



การออกแบบระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตโยเกิร์ต

Design of supporting system for production planning in yoghurt manufacturing

สุริยะ เปียอยู่* และ สิริวิชญ์ สว่างนพ

Suriya Piayu* and Siravit Swangnop

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 1330

*Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Patumwan, Bangkok
Chulalongkorn University, 1330, Thailand

*E-mail: pc_piayu@hotmail.com, Telephone Number: 089-1306153, Fax. 02-251-3969

บทคัดย่อ

การวางแผนการผลิตโยเกิร์ตมีความซับซ้อนเนื่องจากข้อกำหนดของกระบวนการผลิตที่หลากหลายและเงื่อนไขการทำความสะอาดเครื่องจักรที่แตกต่างกันในแต่ละขั้นตอนผลิต ในปัจจุบันพนักงานมักวางแผนการผลิตด้วยมือซึ่งทำให้ใช้เวลานานและเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากต้องพิจารณาเงื่อนไขและข้อมูลจำนวนมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตโยเกิร์ต โดยประยุกต์ใช้การจัดตารางแบบถอยหลัง (Backward scheduling) และกฎการจ่ายงานแบบ Earliest due date (EDD) ในการจัดตารางการผลิต และใช้ VBA ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งในโปรแกรม Microsoft excel สำหรับการสร้างระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิต ระบบสนับสนุนที่พัฒนาถูกนำไปทดลองใช้งานจริงเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแผนการผลิตและความสะดวกในการใช้งานระบบ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระยะเวลาการสร้างแผนการผลิตลงได้ถึง 90% โดยที่แผนการผลิตที่ได้ยังคงเป็นไปตามเงื่อนไขของการผลิตโยเกิร์ต สามารถระบุเวลาในการทำความสะอาดเครื่องจักรได้ทุกตัว และพนักงานสามารถสร้างแผนการทำความสะอาดที่สอดคล้องกับแผนการผลิตได้ ซึ่งแนวคิดนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการผลิตสินค้าที่เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องและมีข้อจำกัดเรื่องการทำทำความสะอาดอื่นๆ เช่นนมพาสเจอร์ไรส์ เครื่องดื่มและขนมขบเคี้ยว เป็นต้น

ABSTRACT

Production planning of yoghurt is complicated due to process requirements and varieties of machine cleaning procedure at different stages. The current situation, staff is making production plan by hand, which is time consuming and could have error easily due to production constraints and large amounts of data. This research aims to develop a system to support yoghurt production planning. Principles of Backward scheduling and Earliest Due Date (EDD) rules are applied on this support system. Then function visual basic for applications (VBA) is used to create the production plan. This support system is tested in real production in order to evaluate the effectiveness of the plan and ease of use.

The results show that the developed support system can reduce the time to create a plan by up to 90% and the plan is conformed with all yoghurt production constraints. In addition operator who has basic understanding of yoghurt processing could use this system to make a plan. Moreover this concept method could apply in another manufacturing having continuous processing and cleaning constraint such as pasteurized milk, beverage and snack.

1. บทนำ

การผลิตโยเกิร์ตแบบบรรจุถ้วยและโยเกิร์ตแบบบรรจุขวดหรือที่เรียกว่านมเปรี้ยวนั้น จะมีข้อจำกัดในกระบวนการผลิตหลายปัจจัย ทั้งจากในกระบวนการผลิตเองเช่น ข้อกำหนดเรื่องการทำความสะดวกของแต่ละเครื่องจักร ข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตในแต่ละขั้นตอน ข้อจำกัดเรื่องเวลาของแต่ละช่วงการผลิตและข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาการส่งมอบ เนื่องจากเป็นสินค้าที่มีอายุการจัดเก็บสั้นและเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความเสี่ยงเรื่องเชื้อจุลินทรีย์มาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยภายนอกเช่นคุณภาพของนมดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิต เวลาที่ผู้รับเหมาสามารถจัดส่งนมดิบได้ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงแผนการผลิต เนื่องจากการประมาณการขายที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลาที่ส่งผลให้ต้องปรับแผนการผลิตใหม่

เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายด้านดังที่ได้กล่าวมาผู้ที่ทำหน้าที่วางแผนการผลิต จึงต้องมีความรู้และเข้าใจในกระบวนการผลิตเป็นอย่างดี เพื่อจะได้พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างครอบคลุมและวางแผนได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังต้องสามารถปรับแผนการผลิตได้อย่างรวดเร็วเมื่อคำสั่งผลิตเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามพบว่าในปัจจุบันผู้ที่ทำหน้าที่วางแผนสูญเสียเวลาเพื่อใช้ในการวางแผนการผลิตค่อนข้างนาน และยังไม่สามารถพิจารณาข้อจำกัดทั้งหมดได้อย่างครบถ้วน เนื่องจากเงื่อนไขการผลิตและเงื่อนไขการความสะดวกเครื่องจักรที่มีความซับซ้อนรวมถึงยังขาดเครื่องมือและตรรกะที่จะนำมาใช้เพื่อรองรับการทำงานดังกล่าว ทำให้บางครั้งเมื่อพบปัญหาจากแผนการผลิต พนักงานในระดับปฏิบัติการอาจทำการตัดสินใจเอง ซึ่งกรณีที่มีการตัดสินใจไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้เกิดการรอกคอยการบรรจุของเครื่องบรรจุ เนื่องจากการทำความสะอาดเครื่องจักรผิดช่วงเวลา หรือผลิตภัณฑ์อาจจะรอบรรจุนานเกินไป จนส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสินค้าเช่น โยเกิร์ตมีรสชาติเปรี้ยวอันเกิดจากการหมักที่เกินมาตรฐานที่กำหนด และมีความเสี่ยงของ

การเกิดการแยกชั้นในเนื้อโยเกิร์ต รวมถึงอาจเกิดค่าปรับเนื่องจากความล่าช้าในการส่งมอบให้กับลูกค้า

ในปัจจุบันการวางแผนการผลิตใช้หลักการจัดการงานแบบไปข้างหน้า (Forward scheduling) เพื่อจัดการกับความซับซ้อนของข้อจำกัดในการผลิต แต่การจัดการการผลิตด้วยหลักดังกล่าวอาจส่งผลให้เครื่องบรรจุซึ่งเป็นสถานีงานที่อยู่ท้ายสายการผลิตเกิดการรอกคอยโยเกิร์ตเพื่อใช้ในการบรรจุ หรือทำให้โยเกิร์ตที่รอการบรรจุอยู่ในถังกวนเกินไปและส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นประเด็นหลักที่ควรคำนึงถึงในอุตสาหกรรมการผลิต โยเกิร์ต

งานวิจัยนี้ใช้การวางแผนการผลิตแบบจัดการงานถอยหลัง (Backward scheduling) และจัดลำดับงานด้วยหลักการ EDD (Earliest Due Date) เนื่องจากโรงงานให้ความสำคัญกับเรื่องเวลาในการส่งมอบและไม่ต้องการให้โยเกิร์ตอยู่ในถังกวนรอการบรรจุเกินกว่ามาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ และพัฒนาระบบสนับสนุนการวางแผนโดยใช้ VBA (Visual Basic for Applications) ของโปรแกรม Microsoft Excel

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โยเกิร์ตเป็นผลิตภัณฑ์จากนมที่มีความนิยมนมากที่สุดชนิดหนึ่ง [1] โดยหลัก ๆ แล้วจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ Set yoghurt กับ Stirred yoghurt ซึ่ง Set yoghurt จะเป็นการหมักในถ้วยผลิตภัณฑ์หลังการบรรจุ ส่วน Stirred yoghurt จะเป็นการหมักก่อนที่จะทำการบรรจุ [2] มีลักษณะการผลิตคือนำนมที่ผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์แล้วเติมแบคทีเรียที่ทำให้เกิดกรดแล็กติกลงไป โปรตีนในนมจึงเกิดการตกตะกอน โดยแบคทีเรียที่ใส่จะเป็นกลุ่ม thermophilic lactic acid bacteria ได้แก่ สเตรปโตคอคคัสเทอร์โมฟิลัส แล็กโทแบซิลัสสับลาคาริซิส ซึ่งอัตราส่วนของทั้งสองชนิดควรจะเท่าๆ กัน เนื่องจากจะได้ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตซึ่งกันและกัน แล้วทำให้เกิดกรดแล็กติกอันเป็นรสชาติเฉพาะของโยเกิร์ต [3] ตาม

ประกาศกระทรวงสาธารณสุขแล้วโยเกิร์ตจะมีอายุการจัดเก็บไม่เกิน 30 วัน [4]

2.1 ขั้นตอนการผลิตโยเกิร์ตบรรจุถ้วย

2.1.1 รับนมดิบและฆ่าเชื้อเบื้องต้น เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในนมดิบ

2.1.2 ผสมส่วนผสมตามสูตรที่กำหนด ในขั้นตอนนี้จะมีการผสมนมดิบ สารให้ความหวาน สารให้ความคงตัว รวมถึงมีการเติมนมผงและส่วนผสมอื่นๆ เพื่อปรับค่าองค์ประกอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนด

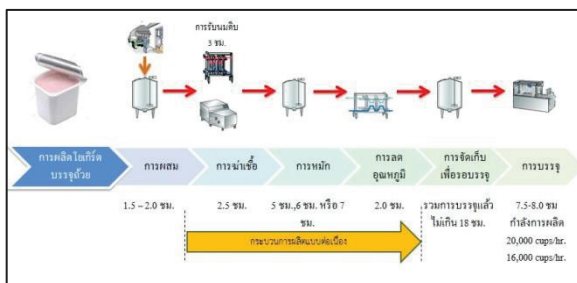
2.1.3 ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบโดยใช้กระบวนการพาสเจอร์ไรเซอร์เพื่อช่วยลดขนาดของเม็ดไขมันในนมที่ 10,000 – 70,000 kPa [5] การพาสเจอร์ไรเซอร์ในช่วงอุณหภูมิ 90-95°C เป็นเวลา 3-10 นาที [6] เพื่อป้องกันไม่ให้มีเชื้อชนิดอื่นที่ไม่ต้องการมารบกวนเชื้อที่ใช้ในการหมัก จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการ

2.1.4 เติมเชื้อจุลินทรีย์เพื่อทำการหมัก จากนั้นหมักจนได้ค่าความเป็นกรด (pH) ตามที่กำหนด

2.1.5 ลดอุณหภูมิของโยเกิร์ตที่หมักเสร็จแล้วลงเพื่อชะลอการทำงานของจุลินทรีย์ โดยจะลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 10°C [6] รวมทั้งปรับสภาพเนื้อสัมผัสให้เนียนและละเอียด

2.1.6 จัดเก็บในถังเพื่อรอการบรรจุ

2.1.7 บรรจุตามขนาดและรสชาติที่กำหนด โดยในขั้นตอนนี้อาจมีการเติมเนื้อผลไม้, สีและกลิ่นเข้าไปด้วย



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตโยเกิร์ตบรรจุถ้วย

2.2 ขั้นตอนการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวด

2.2.1 ผสมส่วนผสมตามสูตรที่กำหนด โดยในการผลิตจะแบ่งขั้นตอนการผลิตเป็น 2 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกจะเป็นการผลิตส่วนที่เป็นเนื้อโยเกิร์ต ส่วนที่สองจะเป็นน้ำเชื่อม (Syrup) อัตราส่วนระหว่างส่วนที่เป็นเนื้อโยเกิร์ตและน้ำเชื่อม คือ 50:50

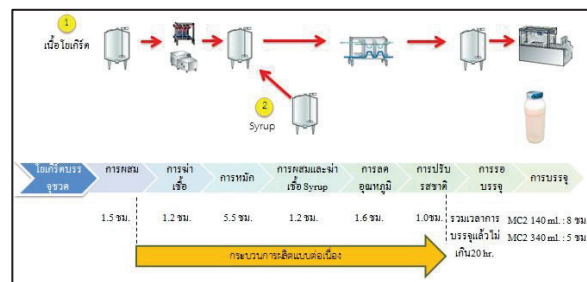
2.2.2 ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับวัตถุดิบโดยใช้กระบวนการพาสเจอร์ไรเซอร์เพื่อป้องกันไม่ให้มีเชื้อชนิดอื่นที่ไม่ต้องการมารบกวนเชื้อที่ใช้ในการหมัก จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการ

2.2.3 เติมเชื้อจุลินทรีย์เพื่อทำการหมัก แล้วหมักจนได้ค่าความเป็นกรดตามที่กำหนด

2.2.4 เมื่อการหมักสมบูรณ์แล้ว จะทำการผสมและฆ่าเชื้อส่วนที่เป็นน้ำเชื่อมเข้ามาในถังหมัก

2.2.5 ลดอุณหภูมิของโยเกิร์ตที่หมักเสร็จแล้วลงเพื่อชะลอการทำงานของจุลินทรีย์

2.2.6 ปรับรสชาติของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวด

2.3 หลักการวางแผนการผลิต

การจัดตารางงานมีวัตถุประสงค์หลายอย่างเช่น เพื่อให้สามารถส่งงานได้ทัน, ลดเวลาการว่างของคนและเครื่องจักร, ลดงานที่ค้างอยู่ระบบ เป็นต้น [7] แนวทางในการจัดตาราง แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การจัดตารางกิจกรรมแบบไปข้างหน้า (Forward scheduling) และการจัดตารางแบบถอยหลัง (Backward scheduling) โดยมีรายละเอียดดังนี้ [8]

2.3.1 การจัดตารางแบบไปข้างหน้า จะเริ่มจัดตารางทันทีหลังจากที่ได้รับงานและทราบเกี่ยวกับลักษณะงานที่ต้องทำ มักใช้กับสินค้าที่ผลิตเพื่อเก็บเข้าคลังพัสดุ (Make to stock) โดยไม่ได้มุ่งเน้นเป้าหมายไปที่การส่งมอบการตรงตามกำหนดเวลา แต่จะเน้นไปที่การใช้ทรัพยากรที่มีให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

