร้อนจะไหลในช่องการไหลแบบวกกลับซึ่งติดตั้งกริ๊บสร้างความปั่นป่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำที่ได้รับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไหลออกจากโมดูลระบายความร้อนไปยังท่อรวมน้ำขาออกแล้วกลับสู่ถังเก็บน้ำร้อนโดยน้ำจะไหลเวียนภายในระบบตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ สำหรับการวัดค่า กำลังไฟฟ้าจะถูกวัดโดยเครื่อง I-V tracer ค่าความเข้มแสงถูกวัดโดย ไพรานอมิเตอร์ อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผง PV/T, PV

อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลและอุณหภูมิน้ำในถังเก็บถูกวัดโดย Thermocouple type T และบันทึกค่า Data logger ซึ่งทั้งค่าทางไฟฟ้าและอุณหภูมิจะถูกบันทึกทุกๆ 20 นาที ตลอดระยะเวลาการทดสอบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของระบบผลิตไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

ชนิดของระบบ	แผง PV/T	แผง PV
เซลล์แสงอาทิตย์		
ชนิด	Poly-Si	Poly-Si
ยี่ห้อ	Full Solar	Full Solar
รุ่น	FAL 300P	FAL 300P
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ขนาด (mm x mm)	1956 x 992	1956 x 992
คุณสมบัติทางไฟฟ้า		
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{MP})	300 W	300 W
แรงดันไฟฟ้า ณ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_{MP})	36.19 V	36.19 V
กระแสไฟฟ้า ณ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_{MP})	8.29 A	8.29 A
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc})	44.71 V	44.71 V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	8.88 A	8.88 A
ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ ($\eta_{PV,STC}$)	15 %	15 %
โมดูลระบายความร้อน		
คุณสมบัติทางกายภาพ		
ขนาด (mm x mm)	315 x 650	
ความสูง (mm)	20	
วัสดุ	อลูมิเนียม	
ฉนวนกันความร้อน	EDPM	
ปั้มน้ำ		
ยี่ห้อ	MITSURO	
แรงดัน	220 V	
พิกัดกำลังสูงสุด	1.5 kW	

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ผลการทดสอบได้ถูกนำเสนอใน 3 ส่วน คือ ผลของอุณหภูมิภายในระบบกับความเข้มแสงอาทิตย์ ผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ช่วงการวัดและผลของประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนช่วงของระบบแผง PV/T และ PV ซึ่งจะถูกระบุแสดงในรูปแบบกราฟเทียบกับเวลา โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 ผลของอุณหภูมิกับความเข้มแสงอาทิตย์

จากการทดสอบเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิจุดต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิแผง PV อุณหภูมิแผง PV/T อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกโมดูลระบายความร้อน อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนและความเข้มแสงอาทิตย์ ทั้ง 3 กรณีที่ทำการทดสอบ ณ อัตราการไหลของน้ำในระบบ PV/T ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า โดยทั่วไปในช่วง 08.00 น. ถึง 15.00 น. ของวันที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิของแผง PV จะสูงกว่าแผง PV/T โดยเฉลี่ยตลอดทั้งช่วง (08.00 - 15.00 น.) ประมาณ 8 ถึง 10 °C และมีผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดที่ 21 °C ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงที่ความเข้มแสงมีค่าสูง ซึ่งอุณหภูมิของแผง PV จะมีความไวต่อความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศเป็นอย่างมากเมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศลดลงอย่างกะทันหัน อุณหภูมิของแผง PV ก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน แต่สำหรับแผง PV/T นั้น อุณหภูมิของแผงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการรับแสงซึ่งมีแนวโน้มที่สม่ำเสมอและพบว่าอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนในระบบแผง PV/T นั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการรับพลังงานแสงอาทิตย์เช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T ลดลง ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยเพิ่มปริมาณน้ำให้ระบบให้มากขึ้น นอกจากนั้นน้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นน้ำร้อนต่อไปในคอนกลางคืน

3.2 กำลังไฟฟ้าสูงสุด แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

จากการนำผลกำลังไฟฟ้าไปแสดงในรูปแบบกราฟกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า โดยทั่วไปแล้วตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 15.00 น. ค่ากำลังไฟฟ้าของแผง PV/T จะสูงกว่าแผง PV โดยเฉลี่ยที่

14.3 W และมีค่ามากที่สุดที่ 30 W โดยกำลังไฟฟ้าของทั้งสองแผงนี้จะแปรผันตรงกับความเข้มแสงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงท้ายของการทดสอบซึ่งมีค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิมิบรรยากาศต่ำลงนั้นแผง PV จะคายความร้อนได้เร็วกว่าแผง PV/T เนื่องจากด้านหลังของแผง PV/T ได้มีการหุ้มฉนวนกันความร้อนแต่ถึงกระนั้นก็ไม่ได้ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากนักเพราะจากความเข้มแสงในช่วงท้ายการทดสอบนั้นมีค่าต่ำมาก

3.3 ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพทางความร้อน

พิจารณากรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) พบว่าอุณหภูมิของแผง PV/T นั้นจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV เฉลี่ยตลอดวันที่ 5.7 °C และที่เวลา 11.00 น. นั้นความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดประมาณ 1,150 W/m² ทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผงอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิของแผง PV/T จะต่ำกว่าอุณหภูมิได้แผง PV ประมาณ 17 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T สูงกว่าแผง PV ประมาณ 1.8 % แต่เมื่อเวลาตั้งแต่ 16.00 น. เป็นต้นไปพบว่า ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิมิบรรยากาศนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องส่งผลให้อุณหภูมิของแผง PV ลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าแผง PV/T แต่ไม่ได้ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามากนักเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทั้งสองแผงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

พิจารณากรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 1.0 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) พบว่า อุณหภูมิของแผง PV/T มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV โดยเฉลี่ยที่ 6.8 °C และเมื่อพิจารณาที่เวลา 13.00 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดประมาณ 1,050 W/m² พบว่า แผง PV/T มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV ถึง 18.4 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T นั้นสูงกว่าแผง PV 1.6 % แต่ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไปพบว่า ความเข้มแสงจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและตั้งแต่เวลา 16.00 น. เป็นต้นไปนั้น แผง PV มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV/T แต่ก็ไม่ได้ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเช่นกัน

พิจารณากรณีควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 1.5 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) พบว่าอุณหภูมิของแผง PV/T มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV เฉลี่ยตลอดวันเท่ากับ 4.6 °C และหากพิจารณาในช่วงเวลา 12.20 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงประมาณ 1000 W/m² อุณหภูมิของแผง PV/T นั้นจะต่ำกว่าแผง PV ประมาณ 10 °C ทำให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผง PV/T สูงกว่าแผง PV 1.7 %

เนื่องด้วยการทดสอบที่อัตราการไหลของน้ำแตกต่างกัน มีค่าความเข้มแสงที่ไม่เท่ากัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแต่ละอัตราการไหลได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพที่แตกต่างกันระหว่างแผง PV/T และแผง PV ที่ทดสอบในวันเดียวกันเท่านั้น

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะของแผง PV/T โดยคำนวณจากสมการที่ 2 กับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า การทดสอบทุกอัตราการไหลของน้ำ ประสิทธิภาพทางความร้อนจะสูงในช่วงเริ่มต้นการทดลองและจะลดลงตามระยะเวลาในการรับความร้อนจากแผง PV/T และอุณหภูมิน้ำในถังที่เพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยต่อยอดนั้นจะทำการเพิ่มปริมาณน้ำในระบบแผง PV/T เพื่อชะลอการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผง PV/T กับแผง PV ที่ทุกๆ อัตราการไหลทดสอบพบว่า แผง PV/T จะให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยตลอดวันสูงกว่าแผง PV เนื่องจากอุณหภูมิของแผงที่ต่ำกว่า นอกจากนั้นแผง PV/T ยังสามารถนำพลังงานความร้อน

มาใช้ในรูปของน้ำร้อนได้อีกด้วยซึ่งมีประสิทธิภาพทางความร้อนดังตารางที่แสดงไว้ข้างต้น

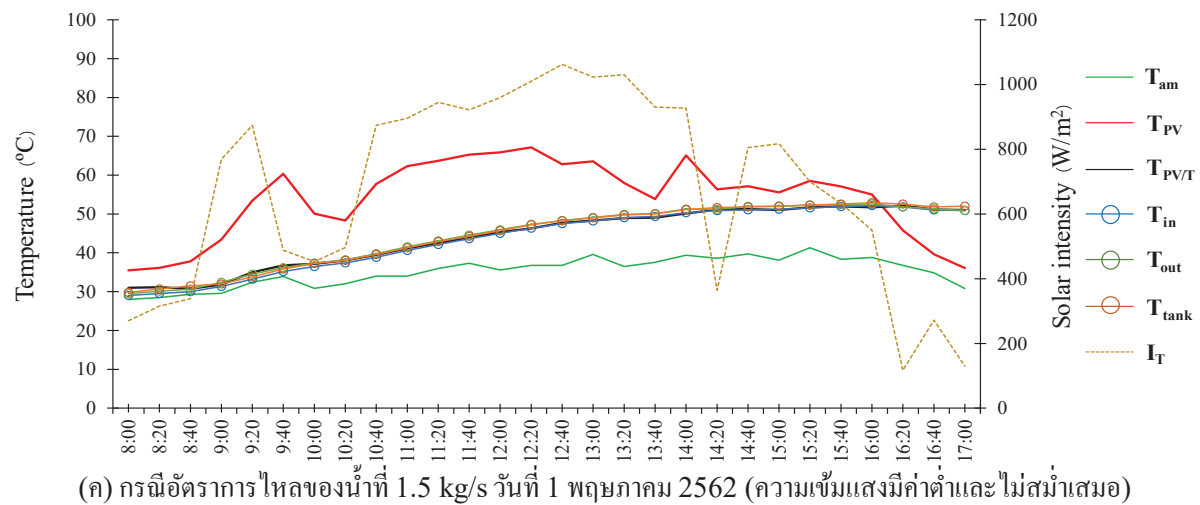
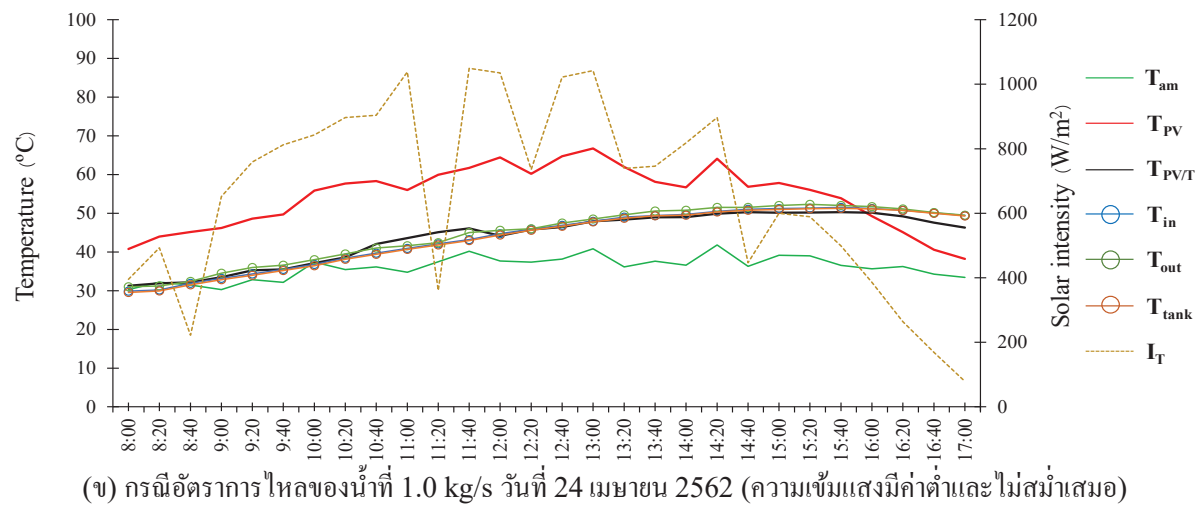
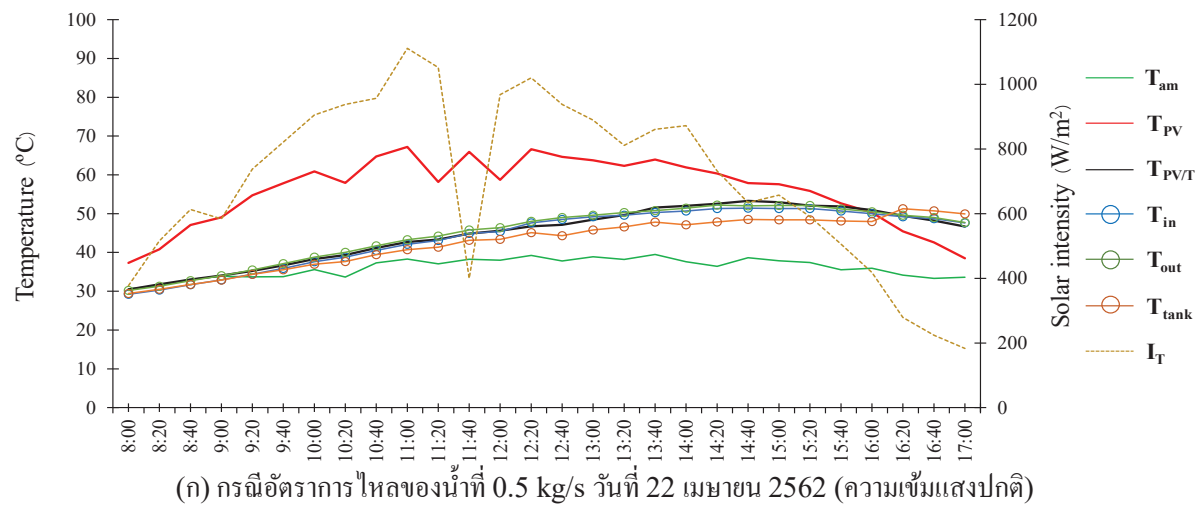
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผง PV และ PV/T (หน่วย: %)

m' (kg/s)	I _{T,avg} (W/m ²)	PV	PV/T	
		η_{PV}	η_{PV}	η_{th}
0.5	700	13.40	14.20	42.50
1.0	660	13.00	14.50	44.30
1.5	678	12.00	14.90	40.70

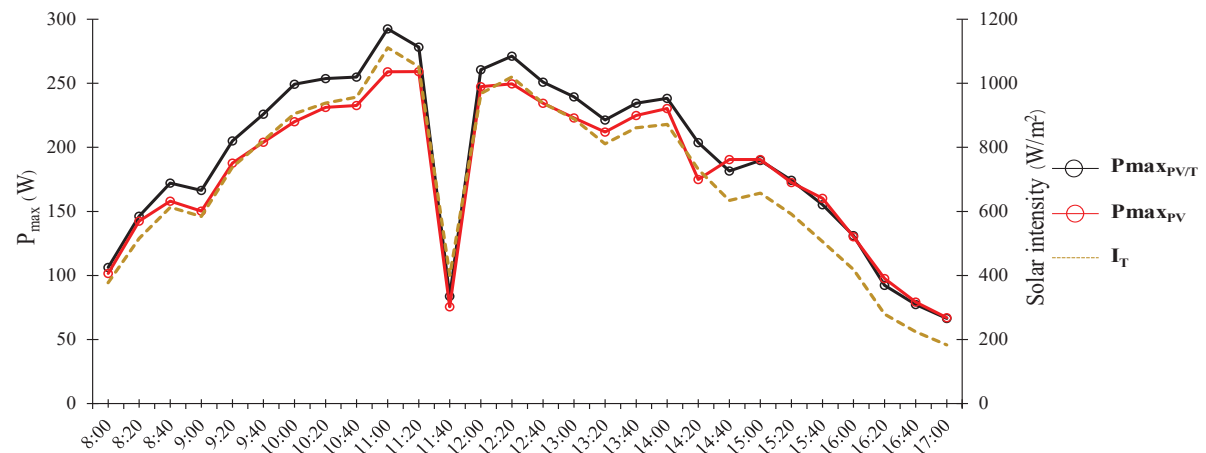
จากข้อมูลการทดสอบของแผง PV และ PV/T ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. สามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อวันของแผง PV และ PV/T จากค่ากำลังไฟฟ้ากับเวลาและคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ของแผง PV/T จากอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดสอบ ด้วยสมการที่ 3 ถึง 6 พบว่า การทดสอบทั้ง 3 กรณีมีค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าของแผง PV และ PV/T เท่ากับ 5.51 MJ/day และ 5.95 MJ/day ตามลำดับและค่าเฉลี่ยพลังงานความร้อนของแผง PV/T เท่ากับ MJ/day โดยค่าพลังงานของทั้ง 3 กรณีที่ทดสอบนั้นดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลค่าพลังงานที่ผลิตได้จากแผง PV/T และแผง PV (หน่วย: MJ/day)

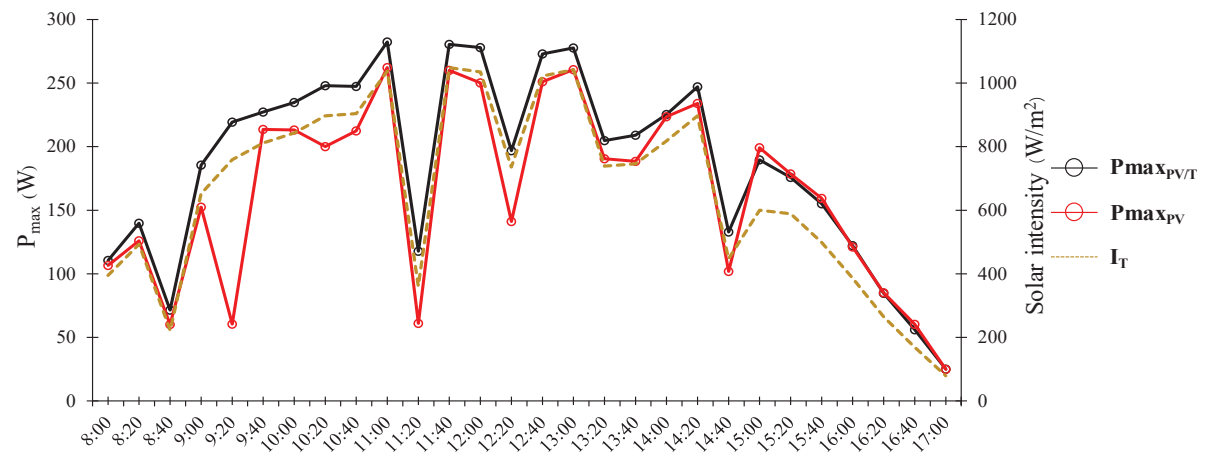
m' (kg/s)	I _{T,avg} (W/m ²)	PV	PV/T		
		E_{el}	E_{el}	E_{th}	E_{Net}
0.5	700	5.87	6.24	17.56	23.80
1.0	660	5.32	5.93	16.55	22.48
1.5	678	5.33	5.67	18.39	24.60



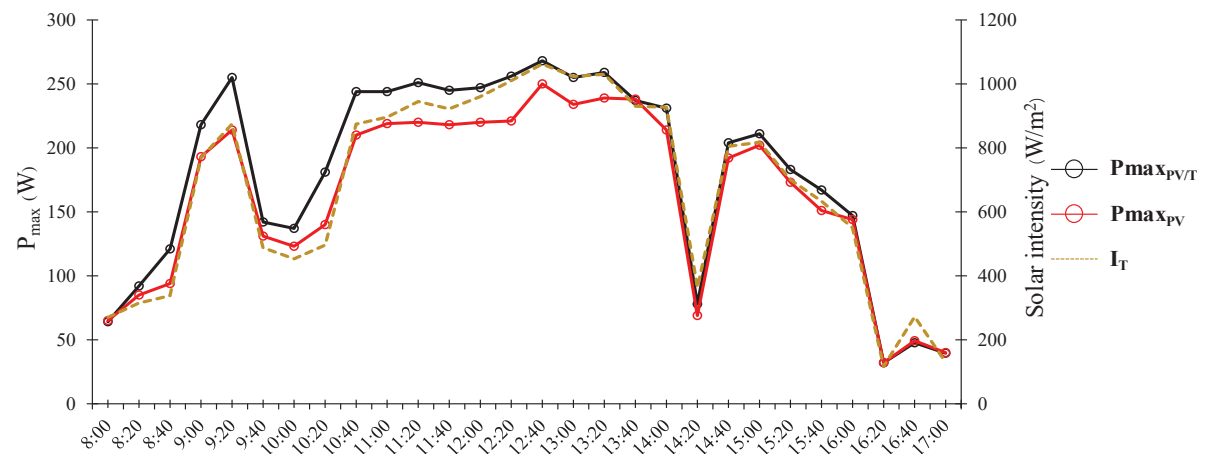
รูปที่ 5 กราฟอุณหภูมิบรรยากาศ (T_{amb}), อุณหภูมิแผง PV (T_{PV}), อุณหภูมิแผง PV/T ($T_{PV/T}$), อุณหภูมิน้ำเข้าโมดูลระบายความร้อน (T_{in}), อุณหภูมิน้ำออกโมดูลระบายความร้อน (T_{out}), อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน (T_{tank}) และความเข้มแสงอาทิตย์ (I_T)



(ก) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงปกติ)

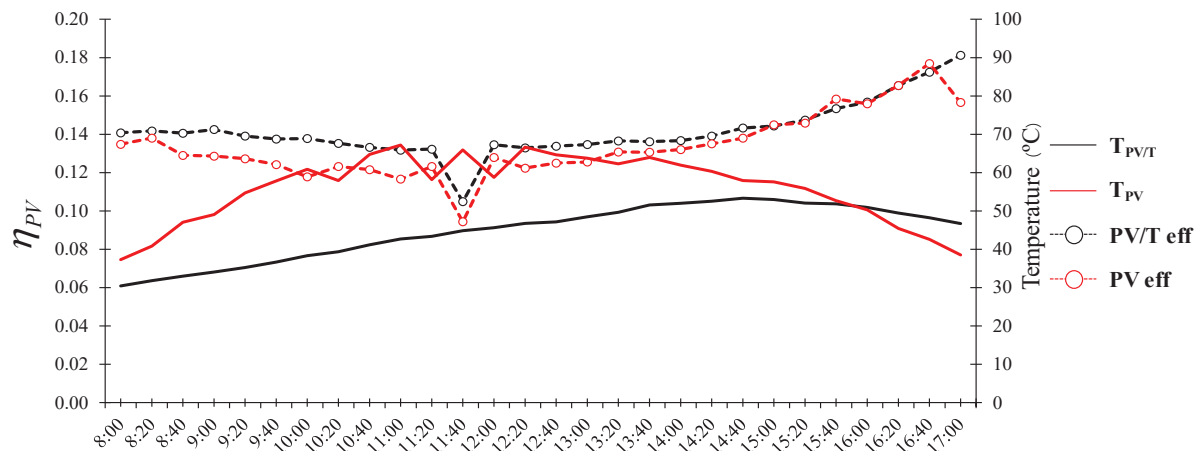


(ข) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

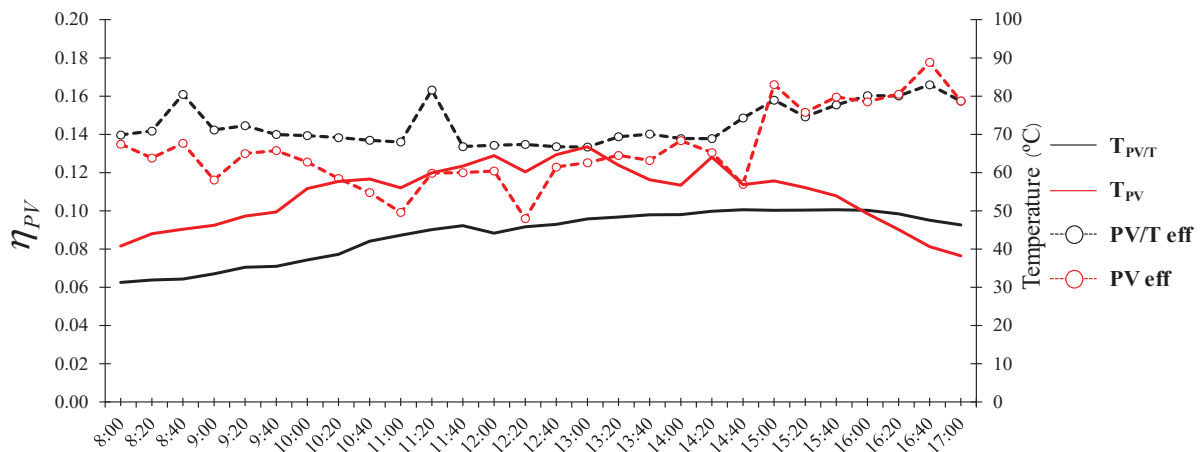


(ค) กรณีอัตราการไหลของน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

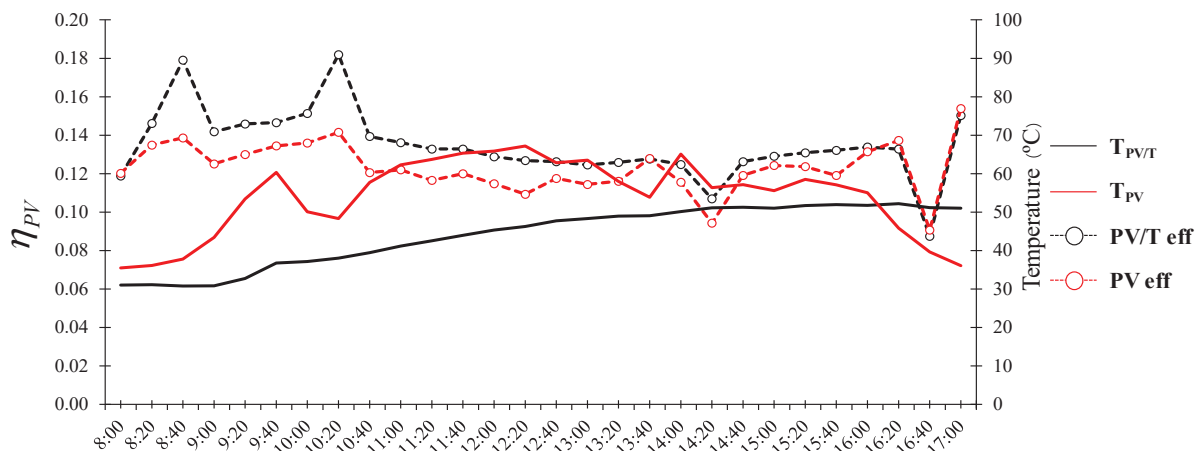
รูปที่ 6 กราฟกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV/T ($P_{max_{PV/T}}$) และแผง PV ($P_{max_{PV}}$) และความเข้มแสงอาทิตย์ (I_T)



(ก) กรณีสัณฐานการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงปกติ)

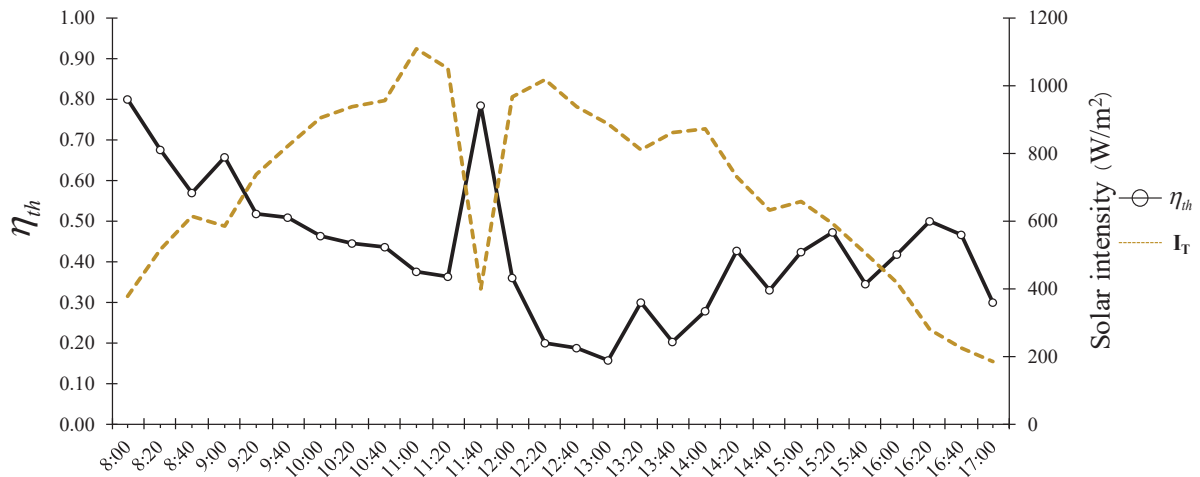


(ข) กรณีสัณฐานการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

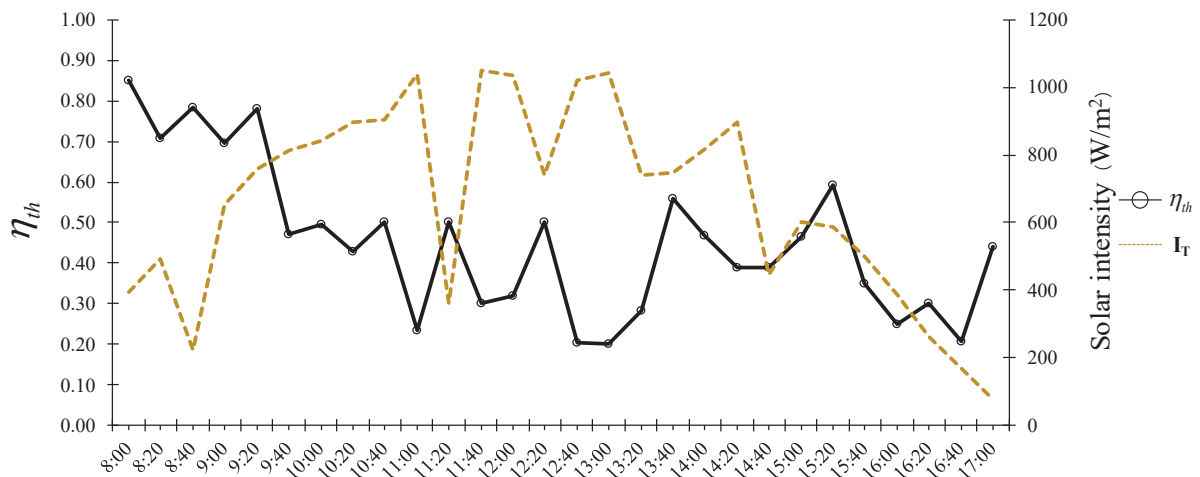


(ค) กรณีสัณฐานการไหลของน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

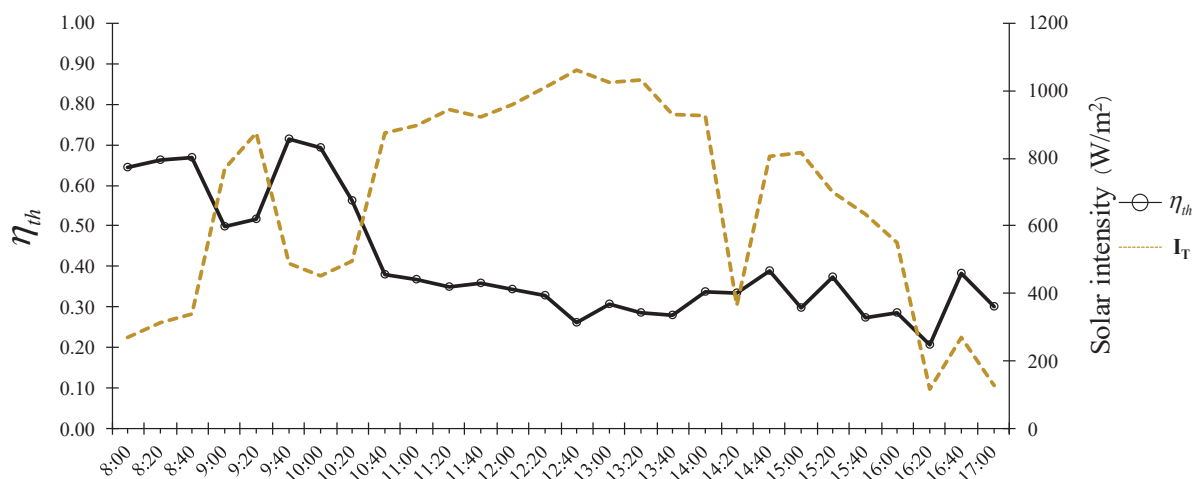
รูปที่ 7 กราฟประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงของแสง PV/T (PV/T eff) และแสง PV (PV eff) กับอุณหภูมิของแสง



(ก) กรณีสัณฐานการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 22 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงปกติ)



(ข) กรณีสัณฐานการไหลของน้ำที่ 0.5 kg/s วันที่ 24 เมษายน 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)



(ค) กรณีสัณฐานการไหลของน้ำที่ 1.5 kg/s วันที่ 1 พฤษภาคม 2562 (ความเข้มแสงมีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ)

รูปที่ 8 กราฟประสิทธิภาพทางความร้อนชั่วขณะของแผง PV/T (η_{th}) กับความเข้มแสงอาทิตย์

4. สรุปผลการทดสอบ

1. อุณหภูมิของแผง PV/T จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแผง PV ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของแผง PV/T มีค่าสูงกว่าแผง PV โดยทั่วไปในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 15.00 น. แผง PV/T จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผง PV ที่ 8-10 °C แต่ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศและความเข้มแสงมีค่าต่ำ อาทิ ตั้งแต่เวลา 15.00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของแผง PV จะลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าแผง PV/T เนื่องจากความสามารถในการคายความร้อนบริเวณด้านหลังแผงที่สูง แต่ไม่มีผลต่อผลต่างของกำลังไฟฟ้ามากนักเนื่องจากเป็นช่วงที่ความเข้มแสงมีค่าต่ำ

2. แผง PV/T มีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงกว่าแผง PV ที่ 6.78-13.97% เนื่องจากอุณหภูมิของแผงที่ต่ำกว่า ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Thermal coefficient) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ซิลิกอน ที่นำมา

3. จากการคำนวณประสิทธิภาพเฉลี่ยตลอดวันพบว่า แผง PV/T มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงเฉลี่ยที่

14.20-15.00% และประสิทธิภาพทางความร้อนช่วงเฉลี่ยที่ 40.70-44.30% ขณะที่แผง PV มีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าช่วงเฉลี่ยที่ 12.00-13.40% โดยค่าประสิทธิภาพนี้จะขึ้นกับความเข้มแสงและอุณหภูมิบรรยากาศในวันที่ทำการทดสอบด้วยเช่นกัน

4. หากเปรียบเทียบพลังงานสุทธิที่ผลิตได้ของทั้ง 2 ระบบ พบว่า แผง PV/T มีค่าพลังงานสุทธิสูงกว่าแผง PV กว่า 4 เท่า ในทุกกรณีที่ทำการศึกษาทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบาย และ แผน พลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณ สถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D. and Arts, T. The Effect of Periodic Ribs on the Local Aerodynamic and Heat Transfer Performance of a Straight Cooling Channel. *Journal of Turbomachinery*, 1998; 120: 368-375.
- [2] Webb, R.L., Eckert, E.R.G. and Goldstein. R.J. Heat Transfer and Friction in Tubes with Repeated-Rib Roughness. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1971; 14: 601-617.
- [3] Han, J.C., Dutta, S. and Ekked, S. Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology. Taylor & Francis Group, USA, 2012; 372-375.
- [4] Kaewchoothong, N., Maliwan, K., Takeishi, K. and Nuntadusit, C. Effect of Inclined Ribs on Heat Transfer Coefficient in Stationary Square Channel. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2017; 7(6): 344-350.
- [5] Skoplaki, E. and Palyvos, J.A. Operating Temperature of Photovoltaic Modules: A Survey of Pertinent Correlations. *Renewable Energy*, 2009; 34: 23-29.
- [6] Krauter, S. Increased Electrical Yield via Water Flow Over the Front of Photovoltaic Panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2004; 82: 131-137.
- [7] อิศระพงศ์ กันธิยะ อรรถกร อาสนคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริจรจน์. การทดสอบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของโมดูลโซลาร์เซลล์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีครีบบระบายความร้อนด้วยอากาศ. การประชุมวิชาการการถ่ายทอดผลงานความรู้และความรู้ในอุปกรณ์ทางความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 14, 19-20 มีนาคม, ฮอไรซันวิลเลแอนดริสส์อร์ท และสวนพฤกษศาสตร์ทวีชล จังหวัดเชียงใหม่, 2558.

- [8] มัณฑนา รังสิโยภาส มัลลิกา คันทะมุล นิโบล ธาราสมบัติ และ วรันต์พงษ์ วัชรพงศ์วัณิช. การประเมินสมรรถนะของตัวเก็บความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับทำน้ำร้อนในครัวเรือน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30, 5 - 8 กรกฎาคม, โรงแรม บีพี สมิทลา บีช รีสอร์ท จังหวัดสงขลา, 2559.



การแก้ปัญหการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยู แบบหลายสายของระบบเซลล์ลู่แบบมากวัตถุประสงค์ Worker Allocation Problem on Multiple Cellular U-Shaped Lines Under Many-Objectives

จุไรรัตน์ จิรมะฆัง¹ และ ปารเมศ ชุตินา^{2,*}

Jurairat Chimrakhang¹ and Parames Chutima^{2,*}

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330 Thailand.

Corresponding author: ¹jurairat.che@gmail.com, ^{2,*}cparames@chula.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) มีหลักการในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ด้วยการสร้างจุดอ้างอิง (Reference Point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ เพื่อหากลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุด บทความนี้จึงเสนอ NSGA-III มาเปรียบเทียบกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) ในการแก้ปัญหการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย ประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด จำนวนพนักงานน้อยที่สุด ภาระประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด และความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดลองพบว่า NSGA-III มีสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D ในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ ด้านการกระจายและความหลากหลายของคำตอบ และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ ผลการทดลองพบว่า NSGA-III มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่า MOEA/D เมื่อเปรียบเทียบในมุมมองของพารेटอ

คำสำคัญ: สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลู่ การจัดสมดุลสายการผลิต มากวัตถุประสงค์

ABSTRACT

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III (NSGA-III) is a multi-objective algorithm which uses reference points in generating the n-dimensional vector space in order to find the set of objective functions which is the shortest perpendicular distance to each of them. The purpose of the research is to compare the performance of NSGA III and MOEA/D on the worker allocation problem on multiple cellular U-shaped assembly lines attempting to realize five objectives, i.e. minimizing idle worker, minimizing number of workers, maximizing utilization of workers, minimizing walking time and minimizing the deviation of walking time. The experiments showed that NSGA-III performs better than MOEA/D in terms of convergence to Pareto optimal set, convergence and diversity metrics and ratio of Non-dominated Solutions.

Keywords: Multiple cellular u-shaped, Line-Balancing, Many-objectives

1. บทนำ

ระบบการผลิตส่วนมากจำเป็นต้องมีคน เครื่องจักร วัตถุดิบ ทำงานด้วยกัน เพื่อให้ได้สินค้าที่ถูกต้อง มีความหลากหลาย และทันตามความต้องการของลูกค้า มีระบบการผลิตอยู่หนึ่งแบบที่ได้นำแนวคิดของ Lean และ JIT [1] เข้ามาใช้ นั่น คือ การผลิตแบบเซลล์ลาร์ (Cellular Manufacturing) ซึ่งเป็นการจัดการขั้นตอนการผลิตที่ทำการผลิตชิ้นส่วนกลุ่มเดียวกัน หรือ การผลิตที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แบบเดียวกัน เพื่อให้ผลิตชิ้นส่วนได้จนจบขั้นตอน ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในระบบสายการผลิต และใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของระบบการผลิตแบบเซลล์ลาร์ คือ ลดระยะเวลาในการผลิต ลดเวลานำในการผลิต ลดระยะทางที่เป็นเส้นทางไหลของชิ้นส่วน ทำให้ชิ้นส่วนไหลไปได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการใช้เครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มคุณภาพในการผลิต

รูปแบบสายการผลิตมีอยู่หลากหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นสายการผลิตแบบเส้นตรง สายการผลิตสองด้าน แบบขนาน หรือ สายการผลิตรูปตัวยู ที่มีลักษณะเด่นและจุดประสงค์ในการใช้ในการผลิตที่แตกต่างกันไป สำหรับสายการผลิตแบบรูปตัวยู ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม มีข้อดีในเรื่องความยืดหยุ่น เดินทำงานได้อย่างคล่องตัว รวมถึงการมองเห็นและการสื่อสารระหว่างพนักงานได้ดีขึ้น และได้มีการนำมาใช้กับระบบการผลิตแบบเซลล์ลาร์ โดยที่มีการวางเครื่องจักรให้เป็นลักษณะรูปตัวยู ตามลำดับการดำเนินการผลิต และคนทำงานอยู่ภายในตัวยู ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งทางเข้าและออกของสายการผลิต โดยที่เครื่องจักรมีการทำงานแยกออกจากคนทำงาน และเครื่องจักรจะมีความเป็นอิสระมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยการดำเนินงานแต่ละเครื่องจักร ประกอบด้วยการทำงานของคนทำงานด้วยตัวบุคคลเอง และการทำงานอัตโนมัติโดยเครื่องจักร ซึ่งคนจะมีหน้าที่เพียงป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องจักร เริ่มการทำงานการทำงานของเครื่องจักรและรอดูการทำงานของเครื่องจักรว่าดำเนินการไปได้ด้วยดี ไม่มีปัญหาติดขัดอะไร และรอเวลาที่วัตถุดิบได้ถูกทำเสร็จ คนก็จะเป็นคนนำวัตถุดิบออก

จากเครื่องจักร แล้วตรวจสอบความเรียบร้อย ก่อนที่จะเริ่มลงมือทำงานตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ส่วนเครื่องจักรก็จะมีหน้าที่ทำงานตามระบบอัตโนมัติที่ถูกสั่งการไว้ อยู่แล้ว เช่น การเจาะ การกลึง การขึ้นรูป และการประกอบ เป็นต้น [2]

ในโรงงานอุตสาหกรรมได้เริ่มมีการใช้สายการผลิตรูปตัวยูมากขึ้น จึงได้มีการเพิ่มจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายขึ้นมาในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี [3] เพื่อให้ทันตามความต้องการความลูกค้า เช่น ถ้ามีสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการผลิต ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันโดยใช้คนเดียวระหว่างสองสายการผลิต ถ้าพนักงานทำเพียงแค่อีกหนึ่งสายการผลิตแบบรูปตัวยู จะมีการะงานที่เหลือ เวลาที่ต้องรอ แต่ถ้ามีการทำงานร่วมกันตั้งแต่สองสายการผลิตขึ้นไป สามารถแบ่งภาระงานที่เหลือจากสายแรกไปให้กับอีกหนึ่งสายการผลิตได้ เป็นการลดจำนวนพนักงาน ค่าใช้จ่ายในการผลิต รวมถึงเป็นการใช้ภาระงานของพนักงานให้เต็มประสิทธิภาพ ไม่มีเวลาที่จะต้องรอในการทำงานขึ้นถัดไป

โดยการจัดวางเครื่องจักรแต่ละสายการผลิตรูปตัวยูจะเป็นอิสระต่อกัน จำเป็นต้องมีระยะห่างของแต่ละสายที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นเส้นทางที่ใช้ประโยชน์ในการขนถ่ายสินค้าระหว่างการผลิต รวมถึงพื้นที่ในการเดินของพนักงานด้วย เนื่องจากพนักงานต้องมีการเดินทำงานอยู่ตลอดเวลา อาจจะทำให้เกิดความล่าช้าในการเดิน และทำให้ระยะเวลาเดินเพิ่มมากขึ้นจากเดิม จากงานวิจัยของ Ferjani และคณะ ได้ศึกษาว่าประสิทธิภาพในการทำงานของคนจะลดลงเนื่องจากความเมื่อยล้าในการทำงาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเวลางานทั้งหมดของระบบการผลิต [4]

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งมีตั้งแต่สายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสายจนถึงสายการผลิตรูปตัวยูแบบสิบสายวางอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อต้องการให้พนักงานได้แบ่งเบาภาระงานไประหว่างสายการผลิตรูปตัวยู โดย

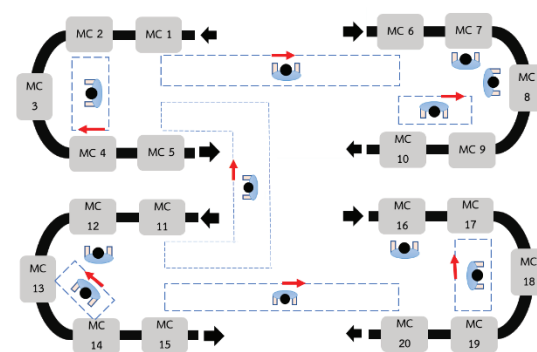
ไม่ได้ทำแค่เพียงสายการผลิตเดียว แต่สามารถไปทำอีกสายการผลิตได้ มีการคิดเวลาเดินทางของพนักงานเข้าไป และพนักงานมีหน้าที่ถือวัตถุดิบแล้วเดินนำไปป้อนให้กับเครื่องจักร รอเครื่องจักรทำงานจนเสร็จ จึงนำวัตถุดิบที่เสร็จแล้วออกมา จึงกลับไปทำตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าคุณจะมีเวลาว่างในการรอจนกว่าเครื่องจักรที่ทำงานจะผลิตจนเสร็จจึงจะกลับไปทำงานได้อีกครั้ง โดยการจัดสรรพนักงานจะเป็นการช่วยให้การใช้ประสิทธิภาพของพนักงานได้เต็มที่ ไม่ต้องทำอยู่เครื่องจักรเดียว แล้วรอเวลาให้เครื่องจักรทำงานเสร็จ แต่สามารถเดินไปทำงานที่เครื่องจักรอื่นได้ในระหว่างที่เครื่องจักรแรกกำลังทำงาน

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่ ที่ได้นำแนวคิดของ Miltenburg ที่เป็นสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายมาประยุกต์ใช้ โดยในงานวิจัยของ Miltenburg ได้มีการนำเสนอวัตถุดิบประเภท 1 วัตถุดิบประเภท 2 และไม่มี การคิดระยะเวลาเดิน [3] ซึ่งจะมีความแตกต่างกับงานวิจัยนี้ที่ได้นำเสนอวัตถุดิบประเภท 5 วัตถุดิบประเภท 2 และมีการคิดระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) ที่มีหลักการในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากระยะเวลาที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุด [5] เปรียบเทียบกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุดิบประเภทโดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) มีหลักการในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการแบ่งเป็นปัญหาย่อยที่มีหลายปัญหาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน [6]

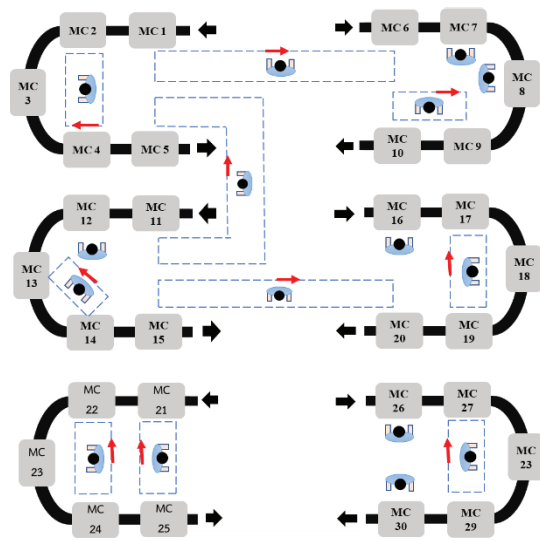
2. สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย

ในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี สายการผลิตรูปตัวยูเริ่มถูกนำมาใช้ ทั้งมีความยืดหยุ่น เดินทางทำงานคล่องตัว รวมถึงการมองเห็นและการสื่อสารระหว่าง

พนักงานได้ดีขึ้น ส่งผลให้ของเสียในระบบการผลิตและสินค้าคงคลังน้อยลง ลดแรงงาน ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยสายการผลิตรูปตัวยูมีลักษณะเป็นตัวยูแบ่งออกเป็นด้านหน้าและด้านหลังของสายการผลิต โดยลักษณะเด่นของสายการผลิตรูปตัวยู คือ พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังพร้อมกัน เมื่อสายการผลิตรูปตัวยูเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นในระบบอุตสาหกรรม จึงได้มีการเพิ่มจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายขึ้นมาในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี เพื่อให้ทันตามความต้องการความลูกค้า เช่น ถ้ามีสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการผลิต เป็นการลดเวลาว่างของพนักงานและทำให้ระบบการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น [2] ตัวอย่างสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย เช่น สายการผลิตรูปตัวยูแบบสี่สาย ดังรูปที่ 1 และสายการผลิตรูปตัวยูแบบหกสาย ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 สายการผลิตรูปตัวยูแบบสี่สาย



รูปที่ 2 สายการผลิตรูปตัวยูแบบหกสาย

3. การจัดสรรพนักงานลงบนสายการผลิตรูปตัวยู โดยใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักร

กระบวนการผลิตในปัจจุบัน มักมีเครื่องจักรอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ ช่วยในการปฏิบัติงาน เช่น พนักงาน 1 คน ควบคุมเครื่องจักร 1 เครื่อง หรือพนักงาน 1 คน ควบคุมเครื่องจักร 2 เครื่องหรือมากกว่านั้น ซึ่งการจัดลำดับงานของพนักงานย่อมจะซับซ้อนมากขึ้น จึงมีการประยุกต์ใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักร เพื่อศึกษาลำดับการปฏิบัติงาน เวลา จังหวะ ซึ่งจะเน้นที่การแสดงผลงาน การปฏิบัติงานและการหยุดรอของผู้ปฏิบัติงาน เครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งระบุระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละแกนที่สังเกตได้ชัดเจน [7]

Ferjani และคณะ ได้ศึกษาว่าความเหนื่อยล้าของพนักงานทำให้ระยะเวลาทำงานเพิ่มขึ้น จึงเสนอให้คำนวณระยะเวลาที่เป็นไปได้มากขึ้นจากการพิจารณาถึงความเหนื่อยล้าของพนักงาน และสมมติว่าความเหนื่อยล้าของพนักงานขึ้นอยู่กับความสามารถในการใช้งานของเครื่องจักร จึงมีความล้าสะสมในช่วงเวลาการทำงานดังกล่าว ซึ่งมีตัวชี้วัดความล้าที่เกิดจากสัมประสิทธิ์การทำงานหนักซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 [4] เนื่องจากพนักงานมีหน้าที่ปฏิบัติงาน คือ เดินถือวัตถุดิบไปป้อนและ

นำวัตถุดิบออกจากเครื่องจักร ดังนั้นจึงสมมติให้มีความล้าที่เกิดขึ้นเฉพาะเวลาเดินปฏิบัติงานเท่านั้น และเวลาดำเนินการที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักร จึงคิดเป็นเวลาเดินระหว่างเครื่องจักรเช่นกัน ซึ่งจะไม่นรวมเวลาป้อนและนำวัตถุดิบออก รวมถึงเวลาดำเนินการของเครื่องจักร แสดงตัวชี้วัดความล้า ดังสมการที่ 1

$$I(d_j, w_{it}) = 1 - e^{-d_j * w_{it}} \quad (1)$$

เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดความล้าซึ่งเกิดจากการเดินของพนักงานจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาเวลาดำเนินการที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากความล้าในการทำงาน ดังสมการที่ 2

$$T'_{kj} = (1 + I(d_j, w_{it}))T_{kj} \quad (2)$$

โดย $I(d_j, w_{it})$ คือ ตัวชี้วัดความล้าของพนักงาน i บนเครื่องจักร j

d_j คือ สัมประสิทธิ์การทำงานหนัก กำหนดไว้ที่ 0.5

w_{it} คือ ระยะเวลาดำเนินการของพนักงาน i (เวลาเดินไปหรือกลับของแต่ละเครื่องจักร)

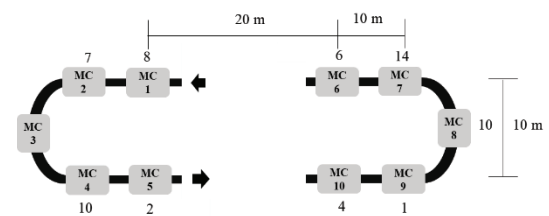
T_{kj} คือ ระยะเวลาดำเนินการที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักร k ถึง j

T'_{kj} คือ ระยะเวลาดำเนินการที่เพิ่มขึ้นจากความล้าระหว่างเครื่องจักร k ถึง j

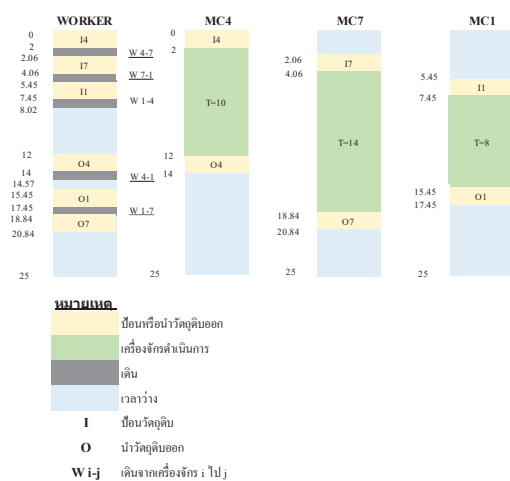
ปัญหาดังกล่าวสำหรับการจัดสรรพนักงานลงบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย ที่มีเวลาดำเนินการของเครื่องจักรที่แตกต่างกัน รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 25 หน่วยเวลา เวลาเดิน 0.5 เมตรต่อหน่วยเวลา เวลาป้อนและนำวัตถุดิบออก 2 หน่วยเวลา โดยมีระยะห่างระหว่างเครื่องจักรและสายการผลิตตามรูปที่ 3 ซึ่งมีระยะเวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักรที่รวมความล้าจากการเดิน ตามตารางที่ 1 และแสดงการจัดสรรพนักงานลงเครื่องจักรโดยประยุกต์ใช้กับแผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักร ดังรูปที่ 4 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) พนักงานเริ่มทำงานจากเครื่องจักร 4 มีเวลาป้อนวัตถุดิบเท่ากับสองหน่วยเวลา

- 2) เลือกทำงานเครื่องจักร 4 มีเวลาดำเนินการเท่ากับ 10 หน่วยเวลา พนักงานต้องรอเวลาให้เครื่องจักร 4 ดำเนินการเสร็จ ดังนั้นจึงเลือกเครื่องจักรที่จะทำงานถัดไปได้
- 3) เลือกทำงานเครื่องจักร 7 ใช้เวลาเดินจากเครื่องจักร 4 ไป 7 เท่ากับ 2.06 หน่วยเวลา ซึ่งเครื่องจักร 7 สามารถดำเนินการได้ที่เวลา 4.06 หน่วยเวลา หลังทำการป้อนวัตถุดิบ
- 4) เลือกทำงานเครื่องจักร 1 ใช้เวลาเดินจากเครื่องจักร 7 ไป 1 เท่ากับ 1.39 หน่วยเวลา ซึ่งเครื่องจักร 1 สามารถดำเนินการได้ที่เวลา 7.45 หน่วยเวลา หลังทำการป้อนวัตถุดิบ
- 5) พนักงานเดินกลับมาเครื่องจักร 4 ใช้เวลาเดินกลับจากเครื่องจักร 1 ไป 4 เท่ากับ 0.57 หน่วยเวลา เพื่อนำวัตถุดิบออก และเสร็จการทำงานของเครื่องจักร 4 ที่ 12 หน่วยเวลา
- 6) พนักงานดำเนินการจนครบทุกเครื่องจักร ซึ่งต้องทำงานให้ครบในขั้นตอนป้อนและนำวัตถุดิบออกของแต่ละเครื่องจักรถือจะเป็นการทำงานที่เสร็จสมบูรณ์ โดยมีรอบเวลาการทำงานไม่เกินรอบเวลาการผลิต



รูปที่ 3 เวลาดำเนินการของเครื่องจักร ระยะห่างระหว่างเครื่องจักรของปัญหาตัวอย่างสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย



รูปที่ 4 ตัวอย่างแผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย

ตารางที่ 1 ระยะเวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักร (หน่วย : เวลา)

Machine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.00	0.38	0.89	0.57	0.38	0.86	1.39	2.00	1.49	0.98
2	0.38	0.00	0.44	0.38	0.57	1.39	1.98	2.63	2.06	1.49
3	0.89	0.44	0.00	0.44	0.89	2.00	2.63	3.26	2.63	0.89
4	0.57	0.38	0.44	0.00	0.38	1.49	2.06	2.63	1.98	1.39
5	0.38	0.57	0.89	0.38	0.00	0.98	1.49	2.00	1.39	0.86
6	0.86	1.39	2.00	1.49	1.49	0.00	0.38	0.89	0.57	0.38
7	1.39	1.98	2.63	2.06	1.49	0.38	0.00	0.44	0.38	0.57
8	2.00	2.63	3.26	2.63	2.00	0.89	0.44	0.00	0.44	0.89
9	1.49	2.06	2.63	1.98	1.39	0.57	0.38	0.44	0.00	0.38
10	0.98	1.49	0.89	1.39	0.86	0.38	0.57	0.89	0.38	0.00

4. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย เป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-

Objective Problem) ซึ่งต้องหาค่าเหมาะสมที่สุดไปพร้อม ๆ กันทุกวัตถุประสงค์ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ 5 วัตถุประสงค์ ประกอบไปด้วย เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

อรรถประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด และความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด โดยวัตถุประสงค์ทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด

พนักงานมีหน้าที่เดินนำวัตถุไปป้อนหรือนำวัตถุดิบออกจากเครื่องจักร จึงทำให้เกิดเวลาว่างในขณะที่รอเครื่องจักรทำงานจนเสร็จ ดังนั้นจึงต้องการให้พนักงานใช้เวลาที่รอเครื่องจักรทำงานสามารถไปทำงานที่เครื่องจักรอื่นได้ ซึ่งเป็นการลดเวลาว่างในการของพนักงาน สามารถทำงานได้หลายเครื่องจักร ดังสมการที่ 3

$$\text{Minimize : } I_w \quad (3)$$

4.2 จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

การทำงานของพนักงานจากเดิมหนึ่งคนจะรับผิดชอบต่อหนึ่งเครื่องจักร แต่เมื่อมีการลดเวลาว่างของพนักงานลง ดังพนักงานหนึ่งคนจึงสามารถทำได้สองถึงสามเครื่องจักรหรือมากกว่านั้น ซึ่งเป็นการช่วยลดจำนวนพนักงานลงได้ และทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง ดังสมการที่ 4

$$\text{Minimize : } N_w \quad (4)$$

4.3 อรรถประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด

การทำงานของพนักงานมีหน้าที่เดินไปเพื่อป้อนและนำวัตถุดิบออก ดังนั้นภาระการทำงานของพนักงานจึงคิดจากเวลาที่ป้อนวัตถุดิบเข้าและนำวัตถุดิบออก และพนักงานหนึ่งคนจะแบ่งเบาภาระงานจากเวลาทำงานที่เหลืออยู่โดยสามารถทำงานได้หลายเครื่องจักร ทำให้มีอรรถประโยชน์สูงสุดในการทำงานของพนักงาน ดังสมการที่ 5

$$\text{Maximize } U_w = \frac{\sum_{k=1}^{N_w} (ST_k)}{N_w \times CT} \quad (5)$$

โดย ST_k คือ เวลาป้อนและนำวัตถุดิบออกของพนักงาน k

CT คือ รอบเวลาการผลิต

N_w คือ จำนวนพนักงาน

4.4 เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

พนักงานมีหน้าที่เดินนำวัตถุไปป้อนหรือนำวัตถุดิบออกจากเครื่องจักร รอเครื่องจักรทำงานจนการเสร็จ จึงนำวัตถุดิบที่เสร็จแล้วออกมา และกลับไปทำตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ในขั้นตอนการเดินไปทำงานแต่ละเครื่องจักร ถ้าพนักงานต้องเดินไปทำงานที่ไกลจะส่งผลให้พนักงานทำงานได้จำนวนน้อยเครื่องจักร มีความสลับซับซ้อนในการเดินทำงาน และส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานด้วย ดังสมการที่ 6

$$\text{Minimize } WT = \sum_{k=1}^{N_w} (W_k) \quad (6)$$

โดย W_k คือ เวลาเดินของพนักงาน k

4.5 ความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

การเดินทางของพนักงานต้องเดินไปแต่ละเครื่องจักร บางคนได้ทำงานกับหลายเครื่องจักรที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน หรือบางคนได้ทำงานกับหลายเครื่องจักรที่มีตำแหน่งใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความไม่เท่าเทียมเกิดขึ้น และส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน จึงต้องการให้มีความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยลง ดังสมการที่ 7

$$\text{Minimize } DWW : \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_w} (W_k - \bar{W})^2}{N_w}} \quad (7)$$

โดย N_w คือ จำนวนพนักงาน

W_k คือ เวลาเดินของพนักงานคนที่ k

$\bar{W}$ คือ ค่าเฉลี่ยเวลาเดินของพนักงานทั้งหมด

5. วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูก

กรอบงาน III

วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) มีหลักการในการแก้ปัญหาจากวัตถุประสงค์ด้วยการสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ เพื่อหากลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุด โดยมีวิธีการสร้างจุดอ้างอิงจาก Simplex lattice design แล้วนำกลุ่มคำตอบมาเทียบระยะตั้งฉากกับจุดอ้างอิงทุกจุด

บนระนาบวัตถุประสงก์ (Hyperplane) ถ้ากลุ่มคำตอบใดมีระยะตั้งฉากน้อยที่สุดกับจุดอ้างอิงนั้น จะถูกเลือกให้เป็นคำตอบที่ดี ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับ NSGA-II ในขั้นตอนการสร้างประชากรเริ่มต้น การสร้างรุ่นลูกของประชากร แต่จะมีความแตกต่างกันระหว่าง NSGA-II และ NSGA-III ในขั้นตอนดำเนินการหาคำตอบและเก็บคำตอบที่ดี ซึ่ง NSGA-III จะไม่มีวิธีการ Crowding distance แต่จะใช้จุดอ้างอิงเพื่อกำหนดทิศทางบนระนาบ และหากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากใกล้กับจุดอ้างอิง [5]

ในงานวิจัยนี้ได้ยกปัญหาตัวอย่างที่มีสองสายการผลิตรูปตัวยู มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 25 หน่วยเวลา ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย มีขั้นตอนดังนี้

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III

1. จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) 10 สตริงคำตอบ
2. ความน่าจะเป็นในครอสโอเวอร์ (P_c) เท่ากับ 0.9
3. ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) เท่ากับ 0.1

ขั้นที่ 1 กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างจุดอ้างอิง (Reference point)

กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นและสร้างจุดอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ค่าศูนย์ในทุกะนาบวัตถุประสงก์ โดยใช้ Simplex lattice design ในการสร้างจุดอ้างอิงขึ้นมา

โดย $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})^T$ คือเวกเตอร์จุดอ้างอิงของปัญหาย่อยที่ j และ λ_{ij} คือเวกเตอร์จุดอ้างอิงของประสงก์ที่ i ของสตริงคำตอบที่ j ดังตารางที่ 2

ขั้นที่ 2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มแบบอิสระ โดยมีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด ซึ่งเลขลำดับ (Priority) มีค่าเท่ากับลำดับเครื่องจักร

(Machine Sequence) แสดงตัวอย่างสตริงเริ่มต้นดังตารางที่ 3

ขั้นที่ 3 พัฒนาสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

โดยใช้วิธีการครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเตชัน (Mutation) เพื่อให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) แสดงดังตารางที่ 4 โดยการพิจารณาว่าสตริงคำตอบใดจะถูกนำมาครอสโอเวอร์หรือมิวเตชันขึ้นอยู่กับ P_c และ P_m ตามลำดับ [8]

- วิธีการครอสโอเวอร์ เป็นวิธีการนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงคำตอบ ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Partial-Mapped Crossover (PMX) [9]

- วิธีการมิวเตชัน การมิวเตชันเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ ในบางครั้งคำตอบที่ผ่านการดำเนินงานต่างๆ อาจเข้าไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ทำให้การเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมด้วยการมิวเตชันช่วยให้คำตอบสามารถหลุดออกมาได้คำตอบที่ดี โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งเป็นการสลับตำแหน่งตัวเลข 2 ตัวภายในสตริงคำตอบ [8]

ตารางที่ 2 ค่าเวกเตอร์จุดอ้างอิง

λ_j	เวกเตอร์จุดอ้างอิง				
	Obj 1	Obj 2	Obj 3	Obj 4	Obj 5
1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1
2	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	0
4	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6
6	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
7	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	1
9	1	0	0	0	0
10	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1

ตารางที่ 3 สตริงคำตอบเริ่มต้น

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

ตารางที่ 4 สตริงคำตอบรุ่นลูก

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

ขั้นที่ 6 เก็บสตริงคำตอบทั้งหมดจากรุ่นพ่อแม่และลูก
($R_t = P_t \cup Q_t$)

ขั้นที่ 7 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด (R_t) ดังสมการที่ 3 ถึง 7

โดยสตริงที่ 1-10 คือสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ และสตริงที่ 11-20 คือสตริงคำตอบรุ่นลูก แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ (R_t)

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	69.500	5	0.320	15.500	3.823
2	42.790	4	0.400	17.210	2.553
3	21.590	3	0.533	13.410	2.649
4	16.366	3	0.533	18.634	0.471
5	26.945	3	0.533	8.055	1.663
6	50.254	4	0.400	9.746	2.293
7	41.001	4	0.400	19.000	3.361
8	41.591	4	0.400	18.409	3.165
9	39.931	4	0.400	20.069	3.129
10	44.188	4	0.400	15.812	2.817

ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ (R_t)

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
11	52.342	4	0.400	7.658	1.426
12	16.459	3	0.533	18.541	0.450
13	21.590	3	0.533	13.410	2.649
14	16.366	3	0.533	18.634	0.471
15	26.945	3	0.533	8.055	1.663
16	17.762	3	0.533	17.238	1.854
17	41.001	4	0.400	19.000	3.361
18	18.556	3	0.533	16.444	1.195
19	18.952	3	0.533	16.048	0.973
20	44.188	4	0.400	15.812	2.817

ขั้นที่ 8 จัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์สตริงคำตอบทั้งหมด (R_t)

จากนั้นกำหนดค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ (z_i^*) ในกรณีการหาค่าที่เหมาะสมน้อยที่สุด คือ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ หรือการหาค่าที่เหมาะสมที่มากที่สุด คือ

$z_i^* = \max\{f_i(x)\}$ โดยให้จัดเก็บค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละวัตถุประสงค์ในรอบปัจจุบัน แสดงการเก็บค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ff	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
ff _{max}	69.500	5	0.320	20.060	3.823
ff _{min}	16.366	3	0.533	7.657	0.450

ขั้นที่ 9 นอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด ดังสมการที่ 8 [9]

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(f_{i(\max)} + 0.0005) - z_i^*} \quad (8)$$

โดย f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i

$f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดในรอบปัจจุบันในวัตถุประสงค์ที่ i

z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ที่ i

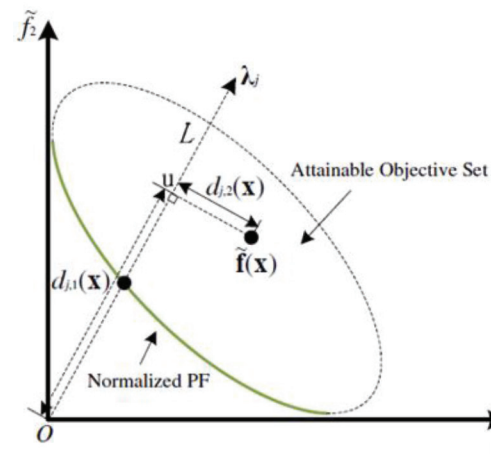
แสดงค่านอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 นอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	1.000	1.000	0.998	0.632	1.000
2	0.497	0.500	0.623	0.770	0.623
3	0.098	0.000	0.000	0.463	0.652
4	0.000	0.000	0.000	0.884	0.006
5	0.199	0.000	0.000	0.032	0.360
6	0.638	0.500	0.623	0.168	0.546
7	0.464	0.500	0.623	0.914	0.863
8	0.475	0.500	0.623	0.866	0.805
9	0.443	0.500	0.623	1.000	0.794
10	0.524	0.500	0.623	0.657	0.702
11	0.677	0.500	0.623	0.000	0.289
12	0.002	0.000	0.000	0.877	0.000
13	0.098	0.000	0.000	0.463	0.652
14	0.000	0.000	0.000	0.884	0.006
15	0.199	0.000	0.000	0.032	0.360
16	0.026	0.000	0.000	0.772	0.416
17	0.464	0.500	0.623	0.914	0.863
18	0.041	0.000	0.000	0.708	0.221
19	0.049	0.000	0.000	0.676	0.155
20	0.524	0.500	0.623	0.657	0.702

ขั้นที่ 10 ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิง

โดยนำกลุ่มคำตอบของสตริงทั้งหมดที่ทำการนอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปดำเนินการหาความสัมพันธ์เทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุดบนระนาบวัตถุประสงค์ (Hyperplane) ด้วยวิธีการคำนวณหาระยะตั้งฉากของกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุด โดยกลุ่มคำตอบที่ดีจะถูกเลือกจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากกับเส้นอ้างอิงสั้นที่สุด ซึ่งหนึ่งจุดอ้างอิงจะมีคำตอบได้เพียงหนึ่งกลุ่มคำตอบในแต่ละเจเนอเรชัน ถ้าในกรณีที่จุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดซ้ำกับเส้นอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเป็นลำดับถัดไป แสดงรูปวิธีการหาระยะตั้งฉาก ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระยะ $d_{j,1}(x)$ และ $d_{j,2}(x)$ ของเวกเตอร์จุดอ้างอิงเทียบกับเวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ x ที่ถูกนอร์มอลไลซ์ [10]

สามารถคำนวณระยะ $d_{j,1}(x)$ และ $d_{j,2}(x)$ ดังสมการที่ 9 และ 10 ดังนี้

$$d_{j,1}(x) = \|\bar{f}_i(x)^T \lambda_j\| / \|\lambda_j\| \quad (9)$$

$$d_{j,2}(x) = \|\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j / \|\lambda_j\|)\| \quad (10)$$

โดย $d_{j,2}(x)$ คือ ระยะตั้งฉากของกลุ่มคำตอบ x ที่ถูกนอร์มอลไลซ์กับเวกเตอร์จุดอ้างอิง $d_{j,1}(x)$ คือ ระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นกับ λ_j คือ ค่าเวกเตอร์ของจุดน้ำหนักที่ j

$\bar{f}_i(x)$ คือ เวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูก
นอมอลไลซ์

$\bar{f}_i(x)^T$ คือ เวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่
ถูกนอมอลไลซ์โดยมีการเปลี่ยนแถว
เป็นหลัก (Transpose)

$||$ คือ ขนาดของเวกเตอร์

ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่าง
จุดคำตอบกับเส้นอ้างอิง ดังนี้

1) สร้างเวกเตอร์จุดอ้างอิงและหาขนาด λ_j โดย

$$\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})$$

2) สร้างเวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์
ของกลุ่มคำตอบ โดย $\bar{f}(x) = (\bar{f}_1(x), \bar{f}_2(x),$
 $\bar{f}_3(x), \bar{f}_4(x), \bar{f}_5(x))$

3) สร้างเวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์
โดยเปลี่ยนรูปแบบจากหลักเป็นแถว (Transpose) ตาม
หลักการคูณเมทริกซ์ โดย $\bar{f}(x)^T =$
 $(\bar{f}_1(x), \bar{f}_2(x), \bar{f}_3(x), \bar{f}_4(x), \bar{f}_5(x))^T$

4) คำนวณค่า $d_{j,1}(x)$ เพื่อคำนวณหาระยะ $d_{j,2}(x)$ ของ
ทุกสตริงคำตอบ

5) เลือกกลุ่มคำตอบที่ดีจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้น
ที่สุดเทียบกับจุดอ้างอิง ซึ่งหนึ่งจุดอ้างอิงจะมีคำตอบได้
เพียงหนึ่งกลุ่มคำตอบ ถ้าในกรณีจุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่
มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดซ้ำกับจุดอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้ง
ฉากที่สั้นที่สุดเป็นลำดับถัดไป แสดงระยะ $d_{j,2}(x)$ และ
การเลือกกลุ่มคำตอบ ดังตารางที่ 8

ขั้นที่ 11 เก็บสตริงคำตอบของประชากรในปัจจุบัน
ทั้งหมด

เก็บสตริงคำตอบของกลุ่มคำตอบที่ดี เพื่อนำไปเป็น
ประชากรในรุ่นถัดไป และเก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด
(Elitist) ด้วยวิธีการเลือกเก็บคำตอบที่ไม่ถูกรองรับ
โดยคำตอบอื่น (Non-dominated Sorting) และกลับไป
ทำซ้ำในขั้นที่ 3

ขั้นที่ 12 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจนเนอเรชัน
แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ
(Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีของอัลกอริทึม
NSGA-III

ตารางที่ 8 ระยะ $d_{j,2}(x)$ และการเลือกกลุ่มคำตอบที่ดีจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดเทียบกับจุดอ้างอิง

x/λ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
1	1.750	1.842	1.547	1.842	1.843	1.549	1.842	1.547	1.547	1.750
2	0.947	1.272	1.170	1.273	1.216	1.112	1.216	1.112	1.113	1.030
3	0.166	0.806	0.803	0.800	0.806	0.806	0.474	0.661	0.607	0.736
4	0.621	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.625
5	0.305	0.412*	0.387	0.361	0.412	0.412*	0.202	0.325*	0.118*	0.412
6	1.057	1.059	0.851	0.982	0.992	0.861	1.036	0.908	0.819	1.072
7	0.925	1.478	1.403	1.489	1.430	1.342	1.299	1.227	1.246	1.197
8	0.931	1.419	1.337	1.427	1.369	1.277	1.271	1.188	1.201	1.153
9	0.925	1.488	1.421	1.506	1.441	1.354	1.355	1.276	1.304	1.158
10	0.956	1.260	1.146	1.250	1.203	1.098	1.159	1.056	1.042	1.080
11	1.067	0.965	0.699	0.850	0.890	0.741	1.047	0.932	0.845	1.028
12	0.620	0.877	0.877	0.877	0.877*	0.877	0.877	0.877	0.877	0.620
13	0.166*	0.806	0.803	0.800	0.806	0.806	0.474	0.661	0.607	0.736
14	0.621	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.625
15	0.305	0.412*	0.387*	0.361	0.412	0.412	0.202	0.325	0.118	0.412*
16	0.253	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.772*	0.827	0.820	0.687
17	0.925	1.478	1.403	1.489	1.430	1.342	1.299	1.227	1.246	1.197
18	1.102	1.560	1.547	1.548	1.560	1.560	1.449	1.468	1.456	1.297
19	0.372	0.695	0.694	0.694*	0.695	0.695	0.678	0.687	0.680	0.505

ตารางที่ 8 (ต่อ) ระยะ $d_{j,2}(x)$ และการเลือกกลุ่มคำตอบที่ดีจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดเทียบกับจุดอ้างอิง

x/λ	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
20	1.026	1.355	1.337	1.337	1.355	1.355	1.282	1.289	1.268	1.133

หมายเหตุ แสดงสัญลักษณ์ *

ระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุด

ระยะตั้งฉากที่ถูกเลือก (ระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดหรือสั้นลำดับถัดไป)

6. การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

คำตอบที่ได้จากปัญหาที่มีมากวัดอุปประสงค์จะเป็นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบจะยอมรับได้ว่าเป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีก็ต่อเมื่อสามารถวัดสมรรถนะของคำตอบว่าใกล้เคียงกับขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือขอบเขตกลุ่มคำตอบอ้างอิง (Reference Pareto Optimal) โดยจะสามารถเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบที่ได้จากหลายอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่าง ๆ จำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด [9] โดยแต่ละตัวชี้วัดมีรายละเอียดดังนี้

6.1 ตัวชี้วัดการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารโต (Convergence to pareto optimal set)

ตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบใช้ในการประมาณระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ กับคำตอบที่แท้จริง ซึ่งถ้าหากค่า GD (Generational Distance) มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าทุกจุดของคำตอบที่อัลกอริทึมค้นพบนี้อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด

6.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่และความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics)

การหาค่าระยะห่างจากคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงไปยังกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ แสดงได้ด้วยค่า IGD (Inverted Generational Distance) ค่า IGD ที่มีค่าน้อยจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบอยู่ใกล้กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากและเกือบจะครอบคลุมขอบเขตทั้งหมดบนกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

6.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้เพื่อประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารโตที่อัลกอริทึมหาได้ (กลุ่มคำตอบ A) โดยพิจารณาจากระยะทางเฉลี่ยระหว่างคำตอบที่อยู่ค่า Spread ที่ดีที่สุดนั้นมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นได้

6.4 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (การเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม) (Ratio of non-dominated solution: self-comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริงว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ แสดงได้ด้วยค่า RNDS1 ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้มีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

6.5 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (การเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง) (Ratio of non-dominated solutions: Pareto-optimum comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ว่าอยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริงมีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง แสดงได้ด้วยค่า RNDS2 ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้มีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

6.6 ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

7. การกำหนดค่าพารามิเตอร์

การทดลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปัญหามาตรฐานการจัดสมมูลสายประกอบของ Sawyer และ Mitchell [11] มาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย ซึ่งเป็นปัญหาที่มีจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสายจนถึงสายการผลิตรูปตัวยูแบบสิบสาย โดยแต่ละสายการผลิตรูปตัวยูจะมี 5 เครื่องจักร มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 25 และ 33 หน่วยเวลา ซึ่งวางอยู่รูปแบบที่แตกต่างกัน มีระยะห่างระหว่างเครื่องจักรที่ชัดเจนเพื่อทำการคำนวณระยะเวลาเดินของพนักงาน ซึ่งแบ่งเป็นปัญหาได้ทั้งหมด 10 ปัญหา แบ่งกลุ่มเป็นปัญหาลึก กลาง และใหญ่ แสดงรายละเอียดปัญหาดังตารางที่ 9 โดยงานวิจัยนี้ได้โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบอัลกอริทึม NSGA-III และ MOEA/D ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหา มาวัดดูประสิทธิภาพทั้งคู่ ดังนั้นในการแก้ปัญหา มาวัดดูประสิทธิภาพจึงต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ และทดสอบค่าพารามิเตอร์เพื่อให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหาซึ่งใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ในการกำหนดระดับค่าพารามิเตอร์

โดยพารามิเตอร์ของ NSGA-III มี 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (Crossover rate : P_c) และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Mutation rate : P_m) ในส่วนของ MOEA/D มี 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ จำนวนสตริงข้างเคียง (Neighborhood : N_b) และจำนวนการแทนที่สูงสุด (Maximum number of replacement : N_r) ซึ่งทั้งสองอัลกอริทึมแบ่งพารามิเตอร์เป็นสองระดับ มีการทำซ้ำ 3 ครั้ง จำนวนเจนอเรชันเท่ากับ 2000 รอบ และใช้วิธี Simplex lattice design ในการสร้างประชากรเริ่มต้น ซึ่งเท่ากับ 131 ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

Problem	No.of U-line	No.of Machine	Cycle time	Setup time (Input/Output)
1.1 (S)	2	10	25	2
1.2 (S)			33	2
2.1 (M)	4	20	25	2
2.2 (M)			33	2
3.1 (M)	6	30	25	2
3.2 (M)			33	2
4.1 (L)	8	40	25	2
4.2 (L)			33	2
5.1 (L)	10	50	25	2
5.2 (L)			33	2

ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

Population size	131	
NSGA III		
Crossover rate	0.6	0.9
Mutation rate	0.1	0.4
MOEA/D		
Neighborhood	10	20
Maximum number of replacement	2	5

8. ผลการทดลอง

การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลูลาร์แบบมากวัดดูประสิทธิภาพได้ใช้โปรแกรม MATLAB 2019a ประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i5-7200U CPU@2.50GHz RAM 8 GB Windows 10 64 bit Operation System ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 11

เมื่อเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (GD) พบว่าอัลกอริทึม NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในปัญหขนาดกลางและใหญ่ โดยดูได้จากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ GD ให้ค่าสมรรถนะที่น้อยกว่า บ่งบอกได้ถึงกลุ่มคำตอบที่ได้ของอัลกอริทึมนั้นอยู่ในกลุ่มคำตอบแท้จริงทั้งหมด

ส่วนปัญหามานกลางเล็กของทั้งสองอัลกอริทึมให้ค่าสมรรถนะที่ดีใกล้เคียงกัน

สำหรับการค้นหาและค่าความหลากหลายของคำตอบ (IGD) พบว่าอัลกอริทึม NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในปัญหามานกลางและใหญ่ โดยดูได้จากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ IGD ให้ค่าสมรรถนะที่น้อยกว่า บ่งบอกได้ถึงกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมนั้นอยู่ใกล้กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากและเกือบจะครอบคลุมขอบเขตทั้งหมด ส่วนปัญหามานกลางเล็กของทั้งสองอัลกอริทึมให้ค่าสมรรถนะที่ดีใกล้เคียงกัน

สำหรับด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) พบว่าอัลกอริทึม MOEA/D ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า NSGA-III ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในปัญหามานกลางและใหญ่ โดยดูได้จากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ Spread ให้ค่าสมรรถนะที่น้อยกว่า บ่งบอกได้ถึงคำตอบมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ส่วนปัญหามานกลางเล็ก NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D

สำหรับด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของการเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของการเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) พบว่า

อัลกอริทึม NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D ในเกือบทุกปัญหา โดยดูได้จากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ RNDS1 และ RNDS2 ให้ค่าสมรรถนะที่มากกว่า บ่งบอกได้ถึงกลุ่มคำตอบที่ได้ของอัลกอริทึมนั้นเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

สำหรับด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) พบว่าอัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยกว่า NSGA-III ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในปัญหามานกลางและเล็ก ส่วนปัญหามานกลางใหญ่ของทั้งสองอัลกอริทึมให้ค่าสมรรถนะที่ดีใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อัลกอริทึม NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะโดยรวมที่ดีกว่า MOEA/D ในด้านการค้นหาและค่าความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของการเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของการเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) ส่วนอัลกอริทึม MOEA/D ให้ค่าสมรรถนะโดยรวมที่ดีกว่า NSGA-III ในด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

ตารางที่ 11 ผลการทดลองของการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2
Problem Size	Small		Medium		Medium		Large		Large	
No. of Machine	10		20		30		40		50	
No. of U-line	2		4		6		8		10	
Cycle time	25	33	25	33	25	33	25	33	25	33
Generational Distance (GD)										
NSGA III	1.561	0.046	0.200	0.106	0.211	0.297	0.348	0.374	0.241	0.649
MOEA/D	0.218	0.051	0.225	0.160	0.294	0.470	0.260	0.479	0.283	0.894
Inverted Generational Distance (IGD)										
NSGA III	0.434	0.037	0.159	0.137	0.204	0.606	0.416	0.546	0.293	0.853
MOEA/D	0.148	0.038	0.262	0.145	0.351	0.847	0.257	0.571	0.421	1.263
Spread										
NSGA III	0.824	0.848	0.931	0.960	0.959	0.971	0.966	1.013	0.917	0.953
MOEA/D	0.844	0.853	0.698	0.767	0.785	0.836	0.838	0.881	0.722	0.875

ตารางที่ 11 (ต่อ) ผลการทดลองของการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2
RNDS1										
NSGA III	0.138	0.936	0.406	0.907	0.157	0.227	0.444	0.684	0.527	0.461
MOEA/D	0.545	0.444	0.197	0.631	0.026	0.134	0.374	0.379	0.072	0.062
RNDS2										
NSGA III	0.069	0.121	0.085	0.126	0.105	0.056	0.098	0.129	0.176	0.154
MOEA/D	0.168	0.057	0.050	0.072	0.014	0.055	0.076	0.055	0.026	0.021
CPU Time										
NSGA III	470.8	495.8	531.8	544.0	646.7	670.0	1001.4	876.8	983.3	915.6
MOEA/D	359.1	445.5	478.7	589.5	609.7	630.5	830.7	837.2	1000.1	1082.1

9. สรุป

การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายแบบมากวัตถุประสงค์ โดยมีการประยุกต์เวลาเดินและความล่าช้าจากการเดินเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายสามารถตอบสนองในเรื่องระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี เพื่อให้ทันตามความต้องการลูกค้า โดยพนักงานสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการผลิตหรือมากกว่านั้น เป็นการลดเวลาว่างของพนักงาน เกิดอรรถประโยชน์สูงสุดแก่พนักงาน ช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ จึงใช้วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ III (NSGA-III) เปรียบเทียบกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) พบว่า NSGA-III ให้สมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D ในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (GD) และด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD)

คิดเป็นร้อยละ 80 ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของการเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของการเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) คิดเป็นร้อยละ 90 ส่วนด้านความหลากหลายของคำตอบและด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ MOEA/D ให้สมรรถนะที่ดีกว่า NSGA-III คิดเป็นร้อยละ 80 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า NSGA-III เป็นอัลกอริทึมที่ดีและมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาของงานวิจัยนี้

สำหรับแนวทางการศึกษาในอนาคตจะมีแนวทางพัฒนาวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ III (NSGA-III) ให้หาคำตอบได้เร็วขึ้น และมีแนวทางที่จะนำด้านการยศาสตร์ (Ergonomics) มาประยุกต์ใช้กับสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย ให้เหมือนกับสถานการณ์จริงในโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุด เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อพนักงานและองค์กร

เอกสารอ้างอิง

- [1] Monden, Y. Toyota Production System, An Integrated Approach to Just-In-Time. Institute of Industrial Engineers, CHAPMAN & HALL, 1994.
- [2] Miltenburg, J. (2001). U-shaped Production Lines: A Review of Theory and Practice. *International Journal of Production Economics*, 2001; 70(3): 201-214.
- [3] Miltenburg, J. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, 1998; 109: 1-23.
- [4] Ferjani, A., Ammar, A., Pierreval, H. and Trabelsi, A. A Heuristic Approach Taking Operators Fatigue into Account or the Dynamic Assignment of Workforce to Reduce the Mean Flowtime. The 45th International Conference on Computers & Industrial Engineering, 28-30 October, Metz, France, 2015.

- [5] Deb, K. and Jain, H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014; 18(4): 577-600.
- [6] Zhang, Q. and Li, H. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007; 11(6): 712-731.
- [7] จักรกฤษณ์ วันดี. การเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการด้านระบบสารสนเทศ. สารนิพนธ์, มหาวิทยาลัยสยาม, 2557.
- [8] ปาลิดา นิยมคล้าย. การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [9] ตริยรัตน์ เกิดโกศลทรัพย์. การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560.
- [10] Yuan Y., Xu H. and Wang B. An Improved NSGA-III Procedure for Evolutionary Many-Objective Optimization. The 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, July, Vancouver, Canada, 2014.
- [11] Scholl, A., Boysen, N. and Fließner, M. The Assembly Line Balancing and Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times: Problem Extension, Model Formulation and Efficient Heuristics. *Operations Research Spectrum*, 2013; 35(1): 291-320.



เทคโนโลยีทอรรีแฟกชันชีวมวลเพื่อผลิต เชื้อเพลิงชีวภาพแข็งคุณภาพสูง Biomass Torrefaction Technology for Producing High Quality Solid Biofuels

ภูมินทร์ คงโต¹ อากม ปะหลามานิต^{2,*} สุเมธ ไชยประพัทธ์^{2,3} และ นคร ทิพย์าวงศ์⁴
Pumin Kongto¹, Arkom Palamanit^{2,*}, Sumate Chaiprapat^{2,3} and Nakorn Tippayawong⁴

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถ.กาญจนวนิชย์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

²บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถ.กาญจนวนิชย์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

15 ถ.กาญจนวนิชย์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

⁴ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

¹Energy Technology Program, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

²Interdisciplinary Graduate School of Energy Systems, Prince of Songkla University,
15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
15 Karnjanavanich Rd., Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

⁴Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University,
239 Huay Kaew Rd., Muang District, Chiang Mai 50200, Thailand

*E-mail address: arkom.p@psu.ac.th, energy_man001@hotmail.com

บทคัดย่อ

กระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงหรือพลังงานชีวภาพด้วยกระบวนการทางเคมีความร้อนนั้นมีอยู่หลากหลาย เช่น ทอรรีแฟกชัน ไพโรไลซิส แก๊สซิฟิเคชัน และการเผาไหม้ การเลือกใช้กระบวนการที่ต่างกันทำให้ได้เชื้อเพลิงหรือพลังงานที่ต่างกันซึ่งอาจจะมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว ก๊าซ หรือพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า การเลือกใช้เทคโนโลยีหรือกระบวนการดังกล่าวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น (1) ชนิด รูปแบบและองค์ประกอบของชีวมวล (2) เป้าหมายการใช้เชื้อเพลิงหรือพลังงาน เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อน ไฟฟ้า หรือการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์ (3) การจัดเก็บและการขนส่ง (4) ต้นทุนการผลิตหรือการเปลี่ยนรูป และ (5) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการยอมรับของสังคมหรือประชาชน สำหรับเทคโนโลยีทอรรีแฟกชันนั้นเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลแข็งโดยใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือจำกัดออกซิเจน เพื่อให้ได้ความชื้นและสารระเหยเบา (Light volatile) เกิดการระเหยออกจากชีวมวล ซึ่งชีวมวลที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะมีค่า

ความร้อนและความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านอื่น ๆ เช่น การดูดซับความชื้นต่ำ ลดการย่อยสลายทางชีวภาพหรือเสื่อมสภาพในระหว่างการเก็บรักษา ด้วยสมบัติดังกล่าวทำให้ชีวมวลทอรรีไฟด์ได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้นสำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินในการผลิตความร้อนและไฟฟ้า อย่างไรก็ตามการผลิตชีวมวลทอรรีไฟด์ (Torrefied biomass) ให้ได้คุณภาพหรือมีสมบัติที่ดัดแปรขึ้นอยู่กับการปฏิบัติ เช่น ชนิดและสมบัติชีวมวล (Type and property of biomass) เงื่อนไขการดำเนินการที่ใช้ (Operating parameters) หรือชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ (Type of reactor) ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับเทคโนโลยีทอรรีแฟคชันชีวมวลโดยมีเนื้อหาครอบคลุม นิยาม เทคโนโลยี รูปแบบ ปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของชีวมวลทอรรีไฟด์ สมบัติทางกายภาพและเคมี ข้อดี ข้อจำกัด รวมถึงการใช้ประโยชน์ชีวมวลทอรรีไฟด์ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจศึกษาและประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพชีวมวลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ยั่งยืนต่อไป

คำสำคัญ: ชีวมวล การเปลี่ยนรูปชีวมวล ทอรรีแฟคชัน ชีวมวลทอรรีไฟด์ เชื้อเพลิงชีวภาพแข็ง

ABSTRACT

The conversion processes of biomass into biofuels or bioenergy via thermochemical process can be performed by several processes such as torrefaction, pyrolysis, gasification and combustion. The use of different biomass conversion processes provides the different biofuels or bioenergy forms, for example, solid, liquid, gas, heat and power. The criterion for selecting biomass conversion processes depend on many factors, including (1) type and property of biomass (2) target for using biofuels or bioenergy such as using as fuel for heat and power generation and using as vehicle fuels (3) storage and transportation (4) production and conversion cost and (5) environmental impacts and social acceptance. For the torrefaction process, it is the process used to improve the biomass property by using heat at the temperature range of 200-300°C under absence or controlled oxygen conditions. With this process, the moisture and light volatile will be removed, resulting in torrefied biomass with higher heating value and energy density. The torrefied biomass also has better property such as low moisture and water absorbability and low biological activity during storage. With a better property of torrefied biomass, the industry and power sectors have more increasingly interested in torrefied biomass for using as fuel or co-firing with coal in heat and power generation. However, production of torrefied biomass with a good property depends on several factors such as type and property of biomass, operating parameters and types of reactor. Therefore, this review article presents biomass torrefaction technology. The detail of this article covers the definition, torrefaction technology, types of torrefaction processes, effects of operating parameters on quality and quantity of torrefied biomass, the physiochemical property of torrefied biomass, advantages and disadvantages of torrefied biomass, as well as the use of torrefied biomass. This review article will be a guideline for the readers who interest in biomass torrefaction technology for sustainable development and application in the future.

Keywords: Biomass, Biomass conversion, Torrefaction, Torrefied biomass, Solid biofuel.

1. บทนำ

การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม โดยทั่วไปเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้อยู่แพร่หลายประกอบด้วย น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามปริมาณความต้องการเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลมีอยู่จำกัด ซึ่งจากรายงาน

ของ British Petroleum (BP) พบว่าปี ค.ศ. 2017 น้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ทั่วโลกมีปริมาณสำรองที่พิสูจน์แล้วทั้งหมดประมาณ 1,696.6 พันล้านบาร์เรล 1,035,012 ล้านตัน และ 193.5 ล้านล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สำหรับประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ในปี ค.ศ. 2017 พลังงานขั้นต้นที่ใช้ประมาณ 129.7 ล้านตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือร้อยละ 1 ของการใช้พลังงาน

ขึ้นต้นทั่วโลก เพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2016 ประมาณร้อยละ 2.5 [1] และมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายประมาณ 80.752 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ในขณะที่ใช้พลังงานหมุนเวียน และพลังงานทดแทนประมาณ 11.698 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือร้อยละ 14.49 ของพลังงานขั้นสุดท้าย เพิ่มขึ้นร้อยละ 5.9 จากช่วงเดียวกันของปีก่อน เป็นผลจากการที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น [2] อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาแหล่งสำรองเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งในส่วนของน้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พบว่าประเทศไทยมีแหล่งสำรองของน้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติที่พิสูจน์แล้วน้อยมาก โดยน้ำมันดิบมีประมาณ 0.3 พันล้านบาร์เรล ในขณะที่ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติมีเพียง 1,063 ล้านตัน และ 0.2 ล้านล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ [1] นอกจากการลดลงของปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Global climate change) และสภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งเป็นผลจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซหลักที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล [3-4] นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินยังไม่เป็นที่ยอมรับของประชาชนในหลายพื้นที่ เนื่องจากข้อกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ จากประเด็นดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลักมีผลกระทบต่อความมั่นคงและยั่งยืนด้านพลังงาน (Energy security and sustainability) โดยเฉพาะประเทศไทยที่ต้องนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) และพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก (Alternative energy) จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพิ่มความมั่นคงและยั่งยืนด้านพลังงาน

แหล่งพลังงานทดแทน (Alternative energy source) และพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy source) มีหลากหลาย เช่น แหล่งพลังงานงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากความร้อนใต้พิภพ พลังงานคลื่น พลังงานจากน้ำขึ้นและน้ำลง และพลังงานจากชีวมวล การใช้งานขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ศักยภาพของแหล่งพลังงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความพร้อมของเทคโนโลยีและการยอมรับของประชาชน จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่า ประเทศไทยมีแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพประกอบด้วย ลม (Wind) แสงอาทิตย์ (Solar) น้ำ (Hydro) ชีวมวล (Biomass) และขยะชุมชน (Municipal solid waste) ประมาณ 12, 554,070.6, 1,540.7, 19,264.1 และ 3431.9 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ตามลำดับ [5] และเมื่อพิจารณาจากข้อมูลการใช้พลังงานทดแทนของไทยในปี พ.ศ. 2560 พบว่ามีการใช้พลังงานทดแทนเพียง 11,731 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือร้อยละ 14.53 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด [2] สำหรับเป้าหมายในอนาคตของการส่งเสริมและการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยนั้น ได้มีการกำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) [6] โดยเป้าหมายในปี พ.ศ. 2579 จะเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเป็นร้อยละ 30 ซึ่งพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนที่ส่งเสริมให้ใช้เพิ่มขึ้นประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานจากชีวมวล ซึ่งปัจจุบันมากกว่าร้อยละ 80 ของพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนทั้งหมดของประเทศไทยมาจากชีวมวล [6] เนื่องจากไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มีส่วนเหลือทิ้ง (Residues) และของเสีย (Wastes) จากการเพาะปลูก การเก็บเกี่ยวและการแปรรูปผลผลิตจำนวนมาก เช่น ข้าว อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง ไม้ยางพารา และปาล์มน้ำมัน [7] โดยเฉพาะชีวมวลจากไม้ยางพาราและปาล์มน้ำมัน

พบว่ามีปริมาณมากทางภาคใต้ ในปี พ.ศ. 2560 มีพื้นที่ปลูกต้นยางพาราและปาล์มน้ำมัน 14.25 และ 4.02 ล้านไร่ เป็นพื้นที่ปลูกทางภาคใต้ร้อยละ 60 และ 86.5 ตามลำดับ [8-9] สำหรับชีวมวลจากปาล์มน้ำมันประกอบด้วย กะลาปาล์ม เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า ต้นปาล์ม ทางใบปาล์ม และตอรากต้นปาล์ม ในส่วนของชีวมวลจากไม้ยางพาราประกอบด้วย ขี้เลื่อยไม้ยางพารา ปีกไม้ยางพารา ตอรากต้นยางพารา และกิ่งก้านไม้ยางพารา ในปี พ.ศ. 2556 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้รายงานศักยภาพของชีวมวลปาล์มน้ำมันและไม้ยางพาราไว้ว่ามีประมาณ 1,413.40 และ 136.56 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ตามลำดับ ชีวมวลดังกล่าวบางส่วนถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตความร้อนและไฟฟ้าอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามยังมีชีวมวลอีกมากที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้

การเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิงนั้นมีหลายกระบวนการ เช่น (1) กระบวนการทางกล (Mechanical processes) เช่น การสับ การบด และการอัด (2) กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical processes) เช่น การเผาไหม้ (Combustion) การทำแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) และการทอรรีแฟคชัน (Torrefaction) (3) กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical processes) เช่น การหมักและการย่อย (Fermentation and digestion) (4) กระบวนการเคมี (Chemical processes) และ (5) กระบวนการร่วม (Combined processes) เช่น การบดและอัดเม็ด หรือการเผาด่านและอัดแท่ง [10-13] การเลือกใช้กระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิง ด้วยกระบวนการดังกล่าวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หรือพลังงานที่แตกต่างกัน เช่น พลังงานความร้อน (Heat) ก๊าซเชื้อเพลิง (Gas fuel) เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) หรือเชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปแบบของพลังงานหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์ การจัดเก็บ การขนส่ง และต้นทุนการผลิตหรือการเปลี่ยนรูป

สำหรับการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้านั้นยังมีข้อจำกัดในหลายส่วน เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดมีสมบัติทางกายภาพ (Physical property) องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition) และค่าความร้อน (Heating value) แตกต่างกัน การนำชีวมวลมาปรับปรุงสมบัติทางกายภาพหรือองค์ประกอบทางเคมีจึงเป็นอีกแนวทางที่กำลังได้รับความสนใจ เช่น การสับไม้เป็นชิ้นขนาดเล็ก (Wood chip) และการผลิตขี้เลื่อยอัดเม็ด (Wood pellet) กระบวนการดังกล่าวช่วยปรับปรุงรูปทรง (Shape) เพิ่มความหนาแน่นเชิงมวล (Mass density) และเพิ่มความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ซึ่งช่วยให้สะดวกในการใช้ จัดเก็บและขนส่ง อย่างไรก็ตามชีวมวลที่อยู่ในรูปของไม้สับหรือขี้เลื่อยอัดเม็ดยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น เกิดการสลายตัวทางชีวภาพและลดความชื้นขณะจัดเก็บ รวมถึงค่าความร้อนยังค่อนข้างต่ำ ดังนั้น การนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันสามารถลดความชื้น เพิ่มค่าความร้อน ลดการสลายตัวทางชีวภาพ มีความสามารถในการลดความชื้นกลับต่ำ [14] อีกทั้งยังเปราะซึ่งสะดวกต่อการบดทำให้ใช้พลังงานในการบดน้อยลง [15-16] การใช้ชีวมวลทอรรีไฟด์เผาไหม้ร่วมกับถ่านหินยังสามารถช่วยลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ [17] สำหรับเรื่องมลพิษนั้น ถึงแม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นหนึ่งในกลุ่มก๊าซเรือนกระจกซึ่งภาคเกษตรจะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากเป็นอันดับสองรองจากภาคพลังงาน [18] แต่พืชก็นำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนนั้นมาใช้ในการกระบวนการสังเคราะห์แสงสำหรับการเจริญเติบโตของพืชรุ่นต่อไป การใช้ชีวมวลเป็นพลังงานจึงถือได้ว่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกลาง (Carbon neutral) ดังนั้นด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้นบทความนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานด้วยเทคโนโลยีทอรรีแฟคชันเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเชิงคุณภาพสูง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2. ชีวมวลและการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงาน

2.1 นิยามของชีวมวล

ชีวมวลคือสารอินทรีย์ที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจจะมีมาจากพืช สัตว์ และมนุษย์ หรือเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพที่มีความหลากหลายทางชีววิทยา [19] การย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากพืช สัตว์และจุลินทรีย์ รวมทั้งผลิตภัณฑ์และของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตร รวมทั้งสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะอุตสาหกรรมและชุมชน ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่รวมถึงเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือผลิตภัณฑ์จากเชื้อเพลิงฟอสซิล [20]

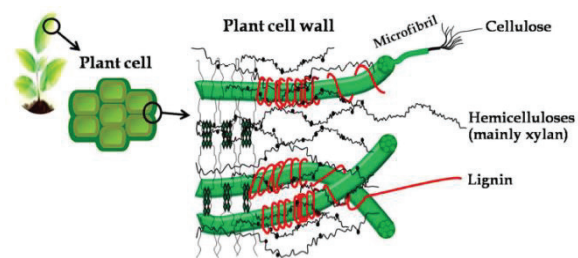
2.2 แหล่งที่มาและรูปแบบของชีวมวล

พลังงานแสงอาทิตย์จะถูกกักเก็บโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช เมื่อพืชเจริญเติบโตพลังงานส่วนดังกล่าวถูกสะสมอยู่ในรูปของชีวมวล [19] ซึ่งแหล่งที่มาและรูปแบบของชีวมวลจะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ โดยชีวมวลจะมี 3 กลุ่ม ได้แก่ ชีวมวลดั้งเดิมจากแหล่งกำเนิด (Virgin) ชีวมวลจากของเหลือทิ้งหรือเศษเหลือทิ้ง (Residues) และชีวมวลจากของเสีย (Wastes) ซึ่งทั้ง 3 กลุ่มจะแบ่งตามแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 6 ประเภท ได้แก่ 1. ชีวมวลที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ (Natural) 2. ชีวมวลที่เกิดจากการทำเกษตรกรรม (Agricultural) 3. ชีวมวลจากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร (Agricultural industries) 4. ชีวมวลจากชุมชนและที่อยู่อาศัย (Community and residential) 5. ชีวมวลจากอุตสาหกรรม (Industry) 6. ชีวมวลจากการเลี้ยงสัตว์ (Farming) [19-20]

2.3 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของชีวมวลจากพืชประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) [21-23] ดังแสดงตามรูปที่ 1 องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสมีสมบัติที่แตกต่างจากคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) และสตาร์ช (Starch) เนื่องจากไม่สามารถย่อยได้ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ ดังนั้นด้วยสมบัติดังกล่าวนี้

การนำชีวมวลที่มีส่วนประกอบของลิกโนเซลลูโลสมาใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนโดยการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานหรือเชื้อเพลิง เช่นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า แก๊สชีวภาพ (Biogas) แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และชีวมวลอัดเม็ด (Biomass pellet) จึงกำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย ทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งองค์ประกอบหลักของลิกโนเซลลูโลสมีดังนี้ [20-23]



รูปที่ 1 องค์ประกอบของชีวมวล [22]

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบอยู่ทั่วไปโดยเฉพาะในโครงสร้างผนังเซลล์ของชีวมวล ปริมาณของเซลลูโลสในชีวมวลมีประมาณร้อยละ 33-90 ขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของชีวมวลนั้น ๆ ซึ่งชีวมวลประเภทไม้จะมีปริมาณเซลลูโลสมากถึงร้อยละ 40-55 โดยน้ำหนักแห้ง

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นส่วนประกอบที่อยู่บริเวณผนังเซลล์ของพืช เป็นเส้นใยอาหาร (Dietary fiber) ที่ไม่ละลายน้ำ เป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ของพืช เช่น ผัก ผลไม้ และไม้ ชีวมวลประเภทไม้โดยทั่วไปอาจจะมีเฮมิเซลลูโลสอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักแห้ง

2.3.3 ลิกนิน (Lignin) พบในส่วนผนังเซลล์พืช ซึ่งช่วยให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรงและอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พืชโดยทั่วไป เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน และหญ้า พบลิกนินมากในส่วนเปลือก ลำต้น กิ่งก้าน โดยลำต้นไม้เนื้อแข็งจะมีลิกนินประมาณร้อยละ 18-25 ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนจะมีประมาณร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนักแห้ง

2.4 เทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานชีวภาพ

การเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงานขั้นต้น (Primary energy) และพลังงานขั้นสุดท้าย (Final or secondary energy) สามารถดำเนินการได้หลายกระบวนการที่กำลังได้รับความนิยมและใช้อย่างแพร่หลายประกอบด้วย (1) กระบวนการทางกายภาพหรือทางกล (Physical or mechanical processes) (2) กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical processes) (3) กระบวนการทางเคมี (Chemical processes) (4) กระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical processes) และ (5) กระบวนการร่วม (Combined processes) [12-13] ผลผลิตที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น หากมีชีวมวลที่เป็นของแข็งในกลุ่มแป้งหรือน้ำตาล กระบวนการทางชีวเคมีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้โดยการหมักเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซหรือของเหลวชีวมวลที่เป็นประเภทน้ำมันใช้แล้ว ผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมี ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ไบโอดีเซล หรือเป็นประเภท เศษไม้หรือขี้เลื่อย ชีวมวลกลุ่มนี้ก็จะได้นำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือทางเคมีความร้อน หากต้องการเพิ่มความหนาแน่นอาจจะนำมาอัดเม็ด แต่หากต้องการเพิ่มความความร้อนหรือสมบัติอื่น ๆ ที่สูงขึ้นก็อาจจะใช้กระบวนการทางกายภาพและทางเคมีความร้อนร่วมกัน โดยอาจจะอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของชีวมวลก่อนนำไปผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน ก็จะได้ชีวมวลอัดเม็ดทอรรีไฟด์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีทั้งความหนาแน่น ค่าความร้อน และสมบัติด้านเชื้อเพลิงสูงขึ้น ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการทอรรีแฟกชันมีดังนี้

3. เทคโนโลยีทอรรีแฟกชัน

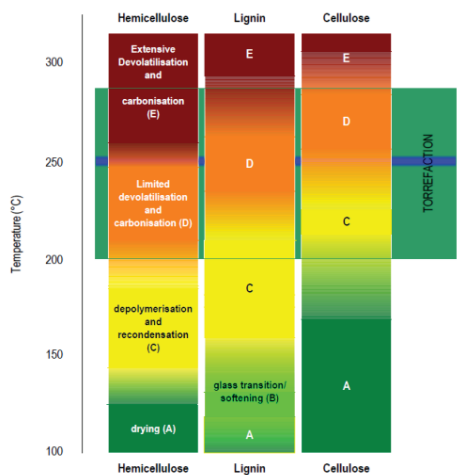
3.1 นิยามของทอรรีแฟกชัน

ทอรรีแฟกชันเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและการเปลี่ยนรูปชีวมวลโดยกระบวนการทางเคมีความร้อน โดยให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือจำกัดออกซิเจน (อากาศ) ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศา

เซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 30-120 นาที ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของชีวมวลดีขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะมีสถานะเป็นของแข็ง ส่วนที่เหลือจะมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ [21], [24-33]

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการทอรรีแฟกชันเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1930 โดยนักวิจัยในประเทศฝรั่งเศส แต่ยังไม่ได้มีการตีพิมพ์จนกระทั่งปี ค.ศ. 1980 นักวิจัยชื่อ Bourgois และ Doat ได้ตีพิมพ์ผลการวิจัยเกี่ยวกับการทอรรีแฟกชันไม้เขตร้อนสองชนิด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการทอรรีแฟกชันสามารถเพิ่มค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ และยังคงรักษาพลังงานไว้ได้มากกว่าร้อยละ 90 [27-28] กระบวนการทอรรีแฟกชันเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส จุดประสงค์หลักของการทอรรีแฟกชันคือการกำจัดน้ำและสารระเหยออกจากชีวมวล [34-35] ในกระบวนการทอรรีแฟกชัน เฮมิเซลลูโลสบางส่วนจะเริ่มสลายตัวก่อนแต่เซลลูโลสและลิกนินจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินจะสลายตัวในช่วง 200-400, 275-430 และ 127-900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [22] ซึ่งทั้งสามองค์ประกอบนี้จะมีการสลายตัวเพียงบางส่วนเท่านั้น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลในกระบวนการทอรรีแฟกชันแสดงตามรูปที่ 2 [28]

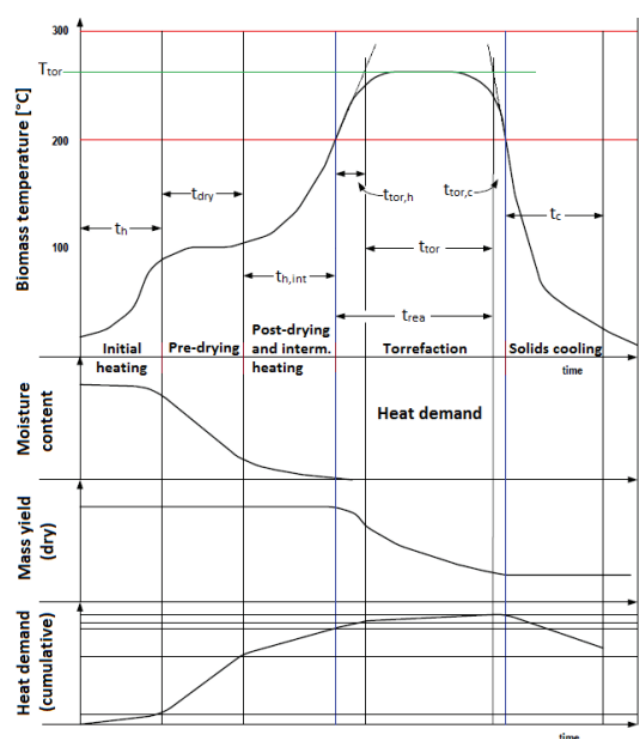
ในกระบวนการทอรรีแฟกชันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของชีวมวลตามช่วงอุณหภูมิซึ่งมี 5 ขั้นตอนได้แก่ (1) ช่วงให้ความร้อนเริ่มต้น (2) ช่วงระเหยความชื้น (3) ช่วงหลังระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิ (4) ช่วงทอรรีแฟกชัน และ (5) ช่วงลดอุณหภูมิ ดังแสดงตามรูปที่ 3 [24], [28], [36]



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของ
ชีวมวลในกระบวนการทอรีแฟคชัน [28]

ช่วงที่ 1 ช่วงให้ความร้อนเริ่มต้น (Initial heating) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และเป็นช่วงที่ชีวมวลได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ความชื้นเริ่มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการระเหยของความชื้นที่บริเวณผิวนอก

ช่วงที่ 2 ช่วงการลดความชื้นหรือการอบแห้งบางส่วน (Pre-drying) ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 100-105 องศาเซลเซียส ความชื้นส่วนใหญ่ในชีวมวลถูกระเหยออกไป ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงมาก ในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 3 ลำดับขั้นต่างๆ ที่เกิดในขั้นกระบวนการทอรีแฟคชัน [36]

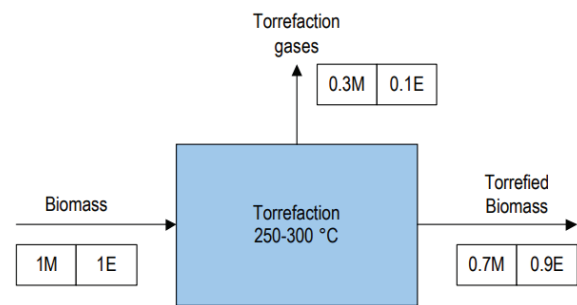
ช่วงที่ 3 ช่วงการลดความชื้นหรือการอบแห้งส่วนสุดท้ายและการเพิ่มอุณหภูมิของชีวมวล (Post drying and intern heating) ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส ความชื้นภายในผนังเซลล์ของชีวมวลถูกระเหยหมดและมีสารระเหยเบา (Light volatile) บางส่วนเริ่มระเหยออกจากชีวมวล ในขณะที่การใช้

พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากช่วงก่อนหน้านี้ ซึ่งจะสังเกตได้จากช่วงที่ 1-3 นั้น มวลแห้ง (Dry mass or mass yield) ของชีวมวลค่อนข้างคงที่ตลอดการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงการระเหยความชื้นและการเพิ่มอุณหภูมิเป็นหลัก

ช่วงที่ 4 ช่วงทอรัฟแฟชัน (Torrefaction) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส ในช่วงดังกล่าวเกิดการสูญเสียมวลอย่างชัดเจน เนื่องจากการระเหยของสารระเหย (Volatiles) และการแตกตัวกลายเป็นไอระเหยของลิกโนเซลลูโลสเนื่องจากความร้อน (Thermal decomposition) โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสซึ่งสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส [22] พลังงานความร้อนสะสมในช่วงนี้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ช่วงที่ 5 ช่วงลดอุณหภูมิของชีวมวลทอรัฟไฟด์ (Solid cooling of torrefied biomass) เป็นช่วงการลดอุณหภูมิของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรัฟแฟชันให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม ในช่วงนี้พลังงานความร้อนสะสมลดลงในขณะที่มวลค่อนข้างคงที่

ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการทอรัฟแฟชันชีวมวลมีสถานะเป็นของแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่เหลือมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้แต่ละส่วนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของชีวมวล องค์ประกอบของชีวมวล อุณหภูมิทอรัฟแฟชัน ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ใช้ในระบบ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอรัฟแฟชัน ตัวอย่างการพิจารณาสมดุลมวลและพลังงานในกระบวนการทอรัฟแฟชันชีวมวลที่อุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส พบว่า มวลลดลงประมาณร้อยละ 30 โดยการเปลี่ยนสถานะไปเป็นก๊าซ ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซที่ควบแน่นได้ (Condensable gas) และก๊าซที่ควบแน่นไม่ได้ (Non-condensable gas) ก๊าซดังกล่าวมีพลังงานร้อยละ 10 ในขณะที่มวลของผลิตภัณฑ์หลักจะมีประมาณร้อยละ 70 ของมวลเริ่มต้นและมีพลังงานประมาณร้อยละ 90 [24], [37] ดังแสดงตัวอย่างตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 สมดุลมวลและพลังงานในกระบวนการทอรัฟแฟชัน โดยที่ M คือ มวล และ E คือ พลังงาน [37]

3.2 รูปแบบของกระบวนการทอรัฟแฟชัน

กระบวนการทอรัฟแฟชันแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

3.2.1 การทอรัฟแฟชันแบบเปียก (Wet torrefaction: WT)

เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่ผสมอยู่กับน้ำภายในเตาปฏิกรณ์ในช่วงอุณหภูมิ 180-260 องศาเซลเซียส และเป็นสภาวะที่ควบคุมแรงดัน ระยะเวลาในกระบวนการทอรัฟแฟชันอยู่ในช่วง 5-240 นาที ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีสถานะเป็นของแข็งชื้นหรือที่เรียกว่าไฮโดรชาร์ (Hydrochar) ประมาณร้อยละ 88.30 และก๊าซ ซึ่งส่วนใหญ่ที่ได้เป็นก๊าซผสม ที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 90-95 ส่วนที่เหลือเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ละลายน้ำ เช่น น้ำตาลและกรดอินทรีย์ [21], [41-43]

3.2.2 การทอรัฟแฟชันแบบแห้ง (Dry torrefaction: DT)

เป็นการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อยู่ในเตาปฏิกรณ์ ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในกระบวนการทอรัฟแฟชันอยู่ในช่วง 30-120 นาที ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือจำกัดออกซิเจน (อากาศ) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีสถานะเป็นของแข็งหรือเรียกว่า ถ่านชาร์หรือถ่านชีวภาพ (Bio-char) หรือชีวมวลทอรัฟไฟด์ (Torrefied biomass) ส่วนที่เหลือจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวซึ่งเกิดจากก๊าซที่สามารถควบแน่นได้ ส่วนใหญ่เป็นน้ำ สารอินทรีย์และอนุภาคอิสระ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน [21], [38-45] ชีวมวล

ประเภทไม้หลังจากผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส ความชื้นจะลดลงจากร้อยละ 30-60 เหลือประมาณร้อยละ 1-5 ปริมาณสารระเหยจากร้อยละ 70-80 ลดลงเหลือประมาณร้อยละ 55-65 ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่มีร้อยละ 15-25 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 28-35 แต่ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ลดลงเหลือ

ประมาณร้อยละ 70 หลังจากทอรรีไฟด์ ค่าความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 16-18 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เป็น 20-24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [24]

ข้อดีและข้อจำกัดหรือข้อกังวลของการทอรรีแฟกชันทั้งสองแบบแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อจำกัด-ข้อกังวล ของกระบวนการทอรรีแฟกชันแบบ WT และ แบบ DT

Dry torrefaction : DT	
ข้อดี	ข้อจำกัด-ข้อกังวล
1. การเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินมีเสถียรภาพมากขึ้น	1. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงขึ้น ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง เนื่องจากต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการลดความชื้นชีวมวล
2. ปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณภาพของ Syngas ในแก๊สซิฟิเคชัน	2. ปริมาณขี้เถ้าสูงขึ้นและมีปัญหาในช่วงการนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูง
3. ได้น้ำมันชีวภาพที่ดีขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว	3. นำมาอัดเม็ดได้ไม่ดีเนื่องจากเกิดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนเกิดการสลายตัว
	4. หากเพิ่มแรงกดในกระบวนการอัดเม็ดอาจทำให้เกิดการระเบิดหรือเพลิงไหม้ได้เนื่องจากแรงเสียดทานจากการกด
	5. อาจเกิดการติดไฟเองขณะจัดเก็บเนื่องจากอุณหภูมิการจุดติดไฟต่ำลง
Wet torrefaction : WT	
ข้อดี	ข้อจำกัด-ข้อกังวล
1. สามารถใช้ชีวมวลที่เปียกได้	1. วัสดุเตาปฏิกรณ์ต้องทนอุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันปานกลางและการกัดกร่อนที่รุนแรง
2. มีค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่าแบบ Dry torrefaction	2. ต้องบีบแรงดันที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการป้อนชีวมวล
3. ให้ค่าความร้อนสูงขึ้น ง่ายต่อการบด ดูดความชื้นกลับต่ำ	3. ปัญหาการอุดตันที่เกิดจากกากตะกอนอินทรีย์
4. ลดสารประกอบอินทรีย์จำพวกโลหะ-อัลคาไลน์	4. เกิดน้ำเสียระหว่างกระบวนการทอรรีแฟกชัน

ที่มา : [42]

3.3 ปัจจัยหรือตัวแปรที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชัน

ปัจจัยหรือตัวแปรที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของชีวมวล ขนาดของชีวมวล องค์ประกอบของชีวมวลปริมาณ

ออกซิเจนหรืออากาศ อุณหภูมิ เวลา และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ชนิดของชีวมวลและองค์ประกอบของชีวมวล (Biomass type and composition)

ชีวมวลแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน

เช่น ปริมาณลิกโนเซลลูโลส ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า นอกจากนี้ยังมี ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และธาตุ อื่น ๆ ปัจจัยดังกล่าวนี้ล้วนส่งผลต่อ คุณภาพของชีวมวล ทอรัไฟด์ ต้นทุนการทอรัไฟเคชัน พลังงานที่ใช้ รวมทั้ง ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานความร้อนและ องค์ประกอบของไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล ทอรัไฟด์ องค์ประกอบและสมบัติของชีวมวลบางชนิด แสดงตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3

สมบัติเบื้องต้นของชีวมวลมีผลต่อคุณภาพและ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณ ลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่างกัน ในกระบวนการทอรัไฟเคชัน ผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ อยู่ในสถานะของแข็ง การที่มีปริมาณลิกนินมากส่งผลให้ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มากตามไปด้วย เนื่องจากลิกนินสลาย ตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและสูงกว่าเซลลูโลสและเฮมิ-

เซลลูโลส นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความร้อนสูงกว่า ชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินต่ำอีกด้วย [10] สำหรับสมบัติ ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีแบบประมาณซึ่งประกอบด้วย ปริมาณความชื้น ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย และปริมาณเถ้า องค์ประกอบเหล่านี้บ่งบอกถึงคุณภาพ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน หากใช้ชีวมวลที่มี ความชื้นสูงเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง จะต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการระเหยความชื้น เป็น เหตุให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นหรือสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณสารระเหยถ้ามีมากก็จะช่วยให้เกิดการ เผาไหม้ได้ดี ในส่วนของคาร์บอนคงตัวยังมีปริมาณมาก ก็หมายถึงว่าจะส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ใน ขณะเดียวกันการมีปริมาณเถ้าน้อย แสดงว่าเชื้อเพลิงนั้นมี องค์ประกอบที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้น้อย เป็นสมบัติที่ดี ของเชื้อเพลิง ส่วนการวิเคราะห์แบบละเอียด ปริมาณ คาร์บอนเป็นส่วนที่สำคัญหากปริมาณคาร์บอนมากจะ ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

ตารางที่ 2 ตัวอย่างองค์ประกอบของชีวมวลบางชนิด

Lignocellulosic materials	Components (%wt. drybasis)			Ref.
	Cellulose	Hemicellulose	Lignin	
Particle rubber wood	52.41	34.24	14.31	[46]
Nut shells	25.00-30.00	25.00-30.00	30.00-40.00	[22]
Corn cobs	45.00	35.00	15.00	[22]
Sawdust	19.64	27.20	51.48	[47]
Beech wood	45.30	31.20	21.90	[48]
Hardwoods	40-50	15.00-35.00	18.00-25.00	[49]
Softwoods	35-50	20.00-32.00	20.00-25.00	[49]
Rice straw	34.00	27.20	14.20	[25]
Olive tree purning	52.40	7.10	16.70	[50]

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสมบัติทางเคมีของชีวมวลบางชนิด

Biomass	Proximate analysis (wt.%)				HHV (MJ/kg)	Ultimate analysis (wt.%)					Ref.
	M	FC	VM	Ash		C	H	O	N	S	
Eucalyptus	2.28	13.89	83.44	0.40	18.70	47.20	6.20	46.34	0.20	0.06	[51]
Palm kernel shell	10.00	23.00	74.00	3.00	17.58	45.10	5.10	49.20	0.56	0.04	[52]
Rich husk	8.00	9.27	73.18	9.55	17.46	43.40	4.33	42.07	0.65	0.00	[53]
Marula seeds	17.10	15.80	79.10	5.10	20.40	47.38	6.33	44.46	1.46	0.37	[54]
Blue gum wood	56.70	13.50	80.65	5.85	19.74	50.13	5.96	43.16	0.53	0.22	[54]

ตารางที่ 3 (ต่อ) ตัวอย่างสมบัติทางเคมีของชีวมวลบางชนิด

Biomass	Proximate analysis (wt.%)				HHV (MJ/kg)	Ultimate analysis (wt.%)					Ref.
	M	FC	VM	Ash		C	H	O	N	S	
Olive tree pruning	9.07	15.23	81.95	2.82	18.01	44.49	6.27	47.97	0.63	0.64	[30]
Pine	7.63	11.88	87.87	0.25	19.40	47.90	6.53	44.89	0.16	0.51	[30]
Chestnut	7.85	17.70	82.17	0.13	17.69	46.35	5.86	50.41	0.88	0.98	[30]
Mesquit	15.50	16.70	66.10	1.67	16.70	43.60	4.98	33.60	0.62	0.03	[32]
Juniper	5.85	14.30	78.00	1.91	19.00	49.30	5.68	37.00	0.28	0.01	[32]
Cedarwood	-	12.79	85.49	1.72	18.13	45.14	6.34	46.25	0.26	0.29	[55]
Wheat	5.10	30.60	69.40	10.90	17.80	44.90	5.90	37.60	0.69	0.15	[56]
Barley	5.80	28.80	71.20	8.10	17.70	44.50	5.80	40.40	1.09	0.17	[56]
Pine shell	13.90	24.50	74.00	1.50	18.80	47.80	5.60	46.30	0.30	-	[57]
Bamboo	-	19.94	73.56	3.51	18.70	43.84	6.05	46.53	0.07	-	[58]
Rubber wood sawdust	2.52	24.44	70.78	2.26	-	43.27	6.83	-	0.39	-	[59]
Rubber wood sawdust	6.20	23.38	69.68	0.74	-	43.98	8.04	47.53	-	0.45	[60]
Rubber wood chips	8.5	14.75	83.09	0.84	17.06	46.39	5.75	47.71	0.16	0.00	[61]
Rubber wood chips	39.43	9.22	49.64	1.71	-	48.78	6.38	41.68	0.17	0.16	[62]

3.3.2 ขนาดของชีวมวล (Biomass size)

ขนาดของชีวมวลมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ ชีวมวลที่มีขนาดใหญ่อาจมีอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงหรือช้ากว่าชีวมวลขนาดเล็กส่งผลให้อัตราการระเหยของความชื้นหรือสารระเหยในชีวมวลยากขึ้น จากสาเหตุข้างต้นอาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่มีขนาดใหญ่ทุกชิ้นไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ยังมีขนาดเล็กที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า การระเหยความชื้นและสารระเหยทำได้ง่ายกว่าชีวมวลที่มีขนาดใหญ่แต่จะมีการสูญเสียมวลมากกว่าชีวมวลขนาดใหญ่ [22], [63]