2.3.2 การจัดตารางแบบถอยหลัง วิธีการจัดแบบนี้ มักจะให้ความสำคัญกับเวลาส่งมอบงาน ซึ่งจะจัดตารางงานจากงานลำดับสุดท้ายก่อนหรืองานที่ต้องส่งมอบช้าสุดก่อน แล้วย้อนมาหางานแรก โดยจะต้องพยายามวางแผนงานให้เสร็จสิ้นก่อนวันกำหนดส่งมอบของงานนั้นๆ และต้องไม่ขัดกับข้อจำกัดของทรัพยากร หรือไม่มีงานมากกว่า 1 งานทำบนเครื่องจักรตัวเดียวกัน ในช่วงเวลาเดียวกัน ถ้าไม่สามารถเป็นไปได้ ให้ทำการเลื่อนงานให้เริ่มเร็วขึ้นจนไม่มีงานที่ต้องทำพร้อมกัน

การจัดตารางงานด้วยเทคนิคนี้ มักใช้กับการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า (Make to order) ที่มีเป้าหมายอยู่ที่การส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าได้ทันเวลาตามที่กำหนด

2.4 ประเภทของกฎการจ่ายงาน

กฎการจ่ายงานจะถูกนำมาใช้สำหรับการแก้ไขปัญหาการจัดตารางกรณีที่มียานตั้งแต่ 2 งานขึ้นไปรอการทำงานบนเครื่องจักร (ทรัพยากร) เดียวกัน ซึ่งทำให้ต้องตัดสินใจว่าจะให้งานใดทำก่อน ตัวอย่างกฎการจ่ายงานที่ถูกนำมาใช้บ่อยในการจัดตารางการผลิต ได้แก่

2.4.1 FASFS (First Arrive at the Shop First Served) ให้ความสำคัญสูงกับงานที่เข้ามาในระบบก่อน

2.4.2 TWOR (Total Work) ให้ความสำคัญกับงานที่มีเวลารวมทั้งหมดจากทุกการดำเนินงานน้อยที่สุดก่อน

2.4.3 EDD (Earliest Due Date) ให้ความสำคัญกับงานที่มีระยะเวลาดำเนินการสั้นที่สุดก่อน

2.4.4 FCFS (First Come First Served) ให้ความสำคัญกับงานที่มาถึงแถวคอยเป็นอันดับแรกก่อน

2.4.5 MST (Minimum Slack Time) ให้ความสำคัญกับงานที่มีเวลาหย่อนน้อยที่สุดก่อน

2.4.6 SPT (Shortest Processing Time) ให้ความสำคัญกับงานที่มีระยะเวลาในการดำเนินงานบนเครื่องจักรนั้นสั้นที่สุดก่อน

หนึ่งในวิธีการจัดตารางงานที่มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถส่งมอบได้ทันเวลาคือใช้กฎ EDD หรือการจัดลำดับของงานตามความเร่งด่วน การจัดลำดับงานด้วยวิธี “กำหนดส่งมอบเร็วที่สุด (Earlier Due Date: EDD)” จะส่งผลให้เวลาสายมากที่สุดของงานมีค่าน้อยที่สุด [8]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประพัฒน์ [9] ได้ทำการปรับปรุงระบบการวางแผนการผลิตของโรงพ่นสีพลาสติกชิ้นส่วนจักรยานยนต์ โดยนำเทคนิคของการจัดตารางการผลิต รวมถึงการนำเอาโปรแกรมออนไลน์มาใช้ในการติดตามงาน ระบบที่ได้สามารถลดจำนวนงานล่าช้าของการพ่นสีลงได้ 63.53% และลดจำนวนงานล่าช้าจากการติดกราฟิกได้ 62.29% สำหรับในการจัดตารางการผลิตผู้แต่งใช้กฎการจ่ายงานแบบ EDD เป็นวิธีการจัดตารางหลักและใช้ SPT เป็นการ จัดตารางรอง และยศธนา [10] ทำการปรับปรุงกระบวนการวางแผนการผลิต เนื่องจากพบว่ามีปัญหาสินค้าคงคลังที่มากเกินไปจนถึงการส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าล่าช้า โดยประยุกต์ใช้เทคนิคทางวิศวกรรมอุตสาหการและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวางแผนผลิต ทำให้เวลาไหลเฉลี่ยของงานที่เป็นกลุ่มผ้าเช็ดหน้า มีค่าลดลง 33.8% และมีงานล่าช้าเฉลี่ยลดลง 41.2% สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กฎการจ่ายงานแบบ EDD (Earliest Due Date) ประกอบกับโปรแกรม Microsoft Excel นอกจากนี้ Philip Doganis และ Haralambos Sarimveis [11] ได้ทำการศึกษาการวางแผนการบรรจุของการผลิตโยเกิร์ต โดยอาศัย Mixed Integer Linear Programming (MILP) ด้วยโปรแกรม CPLEX เพื่อหาแผนการบรรจุที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด พบว่าการใช้ MILP สามารถช่วยในการวางแผนการผลิตได้ แต่ในที่นี้ได้ทดสอบบนเครื่องจักรเดียว ยังไม่ได้ขยายผลไปยังเครื่องจักรหลายๆ เครื่อง

สิทธิพร จันท์เฉลิมพร [12] ได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาการส่งมอบไก่สุกแช่แข็งส่งออกล่าช้า โดยพบว่าสาเหตุหลักคือฝ่ายวางแผนได้รับข้อมูลสินค้าคงคลังจากฝ่ายคลังสินค้าล่าช้า และมีการรอคอยระหว่างขั้นตอนการดำเนินงาน จึงได้ใช้หลักการ CPM (Critical Path Method) เพื่อหาเส้นทางวิกฤตของกระบวนการวางแผนการส่งออก และใช้หลัก Process Activity Mapping เพื่อการจัดกิจกรรมที่ไม่เกิดคุณค่าพบว่าสามารถกำจัดกิจกรรมที่ไม่เกิดคุณค่าและลดเวลาในการวางแผนการส่งออกจาก 6,670 นาที เป็น 5,065 นาที หรือคิดเป็นร้อยละ 24.06

นอกจากนี้ ศันสนีย์ เปลี่ยนสงค์ [13] ทำการศึกษาการวางแผนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตของโรงงานผลิตอาหารเสริม โดยการวิเคราะห์หาสาเหตุของการส่งมอบสินค้าล่าช้าโดยใช้แผนภาพพาเรโต (Pareto Chart) โดยพบว่าสาเหตุของปัญหาคือการประเมินกำลังการผลิตผิดพลาด และมีการแทรกงานให้กับลูกค้าที่ต้องการสินค้าเร่งด่วน ผู้วิจัยได้แก้ปัญหาโดยการจัดตารางการผลิตเพื่อนำมาใช้ในการวางแผนการผลิต และนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมไมโครซอฟต์โปรเจกต์ (Microsoft Project) โดยพบว่าสามารถช่วยผู้วางแผนการผลิตในการตัดสินใจในการแทรกงานได้ โดยจำนวนการผลิตครบตามจำนวนใบสั่งเพิ่มขึ้น จาก 66% เป็น 80% และจำนวนครั้งในการส่งมอบล่าช้าลดลงจาก 34% เหลือ 20%

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

3.1 การรวบรวมและวิเคราะห์การทำงานในปัจจุบัน

1. ศึกษาข้อจำกัดต่างๆ ในการผลิตโยเกิร์ตบรรจุถ้วยและโยเกิร์ตบรรจุขวด เพื่อทราบเงื่อนไขที่จำเป็นต้องพิจารณา ประกอบการวางแผนการผลิตทั้งในด้านระยะเวลาในการผลิตสินค้าแต่ละชนิด จำนวนเครื่องจักรที่มีความถี่ที่ต้องทำความสะอาด และระยะเวลาในการทำความสะอาดแต่ละครั้ง รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกันระหว่างการผลิตโยเกิร์ตบรรจุถ้วยและโยเกิร์ตบรรจุขวด

ในการทำวิจัยครั้งนี้ โรงงานที่เป็นกรณีศึกษามีชนิดของโยเกิร์ตแบบถ้วยอยู่ 3 ชนิดคือ C-Type 1(cup), C-Type 2 (light) และ C-Type 3 (liquid) ซึ่งใช้ระยะเวลาการผลิตในแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกัน ส่วนโยเกิร์ตชนิดบรรจุขวดมี 2 ชนิดคือ D-0% กับ D-Light โดยทั้ง 2 ชนิดนี้ใช้ระยะเวลาในการผลิตที่เท่ากัน แตกต่างกันเพียงส่วนผสมที่ใช้

ตารางที่ 1 ระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนการผสมและขั้นตอนการหมักของโยเกิร์ตชนิดบรรจุถ้วยและชนิดบรรจุขวด

ผลิตภัณฑ์	เวลาการผสม	เวลาการหมัก
C-Type1(cup)	2.0 ชั่วโมง	7.0 ชั่วโมง
C-Type2(light)	1.5 ชั่วโมง	6.0 ชั่วโมง
C-Type3(liquid)	1.5 ชั่วโมง	5.0 ชั่วโมง
D-0%	1.5 ชั่วโมง	5.5 ชั่วโมง
D-Light	1.5 ชั่วโมง	5.5 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดด้านการทำความสะอาดเครื่องจักรในการผลิตโยเกิร์ตชนิดบรรจุถ้วยและชนิดบรรจุขวด

เครื่องจักร	ความถี่ในการทำความสะอาด	ระยะเวลาในการทำความสะอาด
ถังผสม	ทุก 24 ชั่วโมง	1.5 ชั่วโมง
ชุดฆ่าเชื้อ	ทุก 24 ชั่วโมง	3.0 ชั่วโมง
ถังหมัก	ทุกครั้งที่ใช้งาน	2.0 ชั่วโมง
ชุดทำความสะอาด	ทุก 24 ชั่วโมง	1.5 ชั่วโมง
ถังบรรจุ	ทุกครั้งที่ใช้งาน	2.0 ชั่วโมง
เครื่องบรรจุถ้วย	ทุก 24 ชั่วโมง	5.5 ชั่วโมง
เครื่องบรรจุขวด	ทุก 48 ชั่วโมง	4.0 ชั่วโมง

สำหรับจุดที่อุปกรณ์ถูกใช้ร่วมกันระหว่างการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวดกับโยเกิร์ตบรรจุถ้วยคือ จุดเทพสมซึ่งมีเพียงจุดเดียว ดังนั้นในการวางแผนการผลิต จำเป็นต้องพิจารณาเวลาที่ใช้จุดเทพสม เพื่อป้องกันการใช้อุปกรณ์พร้อมกันในการผลิตสินค้าทั้งสองชนิด

2. คำนวณกำลังการผลิตสูงสุดของกระบวนการผลิต โดยพิจารณาจากข้อกำหนดการใช้เครื่องจักรและขั้นตอนการผลิตในปัจจุบัน เพื่อตรวจสอบว่ากำลังการผลิตที่มีอยู่สามารถรองรับกับแผนการผลิตได้หรือไม่

จากการคำนวณโดยใช้ข้อมูลด้านกระบวนการผลิต รวมถึงข้อจำกัดต่างๆ พบว่ากำลังการผลิตสูงสุดของการผลิตโยเกิร์ตบรรจุถ้วยและโยเกิร์ตบรรจุขวดคือ 10,000 ตันต่อปี และ 18,000 ตันต่อปี ตามลำดับ ซึ่งยังสามารถรองรับแผนการผลิตในปัจจุบันได้

3.2 การปรับปรุงกระบวนการวางแผนการผลิตใหม่ ซึ่งใช้หลักการวางแผนการผลิตแบบถอยหลัง (Backward scheduling) และกฎการจ่ายงานแบบ EDD (Earliest Due Date) โดยจะทำการวางแผนการผลิตแยกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย คือ 1. การวางแผนการผลิตของโยเกิร์ตบรรจุถ้วยเพียงอย่างเดียว 2. การวางแผนการผลิตของโยเกิร์ตบรรจุขวดเพียงอย่างเดียว และขั้นตอนสุดท้าย 3. การรวมแผนการผลิตของทั้งโยเกิร์ตบรรจุถ้วยและบรรจุขวดเข้าด้วยกัน

หลังจากที่ได้รับแผนการบรรจุจากแผนวางแผนซึ่งระบุเวลาที่ควรเริ่มบรรจุผลิตภัณฑ์นั้นๆ แล้ว มีรายละเอียดขั้นตอนการวางแผนการผลิตของโยเกิร์ตบรรจุถ้วยดังนี้

1. เปลี่ยนจำนวนการผลิตจากถ้วยเป็นน้ำหนักการผลิต โดยพิจารณาขนาดบรรจุ ปริมาณเนื้อผลไม้ รวมถึงการสูญเสียระหว่างการผลิต

2. แบ่งจำนวนการผลิตที่เป็นน้ำหนัก เป็น Batch การผลิตโดยขั้นต่ำคือ 5 ตันและมากที่สุดไม่เกิน 10 ตัน อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของกระบวนการผลิต

3. คำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการบรรจุแต่ละ Batch โดยพิจารณาชนิดของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากอัตราบรรจุสินค้าแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

4. จัดลำดับงานแบบ EDD และคำนวณเวลาเริ่มบรรจุของแต่ละ Batch โดยพิจารณาเงื่อนไขการทำความสะอาดเครื่องบรรจุ ซึ่งสำหรับเครื่องบรรจุของโยเกิร์ตชนิดถ้วยจะทำความสะอาดทุก 24 ชั่วโมง และใช้เวลาครั้งละ 5.5 ชั่วโมง

5. หลังจากที่ได้เวลาเริ่มบรรจุแล้วทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาเวลาเริ่มผสมของแต่ละ Batch โดยพิจารณาจากระยะเวลาการผลิตโยเกิร์ตแต่ละชนิด, ขนาดของ Batch size รวมถึงเวลาเพื่อให้โยเกิร์ตพร้อมสำหรับการบรรจุก่อนเวลาบรรจุจริงประมาณ 3.5 ชั่วโมง

6. คำนวณ Slack time ของการผลิตในแต่ละ Batch

$$\text{Slack time} = d_j - p_j \quad (1)$$

โดย d_j คือเวลาเริ่มบรรจุของ Batch j

p_j คือเวลาที่ Batch j พร้อมสำหรับการบรรจุ

7. คำนวณเลือกใช้ถังในการหมักและการอบบรรจุ จากถังที่มีทั้งหมด 6 ถัง โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ถังในแต่ละขั้นตอน และระยะเวลาในการทำความสะอาดหลังจากใช้งานเสร็จ

การวางแผนการผลิตของโยเกิร์ตบรรจุขวด โดยรวมจะมีขั้นตอนการวางแผนผลิตใกล้เคียงกับของโยเกิร์ตบรรจุถ้วยแต่จะมีลักษณะที่แตกต่างกันบ้างเช่น ในการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวดจะเป็นการผสมส่วนที่เรียกว่าเนื้อโยเกิร์ตกับส่วนที่เป็นน้ำเชื่อม ในอัตราส่วน 50:50 ซึ่งขั้นตอนในการผสมของโยเกิร์ตบรรจุขวดก็จะแบ่งเป็นการผสม 2 รอบ โดยรอบแรกจะเป็นการผสมส่วนที่เป็นเนื้อโยเกิร์ต จากนั้นทำการหมัก เมื่อได้ค่าตามที่กำหนดไว้จึงทำการผสมส่วนที่เป็นน้ำเชื่อม ขั้นตอนการวางแผนการผลิต โยเกิร์ตบรรจุขวดมีรายละเอียดดังนี้

1. เปลี่ยนคำสั่งผลิตจากจำนวนขวดที่ต้องการเป็นน้ำหนักโยเกิร์ตที่ต้องเตรียม โดยต้องคำนึงถึงขนาดการบรรจุ รสชาติผลิตภัณฑ์และการสูญเสียระหว่างการผลิต

2. แบ่งเป็น Batch การผลิตโดย Batch size ขั้นต่ำคือ 7 ตันและสูงสุดไม่เกิน 10 ตัน อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของกระบวนการผลิต

3. คำนวณระยะเวลาที่ใช้ในการบรรจุของแต่ละ Batch โดยพิจารณาจากขนาดการบรรจุ เนื่องจากอัตราการบรรจุของแต่ละขนาดของผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน

4. จัดลำดับงานแบบ EDD และคำนวณหาเวลาที่เริ่มการบรรจุของแต่ละ Batch โดยพิจารณาจากระยะเวลาที่ใช้ในการบรรจุ รวมถึงข้อกำหนดในการทำความสะอาดเครื่องบรรจุ ซึ่งสำหรับการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวด จะทำความสะอาดเครื่องบรรจุทุก 48 ชั่วโมง และระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละครั้งคือ 4 ชั่วโมง

5. เมื่อได้เวลาในการเริ่มบรรจุของแต่ละ Batch แล้ว ทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาเวลาการผสมของแต่ละ Batch โดยพิจารณาจากขนาด Batch size ที่ทำการผลิต รวมถึงระยะเวลาเพื่อให้โยเกิร์ตมีพร้อมสำหรับการบรรจุก่อนที่จะทำการบรรจุจริงประมาณ 3.5 ชั่วโมง

6. เนื่องจากในการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวด การผสมจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เป็นเนื้อโยเกิร์ตกับส่วนที่เป็นน้ำเชื่อม ดังนั้นต้องทำการคำนวณเวลาเริ่มผสมส่วนที่เป็นน้ำเชื่อมด้วย โดยจะทำหลังจากที่ส่วนที่เป็นเนื้อโยเกิร์ตเข้าสู่ขั้นตอนการหมักไปแล้ว 4 ชั่วโมง ถ้าเพิ่มเวลาการผสมส่วนที่เป็นน้ำเชื่อมของทุก Batch แล้วทำให้ขั้นตอนการผสมมีบาง Batch ที่มีเวลาซ้อนทับกัน ให้ยับยั้งเวลาผสมของ Batch ที่เริ่มผสมหลังออกไป โดยจะทำการผสมเมื่อ Batch ก่อนหน้าผสมเสร็จแล้ว จากนั้นคำนวณระยะเวลาพร้อมบรรจุของแต่ละ Batch และ slack time ใหม่

7. คำนวณการเลือกใช้ถัง ของขั้นตอนการหมักและขั้นตอนการบรรจุของทุก Batch ซึ่งถังที่สามารถใช้ได้มีทั้งหมด 7 ถังและหลังจากใช้งานในแต่ละขั้นตอนแล้ว ต้องทำความสะอาดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงก่อนถึงจะสามารถใช้ถังนี้ในขั้นตอนต่อไปได้

เมื่อได้ข้อมูลการผลิตเบื้องต้นของโยเกิร์ตบรรจุด้วยและโยเกิร์ตบรรจุขวดในระยะเวลาเริ่มการผสมของแต่ละ Batch แล้ว จะทำการวางแผนการผลิตรวม โดยจะใช้หลักการเปรียบเทียบ Slack time การผสมแต่ละ Batch

ซึ่งเป็นระยะเวลาการรอคอยการบรรจุ กรณีที่มี slack time มากเกินกว่า 5 ชั่วโมง อาจส่งผลด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือจะมีรสชาติที่เปรี้ยวมากขึ้น เนื่องจากกระบวนการหมักจะดำเนินการช้าๆ อย่างต่อเนื่อง ส่วนกรณีที่มี slack time น้อยเกินไป อาจส่งผลให้เครื่องจักร

รอการบรรจุได้ ถ้าประสิทธิภาพของเครื่องบรรจุดีกว่าที่ประมาณการไว้

ขั้นตอนการวางแผนผลิตรวมมีรายละเอียดดังนี้

1. เรียงลำดับการผสมของทั้งโยเกิร์ตบรรจุด้วยและบรรจุขวด จากเวลาเริ่มผสมเร็วสุดไปช้าสุด

2. กรณีที่พบว่าเวลาการผสมมีการทับซ้อนกันกับ Batch อื่นๆ จะทำการเปรียบเทียบ Slack time โดยจะทำการผลิต Batch ที่มี Slack time น้อยกว่าก่อนแล้วจึงทำการผสม Batch ที่มี Slack time มากกว่า

3. คำนวณ Slack time ใหม่ เพื่อตรวจสอบว่าการผลิตใน Batch นั้นๆ สามารถเตรียมเนื้อโยเกิร์ตสำหรับการบรรจุได้ทันเวลาหรือไม่ รวมถึงเป็นการตรวจสอบระยะเวลาการรอคอยการบรรจุไม่ให้นานกว่ามาตรฐานที่ได้กำหนด ซึ่งในปัจจุบันกำหนดไว้ไม่ให้เกิน 5 ชั่วโมง

กรณีที่พบว่า Slack time ใน Batch นั้นๆ มีค่าน้อยกว่า 0 หมายความว่าเครื่องบรรจุจะเกิดการรอคอย อันเนื่องมาจากไม่มีโยเกิร์ตพร้อมสำหรับการบรรจุ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ลักษณะดังกล่าว จะทำการแก้ไขโดยเพิ่มเวลาเผื่อของ Batch นั้นๆ ให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เวลาเริ่มผสมจะเร็วขึ้นและได้โยเกิร์ตสำหรับการบรรจุเร็วกว่าเดิม จากนั้นทำการตรวจสอบ Slack time ใหม่เพื่อตรวจสอบผลของการปรับปรุงแผนอีกครั้ง

3.3 การพัฒนาระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตโดยใช้ VBA ในโปรแกรม Microsoft Excel

หลังจากได้กระบวนการวางแผนการผลิตแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิต โดยการเขียนฟังก์ชันการวางแผนการผลิตด้วย VBA ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อช่วยลดระยะเวลาการทำงาน ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ในระบบการวางแผนที่พัฒนาประกอบด้วย

1. การจัดตารางการผลิตโยเกิร์ตบรรจุขวดและบรรจุด้วย
2. การเลือกใช้ถังหมักและถังบรรจุของโยเกิร์ตบรรจุขวดและบรรจุด้วย

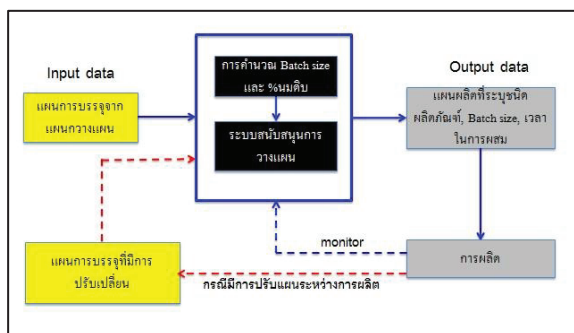
3. การจัดการเวลาทำความสะอาดเครื่องฆ่าเชื้อของโยเกิร์ตบรรจุขวดและบรรจุถ้วย

4. การจัดการเวลาทำความสะอาดเครื่องลดอุณหภูมิของโยเกิร์ตบรรจุขวดและบรรจุถ้วย

5. การจัดการเวลาทำความสะอาดเครื่องบรรจุของโยเกิร์ตบรรจุขวดและบรรจุถ้วย

ผลลัพธ์ของการวางแผนการผลิตที่ได้จากระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตคือเวลาในการผสมแต่ละ Batch ทั้งโยเกิร์ตบรรจุถ้วยและโยเกิร์ตบรรจุขวด รวมถึงเวลาในการทำความสะอาดเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตของทั้งสองผลิตภัณฑ์

การปรับเปลี่ยนแผนการผลิตจะเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ 1.จากการเปลี่ยนแผนการบรรจุเนื่องจากความต้องการสินค้ามีการเปลี่ยนแปลง 2.จากการตรวจสอบแผนแล้วพบว่าไม่เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ จึงต้องมีการแก้ไขแผนเพื่อให้ยังบรรลุวัตถุประสงค์ในการผลิตและสอดคล้องกับข้อจำกัดการผลิตที่มี



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบสนับสนุน

4. ผลการวิจัย

ระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตที่พัฒนาถูกนำไปทดลองใช้จริงเพื่อทดสอบใน 3 ประเด็นคือ 1. ระยะเวลาที่ใช้ในการวางแผนการผลิต 2. Slack time ของแต่ละ Batch ซึ่งเป็นระยะเวลาที่โยเกิร์ตอยู่ในถังเพื่อรอการบรรจุ อันเป็นข้อกำหนดด้านคุณภาพที่สำคัญอันหนึ่ง โดยแยกพิจารณาเป็นการผลิตโยเกิร์ตบรรจุถ้วย

และโยเกิร์ตบรรจุขวด 3.การจัดการเรื่องข้อจำกัดด้านการทำความสะอาดเครื่องจักร

4.1 ระยะเวลาในการวางแผนการผลิต

จากการเก็บข้อมูลพบว่ากรณีการจัดทำแผนการผลิตด้วยวิธีเดิมและใช้ผู้ที่มีความเข้าใจกระบวนการผลิตเป็นอย่างดี จะใช้เวลาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4 ชั่วโมง ส่วนการวางแผนด้วยวิธีใช้ระบบสนับสนุน จะใช้ระยะเวลาประมาณ 25 นาที สาเหตุที่วิธีการวางแผนแบบเดิมใช้เวลานาน เนื่องจากความซับซ้อนของข้อจำกัดในการผลิต เช่นเครื่องจักรมีหลายตัว และมีระยะเวลาในการทำงานไม่เท่ากัน รวมถึงมีข้อกำหนดในการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างในเรื่องระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตสินค้าแต่ละชนิดอีกด้วย

4.2 Slack time

ในการผลิตโยเกิร์ตของบริษัทที่ทำการศึกษา มีข้อกำหนดเรื่องระยะเวลาที่โยเกิร์ตสามารถอยู่ในถังรอบรรจุก่อนการบรรจุจริง ไม่ควรเกิน 5 ชั่วโมง อันเนื่องจากอุณหภูมิในถังรอบรรจุจะอยู่ที่ประมาณ 18 องศาเซลเซียส ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักยังทำงานอยู่ ดังนั้นถ้ามีระยะเวลาการรอคอยการบรรจุที่นานขึ้นจะทำให้โยเกิร์ตมีรสชาติที่เปรี้ยวและมีโอกาสที่เนื้อโยเกิร์ตจะแยกชั้นมากขึ้นด้วย

จากการทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาการรอคอยการบรรจุของโยเกิร์ตทั้ง 2 ชนิด จำนวน 30 ข้อมูล โดยเทียบระหว่างการวางแผนแบบเดิมกับการใช้ระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตพบว่าให้ค่า slack time ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบ slack time

ชนิดผลิตภัณฑ์	Slack time (ชม:นาที)		
	วิธีเดิม	ระบบสนับสนุน	ส่วนต่าง
โยเกิร์ตบรรจุถ้วย	4:09	3:38	0:31
โยเกิร์ตบรรจุขวด	4:38	3:46	0:52

จากตารางพบว่าการวางแผนการผลิตด้วยวิธีเดิมและการใช้ระบบสนับสนุน ให้ค่า slack time อยู่ในเกณฑ์ที่บริษัทกำหนดคือน้อยกว่า 5 ชั่วโมง โดยพบว่าการใช้ระบบสนับสนุนการวางแผนให้ค่า slack time ที่น้อยกว่าการใช้วิธีเดิม ทั้งการวางแผนของโยเกิร์ตบรรจุถ้วยและ โยเกิร์ตบรรจุขวด ที่ 14.07% และ 18.67% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังไม่พบว่า slack time การผลิตมีค่าที่น้อยกว่า 0 ซึ่งหมายความว่าเครื่องบรรจุไม่เกิดการรอคอย อันเป็นจุดประสงค์ที่สำคัญอันหนึ่งของการวางแผนการผลิต โยเกิร์ต

4.3 การจัดการเรื่องข้อจำกัดด้านการทำความสะอาดเครื่องจักร

ในระบบการผลิตที่สินค้าเป็นอาหาร การทำความสะอาดอุปกรณ์เครื่องจักรจัดว่าเป็นสิ่งที่สำคัญในลำดับต้นๆ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค แต่ในกระบวนการผลิตพบว่าเครื่องจักรแต่ละตัวนั้นจะมีข้อกำหนดในด้านการทำความสะอาด (CIP) ที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านความถี่และระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละครั้ง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

ในอดีตพนักงานที่เป็นคนควบคุมเครื่องจักรจะเป็นผู้ตัดสินใจช่วงเวลาที่ทำการ CIP เอง โดยพิจารณาจากรอบชั่วโมงการทำงาน CIP เป็นหลัก และไม่ได้พิจารณาเรื่องเวลาผสมประกอบด้วย ส่งผลให้บางครั้งไม่สามารถผสมวัตถุดิบได้ รวมถึงไม่สามารถฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์ได้ตามเวลาที่กำหนด เนื่องจากเครื่องจักรกำลังอยู่ในขั้นตอนการทำงาน CIP และอาจนำไปสู่การทำให้เครื่องบรรจุเกิดการรอคอยได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ตารางการทำความสะอาดเครื่องจักรที่สอดคล้องกับแผนการผลิตและที่สามารถนำไปปฏิบัติจริงได้ จึงควรมีระบบสนับสนุนเข้ามาช่วยเพื่อจะได้พิจารณาข้อมูลแผนการผลิตและข้อจำกัดต่างๆ ได้อย่างครบถ้วน