3.3.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟกชันมีผลต่อผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิดำเนินการที่ต่างกันทำให้อัตราการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ต่างกันด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการที่สูงกว่ามีโอกาสจะได้ผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นของแข็งลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและก๊าซเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงกว่า

ยังทำให้ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีสมบัติที่ง่ายต่อการบด มีการดูดความชื้นกลับต่ำกว่าชีวมวลทอร์รีไฟต์ที่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการทอร์รีแฟกชันต่ำกว่า การทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงใกล้เคียงถ่านหินมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับหลาย ๆ งานวิจัย [52], [64-66] ไม่เพียงเท่านั้น อุณหภูมิสูงยังส่งผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้น สารระเหย และการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัว ซึ่งปริมาณความชื้นที่ลดลงจะช่วยลดการเกิดเชื้อราและการสลายตัวทางชีวภาพในขณะจัดเก็บ [67] ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวและสารระเหยมีผลอย่างมากต่อลักษณะการเผาไหม้และพฤติกรรมของเชื้อเพลิงแข็ง เช่นอุณหภูมิที่เผาไหม้ อุณหภูมิในการจุดไฟ อัตราการเผาไหม้และเวลาความคงตัวของเปลวไฟ [68]

3.3.4 ระยะเวลา (Time)

ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟกชันมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ ระยะเวลาที่นานขึ้นส่งผลให้การสูญเสียมวลมากขึ้นทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ได้น้อยลง ปริมาณของก๊าซที่ควบแน่นได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการทอรีแฟกชันที่อุณหภูมิสูง [52], [64-66]

3.3.5 ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศ (Oxygen or air content)

ปริมาณออกซิเจนในกระบวนการทอรีแฟกชันมีผลต่อสมบัติของชีวมวลทอรีไฟด์ [69-70] โดยทั่วไปในกระบวนการทอรีแฟกชันจะใช้ก๊าซที่อยู่ในกลุ่มก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เป็นตัวพาผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นก๊าซออกจากเตาปฏิกรณ์ หรืออาจจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [32] ซึ่งคุณภาพและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแตกต่างกัน เช่นการศึกษาของ Zhang et al., [71] ได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนในกระบวนการทอรีแฟกชันของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ Walnut shell, Xanthoeras sorbifolia shell and Sapindus mukorossi shell ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลาดำเนินการ 10, 20 และ 30 นาที โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นออกซิเจนจาก 0 เป็นร้อยละ 5, 15 และ 21 เพื่อดูผลของปริมาณผลิตภัณฑ์ค่าความร้อนสูงและพลังงานที่ได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานและผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยลง แต่ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่สม่ำเสมอเนื่องจากบางเงื่อนไขที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลามากขึ้นรวมถึงความเข้มข้นของออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นอาจเกิด Preoxidation ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในบางงานวิจัยศึกษาการนำออกซิเจนหรืออากาศมาใช้ทดแทนก๊าซเฉื่อยเพื่อลดต้นทุนดำเนินการ เช่น Ke-Miao Lu et al., [72] ศึกษาการทอรีแฟกชัน โดยใช้ชีวมวลจากเส้นใยปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบโดยการใช้อากาศกับการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวพา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้อากาศในกระบวนการทอรีแฟกชัน ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงลดลง ในขณะที่ปริมาณเถ้า

กลับเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยลดลง และปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่เงื่อนไขดำเนินการเดียวกัน การลดลงของผลิตภัณฑ์และปริมาณสารระเหย รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าแสดงให้เห็นว่าชีวมวลและสารระเหยบางส่วนเกิด Preoxidation ในระหว่างทอรีแฟกชันแล้ว

จากที่กล่าวไปแล้วข้างต้นมีบางงานวิจัยทดสอบโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซตัวพาในกระบวนการทอรีแฟกชัน เช่นการศึกษาของ Eshtine et al., [32] ใช้ชีวมวลสองชนิด ได้แก่ Juniper และ Mesquite ทดสอบที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ภายใต้เงื่อนไขดำเนินการอื่น ๆ เดียวกัน ผลการทดสอบพบว่าการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการสูญเสียมวลของผลิตภัณฑ์หลักที่ได้น้อยกว่าประมาณร้อยละ 2 ถึง 4 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซไนโตรเจน ในขณะที่มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกัน และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาพบพบว่าชีวมวลทอรีไฟด์ที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะบดได้เล็กกว่า แต่การใช้ก๊าซไนโตรเจนทำให้ชีวมวลทอรีไฟด์มีความสามารถในการดูดความชื้นกลับได้ต่ำกว่าการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งชีวมวลทั้งสองชนิดที่ทำการทดสอบมีผลการทดสอบที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน เพียงแต่อาจจะมีค่าต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบของชีวมวลทั้งสองชนิดที่ต่างกัน เชื้อเพลิงบางประเภทหรือแม้แต่เชื้อเพลิงจากชีวมวลเมื่อมีการเผาไหม้จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ หากสามารถนำมานำมาใช้ในกระบวนการทอรีแฟกชันก็เป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ

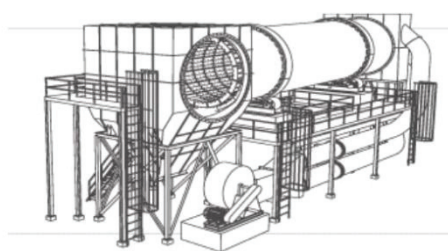
3.3.6 ชนิดของเตาปฏิกรณ์ (Reactor types)

เตาปฏิกรณ์แต่ละชนิดส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้เช่นกัน เนื่องจากรูปแบบการให้ความร้อนหรือการป้อนวัตถุดิบแตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติของชีวมวลที่ได้แตกต่างกันด้วย โดยเตาปฏิกรณ์จะแบ่งตามลักษณะการให้ความร้อนได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การให้ความร้อนโดยตรง (Direct) และการให้ความร้อนโดยอ้อม (Indirect) แต่บางชนิดก็สามารถให้ความร้อนทั้งโดยตรงและโดยอ้อม

โดยชีวมวลส่วนใหญ่จะต้องผ่านการลดขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับเตาปฏิกรณ์ชนิดนั้น ๆ มีเตาปฏิกรณ์บางชนิดเท่านั้นที่สามารถใช้ชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ สำหรับอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ในกระบวนการทอรีแฟกชันจะมีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่ออนาที ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเตาปฏิกรณ์ ชนิดและขนาดของชีวมวล และระยะเวลาในกระบวนการทอรีแฟกชัน โดยอัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกันจะมีผลในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการทอรีแฟกชัน ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิคงที่ หากอัตราการให้ความร้อนที่สูงจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนมาก ซึ่งเตาปฏิกรณ์แต่ละชนิดมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันด้วย [22], [38], [44], [73-74]

รายละเอียดของเตาปฏิกรณ์แต่ละชนิด รวมทั้งข้อดีและข้อจำกัด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เตาปฏิกรณ์แบบถังหมุน (Rotary drum reactor) เป็นเตาปฏิกรณ์ที่มีความต่อเนื่องและเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับ สามารถให้ความร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม ควบคุมการทำงานโดยการควบคุมอุณหภูมิ ความยาวและมุมเอียงของถัง การหมุนของถังทำให้เกิดการผสมของชีวมวลและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ทั่วถึง ถึงมีขนาดจำกัด หากต้องการขนาดใหญ่ขึ้นจะต้องใช้เป็นแบบแยกส่วน รูปของเตาปฏิกรณ์แบบถังหมุนแสดงตามรูปที่ 5

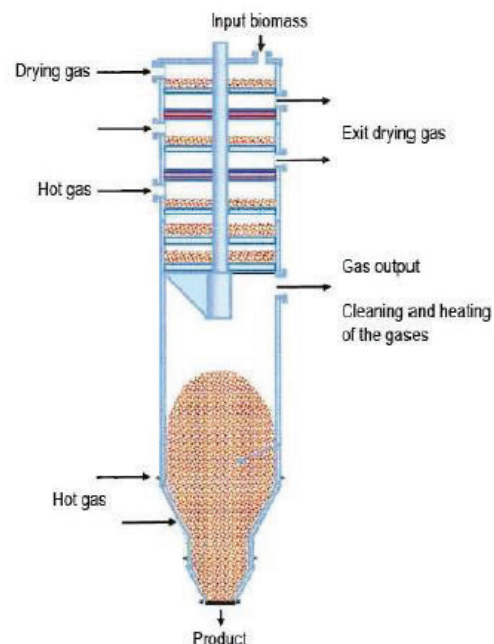


รูปที่ 5 เตาปฏิกรณ์แบบถังหมุน (Rotary drum reactor) [44]

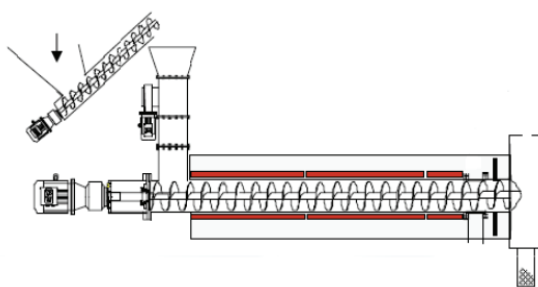
2. เตาปฏิกรณ์แบบ Compact moving bed เป็นเตาปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบปิด ชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบนและเคลื่อนตัวลงเรื่อย ๆ ในระหว่างกระบวนการ

ทอรีแฟกชันความร้อนจากก๊าซร้อนซึ่งเข้ามาจากด้านล่างและไหลไปสู่ด้านบน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกลดอุณหภูมิที่ด้านล่างของเตาปฏิกรณ์ สารระเหยจะออกทางด้านบนของเตาปฏิกรณ์ [44] ภาพเตาปฏิกรณ์แบบ Compact moving bed ดังแสดงตามรูปที่ 6

3. เตาปฏิกรณ์แบบสกรู (Screw reactor) เตาปฏิกรณ์แบบสกรูเป็นเตาปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยสกรูหนึ่งตัวหรือหลายตัวที่จะลำเลียงชีวมวลไปยังเตาปฏิกรณ์ เทคโนโลยีเตาปฏิกรณ์แบบสกรูเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับ และสามารถวางได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน เตาปฏิกรณ์แบบนี้มักจะให้ความร้อนโดยทางอ้อม โดยใช้สกรูแบบกลวง แต่มีรูปแบบของแนวคิดเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ความร้อนโดยตรงโดยใช้ระบบสกรูคู่ ข้อเสียของเตาปฏิกรณ์แบบสกรูที่ให้ความร้อนทางอ้อม คือเกิดเป็นถ่านในบริเวณที่ร้อน นอกจากนี้การเพิ่มความร้อนในเตาปฏิกรณ์แบบสกรูมีข้อจำกัดเนื่องจากเตาปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวสกรูต่อปริมาตรของเตาปฏิกรณ์ลดลง เตาปฏิกรณ์แบบสกรูแสดงตามรูปที่ 7

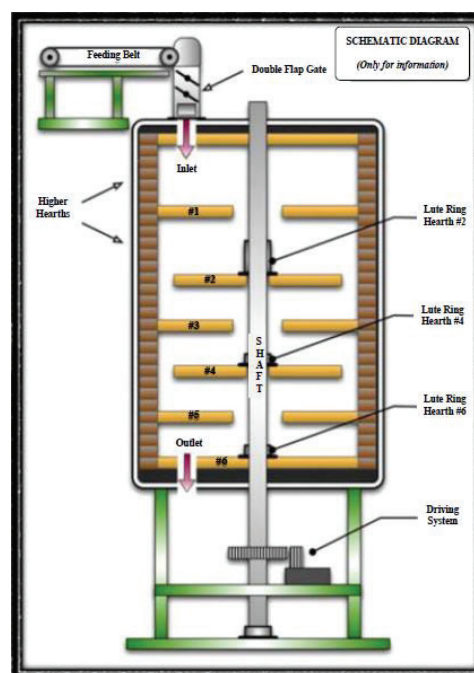


รูปที่ 6 เตาปฏิกรณ์แบบ Compact moving bed [75]



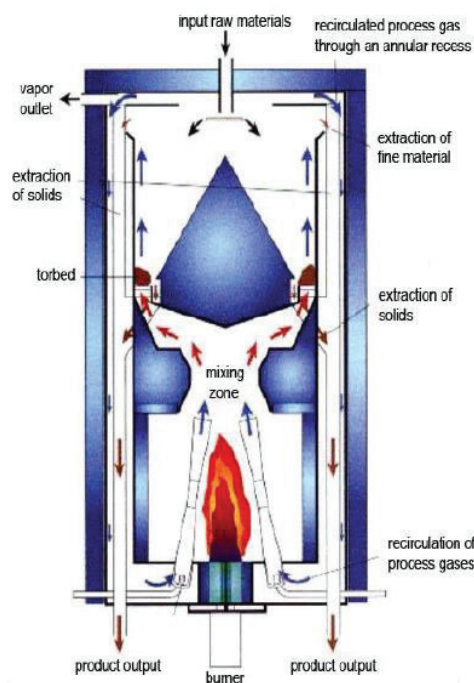
รูปที่ 7 เตาปฏิกรณ์แบบสกรู (Screw reactor) [44]

4. เตาปฏิกรณ์แบบ Multiple heart furnace: (MHF) เป็นเตาปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องหลายชั้น โดยในแต่ละชั้นจะมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามลำดับขั้นตอนในการทอรีแฟกชัน โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นทีละชั้นตั้งแต่ 220-300 องศาเซลเซียส ชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่เตาทางด้านบนของเตาปฏิกรณ์ บนแผ่นแนวนอนและถูกดันเข้าด้านใน จากนั้นจะตกลงมายังชั้นที่สอง กระบวนการนี้จะทำซ้ำหลาย ๆ ชั้นทำให้เกิดการผสมสม่ำเสมอและค่อย ๆ ให้ความร้อน โดยความร้อนถูกนำมาใช้ในแต่ละชั้นของเตาปฏิกรณ์โดยตรง โดยใช้หัวเผาก๊าซภายในและการฉีดไอน้ำ เตาปฏิกรณ์ MHF สามารถปรับขนาดได้ถึง 7 ถึง 8 เมตร ซึ่งการลงทุนค่อนข้างต่ำสำหรับเครื่องขนาดใหญ่ เตาปฏิกรณ์อาจใช้ก๊าซธรรมชาติหรือชีวมวลไม้เป็นเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้ก๊าซธรรมชาติทำให้ความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อาจจะไม่ใช่ผลเสีย เนื่องจากความชื้นช่วยให้การอัดขึ้นรูปง่ายขึ้น ผู้ผลิตบางรายเพิ่มความชื้นในวัสดุผสมก่อนที่จะอัดเม็ด อย่างไรก็ตาม การใช้ก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเกิดก๊าซเรือนกระจก เทคโนโลยีนี้ใช้ได้ตั้งแต่ชีวมวลขนาดเล็กไปจนถึงไม้ขนาดใหญ่ เตาปฏิกรณ์แบบ MHF ดังแสดงตามรูปที่ 8



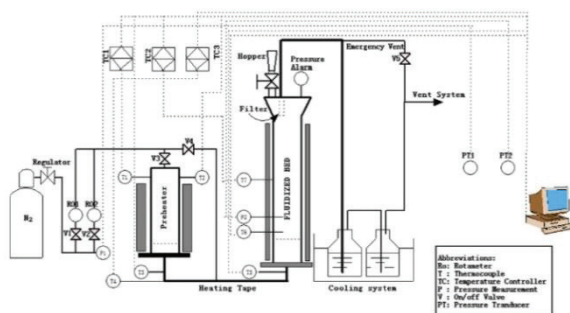
รูปที่ 8 เตาปฏิกรณ์แบบ Multiple heart furnace [44]

5. เตาปฏิกรณ์แบบ Torbed เทคโนโลยีเตาปฏิกรณ์แบบ Torbed เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการใช้งานต่าง ๆ รวมถึงการเผาไหม้ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ถึง 7 เมตร และมีการทำงานอย่างต่อเนื่อง ในการทำงานของเตาปฏิกรณ์ความร้อนจะถูกป้อนจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนด้วยความเร็ว 50-80 เมตรต่อวินาที ชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์มีการเคลื่อนที่แบบแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งทำให้ชีวมวลได้รับความร้อนได้อย่างรวดเร็ว รูปเตาปฏิกรณ์แบบ Torbed ดังแสดงตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 เตาปฏิกรณ์แบบ Torbed [44]

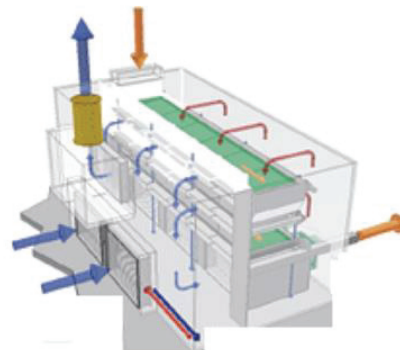
6. เตาปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไซ์เบด (Fluidized bed reactor) ชีวมวลถูกวางลงบนตะแกรง โดยก๊าซเชื้อเพลิงจะถูกเป่าจากด้านล่างของตะแกรงด้วยความเร็วที่เหมาะสม การลอยตัวของชีวมวลทำให้การกระจายของอุณหภูมิสม่ำเสมอ ดังตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 เตาปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไซ์เบด (Fluidized bed reactor) [47]

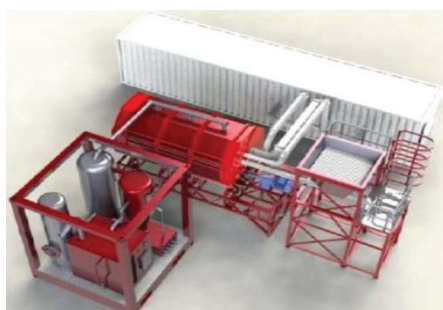
7. เตาปฏิกรณ์แบบ Belt dryer เตาปฏิกรณ์แบบสายพานเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับ ในขณะที่ชีวมวลไหลมาตามสายพานที่มีรูพรุนและให้ความร้อนโดยตรง โดยใช้ก๊าซร้อนในเตาปฏิกรณ์แบบ Belt dryer

เตาปฏิกรณ์แบบนี้มักจะมีสายพานหลายตัวอยู่ด้านบน ในขณะที่ชีวมวลตกลงมาจากสายพานเกิดการผสมของชีวมวลส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าของชีวมวล การควบคุมความเร็วของสายพานทำให้สามารถควบคุมเวลาของการป้อนชีวมวลที่จะเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ได้อย่างแม่นยำ ข้อเสียคือรูสายพานอาจจะเกิดการอุดตันจากฝุ่นละอองและน้ำมันดิน ทำให้เกิดการทอรั้นแฟลชขึ้นไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ปริมาณการผลิตที่จำกัดทำให้เครื่องปฏิกรณ์ไม่เหมาะสมสำหรับวัสดุชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำ การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถควบคุมได้เฉพาะเมื่ออุณหภูมิของก๊าซเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แล้ว เตาปฏิกรณ์แบบ Belt dryer ดังแสดงตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 เตาปฏิกรณ์แบบ Belt dryer [44]

8. เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ (Microwave reactor) เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ ให้ความร้อนโดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งความร้อน ทำให้ชีวมวลได้รับความร้อนภายในอย่างสม่ำเสมอและรวดเร็ว ชีวมวลต้องมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 สมบัติของชีวมวลที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการทอรั้นแฟลชขึ้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟ และขนาดของเตาไมโครเวฟ พลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้นสามารถทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นก็จะใช้เวลาในกระบวนการทอรั้นแฟลชขึ้นน้อยลง ช่วยให้ประหยัดเวลา [44] ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์แบบไมโครเวฟแสดงตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 เตาปฏิกรณ์ไมโครเวฟ
(Microwave reactor) [38]

ซึ่งเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟลชันแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันดังแสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อจำกัดของเตาปฏิกรณ์แต่ละชนิดที่ใช้ในกระบวนการทอรีแฟลชัน

ชนิดของเตาปฏิกรณ์	ข้อดี	ข้อจำกัด
Rotary drum reactor	1. สามารถปรับเปลี่ยนการควบคุมได้ และสามารถให้ความร้อนได้โดยตรงและทางอ้อม 2. มีการถ่ายเทความร้อนแบบสม่ำเสมอ 3. สามารถใช้กับชีวมวลหลายขนาด รวมทั้งของเสียต่างๆ 4. เทคโนโลยีเป็นที่ยอมรับ	1. การถ่ายเทความร้อนต่ำ โดยเฉพาะการให้ความร้อนโดยทางอ้อม 2. ควบคุมอุณหภูมิยาก 3. ปริมาณฝุ่นเพิ่มขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างชีวมวลกับผนังเตาปฏิกรณ์ 4. การขยายขนาดได้จำกัด 5. ค่าใช้จ่ายสูงและมีขนาดใหญ่
Compact moving bed reactor	1. เป็นเตาปฏิกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ 2. การถ่ายเทความร้อนสูง 3. เตาปฏิกรณ์สามารถรองรับชีวมวลได้ปริมาณมากหรือชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ 4. เตาปฏิกรณ์ไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว 5. ใช้กับชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำได้ โดยไม่มีผลเสียมากนัก	1. ปริมาณฝุ่นอาจทำให้แรงดันลดลงส่งผลให้เตาปฏิกรณ์หยุดการทำงานโดยอัตโนมัติ 2. จำกัดขนาดและชนิดของชีวมวลที่อาจทำให้แรงดันของเตาปฏิกรณ์ลดลง 3. การกระจายของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไม่ทั่วถึงสม่ำเสมอโดยเฉพาะจากการให้ความร้อนโดยทางอ้อมควบคุมอุณหภูมิได้ยาก 4. ช่องว่างระหว่างชีวมวลที่ไม่สม่ำเสมออาจทำให้เกิดชีวมวลทอรีไฟด์ที่ไม่สม่ำเสมอ 5. ศักยภาพสำหรับระบบขนาดใหญ่ยังไม่แน่นอน
Screw reactor	1. เตาปฏิกรณ์มีราคาค่อนข้างถูก 2. การเคลื่อนที่ของชีวมวลสะดวกกว่า 3. สามารถรองรับชีวมวลได้หลายขนาด 4. เทคโนโลยีเป็นที่ยอมรับ	1. การทอรีไฟด์จะไม่ทั่วถึงสม่ำเสมอทั้งชีวมวลบางส่วนที่สัมผัสกับผิวสกรูได้รับความร้อนสูงกว่าจนเป็นจุดไหม้ 2. อัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ การแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ดีเนื่องจากการผสมหรือคลุกเคล้ากันของชีวมวลมีน้อยในขณะทอรีแฟลชัน 3. ศักยภาพในการขยายขนาดมีข้อจำกัดเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของสกรูต่อชีวมวลลดลงหากสกรูมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4 (ต่อ) ข้อดีและข้อจำกัดของเตาปฏิกรณ์แต่ละชนิดที่ใช้ในกระบวนการทอรีรีแฟกซ์

ชนิดของเตาปฏิกรณ์	ข้อดี	ข้อจำกัด
Multiple heart furnace	1. สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี 2. สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดี 3. ใช้กับชีวมวลได้หลายขนาด	1. เตาปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่ 2. ต้องใช้ก๊าซเป็นแหล่งพลังงานในการให้ความร้อนกับเตาปฏิกรณ์ทำให้ระบบไม่ยั่งยืน 3. ก๊าซไอเสียที่ได้มีความชื้นทำให้ประสิทธิภาพในการนำก๊าซไอเสียกลับมาใช้ลดลง
Torbed reactor	1. ใช้ระยะเวลาสั้น (สั้นกว่า 100 วินาที) ทำงานได้มาก ถ่ายเทความร้อนได้ดี 2. มีตั้งแต่ขนาดเล็กในห้องแลปจนถึงขนาดใหญ่ที่ 25 ตันต่อชั่วโมง 3. ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ทำให้บำรุงรักษาน้อย	1. ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงสูง 2. เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียของสารระเหยมากขึ้น 3. มีความเสี่ยงจะเกิดน้ำมันดินเนื่องจากการระเหยของสารระเหย
Fluidized bed reactor	1. สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี 2. สามารถปรับขนาดเตาปฏิกรณ์ได้	1. ต้องเลือกขนาดของชีวมวล 2. การตอบสนองต่ออุณหภูมิช้า 3. เกิดการสูญเสียชีวมวลเนื่องจากการเสียดสี
Belt dryer reactor	1. ควบคุมอุณหภูมิได้ดี 2. สามารถใช้กับชีวมวลได้หลายขนาด 3. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนค่อนข้างต่ำ 4. ควบคุมระยะเวลาได้ง่ายโดยการควบคุมความเร็วของสายพาน 5. เทคโนโลยีเป็นที่ยอมรับ	1. รูสายพานอาจจะเกิดการอุดตันจากฝุ่นละอองและน้ำมันดินทำให้เกิดการทอรีรีแฟกซ์ไม่สม่ำเสมอ 2. มีข้อจำกัดในการเพิ่มประสิทธิภาพ เนื่องจากขึ้นอยู่กับพื้นที่ของสายพานในขณะที่ระบบอื่นขึ้นอยู่กับปริมาตร 3. ระบบมีชิ้นส่วนเครื่องจักรมากเกินไปทำให้เพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา
Microwave reactor	1. ใช้การแผ่รังสีความร้อนแทนการนำและการพาความร้อน 2. ความร้อนสูงทำให้รวดเร็วในการทอรีรีแฟกซ์ 3. การถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับขนาดของชีวมวลและสามารถใช้กับชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ 4. สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดี	1. เป็นเทคโนโลยีที่ยังไม่ได้รับการยอมรับผลของการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วยังไม่มีการศึกษา 2. ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงาน 3. ความร้อนภายในชีวมวลไม่สม่ำเสมอ 4. ต้องใช้ร่วมกับเครื่องให้ความร้อนแบบอื่น ๆ เพื่อให้ได้ความร้อนที่สม่ำเสมอ

ที่มา : [22], [76]

3.4 สมบัติของชีวมวลทอรรีไฟด์ (Torrefied biomass)

หลังผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์ขั้นสมบัติของชีวมวลเปลี่ยนแปลงไป เช่น ปริมาณความชื้น (Moisture: M) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon: FC) ปริมาณสารระเหย (Volatile matter: VM) ปริมาณเถ้า (Ash content: Ash) ปริมาณคาร์บอน (Carbon: C) ปริมาณไฮโดรเจน (Hydrogen: H) ปริมาณออกซิเจน (Oxygen: O) ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen: N) ปริมาณซัลเฟอร์ (Sulphur: S) ซึ่งสามารถทำการทดสอบและวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์หาองค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis) การสลายตัวด้วยความร้อน Thermogravimetric analysis (TGA) ค่าความร้อนสูง (Higher heating value: HHV) ปริมาณของผลิตภัณฑ์

ที่ ได้ (Solid product yield) พลังงานที่ได้ (Energy yield) ความสามารถในการดูดความชื้น (Hydrophobicity) ความเปราะ (Grindability) ความหนาแน่นและปริมาตร (Density and volume of Particle) สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Color of the torrefied product) ซึ่งค่าต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขดำเนินการในกระบวนการทอรรีไฟด์ เช่น ชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ เวลา และชนิดของเตาปฏิกรณ์ [63], [77-80] ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์จะมีการดูดความชื้นกลับต่ำ [81-82] ในขณะที่มีความเปราะง่ายต่อการบดและใช้พลังงานน้อยลง [66], [82-83] สีจะเข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอรรีไฟด์

สมบัติต่าง ๆ ของชีวมวลเมื่อผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์จะเปลี่ยนไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยดังกล่าวข้างต้นซึ่งแสดงตัวอย่างตามตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5 ตัวอย่างผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และ ลิกนิน

Torrefaction temperature (°C)	Weight losses in polymer component (wt. %)			Ref.
	Hemicellulose	Cellulose	Lignin	
230	2.74	1.05	1.45	[22]
260	37.98	4.43	3.12	
290	58.33	44.82	6.97	

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในกระบวนการทอรรีไฟด์ที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลเพิ่มขึ้น ทำให้มีการสูญเสียมวลมากขึ้น โดยที่เฮมิเซลลูโลสมีการสลายตัวเพิ่มมากถึงประมาณร้อยละ 58 ที่อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส และประมาณร้อยละ 43 สำหรับเซลลูโลส ซึ่ง

ต่างจากลิกนินที่มีการสลายตัวเพิ่มขึ้นเพียงประมาณร้อยละ 7 เท่านั้น นี่ก็เป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่จะบอกได้ว่าหากชีวมวลมีปริมาณลิกนินสูงกว่าเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสแล้ว ย่อมมีโอกาที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมากกว่าชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินน้อย

ตารางที่ 6 ตัวอย่างสมบัติของชีวมวลจากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อนสูงของชีวมวล (High heating value: HHV) ก่อนและหลังกระบวนการทอรรีไฟด์

Biomass	Torrefaction temperature (°C)	Residence time (min)	HHV (MJ/kg)	Proximate analysis (wt.% as received basis)								HHV (MJ/kg)	Ref.
				Before torrefaction				After torrefaction					
				M	FC	VM	Ash	M	FC	VM	Ash		
Bagasse	250	60	18.31	7.03	13.61	75.03	4.33	2.45	25.27	65.18	7.10	20.92	[53]
	300							1.96	41.33	45.00	11.71	23.35	

ตารางที่ 6 (ต่อ) ตัวอย่างสมบัติของชีวมวลจากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อนสูงของชีวมวล (High heating value: HHV) ก่อนและหลังกระบวนการทอรีรีแฟคชัน

Biomass	Torrefaction temperature (°C)	Residence time (min)	HHV (MJ/kg)	Proximate analysis (wt.% as received basis)								HHV (MJ/kg)	Ref.
				Before torrefaction				After torrefaction					
				M	FC	VM	Ash	M	FC	VM	Ash		
Bamboo	250	60	18.95	5.76	14.40	78.76	1.08	3.32	25.05	70.20	1.43	21.02	[53]
	300							2.97	47.03	48.05	1.95	27.26	
Logging residue chips	225	30	18.79	7.94	14.79	75.65	1.63	3.11	17.34	78.24	1.33	19.79	[83]
	250							2.66	19.83	76.08	1.45	21.21	
	275							2.64	25.99	69.55	1.83	22.03	
	300							2.36	43.70	51.67	2.27	26.41	
Madagascar almond	250	60	17.32	10.17	20.37	78.35	0.92	2.55	35.78	63.12	1.10	23.55	[53]
	300							2.50	57.22	40.99	1.78	26.66	
Oil palm	250	60	17.12	7.20	19.03	67.25	6.52	3.69	32.58	53.76	9.97	20.61	[53]
	300							3.21	43.67	39.60	13.52	23.54	
Pine chips	225	30	18.46	6.69	12.84	80.23	0.25	3.30	14.46	81.98	0.26	19.48	[83]
	250							2.88	16.74	80.14	0.24	20.08	
	275							2.46	22.69	74.52	0.34	21.82	
	300							2.57	39.80	57.21	0.42	25.38	
Rice husk	250	60	17.46	8.00	10.08	79.54	10.38	2.67	22.88	63.58	13.54	17.68	[53]
	300							2.39	42.18	34.15	23.68	21.48	

ตารางที่ 7 ตัวอย่างสมบัติของชีวมวลแบบและเียด (Ultimate analysis) ก่อนและหลังกระบวนการทอรีรีแฟคชัน

Biomass	Torrefaction temperature (°C)	Residence time (min)	Ultimate analysis (wt.% dry basis)										Ref.
			Before torrefaction					After torrefaction					
			C	H	O	N	S	C	H	O	N	S	
Bagasse	250	60	46.38	4.68	44.11	0.50	0.00	53.04	4.97	34.34	0.55	0.00	[53]
	300							65.59	4.31	18.11	0.28	0.00	
Bamboo	250	60	48.64	5.64	44.09	0.52	0.03	56.58	4.51	29.38	1.54	0.16	[53]
	300							69.56	3.82	18.06	1.70	0.00	
Logging residue chips	225	30	47.29	6.20	45.19	0.42	-	50.15	6.10	42.74	0.30	-	[83]
	250							54.91	5.87	40.96	0.31	-	
	275							53.25	5.39	40.12	0.30	-	
	300							66.07	4.92	27.34	0.48	-	
Madagascar almond	250	60	47.68	4.31	46.68	0.50	0.00	61.29	5.10	32.04	0.50	0.16	[53]
	300							71.71	4.18	22.16	0.21	0.00	
Oil palm	250	60	44.81	4.10	42.23	2.10	0.24	54.41	4.54	29.38	1.54	0.00	[53]
	300							62.90	3.82	18.06	1.70	0.00	
Pine chips	225	30	47.21	6.64	45.76	0.17	-	49.47	6.07	44.03	0.15	-	[83]
	250							51.46	5.86	42.02	0.14	-	
	275							54.91	6.20	38.17	0.20	-	
	300							63.67	5.58	29.99	0.20	-	
Rice husk	250	60	43.40	4.33	42.07	0.65	0.00	48.05	4.63	33.44	0.00	0.06	[53]
	300							55.47	3.29	17.63	0.00	0.09	

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและค่าความร้อนสูงของชีวมวลก่อนและหลังผ่านกระบวนการทอรีรีแฟคชัน เช่น ที่เวลาคงที่แต่อุณหภูมิที่

ใช้ในกระบวนการทอรีรีแฟคชันเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นลดลง ค่าคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณสารระเหย

ลดลง จากการที่ความชื้นลดลง ปริมาณคาร์บอนคงตัว เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความร้อนของชีวมวลที่ผ่าน กระบวนการทอรรีแฟกซ์สูงตามไปด้วย

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบ ละเอียดของชีวมวลก่อนและหลังกระบวนการ ทอรรีแฟกซ์ เช่น ที่เวลาคงที่แต่อุณหภูมิที่ใช้ใน กระบวนการทอรรีแฟกซ์เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แสดง ให้เห็นว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณ ไฮโดรเจน ออกซิเจน มีปริมาณลดลง เมื่อพิจารณา อัตราส่วนระหว่าง ไฮโดรเจนและออกซิเจนต่อปริมาณ คาร์บอนพบว่ามีความต่ำลง ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีในการเป็น เชื้อเพลิงมากขึ้น ใกล้เคียงกับถ่านหิน

ในหลาย ๆ งานวิจัยได้มีการศึกษาผลของการ ทอรรีแฟกซ์ชีวมวลเพื่อปรับปรุงคุณภาพและ สมบัติต่าง ๆ สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น เช่น Asadullah et al., [52] ศึกษาการทอรรีไฟด์กลา ปาล์ม ที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก หลังจากตากแดดสองวัน ความชื้นของตัวอย่างลดลงเหลือ ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนเตาปฏิกรณ์ ทรงกระบอกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากก๊าซแอลพีจี ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองครั้งละ 100 กรัม โดยศึกษาผล ของอุณหภูมิ ระยะเวลาและอัตราการไหลของไนโตรเจน ต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งมีเงื่อนไขดำเนินการที่ อุณหภูมิในช่วง 200-350 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10-60 นาที และอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.1-1 ลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทอรรีไฟด์ที่ อุณหภูมิ 200, 250, 275, 300, 325, 350 องศาเซลเซียส ในขณะที่ระยะเวลาและอัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ ที่ 15 นาที และ 0.2 ลิตรต่อนาทีนั้น พลังงานที่ได้ลดลง สอดคล้องกับปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นของแข็งที่ได้ ลดลงประมาณ ร้อยละ 11.9-55.5 ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็น ของเหลวและก๊าซเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11.3-36.9 และ 0.6-18.6 ตามลำดับ นอกจากนี้การทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ สูงยังส่งผลให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อให้ อุณหภูมิคงที่ 300 องศาเซลเซียส แต่ปรับเปลี่ยนระยะเวลา

เป็น 10, 15, 20, 30, 50, 40 และ 60 นาที ในขณะที่ อัตราการไหลของไนโตรเจนคงที่ 0.2 ลิตรต่อนาที ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลงอยู่ในช่วง 22.7-56.5 ขณะที่ของเหลวและก๊าซเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 14.8-34.8 และ 7.9 ถึง 21.5 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณา ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 300 องศา เซลเซียส ระยะเวลาดำเนินการ 20 นาที ปรากฏว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ Rokin et al., [17] ศึกษาเรื่องการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการใช้ชีวมวลทอรรีไฟด์ร่วมกับถ่านหิน โดยศึกษาผล ของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน- คลอไรด์ (HCl) โดยใช้ซังข้าวโพดและแกลบหรือ ซังข้าวโพดและแกลบที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์ แล้ว นำมาเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินในอัตราส่วน 1:1 โดย น้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลวิน เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า ขนาดเล็ก ซึ่งถ่านหินมีขนาด 75-90 ไมโครเมตร ในขณะที่ ชีวมวลมีขนาดประมาณ 90-150 ไมโครเมตร ซึ่งผล การศึกษาพบว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ ชีวมวลทอรรีไฟด์เผาไหม้ร่วมกับถ่านหินเพิ่มขึ้นกว่าการ ใช้ชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบเผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ซึ่งเกิดจาก องค์ประกอบคาร์บอนที่เปลี่ยนไปของชีวมวลทอรรีไฟด์ เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลที่เป็นวัตถุดิบ ปริมาณซัลเฟอร์- ไดออกไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 35 และร้อยละ 26 เมื่อ ใช้ซังข้าวโพดเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินบิโธมินัสและซังบิโธ- มินัส และลดลงร้อยละ 46 และ ร้อยละ 33 เมื่อใช้ซัง ข้าวโพดทอรรีไฟด์เผาไหม้ร่วมกับถ่านหินบิโธมินัส และ ซังบิโธมินัส ในขณะที่เดียวกันการใช้แกลบเผาไหม้ร่วมกับ ถ่านหิน สามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ ประมาณร้อยละ 19-37 และแกลบทอรรีไฟด์เผาไหม้ ร่วมกับถ่านหินลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ประมาณ ร้อยละ 36-50 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหินเพียง อย่างเดียว ปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ลดลงประมาณ ร้อยละ 6 และร้อยละ 5 เมื่อใช้ซังข้าวโพดเผาไหม้ร่วมกับ

ถ่านหินบิทูมินัสและซับบิทูมินัส และลดลงร้อยละ 17 และร้อยละ 15 เมื่อใช้ซังข้าวโพดทอรรีไฟด์เผาไหม้ ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและซับบิทูมินัส ในขณะที่เดียวกัน การใช้แกลบเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและซับบิทูมินัส สามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ประมาณร้อยละ 10 และร้อยละ 9 และแกลบทอรรีไฟด์เผาไหม้ ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและซับบิทูมินัส ลดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ประมาณร้อยละ 19 และร้อยละ 27 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหินบิทูมินัสและซับบิทูมินัส เพียงอย่างเดียว ปริมาณไฮโดรเจนคลอไรด์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 39 และร้อยละ 22 เมื่อใช้ซังข้าวโพดเผาไหม้ ร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและซับบิทูมินัส ในขณะที่เมื่อใช้ซังข้าวโพดทอรรีไฟด์เผาไหม้ร่วมกับถ่านหิน ปริมาณไฮโดรเจนคลอไรด์ จะเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 5 และร้อยละ 9 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ถ่านหินเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีอีกหลาย ๆ งานวิจัยที่ได้ศึกษาและรายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการทอรรีแฟกซ์ชีวมวลและผลดำเนินการต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

3.5 ข้อดีและข้อเสียของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์

ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์จะมีสมบัติที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับชีวมวลวัตถุดิบ ข้อดีคือทำให้สมบัติของชีวมวลมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงมากขึ้น เช่น ค่าความร้อนสูงขึ้น ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น ความชื้นลดลง องค์ประกอบของไฮโดรเจนและออกซิเจนต่อคาร์บอนลดลง ง่ายต่อการบด ใช้พลังงานในการบด น้อยลง แต่อาจจะมีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่ง สำหรับการทอรรีแฟกซ์ [17], [19], [84-90] ซึ่งตัวอย่างข้อดีของชีวมวลทอรรีไฟด์เมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลดังแสดงตามตารางที่ 8

3.6 การใช้ประโยชน์ชีวมวลทอรรีไฟด์

การใช้ประโยชน์จากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์หรือชีวมวลทอรรีไฟด์สามารถใช้ได้หลายอย่าง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสามส่วน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นของแข็งหรือถ่าน ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้

คือของเหลวและก๊าซ มีรายละเอียดเกี่ยวกับการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนี้

3.6.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่าน ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยปกติให้เป็นผงและใช้ร่วมกับถ่านหินในโรงไฟฟ้า หรือใช้กับเตาเผาชีวมวลอัดเม็ดขนาดเล็ก หรือใช้กับเตาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ (1) กลุ่มของการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งใช้ร่วมกับถ่านหิน ซึ่งข้อดีอย่างหนึ่งของการใช้ชีวมวลทอรรีไฟด์เมื่อเทียบกับถ่านหินคือ สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [91-92] (2) การผลิตความร้อนในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่นเตาเผาอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก หรือการใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการบำบัดน้ำ กระบวนการกรองก๊าซและอากาศ หรือโรงงานบำบัดทางเคมี และ (3) การใช้ผลิตความร้อนสำหรับที่อยู่อาศัย [44], [64] การใช้ชีวมวลทอรรีไฟด์เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ ทำให้น้ำมันมีคุณภาพสูงขึ้น เนื่องจากชีวมวลทอรรีไฟด์มีค่าความชื้นต่ำและอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ สามารถนำมาผลิตน้ำมันไบโอออยล์ (Bio-oil) ที่มีคุณภาพดีด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว [64] หรือใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันสำหรับระบบความร้อนร่วม ประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าการใช้ชีวมวลที่ไม่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จากของเหลวและก๊าซ เนื่องจากมีปริมาตรต่ำ รูพรุนสูง พื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า และการใช้ชีวมวลทอรรีไฟด์ร่วมกับถ่านหิน จะทำให้การเผาไหม้ดี เปลวไฟที่ได้สม่ำเสมอกว่าการใช้ร่วมกับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์

ตารางที่ 8 ตัวอย่างการเปรียบเทียบสมบัติของชีวมวลกับชีวมวลทอรัรีไฟด์

อ้างอิง	ชีวมวล	ชีวมวลทอรัรีไฟด์	อ้างอิง
[66], [80]	มีความชื้นสูง	ความชื้นลดลง	[25], [29]
[40], [66], [77]	ความหนาแน่นต่ำ	การดูดความชื้นกลับต่ำ	[25], [29], [86]
[48]	ค่าความร้อนต่ำ	ค่าความร้อนสูงขึ้น	[25], [29], [86], [93]
[66], [77], [84]	ความหนาแน่นพลังงานต่ำ	ความหนาแน่นพลังงานเพิ่มขึ้น	[25], [29], [93]
[66], [80]	ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำ	เพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาหม้อไอน้ำเมื่อใช้ร่วมกับถ่านหิน	[14]
[31]	เกิดวันขณะเผาไหม้	ไม่เกิดวันขณะเผาไหม้	
[48], [66]	จัดเก็บและขนส่งลำบาก	ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและจัดเก็บ	[29]
[29], [31], [40]	ขณะจัดเก็บจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นและมีการย่อยสลายทางชีวภาพ	ขณะจัดเก็บไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ	[29]
[25]	เหนียวและบดยาก	เปราะและง่ายในการบด	[83]
		ใช้พลังงานในการบดน้อยลง	[16], [22], [72], [86]
		คุณภาพก่อนข้างคองที่	[25]
		องค์ประกอบของออกซิเจนและไนโตรเจน ลดลง	[31]
		ปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น	[93]
		O/C และ H/C ลดลง	[25], [29], [66]
		มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินเกรดต่ำ	[17], [66]
		ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก	[17], [29], [94]

3.6.2 ผลึกภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำ สารประกอบอินทรีย์เช่น กรดอะซิติก เมทานอล อะซิโตน เป็นต้น ผลึกภัณฑ์ในกลุ่มนี้จะมีองค์ประกอบคล้ายน้ำส้มควันไม้ แต่การเก็บน้ำส้มควันไม้จะเก็บที่ช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิทอรัรีแฟลชจึงจะสามารถใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้น ยังไม่พบรายงานการนำของเหลวจากกระบวนการทอรัรีแฟลชไปใช้ประโยชน์ [26], [95]

3.6.3 ผลึกภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ผลึกภัณฑ์ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซมีเทนอีกบางส่วน ในกระบวนการทอรัรีแฟลชโดยทั่วไปแล้วจะนำกลุ่มก๊าซผลึกภัณฑ์ที่ได้ไปลดความชื้นและใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการอบแห้งหรือลดความชื้นชีวมวลก่อนจะเข้าสู่กระบวนการทอรัรีแฟลช [44]

3.7 ชีวมวลทอรัรีไฟด์อัดเม็ดและมาตรฐานชีวมวลทอรัรีไฟด์อัดเม็ด

การปรับปรุงคุณภาพชีวมวลโดยผ่านกระบวนการทอรัรีแฟลชเป็นอีกหนึ่งการเปลี่ยนรูปชีวมวลที่ทำให้สมบัติของชีวมวลสูงขึ้น แต่ก็ยังมีสมบัติบางประการที่ยังเป็นข้อด้อยเช่น ความหนาแน่นต่ำ ไม่สะดวกในการจัดเก็บและการขนส่ง จึงได้รวมเทคนิคและวิธีการเพื่อลดข้อด้อยของชีวมวลทอรัรีไฟด์ในส่วนนี้โดยการนำชีวมวลทอรัรีไฟด์ไปผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปทางกลโดยการอัดเม็ด [96] ด้วยข้อดีของชีวมวลอัดเม็ดคือมีความหนาแน่นสูงกว่าชีวมวลทั่วไป ทำให้สะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง อีกทั้งยังจัดเก็บได้ง่ายและใช้พื้นที่น้อยกว่ามีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอและมีน้ำหนักค่อนข้างคงที่ ทำให้ควบคุมอัตราการเผาไหม้และการป้อนเชื้อเพลิงได้

สะดวก [97] ทำให้เกิดการเผาไหม้ก่อนข้างสมบูรณ์ เนื่องจากมีขนาดเล็ก ทำให้ผสมกับอากาศในขณะเผาไหม้ได้ดี นอกจากนี้ยังใช้งานได้หลากหลายวัตถุประสงค์ เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม การใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงไฟฟ้า และการใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาในที่อยู่อาศัย การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้เกิดก๊าซส่วนเกินน้อย ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดก๊าซส่วนเกิน และช่วยลดค่าบำรุงรักษาระบบเผาไหม้ ชีวมวลอัดเม็ดมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง (High heating value) เมื่อเทียบกับชีวมวลโดยทั่วไป ซึ่งโดยทั่วไปชีวมวลอัดเม็ดที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์มีค่าความร้อนต่ำ (Net calorific value) มากกว่า 16.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) เนื่องจากมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 และถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีค่าพลังงานสูงเมื่อเทียบกับพลังงานของน้ำมันเตาชนิดเบา (Light fuel oil) ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดน้ำหนัก 1 กิโลกรัม จะเทียบเท่ากับน้ำมันเตาชนิดเบา 0.5 ลิตร การใช้ชีวมวล

อัดเม็ดช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (โดยทางอ้อม) ซึ่งเป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) ที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน (Global warming) เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลอัดเม็ดจะถูกดูดซับโดยชีวมวลที่เจริญเติบโตขึ้นมาใหม่ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์แสง หรืออาจจะเรียกได้ว่าการใช้ชีวมวลทำให้เกิด Carbon neutral นอกจากนี้ การอัดชีวมวลเป็นเม็ดทำให้สะดวกต่อการใช้ร่วมกับระบบเดิมเชื้อเพลิงโดยอัตโนมัติ ซึ่งช่วยลดการใช้แรงงานคน ต้นทุนการดำเนินการ และควบคุมอัตราการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น การนำชีวมวลทอรรีไฟด์อัดเม็ดทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นชีวมวลทอรรีไฟด์อัดเม็ดที่มีสมบัติด้านเชื้อเพลิงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลสับหรือชีวมวลอัดเม็ด เช่น ง่ายต่อการบด จัดเก็บและดูแลรักษา [98] และยังมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหิน ดังแสดงตัวอย่างสมบัติต่าง ๆ เปรียบเทียบกันตามตารางที่ 9 [99]

ตารางที่ 9 ตัวอย่างสมบัติ (Property) และคุณลักษณะ (Characteristic) ของชีวมวล ชีวมวลอัดเม็ด ชีวมวลทอรรีไฟด์อัดเม็ด และถ่านหิน

Property/Characteristic	wood	Wood pellet	Torrefied pellet	Coal
Moisture content (wt.%)	30-40	7-10	1-5	10-15
Calorific value (MJ/kg)	9-12	15-16	20-24	23-28
Volatiles (% db)	70-75	70-75	55-65	15-30
Fixed carbon (% db)	20-25	20-25	28-35	50-55
Bulk density (kg/m ³)	200-250	550-750	750-850	800-850
Volumetric energy density (GJ/m ³)	2.0-3.0	7.5-10.4	15.0-18.7	18.4-23.8
Dust explosibility	Average	Limited	Limited	Limited
Hydroscopic properties	Hydrophilic	Hydrophilic	Hydrophilic	Hydrophilic
Biological degradation	Yes	Yes	No	No
Handling properties	Special	Easy	Easy	Easy
Transport cost	High	Average	Low	Low

ที่มา: [99]

มาตรฐานชีวมวลทอรรีไฟด์อัดเม็ด

มาตรฐานชีวมวลทอรรีไฟด์อัดเม็ดอ้างอิงตามมาตรฐานของ the International Organization for Standardization (ISO) ซึ่งแบ่งมาตรฐานของเชื้อเพลิง

ชีวมวลแบ่งออกเป็น 8 กลุ่ม [100] ได้แก่ ISO 17225-1

- ถึง ISO 17225-8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
- ISO 17225-1 ข้อกำหนดทั่วไป
 - ISO 17225-2 ไม้อัดเม็ด

- ISO 17225-3 ไม้อัดแท่ง
 - ISO 17225-4 ไม้สับ
 - ISO 17225-5 ฟืน
 - ISO 17225-6 ชีวมวลอัดเม็ดที่ไม่ใช่ไม้
 - ISO 17225-7 ชีวมวลอัดแท่งที่ไม่ใช่ไม้
 - ISO 17225-8 ชีวมวลที่ผ่านการให้ความร้อนแล้ว
 โดยชีวมวลทอรรีไฟต์อัดเม็ดจัดอยู่ในกลุ่มที่ 8 ซึ่งชีวมวล
 จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่เป็นไม้
 (Woody biomass) และ ประเภทที่ไม่ใช่ไม้ (Non-

woody biomass) รายละเอียดเชิงลึก สามารถศึกษา
 เพิ่มเติมได้จากมาตรฐานดังกล่าว

3.8 การผลิตชีวมวลทอรรีไฟต์ในเชิงพาณิชย์

ในปัจจุบันชีวมวลทอรรีไฟต์มีทั้งที่กำลังอยู่ใน
 ขั้นตอนทดลองขนาดเล็กระดับห้องปฏิบัติการ (Lab scale)
 การทดสอบต้นแบบ (Pilot scale) และการผลิตชีวมวล
 ทอรรีไฟต์หรือชีวมวลทอรรีไฟต์อัดเม็ดในเชิงพาณิชย์
 (Commercial scale) ตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ดังแสดง
 ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ตัวอย่างการผลิตชีวมวลทอรรีไฟต์ในเชิงพาณิชย์

Name of reactor	Heating mode	Technology	Capacity (tones/hr)	Country
1. Torr-coal	Indirect	Rotary drum	4.5	Netherlands
2. BTG		Screw conveyor	5	
3. Foxcoal			4.2	
4. Stramproy	Direct	Belt conveyor	5.5	
5. Torbed		Toroidal	8.0	
6. ECN		Moving bed	5	
7. Stramproy		Oscillating belt conveyor	5	
8. BO2		Moving bed	5	
9. Torre-tech	Indirect	Screw conveyor	5	USA
10. RFT			5	
11. Wyssmont	Direct	Multiple heart	2	
12. Konza		Rotary drum	10	
13. Eco-PYRO		Oscillating belt conveyor	2	
14. Airless	Direct	Belt	5	UK
15. Rotawave		Microwave	12	
16. BioEndev	Indirect	Rotary drum	4.3	Spain
17. Thermya	Direct	Moving bed	2.5	France
18. CarbonFX technology	Direct	Cylonic bed reactor	0.25	Canada

ที่มา : [22]

4. สรุป

ทอรรีไฟต์เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ
 ชีวมวลแข็งโดยใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 200-300
 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนหรือจำกัด
 ออกซิเจน เพื่อกำจัดความชื้นและสารระเหยเบา (Light
 volatile) ส่งผลให้ชีวมวลทอรรีไฟต์ (Torrefied
 biomass) มีค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงาน
 เพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติด้านอื่น ๆ เช่น ลดการ

ดูดซับความชื้น ลดการย่อยสลายทางชีวภาพหรือ
 เสื่อมสภาพในระหว่างการเก็บรักษา การผลิตชีวมวล
 ทอรรีไฟต์ให้มีคุณภาพดีจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิด
 และสมบัติชีวมวล (Type and property of biomass)
 เงื่อนไขการดำเนินการที่ใช้ (Operating parameters)
 และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ (Types of reactor)
 นอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวยังส่งผลต่อต้นทุนการผลิต การใช้
 พลังงานของระบบ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับ

การใช้ประโยชน์ชีวมวลทอรรีไฟด์นั้นมีหลากหลาย เช่น การบดให้ละเอียดเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินในระบบเผาไหม้แบบ Pulverized combustion ซึ่งเหมาะสำหรับการผลิตและใช้งานในบริเวณเดียวกัน แต่หากผลิตเพื่อส่งออกหรือนำไปใช้ในพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่ห่างไกล จำเป็นต้องเพิ่มความหนาแน่นด้วยการทำเป็นชีวมวลทอรรีไฟด์อัดเม็ด (Torrefied biomass pellet) เพื่อ

ความสะดวกในการจัดเก็บและขนส่ง ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีทอรรีแฟคชันเพื่อปรับปรุงชีวมวลให้มีคุณภาพตามที่ต้องการ รวมทั้งมีความเป็นไปได้ทั้งทางเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจและพิจารณาให้ครบทุกประเด็น เพื่อก่อให้เกิดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวภาพอย่างมั่นคงและยั่งยืนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] BP Statistical Review of World Energy. 2018; 67th edition.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-ธันวาคม 2560. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th>
- [3] เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวด และสันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. น้ำกับภาวะโลกร้อน. *วารสารราชบัณฑิตยสถาน*, 2555; 37: 69-79.
- [4] International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights. 2017.
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. พลังงานทดแทน. 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.thailandenergyeducation.com/assets/media/A004.pdf>
- [6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579, 255; 1-9.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย. 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.biomass.dede.go.th/biomass_web/index
- [8] Rubber Authority of Thailand. Rubber wood data base. 2561. [online] available: <http://www.raot.co.th>
- [9] Office of Industrial Economics. Industrial Cooperation Development with Neighbouring Countries Project. Industrial Cooperation Development Strategy under the Indonesia-Malaysia-Thailand Growth Triangle: IMT-GT, 2013; 143p.
- [10] Sharma, S., Meena, R., Sharma, A. and Goyal, P. Biomass Conversion Technologies for Renewable Energy and Fuels: A Review Note. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2014; 11: 28-35.
- [11] A Sustainable and reliable energy source. *A review of status and prospects*. IEA BIOENERGY: ExCo: 2009. Patricia Thornley Paul Adams
- [12] Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A. and Watson, I. Chapter 8 - Biomass Conversion Technologies. *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*, 2018; 107-139.
- [13] United Nations Environmental Programme (UNEP). Technologies for Converting Waste Agricultural Biomass to Energy. 2013; 229p.
- [14] Isemin, R., Mikhalev, A., Klimov, D., Grammelis, P., Margaritis, N., Kourkoumpas, D.S. and Zaichenko, V. Torrefaction and Combustion of Pellets Made of A Mixture of Coal Sludge And Straw. *Fuel*, 2017; 210: 859-865.
- [15] Wang, L., Barta-Rajnai, E., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Czégény, Z., Jakab, E., Barta, Z. and Grønli, M. Impact of Torrefaction on Woody Biomass Properties. *Energy Procedia*, 2017; 105: 1149-1154.
- [16] Repellin, V., Govin, A., Rolland, M. and Guyonnet, R. Energy Requirement for Fine Grinding of Torrefied wood. *Biomass and Bioenergy*, 2010; 34(7): 923-930.

- [17] Rokni, E., Ren, X., Panahi, A. and Levendis, Y. A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of Coals with Raw and Torrefied Biomass Fuels. *Fuel*, 2018; 211: 363–374.
- [18] โครงการจัดทำฐานข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคเกษตร. บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2555.
- [19] นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558.
- [20] Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design, 2010.
- [21] Bach, Q.V. and Skreiberg, Ø. Upgrading Biomass Fuels via Wet Torrefaction: a Review and Comparison with Dry Torrefaction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016; 54: 665–677.
- [22] Nhuchhen, D.R., Basu, P., and Acharya, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 2014; 2014(2014) 1–56.
- [23] Anwar, Z., Gulfranz, M. and Irshad, M. Agro-industrial Lignocellulosic Biomass a Key to Unlock the Future Bio-Energy: a Brief Review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2014; 7(2), 163–173.
- [24] Sukiran, M.A., Abnisa, F., Wan Daud, W.M.A., Abu Bakar, N. and Loh, S.K. A Review of Torrefaction of Oil Palm Solid Wastes for Biofuel Production. *Energy Conversion and Management*, 2017; 149: 101–120.
- [25] Tumuluru, J.S., Wright, C.T., Boardman, R.D., Hess, R.J. and Sokhansanj, S. Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development. American Society of Agricultural and Biological Engineers, August 7–10, Louisville, Kentucky, 2011.
- [26] 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(5): 384–401.
- [27] Prins, M.J., Ptasiński, K.J. and Janssen, F.J.J.G. Torrefaction of Wood: Part 2. Analysis of Products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006; 77(1): 35–40.
- [28] 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-C--05-013, 2005.
- [29] Wilk, M., Magdziarz, A. and Kalembe, I. Characterisation of Renewable Fuels' Torrefaction Process with Different Instrumental Techniques. *Energy*, 2015; 87: 259–269.
- [30] Álvarez, A., Nogueiro, D., Pizarro, C., Matos, M. and Bueno, J.L. Non-oxidative Torrefaction of Biomass to Enhance Its Fuel Properties. *Energy*, 2018; 158: 1–8.
- [31] Pimchua, A., Dutta, A. and Basu, P. Torrefaction of Agriculture Residue to Enhance Combustible Properties. *Energy and Fuels*, 2010; 24(9): 4638–4645.
- [32] 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.
- [33] Mi, B., Liu, Z., Hu, W., Wei, P., Jiang, Z. and Fei, B. Investigating Pyrolysis and Combustion Characteristics of Torrefied Bamboo, Torrefied Wood and Their Blends. *Bioresource Technology*, 2016; 209: 50–55.
- [34] ทศพร อ่อนศรี และนคร ทิพยาวงศ์. ภาพรวมของการเพิ่มคุณภาพเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยกระบวนการอบแห้ง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2018; 25(1): 11–33.
- [35] Couhert, C., Salvador, S., and Commandré, J.M. Impact of Torrefaction on Syngas Production From Wood. *Fuel*, 2009; 88(11): 2286–2290.
- [36] Schorr, C., Muinonen, M. and Nurminen, F. Torrefaction of Biomass. Mikkeli: Miktech Ltd/Centre of Expertise-programme, 2012; 55.
- [37] Bergman, P. C. Technical Report, Combined Torrefaction and Pelletisation: The TOP Process. Energy research Centre of the Netherlands ECN, Petten (Netherlands), 2005; 29.
- [38] Eseyin, E.A., Philip, S.H. and Jr. Charles, C. U. Current Trends in the Production and Applications of Torrefied Wood/Biomass-A Review. *BioResources*, 2015; 10(4): 8812–8858, 2015.

- [39] Wang, X., Wu, J., Chen, Y., Pattiya, A., Yang, H. and Chen, H. Comparative Study of Wet and Dry Torrefaction of Corn Stalk and the Effect on Biomass Pyrolysis Polygeneration. *Bioresource Technology*, 2018; 258: 88–97.
- [40] Tu, R., Jiang, E., Yan, S., Xu, X. and Rao, S. The Pelletization and Combustion Properties of Torrefied Camellia Shell via Dry and Hydrothermal Torrefaction: A Comparative Evaluation. *Bioresource Technology*, 2018; 264: 78–89.
- [41] Bach, Q.V., Chen, W.H., Lin, S.C., Sheen, H.K. and Chang, J.S. Wet Torrefaction of Microalga *Chlorella Vulgaris* ESP-31 with Microwave-Assisted Heating. *Sustainable Biofuels*, 2017; 141: 163–170.
- [42] He, C., Tang, C., Li, C., Yuan, J., Tran, K.Q., Bach, Q.V. and Yang, Y. Wet Torrefaction of Biomass for High Quality Solid Fuel Production: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018; 91: 259–271.
- [43] Acharya, B., Dutta, A. and Minaret, J. Review on Comparative Study of Dry and Wet Torrefaction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2015; 12: 26–37.
- [44] Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S., and Madrali, S. Status Overview of Torrefaction Technologies. IEA Bioenergy Task 32 Final Report, 2012.
- [45] Bach, Q.V., Tran, K.Q. and Skreiberg, Ø. Comparative Study on the Thermal Degradation of Dry- and Wet-Torrefiedwoods. *Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future*, 2017; 185: 1051–1058.
- [46] Lamaming, J., Sharudin, N.H., Hashim, R. and Sulaiman Characterization of Cellulose Microfibers Isolated from Rubberwood (*Hevea brasiliensis*). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2016; 6(2): 170-174.
- [47] Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C.J. and Sokhansanj, S. Torrefaction of Sawdust in a Fluidized Bed Reactor. *Bioresource Technology*, 2012; 103(1): 453–458.
- [48] Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S. and Mekhilef, S. A Review on Biomass as a Fuel For Boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011; 15(5): 2262–2289.
- [49] พงษ์ศักดิ์ เสงนิรันดร์ และไตรรัตน์ เนียมสุวรรณ. เม็ดเชื้อเพลิงไม้ทอรรีไฟด์เทคโนโลยีและโอกาสทางการตลาด. *วารสารการจัดการป่าไม้*, 2554; 5(10): 67-75.
- [50] Toptas, A., Yildirim, Y., Duman, G. and Yanik, J. Combustion Behavior of Different Kinds of Torrefied Biomass and Their Blends with Lignite. *Bioresource Technology*, 2015; 177: 328–336.
- [51] Arteaga-Pérez, L.E., Grandón, H., Flores, M., Segura, C. and Kelley, S.S. Steam Torrefaction of Eucalyptus Globulus for Producing Black Pellets: A Pilot-Scale Experience. *Bioresource Technology*, 2017; 238: 194–204.
- [52] Asadullah, M., Adi, A.M., Suhada, N., Malek, N.H., Saringat, M.I. and Azdarpour, A. Optimization of Palm Kernel Shell Torrefaction to Produce Energy Densified Bio-Coal. *Energy Conversion and Management*, 2014; 88: 1086–1093.
- [53] 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.
- [54] Mamvura, T.A., Pahla, G. and Muzenda, E. Torrefaction of Waste Biomass for Application in Energy Production in South Africa. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2018; 25: 1–12.
- [55] Mei, Y., Liu, R., Yang, Q., Yang, H., Shao, J., Draper, C. and Chen, H. Torrefaction of Cedarwood in a Pilot Scale Rotary Kiln and the Influence of Industrial Flue Gas. *Bioresource Technology*, 2015; 177: 355–360.
- [56] Satpathy, S.K., Tabil, L.G., Meda, V., Naik, S.N. and Prasad, R. Torrefaction of Wheat and Barley Straw after Microwave Heating. *Fuel*, 2014; 124: 269–278.
- [57] Karlström, O., Costa, M., Brink, A. and Hupa, M. CO₂ Gasification Rates of Char Particles from Torrefied Pine Shell, Olive Stones and Straw. *Fuel*, 2015; 158: 753–763.
- [58] Chew, J.J. and Doshi, V. Recent Advances in Biomass Pretreatment – Torrefaction Fundamentals and Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011; 15(8): 4212–4222.

- [59] Shaaban, A., Se, S.M., Dimin, M.F., Juoi, J.M., MohdHusin, M.H. and Mitan, N.M.M. Influence of Heating Temperature and Holding Time on Biochars Derived from Rubber Wood Sawdust via Slow Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014; 107, 31–39.
- [60] Srinivasakannan, C. and Zailani Abu Bakar, M. Production of Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust. *Biomass and Bioenergy*, 2004; 27(1): 89–96.
- [61] Kaewluan, S., and Pipatmanomai, S Preliminary Study of Rubber Wood Chips Gasification in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor: Effect of Air to Fuel Ratio. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, Phuket, Thailand, 2007.
- [62] Chaivatamaset, P. The Defluidization During Rubber Wood Combustion in Fluidized Bed. *International Energy Journal*, 2016; 15(3): 135–142.
- [63] 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; 44: 847–866.
- [64] Li, M.F., Li, X., Bian, J., Chen, C.Z., Yu, Y.T. and Sun, R.C. Effect of Temperature and Holding Time on Bamboo Torrefaction. *Biomass and Bioenergy*, 2015; 83: 366–372.
- [65] Zheng, A., Zhao, Z., Chang, S., Huang, Z., Wang, X., He, F. and Li, H. Effect of Torrefaction on Structure and Fast Pyrolysis Behavior of Corncobs. *Bioresource Technology*, 2013; 128: 370–377.
- [66] Granados, D.A., Ruiz, R.A., Vega, L.Y. and Chejne, F. Study of Reactivity Reduction in Sugarcane Bagasse as Consequence of A Torrefaction Process. *Energy*, 2017; 139: 818–827.
- [67] Arias, B., Pevida, C., Fermoso, 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(2): 169–175.
- [68] Barskov, S., Zappi, M., Buchireddy, P., Dufreche, S., Guillory, J., Gang, D. and Sharp, R. Torrefaction of Biomass: A Review of Production Methods for Biocoal from Cultured and Waste Lignocellulosic Feedstocks. *Renewable Energy*, 2019; 142: 624–642.
- [69] Chen, W.H., Lu, K.M., Liu, S.H., Tsai, C.M., Lee, W.J. and Lin, T.C. Biomass Torrefaction Characteristics in Inert and Oxidative Atmospheres at Various Superficial Velocities. *Bioresource Technology*, 2013; 146: 152–160.
- [70] Ramos-Carmona, S., Martínez, J.D. and Pérez, J.F. Torrefaction of Patula Pine Under Air Conditions: a Chemical and Structural Characterization. *Industrial Crops and Products*, 2018; 118: 302–310.
- [71] Zhang, C., Ho, S.H., Chen, W.H., Fu, Y., Chang, J.S. and Bi, X. Oxidative Torrefaction of Biomass Nutshells: Evaluations of Energy Efficiency as Well as Biochar Transportation and Storage. *Applied Energy*, 2019; 235: 428–441.
- [72] 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.
- [73] Batidzirai, B., Mignot, A.P.R., Schakel, W.B., Junginger, H.M. and Faaij, A.P.C. Biomass Torrefaction Technology: Techno-Economic Status and Future Prospects. *Energy*, 2013; 62: 196–214.
- [74] Sun, Y. J., Jiang, J. C., Zhao, S. H., Hu, Y. M., and Zheng, Z. F. Review of Torrefaction Reactor Technology. *Advanced materials research*, 2012; 347: 1149-1155
- [75] Crnogaca, B. Torrefaction as a Process for Biomass Conversion into Biocoal. *Tehnika*, 2017; 72: 323–327.
- [76] Batidzirai, B., Mignot, A.P.R., Schakel, W.B., Junginger, H.M. and Faaij, A.P.C. Biomass Torrefaction Technology: Techno-Economic Status and Future Prospects, *Energy*, 2013; 62: 196–214.
- [77] 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: 70–77.
- [78] Jaafar, A.A. and Ahmad, M.M. Torrefaction of Malaysian Palm Kernel Shell into Value-Added Solid Fuels. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2011; 5(12): 1106-109.

- [79] Bilgic, E., Yaman, S., Haykiri-Acma, H. and Kucukbayrak, S. Limits of Variations on the Structure and the Fuel Characteristics of Sunflower Seed Shell Through Torrefaction. *Fuel Processing Technology*, 2016; 144: 197–202.
- [80] 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(6): 844–856.
- [81] Bilgic, E., Yaman, S., Haykiri-Acma, H. and Kucukbayrak, S. Is Torrefaction of Polysaccharides-Rich Biomass Equivalent to Carbonization of Lignin-Rich Biomass. *Bioresource Technology*, 2016; 200: 201–207.
- [82] Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Barsberg, S., Thomsen, T. and Henriksen, U. B. Changes of Chemical and Mechanical Behavior of Torrefied Wheat Straw. *Biomass and Bioenergy*, 2012; 40: 63–70.
- [83] Phanphanich, M. and Mani, S. Impact of Torrefaction on the Grindability and Fuel Characteristics of Forest Biomass. *Bioresource Technology*, 2011; 102(2): 1246–1253.
- [84] Medic, D., Darr, M., Shah, A., Potter, B. and Zimmerman, J. Effects of Torrefaction Process Parameters on Biomass Feedstock Upgrading. *Fuel*, 2012; 91(1): 147–154.
- [85] Cao, L., Yuan, X., Li, H., Li, C., Xiao, Z., Jiang, L., Huang, B., Xiao, Z., Chen, X., Wang, H. and Zeng, G. Complementary Effects of Torrefaction and Co-Pelletization: Energy Consumption and Characteristics of Pellets. *Bioresource Technology*, 2015; 185: 254–262.
- [86] Shang, L., Nielsen, N.P.K., Dahl, J., Stelte, W., Ahrenfeldt, J., Holm, J.K., Thomsen, P.T. and Henriksen, U.B. Quality Effects Caused by Torrefaction of Pellets Made from Scots Pine. *Fuel Processing Technology*, 2012; 101: 23–28.
- [87] Järvinen, T. and Agar, D. Experimentally Determined Storage and Handling Properties of Fuel Pellets Made from Torrefied Whole-Tree Pine Chips, Logging Residues and Beech Stem Wood. *Fuel*, 2014; 129: 330–339.
- [88] Thrän, D., Witt, J., Schaubach, K., Kiel, J., Carbo, M., Maier, J., Ndibe, C., Koppejan, J., Alakangas, E., Majer, S. and Schipfer, F. Moving Torrefaction Towards Market Introduction–Technical Improvements and Economic-Environmental Assessment Along the Overall Torrefaction Supply Chain Through the SECTOR Project. *Biomass and bioenergy*, 2016; 89: 184–200.
- [89] Dudyński, M., van Dyk, J.C., Kwiatkowski, K. and Sosnowska, M. Biomass Gasification: Influence of Torrefaction on Syngas Production and Tar Formation. *Fuel Processing Technology*, 2015; 131: 203–212.
- [90] Pushkin, S.A., Kozlova, L.V., Makarov, A.A., Grachev, A.N. and Gorshkova, T.A. Cell Wall Components in Torrefied Softwood and Hardwood Samples. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015; 116: 102–113.
- [91] Bergman, P.C., Boersma, A.R., Zwart, R.W.R. and Kiel, J.H.A. Torrefaction for Biomass Co-Firing on Existing Coal-Fired Power Stations. *Energy Centre of Netherlands*, 2005; ECN-C-05-013.
- [92] Vassilev, S.V., Vassileva, C.G. and Vassilev, V.S. Advantages and Disadvantages of Composition and Properties of Biomass in Comparison with Coal: An Overview. *Fuel*, 2015; 158: 330–350.
- [93] Ribeiro, J.M.C., Godina, R., de Oliveira Matias, J.C. and Nunes, L.J.R. Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-of-the-art and Research Development. *Sustainability*, 2018; 10(7): 1–17.
- [94] Proskurina, S., Heinimö, J., Schipfer, F. and Vakkilainen, E. Biomass for Industrial Applications: The Role of Torrefaction. *Renewable Energy*, 2017; 111: 265–274.
- [95] รู้ไว้ได้ประโยชน์กับน้ำส้มควันไม้. *วารสารทหารพัฒนา*, 2551; 2: 86–91.
- [96] Wattananoi, W., Khumsak, O. and Worasuwanarak, N. Upgrading of Biomass by Torrefaction and Densification Process. 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology, June 27–29, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011; 209–212.

- [97] Nunes, L.J.R., Matias, J.C.O. and Catalão, J.P.S. A Review on Torrefied Biomass Pellets as a Sustainable Alternative to Coal in Power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014; 40: 153–160.
- [98] Stelte, W. Guideline: Densification of Torrefied Biomass. Resultat Kontrakt (RK) Report. Danish Technological Institute, 2012.
- [99] Acharya, B., Sule, I. and Dutta, A. A Review on Advances of Torrefaction Technologies for Biomass Processing. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2012; 2(4): 349-369.
- [100] Eija, A. International Solid Biofuels Standards Published. *Solutions for Natural Resources and Environmental*, 2015.



การควบคุมการฟุ้งกระจายฝุ่นถ่านหิน บริเวณโม่บดด้วยม่านอากาศ Control of Coal Particle Dispersion over Crusher by Air Curtain

ชัยฤกษ์ จันทพิมพ์ และ อรรถกร อาสนคำ*

Chanyagrid Jantapimpa and Attakorn Asanakham*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200

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

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

*E-mail: attakorn.asana@cmu.ac.th, Tel: 0924590550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการควบคุมและลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินบริเวณอ่างที่เป็นตัวแทนอ่างโม่บดถ่านหินด้วยม่านอากาศ โดยติดตั้งหัวพ่นอากาศบริเวณปากของอ่างทดสอบขนาดกว้าง 0.6 เมตร ยาว 1.2 เมตร สูง 0.6 เมตร ซึ่งจะทดสอบเพื่อพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของฝุ่นถ่านหินและผลของการลดความดัน เนื่องจากความเร็วลมที่พ่นอากาศในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม ESI-CFD จากนั้นจะทดสอบกับโม่บดทดสอบเพื่อดูลักษณะการฟุ้งกระจายและปริมาณฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจาย

จากการทดสอบเทถ่านหินขนาดเล็กลงกว่า 0.045 mm ถึงขนาดใหญ่มากกว่า 50.8 mm ปริมาณ 8.5 kg ลงในโม่บดทดสอบที่ไม่มีระบบควบคุมการฟุ้งกระจายด้วยมุมการเท 30° จากแนวราบ ถ่านหินไหลลงด้วยความเร็ว 5 m/s พบว่ามีปริมาณฝุ่นถ่านหินชนิด PM10 เพิ่มขึ้นในอากาศบริเวณด้านข้างอย่างรวดเร็วในช่วง 9 วินาทีจาก 96.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ถึง 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และปริมาณฝุ่นถ่านหินที่บริเวณด้านหน้าของโม่บดทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 6 วินาทีจาก 233.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ถึง 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยความเร็วของลมที่พ่นอากาศที่เหมาะสมกับระบบทดสอบอยู่ที่ความเร็ว 35 m/s ซึ่งสามารถควบคุมฝุ่นถ่านหินให้ฟุ้งกระจายในทิศทางเดียวกับลมที่พ่นอากาศไปยังบริเวณด้านข้างของอ่าง โดยฝุ่นถ่านหินไม่สามารถฟุ้งกระจายไปยังบริเวณด้านหน้าของโม่บดทดสอบได้ ซึ่งลดลงมาเฉลี่ยจากอ่างที่ไม่มีการใช้ระบบม่านอากาศอยู่ที่ 166.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ และในการศึกษาผลของความเร็วของถ่านหินที่ตกลงไปในอ่างด้วยความเร็ว 2.5, 5 และ 7.5 m/s ด้วยโปรแกรม ESI-CFD จะเกิดความดันในการผลักให้อากาศเคลื่อนที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายเป็น เท่ากับ 12.3734, 28.4808 และ 56.2321 N/m² ตามลำดับ พบว่า จะต้องพ่นอากาศให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างภายในอ่างทดสอบและเหนืออ่างอากาศที่ประมาณ 6, 20 และ 41 N/m² ที่ความเร็วลมที่พ่นอากาศ เท่ากับ 20, 35 และ 40 m/s ตามลำดับ

คำสำคัญ: โม่บดถ่านหิน ม่านอากาศ การควบคุมการฟุ้งกระจาย พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

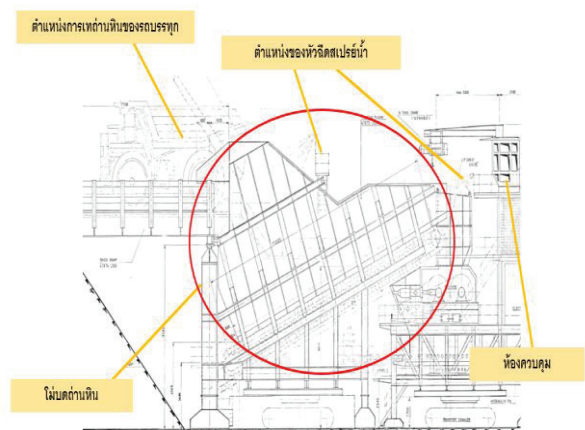
The aim of this study was to control and reduce coal particle dispersion in a coal crusher basin model by air curtain. A set of air nozzles was installed at the edge of the tested basin having dimensions of 0.6 m width x 1.2 m length x 0.6 m height. The flow pattern and pressure drop of the flow field of the air in the basin due to the air curtain were evaluated by ESI-CFD program. Experiments to observe the coal particle dispersion and coal particle concentration were carried out.

In the experiment, without the air curtain, 8.5 kg of coal having a size in a range of smaller than 0.045 mm to larger than 50.8 mm was dumped into the tested basin by a 30° inclined tray with a velocity of 5 m/s. It could be found that the amount of PM10 dispersed rapidly from 96.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to the measured full scale of 1,999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ around the basin side area and from 233.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to the measured full scale of 1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ around the basin front area in the retention times of 9 and 6 seconds, respectively. With air curtain, to control the dispersed particles, the air velocity at around 35 m/s could control the dispersed particle pattern to be in the same direction as that of the air curtain and less particle amount spread out to the front area. The average amount of the particles was at around 166.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The study with different velocities of the feeding coal particles at 2.5, 5 and 7.5 m/s on the air dynamic pressure that generated particle dispersions was also performed by ESI-CFD simulation. The dynamics pressures were found to be 12.3734, 28.4808 and 56.2321 N/m², respectively. Then the air curtain that generated the pressure drops between the air in the tested basin and the air over the curtain were 6, 20 and 41 N/m² at the air curtain velocities of 20, 35 and 40 m/s, respectively.

Keywords: Crusher, Air curtain, Control of coal particle dispersion, Computational fluid dynamics

1. บทนำ

โดยทั่วไปการทำเหมืองถ่านหินจะเกิดปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงานในเมือง ส่งผลเสียต่อสภาพอากาศ รวมถึงการก่อให้เกิดสภาพทัศนวิสัยไม่ดีที่ประชาชนมีต่อโรงไฟฟ้า โดยจุดที่พบปัญหามากเป็นพิเศษ คือบริเวณสถานีโม่บด (Crusher station) ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นจุดที่รับถ่านหินขนาดใหญ่ที่ถูกขุดและถูกขนย้ายด้วยรถบรรทุก แล้วตกลงสู่อ่างของโม่บดก่อนถูกบดให้ได้ถ่านหินที่มีขนาดเล็ก เพื่อป้อนสู่สายพานลำเลียงไปยังโรงไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 1 สถานีโม่บด (Crusher station)

โดยกระบวนการที่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นมากที่สุดคือ ช่วงที่มีการเทถ่านหินขนาดใหญ่จากกระบะรถบรรทุกลงสู่อ่างโม่บด ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดการกระแทกระหว่างถ่านหินที่ถูกเทลงไปกับก้นอ่างของโม่บด และจะเกิดการแทนที่ของอากาศในอ่างของโม่บด ทำให้อากาศเกิดการยกและลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะนำพาฝุ่นถ่านหินออกมาและเกิดการฟุ้งกระจายบริเวณโม่บดเป็นบริเวณกว้าง จากปัญหาดังกล่าวได้มีการนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาหลากหลายวิธีโดย Peoria [1] ได้ออกแบบอุปกรณ์ลดฝุ่นถ่านหินโดยใช้หลักการสร้างม่านละอองน้ำจากหัวฉีดที่ติดตั้งเป็นลักษณะวงแหวนล้อมรอบกลุ่มถ่านหินที่ตกลงมา จากผลการศึกษาพบว่า สามารถลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นบริเวณที่เทถ่านหิน แต่วิธีดังกล่าวส่งผลให้ถ่านหินมีความชื้นค่อนข้างสูง และงานวิจัยของ Ren Ting [2] ได้ศึกษาระบบการใช้โฟมในการควบคุมฝุ่นละอองในอากาศ (FTDC) ของเหมืองหินแกรนิต ซึ่งการใช้สเปรย์น้ำในการควบคุมฝุ่นละอองในเหมืองหินแกรนิตนั้นเกิดข้อบกพร่องมากมาย เช่น ใช้น้ำในปริมาณที่สูง และการอุดตันของหัวฉีด ซึ่งเทคโนโลยีในการดักจับฝุ่นละอองโดยใช้โฟมนี้มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างดี แต่ก็มีข้อเสียคือ สามารถดักจับ

ฝุ่นละอองได้ในระยะสั้นๆ และงานวิจัยของ Ji Yinlin [2] แก้ปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินขณะลำเลียงผ่านสายพานลำเลียงเพื่อเข้าสู่กระบวนการบด โดยการฉีดน้ำไปยังถ่านหินบนสายพานลำเลียง ในการศึกษาพบว่ากลุ่มตัวอย่างถ่านหินที่ผ่านกระบวนการควบคุมการฟุ้งกระจายของฝุ่นโดยการฉีดน้ำ เมื่อถูกนำไปบดจะเกิดฝุ่นถ่านหินน้อยลงประมาณ 60% และงานวิจัยของ Dariusz Prostarski [3] คิดตั้งระบบสเปรย์น้ำในเหมืองถ่านหินชุดแรกของชุดหัวฉีดถูกติดตั้งบริเวณจุดเคลื่อนย้ายถ่านหินของสายพานลำเลียงในเหมือง พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองลดลง 67-82% และหัวฉีดชุดที่สองถูกติดตั้งบริเวณทางเดินรถ พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่นละอองได้ 40-50% และงานวิจัยของ Gang Zhou [4] ได้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศร่วมกับการฉีดสเปรย์น้ำบริเวณที่มีการบดถ่านหิน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกออกแบบให้ทิศทางการดูดอากาศตรงข้ามกับทิศทางของการฉีดสเปรย์น้ำ ซึ่งพัดลมจะดูดละอองน้ำที่ปะปนกับฝุ่นถ่านหิน จากวิธีดังกล่าวสามารถลดความเข้มข้นของฝุ่นถ่านหินในบริเวณที่มีการบดถ่านหินได้ประมาณ 61.8-66.5%

ซึ่งทางโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่มักจะใช้เครื่องพ่นละอองน้ำขนาดใหญ่ [5] เพื่อลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินที่เกิดขึ้น แต่วิธีดังกล่าวยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอที่จะสามารถควบคุมการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินที่เกิดขึ้นบริเวณโม่บดได้ และยังส่งผลให้ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเกิดการเปียก นอกจากนั้นถ่านหินที่เปียกเหล่านี้ที่มีลักษณะคล้ายโคลนจะไหลไปเกาะบริเวณรอกของสายพานลำเลียง ส่งผลให้สายพานลำเลียงเกิดการติดขัดในระหว่างลำเลียงไปยังโรงไฟฟ้า อีกวิธีที่น่าสนใจในการควบคุมการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินคือการใช้ม่านอากาศ โดยในงานวิจัยของ Haiming Yu [6] ได้มีการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นด้วยม่านอากาศ โดยจำลองการแพร่ของอากาศและอนุภาคฝุ่นภายในอุโมงค์ขนส่งถ่านหินในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า ม่านอากาศสามารถช่วยป้องกันและลดปริมาณอนุภาคฝุ่นที่เคลื่อนที่ไปยังส่วนท้ายของอุโมงค์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

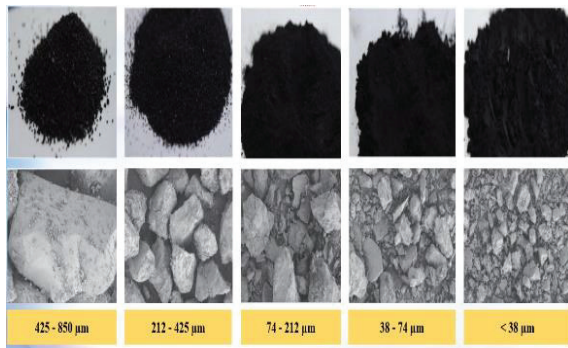
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ม่านอากาศในการลดการฟุ้งกระจายฝุ่นถ่านหินบริเวณโม่บด ซึ่งจะติดตั้งระบบม่านอากาศวางทิศทางการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินบริเวณปากโม่บดทดสอบ โดยจะศึกษาความสามารถในการลดความรุนแรงในการฟุ้งกระจายก่อนและหลังผ่านม่านอากาศจากค่าความดันที่เกิดขึ้น และปริมาณฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายที่ลดลงหลังจากสร้างม่านอากาศ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การฟุ้งกระจายของอนุภาคถ่านหินจะเกิดขึ้นในขณะที่มีการเทถ่านหินลงในโม่บดถ่านหิน (Crusher) ซึ่งส่งผลให้อากาศที่อยู่ข้างในอ่างถูกแทนที่ด้วยถ่านหิน อากาศจึงลอยขึ้นสู่ด้านบนพร้อมกับฝุ่นถ่านหิน โดยหลักการแล้วหากไม่ต้องการให้ฝุ่นถ่านหินฟุ้งกระจายขึ้นด้านบนจะต้องทำการกันไม่ให้อนุภาคเคลื่อนที่สู่ด้านบน ในการทดสอบครั้งนี้มีแนวคิดที่จะสร้างม่านอากาศจากหัวพ่นอากาศเพื่อลดความเร็วของอากาศที่จะพาฝุ่นถ่านหินลอยขึ้นด้านบน หรือควบคุมทิศทางของฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายให้ไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

2.1 ฝุ่นละอองในอากาศ (Particulate matter)

ฝุ่นละออง คือ อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าหากมีขนาดเล็กมาก ๆ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งฝุ่นละอองตามขนาดได้เป็น 2 ประเภท คือฝุ่นละอองที่มีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ก่อให้เกิดทัศนวิสัยที่ไม่ดี และฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) สามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นาน และเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากมีขนาดเล็กมากพอที่จะเข้าไปในถุงลม [7] โดยฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการเผาไหม้ การระเบิด การก่อสร้าง หรือในกระบวนการขนส่งเชื้อเพลิงอย่างเช่น การขนส่งถ่านหินทางรถบรรทุกจากเหมือง โดยขนาดของฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจาย [8] ก็จะมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 38 ไมครอน จนถึงขนาดใหญ่ที่ 425-850 ไมครอนดังรูปที่ 2



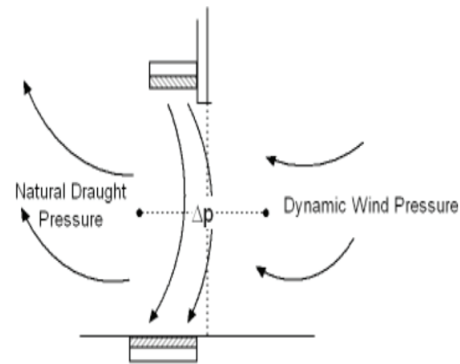
รูปที่ 2 ฝุ่นดำหินที่สามารถฟุ้งกระจายในอากาศ [8]

การฟุ้งกระจายของฝุ่นดำหินเหล่านี้ เกิดจากการไหลของอากาศและแรงต้านทานซึ่งเกิดจากแรงเสียดลากเชิงแอโรไดนามิก (Aerodynamic drag) ซึ่งโมเลกุลของอากาศที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคจะกระหน่ำชนอนุภาคอย่างไม่มีการเหนี่ยวนำ และทำให้ความเร็วในการตกลงของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป คืออนุภาคจะเกิดการเคลื่อนไหวที่ไม่มีกฎเกณฑ์ขึ้นกับการเคลื่อนตกลงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งอนุภาคฝุ่นที่เคลื่อนที่ไปตามการไหลของอากาศเหล่านี้ จะมีความรุนแรงในการฟุ้งกระจายตามความเร็วของอากาศ โดยในกรณีที่เป็นระบบที่มีอากาศอยู่ภายในระบบ ความรุนแรงในการฟุ้งกระจายสามารถอ้างอิงจากแรงดันที่เกิดขึ้น ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนเป็นแรงดันสถิต (Static pressure) และแรงดันเนื่องจากการเคลื่อนที่ (Dynamic pressure, P_d) โดยที่แรงดันเคลื่อนที่นั้นจะระบุถึงปริมาณทั้งหมดของแรงดันที่เกิดจากอัตราการไหลที่แสดงถึงความรุนแรงของการฟุ้งกระจายสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [9]

$$P_d = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

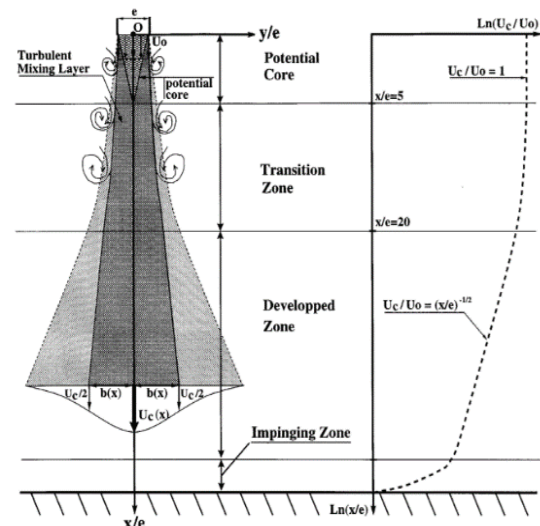
2.2 ม่านอากาศ (Air curtain)

จากความรุนแรงในการฟุ้งกระจายของฝุ่น อันเป็นผลมาจากแรงดันเคลื่อนที่ (Dynamic pressure) การใช้หัวพ่นอากาศเพื่อสร้างกระแสอากาศให้มีลักษณะเป็นม่านอากาศพุ่งด้วยความเร็วตามความดันของหัวพ่นอากาศสร้างความแตกต่างของความดันในทิศตั้งฉากกับกระแสการไหลของอากาศที่ต้องการควบคุมดังรูปที่ 11 เป็นอุปสรรคป้องกันการเข้าออกของอนุภาคฝุ่นละออง



รูปที่ 3 ลักษณะของม่านอากาศ [10]

แม้ว่าม่านอากาศจะมีการไหลเป็น 3 มิติ แต่สามารถแสดงในลักษณะ 2 มิติ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 4 โซนดังรูปที่ 12 ทิศทางลงของม่านอากาศจะอธิบายเป็นแกน x ทิศทางที่ตั้งฉากกับการไหลในแนวนอนเป็นแกน y โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อัตราส่วนของระยะทางในแนวนอนจากหัวพ่นอากาศกับความกว้างของช่องลมขาออกจากหัวพ่นอากาศ (y/e) และอัตราส่วนของระยะทางแนวตั้งกับความกว้างของช่องลมขาออกจากหัวพ่นอากาศ (x/e) ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้จะเป็นตัวบอกระยะโซนของม่านอากาศ และความเร็วของอากาศที่ออกจากหัวพ่นอากาศที่เปลี่ยนไปของแต่ละโซน [11]



รูปที่ 4 รูปร่างการกระจายความเร็วของม่านอากาศ [11]

การวิเคราะห์ทฤษฎีผ่านอากาศ จากความแตกต่างความดันที่ผ่านอากาศสร้างได้จะวิเคราะห์ได้จาก Dimensional analysis ใช้ 8 ตัวแปรเพื่ออธิบายปัญหาในสมการที่ 2 [11] โดยใช้ทฤษฎีของ π – *Buckingham* เพื่อสร้างตัวแปรไร้มิติ 5 ตัว คือ The geometric aspect ratio (H/e), The Reynolds number ($U_0 e/\nu$), The turbulence intensity of the jet at exit (I_0), The blowing angle (α) และสุดท้ายคืออัตราส่วนของแรงดันต่อแรงเฉื่อย เรียกอีกอย่างว่า ตัวเลขของออยเลอร์ (Euler number, Eu) โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 3 [11]

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} = f\left[\frac{H}{e}, \frac{U_0 e}{\nu}, I_0, \alpha\right] \quad (2)$$

$$Eu = 2 \frac{e}{H} \left[2.4 \sqrt{\frac{e}{H}} \left(1 - 2.56 \frac{e}{H} \right) - \sin(\alpha) \right] \quad (3)$$

ซึ่งการคำนวณทางทฤษฎีของผ่านอากาศเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จะวิเคราะห์จากค่าความเร็วอากาศ (U_0) ที่น้อยที่สุด ที่สามารถสร้างความแตกต่างความดันให้เพียงพอต่อการป้องกันความรุนแรงในการฟุ้งกระจายเนื่องจากความดันเคลื่อนที่ (Dynamic pressure) โดยใช้ค่า the Euler number คำนวณจากสมการที่ 4 [11]

$$Eu = \Delta P / \frac{1}{2} \rho U_0^2 \quad (4)$$

2.3 พลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics)

การเคลื่อนที่ของของไหลจะแสดงในลักษณะสายกระแส คือเส้นที่สัมผัสทิศทางของความเร็ว โดยระยะระหว่างสายกระแสเป็นตัวบ่งบอกค่าของอัตราการไหล ซึ่งหากช่องว่างระหว่างสายกระแสแคบแสดงว่าอัตราการไหลมีค่าสูง และขนาดช่องว่างระหว่างสายกระแสห่างกันมากแสดงว่าอัตราการไหลต่ำ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดท่ออากาศ เช่น การจ่ายลมจากโบลเวอร์ผ่านท่อมายังหัวพ่นอากาศ สามารถคำนวณหาความเร็วที่ออกจากหัวพ่นอากาศจากสมการที่ 5 [12]

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (5)$$

3. วิธีการศึกษา

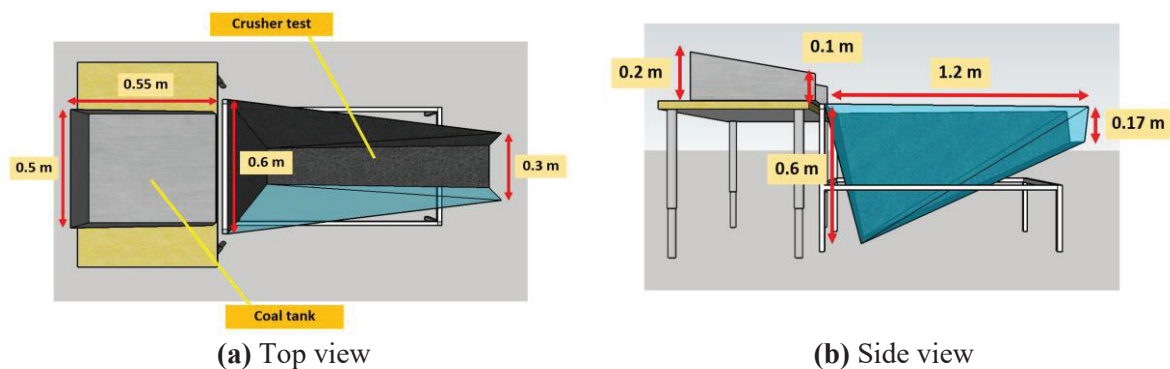
การศึกษาลดฝุ่นผ่านหินที่ฟุ้งกระจายบริเวณโม่บดด้วยผ่านอากาศใน 2 รูปแบบคือ รูปแบบแรกจะศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของฝุ่นผ่านหิน และความดันที่ลดลงหลังจากมีการสร้างผ่านอากาศให้กับโม่บดจำลอง และรูปแบบที่สองจะทดสอบกับโม่บดระดับห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝุ่นผ่านหินที่ฟุ้งกระจายในอากาศในระหว่างที่มีการเทผ่านหินลงในโม่บดทดสอบ ที่แต่ละค่าความเร็วของผ่านอากาศ

3.1 การทดสอบในห้องทดสอบ กรณีที่ไม่มีการติดตั้งระบบผ่านอากาศ

ระบบการทดสอบในห้องทดสอบดังรูปที่ 5 ประกอบด้วยโม่บดทดสอบ (Crusher test) ขนาดกว้าง 0.6 m ยาว 1.2 m สูง 0.6 m และถังเทผ่านหินโดยจะเทผ่านหินปริมาณ 9.5 kg ด้วยมุมการเท 30° ซึ่งผ่านหินที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งจะประกอบไปด้วยผ่านหินช่วงขนาดดังตารางที่ 1 โดยเก็บผลการทดสอบใน 2 ลักษณะคือลักษณะการฟุ้งกระจายของฝุ่นผ่านหินหลังจากเทผ่านหินลงในโม่บดทดสอบด้วยการบันทึกภาพ และปริมาณฝุ่นผ่านที่ฟุ้งกระจายในอากาศหลังจากเทผ่านหิน

ตารางที่ 1 ปริมาณผ่านหินแต่ละช่วงขนาดที่ใช้ทดสอบ

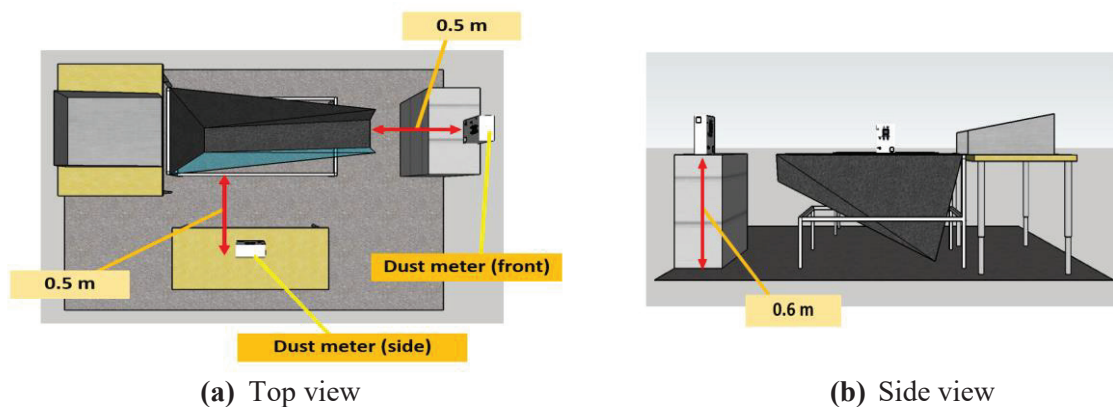
ขนาดผ่านหิน (mm)	น้ำหนัก (g)	อัตราส่วน (%)
>50.8	1400	14.74
38.1-50.8	960	10.11
25.4-38.1	1020	10.74
12.7-25.4	2220	23.37
9.525-12.7	760	8.00
6.35-9.525	1260	13.26
5.08-6.35	300	3.16
2.54-5.08	230	2.42
2.36-2.54	20	1.48
1.18-2.36	450	33.33
0.6-1.18	300	22.22
0.3-0.6	150	11.11
0.15-0.3	300	22.22
0.075-0.15	100	7.41
0.045-0.075	20	1.48
<0.045	10	0.74



รูปที่ 5 ระบบการทดสอบในห้องทดสอบ

เก็บผลของปริมาณฝุ่นผ่านหลังจากเทผ่านหินลงในไม้บดทดสอบด้วยเครื่องวัดปริมาณฝุ่นผ่านในอากาศ (Dust meter) ที่สามารถวัดปริมาณฝุ่นผ่านในขนาดใหญ่มากกว่า PM10 ในช่วง 0-1999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยจะ

ติดตั้งไว้บริเวณด้านหน้าและด้านข้างของไม้บดทดสอบดังรูปที่ 6 ทั้งสองเครื่องจะวางสูงจากพื้น 0.6 m และห่างจากไม้บดทดสอบ 0.5 m

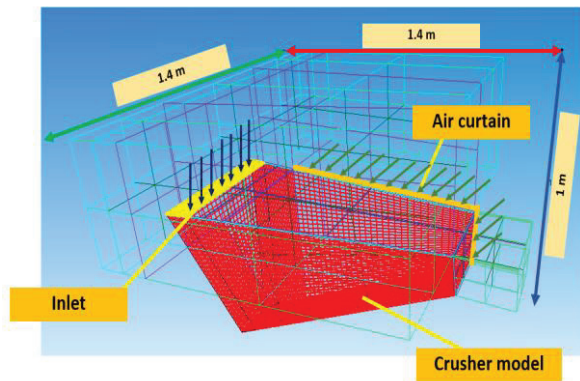


รูปที่ 6 ตำแหน่งของเครื่องวัดปริมาณฝุ่นผ่านในอากาศในห้องทดสอบ

ปริมาณฝุ่นผ่านที่ฟุ้งกระจายที่วัดได้จะใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการฟุ้งกระจายฝุ่นผ่านบริเวณไม้บดเมื่อมีการติดตั้งระบบผ่านอากาศ และภาพการทดสอบที่ได้จะใช้หาค่าความเร็วในการฟุ้งกระจายของฝุ่นผ่านในระบบ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการศึกษาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างการทดสอบจริงและการทดสอบในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.2 ศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สร้างไม้บดจำลองด้วยโปรแกรม ESI-CFD ขนาดเดียวกับไม้บดผ่านหินในห้องทดสอบดังรูปที่ 7 โดยให้ปริมาตรทั้งหมดในแบบจำลองเป็นอากาศ จำลองการเทผ่านหินด้วยการจ่ายอากาศเข้าในช่อง Inlet และปริมาตรอากาศเหนือไม้บดจำลองเป็น Outlet ศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศหลังจากจ่ายอากาศเข้าไปในไม้บด



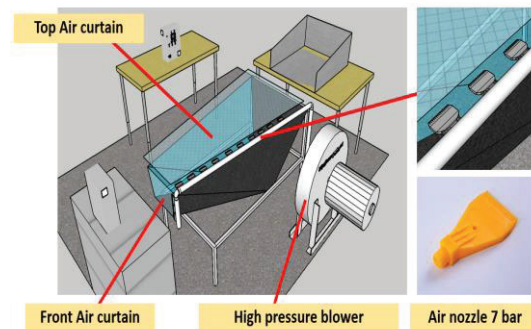
รูปที่ 7 โม่บดจำลองในโปรแกรม ESI-CFD

จำลองม่านอากาศบริเวณปากโม่บดจำลองให้ความเร็วขาออกจากหัวพ่นอากาศเป็น 10-50 m/s ซึ่งจะศึกษาทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศในโม่บดจำลอง และการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศหลังจากผ่านม่านอากาศ สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศเข้า ความเร็วของม่านอากาศ และค่าความดันแตกต่างระหว่างบริเวณภายในและภายนอกโม่บดจำลอง

3.3 การทดสอบในห้องทดสอบ เมื่อการติดตั้งระบบม่านอากาศ

ศึกษาการใช้ม่านอากาศเพื่อลดการฟุ้งกระจายของฝุ่น ถ่านหินในระบบการทดสอบดังรูปที่ 8 ซึ่งในติดตั้งระบบควบคุมการฟุ้งกระจายบริเวณโม่บดถ่านหินจะต้องไม่ขวางการมองเห็นของผู้ปฏิบัติงานในห้องควบคุม ดังนั้นในการทดสอบจะตั้งชุดหัวพ่นอากาศรับแรงดันสูงสุด 7 bar จำนวน 21 ตัวตามแนวท่อขนาด 1.5 inch บริเวณปากโม่บดจำลองด้านข้างและด้านหน้าที่สามารถสร้างม่านอากาศขวางการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินที่ออกจากโม่บดทดสอบ โดยจ่ายลมให้ระบบหัวพ่นอากาศด้วยพัดลมดูดอากาศแรงดันสูง (High pressure blower) ที่สามารถ

ปรับความเร็วม่านอากาศจากการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ เก็บผลการทดสอบจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายในอากาศ ตั้งแต่เริ่มเทถ่านหินลงในโม่บดทดสอบทุก 3 วินาที และศึกษาลักษณะทิศทางการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินที่แต่ละค่าความเร็วของม่านอากาศ



รูปที่ 8 ระบบทดสอบควบที่ติดตั้งม่านอากาศ

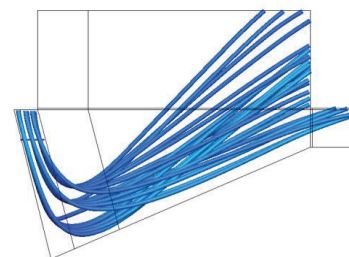
4. ผลการวิจัย

4.1 การฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินของโม่บดที่ไม่มีการติดตั้งระบบม่านอากาศ

การทดสอบเทถ่านหินลงในโม่บดทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งระบบม่านอากาศ พบว่าฝุ่นถ่านหินส่วนใหญ่ฟุ้งออกไปบริเวณด้านหน้าของโม่บดทดสอบดังรูปที่ 9a โดยสามารถคำนวณความเร็วของอากาศที่ถ่านหินกระทบกับโม่บดทดสอบ จนเริ่มฟุ้งกระจายภายตั้งแต่ม่านอากาศ 6.5 m/s และเมื่อนำไปคำนวณในแบบจำลองพบว่า หากต้องการให้เกิดความเร็วในการฟุ้งกระจาย 6.5 m/s ที่ค่าเดียวกับการทดสอบจริง จะต้องสร้างอากาศเข้าที่ความเร็ว 5 m/s ซึ่งจะได้อัตลักษณ์การเคลื่อนที่ของอากาศภายในโม่บดจำลองดังรูปที่ 9b



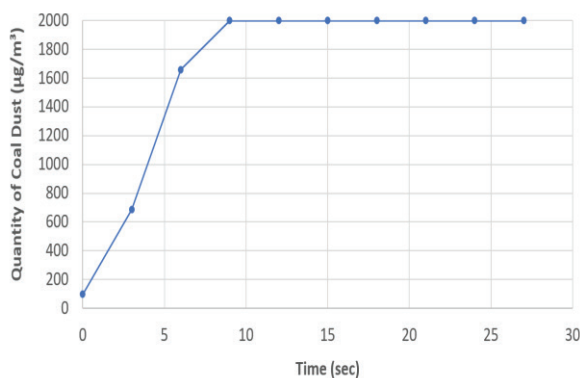
(a) การทดสอบในห้องทดสอบ



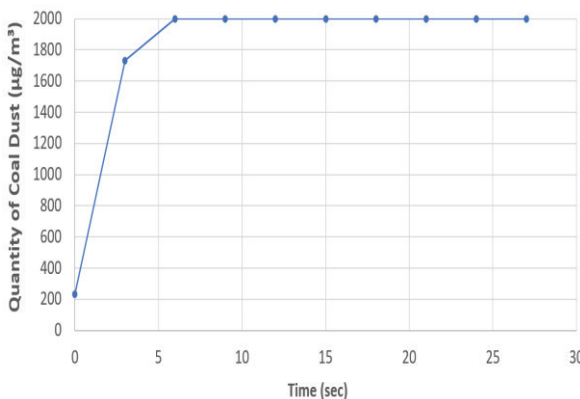
(b) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 9 ลักษณะการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินของโม่บดที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมการฟุ้งกระจาย

เมื่อสร้างอากาศเข้าแทนการเท่านหินลงในไม้บดจำลองจากความเร็วอากาศที่ 5 m/s ที่ได้จากการทดสอบจากรูปที่ 9b พบว่าอากาศภายในไม้บดจำลองมีทิศทางการเคลื่อนที่สอดคล้องกับการทดสอบจริง โดยผลที่เกิดขึ้นคืออากาศส่วนใหญ่ภายในไม้บดจำลองพุ่งออกทางด้านหน้าของไม้บดจำลอง และสามารถใช้โมเดลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ในการจำลองสถานการณ์ที่มีการติดตั้งระบบควบคุมการฟุ้งกระจายต่อไปได้ โดยผลการทดสอบปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นด้านหน้าระหว่างที่เท่านหินลงในไม้บดทดสอบในห้องทดสอบที่บริเวณด้านข้าง และด้านหน้าของไม้บดทดสอบที่ไม่มีระบบควบคุมการฟุ้งกระจายเป็นดังรูปที่ 10



(a) บริเวณด้านข้างของไม้บดทดสอบ



(b) บริเวณด้านหน้าของไม้บดทดสอบ

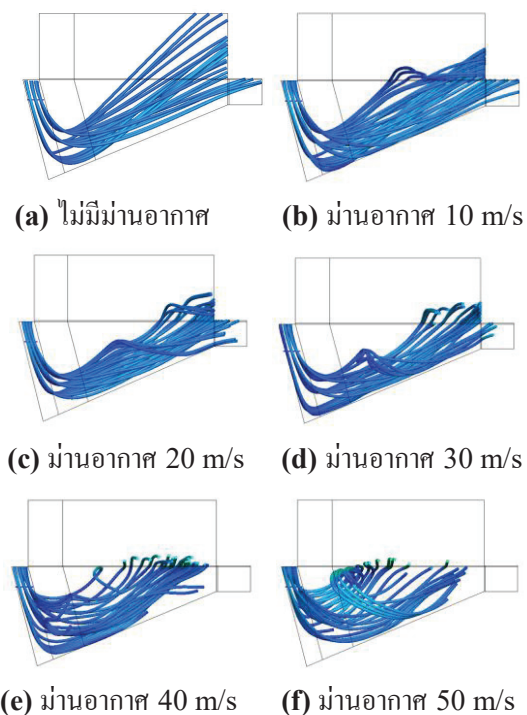
รูปที่ 10 ปริมาณฝุ่นด้านหน้าและด้านข้างที่ฟุ้งกระจายในห้องทดสอบที่ไม่มีติดตั้งระบบ

รูปที่ 10 พบว่าเมื่อเท่านหินลงในไม้บดทดสอบที่ไม่มีติดตั้งระบบควบคุมการฟุ้งกระจาย ปริมาณฝุ่นด้านหน้าและด้านข้างที่ฟุ้งกระจายในอากาศบริเวณด้านข้างของไม้บด

ทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 9 วินาทีจาก 96.7 μg/m³ ถึง 1999 μg/m³ และปริมาณฝุ่นด้านหน้าบริเวณด้านหน้าของไม้บดทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 6 วินาทีจาก 233.6 μg/m³ ถึง 1999 μg/m³ จากผลการทดสอบของระบบที่ไม่มีควบคุมการฟุ้งกระจายข้างต้นจากเครื่องวัดปริมาณฝุ่นในอากาศทั้งบริเวณด้านข้างและด้านหน้าของไม้บดทดสอบ

4.2 การฟุ้งกระจายฝุ่นด้านหน้าของไม้บดทดสอบเมื่อมีการติดตั้งระบบผ่านอากาศ

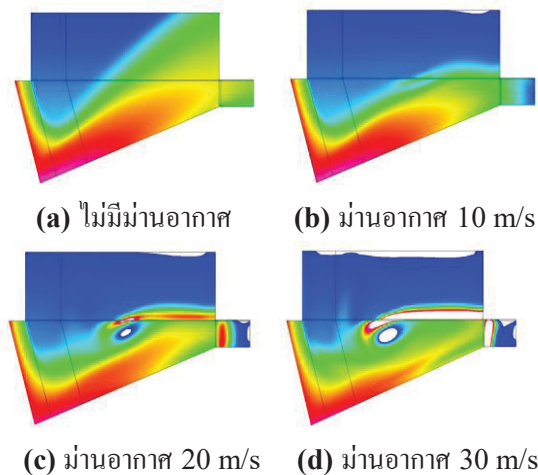
ไม้บดจำลองที่มีการอากาศเข้าเป็น 5 m/s พบว่าความเร็วอากาศที่เริ่มฟุ้งกระจายบริเวณก้นของไม้บดจำลองเป็น 6.5 m/s เมื่อคำนวณด้วยสมการที่ 1 จะได้ความดันเนื่องจากการฟุ้งกระจายบริเวณก้นไม้บดเป็น 21.125 N/m² ซึ่งสามารถคำนวณความเร็วของผ่านอากาศที่ส่งผลให้ความดันเนื่องจากการฟุ้งกระจายไม่ทะลุผ่านผ่านอากาศได้จากสมการที่ 2 และ 3 มีค่าความเร็วประมาณ 40.5 m/s ดังนั้นจึงได้ทดสอบสร้างผ่านอากาศในช่วงความเร็วขาออกของหัวพ่นอากาศ 10-50 m/s ให้กับไม้บดในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลการคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศ ดังรูปที่ 11



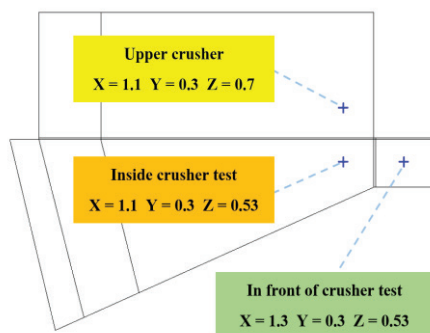
(e) ผ่านอากาศ 40 m/s (f) ผ่านอากาศ 50 m/s

รูปที่ 11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศหลังเท่านหินของไม้บดจำลองที่มีการติดตั้งระบบผ่านอากาศ

รูปที่ 11 พบว่าม่านอากาศที่ความเร็ว 10-30 m/s อากาศยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปบริเวณทางออกด้านหน้าของโมบดจำลองได้ และม่านอากาศที่ความเร็ว 40-50 m/s สามารถขวางการเคลื่อนที่ของอากาศที่ออกจากด้านหน้าของโมบดจำลอง แต่อากาศบางส่วนถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับม่านอากาศออกไปบริเวณด้านข้างของโมบดจำลอง และผลความดันที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการจำลองระบบม่านอากาศได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 12



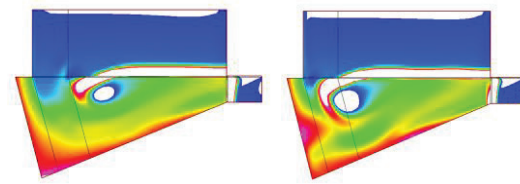
รูปที่ 12 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันในโมบดจำลองเมื่อมีการติดตั้งระบบม่านอากาศ



(a) ตำแหน่งวัดความดัน

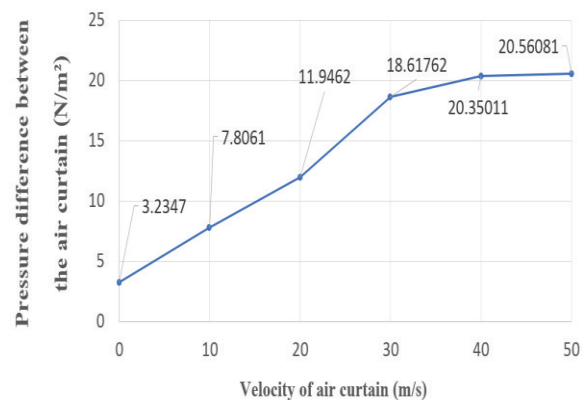
รูปที่ 13 ตำแหน่งของจุดที่ใช้วัดความดันในโมบดจำลอง และความดันแตกต่างระหว่างม่านอากาศ

รูปที่ 13 พบว่าความแตกต่างความดันภายในโมบดจำลองกับความดันบริเวณปากโมบดจำลองเริ่มเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ประมาณ 20 N/m^2 ที่ค่าความเร็ว



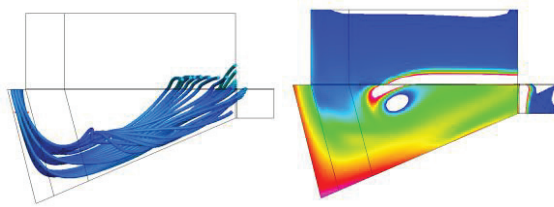
(e) ม่านอากาศ 40 m/s (f) ม่านอากาศ 50 m/s
รูปที่ 12 (ต่อ) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความดันในโมบดจำลองเมื่อมีการติดตั้งระบบม่านอากาศ

รูปที่ 12 พบว่าม่านอากาศช่วงความเร็ว 10-30 m/s ถูกควบคุมให้ผ่านไปยังเหนือปากโมบดจำลองได้น้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งระบบม่านอากาศให้โมบดจำลอง และที่ม่านอากาศความเร็ว 40 m/s ขึ้นไปเริ่มไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความดัน โดยเมื่อวัดความดันที่ตำแหน่งดังรูปที่ 13a ซึ่งจะได้ผลความแตกต่างความดันระหว่างม่านอากาศบริเวณปากโมบดจำลองดังรูปที่ 13b



(b) ความดันแตกต่างระหว่างม่านอากาศ

ม่านอากาศตั้งแต่ 35 m/s โดยเมื่อนำไปศึกษาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทดสอบจริงในห้องทดสอบได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 14



(a) ลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศ และความดันที่เปลี่ยนไปของโมบดจำลอง

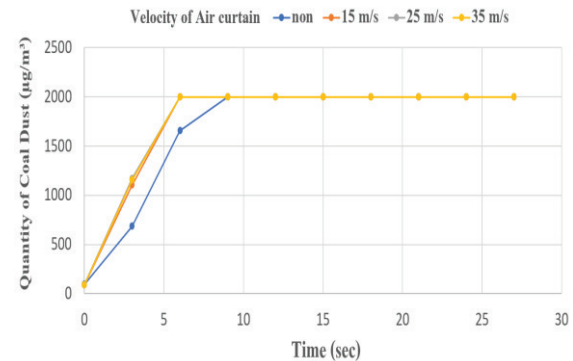


(b) การทดสอบในห้องทดสอบ

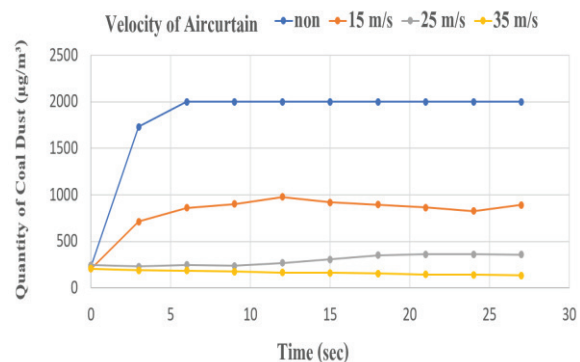
รูปที่ 14 ลักษณะการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินของโมบดที่มีการติดตั้งม่านอากาศความเร็ว 35 m/s

รูปที่ 14a พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศถูกบังคับไปไหลไปทิศทางเดียวกับม่านอากาศ โดยเมื่อคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความดันแล้วก็สามารถลดความดันของอากาศที่ผ่านม่านอากาศในแบบจำลองได้ และเมื่อนำไปทดสอบในห้องทดสอบได้ลักษณะการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินดังรูปที่ 14b พบว่าฝุ่นถ่านหินไม่ฟุ้งกระจายไปบริเวณด้านหน้าของโมบดทดสอบ แต่ถูกพัดไปในทิศทางเดียวกับม่านอากาศไปทางด้านข้างของโมบดทดสอบ เมื่อนำไปทดสอบเพื่อดูผลของปริมาณถ่านหินที่ฟุ้งกระจายในห้องทดสอบ จากการสร้างระบบม่านอากาศด้วยพัดลมดูดอากาศแรงดันสูง (High pressure blower) ปรับความถี่ของมอเตอร์ที่ 20, 30 และ 40 Hz สามารถสร้างความเร็วของม่านอากาศจากหัวพ่นอากาศได้ประมาณ 15, 25 และ 35 m/s ตามลำดับ ได้ผลการทดสอบปริมาณการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินที่เพิ่มขึ้นในระหว่างที่เทถ่านหินจากเครื่องวัดปริมาณฝุ่นในอากาศ

บริเวณด้านข้าง และด้านหน้าของโมบดที่ติดตั้งระบบม่านอากาศในห้องทดสอบเป็นดังรูปที่ 15



(a) บริเวณด้านข้างของโมบดทดสอบ



(b) บริเวณด้านหน้าของโมบดทดสอบ

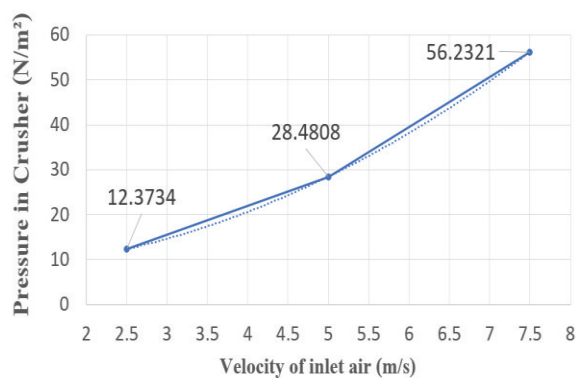
รูปที่ 15 ปริมาณฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายในห้องทดสอบของโมบดทดสอบที่มีการติดตั้งระบบม่านอากาศ

รูปที่ 15 พบว่าเมื่อมีการติดตั้งระบบหัวพ่นอากาศให้กับโมบดทดสอบ ปริมาณฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายในอากาศบริเวณด้านข้างของโมบดทดสอบเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับสูงสุดที่เครื่องวัดปริมาณฝุ่นในอากาศสามารถวัดได้ที่ 1999 µg/m³ ในทุกค่าความเร็วของม่านอากาศที่ใช้ทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับผลจากแบบจำลองที่อากาศส่วนใหญ่ฟุ้งตามทิศทางของม่านอากาศไปยังด้านข้างของโมบดจำลอง และปริมาณฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายในอากาศบริเวณด้านหน้าของโมบดทดสอบที่ม่านอากาศความเร็ว 15, 25 และ 35 m/s ลดลงมาจากโมบดที่ไม่มีติดตั้งระบบม่านอากาศอยู่ที่ 805.13, 296.7 และ 166.22 m/s ตามลำดับ เนื่องจาก

ฝุ่นถ่านหินส่วนใหญ่ถูกพัดไปในทิศทางเดียวกับมวลอากาศ โดยบริเวณด้านข้างของโม่บดปริมาณฝุ่นถ่านหินอากาศเพิ่มขึ้นไปที่จุดสูงสุดอย่างรวดเร็ว และหากเพิ่มความเร็วของมวลอากาศให้สูงพอที่จะลดความเร็วในการฟุ้งกระจาย ฝุ่นถ่านหินเหล่านี้จะถูกพัดไปด้านข้างจนหมดจนไม่สามารถผ่านไปยังด้านหน้าของโม่บดทดสอบได้

4.3 ความสัมพันธ์ของความแตกต่างความดันกับความรุนแรงในการฟุ้งกระจายและความเร็วของมวลอากาศ

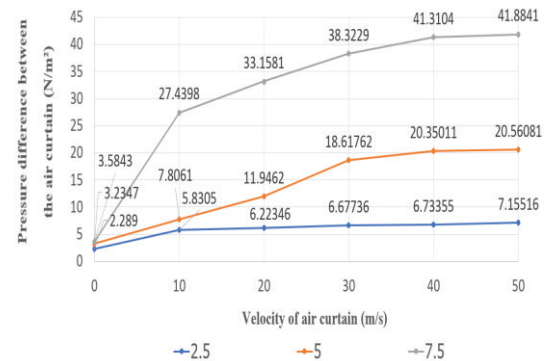
ทดสอบสร้างความเร็วอากาศเข้าแทนความเร็วในการเท่านหินในโม่บดจำลองที่ความเร็ว 2.5, 5 และ 7.5 m/s ได้ความดันในการเท่านหินแทนความดันที่เกิดขึ้นภายในโม่บดจำลอง เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงหลังจากมีการลดความดันที่เกิดขึ้นด้วยมวลอากาศดังรูปที่ 16



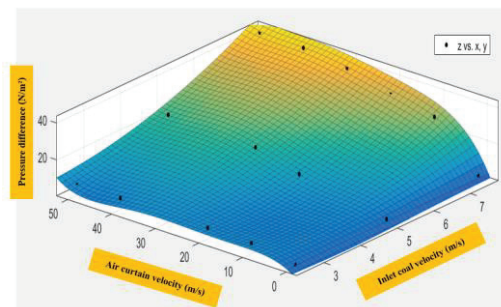
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเท่านหินกับความดันเนื่องจากการฟุ้งกระจาย

รูปที่ 16 พบว่าที่ความเร็วในการเท่านหิน 2.5, 5 และ 7.5 m/s จะเกิดความดันเนื่องจากการฟุ้งกระจายเป็น 12.3734, 28.4808 และ 56.2321 N/m² ตามลำดับ และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเท่านหินกับความดันเนื่องจากการฟุ้งกระจายเป็น $P = 0.9315U^2 - 0.5434U + 7.9099$ ที่ใช้คำนวณหาได้ในช่วงความเร็วในการเท่านหินตั้งแต่ 2.5-7.5 m/s ซึ่งเมื่อนำความเร็วในการเท่านหิน 2.5, 5 และ 7.5 m/s ไปศึกษาในโม่บดจำลอง โดยสร้างมวลอากาศที่ความเร็ว 10-50 m/s เพื่อดูผลของความแตกต่างความดันที่เกิดขึ้น และ

สร้างสมการความสัมพันธ์ในการออกแบบมวลอากาศในช่วงความเร็ว 2.5-7.5 m/s ดังรูปที่ 17



(a) กราฟความสัมพันธ์



(b) พื้นผิวความสัมพันธ์จากโพลีโนเมียลลำดับ 5
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วมวลอากาศกับความดันแตกต่าง ระหว่างภายในโม่บดกับเหนือมวลอากาศที่ความเร็วในการเท่านหิน 2.5-7.5 m/s

รูปที่ 17a พบว่าที่ความเร็วในการเท่านหิน 2.5, 5 และ 7.5 m/s สามารถสร้างความดันแตกต่างระหว่างภายในโม่บดกับเหนือมวลอากาศเริ่มคงที่ที่ประมาณ 6, 20 และ 41 N/m² เมื่อสร้างมวลอากาศที่ความเร็ว 20, 35 m/s และ 40 m/s ตามลำดับ และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ไปสร้างพื้นผิวความสัมพันธ์ด้วยโพลีโนเมียลลำดับ 5 ได้ลักษณะพื้นผิวดังรูปที่ 17b ได้สมการในการออกแบบความเร็วอากาศที่ออกจากหัวพ่นอากาศสำหรับสร้างมวลอากาศเพื่อป้องกันฝุ่นถ่านหินที่ฟุ้งกระจายไปยังปากโม่บดเป็น

$$\Delta P(U, V) = 0.0000013V^5 - 0.000006406UV^4 + 0.0001079U^2V^3 - 0.0001442V^4 - 0.0003319UV^3 - 0.009256U^2V^2 + 0.007158V^3 + 0.06095UV^2 + 0.2069U^2V - 0.2265V^2 - 1.422UV + 0.007367U^2 + 3.358V + 0.1979U + 1.832$$

สมการดังกล่าวสามารถใช้ออกแบบเฉพาะระบบโมบดถ่านหินที่มีลักษณะเดียวกับโมบดทดสอบ โดยสามารถออกแบบได้ในช่วงความเร็วในการเทถ่านหิน 2.5-7.5 m/s ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หากเป็นโมบดทดสอบที่มีขนาดแตกต่างออกไปจะใช้สมการที่ 4 เพื่อหาความเร็วของมวลอากาศที่สามารถสร้างความดันแตกต่างระหว่างมวลอากาศที่มีค่าสูงสุด และหาความเร็วของมวลอากาศที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

5. สรุปผลการวิจัย

ถ่านหินปริมาณ 9.5 kg ลงในโมบดทดสอบด้วยมุมการเท 30° เกิดความเร็วในการฟุ้งกระจายเป็น 6.5 m/s ทิศทางการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินส่วนใหญ่พุ่งไปยังด้านหน้าของโมบดทดสอบ และกระจายเต็มทั่วห้องทดสอบ และเมื่อสร้างมวลอากาศควบคุมการฟุ้งกระจายพบว่าความเร็วของมวลอากาศที่เหมาะสมเป็น 35 m/s ซึ่ง

มวลอากาศยังไม่สามารถป้องกันการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินได้ แต่สามารถควบคุมทิศทางการฟุ้งกระจายของฝุ่นถ่านหินไปยังด้านข้างของโมบดทดสอบในทิศทางเดียวกับมวลอากาศ โดยไม่พุ่งไปยังด้านหน้าของโมบดทดสอบ

แนวทางข้างต้นจะนำไปประยุกต์ใช้กับโมบดถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยหาความเร็วของมวลอากาศที่เหมาะสมด้วยวิธีการเดียวกัน และจะกำจัดฝุ่นถ่านหินที่ถูกควบคุมไปยังด้านข้างของโมบดทดสอบด้วยระบบบำบัดฝุ่นถ่านหินต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบอุณหพลศาสตร์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย อุปกรณ์สถานที่ในการทำวิจัยและความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมไปถึงความอนุเคราะห์เครื่องวัดปริมาณฝุ่นในอากาศจากภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Peoria, I, L. How to describe the droplet size of a nozzle. Water Fluid Handling System Co. 2016. [online] available: http://water.nozzle.com/page27?article_id=23.
- [2] Ting, R., Yinlin, J., Peter, W., Zhijun, W., Zhaoyang, M. and Zhimin, W. A Comparative Study of Dust Control Practices in Chinese and Australian Longwall Coal Mines. China University of Mining and Technology, China, 2016.
- [3] Prostarski, D. Use of Air and Water Spraying Systems for Improving Dust Control in Mines. KOMAG Institute of Mining Technology, Poland, 2013.
- [4] Zhou, G., Feng, B., Yin, W. and Wang, J. Numerical Simulations on Airflow-Dust Diffusion Rules with The Use of Coal Cutter Dust Removal Fans and Related Engineering Applications on A Fully-Mechanized Coal Mining Face. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, China, 2018.
- [5] Ray, R. Reducing Airborne Dust at Unloading. 2013. [online] available: <http://www.powerEng.com/articles/print/volume-117/issue-7/features/coal-dust-control.html>.
- [6] Yu, H., Cheng, W., Wang, H., Peng, H. and Xie, Y. Formation Mechanisms of A Dust-Removal Air Curtain in A Fully-Mechanized Excavation Face and An Analysis of Its Dust-Removal Performances Based on CFD and DEM. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, China, 2017.