ระบบสนับสนุนที่นี้จะต้องช่วยให้พนักงานสามารถสร้างแผนการผลิต ที่เมื่อนำไปปฏิบัติจริงแล้ว พนักงานสามารถปฏิบัติงานได้ตามแผนที่วางไว้ ดังนั้นการประเมินระบบในส่วนนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบเวลาที่เริ่มทำ

ความสะอาดจริงกับเวลาที่ระบุไว้ในแผน เพื่อเป็นการวัดความแม่นยำของแผนที่สร้างจากผู้ใช้งานระบบ โดยได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ส่วนต่างของเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดเครื่องจักรเทียบระหว่างแผนที่กำหนดกับการทำงานจริง

เครื่องจักร	เวลาที่ต่างจากแผน (ชม:นาท)
เครื่องฆ่าเชื้อแบบถ้วย	0:46
เครื่องฆ่าเชื้อแบบขวด	0:31
เครื่องลดอุณหภูมิแบบถ้วย	0:33
เครื่องลดอุณหภูมิแบบขวด	0:38
เครื่องบรรจุแบบถ้วย	0:41
เครื่องบรรจุแบบขวด	0:43

จากตารางพบว่าเวลาในการเริ่มทำความสะอาดเครื่องจักร (CIP) แต่ละตัวมีค่าแตกต่างจากแผนที่กำหนดไว้เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความไม่แน่นอนของเวลาในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต และการหยุดของเครื่องจักรที่ไม่ได้อยู่ในแผน

อย่างไรก็ตาม ด้วยเวลาที่แตกต่างกันระหว่างแผนกับการทำงานจริงที่ไม่เกิน 1.5 ชั่วโมง ทางบริษัทพิจารณาว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากยังไม่ส่งผลกระทบต่อโดยรวมกับแผนการผลิต

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยของการใช้ระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตโดยใช้หลักการวางแผนการผลิตแบบถอยหลัง (Backward scheduling) และกฎการจ่ายงานแบบ EDD สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถลดระยะเวลาในการวางแผนการผลิต โดยพบว่าช่วยลดระยะเวลาในการวางแผนการผลิตจากเดิมที่เป็นแบบแมนนวลซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมงเหลือเพียง 25 นาที หรือสามารถลดเวลาลงได้ 90% ทำให้ผู้ที่รับผิดชอบด้านการวางแผน สามารถใช้เวลาส่วนที่เหลือ

สำหรับการติดตามแผนการผลิต และปรับเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลิตภัณฑ์เป็นสินค้าอายุสั้นและลักษณะความต้องการของตลาดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการที่สามารถปรับเปลี่ยนแผนได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ

2. จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าของ slack time จากการวางแผนแบบแมนนวลกับแบบการใช้ระบบสนับสนุนการผลิตมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และอยู่ในมาตรฐาน slack time ที่กำหนด ซึ่งหมายความว่าระบบสนับสนุนสามารถนำมาใช้ทดแทนการวางแผนการผลิตแบบแมนนวลได้ นอกจากนี้ยังพบว่า slack time โดยเฉลี่ยจากการใช้ระบบสนับสนุนการผลิตมีค่าน้อยกว่าการวางแผนด้วยวิธีแมนนวลแบบเดิม

3. สามารถระบุเวลาในการทำความสะดวกเครื่องจักรทุกตัวที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ ซึ่งจากเดิมผู้ทำหน้าที่วางแผนไม่สามารถพิจารณาได้ครบ เนื่องจากกระบวนการผลิตมีความซับซ้อน รวมทั้งเครื่องจักรแต่ละชนิดมีข้อจำกัดในการทำงานและข้อกำหนดในการทำความสะดวกที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อมีระบบสนับสนุนการ

วางแผนการผลิตแล้ว ทำให้พนักงานไม่ต้องตัดสินใจเอง เป็นการป้องกันการตัดสินใจที่ผิดพลาดเรื่องเวลาการทำงานความสะดวก ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปัญหาการรอกอยของเครื่องจักรได้

4. ด้วยการใช้ระบบสนับสนุนการผลิตนี้ พนักงานที่มีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตเบื้องต้น สามารถทำหน้าที่วางแผนการผลิตได้ ซึ่งจากเดิมต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และเข้าใจกระบวนการผลิตเป็นอย่างดี ซึ่งถือเป็นการช่วยป้องกันความเสี่ยงในด้านการขาดบุคลากรในอนาคตได้

5. งานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการวางแผนการผลิตจริงโดยทดสอบทั้งในด้านระยะเวลาในการทำแผนการผลิตเวลา, ลดการรอกอยก่อนการบรรจุ การระบุเวลาทำความสะดวกเครื่องจักร โดยพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพึงพอใจ นอกจากนี้ยังสามารถนำหลักการวางแผนการผลิตนี้ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารอื่นๆ ที่มีกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง และมีข้อจำกัดในเรื่องการทำความสะดวกเครื่องจักรได้อีกด้วย เช่นกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์, การผลิตเครื่องดื่ม รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตขนมขบเคี้ยว เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chandan, R.C. and Shahani, K.M. Yoghurt. Dairy Science and Technology Handbook, 1993; 1-56.
- [2] Vernam, A.H. and Sutherland, J.P. Milk and Milk Products. London: Chapman and Hall, 1994; 423-426.
- [3] นิยา รัตนานนท์. เคมีนมและผลิตภัณฑ์นม. โอ.เอส.พรีนติ้ง เฮาส์, กรุงเทพมหานคร, 2557.
- [4] นมเปรี้ยว. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข, 2556; 343.
- [5] วิไล ริงสาทอง. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร, 2547.
- [6] จูฑาภรณ์ รัตน์. การผลิตโยเกิร์ตนมแพะโดยการทำแห้งแบบพ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [7] บรรหาญ ลิลา. การวางแผนการควบคุมการผลิต. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพมหานคร, 2553.
- [8] ปารเมศ ชูติมา. เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2555.
- [9] ประพัฒน์ รัตนยานนท์. การจัดตารางการผลิตโรงฟั่นสีขึ้นส่วนพลาสติกโรงจักรยานยนต์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [10] ชยชนา เสนหา. การจัดตารางการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมทอผ้า: ผ้าขนหนู. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [11] Doganis, P. and Sarimveis, H. Optimal scheduling in a yogurt production line based on mixed integer linear programming. *Journal of Food Engineering*, 2007; 80: 445-453.

- [12] สิทธิพร จันท์เฉลิมพร. การปรับปรุงสมรรถภาพของการวางแผนการส่งออกในโซ่อุปทาน ภายในอุตสาหกรรมการผลิตไก่สุกแช่แข็งส่งออก. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.
- [13] ศันสนีย์ เป็ลียนสงค์. การวางแผนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตของโรงงานผลิตอาหารเสริม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.



การวิเคราะห์ความเสี่ยงสำหรับการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ

ในสถานะวิกฤต กรณีศึกษาไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง

Risk Analysis for Business Continuity Management in Crisis : A Case Study of Partial Blackout

สุภวิช หลักคงคา¹ และ จิตรา รุกิจการพานิช²

Supavit Lhakkongka¹ and Jittra Rukijkanpanich²

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

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

E-mail: vexza@hotmail.com¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลักที่ต้องปกป้อง กรณีศึกษาไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง งานวิจัยนี้ได้้นำการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจมาดำเนินการกับงานบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้าจากการศึกษาพบว่ากระบวนการหลักที่ต้องปกป้องได้แก่ 1) การวางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า 2) การส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า 3) การบริหารการใช้เชื้อเพลิง 4) การจัดหาเชื้อเพลิง 5) การวางแผนส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 6) การผลิตไฟฟ้าและควบคุมคุณภาพตามความต้องการของศูนย์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแห่งชาติ และ 7) การปฏิบัติการควบคุมและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ลูกค้าผ่านจุดส่งมอบ ซึ่งมีการจัดลำดับความสำคัญในการฟื้นคืนสภาพโดยเริ่มต้นจากกระบวนการที่ 6), 7), 2), 1), 3), 4) และ 5) ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่ามีความเสี่ยง 6 หัวข้อที่ส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ซึ่งเรียงตามลำดับความสำคัญที่จะต้องมีการจัดการดังนี้ 1) การใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าไม่เป็นไปตามแผนการผลิต 2) ความเสียหายของระบบส่งไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ 3) ภัยพิบัติที่เกิดจากการก่อวินาศกรรมระบบส่งไฟฟ้า 4) ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์ 5) ความเสียหายของโรงไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ และ 6) ภัยพิบัติที่อาจเกิดจากการก่อวินาศกรรมโรงไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research is to analyze risks which affect the key process in crisis protection: a case study of partial blackout. The research was carried out by applying business continuity management (BCM) to electrical energy transmission. It is found that there are 7 key processes needed: 1) Electricity Generating Planning by Electricity Generating Plant, 2) Electricity Machine Running, 3) Fuel Using Management, 4) Fuel Supplying, 5) Electricity Distribution Planning, 6) Electricity Generating and Quality Control as required by the National Control Center, and 7) Electricity Operation Control and Distribution through delivery points. In addition, the priority of restoring processes are 6), 7), 2), 1), 3), 4) and 5), respectively. There are 6 risks which cause partial blackout and shall be manipulated in priority order as follows: 1) fuel used for generating electricity does not comply with the generating plan of the Electricity Generating Authority of Thailand; 2) the electricity plant is damaged by accident; 3) disaster is caused by the electricity transmission system sabotage; 4) the security of

electricity system is under the standard; 5) the electricity transmission system is damaged by accident; 6) disaster caused by electricity plant sabotage.

1. บทนำ

การเกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง หมายถึง การไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้างตลอดช่วงระยะเวลาหนึ่ง ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก [1] ซึ่งองค์กรที่ดำเนินกิจการไฟฟ้าต้องสามารถดำเนินธุรกิจได้อย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างเกิดขึ้น แต่การดำเนินงานขององค์กรต้องเผชิญกับความเสี่ยงและสภาวะวิกฤตต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องมีแนวทางดำเนินการในสภาวะวิกฤต เพื่อให้ลูกค้า ผู้มีส่วนได้เสีย รวมไปถึงประชาชนมั่นใจได้ว่าจะสามารถควบคุมภาวะวิกฤตต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว และจะไม่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างเป็นระยะเวลานาน

จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าองค์กรได้มีการจัดทำแผนปฏิบัติการในสภาวะวิกฤต อาทิเช่น แผนรองรับเหตุฉุกเฉินอัคคีภัย แผนรองรับเหตุฉุกเฉินน้ำท่วม แผนรองรับเหตุฉุกเฉินแผ่นดินไหว แผนกู้คืนระบบสารสนเทศ เป็นต้น แต่ยังไม่สามารถตอบสนองการดำเนินการในสภาวะวิกฤตได้ตามกรอบระยะเวลา เนื่องจากยังไม่มีมีการกำหนดค่าวิกฤตต่างๆ ได้แก่ 1) ช่วงเวลาการหยุดชะงักที่ยอมรับได้สูงสุด 2) ค่าระยะเวลาเป้าหมายในการฟื้นคืนสภาพ และ 3) ระดับที่ยอมรับขั้นต่ำ

โดยค่าวิกฤตดังกล่าวจะได้มาจากการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ (Business Impact Analysis, BIA) เนื่องจากในอดีตยังไม่มีมาตรฐานหรือแนวทางที่สามารถบ่งชี้ค่าวิกฤตต่างๆ ของกระบวนการหลักที่ทำให้เกิดธุรกิจ เนื่องจากมีเพียงการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment, RA) ในภาพใหญ่ขององค์กร ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมความเสี่ยงที่ทำให้การดำเนินงานหยุดชะงักได้อย่างครบถ้วน จึงยังไม่สามารถมั่นใจได้ว่าองค์กรมีแผนหรือมาตรการเพื่อตอบสนองความเสี่ยงได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์

จากการสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทย พบว่าองค์กรขนาดใหญ่

มีการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ (Business Continuity Management, BCM) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อการดำเนินธุรกิจอย่างให้ได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะวิกฤต โดยเริ่มดำเนินการจากการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ การประเมินความเสี่ยง โดยการวิเคราะห์ความเสี่ยงนั้น งานวิจัยนี้จะดำเนินการตามกรอบของ The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission – Enterprise Risk Management (COSO-ERM) เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มา กำหนดกลยุทธ์เพื่อความต่อเนื่องทางธุรกิจ (Business Continuity Strategy) และจัดทำเป็นแผนหรือมาตรการดำเนินการในสภาวะวิกฤต ซึ่งจะต้องดำเนินการได้ภายในค่าวิกฤตที่ได้มา

สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอส่วนหนึ่งของการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจดังกล่าว โดยครอบคลุมตั้งแต่การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจและการประเมินความเสี่ยง ซึ่งในการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจนั้น ประกอบด้วยการหากระบวนการหลักและค่าเวลาวิกฤตต่างๆ ของกระบวนการอันจะทำให้เกิดบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า และในส่วนของ การประเมินความเสี่ยงนั้น จะทำการวิเคราะห์หาความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลักที่อาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง การวิเคราะห์ดังกล่าวเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบและลำดับความสำคัญของความเสี่ยงที่ต้องมีการดำเนินการก่อนหลัง โดยมีหลักการที่เกี่ยวข้องที่สำคัญได้แก่หลักการการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2. หลักการการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ

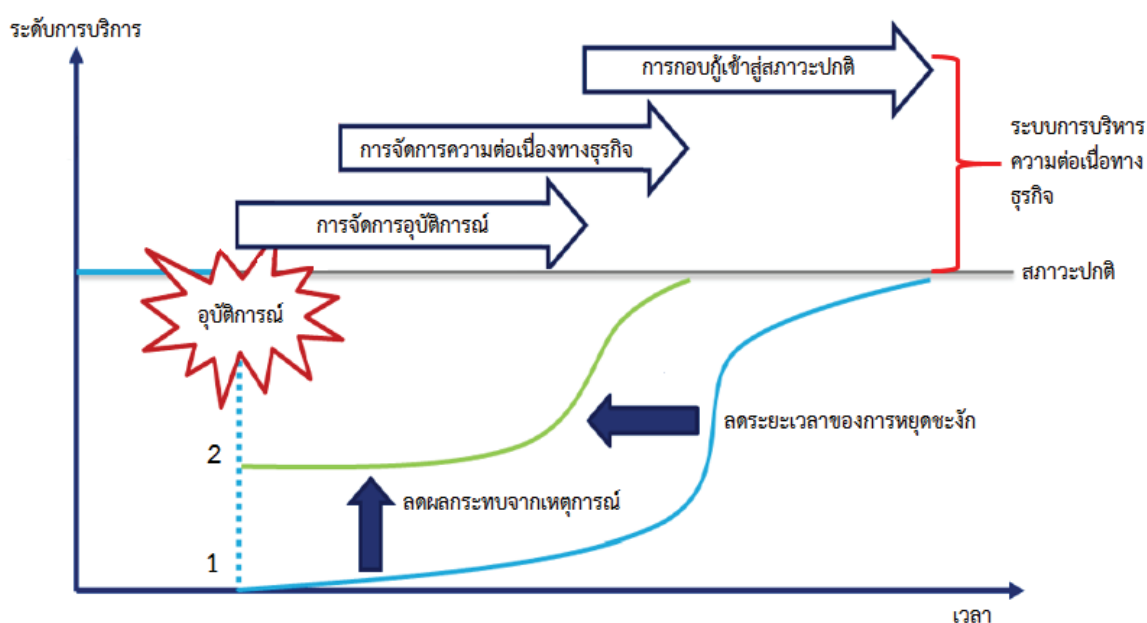
หลักการการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ ประกอบไปด้วยหัวข้อย่อย ดังนี้ 1) แนวคิดการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ เพื่อให้ทราบถึงทฤษฎีและหลักการจัดการเมื่อเกิดอุบัติเหตุเพื่อให้มีความต่อเนื่องทางธุรกิจ

2) การวิเคราะห์ช่องว่าง เพื่อให้ทราบถึงวิธีวิเคราะห์องค์การที่มีการดำเนินการในสภาวะวิกฤตอยู่บางส่วน แต่ต้องการทราบถึง จุดแข็งจุดอ่อนขององค์กร และสิ่งที่ต้องดำเนินการเพิ่มเติมเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ 3) การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ เพื่อให้ทราบถึงกระบวนการหลักที่สนับสนุนให้เกิดบริการ และหาว่าวิกฤตของกระบวนการหลักต่างๆ 4) การประเมินความเสี่ยง เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและหาลำดับความสำคัญของความเสี่ยง

2.1. แนวคิดการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ

หมายถึง องค์กรรวมของกระบวนการบริหารซึ่งขึ้นกับ คุกคามต่อองค์กร และผลกระทบของภัยคุกคามนั้นต่อการ ดำเนินธุรกิจ และให้แนวทางในการสร้างขีดความสามารถ ให้องค์กรมีความยืดหยุ่น เพื่อการตอบสนองและปกป้อง ผลประโยชน์ของผู้มีส่วนได้เสียหลัก ชื่อเสียง ภาพลักษณ์ และกิจกรรมที่สร้างมูลค่าที่มีประสิทธิผล เมื่อเกิด อุบัติการณ์ใดๆ ที่นำไปสู่การหยุดชะงักของธุรกิจ หรือมี ความสูญเสียเกิดขึ้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ของ แนวคิดในการจัดการเพื่อบรรเทาผลกระทบให้อยู่ในระดับ ที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 เมื่อเกิดอุบัติเหตุ (Incident) จะส่งผล ให้ระดับการบริการ (Service Level) ลดต่ำลงดังเส้นที่ 1 ต้องมีการฟื้นคืนสภาพกระบวนการเพื่อให้บริการกลับสู่ สภาวะปกติ ต้องมีการบริหารจัดการเพื่อให้บริการกลับมา ได้รวดเร็วที่สุดและเกิดผลกระทบต่อธุรกิจน้อยที่สุด จึงมี การนำการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจเข้ามาดำเนินการ เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว ซึ่งเมื่อมีการบริหารจัดการที่ดี แล้วจะสามารถลดระยะเวลาของการหยุดชะงัก (Shortened Disruption) และลดผลกระทบจาก เหตุการณ์ (Mitigating and Responding to Impacts) ดังเส้นที่ 2 ทั้งนี้การดำเนินการบริหารความต่อเนื่องทาง ธุรกิจ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่การจัดการ อุบัติการณ์ ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การทำให้เหตุการณ์สงบลงโดย ใช้แผนจัดการเหตุฉุกเฉิน (Incident Management Plan, IMP) ในส่วนของการจัดการความต่อเนื่องทาง ธุรกิจ จะมีแผนหรือมาตรการรองรับเรียกว่าแผนความ ต่อเนื่องทางธุรกิจ (Business Continuity Plan, BCP) และการฟื้นคืนสภาพเข้าสู่สภาวะปกติซึ่งหากพิจารณาตาม แกนของระยะเวลาแล้วจะมีช่วงเวลาในการดำเนินการที่ ทับซ้อนกัน



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของแนวคิดในการจัดการระบบบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยนี้ จะมีส่วนของการวิเคราะห์ช่องว่าง การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ และการประเมินความเสี่ยง ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ช่องว่าง

เนื่องจากองค์กรได้มีการดำเนินการรองรับสภาวะวิกฤตอยู่แล้วบางส่วน จึงได้นำเทคนิควิธีการวิเคราะห์ช่องว่าง (Gap Analysis) มาใช้ในการหาจุดแข็งจุดอ่อนขององค์กรในเรื่องของการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ สิ่งที่ต้องดำเนินการเพิ่มเติมเพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานกำหนด และการวางแผนในการดำเนินการได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ โดยดำเนินการตรวจสอบประเมินเบื้องต้นเพื่อหาช่องว่างระหว่างการดำเนินการที่มีอยู่ในปัจจุบันขององค์กร โดยนำไปเทียบกับข้อกำหนดของมาตรฐานการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ [2]

2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ คือ กระบวนการการวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบจากการหยุดชะงักของกระบวนการหลัก ทำให้องค์กรสามารถเลือกที่จะฟื้นคืนสภาวะกระบวนการหลังจากเกิดอุบัติเหตุตามลำดับได้อย่างเหมาะสม [3] ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการพัฒนาการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้ทราบถึงกระบวนการหลักที่มีความสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวถ้าได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ภัยพิบัติอาจส่งผลทำให้องค์กรได้รับความเสียหายในด้านต่างๆ เช่น การสูญเสียรายได้ การสูญเสียโอกาสในการลงทุนด้านต่างๆ ตลอดจนการไม่สามารถปฏิบัติตามภาระผูกพันที่มีต่อลูกค้า ที่อาจนำไปสู่การสูญเสียชื่อเสียง และการฟ้องร้อง เป็นต้น ซึ่งข้อมูลต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำมาเป็นปัจจัยในการประเมินผลกระทบทางธุรกิจ เพื่อให้ทราบว่าในปัจจุบันองค์กรมีกระบวนการหลักใดที่มีความสำคัญที่ควรพิจารณาดำเนินการปกป้องซึ่งต้องดำเนินการได้ภายใต้ค่าวิกฤตต่างๆ ที่สำคัญ [3] ซึ่งได้แก่

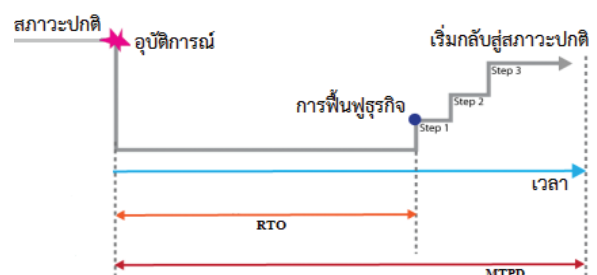
1. ช่วงเวลาการหยุดชะงักที่ยอมรับได้สูงสุด (Maximum Tolerable Period of Disruption,

MTPD) หมายถึง ช่วงเวลาที่ส่งผลกระทบที่ไม่สามารถยอมรับได้

2. ระยะเวลาเป้าหมายในการฟื้นคืนสภาพ (Recovery Time Objective, RTO) หมายถึง ระยะเวลาเป้าหมายที่ใช้ในการดำเนินการให้การส่งไฟฟ้ากลับสู่ระดับที่ยอมรับได้

3. ระดับที่ยอมรับขั้นต่ำ (Minimum Acceptable Level, MAL) หมายถึง ระดับต่ำสุดของการบริการที่ถูกค่ายอมรับได้ที่จะกลับคืนมาในระหว่างเกิดการหยุดชะงัก

ซึ่งระยะเวลาเป้าหมายในการฟื้นคืนสภาพกับช่วงเวลาการหยุดชะงักที่ยอมรับได้สูงสุด สามารถแสดงความสัมพันธ์กันได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า RTO และ MTPD [4]

จากรูปที่ 2 พบว่าค่า RTO จะต้องถูกกำหนดขึ้นภายใต้กรอบของค่า MTPD ซึ่งหากเลยจากช่วงเวลานี้ไปและยังไม่สามารถเริ่มฟื้นฟูธุรกิจได้ จะส่งผลกระทบอย่างรุนแรงมากต่อองค์กร ทั้งนี้การฟื้นฟุดังกล่าวไม่จำเป็นต้องครบสมบูรณ์ในทันที เพียงแต่ต้องระบุให้ได้ว่าค่า RTO ที่กำหนด ณ จุดฟื้นฟูธุรกิจมีระดับ MAL เท่าใด

2.4 การประเมินความเสี่ยง

คือ การระบุประเด็นและวิเคราะห์ความเสี่ยงจากอุบัติการณ์ที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาโอกาสที่จะเกิดอุบัติการณ์แต่ละประเภท และระดับผลกระทบที่เกิดขึ้น ตลอดจนมาตรฐานการควบคุมที่มีอยู่ ซึ่งทำให้ทราบถึงภัยคุกคาม ที่มีโอกาสเกิดขึ้น และส่งผลกระทบต่อการดำเนินธุรกิจขององค์กรในด้านต่างๆ รวมถึงขนาดความรุนแรงของผลกระทบจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น และจุดที่สามารถทำให้

เกิดผลกระทบในปัจจุบัน จุดอ่อนของมาตรการควบคุมที่มีอยู่ในปัจจุบัน และการจัดการเพื่อลดความเสี่ยงให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การประเมินความเสี่ยงช่วยให้องค์กรสามารถพิจารณาถึงเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อการบรรลุวัตถุประสงค์ขององค์กร หรือกลายเป็นเหตุให้การดำเนินธุรกิจขององค์กรหยุดชะงัก ในการประเมินจะพิจารณาจาก 2 มุมมองได้แก่ โอกาสที่จะเกิด (Probability, P) และผลกระทบ (Impact, I) โดยพิจารณาผลกระทบเชิงลบจากเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นทั้งนี้จะต้องมีการประเมินความเสี่ยงบนพื้นฐานของความเสี่ยงที่มีอยู่ (Inherent Risk) และความเสี่ยงที่เหลืออยู่ (Residual Risk) จากความเสี่ยงที่มีการดำเนินการอยู่แล้ว

ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงว่าความเสี่ยงใดมีความสำคัญที่ต้องนำมาดำเนินการก่อนหลัง จะวิเคราะห์จากระดับความเสี่ยง (Degree of Risk) ซึ่งคำนวณโดยนำค่า $P \times I$ และพิจารณาร่วมกับเมตริกซ์ความเสี่ยง ดังรูปที่ 3

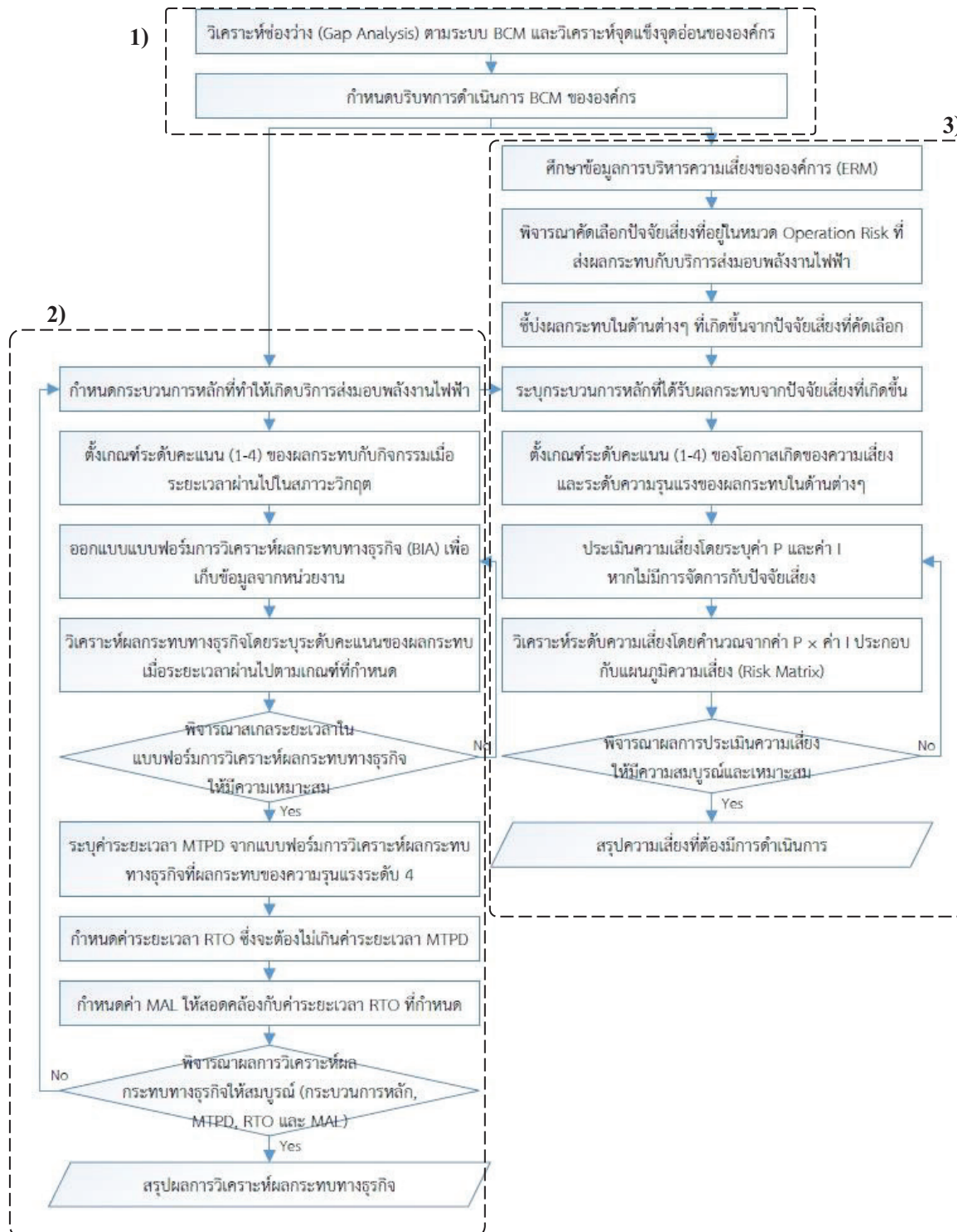
ผลกระทบ					
4		(A)			
3		สูง	สูงมาก		
2		ต่ำ	ปานกลาง	(B)	
1					
		1	2	3	4
		โอกาสเกิด			