- [7] พัชรชาติ สุวรรณชาติ. ฝุ่นละอองในอากาศ. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2557.
- [8] Mishra, D.P. and Azam, S. Experimental Investigation on Effects of Particles Size, Dust Concentration and Dust Dispersion Air Pressure on Minimum Ignition Temperature and Combustion Process of Coal Dust Clouds in G-G Furnace. Department of Mining Engineering, India, 2017.
- [9] Engineering Toolbox. Dynamic Pressure. 2008. [online] available: http://www.engineeringtoolbox.com/dynamicpressure-d_1037.html.
- [10] Engineering Toolbox. Air Curtains and Air Screens. 2003. [online] available: http://www.engineeringtoolbox.com/aircurtains-d_129.html.
- [11] Krajewski, G. and Wegrzynski, W. Air Curtain as A Barrier for Smoke in Case of Fire: Numerical Modelling. Fire Research Department, Building Research Institute, Poland, 2015.
- [12] Nattawadee Charounsuk. Fluid Dynamics. [online] available: <http://sites.google.com/site/nattaWadee06/khwam-ru-keiyw-kab-fisiks/phl-sastr>.



Optimization for Reduction of NO_x and Heat Loss of Parawood Chips Boiler Process Combined with Air Preheater and Controller Using Aspen Dynamics

Jirateep Premsuksatian and Pornsiri Kaewpradit *

Department of Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90112, Thailand

*E-mail: pornsiri.k@psu.ac.th, Tel.: +66-074-287283

ABSTRACT

In a small scale of boiler process, a typical problem is an improper control of air to fuel ratio during the combustion process. Such poor control causes heat loss and undesired emission production. In this study, the main aim was to make the process green in the sense of energy recovery and emissions regulation (CO, NO_x, and SO_x) in an optimum manners, and to design the control system to maintain the optimal conditions using Aspen Plus and Aspen Dynamics. The external flue gas recirculation technique was applied to the process to reduce thermal NO_x. Air preheater was also designed and applied to preheat the feed air combustion temperature for energy recovery purpose. Dynamic simulation scheme was proposed to overcome a limitation of Aspen Dynamics for solid process, and the air to fuel ratio control was then designed to regulate CO, NO_x, and SO_x emission. Boiler level and boiler pressure controllers were also designed for safety purpose. In addition, the steam production controller was also designed for achieving the required steam. Rejection of uncertain moisture content of wood chips was considered. The results have shown that the simulated trajectories were consistent with the measured data collected by wood manufacturing company in the south of Thailand. The optimal operating condition of the process was 5% excess air and 25% flue gas recirculation with 40.5 wt% moisture content of wood chips. The optimal condition with the designed air preheater provided 29% heat recovery in this case, and 35.4% of steam production higher than original process. The proposed control scheme can regulate successfully the CO, NO_x, and SO_x emission under their limitations, and can handle disturbance changes very well.

Keyword: Combustion simulation, Air/fuel ratio, NO_x reduction, Flue gas recirculation, Air preheater

1. INTRODUCTION

Combustion is a chemical reaction between the fuels (such as coal, biomass etc.) and oxygen [1]. Chemical energy, which is stored in the fuel, is transformed into the useful heat energy using in the other processes such a boiler process [2]. The boiler is an equipment for producing steam, which provides a means for heat of combustion to be transferred to boiler feed water until it becomes saturated steam or superheated steam [3]. Many factory processes require steam for utilizing in various fields such as food production, power generation etc. For a small scale of the boiler process, a typical problem is improper control of air to fuel ratio during the combustion process [4]. Such the poor control system leads to inefficient combustion process and further causes significant heat losses as well as undesired pollution emission. The green process with a good control

structure is then required which aimed at environmental burden regulation (especially for CO, NO_x, and SO_x emission) and energy recovery for raw material consumption reduction.

The conventional combustion method provides high flame temperature in the furnace resulting in considerable high NO_x formation, although it operates in an optimal air to fuel ratio. Flue gas recirculation (FGR) is an effective technique for NO_x emission reduction. There are two ways to reduce NO_x emission. First, the recirculated flue gases absorb heat from the burner resulting in lower peak flame temperature and the formation reduction of thermal NO_x. Second, the recirculated flue gases will lower the O₂ concentration in initial combustion zone, this inhibits fuel NO_x conversion [5].

Robinson and Luyben (2008) [6] performed a simulation of a steady-state coal gasification in

Aspen Plus, and developed a dynamic modeling of the coal gasification using Aspen Dynamics. High molecular weight hydrocarbon, which has the same hydrogen to carbon ratio founding in coal, was used for representing the coal in the Aspen Dynamics. A proportional-integral (PI) control system was designed to control the performance of the process. Jin et al. (2014) [7] also performed the dynamic modeling of oxy combustion of the coal by using Aspen Dynamics, pseudo-coal was proposed. Lan et al. (2018) [8], Gaglianoa et al. (2017) [9], Pei et al. (2013) [10] and Doherty et al. (2013) [11] performed the steady-state simulation of biomass gasification. RYIELDS was used for decomposition of the biomass to the conventional elements, and RGIBBS was used as the fluidized gasifier. The simulation results showed that higher temperature of fluidized bed and higher feed air temperature gave higher amount of CO and NO_x but lower amount of CO₂. Nevertheless, higher excess air ratio in the combustion process and higher biomass moisture provided lower CO amount. Gamrat et al. (2016) [12] and Shi et al. (2018) [5] investigated the effect of flue gas recirculation on NO_x emissions. For a coke oven heating system, they found that the 20% recirculated flue gas resulted in 50% reduction of the NO_x emission. For the oxy-fuel natural gas combustion, the 40% recirculated flue gas resulted in 85% reduction of the NO_x emission.

In this study, main aim was to make the process green by designing and simulating a control system for heat energy recovery and regulation of CO, NO_x, and SO_x emissions according to the emission standards regulated by Industrial Estate Authority of Thailand or IEAT. Steady-state process simulation results were initially verified by comparing to the sets of the measured data collected from wood manufacturing company in the south of Thailand. For pollutant emissions point of view, the optimum value of air to fuel ratio was defined by sensitivity analysis. Moreover, the external flue gas recirculation (EFGGR) technique was applied to the process for the thermal NO_x reduction. For heat recovery point of view, air preheater unit was designed and applied here to preheat the feed air temperature. Dynamic simulation scheme was proposed to overcome a limitation of the Aspen Dynamics for a solid process. Air to fuel (A/F) ratio control was further designed at the optimal condition. Boiler level and boiler pressure

controllers were designed for safety purpose as well as the steam production control. Rejection of uncertain moisture content in wood chips was considered. Control robustness test was also investigated to specify the control limits.

2. BOILER PROCESS

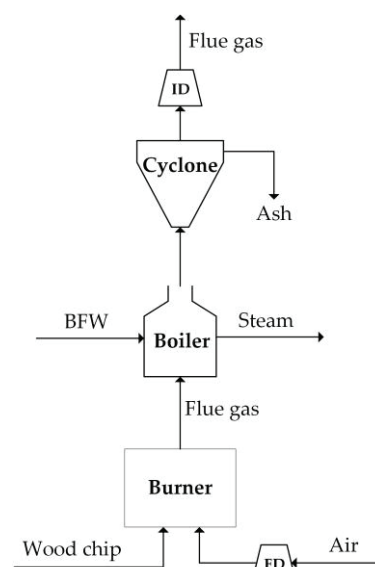


Figure 1. Block flow diagram of the original boiler process.

The boiler is an equipment used to generate steam by applying heat from combustion to boiler feed water (BFW). Figure 1 shows a block flow diagram of the original biomass boiler process of wood manufacturing company in the south of Thailand. Here, parawood chips are used as a combustion raw material, and there composition analysis is shown in Table 1. Combustion air is fed to the burner via forced draft (FD) fan. Process steam capacity in this case is 4-7 ton/hr at steam pressure of 5.5 bar. Flue gas from boiler is passed through a cyclone in order to separate ash before discharging through stack.

Main drawback of the original process is that the combustion process operates without A/F ratio control providing inefficient combustion, significant heat loss, and undesired emission production especially CO, NO_x, and SO_x [4]. The emission control was then focused by controlling A/F ratio at its designed value. In addition, a flue gas recirculation technique was applied to reduce NO_x emissions. Another disadvantage is the flue gas at stack still have high energy content which can be recovered to the process. Air preheater is an

interesting option to improve a thermal efficiency of the boiler process by transferring the heat energy from flue gas to the combustion air.

Table 1. Composition analysis of parawood chips (as received basis).

Parameter	Unit	Result
Proximate analysis		
Moisture	wt %	40.48
Volatile matter	wt %	48.55
Fixed carbon	wt %	10.17
Ash content	wt %	0.80
H.H.V.	kcal/kg	2,895
L.H.V.	kcal/kg	2,251
Ultimate analysis		
Carbon	wt %	29.67
Hydrogen	wt %	8.15
Nitrogen	wt %	0.097
Sulphur	wt %	0.067
Oxygen	wt %	62.02

Table 2. Normal operating data of parawood manufacturing company.

Stream / Block name	Description	Value
AIR	Flow rate	17,700 kg/hr (9,060 ft ³ /min)
	Temperature	30 °C
	Pressure	1.01 bar
WOOD CHIP	Flow rate	1,500 kg/hr
	Temperature	30 °C
	Pressure	1.01 bar
	Moisture content	40.48 wt %
BFW	Flow rate	7,650 kg/hr
	Temperature	100 °C
	Pressure	5.5 bar
FD fan	Forced flow rate	16 in-water 9,060 ft ³ /min
	Induced flow rate	8 in-water
ID fan	Maximum flow rate	30,000 ft ³ /min
	UA	11,390 W-K

*U= heat transfer coefficient, A= exchanger area

3. Simulation of parawood chips combustion boiler process

In this study, the simulation of parawood chips combustion boiler process was achieved under a normal condition as operating at the wood manufacturing company by Aspen Plus v.9 (as shown in Figure 2). The reference condition was given as shown in Table 2. In the Aspen Plus software, parawood chips were defined as non-conventional solid then their proximate analysis, ultimate analysis and heat of combustion (Table 1) were required as input. The value of combustion heat used is high heating value (HHV) in dry basis, HCOALGEN and DCOALIGT models were used for calculation of enthalpy and density [13]. R-YIELD and R-GIBBS blocks were considered here to represent a combustion reaction. The R-YIELD block simulated the decomposition of parawood chips by converting the non-conventional solid to (1) conventional gas consisting of H₂O, H₂, N₂, O₂, and S, (2) conventional solid which was C (3) and non-conventional elements which was ash. Moreover, the R-YIELD block calculated the enthalpy change of the decomposition process (Q-DECOMP) which was transferred to the R-GIBBS block. Since the decomposed product components must be specified in the R-YIELD block, atomic balance of the defined products was then achieved via a solver tool in EXCEL in sense of minimizing sum of absolute difference of defined products and ultimate analysis results. The optimum results are shown in Table 3. The R-GIBBS block simulated the equilibrium reactor, it calculated phase and chemical equilibriums by minimizing Gibbs free energy. All possible products of the combustion in the R-GIBBS, consisting of H₂O, H₂, O₂, CO, CO₂, N₂, NO₂, NO, S, SO₂, SO₃, and ash, were in the gas phases except for ash which was in solid phase.

To validate the process simulation, Mean Absolute Error (MAE) of stack temperature (FLUSTACK stream in Figure 2) deviation between measured and simulated data was considered. The results are shown in Figure 3. It is found that the simulation error was around 3% (considering with 27 scenarios of the collected data). The error was caused from inconstant and uncontrolled of the moisture content in the wood chips since of the rainy season in Thailand.

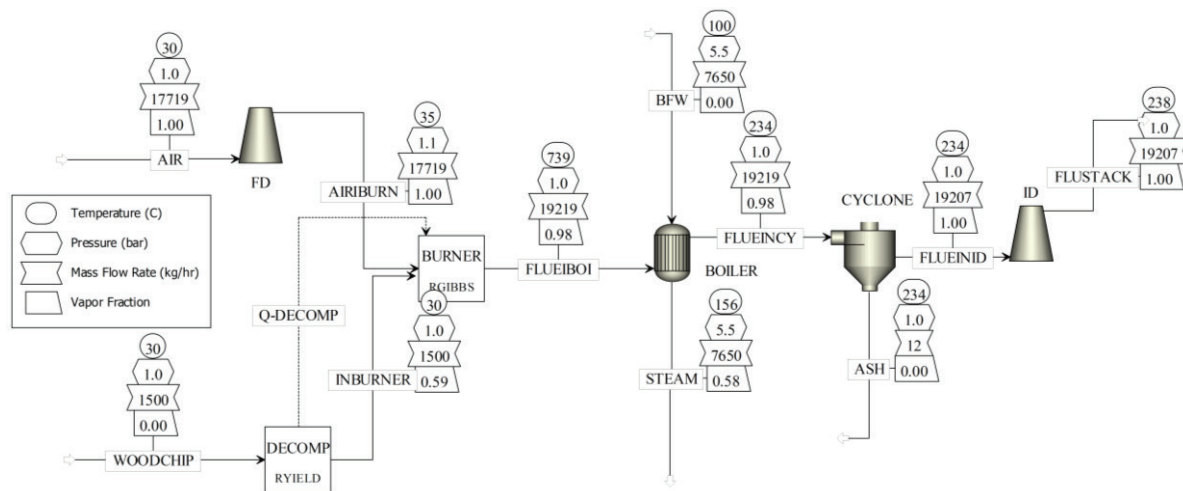


Figure 2. Process flow diagram under original operating conditions (Structure 1).

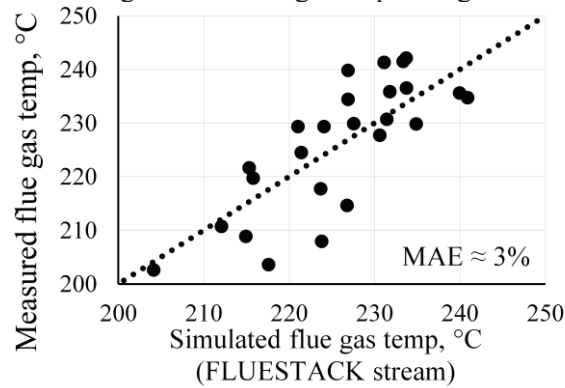


Figure 3. The comparison between simulated and measured flue gas temperature.

Table 3. Optimum distribution of decomposed product yield (R-YIELD).

Basis: 100 g total weight of wet basis			
Decomposed elements from atom balance		Calculating in mole atom	Mole atom from ultimate analysis
2.47 mol C	→	2.47 mol C	2.47 mol C
1.90 mol H ₂	→	3.80 mol H	8.15 mol H
	→	4.54 mol H	
2.27 mol H ₂ O	→	2.27 mol O	3.88 mol O
0.710 mol O ₂	→	1.42 mol O	
0.002 mol S	→	0.002 mol S	0.002 mol S
0.0035 mol N ₂	→	0.007 mol N	0.007 mol N
SAE = 0.38			

4. Effect of flue gas recirculation and excess air on the pollution emissions, stack heat loss, and steam production

The efficient combustion conditions require the appropriate amount of oxygen to completely burn the given amount of fuel. In practice, more air than theoretical air referred to an excess air

must be supplied to completely burn the fuel. The equation for calculating excess air is shown in equation (1) referred to [14].

$$\% \text{ Excess air} = \frac{\% \text{O}_2 - \frac{\% \text{CO}}{2}}{20.9 - \left(\% \text{O}_2 - \frac{\% \text{CO}}{2} \right)} \times 100 \quad (1)$$

Where; %O₂ is the percent by volume of oxygen containing in flue gas and %CO is the percent by volume of carbon monoxide containing in flue gas

The conventional combustion method provides high flame temperature in the furnace which affects directly to the conversion of N₂ and O₂ from air to NO_x. Hence, flue gas recirculation (FGR) technique was applied. Flue gas recirculation is an effective technique for reducing NO_x emission. There are two ways to reduce NO_x. First, the recirculated flue gases absorb heat from the burner resulting in lower peak flame temperature and the formation reduction of thermal NO_x. Second, the recirculated flue gases will lower the O₂ concentration in initial combustion zone, this inhibits fuel NO_x conversion [5]. In this work the external flue gas recirculation (EFGR) technique was used as shown in Figure 4. The concept was that flue gas was separated from a location downstream of the main boiler bank, and then mixed with the combustion air before fed to the burner.

The objective of this section is to find the optimal %excess air and optimal %flue gas recirculation in the sense of CO, NO_x, and SO_x emissions lower than their limitations, which equal to 690, 200, and 60 ppm respectively [15]. Sensitivity analysis was investigated by varying air flow rate (AIR) and the percentage of flue gas recirculation (FLURECIR) while mass flow rate of wood chips (WOODCHIP) was fixed at a normal operating value which is 1,500 kg/hr at 40.48 moisture wt%.

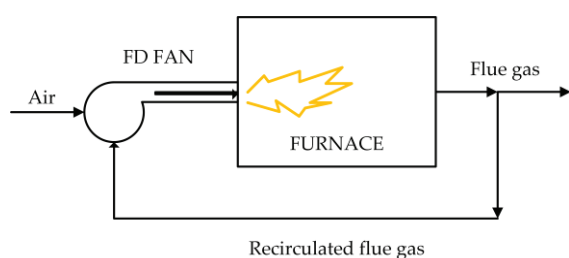


Figure 4. External flue gas recirculation (EFGR)

4.1. CO, NO_x, and SO_x emissions

% Excess air and %flue gas recirculation were varied in the range from 0 - 50% excess air and 0 - 30% flue gas recirculation. From Figure 5(a) shows that increasing of %flue gas recirculation provided a decrease in flame temperature. This is because the recirculated flue

gases increase the total gas volume and absorb heat from the burner. The cooling effect obtains from the moisture and CO₂ contained in the flue gas [18]. As a result, the NO_x formation was significantly decreased as shown in Figure 5(b). At 25% flue gas recirculation provided the NO_x emissions under its limitation in every excess air operating and provided the reduction of NO_x around 70% compared with the condition without flue gas recirculation.

As seen in Figure 5(c), CO emissions was significantly decrease while increasing %flue gas recirculation. Same results were found in [16] which reported that the increasing of flue gas recirculation provided a decrease in CO emissions for the flue gas recirculation < 30%. In addition, [17] concluded that the CO emissions are stable while increasing flue gas recirculation ratio in the range of 0-30%, and significantly increase if flue gas recirculation ratio more than 30% due to dilution effect and low flame temperature.

For SO_x emissions as shown in Figure 5(d), Calpenn Associates, Inc. [18] claimed that the flue gas recirculation for stoker boilers can reduce SO_x emissions. It is because of the lower flame temperature provides the lower reaction rate. However, the sulfur content in wood chips is not too high to make the SO_x higher than its limitation.

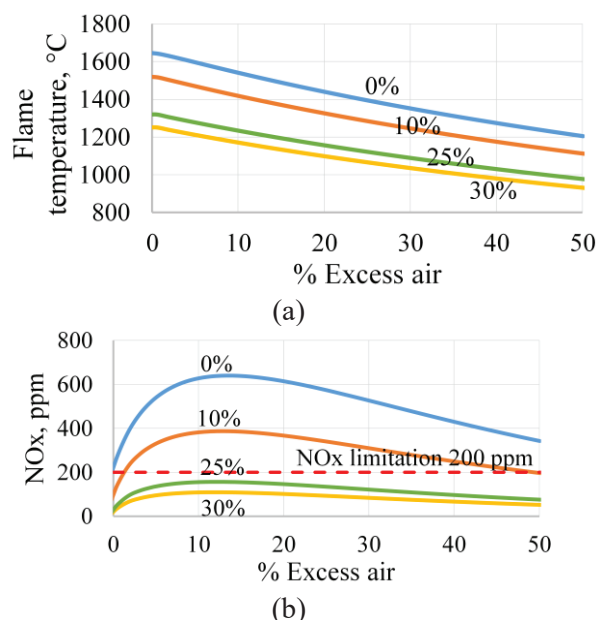


Figure 5. Effect of excess air at different amount of flue gas recirculation on (a) Flame temperature, (b) NO_x, (c) CO, (d) SO_x.

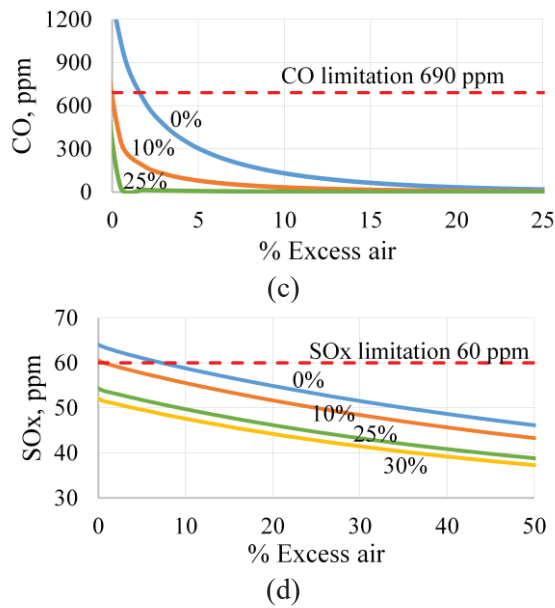


Figure 5. (cont.) Effect of excess air at different amount of flue gas recirculation on (a) Flame temperature, (b) NO_x, (c) CO, (d) SO_x.

In this section, the criteria for choosing the optimal %flue gas recirculation and %excess air was that it could provide the pollution emissions under their limitations. It is noted that at 25% flue gas recirculation provided the NO_x emissions under its limitation in every excess air operating and provided the reduction of NO_x around 70%. The optimal flue gas recirculation was then chosen at 25%. %Excess air should be selected at a low value because it provided a low heat loss. However, at 0% excess air should not be selected although the emissions are lower than limitations. This is because more air must be supplied to burn all fuel completely. Hence, 5% excess air (5,730 kg/hr) was chosen as an optimal excess air in this case. This provided 6, 136, and 52 ppm of CO, NO_x, and SO_x emissions respectively.

4.2. Stack heat loss and Steam production

Heat loss at stack (FLUSTACK) can be calculated by equation (2).

$$Q_{\text{loss}} = \frac{m_{\text{flue}} C_{p_{\text{flue}}}}{10^6} (T_{\text{flue}} - T_{\text{ref}}) \quad (2)$$

Where; Q_{loss} is heat loss of flue gas at stack (MJ/hr), m_{flue} is flue gas mass flow rate (kg/hr), $C_{p_{\text{flue}}}$ is heat capacity at constant pressure of flue gas (J/kg-K), T_{flue} is temperature of flue gas at stack (°C), and T_{ref} is reference temperature at 25 °C.

From equation (2), the amount of heat loss depends on the temperature and flow rate of flue gas at stack. Figure 6(a) shows that increasing excess air increases the stack temperature because excess air is also heated up by a portion of heat from combustion leading to lower flame temperature [19]. Moreover, the increased excess air also increases overall flue gas flow rate. These lead to lower enthalpy and lower heat transfer efficiency of boiler resulting in increasing the temperature of flue gas at stack. Hence, the terms of m_{flue} and T_{flue} increase which mean increased in stack heat loss. It is noted that the amount of excess air is a key factor which has an influence on heat loss.

Figure 6(b) and 6(c) show that stack heat loss increases with the increase in %flue gas recirculation, and steam production decreases with the increase in %flue gas recirculation because of less heat applied into the boiler. It is noted that both of the optimal %flue gas recirculation and %excess air should be selected at the low value in order not to lose the heat through flue gas. From the discussion on section 4.1, the optimal %flue gas recirculation was 25% and the optimal %excess air was 5%. This provided 5,900 kg/hr of steam production.

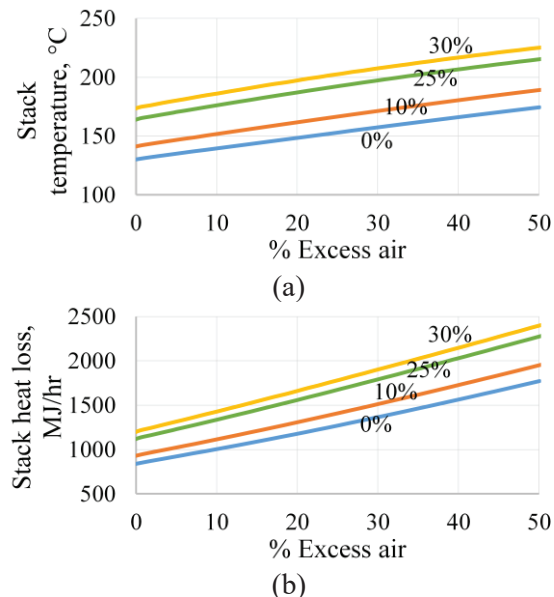


Figure 6. Effects of excess air at different amount of flue gas recirculation on (a) stack temperature, (b) stack heat loss, and (c) steam production.

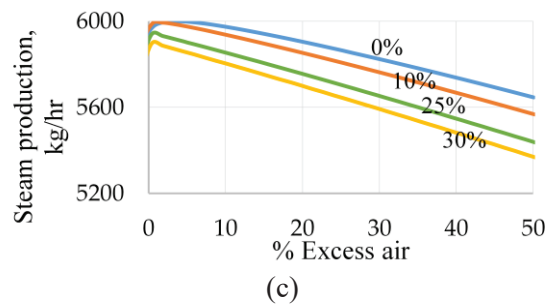


Figure 6. (cont.) Effects of excess air at different amount of flue gas recirculation on (a) stack temperature, (b) stack heat loss, and (c) steam production.

4.3. The Optimal operating conditions

As the above discussion on section 4.1 and 4.2, the optimal excess air and optimal flue gas recirculation was 5% and 25% respectively (or air flow rate of 5,730 kg/hr) at parawood chips

flow rate of 1,500 kg/hr as shown in Figure 7. They provided 6 CO ppm, 136 NO_x ppm, 52 SO_x ppm, and 5,900 kg/hr of steam production which the pollution emissions were under their limitations.

Results comparison between optimal conditions and original conditions are shown in Table 4. It can be seen that the optimal conditions provided the amount of emissions higher because the less amount of oxygen was supplied. Meanwhile, the amount of steam production was higher than original conditions about 32.4%.

Although the optimal excess air and flue gas recirculation can provide higher efficiency of the process. However, another method to improve more efficiency of the process was the heat recovery from remaining heat of flue gas which discussed in the next section.

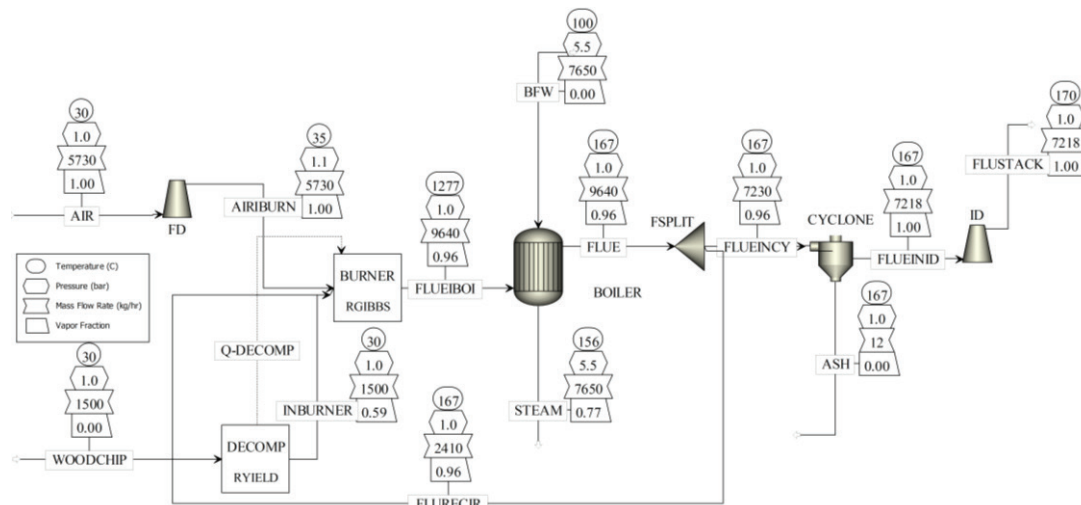


Figure 7. Process flow diagram under optimal conditions (Structure 2).

Table 4. Result comparison of the original process and optimal process.

Process	Emissions (CO, NO _x , SO _x), ppm	Steam production, kg/hr
Original conditions at 168% excess air (17,719 kg/hr)	0.01, 22, 32	4,457
Optimal conditions at 5% excess air (5,730 kg/hr) and 25% FGR	7, 136, 52	5,900

5. Applying air preheater for heat recovery purpose

The objective of this section is to improve the efficiency of the process by using the heat recovery method. The remaining heat of flue gas was transferred through fresh air by shell and tube heat exchanger called air preheater.

5.1. Theoretical design of air preheater

In this work, the requirement of air temperature is higher than 70 °C. The design method based on the theoretical design refers to Sukmanee (2015) [20]. Air preheater was a shell and tube heat exchanger, which flue gas flowed inside the tubes and air flowed outside. One tube pass was used to prevent fouling of flue gas. The design assumptions were no heat loss, as well as

properties of flue gas and air were constant. Operating and properties data for design is shown in Table 5. Designed air preheater specification is shown in Table 6.

5.2. Process simulation combined with air preheater by Aspen Plus

Figure 8 shows the proposed process flow diagram combined with air preheater. The air preheater was used to heat the AIR stream by using the energy from the FLUEINEX stream. At the optimal operating conditions (1,500 kg/hr of parawood chips, 5,730 kg/hr or 5% excess air, and 25% flue gas recirculation), air temperature was heated up to 82 °C. The simulation results of were shown in Table 7.

It is noted that the effect of preheated air provided more supplied heat which can produce a higher amount of steam. However, the emissions also increased but not more than the limitations. For results of steam production, the optimal process condition with air preheater provided steam production more than the original process about 35.4 % and provided steam production more than the optimal process condition without air preheater about 2.2%.

Table 5. Operating and properties data for air preheater design.

Properties	Shell side (Air)	Tube side (Flue gas)
Molecular weight (kg/kmol)	29	28
Mass flow rate* (kg/h)	6,876	8,662
Density (kg/m ³)	1.16	1.00
Heat capacity (kJ/kg-K)	1.02	1.05
Absolute viscosity (mPa-s)	0.020	0.022
Conduction coefficient (W/m.°C)	0.026	0.050
Inlet temperature (°C)	30	170 °C
Outlet temperature (°C)	70 (defined)	139 (calculated)
Pressure inlet (kPa)	105	103

*; Mass flow rate was got from simulation but added 20% for over design.

Table 6. Designed air preheater specification.

Detail	Shell side (Air)	Tube side (Flue gas)
Mass flow (kg/h)	6,876	8,662
Inlet Temperature (°C)	30	170
Outlet Temperature (°C)	70	139
Heat duty (kW)	78.08	
No. pass	1	1
Tube Arrangement		Triangular stainless 304
Tube outside diameter (mm)		88.9
Tube pitch (mm)		118.2
Number of Tube		41
Inside diameter (mm)	1,200	82.09
Thickness (mm)	6	3.404
Baffle		
Type	Segmental	
% cut	25 [21]	
Spacing (mm)	1,500.00	
Heat transfer coefficient (W/m ² .°C)	17.55	
Required heating area (m ²)	43.42	
Existing heating area (m ²)	51.53	

For result of boiler heat duty, the optimal process condition with air preheater provided heat recovery compared with the original process about 29% and provided heat recovery compared with the optimal process condition without air preheater about 1.9%.

It can be seen that the effect of preheated air from 30 °C to 82 °C slightly increased the thermal efficiency and steam productivity. It is suggested that the temperature of preheated air should be more but must consider the increase in heat exchanger price and also pollution emissions.

Table 7. Result comparison of the original process and optimal process with and without air preheater.

Process	Emissions (CO, NO _x , SO _x), ppm	Steam production, kg/hr	Boiler heat duty, MJ/hr
1	0.01, 22, 32	4,457	11,398
2	7, 136, 52	5,900 (32.4% increase compared to 1)	14,422 (26.5% recovery compared to 1)
3	10, 172, 59	6,033 (35.4% increase compared to 1)	14,699 (29% recovery compared to 1)

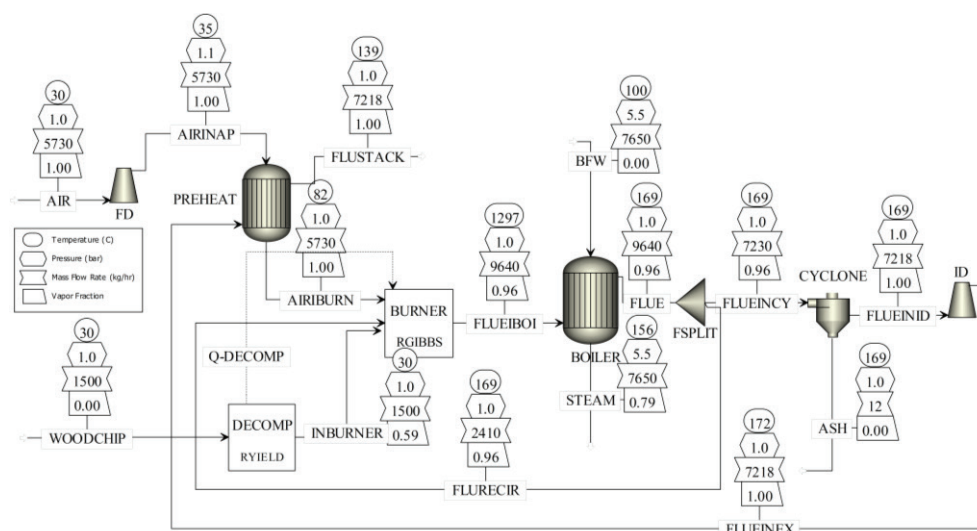
1 is Original process, 2 is Optimal process condition, and 3 is Optimal process condition combined with air preheater

6. Conventional controller design by Aspen Dynamics

The aim of this section is to design PID controller for regulating the optimal condition by adjusting air to fuel ratio. The pollution emissions which consisted of CO, NO_x, and SO_x including steam production were monitored. Moreover, the pressure and level of boiler were controlled for safety purpose.

6.1. Switch the steady state model in Aspen Plus to dynamic model in Aspen Dynamics

The steady state model in Aspen Plus was switched to the dynamic model in Aspen Dynamics using flow driven mode. Since solid component (C in INBURNER) and non-conventional components (WOODCHIP and ASH) were not allowed in the Aspen Dynamics, then RYIELD module had to be removed.

**Figure 8.** Process flow diagram under optimal conditions combined with air preheater (Structure 3).

The approximate model to handle these problems were proposed and described as follows:

1. Ash was assumed to be separated completely from flue gas, then it was not considered in this case. As a result, the cyclone unit was removed.

2. All of the components of parawood chips (C, H, O, S, and N) were totally decomposed into gas phase products (INBURNER). Then, C and H elements were replaced by organic compound or hydrocarbon (C_nH_n) [6]. Two criteria considered here were as following: (1) major

content of wood chips is cellulose, which has the molecular formula as (C₆H₁₀O₅)_n and decomposition temperature about 200 °C [22], and (2) From ultimate analysis, atomic ratio of C:H in ash free basis is 8.37:1 by mass. From both criteria above, C₁₂H₁₈ was then chosen, since it has 203 °C decomposed temperature and the mass ratio of C:H is 8:1. Figure 9 shows the approximate model of parawood chips decomposition.

3. The heating energy value of “Q-DECOMP” stream represented the enthalpy change in the decomposition process of parawood chips into its constituent elements [13].

This energy had to be transferred from BURNER (R-GIBBS) to DECOMP (R-YIELDS). Since DECOMP was removed due to a limitation of Aspen Dynamics. Then a prediction equation of the Q-DECOMP was developed in this work as a function of wood chips flow rate (1300 - 2200 kg/hr) and wood chips moisture content (30 - 50%). In this case, the relationship between the enthalpy of wood chips decomposition (Q-DECOMP) and wood chips flow rate at different moisture content was a linear function as shown in Figure 10. Hence, the approximate model equation for QDECOMP was developed as shown in equation (3).

$$\text{QDECOMP} = \text{Wood chip flow rate} \times [(569.13 \times \text{Moisture content mass frac}) - 1246.2] \quad (3)$$

4. In order to control the level and pressure of boiler, boiler needed to be changed from "HEATX" to "FLASH2" as shown in Figure 11. The vessel type was also changed from "Instantaneous" to "Vertical" with 4 meters of length and 1 meter of diameter. The unit name "HEATX" was added for carrying the heat from flue gas to boiler which the value of heat duty (stream "QTOBOIL") needed to manually specified in dynamic model by using the value from steady state model.



Figure 9. Approximate model of wood chips decomposition.

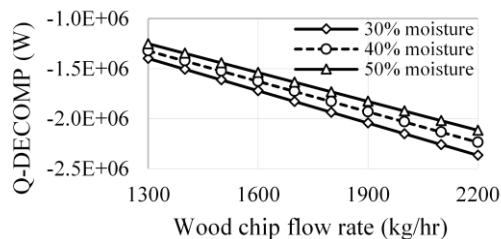


Figure 10. Relationship between heating value Q-DECOMP and wood chips flow rate at different moisture content.

6.2. Control loop description

Figure 12 shows the process simulation developed by Aspen Dynamics. There were a total of 11 loops which consisted of 5 loops of controllers (loops number 1-5), 2 loops of heat

calculators (loops number 6-7), and 4 loops of indicators (loop number 8-11).

1. First, the loop number 1 was a ratio controller between air flow rate and wood chips flow rate. It calculated the optimal set point of air to fuel ratio (A/F). The air to fuel ratio depended on the moisture content of wood chips as shown in Figure 11. It can be seen that it was the 4th order polynomial relationship between A/F and moisture content at 30-50 wt% (equation 4). The result of optimal A/F at 30-50 wt% moisture content was shown in Table 8. From result, the wood chips with lower moisture content meant a higher amount of combustible elements which needed a higher air flow rate in the combustion. And, they provided a higher amount of CO and NO_x ppm and steam production. In the block "AF_calc" as shown in Figure 11 was used for calculating the A/F ratio by using equation 4 and then converting to air flow rate.

$$\begin{aligned} A/F = & -2838.5 \times \text{moist}^4 + 4534.9 \times \text{moist}^3 \\ & -2664.1 \times \text{moist}^2 + 678.71 \times \text{moist} - 58.963 \end{aligned} \quad (4)$$

Where; **moist** is mass fraction of moisture content of wood chips.

2 and 3. "Steam_Flowrate" and "BOILER_LC" were override control. The controlled variables of both controllers were different. For "Steam_Flowrate" controller, the controlled variable was flow rate of steam production and another "BOILER_LC" controller was a level control of boiler which set point was defined in the range of 2.5 to 3.5 meters. While the manipulated variable of both controllers was the same which was boiler feed water flow rate. Only one signal of controller output was selected by the selector which was the high selector in this case. Consider the situation, if the steam flow rate went below its set point, the output signal was then higher and now it was higher than output signal of level controller. The selector was then choosing the output signal from steam flow rate controller and was then sent the signal to adjust boiler feed water flow rate.

4. "BOILER_Drain" was used for an emergency case when the water level of boiler was too high (higher than 3.5 meters).

5. "BOILER_PC" was the boiler pressure controller with the manipulated variable was the steam flow rate.

6. “QDECOMP” loop was used for calculation of decomposition heating value of wood chips by using equation (3).

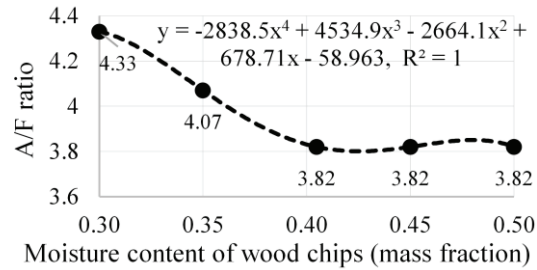


Figure 11. Relationship between optimal A/F ratio and moisture content of wood chips.

Table 8. The result of optimal A/F ratio at different moisture content of wood chips.

Wood chips moisture content, mass fraction	Air flow rate, kg/hr	%Excess air	A/F ratio	Emissions (CO, NO _x , SO _x), ppm	Steam production, kg/hr
0.30	6,500	2.3	4.33	(71, 177, 54)	7,502
0.35	6,100	3.1	4.07	(32, 174, 57)	6,808
0.4048	5,730	5.0	3.82	(10, 170, 59)	6,028
0.45	5,730	11.3	3.82	(1.5, 163, 59)	5,350
0.50	5,730	19.0	3.82	(0.16, 117, 59)	4,600

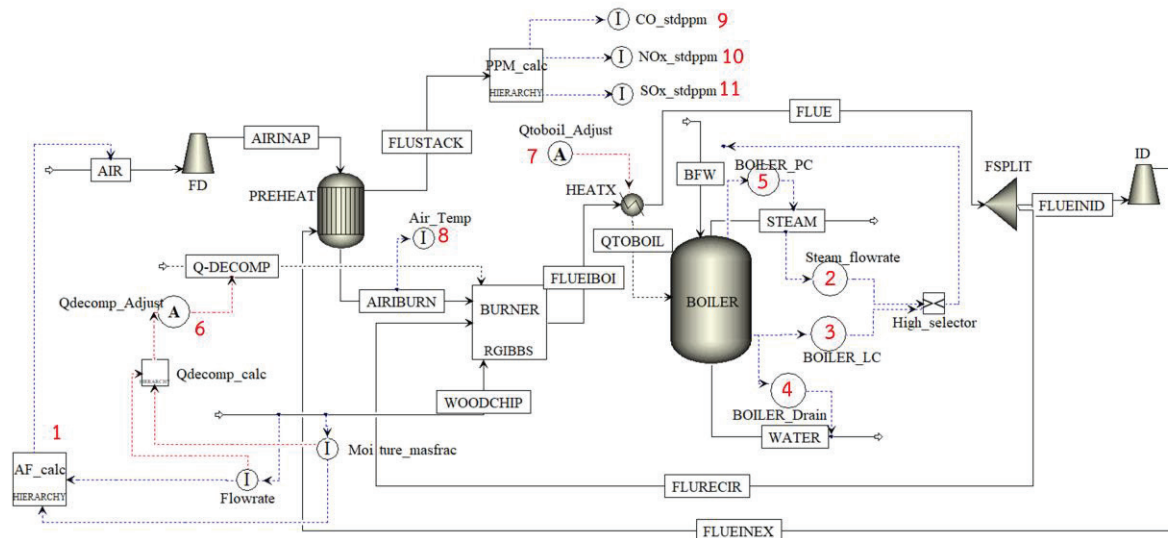


Figure 12. Process simulation with controllers by Aspen Dynamics

7. “QTOBOIL” was used for manual specifying of the heat duty of boiler which got from steady state model in Aspen plus.

8. “Air_Temp” was a preheated air temperature indicator.

9, 10, and 11. “CO_stdppm”, “NO_x_stdppm”, and “SO_x_stdppm” were the CO, NO_x, and SO_x, ppm indicators respectively.

6.3. Robustness test

Robustness of controller was investigated in this section by slightly changing disturbance variables from their design conditions [23]. In this case, the disturbances consisted of wood chips flow rate, wood chips moisture content and inlet temperature of boiler feed water (BFW).

Figure 13 shows controller responses in case of the wood chips flow rate step-change. The wood chips flow rate was stepped down from 1,500 to 1,400 kg/hr at time 53 min. The air flow

rate was adjusted along the air to fuel ratio which was 3.82 from 5,730 kg/hr to 5,348 kg/hr. It can be seen that the dynamics were quite fast. The steam production instant decreased when the wood chips flow rate was decreased because the heat of combustion from fuel was decreased. After that, the BFW flow rate was continuous decreased in order to increase the steam production to its set point. As a result, the boiler level was decreased from 3.50 meter to 3.31 meter. For the emissions, all of CO, NO_x, and SO_x ppm increased due to the denominator of ppm, which was total volume flow, was decreased.

Figure 14 shows controller responses in case of the wood chips moisture content step-change. The moisture content was stepped up from 40.5% to 45% at time around 25 min. The steam flow rate instant decreased when the moisture content was increased. It can be seen that the steam flow

rate cannot reach the set point of 5,800 kg/hr of steam because when the BFW flow rate continuously decreased, the boiler level also continuously decreased until the minimum allowance at 2.5 meters the controller was switched from “Steam_flowrate” to “BOILER_LC” to maintain the boiler level higher than 2.5 meters. Then, the BFW flow rate was forced to increase by “BOILER_LC” controller. It is noted that the heat of combustion from wood chips at 1500 kg/hr and 45% moisture content was not enough for producing steam at 5,800 kg/hr. It should be supplied more fuel or should be supplied fuel with lower moisture content. Table 9 shows the possible maximum steam production at different wood chips flow rate and moisture content.

Figure 15 shows controller responses in case of the BFW inlet temperature step-change. The BFW inlet temperature was stepped down from 100°C to 80°C at time around 28 min. The controllers can perfectly maintain their set points.

These results show that the dynamic model can be self-balanced although disturbance occurred. However, the caution was that the defined set point of steam production must be related together with wood chips flow rate and wood chips moisture content as shown in Table 9.

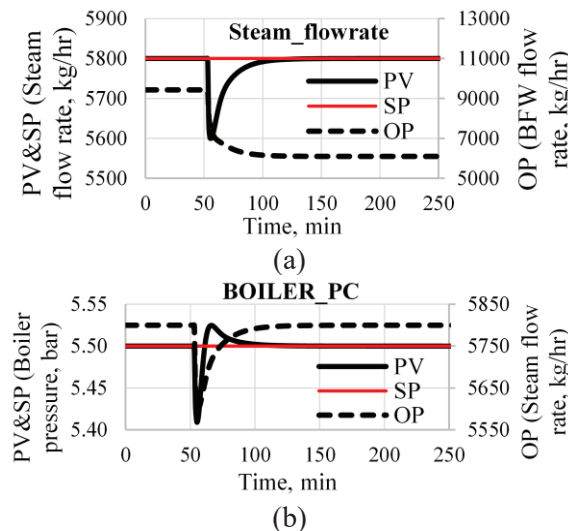


Figure 13. Robustness test in case of wood chips flow rate change (from 1,500 kg/hr to 1,400 kg/hr).

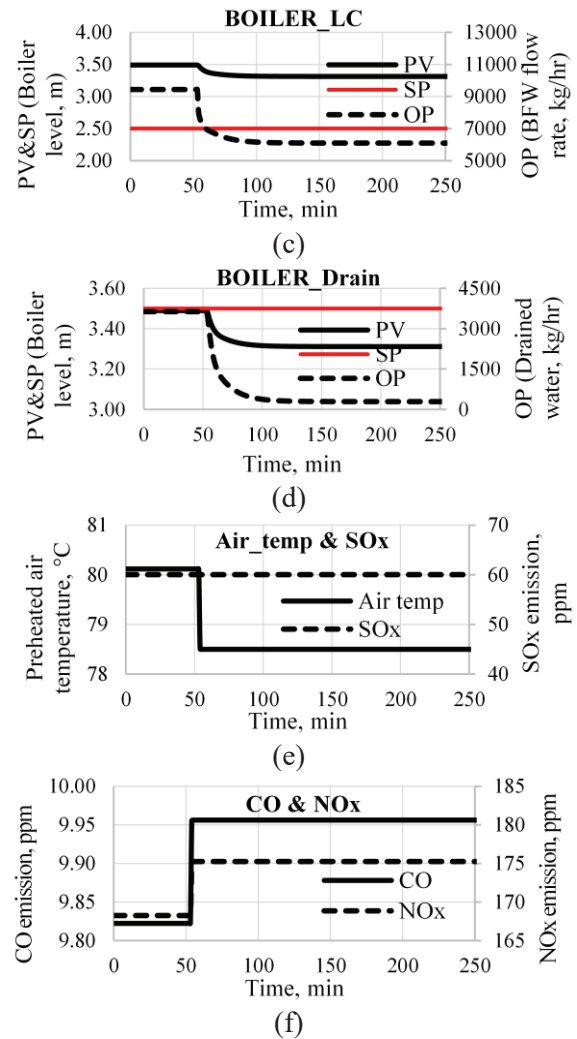


Figure 13. (cont.) Robustness test in case of wood chips flow rate change (from 1,500 kg/hr to 1,400 kg/hr).

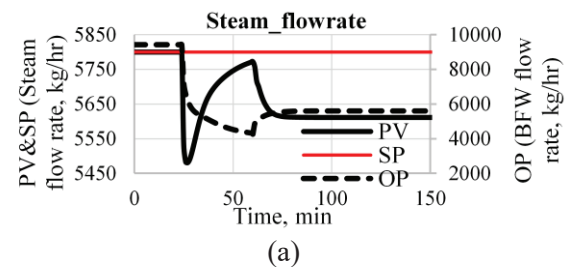


Figure 14. Robustness test in case of wood chips moisture content change (from 40.5 wt% to 45 wt%).

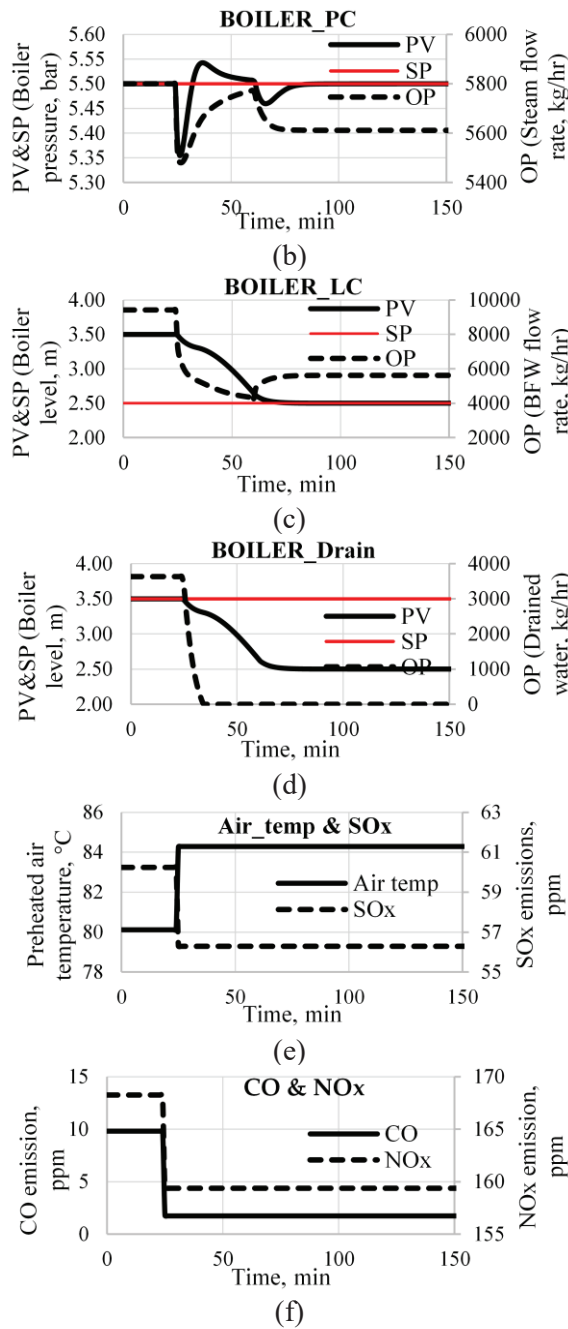


Figure 14. (cont.) Robustness test in case of wood chips moisture content change (from 40.5 wt% to 45 wt%).

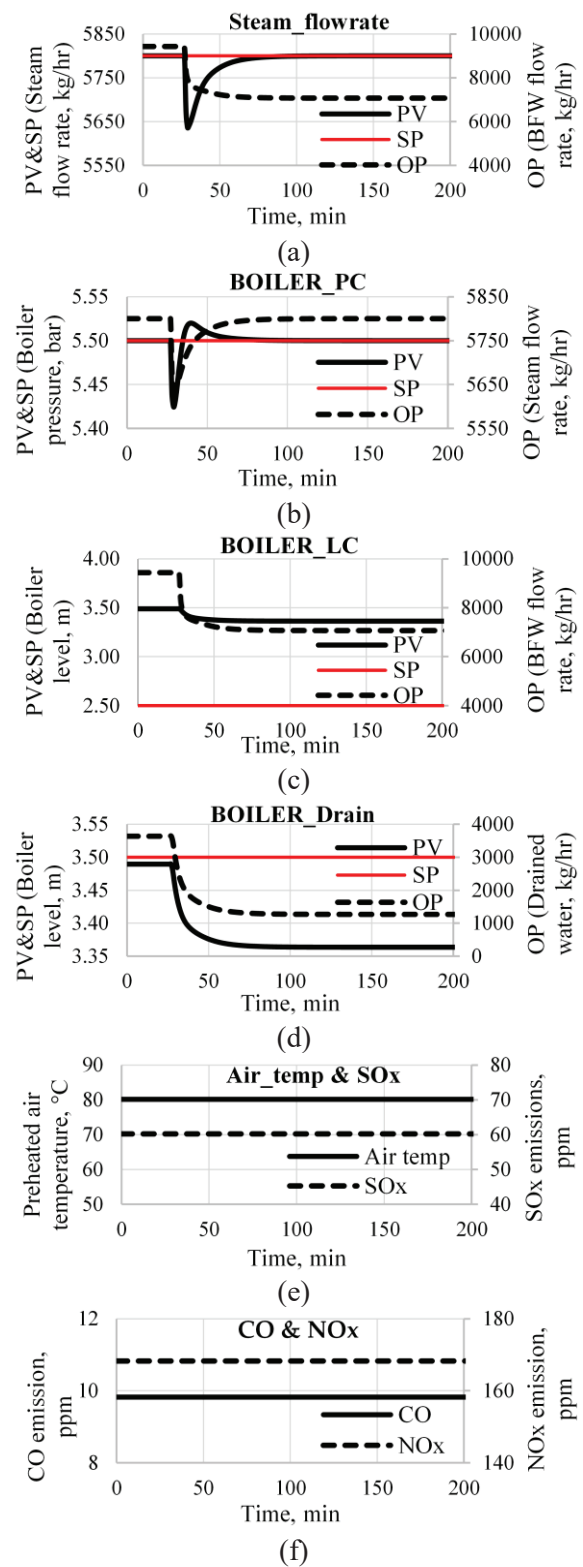


Figure 15. (cont.) Robustness test in case of BFW inlet temperature change (from 100 to 80 °C).

Table 9. Possible maximum steam production at different wood chips flow rate and moisture content.

Wood chips flow rate, kg/hr	Possible maximum steam production, kg/hr
At moisture content 30 wt%.	
1,300	6,365
1,400	6,809
1,445	7,000
At moisture content 35 wt%.	
1,300	5,836
1,400	6,248
1,500	6,650
1,590	7,000
At moisture content 40.48 wt%.	
1,300	5,247
1,400	5,620
1,500	5,985
1,600	6,342
1,700	6,693
1,790	7,000
At moisture content 45 wt%.	
1,300	4,740
1,400	5,076
1,500	5,406
1,600	5,729
1,700	6,045
2,000	6,953
At moisture content 50 wt%.	
1,300	4,179
1,400	4,475
1,500	4,766
1,600	5,050
1,700	5,328
2,000	6,126

7. Conclusion

This work was divided into 2 main sections. First, a steady-state simulation of wood chips combustion boiler process was achieved by using Aspen Plus v.9. The optimal condition of air to fuel ratio combined with the flue gas recirculation technique was determined in the sense of using energy to be cost effective and in the meanwhile, the emissions consisted of CO, NO_x, and SO_x were in their limitations. Furthermore, air preheater was designed and combined for energy recovery purpose.

In this case, manufacturing and pollution requirements are steam productivity of 4,000 to 7,000 kg/hr, the CO, NO_x, and SO_x emissions are less than 690, 200, and 60 ppm respectively and

preheated air temperature more than 70 °C. The simulation model was further used for description of excess air and flue gas recirculation effect on the various factors consisted of CO, NO_x, SO_x emissions, flame temperature, stack temperature, stack heat loss, and steam production.

Second, a dynamic simulation scheme of wood chips combustion boiler process was proposed using Aspen Dynamics v.9. There had 5 controllers consisted of air to fuel ratio controller which was ratio controller type, override control between boiler level and steam flow rate control which were both PI controller, boiler pressure control which was PID controller, and boiler drained water control which was P controller. Robustness tests were performed to prove the performance of the controller by stepping change the disturbance variables consisted of wood chips flow rate, wood chips moisture content, and BFW temperature. The simulation results can be summarized as follows.

1. Model validation was achieved by comparing with the sets of measured data collected by wood manufacturing company in the south of Thailand. Prediction error of flue gas temperature at stack is less than 5% (considering with 26 scenarios of the collected data).

2. CO emissions release hugely at a lower excess air than 0% because incomplete combustion has occurred. After that, CO emissions decrease considerably with increasing %excess air.

3. NO_x reaches a maximum value at around 10-15% excess air and then continuously decrease when increasing %excess air.

4. SO_x comes from the sulfur (S) contained in fuel reacts with the O₂ contained in combustion air. SO_x formation directly depends on the combustion temperature.

5. Increase of excess air leads to increase of the stack temperature and stack heat loss.

6. For the case of steam production, less heat from flue gas applies to generate steam when increasing excess air since the heat loss at stack increases. As a result, steam production also decreases when increasing excess air

7. Flue gas recirculation technique was applied for reducing NO_x emissions. 25% flue gas recirculation provides the reduction of NO_x around 70% compared with the process without flue gas recirculation.

8. Optimal operating condition of the process is 5% excess air (5,730 kg/hr air flow

rate) and 25% flue gas recirculation with 40.5 wt% of moisture content of wood chips and 1,500 kg/hr of wood chips flow rate. It can produce steam higher than original process condition (168% excess air and no flue gas recirculation) about 32.4%.

9. Designed air preheater type is shell and tube heat exchanger. Flue gas is inside tubes and air is outside. The exchanger consists of 41 tubes with 88.90 mm OD, 3.405 mm thickness and 1,212 mm OD of shell with 6 mm thickness (1 tube pass and 1 shell pass). The preheated air was heated up from 30 °C to 82 °C. The effect of preheated air provides more supplied heat which can produce a higher amount of steam. It provides

steam production more than the optimal process condition without air preheater about 2.2%.

10. For the dynamic model, Robustness tests were performed to prove the performance of the controller by stepping change the disturbance variables consisted of wood chips flow rate, wood chips moisture content, and BFW temperature. The results show that the dynamic model can be self-balanced although disturbance occurred. However, the caution is that the defined set point of steam production must be related together with wood chips flow rate and wood chips moisture content as shown in Table 9.

REFERENCES

- [1] Forbes Marshall Ltd. The Process of Combustion. [online] available: https://www.forbesmarshall.com/fm_micro/news_room.aspx?Id=Boilers&nid=179
- [2] Mallikarjuna, V., Jashuva, N., Rama, B. and Reddy, B. Improving Boiler Efficiency by Using Air Preheater. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Applied Sciences*, 2014; 3(2): 11–24.
- [3] Boilers Guide. Working Principle of Boiler. 2014. [online] available: <http://www.boilers.guide/working-principle>.
- [4] Pite, J., Mizakova, J. and Hosovsky, A. Biomass Combustion Control and Stabilization Using Low-Cost Sensors. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013; 5: 1-7.
- [5] Shi, B., Hu, J., Peng, H., and Ishizuka, S. Effects of Internal Flue Gas Recirculation Rate on the NO_x Emission in a Methane / Air Premixed Flame. *Combustion and Flame*, 2018; 188: 199–211.
- [6] Luyben, W. L., and Robinson, P. J. Simple Dynamic Gasifier Model That Runs in Aspen Dynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008; 47(20): 7784–7792.
- [7] Jin, B., Zhao, H. and Zheng, C. Dynamic Modeling and Control for Pulverized-Coal-Fired Oxy-Combustion Boiler Island. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014; 30: 97–117.
- [8] Lan, W., Chen, G., Zhu, X., Wang, X., Liu, C. and Xu, B. Biomass Gasification-Gas Turbine Combustion for Power Generation System Model Based on ASPEN PLUS. *Science of the Total Environment*, 2018; 628–629: 1278–1286.
- [9] Gagliano, A., Nocera, F., Bruno, M. and Cardillo, G. Development of an Equilibrium-based Model of Gasification of Biomass by Aspen Plus. *Energy Procedia*, 2017; 111: 1010–1019.
- [10] Pei, X., He, B., Yan, L., Wang, C., Song, W. and Song, J. Process Simulation of Oxy-Fuel Combustion for a 300 MW Pulverized Coal-Fired Power Plant Using Aspen Plus. *Energy Conversion and Management*, 2013; 76: 581–587.
- [11] Doherty, W., Reynolds, A. and Kennedy, D. The Effect of Air Preheating in a Biomass CFB Gasifier Using ASPEN Plus Simulation. *Biomass and Bioenergy*, 2009; 33(9): 1158–1167.
- [12] Gamrat, S., Poraj, J., Bodys, J., Smolka, J. and Adamczyk, W. Influence of External Flue Gas Recirculation on Gas Combustion in a Coke Oven Heating System. *Fuel Processing Technology*, 2016; 152: 430–437.
- [13] Aspen Technology, Inc. Getting Started Modelling Processes with Solids. 2013. [online] available: http://profsite.um.ac.ir/~fanaei/_private/Solids%208_4.pdf
- [14] TSI Inc. Combustion Analysis Basics. 2004. [online] available: <https://inspectapedia.com/heat/Combustion-Analysis-Basics-tsi.pdf>

- [15] Ministry of Industry of Thailand. Determining the Amount of Impurities in the Air That is Discharged from the Factory. 2006. [online] available: <http://www.diw.go.th/hawk/law/air/A11.pdf>
- [16] Costa, M., Ruão, M. and Carvalho, M.G. On the Influence of Flue-Gas Recirculation on Pollutant Emissions from a Small-Scale Laboratory Furnace. *Archivum Combustionis*, 1996; 16(1-2): 77-86.
- [17] Abdelaal, M., El-Riedy, M. and El-Nahas, A. Effect of Flue Gas Recirculation on Burner Performance and Emission. *Journal of Al Azhar University Engineering Sector*, 2016; 11(41): 1275-1284.
- [18] Maloney, K. Flue Gas Recirculation for Stoker Boilers. FireBridge Inc. Understanding the Impact of Excess Air. [online] available: <https://www.firebridgeinc.com/blog/understanding-the-impact-of-excess-air/>
- [19] Sukmanee, S. Determining the Details of the Shell and Tube Heat Exchanger. Chemical Engineering Equipment Design, Audio Visual Center Department of Engineering Prince of Songkla University, Hatyai, Thailand, 2015; 9-1 – 9-19.
- [20] National Programme on Technology Enhanced Learning. Process Design of Heat Exchanger. [online] available: <https://nptel.ac.in/courses/103103027/pdf/mod1.pdf>
- [21] Martínez, I. Fuel Properties. [online] available: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c15/Fuel%20properties.pdf>
- [22] Wikipedia. Control Theory. [online] available: https://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory



การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันชีวภาพโดยกระบวนการ เผาแบบไร้อากาศบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ Bio Fuel from Bio-Oil by Pyrolytic Catalysis on Dolomite

สว่างทิพย์ ผลเลิศ¹ ทินกร คำแสน¹ และ กิติโรจน์ หวันตาหลา^{1, 2, 3*}

Sawangthip Palalerd¹ Tinakorn Kumsaen¹ and Kitirote Wantala^{1, 2, 3*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002 ประเทศไทย

²ศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002 ประเทศไทย

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

²Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand

*E-mail: kitirote@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันชีวภาพ (น้ำมันปาล์ม (PO) และน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (WCO)) ซึ่งการทดลองนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแฟลคเบดที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ WHSV = 0.5 h⁻¹ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะทำการอัดขึ้นรูปเป็นเม็ดและเผาที่ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการวิเคราะห์ด้วย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) X-ray diffraction (XRD) N₂ adsorption-desorption และ Field emission scanning mlectron Microscope (FESEM) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย CaO SiO₂ และ Fe₂O₃ นอกจากนั้นแล้วลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการเผาพบเฟสของ Ca(OH)₂ CaCO₃ CaO SiO₂ และหลังจากการเผาพบว่ามีเฟสของ Ca(OH)₂ CaO SiO₂ ซึ่งผลหลังจากการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้พื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนเฟสหรือการสลายตัวทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปออกไซด์ สันฐานวิทของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนการเผาประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่และมีลักษณะราบเรียบซึ่งแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์หลังการเผาซึ่งมีลักษณะอนุภาคเล็กลงและขรุขระ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาพบว่า น้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีค่าปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 90% นอกจากนั้นแล้วการทำปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 450°C สามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้สูงสุด ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ของ น้ำมันพืชที่ใช้แล้วที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 550°C สามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้สูงที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยามากขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D86 แยกได้เป็น แก๊สโซลีนและดีเซล ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ ค่าความหนืด ค่าความร้อน ซึ่งค่าความร้อนและค่าความหนืดที่ได้มีค่าผ่านตามมาตรฐาน ดังนั้นกระบวนการนี้สามารถผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: กระบวนการต่อเนื่อง น้ำมันปาล์ม น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

ABSTRACT

The aim of this work was to study the efficiency of biofuel production from bio-oils (Palm oil (PO) and Waste cooking oil (WCO)) in pack-bed reactor with reaction temperature at 450, 500, 550°C under atmospheric pressure and WHSV of 0.5 h⁻¹. The dolomite as a catalyst were pressed to cylindrical pellets and then calcined at 600°C for 4 hr. The physical and chemical properties of catalysts were characterized by X-ray fluorescence spectroscopy (XRF), X-ray diffraction (XRD), N₂ adsorption-desorption and Field emission scanning electron microscope (FE-SEM). The results found that the main compositions of catalyst were CaO, SiO₂ and Fe₂O₃. In addition, the crystalline structures of catalyst before calcination appeared Ca(OH)₂, CaCO₃, CaO and SiO₂. However, after calcination the crystalline structures showed Ca(OH)₂, CaO, SiO₂. The specific surface area decreased because of the phase transformation and thermal decomposition to oxide form of catalyst. The surface morphology of dolomite before calcination showed large particle sizes and smooth surface. The morphology was different after calcination, which obvious in small particle sizes and roughness surface. The highest pyrolytic oil products of PO and WCO were about 90%. Additionally, the products of PO reacted at 450°C gave the highest products, whereas the products of WCO reacted at 550°C showed the highest product yield. The liquid products were distilled following ASTM D86 to separate gasoline and diesel oils. Then, the properties of distilled products were analyzed for viscosity and heating value following ASTM D445 and ASTM D240, respectively. The heating value and viscosity of distilled products followed the standard values. Therefore, this process can produce the bio-fuel oils.

Keywords: Continuous process; Palm oil; Waste cooking oil; Dolomite catalyst

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งธรรมชาติสูงขึ้นมีผลมาจากการขาดแคลนของพลังงานเชื้อเพลิงที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ปิโตรเลียม ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งจัดเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถหามาทดแทนได้และมีปริมาณลดลงทุกปี ทำให้ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าน้ำมันดิบ 979 พันบาร์เรลต่อวันหรือ 14,009 ล้านลิตรต่อวัน นอกจากนั้นแล้วปริมาณการใช้น้ำมันสำเร็จรูป 149 ล้านลิตรต่อวันราคาน้ำมัน 69.49 ดอลลาร์/บาร์เรล [1] ซึ่งเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ประเทศไทยพึ่งพาการใช้พลังงานทดแทน เช่น โดยปัจจุบันมีการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงในการใช้งานรูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะที่ใช้ในภาคขนส่งทั้งทางบก น้ำ และอากาศ มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาวัตถุดิบภายในประเทศ เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็นพลังงานทดแทนเรียกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพและสามารถแปรรูปน้ำมันชีวภาพเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพด้วย 2 กระบวนการหลักๆ คือ ผ่านกระบวนการทางความร้อน การสกัดด้วยตัวทำละลาย ส่วนใหญ่แล้วนิยมการใช้กระบวนการทางความร้อน เช่น กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการานเอสเทอโรฟิเคชัน ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ โดยมีการใช้ CaO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากมูลไก่ [2] ด้วยกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชันพบว่าสามารถผลิตไบโอดีเซลได้ถึง 90% แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าความเป็นด่างสูงทำให้เกิดสบู่มผลพลอยได้ (by product) จากกระบวนการคือ กลีเซอรอลและน้ำเสียจากกระบวนการ ต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่แม่น้ำ ดังนั้นกระบวนการทางเลือกอื่นโดยมีการใช้กระบวนการ fast pyrolysis [3] ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงเนื่องจากปริมาณออกซิเจนสูง ความชื้นสูงเสถียรภาพต่ำ ดังนั้นวิธีการที่สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพสูงและง่ายในการควบคุมกระบวนการคือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolytic Catalysis) ซึ่งได้มีการนำชีวมวลมาใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น การใช้ ZSM-5 [4, 5] ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากที่สุดใน การกำจัดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ (deoxygenation) จาก 39% เป็น 20.7-27.3% แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เป็นกรดสามารถทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่าง

รวดเร็วในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเนื่องจากการเกิด coking ใน channels ของ ZSM-5 ตามหลักการของ ลูอิส-บรอนสเตท [6] คือเกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งก่อให้เกิด carbonation ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยา coking ถ้าพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยามีความเป็นกรดสูงจะทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมของโค้กซึ่งโมเลกุลของการเกิดโค้กจะดูดซับบน lewis acid site หากหนาแน่นหรือสูงขึ้นจะทำให้เกิดสารประกอบออกซิเจนหลายชนิดและทำให้เกิดโค้กเร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุง ZSM-5 ใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกที่เป็นค่าพบว่าสามารถเพิ่มการเกิดอะโรมาติกส์และส่งผลให้คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพดีขึ้นโดยใช้ Al_2O_3 [7, 8] สามารถลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้จาก 41.68% เป็น 24% แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมีปริมาณที่น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ของไฮโดรคาร์บอนอะโรมาติกส์มีเพียง 7.4% ดังนั้นการพัฒนาอุตสาหกรรมด้านการใช้ตัวเร่งร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิสจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงธรรมชาติให้มีการสูญเสียผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด วิธีแก้ปัญหาคือการกำจัดออกซิเจนที่เหมาะสมโดยออกซิเจนในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกในรูปแบบ H_2O CO_2 CO [9, 10] และการยับยั้งการเกิดโค้กในกระบวนการ โดยใช้ MgO [11] เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพลดลงจาก 39% ได้เป็น 25% นอกจากนั้นแล้วพบว่าการใช้ CaO [12-14] เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความเป็นกรดที่เกิดจากการมีปริมาณออกซิเจนสูงได้และยังพบว่าการใช้ SiO_2 ในกระบวนการไพโรไลซิสร่วมกับกากของสับดำในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบ O_2 ช่วยในการยับยั้งการเกิดโค้ก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบต่างจึงสามารถกำจัดสารประกอบออกซิเจนจากน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้ และสามารถช่วยลดค่าความเป็นกรด ส่งผลให้คุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงมีความเสถียรมากขึ้น ดังนั้นโคโลไมท์ [15, 16] จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่

น่าสนใจเนื่องจากหาง่ายพบได้ตามธรรมชาติในแต่ละท้องถิ่นและโคโลไมท์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย CaCO_3 และ MgCO_3 [17-19] และมีเฟอร์ไรต์ ซิลิกา จำนวนเพียงเล็กน้อย เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกลุ่มโคโลไมท์คาร์บอนจะถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเฟสเป็น CaO และ MgO ซึ่ง CaO [18] เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพโดยจะเกิดกระบวนการ deoxygenation [3] สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพผ่านปฏิกิริยา cracking-decarboxylation และ decarbonylation ของไตรโอเลอิน (triolein) นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO สามารถดูดซับ CO_2 ได้มากทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพจากโคโลไมท์และทดสอบความเป็นไปได้ในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์ม โดยทำการแคลไซน์โคโลไมท์ ภายใต้อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังได้ศึกษาตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังศึกษาคุณลักษณะทางเคมีและกายของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคต่างๆดังนี้ การสลายตัวทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer - Differential thermal analyzer (DTG) โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray diffractometer (XRD) การสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) การศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) การศึกษาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง N_2 Adsorption Desorption และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM D445 และ ASTM D240 เป็นต้น

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

น้ำมันปาล์มโอเลอิน (ยี่ห้อ Aro ชุมพรอุตสาหกรรม น้ำมันปาล์มจำกัดมหาชน) น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (เทศบาลเมืองขอนแก่น) โดโลไมท์ (ตราดอกเตอร์ ชมรมถ่ายทอด เทคโนโลยีการเกษตรขอนแก่น) Potassium Hydroxide (85%V.S.CHEMHOUSE, Bangkok, Thailand), Ethanol (V.S. CHEM HOUSE, Bangkok, Thailand)

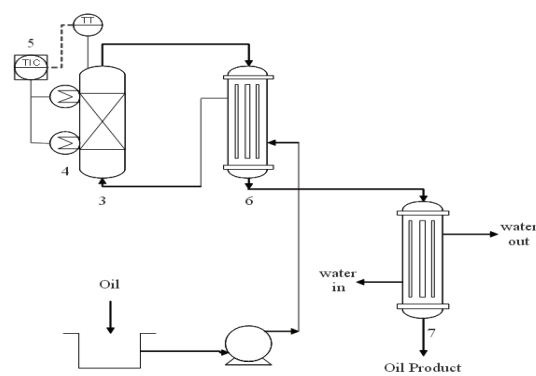
2.2 การเตรียมและการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการบดโดโลไมท์ด้วยเครื่อง ball mill เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปด้วย pellet machine และนำไปเผาในเตาเผาชนิด hot air oven furnace ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง วิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค N₂-Adsorption Desorption (ASPS2460, Micrometrics, USA) และคำนวณหาพื้นที่ผิวด้วยสมการ Brunauer-Emmett-Teller (BET) การวิเคราะห์ทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer-Differential thermal analyzer (DTG 60, Shimadzu (Asia Pacific) Pte Ltd, Singapore) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของสารที่หายไป วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมท์โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD Model D8 Discover, Bruker AXS, Germany) ใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 45 kV และกระแสไฟฟ้า 40 mA ช่วง 2 θ จาก 20° ถึง 80° ที่ความยาวคลื่น $\lambda = 1.5406$ (Å) วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy (XRF model XGT-5200) วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM, Helios NanoLab G3 FIB, USA)

2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

ขั้นตอนแรกของกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 250 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดแพคเกจ ดังรูปที่ 1 ป้อนน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม

และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แพคเกจที่ WHSV 0.5 h⁻¹ (120 ml/h) ให้ความร้อนตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 450°C 500°C และ 550°C น้ำมันชีวภาพจะกลายเป็นไอและทำปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากนั้นเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและจะถูกควบแน่นด้วยเครื่องควบแน่นเป็นของเหลวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และนำผลิตภัณฑ์พักไว้เพื่อรอให้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับน้ำมัน กรองน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส 100 ml นำไปกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D86 เมื่อผ่านกระบวนการกลั่นเสร็จแล้วนำน้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์ ค่าความหนืด ค่าความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D445 และ ASTM D240 ตามลำดับ



รูปที่ 1 กระบวนการไพโรไลซิส

1. ปิกเกอร์ใส่น้ำมัน
2. ปั๊ม Peristaltic
3. เครื่องปฏิกรณ์ชนิดแพคเกจ
4. heater
5. แผงควบคุมอุณหภูมิ
6. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
7. เครื่องควบแน่น

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

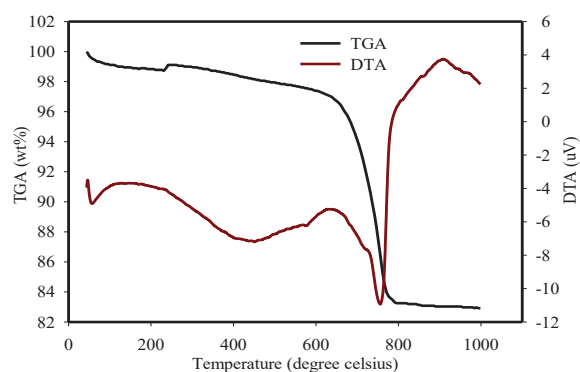
งานวิจัยนี้ศึกษาคุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมท์ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพและคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากการทำปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมท์เผาที่ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การวิเคราะห์น้ำหนักของตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไปต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis (DTG) เพื่อยืนยันอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาของตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบธาตุต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง X-Ray diffractometer (XRD) X-Ray fluorescence spectrometer (XRF) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง N_2 Adsorption-Desorption โดยใช้สมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) ทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิการไพโรไลซิส 450 500 และ 550°C และผลิตภัณฑ์ที่ได้กลั่นตามมาตรฐาน ASTM D86 โดยกลั่นตามจุดเดือดแบ่งออกเป็น แก๊ส-โซลีน ดีเซล และวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้แก่ วิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความหนืด ตามมาตรฐาน ASTM D240 และ ASTM D445 ตามลำดับ

3.1 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์

ในการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์ที่ผ่านการเผาถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis (DTG) ดังรูปที่ 2 เพื่อพิจารณาการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากเส้นกราฟของ TGA พบว่าลักษณะความชันของเส้นโค้งของกราฟจะลดลงเรื่อยๆ แสดงถึงเกิดการสลายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิ 600°C และเริ่มคงที่ที่อุณหภูมิ 786°C และการสลายตัวของโคโลไมท์สิ้นสุดลงที่อุณหภูมิ 800°C ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 800 °C จากงานวิจัยของ Santos และคณะ [18, 21] พบว่าที่ 589°C แสดงถึงการสลายตัวของโครงสร้างโคโลไมท์จาก $CaCO_3$ เกิดการฟอร์มตัวอยู่ในรูปของ CaO และ CO_2 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง

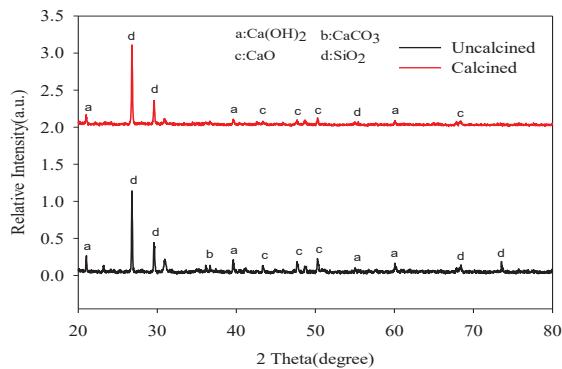
เลือกอุณหภูมิในการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์ เผาที่ 600 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) พบว่าโคโลไมท์ประกอบไปด้วยแคลเซียม (44.31%) เหล็ก (30.82%) ซิลิกอน (16.149%) และองค์ประกอบอื่นๆ อีกเล็กน้อยเช่น K_2O Al_2O_3 MnO และ TiO_2 จากงานวิจัยของ Sunarnoc และคณะ [4] แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของ CaO ในองค์ประกอบของโคโลไมท์ ส่งผลให้สามารถเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาวในน้ำมันเบนซินหรือดีเซล



รูปที่ 2 การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงความร้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์ เผาที่ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ดังรูปที่ 3 เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์ ที่องศาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (2θ) อยู่ในช่วง 20 - 80 องศาที่ความยาวคลื่น $\lambda = 1.5406$ (Å) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมท์ก่อนและหลังการเผาที่ 600°C พบว่าฟิสิกของสารประกอบที่เกิดขึ้นของโคโลไมท์ที่ไม่ได้ผ่านการเผา คือ 21° 39.9° 55.2° 59.2° ($Ca(OH)_2$) 36.1° ($CaCO_3$) 43.37° 47.69° 50.23° (CaO) และ 26.82° 29.65° 68.37° 73.56° (SiO_2) โคโลไมท์ที่ผ่านการเผา คือ $Ca(OH)_2$ (21° 39.9° 55.2°) CaO (43.37° 47.69° 50.23° 68.37°) SiO_2 (26.82°

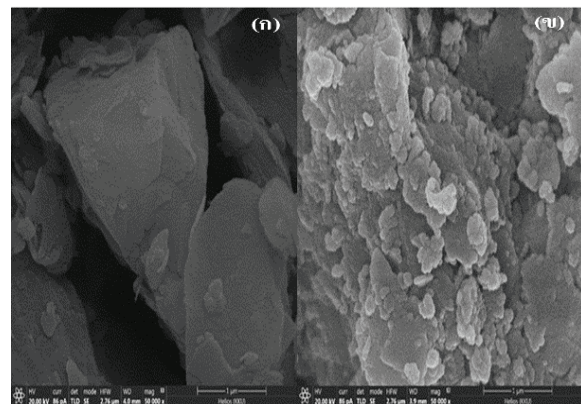
29.65°) [19] พบว่าโดโลไมต์เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง CaCO_3 เกิดการสลายตัวเนื่องจากเกิดเฟสของ CaO ซึ่งสอดคล้องกับผลของ TGA ที่อุณหภูมิการเผาที่ 600°C ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสอยู่ในรูปของออกไซด์เนื่องจากเกิดการสลายตัวของคาร์บอนเนต และพบว่าเมื่อผลต่อพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3 รูปแบบโครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์จากการวิเคราะห์ด้วย XRD

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของโดโลไมต์ก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค N_2 Adsorption-Desorption และคำนวณหาพื้นที่ผิวด้วยสมการ Brunauer-Emmet-Teller (BET) พบว่าโดโลไมต์มีพื้นที่ผิว 15 m^2/g และจากการแคลไซน์ที่ 600°C ทำให้พื้นที่ผิวลดลงซึ่งการลดลงของพื้นที่ผิวและรูพรุนแสดงให้เห็นว่าเกิดการดีคาร์บอนขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากการแคลไซน์ที่ 600°C ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวน้อย และจากงานวิจัยของ Santos และคณะ [18] บ่งบอกถึงการลดลงของพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ซึ่งบ่งบอกได้ว่าตำแหน่งที่ว่างไวในการทำปฏิกิริยา (active site) ไม่ได้เกิดการแพร่เข้าไปทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนแต่เกิดการทำปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวภายนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์โดยใช้เครื่อง FE-SEM ที่กำลังขยาย 50,000 เท่าดังรูปที่ 4 จากรูปที่ 4 (ก) สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่และพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะราบเรียบและเป็นเนื้อ

เดียวกันซึ่งแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เผาที่ 600°C ดังรูปที่ 4 (ข) สัณฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะอนุภาคเล็กลงและลักษณะพื้นผิวขรุขระ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Santos และคณะ [18] เนื่องจากกระบวนการเผาทำให้เกิดการแตกพันธะโมเลกุลของคาร์บอน ดังนั้นจึงเกิดการสลายตัวของกลุ่มคาร์บอนเนต เกิดการฟอร์มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์และ CaO



รูปที่ 4 ภาพถ่าย FE-SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของโดโลไมต์ (ก) โดโลไมต์ก่อนเผา (ข) โดโลไมต์เผาที่ 600°C

3.2 ผลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

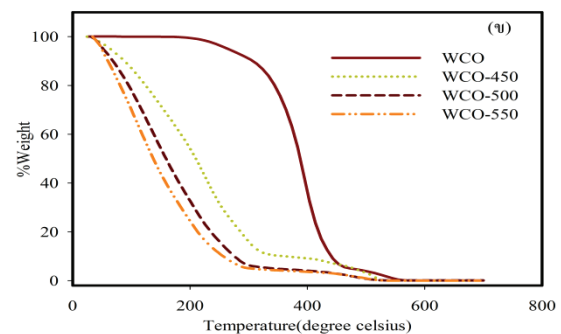
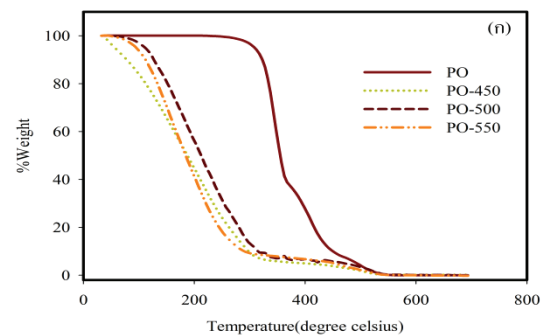
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มปริมাত্রที่ได้อยู่ในช่วง 70-90% และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วอยู่ในช่วง 83-90% ทุกอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 1 และพบว่าค่าเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ที่ได้ของน้ำมันปาล์มมีค่าน้อยกว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

ตารางที่ 1 ผลผลิตที่ไดจากการทำปฏิกิริยาและการกลั่น

ชนิดของน้ำมัน	อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	ปริมาณผลผลิตที่ได (%)	ปริมาณที่ได้จากการกลั่น (%)
น้ำมันปาล์ม (PO)	450°C	90	86
	500°C	70	73
	550°C	77	91
น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (WCO)	450°C	83	79
	500°C	87	85
	550°C	90	96

วิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550°C ผลการศึกษาความเสถียรทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว วิเคราะห์น้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30°C จนถึง 700°C ทดสอบภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ดังรูปที่ 5 (ก) น้ำมันปาล์ม พบว่ามีความเสถียรทางความร้อนเริ่มที่อุณหภูมิ 270°C และช่วงเกิดการสลายตัวของน้ำมันปาล์มอยู่ในช่วงระหว่าง 270-480°C และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันปาล์มเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 0 - 355°C และสลายตัวอย่างต่อเนื่องถึงอุณหภูมิ 445°C เป็นช่วงของอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุดหลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 445-500°C และสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 543°C เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันพืชที่ใช้แล้วดังรูปที่ 5 (ข) พบว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีความเสถียรภาพทางความร้อนเริ่มที่อุณหภูมิ 190°C และสลายตัวอยู่ในช่วง 190 - 430°C

และผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วช่วงแรกของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0 - 325°C และอุณหภูมิเริ่มคงที่ในช่วง 325 - 500°C ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วพบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันปาล์มและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มค่าเฉลี่ยต่ำกว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันอาจเป็นไปได้ว่าขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันซึ่งน้ำมันที่มีความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงจะมีความไวต่อความร้อนมากกว่าและมีสารประกอบทางเคมีที่ซับซ้อน ดังนั้นน้ำมันปาล์มจึงมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนมากกว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว [21]



รูปที่ 5 การสลายตัวทางความร้อนของ (ก) น้ำมันปาล์ม (PO) และ (ข) น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (WCO) เทียบกับผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่างกัน

และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D86 ดังรูปที่ 6 คือความสัมพัทธ์

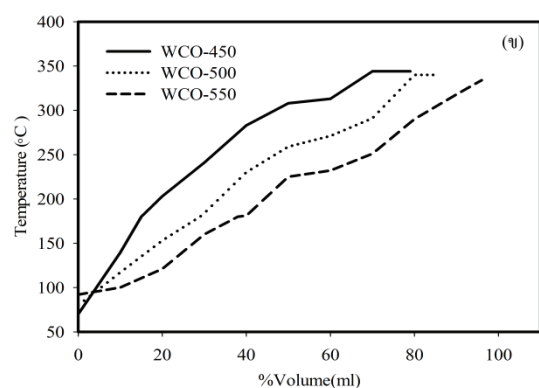
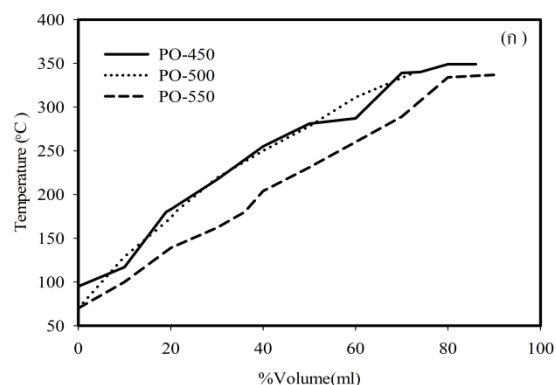
ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาตรของน้ำมันที่ได้จากการกลั่น เพื่อการศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 450, 500, 550°C ต่อปริมาตรการกลั่น ใน ทุก ๆ 10 ml ของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มตาม มาตรฐาน ASTM D86 และตารางที่ 1 แสดงปริมาตร ที่ได้จากกลั่นพบว่ามีความมากกว่า 70% และปริมาตรที่ กลั่นได้สูงสุดของน้ำมันปาล์มได้ 91% และน้ำมันพืชที่ใช้ แล้วได้ 96% ที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 550°C

ผลการกลั่นพบว่าน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 450 และ 500°C อุณหภูมิการกลั่นที่ใกล้เคียง กันและสูงกว่าที่ 550°C เมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสที่ สูงขึ้นพบว่าอุณหภูมิของการกลั่นมีค่าลดลง นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างปริมาตรที่ได้จากการกลั่นกับ อุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่ 450 500 550°C ดังรูปที่ 6 (ก) น้ำมันปาล์ม (ข) น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว พบว่าน้ำมันพืชที่ ใช้แล้วมีอุณหภูมิที่ได้จากการกลั่นต่ำกว่าน้ำมันปาล์มทุก อุณหภูมิการไพโรไลซิสและเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ การกลั่นระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันพืชที่ใช้แล้วพบว่า น้ำมันพืชที่ใช้แล้วสามารถกลั่นได้สูงสุดถึง 96% ที่ อุณหภูมิ 550°C เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผ่านการทำ ปฏิกิริยาคายความร้อนก่อนนำมาทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส ทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนใน การตัดพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้ แล้วจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การกลั่นมีอุณหภูมิที่สูงกว่าน้ำมัน ปาล์ม และเปรียบเทียบปริมาตรในการกลั่นดังรูปที่ 7 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของน้ำมันที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิ และชนิดของน้ำมันที่ต่างกัน ผลการกลั่นของน้ำมันจาก การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างกัน และเปรียบเทียบระหว่าง ปริมาตรของน้ำมันที่ได้จากการกลั่นระหว่างน้ำมันปาล์ม และน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ซึ่งการกลั่นแยกออกเป็น 2 ช่วง คือ อุณหภูมิช่วงของน้ำมันแก๊สโซลีนที่อุณหภูมิ 75-180°C (C_5-C_{12}) และช่วงของน้ำมันดีเซลที่อุณหภูมิ 180-350°C ($C_{13}-C_{20}$) ซึ่งจะใช้ปริมาณของน้ำมันที่ใช้ในการกลั่นแยก 100 ml พบว่าอุณหภูมิในการไพโรไลซิสมีผลต่อสัดส่วน เปอร์เซ็นต์ของแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นและน้ำมันดีเซลจะลดลง

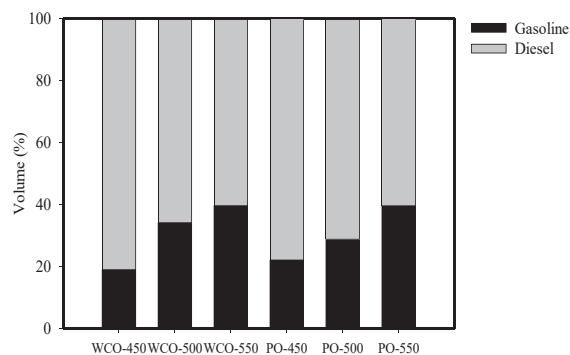
ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [10] การ เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้เกิดการสลายตัวของกรดไขมัน เกิดการตัดพันธะของสายโซ่คาร์บอนจึงทำให้น้ำมันแก๊ส โซลีนมีปริมาณสูงขึ้นและแก๊สโซลีนประกอบด้วยมวล โมเลกุลที่ต่ำคือ C_5-C_{12} เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการตัด พันธะมวลโมเลกุลของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้ดีและทำ ให้ให้น้ำมันดีเซลมีปริมาตรลดลงเนื่องจากเกิดการตัดพันธะ ครั้งที่สองของไอที่ควบแน่น (secondary cracking) [23, 24] ทำให้น้ำมันดีเซลลดลงเมื่ออุณหภูมิการไพโร-ไลซิสที่สูงขึ้น

3.3 ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง ชีวภาพ

ผลการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้จากการกลั่น ได้แก่ ค่าความร้อน และค่าความหนืดของน้ำมันตาม มาตรฐาน ASTM D240 และ ASTM D445 ตามลำดับ การวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันที่ได้จากการกลั่น เปรียบเทียบระหว่างน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว ของแก๊สโซลีนและดีเซลที่อุณหภูมิในการไพโรไลซิส ต่างกันดังรูปที่ 8 จากรูปที่ 8 (ก) พบว่าน้ำมันปาล์มมีค่า ความร้อนของแก๊สโซลีนสูงขึ้นแต่น้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีค่า ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการไพโรไลซิสและ ค่าความร้อนที่ได้สูงสุดคือที่อุณหภูมิ 550°C เท่ากับ 43.50 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จาก น้ำมันดีเซลของน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วดังรูปที่ 8 (ข) พบว่าของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วให้ค่าความร้อนลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสและค่า ความร้อนที่ได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 450°C เท่ากับ 42.67 MJ/kg และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐานเชิง พานิชย์ของน้ำมันแก๊สโซลีนอยู่ในช่วง 44-45 MJ/kg และของน้ำมันดีเซลอยู่ในช่วง 42-46 MJ/kg พบว่ามีค่า ความร้อนอยู่ในช่วงมาตรฐานเชิงพานิชย์ ซึ่งผลที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramírez-Verduzco และ คณะ [24]



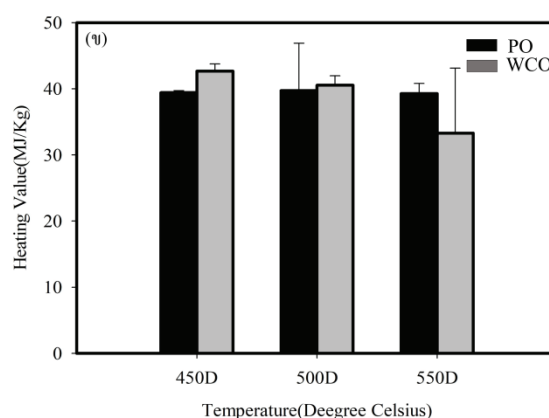
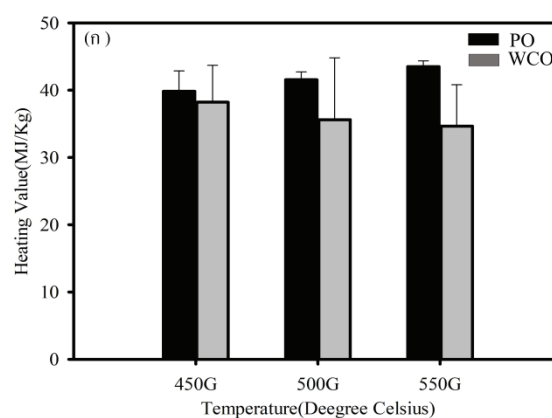
รูปที่ 6 อุณหภูมิกับปริมาตรที่ได้จากการกลั่นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของ (ก) น้ำมันปาล์ม (PO) (ข) น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (WCO)



รูปที่ 7 เปอร์เซนต์ปริมาตรของน้ำมันที่ได้จากการกลั่นที่อุณหภูมิและชนิดของน้ำมันที่ต่างกัน

ตารางที่ 2 ค่าความหนืด (cSt) น้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

อุณหภูมิในการไพโรไลซิส (°C)	น้ำมันปาล์ม		น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว	
	แก๊สโซลีน	ดีเซล	แก๊สโซลีน	ดีเซล
450	0.33	3.36	0.31	2.16
500	0.35	2.84	0.27	2.65
550	0.65	3.36	0.32	2.85



รูปที่ 8 ค่าความร้อนจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว (ก) แก๊สโซลีน (G) (ข) ดีเซล (D)

เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผ่านกระบวนการ secondary cracking จากการไพโรไลซิสในอุณหภูมิที่สูงทำให้มวลโมเลกุลของน้ำมันเล็กลงส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำกว่าน้ำมันปาล์มเนื่องจากน้ำมันปาล์มมีจำนวนมวลโมเลกุลและความหนาแน่นที่สูงทำให้ค่าความร้อนค่าความหนืดสูงขึ้นตามลำดับดังตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความหนืดของน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วตามมาตรฐาน ASTM

D445 ค่ามาตรฐานของน้ำมันแก๊สโซลีนอยู่ในช่วง 0.41-0.71 cSt และดีเซลอยู่ในช่วง 1.80-4.10 cSt การวิเคราะห์ค่าความหนืดพบว่าน้ำมันที่ได้จากการกลั่นมีค่าผ่านมาตรฐานและน้ำมันปาล์มมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้วและเมื่ออุณหภูมิการไพโรไลซิสสูงขึ้นค่าความหนืดสูงขึ้นเช่นกันและเปรียบเทียบระหว่างชนิดของน้ำมันพบว่าน้ำมันดีเซลมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำมันแก๊สโซลีนเนื่องจากค่าความหนาแน่นและจำนวนมวลโมเลกุลของคาร์บอนที่สูงกว่าน้ำมันแก๊สโซลีนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramírez-Verduzco และคณะ [24] และผลวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพปริมาณ 1 ลิตร จากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วภายใต้สภาวะการผลิตที่ได้ผลผลิตสูงสุด โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนวัตถุดิบ พบว่าน้ำมันปาล์มต้นทุน 36 บาท (1.292 ลิตร) น้ำมันพืชที่ใช้แล้วต้นทุน 16 บาท (1.157 ลิตร) และโดโลไมท์ต้นทุน 0.8 บาท (250 กรัม) และต้นทุนการผลิต คำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้าที่ใช้ของตัวให้ความร้อน (ค่าไฟฟ้าคิดที่ 3.60 บาทต่อหน่วย) ของน้ำมันปาล์มเท่ากับ 31.00 บาท (8.163 กิโลวัตต์ชั่วโมง) และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเท่ากับ 27.80 บาท (7.716 กิโลวัตต์ชั่วโมง)

เมื่อพิจารณาต้นทุนผลิตรวมของการผลิตจากน้ำมันปาล์มเท่ากับ 67.70 บาท และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเท่ากับ 44.70 บาทต่อการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพปริมาณ 1 ลิตร

4. สรุปผลการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นได้แก่ น้ำมันแก๊สโซลีนและดีเซลพบว่าน้ำมันแก๊สโซลีนสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น และพบว่าประสิทธิภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีค่าความร้อนผ่านมาตรฐานเชิงพาณิชย์ และน้ำมันพืชที่ใช้แล้วจะมีค่าความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นแล้วค่าความหนืดของน้ำมันที่ได้ผ่านมาตรฐานเช่นกันและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีค่าปริมาณสูงสุด 90%

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนวิจัยสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นและศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Ministry of Energy, 2019. [online] available: <http://www.dede.go.th>.
- [2] Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y. and Wang, C. H. Sustainable Biodiesel Production via Transesterification of Waste Cooking Oil by Using CaO Catalysts Prepared from Chicken Manure. *Energy Convers Manag*, 2016; 123: 487–497.
- [3] Chen, X., Chen, Y., Yang, H., Wang, X., Che, Q., Chen, W. and Chen, H. Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass: Selective Deoxygenation to Balance the Quality and Yield of Bio-Oil. *Bioresour Technol*, 2019; 273: 153–158.
- [4] Narno, S., Rochmadi, R., Mulyono, P., Aziz, M. and Budiman, A. Kinetic Study of Catalytic Cracking of Bio-Oil Over Silica-Alumina Catalyst. *BioResources*, 2018; 13(1): 1917–1929.
- [5] Chang, J.S., Cheng, J.C., Ling, T.R., Chern, J.M., Wang, G.B., Chou, T.C. and Kuo, C.T. Low Acid Value Bio-Gasoline and Bio-Diesel Made from Waste Cooking Oils Using a Fast Pyrolysis Process. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017; 73: 1–11.
- [6] Nakasaka, Y., Nishimura, J.I., Tago, T. and Masuda, T. Deactivation Mechanism of MFI-type Zeolites by Coke Formation during n-hexane Cracking. *Chemical Engineering Journal*, 2015; 278: 159–165.
- [7] Ooia, X.Y., Gao, W., Ong, H.C., Lee, H.V., Juan, J.C., Chen, W.H., Lee, K.T. Overview on Catalytic Deoxygenation for Biofuel Synthesis Using Metal Oxide Supported Catalysts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019; 112: 834–852.

- [8] Li, Y., Zhang, C., Liu, Y., Tang, S., Chen, G., Zhang, R. and Tang, X. Coke Formation on the Surface of Ni/HZSM-5 and Ni-Cu/HZSM-5 Catalysts During Bio-Oil Hydrodeoxygenation. *Fuel*, 2017; 189: 23–31.
- [9] Kay Lup, A. N., Abnisa, F., Daud, W. M. A.W., and Aroua, M. K. A Review on Reactivity and Stability of Heterogeneous Metal Catalysts for Deoxygenation of Bio-Oil Model Compounds. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2017; 56: 1–34.
- [10] Wang, S., Yuan, C., Esakkimuthu, S., Xu, L., Cao, B., Abomohra, A.E.F., Qian, L., Liu, L. and Hu, Y. Catalytic Pyrolysis of Waste Clay Oil to Produce High Quality Biofuel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2019; 141: 104633.
- [11] Charusiri, W. and Vitidsant, T. Upgrading Bio-Oil Produced from the Catalytic Pyrolysis of Sugarcane (*Saccharum Officinarum* L) Straw Using Calcined Dolomite. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2017; 6: 114–123.
- [12] Kalogiannis, K.G., Stefanidis, S.D., Karakoulia, S.A., Triantafyllidis, K.S., Yiannoulakis, H., Michailof, C. and Lappas, A.A. First Pilot Scale Study of Basic vs Acidic Catalysts in Biomass Pyrolysis: Deoxygenation Mechanisms and Catalyst Deactivation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2018; 238: 346–357.
- [13] Barros, F.J.S., Cecilia, J.A., Moreno-Tost, R., de Oliveira, M.F.G., Rodríguez-Castellón, E., Luna, F.M.T. and Vieira, R.S. Glycerol Oligomerization Using Low Cost Dolomite Catalyst. *Waste and Biomass Valorization*, 2020; 11:1499–1512.
- [14] Yu, J., Meng, D., Zhang, H., Gao, J., Zhang, Y., Jiao, T. and Liang, P. Study on Modification and Sulfur-Resistance Characteristics of Dolomite Catalysts over Wash Oil Catalytic Cracking. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018; 57(39): 12973–12979.
- [15] Li, H., Ma, H., Zhao, W., Li, X. and Long, J. Upgrading Lignin Bio-Oil for Oxygen-Containing Fuel Production Using Ni/MgO: Effect of the Catalyst Calcination Temperature. *Applied Energy*, 2019; 253: 113613.
- [16] Valle, B., Aramburu, B., Santiviago, C., Bilbao, J. and Gayubo, A. G. Upgrading of Bio-oil in a Continuous Process with Dolomite Catalyst. *Energy and Fuels*, 2014; 28(10): 6419–6428.
- [17] Kim, H., Shafaghat, H., Kim, J.K., Kang, B.S., Jeon, J.K., Jung, S.C., Lee, I.G. and Park, Y.K. Stabilization of Bio-Oil Over a Low Cost Dolomite Catalyst. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2018; 35(4): 922–925.
- [18] Santos, R. C. R., Vieira, R. B. and Valentini, A. Optimization Study in Biodiesel Production via Response Surface Methodology Using Dolomite as a Heterogeneous Catalyst. *Journal of Catalysis*, 2014; 2014: 1–11.
- [19] Hafriz, R. S. R. M., Salmiaton, A., Yunus, R. and Taufiq-Yap, Y. H. Green Biofuel Production via Catalytic Pyrolysis of Waste Cooking Oil using Malaysian Dolomite Catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2018; 13(3): 489–501.
- [20] Valle, B. García-Gómez, N., Remiro, A., Gayubo, A. G. and Bilbao, J. Cost-effective Upgrading of Biomass Pyrolysis Oil Using Activated Dolomite as a Basic Catalyst. *Fuel Processing Technology*, 2019; 195: 106142.
- [21] Ullah, Z., Bustam, M. A. and Man, Z. Characterization of Waste Palm Cooking Oil for Biodiesel Production. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2014; 5(2): 134–137.
- [22] Vargas, E. M., Neves, M. C., Tarelho, L. A. C. and Nunes, M. I. Solid Catalysts Obtained from Wastes for FAME Production Using Mixtures of Refined Palm Oil and Waste Cooking Oils. *Renewable Energy*, 2019; 136: 873–883.
- [23] Chuah, L. F., Klemeš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A. and Akbar, M. M. Influence of Fatty Acids in Waste Cooking Oil for Cleaner Biodiesel. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017; 19(3): 859–868.
- [24] Ramírez-Verduzco, L. F., Rodríguez-Rodríguez, J. E. and Jaramillo-Jacob, A. D. R. Predicting Cetane Number, Kinematic Viscosity, Density and Higher Heating Value of Biodiesel from Its Fatty Acid Methyl Ester Composition. *Fuel*, 2012; 91(1): 102–111.



ความดันกระแทกและพฤติกรรมของลำพุ่งจากการฉีดยาแบบ ไร้เข็มด้วยวิธีกระแทกที่มีต้นกำเนิดจากสปริงและแก๊ส Impact Pressure and Behavior of Liquid Jet Generated from IDM Needle Free-Jet Injection Powered by Spring and Gas

พลตรี วงษ์ประสานต์ วิระพันธ์ สีหามาน* กมลชนก อูระ และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง
Phontree Wongprasan Wirapan Seehanam* Kamonchanok Ura and
Kulachate Pianthong

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ถ.สดมภ์ ต.เมืองศรีโค

อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,
Warinchamrap, Ubonratchathani 34190, Thailand

*E-mail: wirapan.s@ubu.ac.th Tel.:086-8744606

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะและความดันกระแทกสูงสุดของลำพุ่งของเหลวความเร็วสูงที่สร้างจากหลักการกระแทก เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับนำส่งยาผ่านผิวหนัง ลำพุ่งสร้างจากอุปกรณ์ส่งยาที่ใช้ต้นกำเนิดจากสปริงและแก๊สเป็นกำลังขับ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของโมเมนตัมการชนของลูกปืนที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 - 1.1 kg.m/s เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 0.2 และ 0.3 mm และมีปริมาตรบรรจุ 0.2 และ 0.5 ml จากการศึกษาพบว่า ลำพุ่งมีความดันกระแทกสูงสุดประมาณ 5 - 90 MPa โดยจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อโมเมนตัมของลูกปืนมีค่าเพิ่มขึ้น และปริมาตรบรรจุของหัวฉีดน้อยลง รูปแบบความดันกระแทกมีลักษณะผันผวน เนื่องจากลำพุ่งมีลักษณะฉีดเป็นลูกๆหรือพัลส์ โดยพบปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นอย่างชัดเจนกับอุปกรณ์ที่ใช้ต้นกำเนิดจากแก๊สมากกว่าจากสปริง ซึ่งการฉีดเป็นพัลส์จะช่วยให้การเจาะและกระจายยาเข้าสู่เนื้อเยื่อได้ดี ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์ที่ใช้ต้นกำเนิดจากแก๊สจะสร้างลำพุ่งให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำส่งยาที่ดีกว่าที่ใช้ต้นกำเนิดจากสปริง

คำสำคัญ: ลำพุ่งความเร็วสูง หลักการกระแทก PVDF ความดันกระแทก

ABSTRACT

This research is to investigate the characteristic and impact pressure of the high speed liquid jet which is generated on the principle of Impact Driven Method (IDM) for the application of drug delivery through the skin. High speed liquid jet was generated from IDM needle free- jet injection device which use spring and gas as the power sources. In this study, projectile with momentum around 0.3 - 1.1 kg.m/s are used with the nozzle having 0.2 and 0.3 of orifice diameter and 0.2 and 0.5 ml of containing volumes. It is found that the devices generate the maximum impact pressure of around 5 - 90 MPa, These will increase when the momentum of the projectile is increased and the volume of the nozzle container is decreased. The impact pressure profiles is found highly fluctuated because of the pulsing

characteristics during the injection. These phenomena is clearly seen with devices that uses gas rather than springs as power. The pulse characteristics will enhances the jet efficiency due to the better penetration and dispersion of the drugs into the tissue target. Therefore, for drug delivery, the gas powered device will provide a more appropriate characteristics of jets giving a better delivery that than the jet powered by the spring.

Keywords: High-speed water jet, Impact Driven Method, PVDF, Jet impact pressure

1. บทนำ

ในปัจจุบันลำพุงความเร็วสูง (High -speed liquid jet) มีการนำไปประยุกต์ใช้กับงานอย่างกว้างขวาง เช่น การตัด เจาะ หรือขึ้นรูปวัสดุ ส่วนในทางการแพทย์นั้นได้ถูกนำมาใช้ในการส่งยาผ่านผิวหนังแทนเข็ม (Needle free jet injection) ซึ่งใช้สำหรับฉีดยาให้กับผู้ป่วยที่กลัวการส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงเป็นเทคโนโลยีการจัดส่งยาแบบใหม่ โดยใช้ความดันกระแทกเพียงเสี้ยววินาทีของลำพุงยาเจาะผ่านผิวหนัง และนำส่งยาไปยังชั้นเนื้อเยื่อเป้าหมายแทนการใช้เข็มฉีดยา [1] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การนำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงมีคุณลักษณะที่ช่วยภาพในการกระจายตัวของยาในเนื้อเยื่อและทำให้ยาออกฤทธิ์ได้ดีกว่าการใช้เข็ม [2-4] ปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์นำส่งยาประเภทนี้ ออกมาจำหน่ายในท้องตลาด ทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย แต่ยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร

โดยการควบคุมและความแม่นยำกลายเป็นจุดอ่อนในการส่งยา เพราะการส่งยาด้วยลำพุงบางครั้งให้ความเจ็บปวดที่สูงเมื่อเทียบกับเข็มฉีดยา [5] และนอกจากนี้ในอุปกรณ์อาจมีการปนเปื้อนเลือดที่อยู่หัวฉีดเพราะอุปกรณ์มีความดันสูงเกินไป [6-7]

ทั้งนี้ อุปกรณ์การส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงนั้นสามารถจำแนกเป็น 3 ระบบ คือ การส่งยาแบบอนุภาค การส่งยาแบบของเหลว และ การส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง [8] และจำแนกตามต้นกำลังมี 3 ประเภทได้แก่สปริง (spring-powered) แก๊ส (gas-powered) และไฟฟ้า หรือแม่เหล็กไฟฟ้า (electric-powered or magnetic power) [9] ซึ่งต้นกำลังแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป เช่น แบบใช้สปริงอุปกรณ์จะมีขนาดเล็กกะทัดรัด แบบใช้แก๊สความแม่นยำจะมากกว่าการใช้สปริง

และแบบแม่เหล็กไฟฟ้าและแก๊สจะให้ความแม่นยำมากกว่าสปริงและแก๊สแต่ราคาค่อนข้างแพง [10]

ในปี ค.ศ. 2005 Pianthong และคณะ [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมของลำพุงที่สร้างจากหลักการที่เรียกว่า IDM (Impact driven method) โดยลำพุงจะถูกสร้างจากการกระแทกของเหลวที่บรรจุในหัวฉีดด้วยลูกปืนความเร็วสูง พบว่าในการกระแทกของเหลวด้วยวัตถุความเร็วสูง ของเหลวจะถูกฉีดออกจากหัวฉีดมาเป็นช่วง ๆ หรือพัลส์ (Pulse) หลายครั้งทำให้ลำพุงมีช่วงความดันสูงตามมาอีกหลายครั้ง ซึ่ง P.Mukda และคณะ [12] สันนิษฐานว่าปรากฏการณ์นี้จะช่วยเสริมประสิทธิภาพการส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูง จึงได้ทำการประยุกต์หลักการสร้างลำพุงด้วยหลักการกระแทกกับอุปกรณ์นำส่งยา โดยให้มีการกระแทกผ่านตัวกลาง เรียกว่า หลักการกระแทกแบบ Momentum Exchange Method (MEM) โดยในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษารายละเอียดรูปแบบของความดันกระแทกเปรียบเทียบกับ วิธีดันของไหลด้วยต้นกำลัง (Driving Object Method, DOM) ซึ่งเป็นวิธีทั่วไปที่อุปกรณ์ในท้องตลาดใช้ พบว่าการฉีดลำพุงด้วยหลักการ IDM มีคุณลักษณะการนำส่งยาที่ดีกว่าวิธีที่ใช้กับอุปกรณ์ในท้องตลาด เนื่องจากลักษณะลำพุงฉีดเป็นพัลส์จะทำให้การเจาะผิวหนังทำได้เร็วและลำพุงมีแรงดันตามที่ช่วยให้การนำส่งยาไปยังชั้นเป้าหมายและการแพร่กระจาย อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาของ P.Mukda และคณะ ยังขาดรายละเอียดการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ความดันแก๊สในถังลม ระยะกระแทกของลูกกระสุน และขนาดของหัวฉีด หรือแม้แต่การใช้ต้นกำลังที่แตกต่างกัน เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงจะได้ทำศึกษาคุณลักษณะของลำพุงที่เกิดจากอุปกรณ์ IDM แบบ MEM โดยมุ่ง

ความสนใจไปที่การศึกษาอิทธิพลของดันกำลังโดยใช้สปริงและแก๊ส อิทธิพลของขนาดของหัวฉีด และปริมาตรของของเหลวที่มีต่อ รูปแบบความดันกระแทกของลำพุ่ง

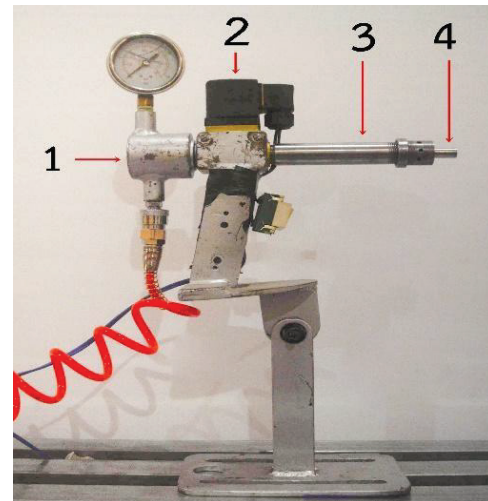
2. เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ต้นแบบนำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูง

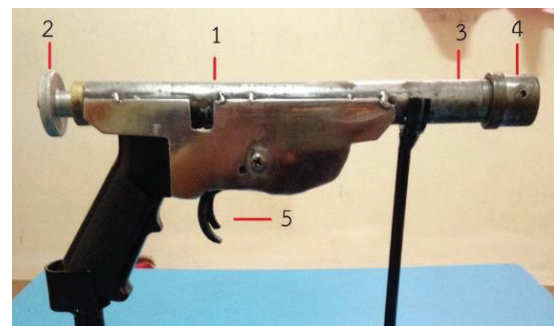
อุปกรณ์นำส่งยาที่มีดันกำลังจากแก๊สและสปริงที่เป็นอุปกรณ์ต้นแบบที่ใช้ในการทดลองแสดงองค์ประกอบรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์สร้างลำพุ่งความเร็วสูงที่ใช้แก๊สเป็นดันกำลัง ซึ่งมี 4 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดกำลังงาน โซลินอยด์ วาล์ว หัวกด และหัวฉีด โดยแหล่งกำเนิดงานจะรับอากาศแรงดันสูงจากปั๊มลมโดยความดันของแก๊สที่ใช้ในการศึกษาอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.8 MPa เมื่อความดันอยู่ในระดับที่ต้องการ โซลินอยด์ วาล์ว จะทำหน้าที่ปล่อยลมอย่างรวดเร็วเพื่อขับเคลื่อนให้หัวกดและชนหัวกดที่จะทำหน้าที่ดันตัวยาที่อยู่ในหัวฉีดให้พุ่งออกมาด้วยความเร็วสูง ซึ่งหัวฉีดจะบรรจุยาขนาด 0.2 และ 0.5 ml รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงที่ใช้สปริงเป็นดันกำลังซึ่งมีองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน คือ ก้านสปริง ลำกล้องปืน ชุดไกปืน หัวกด และหัวฉีด หลักการทำงานจะคล้ายกับอุปกรณ์ที่ใช้แก๊ส

โดยก้านสปริงจะใช้ในการดึงสปริง (ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ขนาดค่านิจสปริงระหว่าง 0.007 - 0.042 kgf) ให้ยุบตัว แล้วชุดไกปืนจะทำหน้าที่ ปล่อยหัวก้านสปริงที่เสมือนเป็นลูกปืนให้กระแทกหัวกับหัวกด และดันให้ของเหลวพุ่งออกจากหัวฉีด

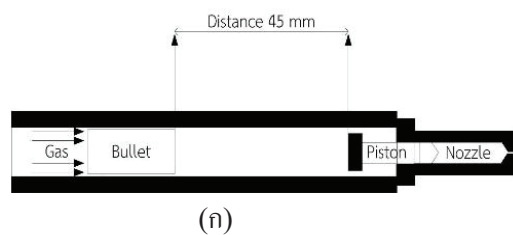


รูปที่ 1 อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงที่มีแก๊สเป็นดันกำลัง: (1) แหล่งกำเนิดกำลังงาน (2) โซลินอยด์ วาล์ว (3) หัวกด และ (4) หัวฉีด

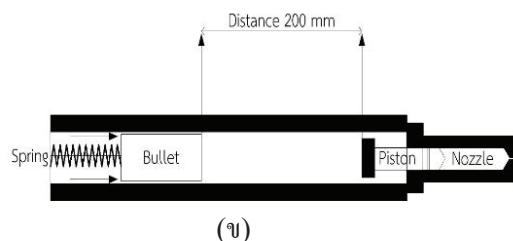


รูปที่ 2 อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุ่งความเร็วสูงที่มีสปริงเป็นดันกำลัง: (1) ลำกล้อง (2) ก้านสปริง (3) หัวกด และ (4) หัวฉีด (5) ไกปืน

การสร้างลำพุ่งความเร็วสูงด้วยหลักการกระแทก จะอาศัยการส่งถ่ายโมเมนตัมของลูกปืนที่วิ่งไปกระแทกกับหัวกด (ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลาง) ในหัวฉีดแล้วอัดทำให้ของเหลวและฉีดออกมาเป็นเป็นลำพุ่งความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งในการศึกษานี้ระยะห่างของลูกปืนกับหัวกดซึ่งเรียกว่าระยะวิ่ง โดยอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สและสปริงจะมีระยะวิ่งเท่ากับเท่ากับ 45 mm และ 200 mm ตามลำดับ โดยใช้ลูกปืนน้ำหนัก 142 g เท่ากัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ระยะห่างที่ใช้ในการทดลองระหว่างกระสุนและหัวกด : (ก) อุปกรณ์ที่ใช้แก๊ส เท่ากับ 45 mm (ข) อุปกรณ์ที่ใช้สปริง เท่ากับ 200 mm

ในการศึกษานี้ใช้อุปกรณ์ต้นแบบ ทดลองในการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าโมเมนตัมของอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งโมเมนตัมของการชนหัวกดอยู่ระหว่าง 0.3 - 1.1 kg.m/s เพื่อหาความดันกระแทกและพฤติกรรมของลำพุ่ง

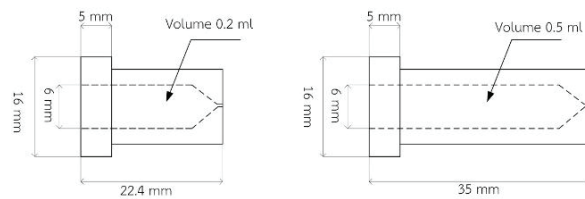
2.2 หัวฉีด

หัวฉีดเป็นส่วนที่บรรจุของเหลวและรองรับการชนของลูกปืนในการสร้างลำพุ่งความเร็วสูง โดยในการศึกษานี้ใช้หัวฉีดจำนวน 4 ขนาด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm และ 0.3 mm กับปริมาตร 0.2 ml และ 0.5 ml หัวฉีดมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylindrical nozzle) และมีปลายโค้งรูปทรงกรวย ทำจากเหล็ก SKD11 ดังแสดงในรูปที่ 4



(ก)

รูปที่ 4 หัวฉีด: (ก) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง (ข) ขนาดและรูปร่างของหัวฉีด

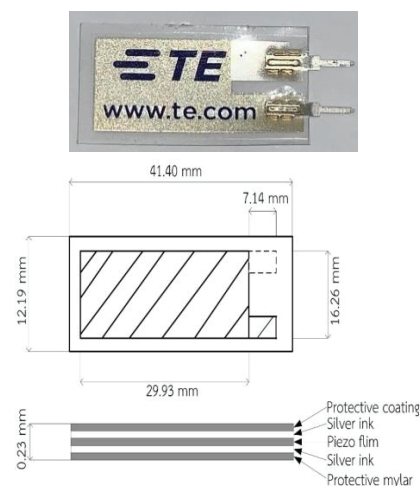


(ข)

รูปที่ 4 (ต่อ) หัวฉีด: (ก) หัวฉีดที่ใช้ในการทดลอง (ข) ขนาดและรูปร่างของหัวฉีด

2.3 การวัดความดันกระแทก

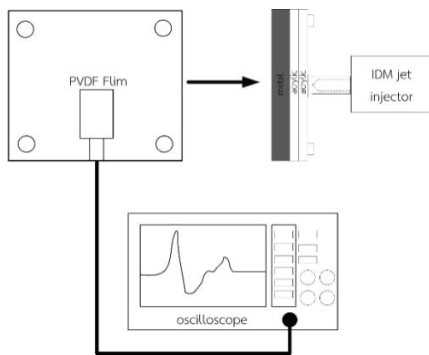
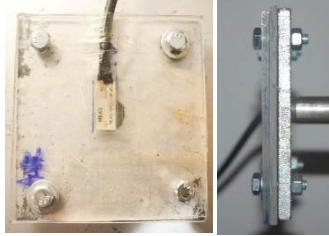
ในการทดลองนี้ไม่ได้ศึกษาในการฉีดเข้าผิวหนังจริงแต่จะอาศัยวัสดุรูปแบบความดันกระแทกด้วยการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ Piezoelectric ของวัสดุ โดยใช้วัสดุประเภทฟิล์มบาง ชนิด Polyvinylidene fluoride film (PVDF) ซึ่งใช้หลักการเปลี่ยนแรงกระแทกของวัตถุที่กระทำบนแผ่น PVDF เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้น โดยลักษณะของแผ่น แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ฟิล์มโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์, (PVDF)