รูปที่ 3 เมตริกซ์ความเสี่ยง

ในการกำหนดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงให้พิจารณาจากคะแนนระดับความเสี่ยง ซึ่งหากมีค่าเท่ากันให้พิจารณาประกอบกับเมตริกซ์ความเสี่ยงในรูปที่ 3 โดยให้ความเสี่ยงที่ตกอยู่ในช่วงสูงกว่ามีความสำคัญมากกว่า ยกตัวอย่างเช่น ความเสี่ยง A มี $P=2, I=4$ กับความเสี่ยง B มี $P=4, I=2$ จะพบว่ามึระดับความเสี่ยงเท่ากับ 8 เท่ากัน แต่ความเสี่ยง A จะตกอยู่ในช่วงสูง ส่วนความเสี่ยง B จะตกอยู่ในช่วงปานกลาง จะสรุปได้ว่าความเสี่ยง A มีความสำคัญมากกว่าความเสี่ยง B ทั้งนี้หากเป็นความเสี่ยงที่มีระดับความเสี่ยงเท่ากันและตกอยู่ในช่วงเดียวกันจะต้องพิจารณาความเสี่ยงที่มีค่าผลกระทบสูงกว่าให้มีความสำคัญมากกว่า

3. การศึกษาและกำหนดบริบทการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจขององค์กร

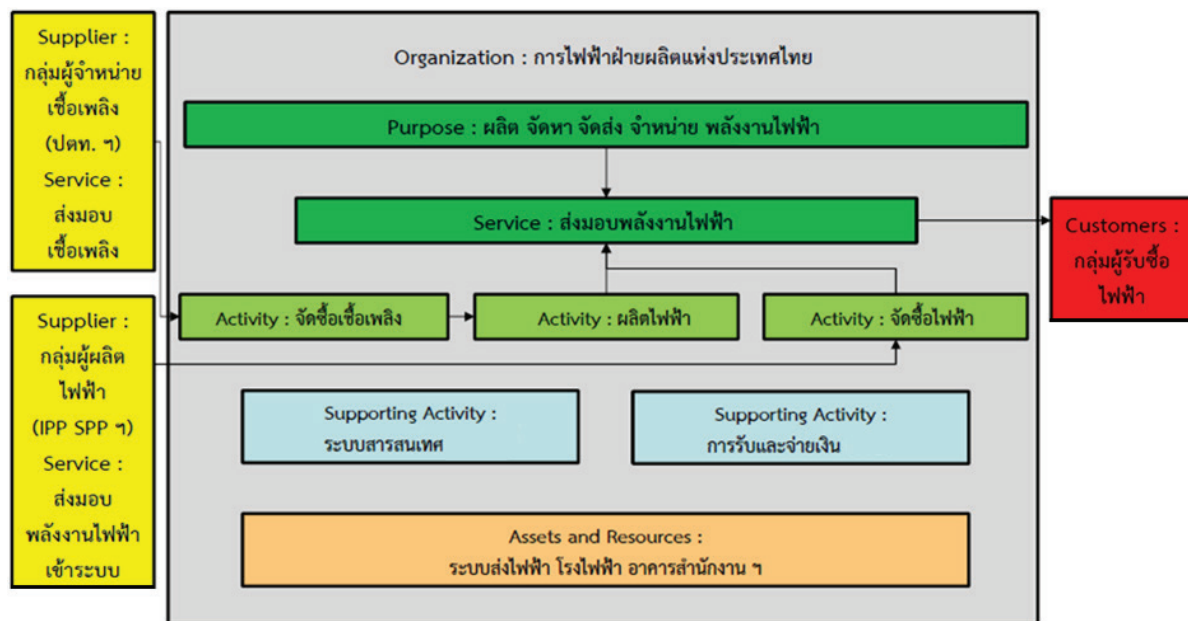
การศึกษาเพื่อหาแผนหรือมาตรการเพื่อลดความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อการบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า เริ่มจากการวิเคราะห์ช่องว่างโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจและจุดแข็งจุดอ่อนขององค์กร เพื่อให้สามารถกำหนดทิศทางการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจขององค์กรได้อย่างเหมาะสม จากนั้นดำเนินการกำหนดกระบวนการหลักที่ทำให้เกิดบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า วิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ และประเมินความเสี่ยง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การปกป้องกระบวนการหลักเพื่อให้มีความต่อเนื่องทางธุรกิจในสภาวะวิกฤต และลดความเสี่ยงอันส่งผลกระทบให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 4 สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การกำหนดบริบทการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจขององค์กร 2) การวิเคราะห์

ผลกระทบทางธุรกิจ และ 3) การประเมินความเสี่ยง โดยในส่วนของการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ และการประเมินความเสี่ยง จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4 และ 5 ต่อไป



รูปที่ 5 แผนผังความเข้าใจองค์กร

3.1 การศึกษาข้อมูลองค์กร

องค์กรดำเนินกิจการด้านพลังงานไฟฟ้าภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงพลังงานและกระทรวงการคลัง ดำเนินธุรกิจหลักในการผลิต จัดหา และส่งพลังงานไฟฟ้าให้แก่ ลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าตามกฎหมายกำหนดและประเทศใกล้เคียง พร้อมทั้งธุรกิจอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไฟฟ้าภายใต้กรอบพระราชบัญญัติ กฟผ. [5]

เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ขององค์กร ควรมีการวิเคราะห์และแสดงความเชื่อมโยงขององค์กรถึงกิจกรรมบริการหรือผลิตภัณฑ์ เป้าประสงค์องค์กร ทรัพยากร ลูกค้า คู่ค้า อย่างเป็นระบบ จึงได้จัดทำแผนผังความเข้าใจองค์กร (Understanding Organization) [6] สำหรับบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 พบว่าบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้าเป็นธุรกิจหลักขององค์กรซึ่งไม่สามารถหยุดชะงักได้ซึ่งสอดคล้องตามพันธกิจขององค์กร โดยมีกลุ่มของกิจกรรมหลักที่สนับสนุนให้เกิดบริการได้แก่ การจัดซื้อเชื้อเพลิง การจัดซื้อไฟฟ้า และการผลิตกระแสไฟฟ้า อันนำไปสู่ระบบส่งไฟฟ้า เพื่อส่งมอบไปยังลูกค้าขององค์กร

3.2 การวิเคราะห์ช่องว่าง

เพื่อให้องค์กรสามารถดำเนินการประเมินความเสี่ยงและวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจได้อย่างถูกต้อง จึงนำข้อมูลองค์กรมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานระบบการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจซึ่งสามารถสรุปประเด็นได้ดังนี้

- 1) ยังไม่มีการกำหนดบริบทการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจขององค์กร
- 2) ยังไม่ได้ระบุถึงกระบวนการหลักที่สนับสนุนให้เกิดบริการหรือผลิตภัณฑ์
- 3) ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจซึ่งอยู่ในลักษณะของผลกระทบตามระยะเวลา (Impacts over Time)
- 4) องค์กรยังไม่ได้ดำเนินการประเมินความเสี่ยงที่มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ
- 5) องค์กรมีแผนหรือมาตรการตอบสนองต่อความเสี่ยงต่างๆ ต่อองค์กร แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์ที่แสดงถึงความเชื่อมโยงระหว่างการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจและการประเมินความเสี่ยง จึงไม่สามารถมั่นใจได้ว่าแผนหรือมาตรการที่มีอยู่สามารถตอบสนองความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อบริการขององค์กรได้อย่างสมบูรณ์

6) แผนหรือมาตรการตอบสนองต่อความเสี่ยงต่างๆ
ต้องกรังยังไม่มีการจัดกลุ่มอย่างเป็นระบบ

3.3 วิเคราะห์จุดแข็งและจุดอ่อนขององค์กร

สามารถสรุปภาพรวมจุดแข็งและจุดอ่อนขององค์กร
ในการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ เพื่อใช้ในการ
กำหนดแนวทางและบริบทการบริหารความต่อเนื่องทาง
ธุรกิจขององค์กร ได้ดังนี้

3.3.1 จุดแข็งขององค์กร

1) องค์กรมีทรัพยากรจำนวนมาก โดยโครงข่าย
ระบบไฟฟ้าถูกสร้างมาให้ทำงานแบบสามารถทำงานแทน
กันได้ (Redundant) ทำให้มีความยืดหยุ่นในระบบสูง

2) องค์กรมีเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการบริหารความ
ต่อเนื่องทางธุรกิจอยู่แล้วในชื่อต่างๆ ซึ่งสามารถนำมา
เชื่อมโยงได้

3) องค์กรมีการฝึกซ้อมในสถานะวิกฤตอย่างเป็น
ประจำทั้งในระดับหน่วยงานและระดับองค์กร

4) มีการวิเคราะห์บริบทขององค์กรที่ดีเนื่องจากมี
การจัดทำรายงานผลการปฏิบัติงานองค์กร (Operation
Report)

3.3.2 จุดอ่อนขององค์กร

1) องค์กรยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบทาง
ธุรกิจซึ่งถือว่าเป็นจุดหลักของการบริหารความต่อเนื่อง
ทางธุรกิจ และเป็นข้อกำหนดหลักของการบริหารความ
ต่อเนื่องทางธุรกิจ ซึ่งจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลกระทบ
ทางธุรกิจในหัวข้อที่ 4 ต่อไป

2) องค์กรยังไม่สามารถเชื่อมโยงแผนหรือมาตรการ
ที่องค์กรมีอยู่แล้วร่วมกับการฝึกซ้อมให้สอดคล้องกับการ
วิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

3) องค์กรยังไม่มีเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่าง
การบริหารความเสี่ยงองค์กรกับการบริหารความต่อเนื่อง
ทางธุรกิจ ซึ่งมุ่งเน้นไปที่ผลกระทบต่อลูกค้าและสังคม

4) องค์กรยังไม่กำหนดบริบทของการบริหารความ
ต่อเนื่องทางธุรกิจขององค์กร ซึ่งต้องมีการระบุถึง
วัตถุประสงค์และขอบเขตอย่างชัดเจน

3.4 บริบทการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ

จากการศึกษาข้อมูลองค์กรที่เกี่ยวข้องกับการ
ประเมินความเสี่ยงองค์กรรวมไปถึงการดำเนินการใน
สถานะวิกฤตในอดีต ประกอบกับผลการวิเคราะห์ช่องว่าง
ตามมาตรฐานการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ ซึ่ง
สามารถสรุปได้ดังนี้

ภารกิจหลักที่ต้องตอบสนองต่อลูกค้าขององค์กรคือ
การส่งมอบพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงมุ่งเน้นการบริหาร
ความต่อเนื่องทางธุรกิจในบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า
ซึ่งมีขอบเขตการพิจารณาได้แก่ โรงไฟฟ้าและระบบส่ง
ไฟฟ้า โดยดำเนินการกับความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อ
กระบวนการหลักที่ทำให้เกิดบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า
ซึ่งหากไม่มีการปกป้องอาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง
จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจและการประเมิน
ความเสี่ยงจึงจะนำมาจัดทำเป็นแผนหรือมาตรการ
ดำเนินการในสถานะวิกฤตเพื่อให้มีความต่อเนื่องทางธุรกิจ
ต่อไป

4. การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

1) กำหนดกระบวนการหลักซึ่งสนับสนุนให้เกิด
บริการ โดยพิจารณาจากบริบทขององค์กรร่วมกับแผนผัง
ความเข้าใจองค์กรในรูปที่ 5 และระบุหน่วยงานที่
รับผิดชอบในแต่ละกระบวนการหลักลงในแบบบันทึกการ
กำหนดกระบวนการหรือกิจกรรมที่ทำให้เกิดบริการ
(BCM-BIA-01)

2) นำกระบวนการหรือกิจกรรมสนับสนุนหลักมา
ดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจลงในแบบบันทึก
การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ (BCM-BIA-02) โดย
กำหนดรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

- ทำการวิเคราะห์ผลกระทบตลอดช่วงระยะเวลา
ที่แต่ละกระบวนการหลักนั้นหยุดชะงัก

- ดำเนินการชี้แจงผลกระทบแต่ละด้านที่จะได้รับ
จากการหยุดชะงักโดยใช้แนวทางการประเมินตามที่ระบุ
ในหัวข้อที่ 4.2 เกณฑ์การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

- กำหนดค่า MTPD ของกระบวนการหลักโดย
พิจารณาเลือกจากค่าระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่เริ่มมีระดับของ

ผลกระทบสูงมาก (คะแนน 4) จากทุกด้าน และระบุค่า
ดังกล่าวลงในช่อง MTPD ตัวอย่างดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการกำหนดค่า MTPD ของกระบวนการหลัก

กระบวนการหลัก	ผล กระทบ	ระดับของผลกระทบเมื่อระยะเวลาผ่านไป																MTPD (ระยะเวลา)
		1-15 min	15-30 min	30-45 min	45-60 min	1-2 hour	2-3 hour	3-4 hour	4-8 hour	8-24 hour	1-2 day	2-4 day	4-7 day	1-2 week	2-4 week	1-2 M	2 M plus	
1. วางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า	<u>Q</u>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	4	4	4	1 week
	<u>C</u>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	