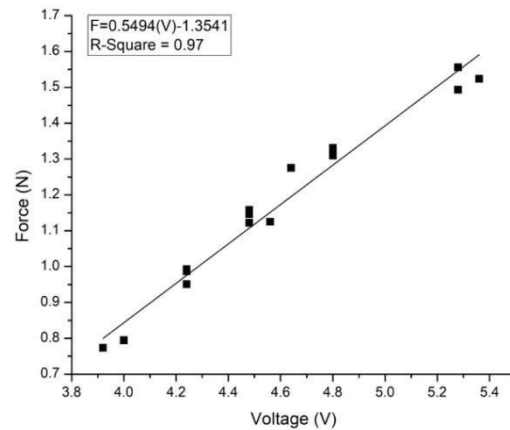
การปรับเทียบสัญญาณไฟฟ้าจากแผ่น PVDF เพื่อใช้วัดแรงกระแทกของลำพุ่งความเร็วสูงนั้น แผ่น PVDF จะติดตั้งบนแผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 3 mm ด้านหน้าแผ่นปิดด้วยพลาสติกใสขนาด 0.15 mm เพื่อป้องกันความเสียหายจากลำพุ่ง และติดด้วยเทปใส แผ่น PVDF หนา 28

μm ซึ่งต่อสายสัญญาณกับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดสัญญาณทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดเครื่องวัดความดัน

ในการศึกษานี้ ใช้หลักการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดความดันของแผ่น PVDF จากหลักการของ Grinspan และคณะ [13] โดยการปล่อยวัตถุให้ตกกระทบบนแผ่นเครื่องมือวัดที่มีความสูงที่ต่างกัน แล้วเทียบเคียงแรงกระแทกสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม กับสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคปจากแผ่น PVDF ในการเปรียบเทียบของการศึกษานี้จะใช้ลูกเหล็กที่มีขนาด 1.05 g ปล่อยลูกเหล็กที่มีความสูงระหว่าง 15 mm - 100 mm รูปที่ 7 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับแรงกระแทกของลูกปืนบนเครื่องมือวัด จากกราฟที่ได้สมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 1



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า (V) กับแรงดันกระแทก (F)

$$F = 0.5494(V) - 1.3541 \quad (1)$$

เมื่อ F คือ แรงดันกระแทก (N)

V คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (V)

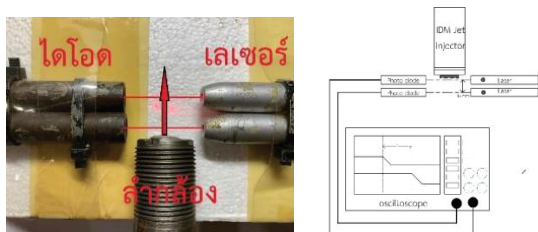
2.4 การวัดความเร็วของลูกปืน

การศึกษานี้จำเป็นต้องวัดความเร็วของลูกปืนก่อนกระแทกหัวกด เพื่อหาค่าโมเมนตัมก่อนชนของลูกปืนที่ปล่อยจากต้นกำเนิดทั้งสองประเภท การวัดความเร็วลูกปืนใช้วิธีรับกวนแสงเลเซอร์ โดยวัดช่วงเวลาการตัดระหว่างลำเลเซอร์สองลำที่ระยะห่างคงที่ด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป แล้วจึงนำมาหาความเร็วเฉลี่ยของลูกปืนจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) ในการศึกษานี้เลเซอร์ 2 ตัวที่ใช้ในการศึกษามีกำลัง 50 mW ความยาวคลื่น 650 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางลำเลเซอร์ 3.0 mm ตั้งอยู่ห่างกัน 14 mm และจัดให้อยู่ในแนวเดียวกันกับเส้นทางลูกปืนที่พุ่งออกมาจากลำกล้องและใช้ ไดโอดตรวจจับแสงเลเซอร์และเชื่อมต่อกับออสซิลโลสโคปเพื่อวัดสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 8

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ Δx คือ ระยะทางระหว่างเลเซอร์ทั้งสอง

Δt คือ เวลาการเคลื่อนที่ผ่านลำเลเซอร์



รูปที่ 8 การจัดวางอุปกรณ์การวัดความเร็วเจ็ทของเหลว
ความเร็วสูง

2.5 โมเมนตัมและการชนของลูกปืนกับหัวกด

การสร้างลำพุ่งความเร็วสูงจากหลักการกระแทกนั้น โมเมนตัมของลูกปืนที่วิ่งชนหัวกดเป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อคุณลักษณะของลำพุ่งที่เกิดขึ้น โดยในการศึกษานี้จะมีต้นกำเนิดที่ต่างกัน ในการเปรียบเทียบจำเป็นจะต้องกำหนดช่วงโมเมนตัมของต้นกำเนิดทั้งสองให้อยู่ในช่วงเดียวกัน โดยในการศึกษานี้จะหาโมเมนตัมของลูกปืนก่อนชนจากต้นกำเนิดแก๊สและสปริงจากสมการที่ 3 ดังนี้

$$P = mv \quad (3)$$

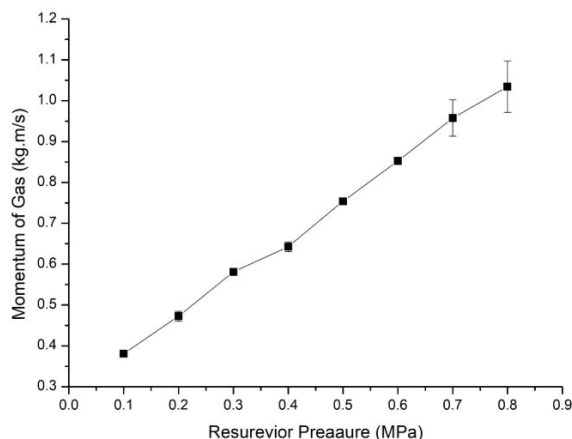
เมื่อ P คือ โมเมนตัม (kg.m/s)

m คือ มวลของวัตถุ (kg)

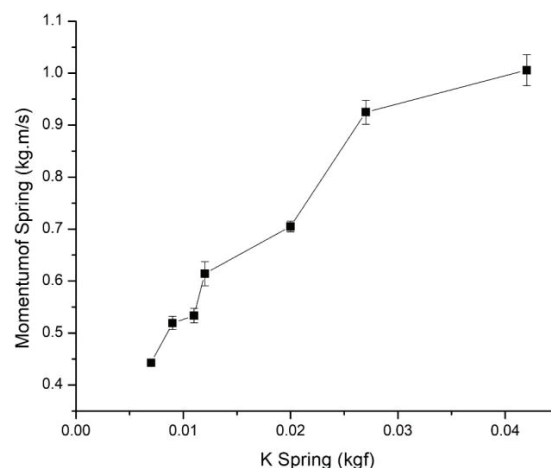
v คือ ความเร็วของวัตถุ (m/s)

รูปที่ 9 และ 10 แสดงค่าเฉลี่ยและแถบค่าเบี่ยงเบนของค่าโมเมนตัมก่อนชนของลูกปืนจากการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง จากอุปกรณ์ต้นกำเนิดแก๊สและสปริง ตามลำดับ ซึ่งค่าโมเมนตัมในการศึกษานี้อยู่ระหว่าง 0.3 - 1.1 kg.m/s ซึ่งกรณีอุปกรณ์ที่มีต้นกำเนิดจากแก๊สนั้น ความดันของแหล่งกำเนิดกำลังงานที่ให้ช่วงค่าโมเมนตัมดังกล่าวอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.9 MPa และ กรณีอุปกรณ์ที่มีต้นกำเนิดจากสปริงนั้นจะใช้ค่าสปริง 0.007 - 0.042 kgf จากรูปที่ 9 และ 10 พบว่า ต้นกำเนิดจากแก๊สนั้นจะให้โมเมนตัมมีแนวโน้มเชิงเส้นมากกว่าสปริง ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรมการขยายตัวของแก๊สทำให้แรงผลักแปรผันเป็นเส้นตรงกับกำลังงานของแก๊ส ขณะที่สปริงมีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเนื่องจากตำแหน่งวังของลูกปืนขณะที่แต่การปลดปล่อยพลังงานของลูกปืนเป็นแนวโน้มฟังก์ชันคลื่นซายน์ ทั้งนี้มีข้อสังเกตว่าค่าโมเมนตัมของสปริงจะมีค่าเบี่ยงเบน

มากกว่าแก๊ส นั้นหมายความว่าความแม่นยำในการทำงานแต่ละครั้งของสปริงจะน้อยกว่าต้นกำเนิดจากแก๊ส แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ความดันสูง (ตั้งแต่ 0.7 MPa ขึ้นไป) ค่าเบี่ยงเบนของโมเมนตัมจากค่าเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศ และ
โมเมนตัมก่อนชนของอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สเป็นต้นกำเนิด



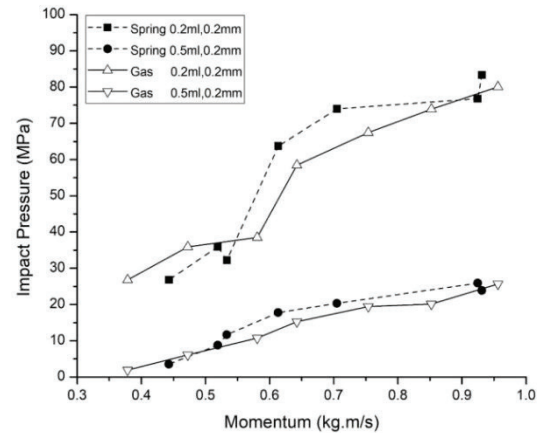
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสปริงและโมเมนตัม
ก่อนชนของอุปกรณ์ที่ใช้สปริงเป็นต้นกำเนิด

3. ผลการศึกษาและอภิปราย

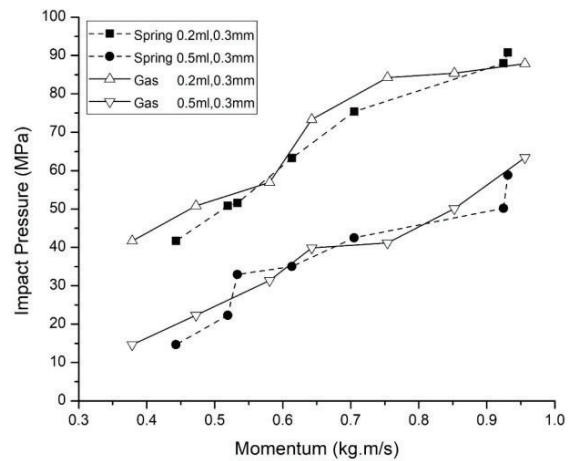
3.1 ความดันกระแทกสูงสุดของลำพุ่ง

รูปที่ 11 แสดงความดันกระแทกสูงสุดของลำพุ่งที่สร้างจากอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สและสปริงเป็นต้นกำเนิด ที่ค่าโมเมนตัมการชนและปริมาตรของเหลว 0.2 ml และ 0.5 ml รูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) แสดงค่าจากหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm และ 0.3 mm ตามลำดับ พบว่าเมื่อ

โมเมนต์การชนของลูกปืน สูงขึ้นความดันกระแทกสูงสุด จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตาม และไม่พบนัยสำคัญของอิทธิพล จากต้นกำเนิดทั้งสองที่มีต่อความดันกระแทกสูงสุด จากรูป ยังพบว่า ความดันกระแทกสูงสุดของการทดลองอยู่ที่ ประมาณ 90 MPa ซึ่งได้จากอุปกรณ์ที่ใช้สปริงเป็นต้น กำกับกับหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm และ ปริมาตร 0.2 ml หัวฉีดที่ปริมาตร 0.2 ml จะให้ค่าความ ดันกระแทกสูงกว่าที่มีปริมาตร 0.5 ml อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาตร 0.2 ml มีมวลของเหลวที่รับโมเมนต์ จากลูกปืนน้อยพลังงานต่อมวลจึงสูงส่งผลให้ของเหลวถูก ขับออกมาด้วยความเร็วสูงมากกว่าหัวฉีดที่มีปริมาตร 0.5 ml นอกจากนี้ยังพบว่าหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm มีแนวโน้มสร้างลำพู่ที่มีแรงกระแทกสูงกว่าหัวฉีด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm เล็กน้อย อันเนื่องมาจาก หัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm เกิดการสั่นสะเทือน สูงในหัวฉีด ทำให้ของเหลวที่บีบอัดตัวในหัวฉีดสูงทำให้ ลำพู่แตกตัวเป็นละอองมาก ส่งผลแรงกระแทกของลำพู่ ลดลง สังเกตเห็นได้ว่าความแม่นยำและความเสถียรของ อุปกรณ์แบบแก๊สจะมากกว่าสปริง เมื่อมีค่าโมเมนต์การ ชนที่ได้จากต้นกำเนิดมากขึ้น ซึ่งแรงกระแทกและการแกว่ง ของค่าสูงมากขึ้นตามไปด้วย ตามแนวโน้มของโมเมนต์ ลูกปืนจากพฤติกรรมการขยายตัวของต้นกำเนิดทั้งสองดัง อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.5 ที่ผ่านมา



(ก)

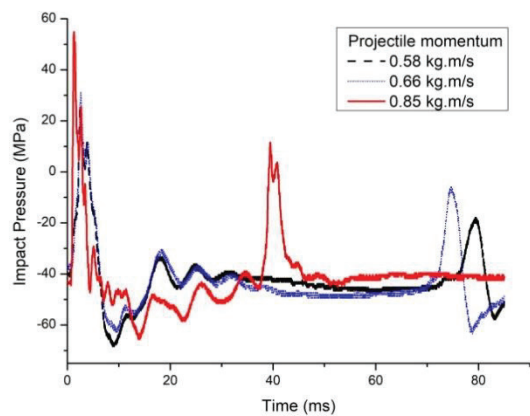


(ข)

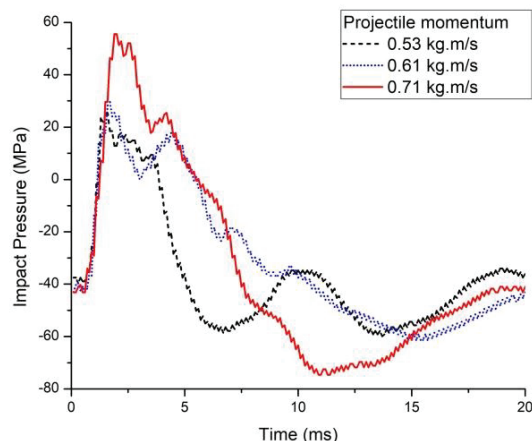
รูปที่ 11 ความดันกระแทกของลำพู่ด้วยแก๊สและสปริง จากหัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง : (ก) 0.2 mm (ข) 0.3 mm

3.2 รูปแบบความดันกระแทกของลำพู่

3.2.1 อิทธิพลของโมเมนตัมการชน



(ก)



(ข)

รูปที่ 12 ความดันเมื่อเทียบกับเวลาตอบสนองจากวิธีของ PVDF film: (ก) อุปกรณ์ที่ใช้แก๊ส (ข) อุปกรณ์ที่ใช้สปริง

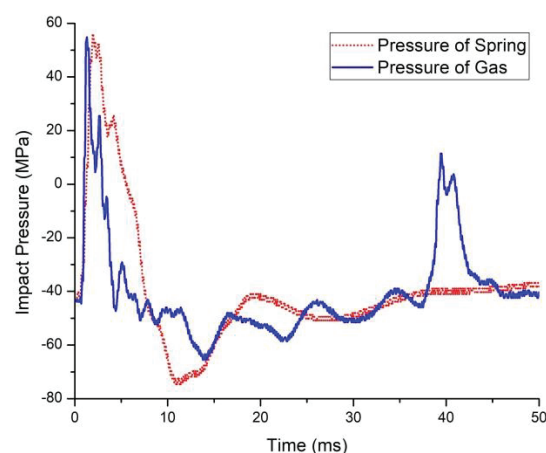
รูปแบบความดันกระแทกของลำพู่ของแก๊สและสปริงแสดงดังรูปที่ 12 (ก) ผลเป็นการทดลองของอุปกรณ์ที่ใช้แก๊สเป็นต้นกำลัง โดยมีโมเมนตัม 0.58, 0.66 และ 0.85 kg.m/s พบว่าแก๊สจะสร้างลำพู่ที่มีพัลส์เกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งครั้ง ซึ่งความดันของพัลส์ลูกที่สองจะลดลงจากพัลส์ลูกแรกประมาณ 30% - 70% ค่าความดันกระแทกจะลดหลั่นลงตามโมเมนตัมการชนของลูกปืน โดยช่วงเวลากการฉีดลำพู่จะอยู่ระหว่าง 90 ms และจะสิ้นสุดเมื่อโมเมนตัมการชนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้พัลส์ครั้งแรกจะ

เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 8 ms และครั้งที่สองจะตามในช่วง 40 - 80 ms รูปที่ 12 (ข) เป็นการทดลองของอุปกรณ์ที่ใช้สปริงเป็นต้นกำลัง โดยมีโมเมนตัม 0.53 0.613 และ 0.705 kg.m/s พบว่า อุปกรณ์ให้ความดันกระแทกสูงสุดที่ 25.5 28.3 และ 55.6 MPa ตามลำดับเวลาฉีดลำพู่ (น้อยกว่า 20 ms) สันกว่าต้นกำลังแก๊สที่มีโมเมนตัมการชนใกล้เคียงกัน มีข้อสังเกตว่า ทุกกรณีจากต้นกำลังทั้งสองหลังเกิดพัลส์ครั้งแรกในเวลาที่ไม่มากนัก จะเกิดพัลส์ครั้งที่สอง เนื่องจากการขยายตัวของต้นกำลังที่ไปกระแทกถูกปืนผ่านหัวกด ทำให้เกิดการอัดตัวของของเหลวอย่างรุนแรงและเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นของเหลวในหัวฉีด ลำพู่จึงมีกำเนิดเป็นลักษณะเป็นพัลส์หลายครั้ง แต่ต้นกำลังจากแก๊สจะมีพัลส์อีกลูกเมื่อกระบวนการฉีดใกล้จะสิ้นสุด

จากการศึกษานี้สรุปได้ว่าโมเมนตัมของต้นกำลังทั้งสองชนิดมีอิทธิพลทำให้ต่อการเกิดพัลส์ของลำพู่ ทั้งนี้เมื่อมีความดันหรือค่าแรงของสปริงจากต้นกำลังมากจะทำให้ลำพู่มีแรงกระแทกมากขึ้นตามไปด้วยและทำให้ระยะเวลาในกระบวนการสั้นลง เนื่องจากของเหลวในหัวฉีดจะมีความดันสูงขึ้นนั่นเอง

3.2.2 อิทธิพลของชนิดต้นกำลัง

รูปแบบความดันกระแทก



รูปที่ 13 รายละเอียดของความดันกระแทกที่ 50 ms แรกของความดันเมื่อเทียบกับเวลาตอบสนองจากวิธีของ PVDF film

รูปที่ 13 แสดงรูปแบบความดันกระแทกของลำพุงที่เกิดจากต้นกำลังด้วยสปริงและแก๊ส ที่มีโมเมนตัมการชนใกล้เคียงกันที่ 0.75 kg.m/s ที่หัวฉีดขนาด 0.2 mm และปริมาตร 0.2 ml ประการแรกพบว่า ลำพุงที่มีแก๊สเป็นต้นกำลังเกิดกลุ่มของพัลส์ครั้งแรกและครั้งที่สองในช่วงเวลาไม่ห่างกันมาก โดยกรณีของแก๊สจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นกว่าสปริง ซึ่งกรณีของสปริงการฉีดลำพุงเมื่อความดันกระแทกขึ้นถึงจุดสูงสุดแล้วจะลดลงจนสิ้นสุดกระบวนการซึ่งต่างจากแก๊สที่จะมีพัลส์อีกตามมาก่อนสิ้นสุดกระบวนการ จากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากต้นกำลังทั้งสอง สันนิษฐานว่าหากนำลำพุงไปใช้ในการนำส่งยา ลำพุงเหล่านี้มีแรงสามารถเอาชนะความเค้นของผิวหนังจะผ่านผิวหนังได้แต่ลำพุงจากสปริงการกระจายตัวในเนื้อเยื่ออาจไม่ดีเนื่องจากไม่มีพัลส์ที่ทำหน้าที่ส่งยาให้กระจายในเนื้อเยื่อนั้นเอง ซึ่งต่างจากการใช้แก๊สที่จะเกิดพัลส์ครั้งสุดท้ายก่อนสิ้นสุดการฉีดซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของเจ็ต นี้เชื่อกันว่าเป็นประโยชน์สำหรับกระบวนการฉีดยา โดยพัลส์แรกจะเป็นการเจาะเข้าไปในผิวหนัง แล้วพัลส์ที่สองจะช่วยยกระดับการส่งยาไปยังพื้นที่เป้าหมายได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นการกระจายตัวจากความดันการฉีดที่เหลือ [12]

4. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบ สร้าง ทดลอง อุปกรณ์นำส่งยาด้วยลำพุงความเร็วสูงด้วยหลักการกระแทกที่มีต้นกำลังจากแก๊สและสปริง โดยการปรับเทียบเครื่องวัดแรงดันกระแทกจากสัญญาณไฟฟ้าจากแผ่น PVDF เพื่อใช้วัดรูปแบบความดันของลำพุงความเร็วสูงที่สร้างจากอุปกรณ์ชุดต้นแบบที่มีต้นกำลังต่างกัน โดยศึกษาอิทธิพลของต้นกำลังทั้งสองผ่านค่าโมเมนตัมการชนของลูกกระสุนโดยมี

โมเมนตัมอยู่ระหว่าง 0.3-1.1 kg.m/s พร้อมกันนี้ยังได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด 0.2 และ 0.3 mm และปริมาตรของเหลวที่ปริมาตร 0.2 และ 0.5 ml ที่มีผลต่อแรงดันกระแทกสูงสุดและรูปแบบของความดันกระแทกของลำพุง พบว่า อุปกรณ์ที่มีต้นกำลังจากแก๊สจะให้ลำพุงที่มีคุณลักษณะสำหรับการนำส่งยาที่ดีกว่าแบบสปริง ความแม่นยำในการทำงานแต่ละครั้งของแก๊สจะมากกว่าสปริง เมื่อโมเมนตัมการชนสูงขึ้นจะทำให้ความดันกระแทกมีค่าสูงขึ้นตาม นอกจากนี้ยังพบว่า หัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 mm มีแนวโน้มสร้างลำพุงที่มีแรงกระแทกสูงกว่าหัวฉีด ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm เนื่องจากหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm เกิดการสั่นสะเทือนและบีบอัดตัวในหัวฉีดสูง เป็นเหตุทำให้ความยากในการควบคุมแรงดันลำพุงและเวลาในการขับออกในขณะที่หัวฉีดเมื่อมีปริมาตรมากจะส่งผลให้แรงกระแทกของลำพุงน้อยและอุปกรณ์ต้นแบบนี้สามารถใช้งานได้จริงในการฉีดเข้าใต้ผิวหนังหรือกล้ามเนื้อของการฉีดมนุษย์หรือสัตว์ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์นี้เป็นชุดต้นแบบที่จำเป็นจะต้องมาการพัฒนาต่อไปซึ่งผลการศึกษานี้เป็นผลเฉพาะการทดลองต้นแบบนี้เท่านั้นซึ่งจำเป็นจะต้องศึกษาคุณลักษณะอื่น ๆ อีกมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยนี้ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผ่านมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ 2561

เอกสารอ้างอิง

- [1] Vaishali Kadam, Bhagyashri Mundhe, Aditi Shahane, Bhaskar Ingole. A Review on NeedleFree Injection System. Wjpps 2014;3(3): 763-780.
- [2] Taberner, A., Hogan, N.C. and Hunter, I.W. Needle-Free Jet Injection Using Real- Time Controlled Linear Lorentz-Force Actuators. *Medical Engineering & Physics*, 2012; 34(9): 1228–1235.
- [3] Comley, K. and Fleck, N. Deep Penetration and Liquid Injection into Adipose Tissue. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2011; 6(1-40): 127-140.

- [4] Schramm-Baxter, J. and S. Mitragotri. Needle-free Jet Injections: Dependence of Jet Penetration and Dispersion in the Skin on Jet Power. *Journal of Controlled Release*, 2004; 97(3): 527-535.
- [5] Giudice, E.L. and Campbell, J.D. Needle-free vaccine delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2006; 58(1): 68-89.
- [6] Baxter, J. and Mitragotri, S. Jet-Induced Skin Puncture and Its Impact on Needle-Free Jet Injection: Experimental Studies and a Predictive Model. *Journal of Controlled Release*. 2005; 106(3): 361-373.
- [7] Hoffman, P.N., Abuknesha, R.A., Andrews, N.J., Samuel, D., Loyd, J.S. A Model to Assess the Infection Potential of Jet Injectors Used in Mass Immunization. *Vaccine*. 2001; 19(28-29): 4020-4027.
- [8] Kale, T.R. and Momin, M. Needle free injection technology - An overview. *Innovation in Pharmacy*, 2014; 5(1): 1-8.
- [9] วิระพันธ์ สีหนาม. การฉีดด้วยลำพุ่งความเร็วสูง: อุปกรณ์และพฤติกรรมการฉีด. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.*, 2014;7(2): 113-124.
- [10] Daniels, C.S. and Headquarters, C.H. Needle-Free Injection: Pros and Cons. High Plains Dairy Conference, March 3-4, Amarillo, Texas, 2020.
- [11] Pianthong, K., Takayama, K., Milton, B. E. and Behnia, M. Multiple Pulsed Hypersonic Liquid Diesel Fuel Jets Driven by Projectile Impact. *Shock Waves*, 2005; 14(1): 73-82.
- [12] Mukda, P., Pianthong K. and Seehanam, W. A New Concept of Needle-Free Jet Injector by Impact Driven Method. *Jornal of Medical Devices*, 2016; 11(1): 1-10.
- [13] Grinspan, A.S. and Gnanamoorthy, R. Impact Force of Low Velocity Liquid Droplets Measured Using Piezoelectric PVDF Film. *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010; 356: 162-168.

การประยุกต์ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีพื้นผิวตอบสนอง สำหรับการทำนายสมบัติทางกลและหาความเหมาะสม ในการเชื่อมลำเรืออลูมิเนียมเกรด 5083

Application of Artificial Neural Network and Response Surface Methodology for Mechanical Property Prediction and Optimization in Aluminum Hull Welding for Alloy 5083 Grade

ปรัชญา เพียสุระ* และ สุทธิพงษ์ โสภ

Prachya Peasura* and Suthipong Sopha

*ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

*Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Technology Education,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Prachautid Road, Bangmod, Thungkru,
Bangkok, 10140, Thailand

*E-mail : prachya.pea@kmutt.ac.th, 02 4708554, 02 4708557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงและความแข็งแรง และการหาความเหมาะสมในการเชื่อมด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง สำหรับการเชื่อมลำเรืออลูมิเนียม เกรด AISI5083 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม หลังจากทำการเชื่อมได้มีการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง ค่าความแข็งแรง วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหาความเหมาะสมในการเชื่อม ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม คือ นิวรอนในชั้นอินพุต จำนวน 3 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 10 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-10-10-1) การเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ค รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ลอกซิกมอยด์สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ฟังก์ชันเพียวรินสำหรับชั้นผลลัพธ์ ชนิดของฟังก์ชัน โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองเท่ากับ 0.454 และ 0.386 สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งแรงตามลำดับ สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้า 220 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 10 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีสารประกอบเชิงโลหะชนิด $Al(Fe,Mn)Si$ ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างพื้นส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งแรงสูงสุด

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียม วิธีพื้นผิวตอบสนอง สมบัติทางกล การเชื่อมลำเรืออลูมิเนียม

ABSTRACT

This research was aimed to determine a mathematic model using artificial neural network (ANN) for predicting the of mechanical property and optimization using response surface methodology (RSM) in the aluminum hull 5083 grade with gas metal arc welding (GMAW) process. The following welding factors were studied: the welding current, voltage and travel speed. The resulting welding samples were examined using tensile strength tests hardness test which were observed microstructure with scanning electron microscopy (SEM) and determine a suitable mathematic model. The research results reveal that using a ANN model with the proposed mathematical model, which tensile strength and hardness represents 3 neurons for the input layer 10 neurons for hidden layer 1 10 neurons for hidden layer 2 and 1 output neurons (3-10-10-1). The Levenberg-Marquart training algorithm was also train for weight and bias network. The neuron of log-sigmoid for input layer, tan-sigmoid for hidden layer1 and 2 purelin for output layer activation function was assigned. The mean square error (MSE) and coefficient of determination (R^2) for tensile strength and hardness predict was showed that of 0.454 and 0.386 respectively. The optimization of GMAW parameters were welding current of 220 amp, voltage of 26 V and 10 mm/sec travel speed. The welding conditions which have the optimization condition was showed that metal compounds Al (Fe, Mn) Si type could be that small size with distribute intensity in heat affected zone, which results in increased welding material high tensile strength and hardness.

Keywords: Artificial Neural Network, Response Surface Methodology, Mechanical Property, Aluminum Hull Welding

1. บทนำ

อุตสาหกรรมต่อเรือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ เนื่องจากเรือสามารถบรรทุกสินค้าได้ในปริมาณมาก ต้นทุนการขนส่งที่ต่ำกว่าการขนส่งด้านอื่น ดังนั้นทุกประเทศทั่วโลกยอมรับว่าอุตสาหกรรมต่อเรือและซ่อมเรือเป็นอุตสาหกรรมที่ช่วยสนับสนุนกิจการเดินเรือขนส่ง และกิจการค้าระหว่างประเทศให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้เรือที่ใช้ในการขนส่งแล้วยังมีเรือประเภทเฉพาะทาง เช่น เรือสำราญ เรือกีฬา เรือตรวจการณ์ เรือนำร่อง เรือสำรวจ เรือดับเพลิง เป็นต้น เรือในกลุ่มนี้มีขนาดต่ำกว่า 1,000 ตันกรอส [1] ทิศทางในตลาดโลกมีความนิยมและความต้องการมากที่สุด [2] เนื่องจากสามารถใช้งานได้หลากหลาย มีขนาดเล็กสามารถเข้าถึงพื้นที่ที่จำกัดได้

เรือเฉพาะทางในปัจจุบันนิยมสร้างมาจากอลูมิเนียม โดยเฉพาะอลูมิเนียมเกรด 5083 (Al-Mg-Mn Alloy) เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ขึ้นรูปได้ง่าย ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี การประกอบเรือเฉพาะทางส่วนมากนิยมใช้การเชื่อม กระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ได้แก่ กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (GAS Metal Arc Welding, GMAW) เนื่องจากสามารถเชื่อม

ได้รวดเร็ว ต่อเนื่อง รอยเชื่อมมีความแข็งแรง แต่ด้วยข้อจำกัดของอลูมิเนียมเกรด 5083 ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่ำ [3] จะต้องพิจารณาถึงพารามิเตอร์ในการเชื่อมให้มีความเหมาะสม เนื่องจากถ้าใช้พารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้รอยเชื่อม เกิดรูพรุน การแตกร้าว หรือการแตกขณะเย็นตัวทั้งในบริเวณรอยเชื่อม และเขตอิทธิพลความร้อน [4] จุดบกพร่องดังกล่าวเป็นปัญหามากในการเชื่อมลำเรือด้วยอลูมิเนียม (Aluminum Hull Welding) ดังรายงานการวิจัยของ R. Tamasgavabari et al. [5] ได้ศึกษาผลกระทบของการต่ำลงของอุณหภูมิในการเชื่อม GMAW จะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลในการเชื่อมอลูมิเนียม 5083 X. Tang et al. [6] ได้ศึกษาผลกระทบการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่ส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องในการเชื่อมอลูมิเนียม 5083 จากรายงานการวิจัย C. Zhu et al. [7,8] และ L. Huang [9] พบว่าการพารามิเตอร์ในการเชื่อมส่งผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลการปรับตั้งพารามิเตอร์ในการเชื่อม GMAW ไม่เหมาะสมในการเชื่อมอลูมิเนียม 5083 ทำให้เกิดรูพรุน บริเวณรอยเชื่อม เกิดการแตกร้าวบริเวณรอยเชื่อมและเขตอิทธิพลความร้อน

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในการเชื่อมอลูมิเนียม 5083 ที่ผ่านมาจึงต้องมีการอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยพยากรณ์พารามิเตอร์ที่ส่งผลทำให้ค่าความเค้นแรงดึง ค่าความแข็งที่เหมาะสม ทำให้อรอยเชื่อมมีประสิทธิภาพสูงที่สุด มีรายงานการวิจัยของ A. Kumar et al [10] ได้ทำการสร้างแบบจำลองโดยวิธีทาคูชิและโครงข่ายประสาทเทียมในการเชื่อมเสียดทานของอลูมิเนียมเกรด 6061 และ 2024 งานวิจัยของ D. Bacioiu et al. [11] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกชนิดจุดบกพร่องในการเชื่อมอลูมิเนียม สำหรับงานวิจัยของ A.S. Francis Britto et al. [12] ได้สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการเชื่อมแบบการแพร่กระจายของสถานะของแข็งเพื่อทำนายค่าความเค้นและแรงเฉือน รายงานวิจัยของ M. H. Rahimi et al. [13] ได้เปรียบเทียบแบบจำลองด้วยวิธีการพื้นผิวดตอบสนองและโครงข่ายประสาทเทียมด้วยในการเชื่อมอลูมิเนียมเลเซอร์ รายงานวิจัย V. M. Dehabadi et al. [14] ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความแข็งในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานในอลูมิเนียม และรายงานวิจัยของ W. Safeen et al. [15] ได้สร้างแบบจำลองจากวิธีการพื้นผิวดตอบสนองในการทำนายค่าความเค้น ค่าแรงกระแทก และค่าความแข็ง ในการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน N. Mollayi และ M. J. Eidi [16] ได้ทำประยุกต์ใช้โมเดลเพิลเคอร์เนล ซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรชันในการทำนายลักษณะของรอยเชื่อม เช่นเดียวกับ R. Kshirsagar et al.[17] ที่ได้ประยุกต์ใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมและซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรชันในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อม และ Liang, Y et al. [18] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีซัพพอร์ตเวกเตอร์รีเกรชันในการทำนายการหลอมละลายลึกในงานเชื่อม จากรายงานการวิจัยพบว่างานวิจัยที่ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนมากเป็นการพยากรณ์สมบัติทางกลของกระบวนการเชื่อมอื่น รวมถึงวัสดุประเภทอื่น เช่น การเชื่อมเลเซอร์ การเชื่อมเสียดทาน เป็นต้น ยังไม่ได้มีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการ

สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) และวิธีพื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) สำหรับการเชื่อมอลูมิเนียมในเกรด 5083 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม และวิธีพื้นผิวดตอบสนองที่สามารถทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ มีความสามารถในการทำนายที่แม่นยำสูง รวมถึงการหาความเหมาะสมในการเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 5083 โดยพิจารณาจากวิธีการพื้นผิวดตอบสนอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี ANN และ RSM งานวิจัยนี้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการเชื่อม และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้โดยเพื่อนำค่าพารามิเตอร์การเชื่อมที่เหมาะสมนำมาระบุในข้อกำหนดการเชื่อม(Welding Procedure Specification) ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน AWS D3.7-90 Guide for Aluminum Hull Welding เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการจัดทำผลการทดสอบกระบวนการเชื่อม (Procedure Qualification Record, PQR) และควบคุมคุณภาพรอยเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 5083 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุมต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุและกรรมวิธีการเชื่อม

วัสดุที่ใช้ในการวิจัยได้แก่อลูมิเนียมผสมเกรด 5083 เป็นเกรดที่มีความแข็งแรงสูงนิยมในการเชื่อมลำเรือ วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยมีความหนา 6 มิลลิเมตร ชิ้นงานทดสอบมีการเตรียมชิ้นงานกว้าง 75 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร บากร่องวีมุม 60 องศา ผิวหน้าของรอยขอบชิ้นงานส่วนฐาน (Root Face) 2 มิลลิเมตร ระบายเว้น (Root Opening) 2 มิลลิเมตร ตามคำแนะนำในมาตรฐาน AWS D3.7-90 Guide for Aluminum Hull Welding [19] โดยมีส่วนผสมทางเคมีแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอูมิเนียมผสมเกรด 5083

Mg	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Cr	Ti
4.61	0.91	0.39	0.38	0.08	0.21	0.18	0.12

กรรมวิธีการเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สปกคลุม (Gas Metal Arc Welding, GMAW) ป้อนที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม ลวดเชื่อม คือ AWS 5.10 ER5356 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร ระยะยื่นอิเล็กโทรด (Electrode Extension) 10 มิลลิเมตร ใช้อาร์กอน (99.99%) เป็นแก๊สปกคลุม ที่อัตราการไหล 15 ลิตรต่อนาที ชิ้นงานที่ได้หลังจากการเชื่อมแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชิ้นงานหลังผ่านการเชื่อม

- A. กระแสไฟฟ้า 220 แอมป์ แรงดัน 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 10 มิลลิเมตรต่อวินาที
- B. กระแสไฟฟ้า 180 แอมป์ แรงดัน 20 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 13 มิลลิเมตรต่อวินาที

2.2 การทดสอบสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบค่าความแข็งและโครงสร้างจุลภาค โดยการตัดชิ้นตามมาตรฐาน AWS จากนั้นทำการขัดด้วยกระดาษทราย ขัดละเอียด และทำการกัดขึ้นรอยด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 1 มิลลิตร ผสมกับน้ำกลั่น 200 มิลลิตร ใช้เวลา 1 นาที จากนั้นทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน และทำการทดสอบค่าความแข็งด้วยการวัดความแข็งบริเนลล์ (Brinell Hardness, HB) การทดสอบค่าความเค้นแรงดึงทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน AWS จำนวน 45

ชิ้น และทำการทดสอบค่าความเค้นแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์

2.3 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง รูปแบบบ็อกซ์-เบนห์เคน ในการสร้างข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง โดยทำการเลือกปัจจัยนำเข้าได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออิทธิพลของสมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาค ปัจจัยส่งออก (ปัจจัยตอบสนอง) ได้แก่ ค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่ผลตอบสนองเป็นฟังก์ชันของปัจจัยที่ศึกษา สามารถเขียนในรูปแบบสมการลำดับที่ 2 ของพื้นผิวตอบสนองมีรูปแบบดังสมการที่ (1)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ij} X_i^2 + \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ X_1 , X_2 and X_3 เป็นปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (X_1) แรงดัน (X_2) และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม (X_3) ที่มีผลกระทบต่อปัจจัยตอบสนอง y ; β_0 , β_{ij} ($i = 1, 2$ และ 3), β_{ij} ($i = 1, 2$, และ 3 ; $j = 1, 2$ และ 3) เป็นปัจจัยที่ไม่ทราบค่า; ε เป็นข้อผิดพลาดแบบสุ่ม ค่าสัมประสิทธิ์ β จะถูกกำหนดในรูปแบบสมการลำดับที่ 2

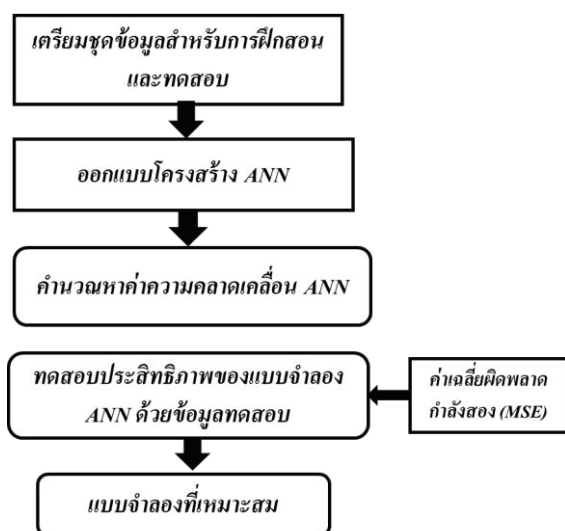
การออกแบบการทดลองรูปแบบบ็อกซ์-เบนห์เคนมีจำนวนการทดลองทั้งสิ้น 45 การทดลอง ทำการทดลองแบบสุ่ม ระดับของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแบบ การ
ออกแบบวิธีการพื้นผิวดตอบสนอง

Factors	Symbol	Level			Unit
		Low (-1)	Medium (0)	High (1)	
Welding current	X_1	180	200	220	amp
Voltage	X_2	20	23	26	V
Travel speed	X_3	10	13	16	mm/sec

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

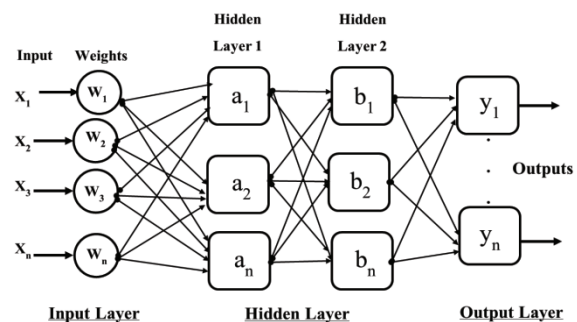
งานวิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
สำหรับการพยากรณ์สมบัติทางกลสำหรับการเชื่อมลำเรือ
ด้วยอลูมิเนียม โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการ
ทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวดตอบสนอง จำนวน 45 ข้อมูลมา
ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีปัจจัยนำเข้า
ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วในการเชื่อม
ปัจจัยส่งออก ได้แก่ ค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง
จากนั้นนำมาทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Net Work,
ANN) จากนั้นนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
(Mean Square Error, MSE) เพื่อทำการเลือก
แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ที่แม่นยำ
สูงสุด การดำเนินการแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังการดำเนินการสร้างแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์

3.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
สำหรับการประมวลผลข้อมูลสารสนเทศ โดยการคำนวณ
เลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ ประกอบด้วย
เซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของ
ระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer
Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส
(Bias, b) สำหรับการจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท
ในงานวิจัยได้ทำการเลือกใช้ โครงข่ายประสาทเทียมแบบ
หลายชั้น (Multi-Layer Neural Network) เนื่องจาก
ให้ประสิทธิภาพในการทำนายของแบบจำลองที่มีความ
แม่นยำสูง ประกอบไปด้วยชั้นนำเข้า (Input Layer) ชั้น
ซ่อน (Hidden Layer) และชั้นแสดงผล (Output
Layer) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น [20]

3.1.1 การเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบ

การเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกสอน (Training)
และการทดสอบ (Testing) งานวิจัยได้มีการเตรียมข้อมูล
จำนวน 45 ข้อมูล จากการทดลองแบบบ็อกซ์ เบนห์เคน
มีปัจจัยนำเข้า (Input) 3 ปัจจัย และปัจจัยส่งออก
(Output) 2 ปัจจัย ได้แก่ค่าความเค้นแรงดึง และค่าความ
แข็ง โดยการแบ่งข้อมูลด้วยการสุ่ม ในอัตราส่วน 80 ต่อ
20 ข้อมูลในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ร้อยละ
80 สำหรับฝึกสอน เท่ากับ 36 ข้อมูล ร้อยละ 20 สำหรับ
การทดสอบ เท่ากับ 9 ข้อมูล งานวิจัยได้กำหนดจำนวน

รอบในการวนซ้ำ (Epoch)=1,000 รอบ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองต้องมีแปลงข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยใช้สมการ (2)

$$X = \frac{a_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (2)$$

หลังจากข้อมูลได้ทำการฝึกสอนและทดสอบ ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม ข้อมูลที่ได้จะต้องถูกแปลงค่ากลับเป็นค่าจริงจากสมการที่ (3)

$$X = [a_i(a_{\max} - a_{\min}) + a_{\min}] \quad (3)$$

โดยที่ X คือ ข้อมูลที่ได้รับการแปลงค่า

a_i คือ ข้อมูลการทดลองที่ i

$a_{\min}$ คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่าน้อยที่สุด

$a_{\max}$ คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่ามากที่สุด

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

การออกแบบโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมทำการทดสอบให้เกิดการเรียนรู้ด้วยเทคนิคการแพร่กระจายแบบย้อนกลับ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมฝึกสอนด้วย อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ค

(Levenberg-Maquartm Algorithm) [21] ฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ (Learning Function) ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน (Learning gradient descent, LearnGD) และชนิดการเคลื่อนลงตามความชันด้วยโมเมนตัม (Learning gradient descent with momentum, LearnGDM) รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น (Activate Function) งานวิจัยได้ใช้ฟังก์ชันลอจิสติกมอยด์ (log-sigmoid) สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 ฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ (tan-sigmoid) สำหรับชั้นซ่อนที่ 2 และฟังก์ชันเพียวรีน (purelin) สำหรับชั้นผลลัพธ์ (Output layer) เพื่อที่จะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยที่สุด ฟังก์ชันการถ่ายโอนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)-(6)

$$a = \text{Logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (4)$$

$$a = \text{Tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (5)$$

$$a = \text{Purelin}(n) \quad (6)$$

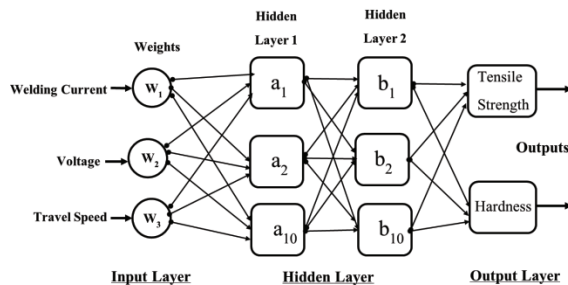
ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของโครงข่ายโครงข่ายประสาทเทียม

Learning Function	Neuron				MSE	
	Input Layer	Hidden Layer 1	Hidden Layer 2	Output layer	Tensile Strength	Hardness
LearnGDM	3	4	10	1	0.2864	0.3122
	3	6	10	1	0.2859	0.3205
	3	8	10	1	0.2864	0.3196
	3	10	10	1	<u>0.2838</u>	<u>0.2937</u>
LearnGD	3	4	10	1	0.2860	0.3057
	3	6	10	1	0.2871	0.3228
	3	8	10	1	0.2860	0.3190
	3	10	10	1	0.2905	0.30812

จากการทดลองเพื่อพิจารณาโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ค่าความเค้น

แรงดึง และค่าความแข็ง โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดค่าทั้งสองที่น้อยที่สุด แสดงในตารางที่ 3 พบว่า

โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง ได้แก่ นิวรอนในชั้นอินพุตจำนวน 3 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 10 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล จำนวน 1 นิวรอน (3-10-10-1) มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเท่ากับ 0.2838 และ 0.2937 สำหรับแบบจำลองพยากรณ์ความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งตามลำดับ สำหรับโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงข่ายประสาทเทียมของการทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง ได้แก่ แบบจำลองจากวิธีการพื้นผิวตอบสนอง และแบบจำลองจากวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองรูปแบบ พิจารณาจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยสุดในการเลือกแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์แม่นยำสูงสุด ดังแสดงในสมการ (7)

โดยที่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{N} \quad (7)$$

สำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะมีการพิจารณาค่าและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ประกอบดังแสดงในสมการที่ (8)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - A)^2} \quad (8)$$

เมื่อ T คือ ผลลัพธ์เป้าหมาย

A คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูล

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ด้วยวิธีการออกแบบทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Bhenken Design) จากนั้นพิจารณาเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่วิธีการพื้นผิวตอบสนองวิเคราะห์ได้มี 4 รูปแบบ ได้แก่ เต็มรูปแบบยกกำลังสอง (Full Quadratic) แบบจำลองเชิงเส้นรวมผลกระทปร่วม (Linear and Interaction) แบบจำลองเชิงเส้นรวมสแควร์ (Linear and Squares) และแบบจำลองเชิงเส้น (Linear) โดยพิจารณาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายมากที่สุดจาก ค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R^2) สัมประสิทธิ์การพยากรณ์ที่ปรับแก้แล้ว (R^2_{adj}) ค่าความน่าจะเป็นของการถดถอย (P-Value of Regression) และค่าความน่าจะเป็นของความเหมาะสมในสมการ (P-Value of Lack of Fit) สำหรับแบบจำลองที่เหมาะสมในงานวิจัย ได้แก่ แบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง โดยข้อมูลแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองสำหรับค่าความเค้นแรงดึง

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	18892.9	18892.9	2099.21	216.09	0.000
Linear	3	17428.7	346.8	115.59	11.90	0.000
Square	3	1179.6	778.1	259.38	26.70	0.000
Interaction	3	284.6	284.6	94.85	9.76	0.000
Residual Error	35	340.0	340.0	9.71		
Lack-of-Fit	1	22.7	22.7	22.72	2.44	0.128
Pure Error	34	317.3	317.3	9.33		
Total	44	19232.9				
R ² = 98.23% R ² (adj) = 97.78%						

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองสำหรับค่าความแข็ง

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	3296.90	3296.90	366.322	61.13	0.000
Linear	3	2694.16	158.35	52.785	8.81	0.000
Square	3	502.73	481.57	160.524	26.79	0.000
Interaction	3	100.01	100.01	33.336	5.56	0.003
Residual Error	35	209.75	209.75	5.993		
Lack-of-Fit	1	2.34	2.34	2.340	0.38	0.540
Pure Error	34	207.41	207.41	6.100		
Total	44	3506.65				
R ² = 94.02% R ² (adj) = 92.48%						

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่าค่าความน่าจะเป็นของการถดถอย (P-Value of Regression) ของแบบจำลองสำหรับค่าความเค้นแรงดึงและค่าความแข็งเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ (P-Value <0.05) สามารถสรุปได้ว่าฟังก์ชันการถดถอยในแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองเป็นลักษณะเชิงเส้น โดยปัจจัยหลัก (กระแสไฟฟ้า (X₁) แรงดันไฟฟ้า (X₂) และความเร็วในการเชื่อม (X₃)) มีอิทธิพลต่อปัจจัยตอบสนอง (ค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ การพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นของความเหมาะสมในสมการ (P-Value of Lack of Fit) พบว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit เท่ากับ 0.128 สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และ 0.540 สำหรับค่าความแข็ง ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05

(P-Value 0.05) สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสองมีความพอเพียง สัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเต็มรูปแบบยกกำลังสอง สำหรับค่าความเค้นแรงดึง มีค่า R² เท่ากับ 98.23 เปอร์เซ็นต์และค่า R²_{adj} เท่ากับ 97.78 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความแข็ง R²= 94.02% R²_{adj}= 92.48% ดังนั้นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลองเป็นที่น่าสนใจ

แบบจำลองของสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสอง สำหรับค่าความเค้นแรงดึง แสดงดังสมการที่ (9)

$$y_{TS} = 614.568 - 1.667 X_1 - 32.131 X_2 + 13.590 X_3 + 0.003 X_1^2 + 1.318 X_2^2 + 0.496 X_3^2 + 0.007 X_1 X_2 + 0.063 X_1 X_3 - 1.716 X_2 X_3 \quad (9)$$

สำหรับสมการเต็มรูปแบบยกกำลังสองของค่าความแข็ง แสดงในสมการที่ (10)

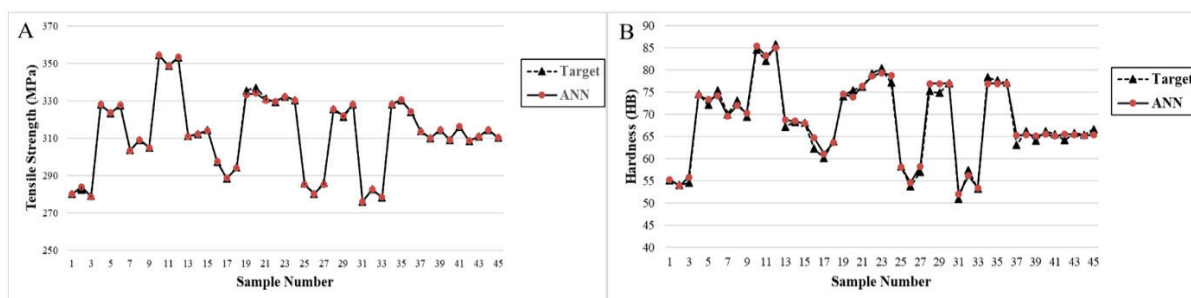
$$y_{HB} = 308.783 - 0.310 X_1 - 26.939 X_2 + 6.605 X_3 + 0.001 X_1^2 + 1.054 X_2^2 + 0.655 X_3^2 - 0.015 X_1 X_2 + 0.028 X_1 X_3 - 1.227 X_2 X_3 \quad (10)$$

โดยมีข้อกำหนดในการใช้สมการที่ (9) และ (10) ดังนี้กระแสไฟฟ้า (X_1) ที่ 180 ถึง 220 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า (X_2) ที่ 20 ถึง 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม (X_3) ที่ 10 ถึง 16 เซนติเมตรต่อนาที เมื่อ Y_{TS} คือ ค่าความเค้นแรงดึง (เมกะปาสกาล, MPa) Y_{HB} คือ ค่าความแข็ง (HB)

4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การเลือกปัจจัยสำหรับการเชื่อมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติทางกลภายหลังจากการเชื่อม ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นทางเลือกที่จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตสำหรับการจัดทำเอกสารบันทึกการทดสอบวิธีการดำเนินการเชื่อม

(Procedure Qualification Record, PQR) การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง งานวิจัยได้พิจารณาค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองน้อยที่สุด โดยโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนาย คือ นิวรอนในชั้นอินพุต จำนวน 3 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 10 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-10-10-1) การเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ก รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ลอกซิกมอยด์ สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ฟังก์ชันเพียวรีนสำหรับชั้นผลลัพธ์



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าเป้าหมายกับค่าที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม A ค่าความเค้นแรงดึง B ค่าความแข็ง

จากรูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมาทำการเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย คือ ค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง จำนวน 45 ค่า พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากค่าความ

เค้นแรงดึงจากรูปที่ 5 A และค่าความแข็ง รูปที่ 5 B มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าผลลัพธ์มากแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำในการทำนายสูง

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง

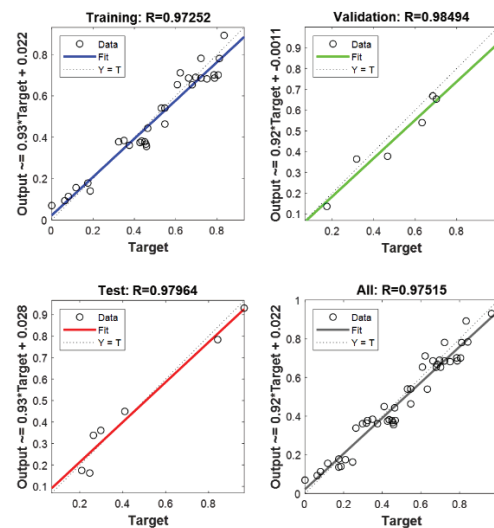
Number	Welding Factors			Tensile Strength					Hardness				
	Welding Current	Voltage	Travel Speed	Target	RSM	SE	ANN	SE	Target	RSM	SE	ANN	SE
1	180	20	13	281.16	283.262	2.102	280.073	1.087	55.1	57.263	2.163	55.330	0.230
2	220	20	13	303.57	302.922	0.648	303.495	0.075	69.1	63.423	5.677	69.424	0.324
3	180	23	10	304.28	303.117	1.163	304.115	0.165	65.2	60.992	4.208	65.800	0.600
4	180	23	16	297.43	293.265	4.165	297.69	0.26	62.3	63.716	1.416	64.730	0.43
5	220	23	10	320.61	316.077	4.533	320.307	0.303	66.1	61.992	4.108	66.623	0.523
6	220	23	16	323.58	321.345	2.235	322.817	0.763	77.3	71.436	5.864	77.641	0.341
7	200	20	10	285.8	282.048	3.752	285.163	0.637	55.3	51.753	3.547	55.137	0.163
8	200	26	16	325.72	325.29	0.43	325.69	0.03	75.3	73.401	1.899	76.991	0.691
9	200	23	13	308.5	302.787	5.713	307.726	0.774	63.1	58.239	4.861	65.276	0.176
MSE					2.749		0.454			3.749		0.386	

RSM คือ แบบจำลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

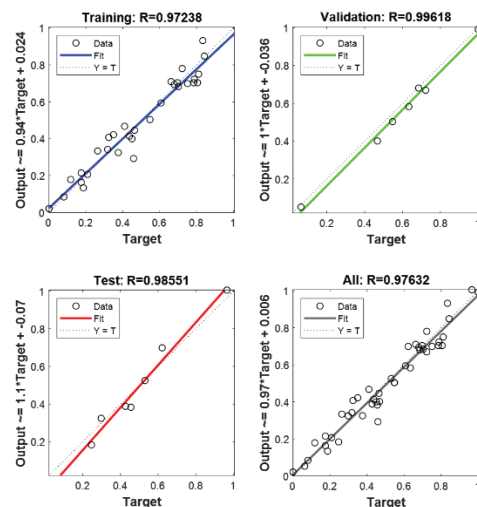
ANN คือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

MSE คือ ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean Square Error)

ตารางที่ 6 การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองจากวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ได้ใช้ข้อมูลในการทดสอบประสิทธิภาพจำนวน 9 ข้อมูล โดยเป็นข้อมูลที่ยังไม่ได้มีการใช้ในการทดสอบ พบว่าค่าความเฉลี่ยคลาดเคลื่อนกำลังสองของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งได้แม่นยำกว่าแบบจำลองจากวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เนื่องจากการทดลองได้มีการเลือกฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ (Learning Function) ให้มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัย รวมถึงการสลับรูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น (Activate Function) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายแม่นยำสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ T. Aroj และคณะ [22] ที่ได้เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพในการทำนายสูงจากการสลับรูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้นโดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองเท่ากับ 0.454 และ 0.386 สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งตามลำดับ โดยมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองจากวิธีพื้นผิวตอบสนองสำหรับค่าความเค้นแรงดึง ที่ 2.749 และค่าความแข็งที่ 3.749 ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งที่ได้จากการเชื่อมโลหะเชิงข้อมูลจริงมาก



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับค่าความเค้นแรงดึง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับค่าความแข็ง

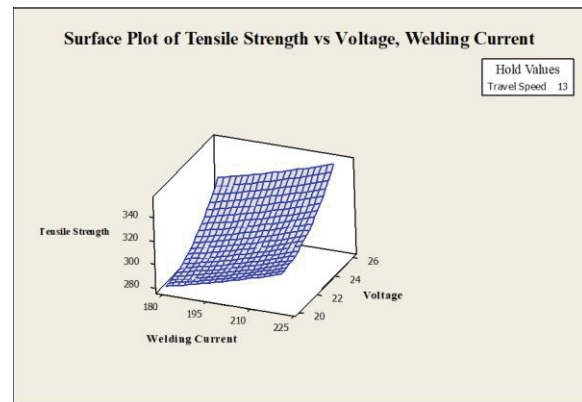
จากรูปที่ 6 และ 7 ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง พบว่าแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.972 สำหรับการเรียนรู้ 0.979 สำหรับการทดสอบ 0.984 สำหรับการตรวจสอบ และ 0.975 สำหรับการตัดสินใจรวมของ โดยมีความชันเท่ากับ 0.92 และตัดแกน y

ที่ 0.022 แสดงในรูปที่ 6 จากรูปที่ 7 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายค่าความแข็ง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.972 สำหรับการเรียนรู้ 0.998 สำหรับการทดสอบ 0.996 สำหรับการตรวจสอบ และ 0.976 สำหรับการตัดสินใจรวมของ โดยมีความชันเท่ากับ 0.97 และตัดแกน y ที่ 0.006 จากผลดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเป้าหมายที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้นที่มีความแม่นยำสูง โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งของการเชื่อมลวดเชื่อม AISI5083 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

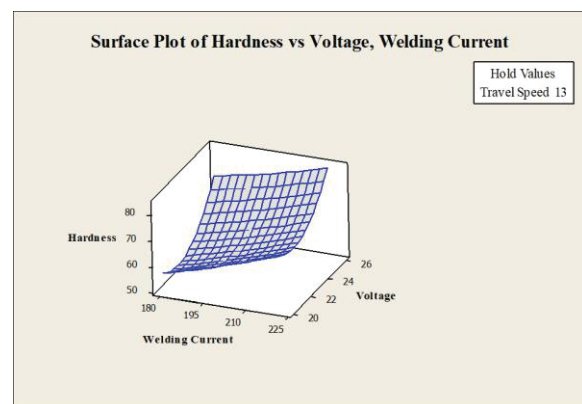
ดังนั้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้นแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง รวมถึงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาการเกิดแบบจำลองจดจำรูปแบบของข้อมูลฝึกสอนมากเกินไป (Over Fitting) ทำให้ไม่สามารถทำนายข้อมูลอื่นได้ ดังนั้นข้อมูลทั้งหมดในงานวิจัยสามารถได้รับการฝึกสอนทั้งหมด จึงเป็นข้อสรุปได้ว่าข้อมูลจำนวน 45 การทดลอง มีความเพียงพอในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง ในการเชื่อมลวดเชื่อม AISI5083 ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ

4.3 การวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการเชื่อมลวดเชื่อม

การหาความเหมาะสมในการเชื่อมลวดเชื่อมพิจารณาจากค่าความเค้นแรงดึง ค่าความแข็ง รวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยจะทำการวิเคราะห์ในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน สำหรับงานวิจัยภายหลังได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเค้น และค่าความแข็งจากวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว ในการวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการเชื่อมลวดเชื่อม AISI5083 งานวิจัยได้ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองในการหาความเหมาะสม โดยมีผลการวิจัยดังนี้

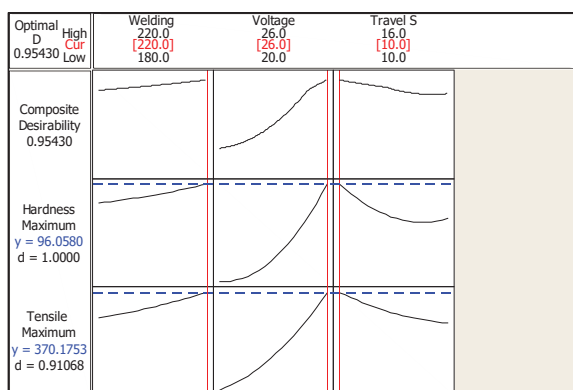


รูปที่ 8 โครงร่างพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วม กระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วในการเชื่อม สำหรับค่าความเค้นแรงดึง



รูปที่ 9 โครงร่างพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลร่วม กระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วในการเชื่อม สำหรับค่าความแข็ง

จากรูปที่ 8 และ 9 โครงร่างพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นถึงค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งมีการลดลงตามกระแสไฟฟ้า และแรงดันที่ใช้ในการเชื่อม ดังนั้นกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจึงมีความสัมพันธ์กันเมื่อค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งที่สูงขึ้น



รูปที่ 10 ค่าความเหมาะสมในการเชื่อมลําเรืออลูมิเนียม

จากรูปที่ 10 ค่าความเหมาะสมในการเชื่อมลําเรือด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยปัจจัยที่แสดงให้เห็นพื้นผิวตอบสนองที่ดีที่สุด สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และความแข็ง คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อมที่ 220 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 10 มิลลิเมตรต่อวินาที จะส่งผลให้มีค่าความเค้นแรงดึงที่ 370 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งที่ 96 HB

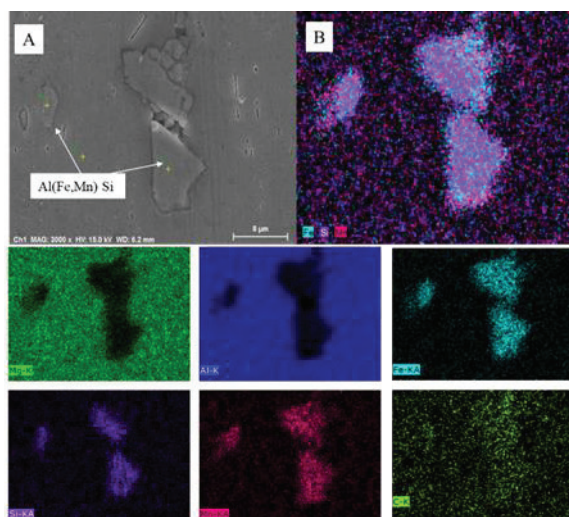
ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบความผิดพลาดจากค่าความเค้นแรงดึงและค่าความแข็งจากการคำนวณ และการทดลอง

No.	Tensile Strength			Hardness		
	Target	Test	Error	Target	Test	Error
1	370.17	372.12	1.95	96.05	95.15	0.9
2	370.17	368.56	1.61	96.05	97.32	1.27
3	370.17	371.35	1.18	96.05	95.41	0.64
Average Error			1.58			0.94

การเปรียบเทียบความผิดพลาดจากค่าความเค้นแรงดึงและความแข็งจากการคำนวณ และการทดลองเชื่อมจำนวน 3 ชิ้นงานจากนั้นนำมาทำการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง ผลการทดลองพบว่ามีความผิดพลาดเฉลี่ย 1.58% และ 0.94% สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งตามลำดับ ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่น้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 7 ตามลำดับ ผลจากการเปรียบเทียบความแตกต่าง (Paired T-Test) พบว่าค่า P-Value = 0.876 สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และ P-value = 0.918 สำหรับค่าความแข็ง ทำให้สรุปได้ว่าค่าความเค้นแรงดึง และความแข็งที่ได้จากการคำนวณในสมการและจากการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

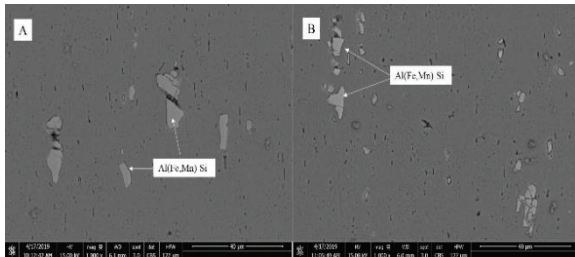
การวิเคราะห์โครงสร้างในงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อมุ่งเน้นในการศึกษาถึงลักษณะที่เกิดขึ้นของโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลกระทบต่อความเค้นแรงดึง และความแข็งในการเชื่อมที่สภาวะแตกต่างกัน โดยได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่แข็งแรงน้อยสุดในชิ้นงานเชื่อม รวมถึงชิ้นงานเชื่อมทุกชิ้นมีการขาดบริเวณดังกล่าว หลังจากการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง งานวิจัยได้มีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และจากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) โดยมีผลการวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 11 SEM และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนในชิ้นงานที่มีสภาวะการเชื่อมเหมาะสม

จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ ของชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 180 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 13 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วยอลูมิเนียมและแมกนีเซียมในเฟสหลัก (Parent Phase) สำหรับในเฟสหลักยังพบสารประกอบเชิงโลหะชนิด $Al(Fe,Mn)Si$ กระจายตัวที่บริเวณเฟส

หลัก [23] โดยสารประกอบดังกล่าวจะต้องมีปริมาณแมงกานีส และเหล็กที่เพียงพอจึงทำให้เกิดได้ [24] ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชื่อมมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน
A. เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 180 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 13 มิลลิเมตรต่อวินาที
B. เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 220 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของชิ้นงานเชื่อมพบโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเฟสหลักประกอบไปด้วยอลูมิเนียมแมกนีเซียมรวมกัน และสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al(Fe,Mn)Si จากรูปที่ 12(A) เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 180 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 13 มิลลิเมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างลักษณะของสารประกอบเชิงโลหะชนิด Al(Fe,Mn)Si มีขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในเกรน สถานะการเชื่อมดังกล่าวที่มีปริมาณความร้อนเข้าในชิ้นงานปริมาณน้อยส่งผลให้การเรียงตัวของ Al(Fe,Mn)Si ไม่สมบูรณ์ ทำให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าความเค้นแรงดึงที่ต่ำ ที่ 281.16 เมกะปาสคาล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Olaf และคณะ [25] ที่ได้ศึกษาถึงผลกระทบของ Al-Mg-Mn ในอลูมิเนียมเกรด สำหรับชิ้นงานเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ 372.12 เมกะปาสคาล เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 220 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 10 มิลลิเมตรต่อวินาที จากรูปที่ 12(B) พบว่าโครงสร้างจุลภาคมี Al(Fe,Mn)Si ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอจึงส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าความเค้น

แรงดึง และค่าความแข็งสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xia S.L. และคณะ [26] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณความร้อนที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคในอลูมิเนียมเกรด 5083

5. สรุปผลการวิจัย

1. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็ง ประกอบด้วย นิวรอนในชั้นอินพุต จำนวน 3 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 10 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-10-10-1) การเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ค รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ลอกซิกมอยด์ สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์ สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 ฟังก์ชันเพียวรีนสำหรับชั้นผลลัพธ์ ชนิดของฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ ที่เหมาะสมของแบบจำลอง คือ ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน (Learned) โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองเท่ากับ 0.454 และ 0.386 สำหรับค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งตามลำดับ

2. สถานะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการพื้นผิวตอบสนอง ที่กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 220 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่งผลให้มีค่าความเค้นแรงดึงที่ 370 เมกะปาสคาล และค่าความแข็งที่ 96 HB

3. สถานะการเชื่อมที่มีความเหมาะสมมีโครงสร้างจุลภาคมี สารประกอบเชิงโลหะชนิด Al (Fe, Mn) Si ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างพื้นส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งสูงสุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย จากงบประมาณบุคลากรประจำปีงบประมาณ 2562 ขอขอบพระคุณ บริษัท เอเชียนมารีน เซอร์วิส จำกัด(มหาชน) ในการสนับสนุนข้อมูลทางเทคนิคในการประกอบลำเรืออลูมิเนียม

เอกสารอ้างอิง

- [1] วันชัย มีชาติ และคณะ. โครงการผลักดันการพัฒนาอุตสาหกรรมท่อเรือและซ่อมเรือแบบครบวงจร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันการขนส่ง, สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2550; 117-185.
- [2] John R Snyder (2018). Best Ship of 2018, Vol 123 no 12, pp. 17-20.
- [3] Welding Handbook. Materials and Application 8 Edited: Volume 3. American Welding Society, Miami, 1996.
- [4] Detao, C., Shanguo, H., Shida, Z., Ziyi, L., Yupeng, Z. and Kai, W. Microstructure and Corrosion Resistance of Al5083 Alloy Hybrid Plasma-MIG Welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018; 255: 530-535.
- [5] Reza, T., Ali, R.E., Seyed, M.A. and Ali, R.Y. The Effect of Harmonic Vibration with a Frequency Below the Resonant Range on The Mechanical Properties of AA-5083-H321 Aluminum Alloy GMAW Welded Parts. *Materials Science and Engineering: A*, 2018; 736: 248-257.
- [6] Chenxiao, Z., Xinhua, T., Yuan, H., Fenggui, L. and Haichao C. Effect of Preheating on the Defects and Microstructure in NG-GMA Welding of 5083 Al-alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018; 251: 214-224.
- [7] Chenxiao, Z., Xinhua, T., Yuan, H., Fenggui, L. and Haichao C. Characteristics and Formation Mechanism of Sidewall Pores in NG-GMAW of 5083 Al-alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016; 238: 274-283.
- [8] Chenxiao, Z., Jason, C., Xinhua, T., Suck-Joo, N. and Haichao, C., Molten Pool Behaviors and Their Influences on Welding Defects in Narrow Gap GMAW of 5083 Al-alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018; 126(A): 1206-1221.
- [9] Lijin, H., Dongsheng, W., Xueming, H., Shichao, L., Zhao, J., Fang, L., Huan, W. and Shaojian, S. Effect of the Welding Direction on the Microstructural Characterization in Fiber Laser-GMAW Hybrid Welding of 5083 Aluminum Alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018; 31: 514-522.
- [10] Amit, K., Khurana, M.K. and Gaurav, S. Modeling and Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters for Dissimilar Aluminium Alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2018; 5(11): 25440-25449.
- [11] Daniel, B., Geoff, M., Mayorkinos, P. and Rob, S. Automated Defect Classification of Aluminium 5083 TIG Welding Using HDR Camera and Neural Networks. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019; 45: 603-613.
- [12] Sagai, A., Francis, B., Edwin, R., Raj, M. and Carolin, M. Prediction of Shear and Tensile Strength of the Diffusion Bonded AA5083 and AA7075 Aluminium Alloy Using ANN. *Materials Science and Engineering: A*, 2017; 692: 1-8.
- [13] Mohammad, H. R., Mahdi, S., Rassoul, N. and Farhad, P. Modelling and Optimization of Laser Engraving Qualitative Characteristics of Al-sic Composite Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks. *Optics & Laser Technology*, 2019; 112: 65-76.
- [14] Vahid, M.D., Saeede, G. and Ghasem, A. Application of Artificial Neural Network to Predict Vickers Microhardness of AA6061 Friction Stir Welded Sheets. *Journal of Central South University*, 2016; 23(9): 2146-2155.
- [15] Wasif, S., Salman, H., Ahmad, W., Mirza, J., Haris, A. and Hassan, A. Predicting the Tensile Strength, Impact Toughness, and Hardness of Friction Stir-welded AA6061-T6 Using Response Surface Methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016; 87(5-8): 1765-1781.
- [16] Nader, M. and Mohammad, J.E. Application of Multiple Kernel Support Vector Regression for Weld Bead Geometry Prediction in Robotic GMAW Process. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2018; 8(4): 2310-2318.
- [17] Rohit, K., Steve, J., Jonathan, L. and Jim, T. Prediction of Bead Geometry Using a Two-Stage SVM-ANN Algorithm for Automated Tungsten Inert Gas (TIG) Welds. *Journal of Manufacturing and Materials*, 2019; 3(39): 1-18.

- [18] Liang, Y., Yu, R., Luo, Y. and Zhang, Y.M. Machine Learning of Weld Joint Penetration from Weld Pool Surface Using Support Vector Regression. *Journal Manufacturing Process*, 2019; 41: 23–28
- [19] American Welding Society. AWS D3.7:2004 Guide for Aluminum Hull Welding.2004.
- [20] Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A. E. and Arshad, H. State-of-the-art in Artificial Neural Network Applications: A Survey. *Heliyon*, 2018; 4(11): e00938.
- [21] Won-Bin, O., Tae-Jong, Y., Bo-Ram, L., Chang-Gon K., Zong-Liang, L. and Ill-Soo, K. A Study on Intelligent Algorithm to Control Welding Parameters for Lap-Join. *Procedia Manufacturing*, 2019; 30: 48-55.
- [22] Ta Aroj, M.M., and Kolahan, F. A. A Comparative Study on the Performance of Artificial Neural Networks and Regression Models in Modeling the Heat Source Model Parameters in GTA Welding. *Fusion Engineering and Design*, 2018; 131: 111–118.
- [23] Yulin, L., Yimeng, S., Li, Z., Yuhua, Z., Jijie, W. and Chunzhong, L. Microstructure and Mechanical Properties of Al-5Mg-0.8Mn Alloys with Various Contents of Fe and Si Cast Under Near-Rapid Cooling. *Metals*, 2017; 7: 1-12.
- [24] Mofid, M.A. and Loryaei, E. Investigating Microstructural Evolution at the Interface of Friction Stir Weld and Diffusion Bond of Al and Mg Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019; 8(5): 3872-3877.
- [25] Olaf, E. and Simon, M.J. Control of Second-Phase Particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016; 689: 998-1010.
- [26] Xia, S.L., Ma, M., Zhang, J.X., Wang, W.X. and Liu, W.C. Effect of Heating Rate on the Microstructure, Texture and Tensile Properties of Continuous Cast AA 5083 Aluminum Alloy. *Material Science Engineering A*, 2014; 609: 168–176.



การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคสำหรับการ การแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเจลอิเล็กโทรด

Design and Fabrication of Microfluidic Chip for Charged Beads Separation using Gel Electrodes

ชาลิณี พิพัฒน์พิภพ^{1,2} รุ่งเรือง พัฒนากุล³ และ คมกฤต เล็กสกุล^{2,*}

Chalinee Phipattanaphip^{1,2}, Rungrueang Phatthanakun³ and Komgrit Leksakul^{2,*}

¹ หลักสูตรบัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

³ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน),

111 อาคารสิรินธรวิทยโชทัย ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

¹ Graduate Program in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 50200, Thailand

² Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University

239 HuayKaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

³ Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

^{*}E-mail address: rug_chalinee@hotmail.com Phone: 0835709819

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบใหม่สำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคสำหรับการแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเจลอิเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าในการคัดแยกอนุภาคแบบอิเล็กโตรโฟรีซิส การใช้เจลอิเล็กโทรดนี้เพื่อช่วยแก้ปัญหาการเกิดออกไซด์/สารเคมีของโลหะที่นำมาทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดเมื่อมีการสัมผัสกับของไหลในช่องการไหลจุลภาค และเพื่อป้องกันสารตัวอย่างบางชนิดที่สัมผัสแล้วทำให้เกิดการกักต้อน เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับขั้วอิเล็กโทรดและเพื่อป้องกันการเกิดความร้อนอันจะส่งผลให้ช่องการไหลมีฟองอากาศซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางการเดินทางของไหลตัวอย่างในช่องการไหลซึ่งจะทำให้เกิดอุปสรรคอย่างมากในการแยกอนุภาค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางการออกแบบและสร้างขั้วอิเล็กโทรดด้วยการใช้เจลอิเล็กโทรดสำหรับการประยุกต์การแยกอนุภาคเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ โดยได้ออกแบบโครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคสำหรับการแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเจลอิเล็กโทรดด้วยเทคนิคการสร้างชิ้นส่วนจุลภาค และทำการทดสอบการแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยอุปกรณ์ของไหลจุลภาคสำหรับการแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเจลอิเล็กโทรดซึ่งทำการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ 1 โวลต์ พบว่าโครงสร้างที่ได้สามารถแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของอนุภาคที่มีประจุลบ 82.18% และอนุภาคที่มีประจุบวกที่ 79.92% ตามลำดับ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ: อุปกรณ์ของไหลจุลภาค การแยกอนุภาคที่มีประจุ เจลอิเล็กโทรด

ABSTRACT

This research presents a new model for the design and fabrication of a gel electrode microfluidic device for charged beads separating with an electrophoresis electric field. In order to achieve more efficient beads separation, the use of this gel electrode to help solve the problem of the occurrence of oxide / metal chemicals used to make the electrode when it comes into contact with the fluid. And to prevent certain substances that have been exposed to corrosion or chemical reactions to the electrode, and finally, to prevent heat generation which may result in the flow channel having bubbles which will hinder the flow of the sample in the flow channel, which will cause a lot of obstacles in separating the particles. Therefore, this research presents designing and fabrication of an electrode using gel electrodes for particle separation applications for further use in medicine. By the designing of structure was created and designed with the layout@ program. Then the microelectrode device was fabricated with a gel electrode by using lithography techniques and soft- lithography techniques for fabrication the microchannel for flow the beads into the microchannel. Finally, the testing was set up for the separation of charged particles in gel electrode microfluidic device by power supply 1 voltage. It was found that the structure can precisely separate the charged particles with the accuracy percentage of the particles with 82.18% negative charge and the positive charged particles at 79.92% respectively at the 95% confidence level.

Keywords: Microfluidic chip, charged beads separation, gel electrodes

1. บทนำ

อิเล็กโตรโฟรีซิสเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายสำหรับการจัดการเกี่ยวกับอนุภาค เซลล์ ไวรัส DNA และวัตถุอื่นๆ [1-3] โดยการสร้างขั้วอิเล็กโตรดเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันได้นำเทคนิคนี้มา ร่วมกับการสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคอย่างแพร่หลายและได้รับการพิสูจน์แล้วว่าประสบความสำเร็จ สำหรับการนำมาทำเป็นตัวดักจับ (Trapping) [4-6] การคัดแยก (Separating) [7-8] การคัดเลือก (Sorting) [9-10] และการจำแนกลักษณะของเซลล์และอนุภาค (Characterizing) [11-13] โดยมีการนำมาประยุกต์ใช้ อย่างแพร่หลายสำหรับในงานทางด้านชีวการแพทย์เช่น การตรวจจับเซลล์หายาก การแยกโปรตีนและการเพิ่มจำนวนประชากรเซลล์ [14-16] โดยเทคนิคที่นิยมนำมาใช้สำหรับสร้างขั้วอิเล็กโตรดที่นิยมส่วนใหญ่จะใช้หลักการสปีดเทอริง [17] ซึ่งเป็นการสร้างฟิล์มโลหะบาง โดยทั่วไป นิยมใช้แพลตตินัม (Pt) ทองคำ (Au) เงิน (Ag) ฯลฯ ซึ่งถูกออกแบบให้ลักษณะเป็นขั้วอิเล็กโตรดวางขนานกันบนพื้นผิวชิ้นงานตามแนวระนาบ [18] ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อขั้วอิเล็กโตรดอยู่ในช่องการไหลจุลภาค ทำให้เกิดการปนเปื้อน การเสื่อมสภาพ รวมทั้งเกิดความร้อนระหว่างการทดสอบเป็นผลต่อเนื่องไปยังการเกิด

ฟองอากาศในช่องการไหลจุลภาค ยิ่งไปกว่านั้น สนามไฟฟ้าที่สร้างด้วยขั้วอิเล็กโตรดบนพื้นผิวชิ้นงาน นั้นมีแนวโน้มที่แข็งแรงที่สุดบนขอบของระนาบของอิเล็กโตรดและจะอ่อนแอลงตามผิวระนาบ อีกทั้ง สนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามเส้นสนามที่ห่างจากขั้วอิเล็กโตรดและกระจายไปตามปริมาตรที่มีขนาดใหญ่กว่า [19] ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โครงสร้างแบบเจลอิเล็กโตรดจึงถูกออกแบบให้มีพื้นที่แบบคู่ขนานไปตามแนวยาวของช่องการไหลอนุภาคที่มีขนาดความยาวที่ 5 มิลลิเมตร พร้อมกับการเพิ่มสนามไฟฟ้าด้วยการเพิ่มความสูงของขั้วอิเล็กโตรดด้วยการใช้เจลอิเล็กโตรดในการสร้างที่ระดับความสูง 50 ไมโครเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่ 100 ไมโครเมตร ในขณะที่ โครงสร้างอิเล็กโตรดแบบเดิมจะมีความหนาได้ไม่เกิน 1 ไมโครเมตร

โครงสร้างนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกอนุภาคและขจัดปัญหาการเกิดฟองอากาศอันเป็นปัจจัยสำคัญในการขัดขวางการคัดแยกอนุภาค และเพื่อเป็นแนวทางในการคัดแยกเซลล์ในอนาคต หรือแม้แต่นำไปต่อยอดเพื่อทำการดักจับเซลล์ที่ไม่ต้องการหรือต้องการออกจากร่างกาย เช่น เซลล์เม็ดเลือดขาว เซลล์มะเร็ง เป็นต้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อิเล็กโทรโฟรีซิส

อิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) เป็นเทคนิคที่ใช้แยกสาร วิเคราะห์ และเตรียมสารที่มีประจุไฟฟ้า เช่น กรดอะมิโน โปรตีน และกรดนิวคลีอิกให้บริสุทธิ์ โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในระบบ สารที่มีประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วที่ตรงข้ามกันด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่คงที่ ซึ่งขึ้นกับปริมาณประจุสุทธิบนโมเลกุลของสาร รูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสารนั้น และกระแสไฟฟ้า โดยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของสารสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [20-22]

$$V = \frac{E \times q}{f} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของสาร

E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า

q คือ ประจุสุทธิบนโมเลกุล

และ f คือ frictional coefficient ขึ้นอยู่กับน้ำหนักและรูปร่างโมเลกุลของสารตัวอย่าง

การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีประจุในสนามไฟฟ้า แสดงโดยเทอมของการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า u ซึ่งหมายถึงความเร็วต่อหน่วยของความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งขึ้นตรงกับอัตราส่วนประจุต่อมวล ดังสมการที่ 2 [21,22]

$$\begin{aligned} u &= \frac{V}{E} \\ &= \frac{\frac{E \times q}{f}}{E} = \frac{q}{f} \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ f จะแปรตามขนาดของสารตัวอย่างไม่ได้แปรตามรูปร่าง

เมื่อเริ่มเปิดสนามไฟฟ้า โมเลกุลของสารจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง จนกระทั่งถึงความเร็วที่สมดุลกับแรงต้านทาน จากนั้น โมเลกุลจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และเนื่องจากโมเลกุลของสารต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน

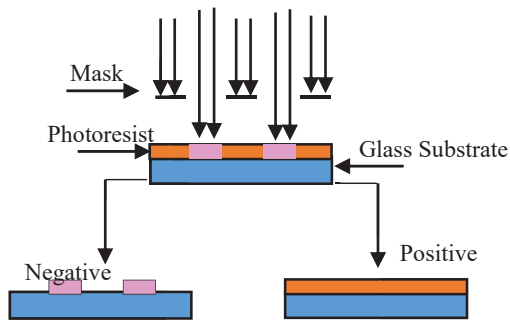
ทั้งขนาด รูปร่าง และประจุไฟฟ้า ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าต่างกัน จึงสามารถแยกออกจากกันได้ การแยกสารโดยวิธีอิเล็กโทรโฟรีซิสจึงเป็นประโยชน์และเป็นที่นิยมอย่างมากในทางอณูชีววิทยาซึ่งนิยมนำเทคนิคนี้มาใช้ในการแยกขนาดของ DNA และโปรตีน

2.2 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical Systems: MEMS)

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical Systems: MEMS) หมายถึง ระบบขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ที่รวมโครงสร้างทางกลและวงจรอิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกันเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ (Sensor) และเป็นตัวขับเคลื่อน (Actuator) โดยผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีการสร้างโครงสร้างจุลภาค (Micro fabrication) ซึ่งเป็นการกระบวนการเดียวกันกับกระบวนการที่ใช้ในการผลิต IC (Integrated Circuit) และได้นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค ด้วยกระบวนการขึ้นรูปโครงสร้างจุลภาคด้วยแสงหรือ โฟโตลิโธกราฟี (photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี คือ การถ่ายแบบของรูปแบบที่อยู่บนแผ่นโฟโตมาสก์ (Photo mask) ให้ลงไปยังผิวหน้าของชิ้นงาน เพื่อเป็นการกำหนดลดทอนลงบนชิ้นงานนั้นๆ ซึ่งเทคนิคนี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้วงการผลิตโครงสร้างจุลภาคเป็นอย่างมาก โดยมีกระบวนการสร้างดังต่อไปนี้

1. การเตรียมฐานชิ้นงาน (Substrate preparation)
2. การเคลือบสารไวแสง (Spin coating) โดยจะทำการเลือกจากสารไวแสงชนิดบวกหรือลบ ซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันคือ เมื่อสารไวแสงชนิดลบโดนแสงจะทำให้บริเวณที่โดนแสงแข็งตัวเกิดเป็นรูปร่างตามต้องการ ส่วนสารไวแสงชนิดบวกเมื่อโดนแสงจะถูกล้างออกไป ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงผลกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีสำหรับสารไวแสงชนิดบวกและลบ

3. การฉายแสง (Exposure) ซึ่งแสงที่นำมาใช้สำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี คือ รังสีอัลตราไวโอเลต (UV) โดยค่าพลังงานในการฉายแสงจะมีความสัมพันธ์กับความหนาของสารไวแสงที่ทำการเคลือบ โดยสามารถคำนวณหาพลังงานแสงได้จากสมการที่ 3 [22]

$$D = I \times T \quad (3)$$

กำหนดให้ D คือ พลังงานในการฉายแสง (J/cm^2) T คือ เวลาในการฉายแสง (วินาที) และ I คือ ค่ากำลังในการฉายแสง (W/cm^2)

4. การล้างสารไวแสง (Develop) เป็นขั้นตอนการทำให้ลวดลายที่เกิดจากการฉายแสงปรากฏขึ้นด้วยสารเคมี โดยสารไวแสงชนิดลบลวดลายที่โดนแสงจะปรากฏ ในขณะที่สารไวแสงชนิดบวกบริเวณที่โดนแสงจะละลายหายไป

3. การทดลอง

3.1 การสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคและเจลอิเล็กโทรด

กระบวนการออกแบบและสร้างลวดลายอุปกรณ์ของไหลจุลภาคและเจลอิเล็กโทรดจะทำการออกแบบและสร้างออกเป็นสองส่วนหลักๆ ได้แก่ โครงสร้างสำหรับเป็นขั้วอิเล็กโทรด และโครงสร้างสำหรับเป็นช่องการไหลจุลภาค โดยจะเริ่มด้วยการออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม

Layout editor[@] และพิมพ์เป็นโฟโตมาส์ก์เพื่อนำมาขึ้นลวดลายด้วยแสง

โครงสร้างสำหรับเป็นขั้วอิเล็กโทรดจะถูกออกแบบให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 6.4×5 มิลลิเมตรแบบคู่ขนาน สำหรับการสร้างขั้วอิเล็กโทรดจะถูกสร้างด้วยโลหะแพดทินัมโครเมียม (Pt/Cr) และเจลอิเล็กโทรดที่มีความสูง 50 ไมโครเมตร โดยมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดที่สร้างนี้จะต้องวางคู่ขนานโดยเพิ่มแรงสนามไฟฟ้าด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในแนวตั้งด้วยเจลอิเล็กโทรดที่มีความสูงจากพื้นผิว 50 ไมโครเมตร และออกแบบขั้วอิเล็กโทรด Pt/Cr โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 100 ไมโครเมตร ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อกับพื้นที่ขั้วอิเล็กโทรดที่มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 4×5 มิลลิเมตร สำหรับต่อกับอุปกรณ์จ่ายไฟ (Power supply) ที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าชนิด บวกและลบ วางสลับข้างกัน ดังรูปที่ 4

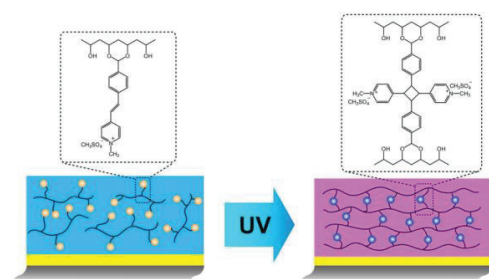
การสร้างโครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดจะถูกสร้างด้วยกระบวนการขึ้นลวดลายด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีและเทคนิคการสร้างฟิล์มโลหะบางด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริง (sputtering) โดยเริ่มจากการเตรียมฐานชิ้นงาน ด้วยการทำความสะอาดด้วยแอมโมเนีย (NH_3) ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ต่อน้ำบริสุทธิ์ (DI water) ในสัดส่วน 1:1:4 บนเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จากนั้นนำฐานชิ้นงานที่ทำความสะอาดมาเคลือบสารไวแสงชนิดบวก S1818G ด้วยเครื่องหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 10 วินาที ตามด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm เป็นเวลา 10 วินาที (รูปที่ 2a) จากนั้นนำฐานชิ้นงานที่ถูกเคลือบสารไวแสงเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และรอให้สารไวแสงเย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ถัดจากนั้นนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 40 วินาที โดยใช้โฟโตมาส์ก์เพื่อให้เกิดลวดลายบนสารไวแสง (รูปที่ 2b) หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (รูปที่ 2c) แล้วนำไปเคลือบฟิล์มโลหะบางด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริง (puttering) (รูปที่ 2d) โดยทำการเคลือบฟิล์มโลหะ

โครเมียม (Cr) และแพลตตินัม (Pt) โดยความหนาของชั้นฟิล์มโลหะแต่ละชนิดจะมีความหนา 30 และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ ถัดจากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่ขั้นตอน Lift-off หรือการล้างส่วนที่ไม่ต้องการชั้นฟิล์มโลหะออกให้หมดโดยแช่ชิ้นงานในอะซิโตน (Acetone) (รูปที่ 2e) ถัดจากนั้นนำไปเคลือบด้วยสารไวแสงโพลีอิมายด์ (Polyimide) ด้วยเครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง (รูปที่ 2f) เพื่อเป็นพื้นที่ในการป้องกันเจลอิเล็กโทรดไหลเข้าสู่บริเวณช่องการไหลจุลภาค และทำการฉายแสงเป็นเวลา 20 วินาทีเพื่อสร้างลวดลาย (รูปที่ 2g) สุดท้ายนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (รูปที่ 2h) จะได้โครงสร้างสำหรับการนำไปทำเป็นชิ้นงานขั้วอิเล็กโทรดต่อไป

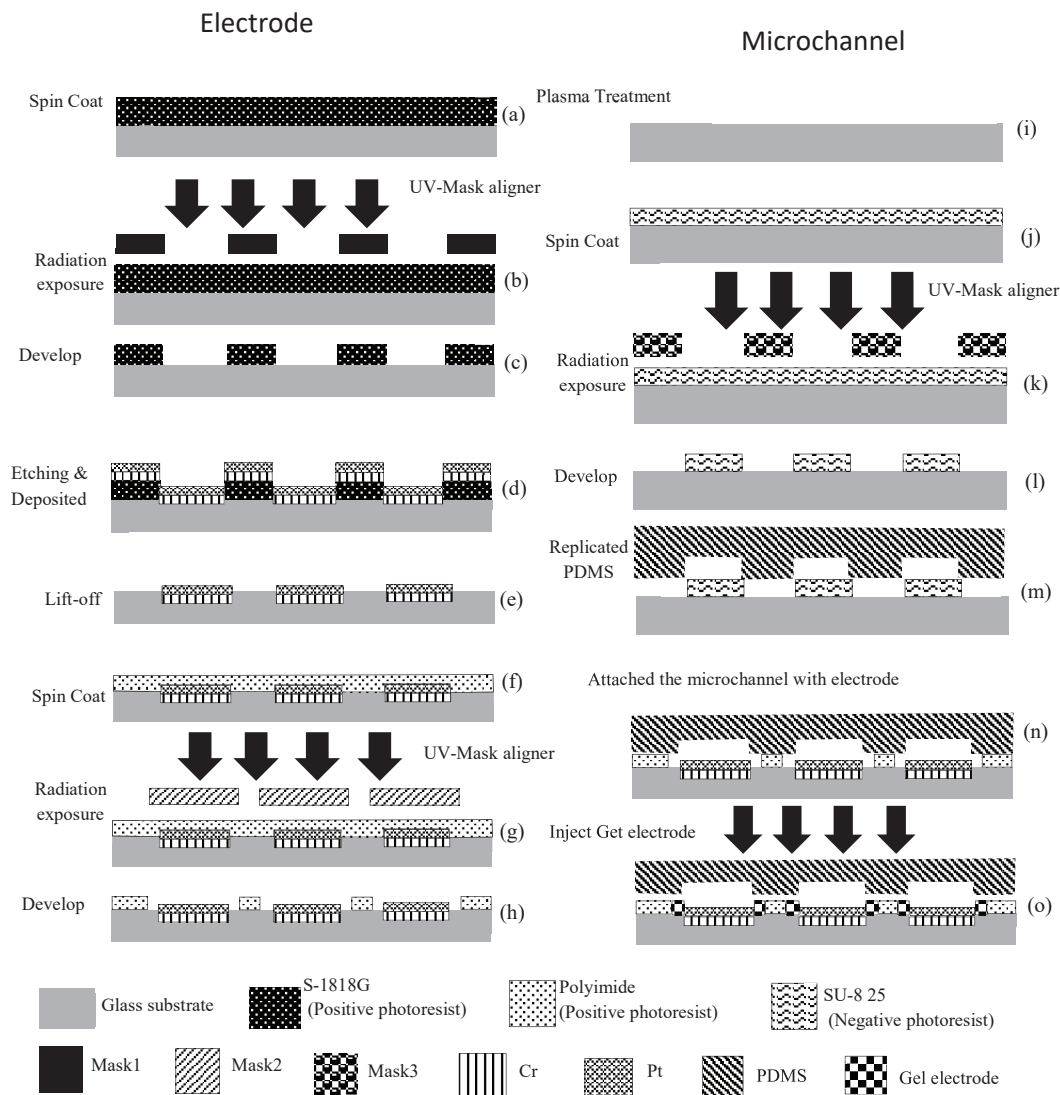
โครงสร้างสำหรับเป็นช่องการไหลจุลภาคถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปตัววาย (Y) เพื่อใช้ในการแยกอนุภาคที่มีประจุบวกและลบออกจากกัน โดยอาศัยการไหลของของไหลในระบบและลำเลียงไปยังพื้นที่ที่กักเก็บ โดยขนาดของช่องการไหลจะมีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 100 x 8,000 ไมโครเมตร และจะถูกสร้างด้วยกระบวนการขึ้นลวดลายด้วยเทคนิค soft-lithography โดยเริ่มจากการนำกระจกที่ทำสะอาดแล้วมาทำการพลาสมา (Plasma) ด้วยก๊าซออกซิเจน (O_2) (รูปที่ 2i) เพื่อให้พื้นผิวของกระจกมีความสะอาดเกิดการยึดเกาะที่ดีระหว่างผิวของฐานชิ้นงานและสารไวแสง จากนั้นทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 25 โดยหมุนเคลือบด้วยความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที จากนั้นปรับความเร็วรอบเป็น 1,250 rpm เป็นเวลา 10 วินาที จะทำให้ได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 40 ไมโครเมตร (รูปที่ 2j) ถัดจากนั้นทำการฉายแสงด้วยเครื่อง UV mask aligner เป็นเวลา 180 วินาที (รูปที่ 2k) ถัดจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 5 min แล้วปรับอุณหภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 30 min รอให้ชิ้นงานเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องประมาณ 15-30 min จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง SU-8 (SU-8 Developer) เป็นเวลาประมาณ 25 นาที (รูปที่ 2l) เมื่อได้โครงสร้างช่องการ

ไหลที่ทำด้วยสารไวแสงชนิดลบหรือแม่แบบ SU-8 จะทำการสำเนาโครงสร้างช่องทางไหลจุลภาคด้วยพอลิเมอร์ PDMS (Polydimethylsiloxane) ซึ่งจะเตรียม PDMS ต่อตัวทำละลายในอัตราส่วน 10:1 ทำการผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปคูดฟองอากาศให้หมด แล้วนำมาเทบนแม่แบบและวางบนเครื่องทำความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาทีหรือจนกว่า PDMS จะแข็งตัว ถัดจากนั้นจะทำการลอกลาย PDMS ออกจากแม่แบบ (รูปที่ 2m) จะทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นช่องการไหลจุลภาค โครงสร้าง PDMS ที่เป็นช่องการไหลจุลภาคจะถูกเจาะรูเพื่อสร้างทางเข้า-ออก แล้วนำมาประกบบนชิ้นงานขั้วอิเล็กโทรด (รูปที่ 2n)

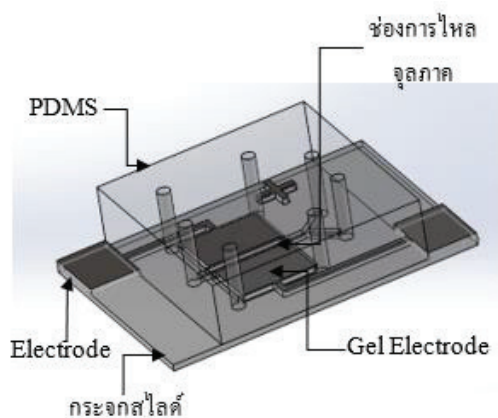
เจลอิเล็กโทรดถูกเตรียมขึ้นโดยการผสมเจลอิเล็กโทรดด้วย PVA-SbQ (Polyvinyl alcohol; PVA - Styrylpyridinium; SbQ) และสารละลาย KCl ด้วยอัตราส่วน 10 : 1 โดยสารละลายที่ผสมแล้วจะถูกเก็บไว้ในอุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส เจลอิเล็กโทรดเจลนี้จะถูกฉีดให้เข้าไปในอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคที่ได้สร้างขึ้นเพื่อให้เข้าไปในพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด Cr/Pt และทำการฉายแสงเป็นเวลา 10 วินาที (รูปที่ 2o) เพื่อให้สารดังกล่าวเกิด Cross-link และแปลงสถานะเป็นเจลที่นำไฟฟ้าได้ แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งจะทำให้ได้อุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคที่มีเจลอิเล็กโทรดประกบทั้ง 2 ด้านตามช่องทางไหลจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 4



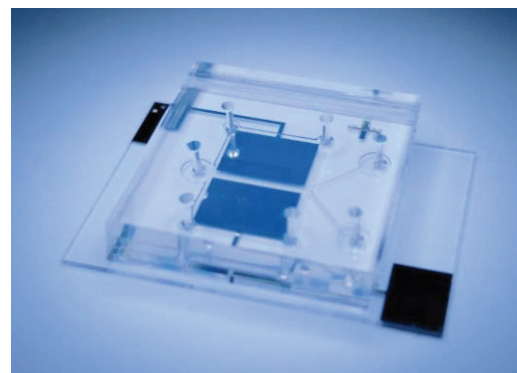
รูปที่ 3 แสดงการ crosslink โครงสร้างทางเคมีของ PVA [17]



รูปที่ 2 กระบวนการสร้างไมโครฟลูอิดิกชนิดแบบเจลอิเล็กโทรด



(ก)



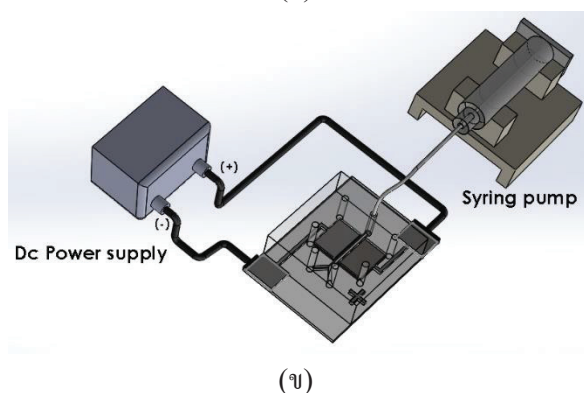
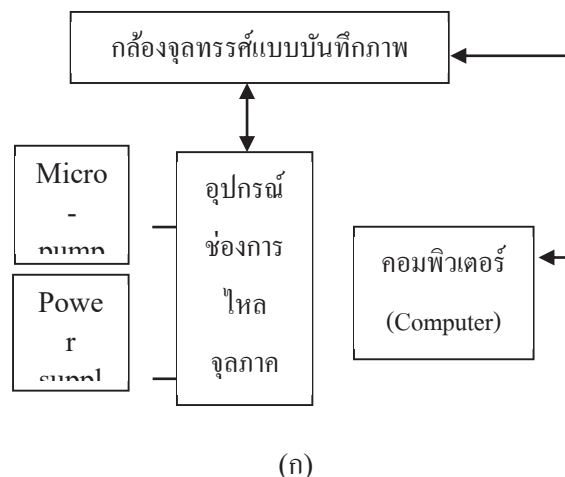
(ข)

รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโทรด (ก) แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโทรด (ข) แสดงอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น

3.2 การเตรียมอนุภาคที่มีประจุและขั้นตอนการทดลอง

เม็ดพอลิสไตรีน (Polystyrene: PS) ที่มีประจุบวกและลบถูกนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติของการเป็นประจุบวกและประจุลบของอนุภาคถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคัดแยกเซลล์สิ่งมีชีวิตที่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับประจุบวกและลบ โดยคุณสมบัติดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการวิจัยด้านชีวการแพทย์ อีกทั้งยังสามารถนำเม็ดพอลิสไตรีนมาตรวจหาปริมาณแอนติเจนหรือแอนติบอดีในซีรัม ปัสสาวะและไขสันหลังได้ ทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโฟลว์ไซโตเมทรี (Flow cytometry) [23,24] โดยเม็ดพอลิสไตรีนดังกล่าวชนิดประจุบวก คือ อะมิโน (Amino) ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก $-NH_3^+$ (cat. no. AP-35-10, Spherotech, Inc.) อนุภาคมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $3.75 \mu m$ โดยความหนาแน่นพื้นผิวประจุที่ $0.8 \mu m$ จะประกอบด้วยอนุภาคอะมิโนประมาณ 15 ถึง 20 ueq/g [25] และเม็ดพอลิสไตรีนชนิดประจุลบ คือ คาร์บอกซิล (Carboxyl) มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบ คือ $-OH^-$ (cat. no. CP-50-10, Spherotech, Inc.) โดยความหนาแน่นพื้นผิวประจุที่ $0.8 \mu m$ จะประกอบด้วยอนุภาคคาร์บอกซิลอยู่ที่ค่าประมาณ 50 ueq/g [25] โดยมีถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI-water) ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.5% w/v โดยก่อนการใช้งานจะนำเม็ดพอลิสไตรีนทำการปั่นป่วน (Resuspend) ด้วยเครื่อง Vortex เพื่อให้เกิดการแขวนลอยของอนุภาค หลังจากนั้นนำไปใส่ไว้ในเครื่องคลื่นอัลตราโซนิก (Sonicate) ด้วยการสั่นสะเทือนของคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้เซลล์หรือโมเลกุลของสารนั้นแยกออกเป็นส่วน ๆ เมื่อทำการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับทำการทดลองแล้ว จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ โดยการนำอุปกรณ์อุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโตรดที่ได้สร้างขึ้นวางบนกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เชื่อมต่อสัญญาณกับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการบันทึกภาพและวิดีโอ จากนั้นนำอุปกรณ์จ่ายไฟ (Power Supply) ชนิดกระแสตรง (Direct current, DC; KEYSIGHT B2962A power source) ทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์

ช่องการไหลจุลภาคที่หัวของเจลอิเล็กโตรดและทำการปรับระบบการไหลด้วยไมโครปั๊ม (ดังแสดงในรูปที่ 5)



รูปที่ 5 แผนผังการทดลองอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโตรด ก. แสดงไดอะแกรมสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโตรด ข. แสดงการเชื่อมต่อระหว่างช่องการไหลจุลภาคแบบเจลอิเล็กโตรดกับชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Syringe pump)

4. ผลการทดลอง

การทดลองจะดำเนินการทดลองด้วยการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมและทดสอบการเกิดฟองอากาศภายในช่องการไหล ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบค่าตั้งแต่ 0.1 โวลต์ ไปจนถึง 1 โวลต์ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้อนุภาคสามารถแยกได้ดีที่สุดคือที่แรงดันไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ ได้แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและความสามารถในการแยกอนุภาคที่มี

ประจุบวกและลบ พบว่าข้อมูลที่ได้มีค่า R square ของประจุบวกเท่ากับ 96.83% และ ประจุลบมีค่าเท่ากับ 98.86% ซึ่งอธิบายได้ว่า ผลของการแยกอนุภาคที่มีประจุบวกและลบเป็นผลกับการใส่ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบแปรผันตรงที่ให้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 96.83% และ 98.86% ตามลำดับ ส่วนที่เหลืออีก 3.17% และ 1.14% เป็นผลจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสมการให้ค่า R square สูง นั้นหมายความว่า ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำเพื่อนำสมการไปใช้ในการคาดคะเนผลลัพธ์ที่มีค่าสูง โดยสมการคำนวณผลของการแยกประจุบวก แสดงดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 สำหรับการคำนวณผลของการแยกประจุลบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่ได้นี้ไม่ก่อให้เกิดฟองอากาศขึ้นระหว่างการทดลอง

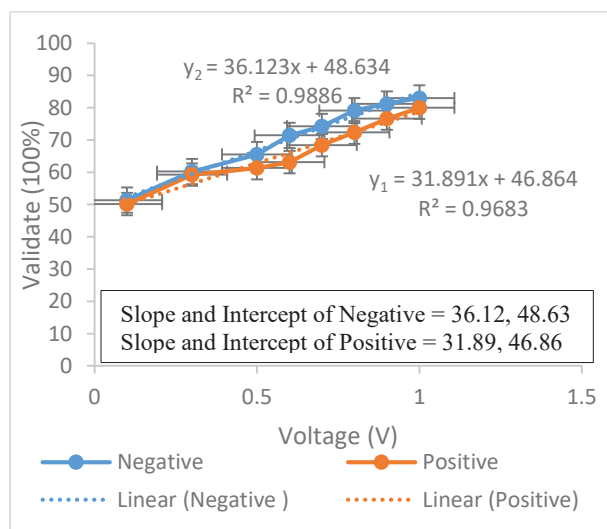
$$Y_1 = 31.891x + 46.864 \quad (4)$$

$$Y_2 = 36.123x + 48.634 \quad (5)$$

เมื่อ Y_1 คือ สมการคำนวณผลของการแยกประจุบวก

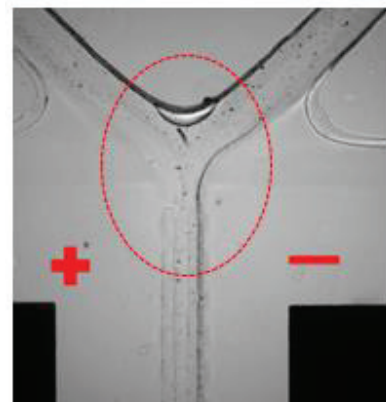
Y_2 คือ สมการคำนวณผลของการแยกประจุลบ

X คือ ค่าความดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ (โวลต์)



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและความสามารถในการแยกอนุภาคที่มีประจุบวกและลบ

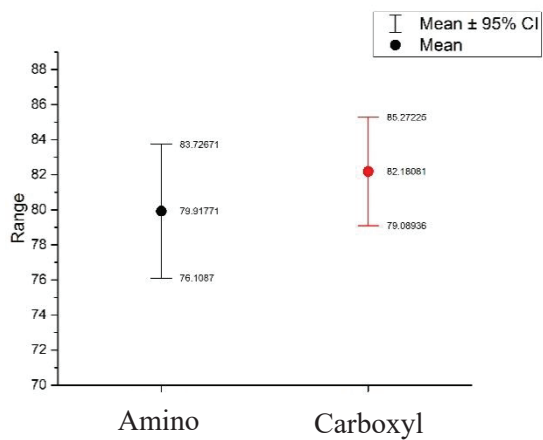
หลังจากหาความสัมพันธ์แล้วจึงนำอุปกรณ์ของการไหลจุลภาคมาทำการทดลองที่ความดัน 1 โวลต์ ซึ่งผลการทดลองเป็นไปดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการแยกอนุภาคเมื่อทำดำเนินการเปิดแหล่งจ่ายไฟที่ความดันไฟฟ้า 1 โวลต์ โดยอนุภาคที่มีประจุลบจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณด้านซ้ายที่จ่ายไฟฟ้าขั้วบวก ขณะเดียวกันอนุภาคบวกจะถูกดึงดูดด้วยสนามไฟฟ้าที่เป็นลบซึ่งเคลื่อนที่มาทางฝั่งขวาและทำการนับจำนวนอนุภาคด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ในการนับจำนวนอนุภาคทั้งสองฝั่ง โดยการทดลองได้ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 การทดลอง ดังผลแสดงในตารางการทดลองที่ 1 ซึ่งพบว่าอุปกรณ์ของไหลจุลภาคสำหรับการแยกอนุภาคแบบมีประจุบวกและลบสามารถทำการแยกได้โดยไม่เกิดฟองอากาศหรือการเสื่อมสภาพของเจลอเล็กโตรไลต์ระหว่างการทดลอง ทำให้สามารถแยกอนุภาคที่มีประจุบวก (Amino) และประจุลบ (Carboxyl) ที่ด้วยเปอร์เซ็นต์ที่แม่นยำที่ 79.92% และ 82.18% ตามลำดับ ด้วยค่าความเชื่อมั่นที่ 95% โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลสำหรับอนุภาคที่มีประจุบวกที่ 3.07 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลสำหรับอนุภาคที่มีประจุลบอยู่ที่ 2.49 โดยมีช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงจุดแยก Y สำหรับการเรียงลำดับลูกบีดที่มีประจุ

ตารางที่ 1 ผลการทดลอง

ผลการทดลอง	เม็ดพอลิไครีน ที่มีประจุบวก (Amino)	เม็ดพอลิไครีน ที่มีประจุลบ (Carboxyl)	การสูญเสียอนุภาค (Particle losses)
1	79.80	83.65	18.28
2	80.00	81.25	19.38
3	81.63	82.46	17.95
4	83.16	78.50	19.17
5	75.00	85.04	19.91
ค่าเฉลี่ย (Mean)	79.92	82.18	18.95
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std.)	3.07	2.49	0.81
ช่วงความเชื่อมั่น (CI)	2.69	2.18	0.71



รูปที่ 8 แสดงค่าความเชื่อมั่นของข้อมูล

5. สรุปงานวิจัย

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่องการไหลจุลภาค เพื่อแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเจลอิเล็กโตรดถูกพัฒนาขึ้น เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดออกไซด์/สารเคมีของโลหะที่นำมาทำเป็นขั้วอิเล็กโตรดเมื่อมีการสัมผัสกับของไหลในช่องการไหล รวมทั้งป้องกันสารบางชนิดที่สัมผัสแล้วทำให้เกิดการกัดกร่อน การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับขั้วอิเล็กโตรดและเพื่อป้องกันการเกิดความร้อนอันจะส่งผลให้ช่องการไหลมีฟองอากาศ สำหรับการแยกอนุภาคที่มี

ประจุบวกและลบได้ถูกทดสอบโดยโครงสร้างไม่ถูกรบกวนด้วยฟองอากาศหรือการเสื่อมสภาพของขั้วเจลอิเล็กโตรดระหว่างการทดลอง นอกจากนี้ยังสามารถแยกอนุภาคที่มีประจุออกมาอย่างแม่นยำด้วยเปอร์เซ็นต์ในการตรวจสอบการแยกของอนุภาคที่ประจุลบและบวกที่ 82.18% และ 79.92% ตามลำดับ สามารถทำการแยกอนุภาคได้อย่างแม่นยำที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สำหรับแนวทางการวิจัยในอนาคต ทางคณะผู้จัดทำมีความคาดหวังในการนำโมเดลนี้ไปใช้สำหรับการคัดแยกอนุภาคที่มีประจุ หรือเซลล์ที่มีประจุ ซึ่งจะเกิดประโยชน์ต่อผู้ที่กำลังทำวิจัยด้านเทคโนโลยีชีวภาพในการแยกเซลล์ของสิ่งมีชีวิต การคัดเลือกคุณภาพของเซลล์พืช รวมถึงการทดสอบและประยุกต์ใช้งานกับการทดลองอวัยวะเทียมบนชิพในอนาคตต่อไป

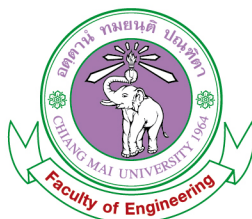
6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) หลักสูตรปริญญาเอก (PHD57I0053)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pethig, R. and Markx, G. H. Applications of Dielectrophoresis in Biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 1997; 15: 426-432
- [2] Gascoyne, P. R. C. and Vykoukal, J. V. Dielectrophoresis-Based Sample Handling in General-Purpose Programmable Diagnostic Instruments. *IEEE Inst Electr Electron Eng*, 2004; 92(1): 22-42.
- [3] Jones, T. B. Basic Theory of Dielectrophoresis and Electrorotation. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 2003; 22: 33-42.
- [4] Green, N. G., Morgan, H. and Milner, J. J. Manipulation and trapping of submicron bioparticles using dielectrophoresis. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 1997; 35: 89-102.
- [5] Schnelle, T., Muller, T. and Fuhr, G. Trapping in AC Octode Field Cages. *Journal of Electrostatics*, 2000; 50:17-29.
- [6] Voldman, J., Toner, M., Gray, M. L. and Schmidt, M. A. Design and Analysis of Extruded Quadrupolar Dielectrophoretic Traps. *Journal of Electrostatics*, 2003; 57: 69-90.
- [7] Pethig, R. Dielectrophoresis: Using Inhomogeneous AC Electrical Fields to Separate and Manipulate Cells. *Critical Reviews in Biotechnology*, 1996;16(4): 331-348.
- [8] Becker, F. F., Wang, X. B., Huang, Y., Pethig, R., Vykoukal, J. and Gascoyne, P.R. Separation of Human Breast Cancer Cells from Blood by Differential Dielectric Affinity. *The National Academy of Sciences of the United States of America*, 1995; 92: 860-864.
- [9] Fiedler, S., Shirley, S. G., Schnelle, T. and Fuhr, G. Dielectrophoretic Sorting of Particles and Cells in a Microsystem. *Analytical Chemistry*, 1998; 70: 1909-1915.
- [10] Hu, X. Y., Bessette, P. H., Qian, J. R., Meinhart, C. D., Daugherty, P.S. and Soh, H.T. Marker-specific Sorting of Rare Cells Using Dielectrophoresis. *The National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005; 102: 15757-15761.
- [11] Markx, G. H., Huang, Y., Zhou, X. F., Pethig, R. Dielectrophoretic Characterization and Separation of Microorganisms. *United Kingdom Microbiology Journals*, 1994; 140: 585-591.
- [12] Huang, Y., Wang, X. B., Holzel, R., Becker, F. F. and Gascoyne, P. R. Electrorotational Studies of the Cytoplasmic Dielectric Properties of Friend Murine Erythroleukaemia Cells. *Journal of Physics in Medicine & Biology*, 1995; 40: 1789-1806.
- [13] Flanagan, L. A., Lu, J., Wang, L., Marchenko, S. A., Jeon, N.L., Lee, A.P. and Monuki, E.S. Unique Dielectric Properties Distinguish Stem Cells and Their Differentiated Progeny. *Journal Stem Cells*, 2008; 26(3): 656-665.
- [14] Patent No.: US 6,939,451 B2, 2005.
- [15] Pethig, R. and Markx, G. H. Applications of Dielectrophoresis in Biotechnology. *Trends Biotechnol*, 1997; 15(10): 426-432.
- [16] Gascoyne, P. R. C., Noshari, J., Anderson, T. J., and Becker, F. F. Isolation of Rare Cells from Cell Mixtures by Dielectrophoresis. *Electrophoresis*, 2009; 30(8): 1388-1398.
- [17] Cristofanilli, M., Krishnamurthy, S., Das, C. M., Reuben, J. M., Spohn, W., Noshari, J., Becker, F., and Gascoyne, P. R. Dielectric Cell Separation of Fine Needle Aspirates from Tumor Xenografts. *Journal of Separation Science*, 2008; 31(21); 3732-3739.
- [18] Yao, J., Zhu, G., Zhao, T. and Takei, M. Microfluidic Device Embedding Electrodes for Dielectrophoretic Manipulation of Cells - A Review. *Electrophoresis*, 2018; 10: 1-28.
- [19] สิทธิศักดิ์ ปุ้ยอ้อ, สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์. 2019. [online] available: <http://up.to/thaiDEP>
- [20] Radford, A.J., Jones, S.L. and Howard, J.L. Cell-mediated Immune Response Assay and Kits Therefor. *Polymer science Part B: Polymer Physics*, 2014; 53(5): 345-455.
- [21] Fritsch, R.J. and Krause, I. The Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. Second Edition, ELECTROPHORESIS, 2003.
- [22] อิเล็กโตรโฟรีซิส, 2019. [online] available: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%AD%E0%B8%B4%E0%B9%80%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81%E0%B9%82%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B9%82%E0%B8%9F%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%AA>

- [23] Ying, Z., Jun, L., Zheng, X., Hua, L., Li, W., Yinguang, G., Zifeng, L., Jinhuan, L., and Jipeng, H. User-defined Microstructures Array Fabricated by DMD Based Multistep Lithography with Dose Modulation. *Optics Express*. 2019; 2722: 31957.
- [24] Product Information, Sigma-alorich, 2019. [online] available:
https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigmaaldrich/docs/Sigma/Product_Information_Sheet/2/lb11pis.pdf
- [25] SPHEROTM Polystyrene Particles, 2010-2011. [online] available:
<https://spherotech.com/polystyrene%20particles%20catalog%202010-2011%20rev%20a.pdf>



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal Chiang Mai University

The aim of this journal is to provide a forum for reporting progress on original basic or applied research including review articles in all branches of engineering and related fields.

Engineering Journal CMU is sponsored by the Faculty of Engineering, Chiang Mai University. Papers are selected for publication through a peer review (double blinded) process. Submitted articles are judged on the technical originality, quality of exposition and significance of the results. To assist in speeding up the review and publication process, author are requested to follow the Journal's style and format. Author should refer to current issues as a guide. Electronic template of manuscript may be downloaded from <<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU>>. Details of style and format are in the Note for Contributors section of this issue. Submit your manuscript via online submission system <<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU>> The published could be loaded from <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU>

Online Submission of Papers Normal Process:

Authors are requested to submit 2 original manuscripts to the editor of Engineering Journal CMU, Faculty of Engineering, Chiang Mai University. Submission of a paper implies that it has not been published elsewhere in the same form. A final revised version of your accepted manuscript should be submitted on a floppy diskette as well as hard copy. The content of the diskette must correspond exactly to the hard copy version of the paper. On-line process, Authors could submit the manuscript online through <<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/EngJCMU>>

Advisory Board

Asst. Prof. Dr. Nat Vorayos
Assoc. Prof. Dr. Phrut Sakulchangsatjatai

Editor

Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot : tanong@dome.eng.cmu.ac.th

Editorial Board

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Thailand :

Prof. Dr. Nakorn Tippayawong	Assoc. Prof. Dr. Nivit Charoenchai
Assoc. Prof. Dr. Khajornsak Sopajaree	Assoc. Prof. Dr. Thongchai Fongsamootr
Assoc. Prof. Dr. Serm Sak Uatrongjit	Assoc. Prof. Dr. Amarin Boontun
Assoc. Prof. Dr. Sansanee Auephanwiriyaikul	Assoc. Prof. Dr. Chayanon Hansapinyo
Prof. Dr. S. Seraphin, National Science and Technology Development Agency, Thailand	
Prof. Dr. Sirivatch Shimpalee, University of South Carolina, USA	
Assoc. Prof. Dr. Jaturapat Varith, Maejo University, Thailand	
Assoc. Prof. Dr. Nattaporn Chaiyai, Maejo University, Thailand	
Assoc. Prof. Dr. Somkiat Jaturonglumlert, Maejo University, Thailand	
Dr. Atipong Nuntaphan, Electricity Generating Authority of Thailand	
Assoc. Prof. Dr. N. Maruyama, Mie University, Japan	
Prof. Dr. C.C Wang, National Chiao Tung University, Taiwan	
Prof. Dr. Junfeng Wang, Jiangsu University, PR.China	
Assoc. Prof. Dr. Nguyen Huy Bich, Nonglam University, Vietnam	

Address

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200 Tel.0-5394-4176-7 Fax.0-5321-7287
Website : www.eng.cmu.ac.th

The Engineering Journal Chiang Mai University (ISSN 0857-2178) has published 3 issues annually in January, May and September since 1994 in Thai.

การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตด้วยแบบหลายสายของระบบเซลล์ลุ่มแบบมากวัตถุประสงค์.....	106-120
(Worker Allocation Problem on Multiple Cellular U-Shaped Lines Under Many-Objectives)	
จุไรรัตน์ ฉิมระลัง และ ปารเมศ ชูติมา	
เทคโนโลยีการแปรรูปเศษชีวมวลเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเชิงคุณภาพสูง.....	121-150
(Biomass Torrefaction Technology for Producing High Quality Solid Biofuels)	
ภูมินทร์ คงโต อาคม ปะหลามานิต สุเมธ ไชยประพัทธ์ และ นคร ทิพย์างค์	
การควบคุมการฟุ้งกระจายฝุ่นถ่านหินบริเวณโม่บดด้วยม่านอากาศ.....	151-163
(Control of Coal Particle Dispersion over Crusher by Air Curtain)	
ชัยภูมิ กฤษ จันทพิมพะ และ อรรถกร อาสนคำ	
Optimization for Reduction of NOx and Heat Loss of Parawood Chips Boiler Process Combined with Air Preheater and Controller Using Aspen Dynamics.....	164-179
Jirateep Premsuksatian and Pornsiri Kaewpradit	
การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันชีวภาพโดยกระบวนการเผาแบบไร้อากาศบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	180-190
(Bio Fuel from Bio-Oil by Pyrolytic Catalysis on Dolomite)	
สวาททิพย์ ผลาเลิศ ทินกร คำแสน และ กิติโรจน์ หวันตาหลา	
ความดันกระแทกและพฤติกรรมของลำพุ่งจากการฉีดยาแบบไร้เข็มด้วยวิธีการแตกที่มีต้นกำเนิดจากสปริงและแก๊ส.....	191-200
(Impact Pressure and Behavior of Liquid Jet Generated from IDM Needle Free-Jet Injection Powered by Spring and Gas)	
พลตรี วงษ์ประสานต์ วีระพันธ์ สีหานาม กมลชนก อูระ และ กุลเชษฐา เพียรทอง	
การประยุกต์ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมและวิธีพื้นผิวตอบสนองสำหรับการทำนายสมบัติทางกลและหาความเหมาะสมในการเชื่อมลวดเชื่อมอลูมิเนียมเกรด 5083.....	201-215
(Application of Artificial Neural Network and Response Surface Methodology for Mechanical Property Prediction and Optimization in Aluminum Hull Welding for Alloy 5083 Grade)	
ปรัชญา เพียรสุระ และ สุทธิพงษ์ ไสกา	
การออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ของไหลจุลภาคสำหรับการแยกอนุภาคที่มีประจุด้วยเจลอิเล็กโทรด.....	216-226
(Design and Fabrication of Microfluidic Chip for Charged Beads Separation using Gel Electrodes)	
ชาลินี พิพัฒน์พิภพ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ คมกฤต เล็กสกุล	