หมายเหตุ พิจารณาระดับคะแนนตามตารางที่ 2 เกณฑ์การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจโดย Q หมายถึง ผลกระทบต่อการดำเนินงาน/การเงิน และ C หมายถึง ผลกระทบด้านภาพลักษณ์/ชื่อเสียง

จากตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างการกำหนดค่า MTPD ของกระบวนการวางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ซึ่งได้เก็บข้อมูลร่วมกับหน่วยงานเจ้าของกระบวนการ มีการระบุระดับของผลกระทบเมื่อเวลาผ่านไปโดยมีค่าคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 4 พบว่ามีค่าคะแนนระดับ 4 ตกอยู่ในช่วง 1-2 สัปดาห์ (ดังที่ได้ทำสัญลักษณ์ไว้) จึงเลือกค่า 1 สัปดาห์ ซึ่งเป็นค่าเวลาที่น้อยที่สุดมาใช้เป็นค่า MTPD ของกระบวนการวางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า

3) นำข้อมูลค่า MTPD และ MAL มาพิจารณา กำหนดค่า RTO และระดับ MAL ของแต่ละกระบวนการหรือกิจกรรมลงในแบบบันทึกการกำหนดระดับที่ยอมรับขั้นต่ำและระยะเวลาเป้าหมายในการฟื้นคืนสภาพของกระบวนการหรือกิจกรรม (BCM-BIA-03) ซึ่งค่า RTO เป็นค่าที่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้ข้อมูลโดยพิจารณาจากการแก้ไขสถานการณ์ในอดีต โดยค่า RTO ที่ระบุจะเป็น

ค่าที่น้อยที่สุดที่สามารถฝึกซ้อมได้จริง โดยการฝึกซ้อมแผนหรือมาตรการในสภาวะวิกฤตในแต่ละครั้งจะถูกนำไปปรับปรุงการฝึกซ้อมในครั้งต่อไป

4) ชี้นำถึงการพึ่งพาทรัพยากรที่สนับสนุนให้เกิดบริการ เช่น ผู้ส่งมอบ ผู้รับจ้าง และผู้มีส่วนได้เสียอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

5) นำการพึ่งพาทรัพยากรที่สนับสนุนให้เกิดบริการในแต่ละกระบวนการหลัก มากำหนดลงในแบบบันทึกการชี้นำถึงการพึ่งพาทรัพยากรที่สนับสนุนกระบวนการหรือกิจกรรม (BCM-BIA-04)

4.2 เกณฑ์การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

เกณฑ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจที่ใช้แบ่งออกเป็นผลกระทบต่อการดำเนินงานและการเงิน และผลกระทบด้านภาพลักษณ์และชื่อเสียง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

คะแนน	ผลกระทบ	ผลกระทบต่อการดำเนินงานและการเงิน	ผลกระทบด้านภาพลักษณ์และชื่อเสียง
1	เล็กน้อย	งานชะงักเล็กน้อยไม่มีผลเสียตามมา สามารถดำเนินการแก้ไขสู่สภาวะปกติได้ภายใน 1 สัปดาห์ /ไม่ส่งผลกระทบกับรายได้และค่าใช้จ่าย	เกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง 15 - 30 นาที /มีการเผยแพร่ข่าวเชิงลบจากสื่อท้องถิ่นหรือไม่มีเลย
2	ปานกลาง	งานชะงักชั่วคราว มีผลเสียเล็กน้อย ใช้เวลาดำเนินการแก้ไขสู่สภาวะปกติมากกว่า 1 สัปดาห์แต่ไม่เกิน 1 เดือน /ขาดรายได้หรือเกิดค่าใช้จ่ายเล็กน้อย	เกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง 0.5 - 1 ชั่วโมง /มีการเผยแพร่ข่าวเชิงลบจากสื่อภายในประเทศ
3	สูง	งานชะงัก มีผลเสีย ใช้เวลาดำเนินการแก้ไขสู่สภาวะปกติมากกว่า 1 เดือน แต่ไม่เกิน 3 เดือน /ขาดรายได้หรือเกิดค่าใช้จ่ายคิดเป็นจำนวนเงินไม่เกิน 5% ของรายได้ต่อเดือน	เกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้าง 1 - 2 ชั่วโมง /มีการพาดหัวข่าวเชิงลบจากสื่อภายในประเทศ

ตารางที่ 2 (ต่อ) เกณฑ์การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

คะแนน	ผลกระทบ	ผลกระทบต่อการดำเนินงานและการเงิน	ผลกระทบด้านภาพลักษณ์และชื่อเสียง
4	สูงมาก	งานชะงัก มีผลเสียมาก / ใช้เวลาดำเนินการแก้ไขสู่สภาวะปกติมากกว่า 3 เดือนขึ้นไป / ขาดรายได้หรือเกิดค่าใช้จ่ายคิดเป็นจำนวนเงินมากกว่า 5 % ของรายได้ต่อเดือน	เกิดไฟฟ้าดับบริเวณกว้างมากกว่า 2 ชั่วโมง / มีการเผยแพร่ข่าวเชิงลบจากสื่อต่างประเทศ

4.3 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

องค์กรมีการนำบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นพันธกิจหลัก สอดคล้องกับการบริหารความเสี่ยงองค์กรและขอบข่าย มาดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ เพื่อใช้ในการพิจารณาถึงลำดับความสำคัญของความต่อเนื่อง การฟื้นฟู และบรรลุมิติวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่กำหนดไว้ โดยมีการสร้างคู่มือในการดำเนินการชื่อ “การวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ” (BCM-BIA)

ทำการเก็บข้อมูลโดยการประชุมร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและศึกษาเอกสารสารสนเทศภายในองค์กร เพื่อวิเคราะห์กระบวนการที่สำคัญจำแนกได้เป็น 7 กระบวนการหลัก ซึ่งหากขาดกระบวนการเหล่านี้แล้วจะส่งผลให้องค์กรไม่สามารถบรรลุพันธกิจหลักในการส่งมอบพลังงานไฟฟ้าได้ เมื่อพิจารณาตามความสำคัญและความเร่งด่วนในการฟื้นคืนสภาพการดำเนินงานให้กลับมาให้บริการได้โดยคำนึงถึงค่าวิกฤตต่างๆ (MTPD, RTO และ MAL) และมีการจัดเรียงลำดับการฟื้นคืนสภาพสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าวิกฤตที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

กระบวนการหลัก	MTPD	ลำดับ RTO	MAL
1) วางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า	1 สัปดาห์	4	80 %
2) การส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า	3 ชั่วโมง	3	100 %
3) บริหารการใช้เชื้อเพลิง	2 สัปดาห์	5	100 %
4) การจัดหาเชื้อเพลิง	2 สัปดาห์	6	100 %
5) วางแผนส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า	1 เดือน	7	100 %
6) ผลิต ไฟฟ้า และ ควบคุมคุณภาพตามความต้องการของศูนย์ NCC	2 ชั่วโมง	1	100 %

หมายเหตุ ค่า RTO เป็นความลับทางธุรกิจ จึงแสดงด้วยลำดับ RTO แทน

ตารางที่ 3 (ต่อ) ค่าวิกฤตที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ

กระบวนการหลัก	MTPD	ลำดับ RTO	MAL
7) ปฏิบัติการควบคุมและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ลูกค้าผ่านจุดส่งมอบ	1 วัน	2	90 %

หมายเหตุ ค่า RTO เป็นความลับทางธุรกิจ จึงแสดงด้วยลำดับ RTO แทน

5. การประเมินความเสี่ยง

5.1 ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง

1) พิจารณาหาหัวข้อความเสี่ยงจากข้อมูลจากเอกสารการบริหารความเสี่ยงองค์กร สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาหัวข้อความเสี่ยงจากการบริหารความเสี่ยงองค์กรในหัวข้อความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน โดยเป็นความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลัก อาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง

2) ชี้นำความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อดำเนินงานขององค์กร หุตุชะงัก ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลัก ระบบสารสนเทศ บุคลากร สินทรัพย์ ผู้รับจ้างและทรัพยากรอื่นๆ ที่สนับสนุน และอาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง โดยดำเนินการลงในแบบบันทึก “การชี้บ่งความเสี่ยงของการหยุดชะงักต่อกิจกรรมที่มีความสำคัญและทรัพยากร” (BCM-RA-01)

3) ดำเนินการประเมินความเสี่ยงโดยพิจารณาให้คะแนนตามเกณฑ์การประเมินความเสี่ยง ตามที่ระบุในหัวข้อที่ 5.2 เกณฑ์การประเมินความเสี่ยง

4) ระบุระดับคะแนนลงในเมตริกซ์ความเสี่ยง ดังรูปที่ 3

5) พิจารณานำความเสี่ยงที่มีระดับความรุนแรงสูงมากและสูง หรือเห็นควรให้มีการจัดการ มาดำเนินการ

จัดทำหรือทบทวนแผนหรือมาตรการเพื่อตอบโต้ภาวะฉุกเฉินสำหรับอุบัติเหตุหรือภัยคุกคามอื่นๆ รวมถึงวางแผนบริหารความเสี่ยงเพื่อควบคุมและลดความเสี่ยงให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยต้องพิจารณาถึงมาตรการเชิงรุกเพื่อลดโอกาสของการหยุดชะงัก ทำให้ช่วงเวลาของการหยุดชะงักสั้นลง และจำกัดผลกระทบของการหยุดชะงัก

5.2 เกณฑ์การประเมินความเสี่ยง

5.2.1 เกณฑ์การประเมินโอกาสเกิดของความเสี่ยง

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่า ในการหาข้อมูลเชิงปริมาณมาสนับสนุนการประเมินความเสี่ยงเป็นไปได้ยาก จึงทำการประเมินในเชิงคุณภาพ ซึ่งต้องอาศัยการวิเคราะห์ตามหลักการอย่างระมัดระวัง ส่วนในกรณีที่หาข้อมูลปริมาณที่เกี่ยวกับเหตุการณ์ความล้มเหลวหรือความถี่ที่เกิดขึ้นในอดีตได้ สามารถนำมาบ่งชี้ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ทั้งนี้ในการประเมินโอกาสเกิดของความเสี่ยงแนวมิต่างเกณฑ์ที่ใช้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์การประเมินโอกาสเกิดของความเสี่ยง [7]

ระดับ	โอกาสเกิด	ความถี่ในการเกิดเหตุการณ์	ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์
1	เล็กน้อย	ไม่เคยเกิดเลยในช่วงตั้งแต่ 10 ปี ขึ้นไป	ความน่าจะเป็นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 %
2	ปานกลาง	เกิดขึ้นในช่วง 5 - 10 ปี	ความน่าจะเป็นมากกว่า 20 – 50 %
3	สูง	เกิดขึ้นในช่วง 1 – 5 ปี	ความน่าจะเป็นมากกว่า 50 – 80 %
4	สูงมาก	เกิดมากกว่า 1 ครั้งใน 1 ปี	ความน่าจะเป็นมากกว่า 80 %

5.2.2 เกณฑ์การประเมินผลกระทบของความเสี่ยง

สำหรับการประเมินผลกระทบของความเสี่ยงจะพิจารณาใช้เกณฑ์ในด้านของผลกระทบที่มีระดับความรุนแรงมากที่สุด โดยเลือกจากเกณฑ์ประเมินผลกระทบด้านต่างๆ ได้แก่ ด้านการเงิน ด้านการจ่ายไฟฟ้า ด้านชุมชน ด้านภาพลักษณ์ชื่อเสียง เป็นต้น ดังตารางที่ 5 ถึงตารางที่ 8

ทั้งนี้ค่าต่างๆ ที่นำมาใช้งาน ได้ถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในองค์กรอยู่ก่อนแล้ว

ตารางที่ 5 เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า [8]

ความรุนแรง	ระดับผลกระทบ	ผลกระทบ
1	เล็กน้อย	ใช้น้ำมันเตา และระบบส่งรองรับ N-1 Contingency
2	ปานกลาง	ใช้น้ำมันดีเซล และระบบส่งรองรับ N-1 Contingency
3	สูง	ใช้น้ำมันดีเซล และระบบส่งไม่รองรับ N-1 Contingency
4	สูงมาก	มีการดับไฟฟ้า

หมายเหตุ ในสภาวะปกติจะผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีต้นทุนถูกที่สุด ใช้น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีต้นทุนสูงขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 6 เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านการเงิน [8]

ความรุนแรง	ระดับผลกระทบ	ผลกระทบ
1	เล็กน้อย	น้อยกว่า 40 ล้านบาทต่อปี
2	ปานกลาง	ระหว่าง 40 - 55 ล้านบาทต่อปี
3	สูง	ระหว่าง 55 - 70 ล้านบาทต่อปี
4	สูงมาก	มากกว่า 70 ล้านบาทต่อปี

ตารางที่ 7 เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านความรุนแรงของการเกิดไฟฟ้าดับ [8]

ความรุนแรง	ระดับผลกระทบ	ผลกระทบ
1	เล็กน้อย	BDI มีค่าน้อยกว่า 0.33
2	ปานกลาง	BDI มีค่าระหว่าง 0.33 - 0.65
3	สูง	BDI มีค่าระหว่าง 0.65 – 0.99
4	สูงมาก	BDI มีค่ามากกว่า 0.99

หมายเหตุ BDI (Bulk System Disturbance Index) คือ ดัชนีวัดการเกิดการรบกวนของระบบ [10]

ตารางที่ 8 เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านมูลค่าความเสียหายของโรงไฟฟ้า [8]

ความรุนแรง	ระดับผลกระทบ	ผลกระทบ
1	เล็กน้อย	มูลค่าความเสียหายน้อยกว่า 170 ล้านบาท
2	ปานกลาง	มูลค่าความเสียหายระหว่าง 170 - 340 ล้านบาท

ตารางที่ 8 (ต่อ) เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านมูลค่าความเสียหายของโรงไฟฟ้า [8]

ความรุนแรง	ระดับผลกระทบ	ผลกระทบ
3	สูง	มูลค่าความเสียหายระหว่าง 340 - 500 ล้านบาท
4	สูงมาก	มูลค่าความเสียหายมากกว่า 500 ล้านบาท

5.3 ผลการประเมินความเสี่ยง

จากการนำอุบัติการณ์ที่ทำให้ส่งผลกระทบต่อองค์กรและบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้ามาดำเนินการวิเคราะห์ความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ ในการประเมินความเสี่ยงจะพิจารณาจากข้อมูล ได้แก่ แผนวิสาหกิจองค์กร ซึ่งมีการวิเคราะห์ประเด็นภายนอกและภายใน (SWOT) ขององค์กร การบริหารความเสี่ยงทั่วทั้งองค์กร และผลการดำเนินงานขององค์กร (Organization Performance Report : OPR) โดยมีการสร้างคู่มือในการดำเนินการชื่อว่า “การประเมินความเสี่ยง” (BCM-RA) ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 9

จากตารางที่ 9 ความเสี่ยงที่จะถูกนำมาพิจารณาตามแนวทางการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจจะต้องเป็นความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน (Operation Risk) ซึ่งเป็นอุบัติการณ์ที่จะส่งผลกระทบแบบฉับพลัน (Disruptive Incident) ต่อกระบวนการหลัก

จากนั้นได้มีการประเมินความเสี่ยงลงในแบบบันทึก “การชี้แจงความเสี่ยงของการหยุดชะงักต่อกิจกรรมที่มีความสำคัญและทรัพยากร” (BCM-RA-01) โดยมีรายละเอียดการพิจารณาให้คะแนนระดับโอกาสเกิดความเสี่ยงและระดับความรุนแรงของผลกระทบ ตัวอย่างเช่น ความเสี่ยงที่ (3) พบว่ามีผลกระทบให้ 1) ความน่าเชื่อถือด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง และ 2) เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ ซึ่งผลกระทบด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้าเป็นผลกระทบด้านที่รุนแรงที่สุดภายใต้หัวข้อความเสี่ยง จึงเลือกใช้เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านความรุนแรงของการเกิดไฟฟ้าดับเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลกระทบ โดยสามารถแสดงสรุปผลการประเมินความเสี่ยงในรูปแบบเมตริกซ์ความเสี่ยงดังรูปที่ 6

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยง ผลกระทบ และความเชื่อมโยงกับกระบวนการหลัก

ที่	ความเสี่ยง	สาเหตุ	ผลกระทบ	เกณฑ์การประเมินผลกระทบ	กระบวนการหลักที่ได้รับผลกระทบ
(1)	การใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าไม่เป็นไปตามแผนการผลิต	- การเกิดอุบัติเหตุกับท่อส่งก๊าซธรรมชาติ - ระยะเวลาการซ่อมบำรุงท่อส่งก๊าซธรรมชาติมากกว่าแผนที่กำหนด - การขัดข้องจากแหล่งผลิตก๊าซจากอ่าวไทยและพม่า - แหล่งก๊าซธรรมชาติเกิด Emergency Shutdown - การสำรองน้ำมันเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้ายังไม่เป็นไปตามกำหนด	- การจัดหาเชื้อเพลิงไม่พอเพียงกับความต้องการของโรงไฟฟ้า - การนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศล่าช้ากว่าแผน - ต้องใช้น้ำมันผลิตไฟฟ้าทดแทนทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น - สูญเสียภาพลักษณ์และชื่อเสียงของผู้ผลิตไฟฟ้า	เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า	1) วางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า 3) บริหารการใช้เชื้อเพลิง 4) การจัดหาเชื้อเพลิง 5) วางแผนส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 6) ผลิตไฟฟ้าและควบคุมคุณภาพตามความต้องการของ NCC
(2)	ความเสียหายของระบบส่งไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ	- อุบัติการณ์ที่ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูง เช่น ไฟไหม้ แผ่นดินไหว น้ำท่วม วินาศกรรม เป็นต้น	- ทำให้บีบประกันเพิ่มสูงขึ้น - ความเชื่อถือด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง	เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านการเงิน	5) วางแผนส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 7) ปฏิบัติการควบคุมและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ลูกค้าผ่านจุดส่งมอบ

หมายเหตุ การเลือกใช้เกณฑ์การประเมินผลกระทบจะเลือกจากผลกระทบด้านที่รุนแรงที่สุดภายใต้หัวข้อความเสี่ยงเดียวกัน

ตารางที่ 9 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยง ผลกระทบ และความเชื่อมโยงกับกระบวนการหลัก

ที่	ความเสี่ยง	สาเหตุ	ผลกระทบ	เกณฑ์การประเมินผลกระทบ	กระบวนการหลักที่ได้รับผลกระทบ
(4)	ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์	- สายส่งไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ขัดข้อง - เกิดสภาพแวดล้อมที่นอกเหนือการคาดการณ์ เช่น ไฟฟ้า เกิดเมฆหมอกหนาที่บ น้ำท่วม แผ่นดินไหว เป็นต้น - การนำระบบส่งไฟฟ้ากลับสู่สภาวะปกติล่าช้า	- ความเชื่อถือด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้าลดลง - เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ	เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านความรุนแรงของการเกิดไฟฟ้าดับ	1) วางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า 5) วางแผนส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า 7) ปฏิบัติการควบคุมและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ลูกค้าผ่านจุดส่งมอบ
(5)	ความเสียหายของโรงไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ	- ความประมาทจากการเดินเครื่องและบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า - การรั่วไหลของเชื้อเพลิงหรือน้ำมันหล่อลื่นของโรงไฟฟ้า - อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเสื่อมสภาพ	- เสื่อมสภาพลักษณะและชื่อเสียง - เกิดมูลค่าความเสียหายจากอุบัติเหตุ - สูญเสียความพร้อมจ่ายไฟฟ้า - เสียค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูโรงไฟฟ้า	เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านมูลค่าความเสียหายของโรงไฟฟ้า	2) การสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า 3) บริหารการใช้เชื้อเพลิง 4) การจัดหาเชื้อเพลิง 6) ผลิตไฟฟ้าและควบคุมคุณภาพตามความต้องการของ NCC
(6)	ภัยพิบัติที่อาจเกิดจากการก่อวินาศกรรมโรงไฟฟ้า	- สถานการณ์ความไม่สงบในจังหวัดชายแดนภาคใต้ - ความขัดแย้งทางการเมืองระดับประเทศ	- สูญเสียความพร้อมจ่ายไฟฟ้า - กำลังการผลิตไฟฟ้าสำรองลดลง - ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น - เสื่อมสภาพลักษณะและชื่อเสียง - เกิดมูลค่าความเสียหายจากอุบัติเหตุ	เกณฑ์การประเมินผลกระทบด้านมูลค่าความเสียหายของโรงไฟฟ้า	2) การสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า 3) บริหารการใช้เชื้อเพลิง 4) การจัดหาเชื้อเพลิง 6) ผลิตไฟฟ้าและควบคุมคุณภาพตามความต้องการของ NCC

ผลกระทบ

4		(3) (4)	(2)	(1)
3	(6)	(5)		
2				
1				

1 2 3 4 โอกาสเกิด

หมายเหตุ ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงหัวข้อความเสี่ยงตามตารางที่ 9

รูปที่ 6 โอกาสเกิดและผลกระทบของความเสี่ยง กรณีศึกษาไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง

จากรูปที่ 6 จะพบว่าความเสี่ยงที่ (1) และ (2) ตกอยู่ในช่วงระดับความเสี่ยงสูงมาก และมีความสำคัญมากที่สุดตามลำดับ หากพิจารณาจากความเสี่ยงทั้งหมดจึงควรมีการจัดการก่อน เนื่องจากมีโอกาสและผลกระทบมากที่สุด ส่วนความเสี่ยงในลำดับถัดไป ได้แก่ (3) และ (4) ซึ่งมีลำดับความสำคัญเท่าเทียมกัน ตามมาด้วยความเสี่ยงที่ (5) และ (6) ซึ่งมีลำดับความสำคัญน้อยที่สุดตามลำดับ

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงสำหรับการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจในสภาวะวิกฤต กรณีศึกษาไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างนั้น การเก็บข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ ภายในองค์กร ได้มีการออกแบบเอกสารชุดแบบบันทึก 2 ฉบับ ได้แก่ 1) เอกสารแบบบันทึกการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ (BCM-BIA) ซึ่งเป็นเอกสารชี้แจงรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินการวิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจ และ 2) เอกสารแบบบันทึกการประเมินความเสี่ยง (BCM-RA) ซึ่งเป็นเอกสารชี้แจงรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินการประเมินความเสี่ยงเพื่อชี้แจงความเสี่ยงของการหยุดชะงักต่อกิจกรรมที่มีความสำคัญและทรัพยากร

การเก็บข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ดังกล่าวเพื่อให้ได้มาของกระบวนการหลักที่ต้องมีการปกป้องซึ่งตอบสนองบริการส่งมอบพลังงานไฟฟ้า และหาความเสี่ยงที่กระทบต่อกระบวนการหลักดังกล่าวจนอาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้าง ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการหลักที่ต้องมีการปกป้องมี 7 กระบวนการหลัก ดังนี้

1) กระบวนการวางแผนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ กองวางแผนปฏิบัติการผลิตไฟฟ้า

2) กระบวนการส่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ หน่วยงานวางแผนปฏิบัติการระบบส่งไฟฟ้า

3) กระบวนการบริหารการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ หน่วยงานวางแผนปฏิบัติการผลิตไฟฟ้า

4) กระบวนการจัดหาเชื้อเพลิง ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ หน่วยงานจัดหาเชื้อเพลิง

5) กระบวนการวางแผนส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ หน่วยงานวางแผนปฏิบัติการระบบส่งไฟฟ้า

6) กระบวนการผลิตไฟฟ้าและควบคุมคุณภาพตามความต้องการของศูนย์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแห่งชาติ ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ หน่วยงานวางแผนปฏิบัติการระบบส่งไฟฟ้า หน่วยงานปฏิบัติการระบบส่งของทุกภูมิภาค และโรงไฟฟ้า

7) กระบวนการปฏิบัติการควบคุมและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ลูกค้าผ่านจุดส่งมอบ ซึ่งมีผู้รับผิดชอบกระบวนการคือ หน่วยงานปฏิบัติการระบบส่งของทุกภูมิภาค

โดยพบว่าลำดับการฟื้นคืนเรียงตามค่า MTPD คือ กระบวนการที่ 6), 7), 2), 1), 3), 4) และ 5) ตามลำดับ หมายความว่าหากเกิดสภาวะวิกฤตที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหลักดังกล่าวแล้ว จะต้องดำเนินการเพื่อฟื้นคืนกระบวนการที่ 6 ก่อนเป็นลำดับแรก เนื่องจากมีค่า MTPD น้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3

สำหรับความเสี่ยงที่กระทบต่อกระบวนการหลักจนอาจทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นวงกว้างและต้องมีการจัดการเพื่อให้มีความต่อเนื่องทางธุรกิจมี 6 ความเสี่ยง ซึ่งเรียงตามลำดับความสำคัญได้ดังนี้

(1) การใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าไม่เป็นไปตามแผนการผลิต

(2) ความเสียหายของระบบส่งไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ

(3) ภัยพิบัติที่เกิดจากการก่อวินาศกรรมระบบส่งไฟฟ้า

(4) ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์

(5) ความเสียหายของโรงไฟฟ้าจากอุบัติเหตุ

(6) ภัยพิบัติที่อาจเกิดจากการก่อวินาศกรรม โรงไฟฟ้า

จากความเสี่ยงทั้ง 6 หัวข้อดังกล่าว ควรพิจารณา ดำเนินการกับความเสี่ยงที่ (1) และความเสี่ยงที่ (2) ก่อน เป็นลำดับแรกเนื่องจากมีระดับความเสี่ยงสูงมาก โดยใน การกำหนดกลยุทธ์ความต่อเนื่องทางธุรกิจ เพื่อจัดทำเป็น แผนหรือมาตรการนั้นต้องดำเนินการได้ภายใต้ค่าวิกฤต ต่างๆ ตามตารางที่ 3 ทั้งนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกระบวนการหลักและความเสี่ยงที่กระทบต่อ กระบวนการหลักได้ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการหลักและ ความเสี่ยงที่กระทบต่อกระบวนการหลัก

		ความเสี่ยง					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
กระบวนการหลัก	1)	√			√		
	2)					√	√
	3)	√				√	√
	4)	√				√	√
	5)	√	√	√	√		
	6)	√				√	√
	7)		√	√	√		

จากตารางที่ 9 ยกตัวอย่างเช่นกระบวนการหลักที่ 7 ซึ่งได้รับผลกระทบจากความเสี่ยงที่ (2) (3) และ (4) ส่งผลให้ความเชื่อถือด้านความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ลดลง จึงได้มีการพิจารณาจัดทำเป็นแผนการนำระบบ กลับคืนสู่สภาวะปกติเมื่อเกิดไฟฟ้าดับขึ้น เป็นต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากผลการวิจัยนี้สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการ วิเคราะห์ผลกระทบทางธุรกิจและการประเมินความเสี่ยง ไปกำหนดกลยุทธ์ความต่อเนื่องทางธุรกิจให้ครอบคลุมใน การฟื้นคืนสภาพกระบวนการหลัก โดยจัดทำในรูปแบบ ของแผนหรือมาตรการดำเนินการเพื่อให้เกิดความต่อเนื่อง ทางธุรกิจ ซึ่งต้องครอบคลุมวัตถุประสงค์ต่อไปนี้

- ลดโอกาสของการหยุดชะงัก
- ทำให้ช่วงเวลาหยุดชะงักสั้นลง
- จำกัดผลกระทบของการหยุดชะงักเฉพาะ ผลิตภัณฑ์และบริการที่สำคัญขององค์กร

2) ในการหาความเสี่ยงในองค์กรขนาดใหญ่ควร พิจารณาเพิ่มเติมจากเอกสารสารสนเทศขององค์กรดังนี้

- การบริหารความเสี่ยงองค์กร
- แผนวิสาหกิจองค์กร ซึ่งมีการวิเคราะห์ SWOTขององค์กร
- รายงานผลการดำเนินงานขององค์กร

3) ในการประเมินผลกระทบแต่ละด้านของการ ประเมินความเสี่ยง สามารถพิจารณาจากเกณฑ์ในด้าน อื่นๆ เพิ่มเติมตามแต่ความเหมาะสมของหัวข้อความเสี่ยง เช่น ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านสุขอนามัยและความ ปลอดภัยของบุคลากร ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการละเมิด กฎหมายและกฎระเบียบ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. คำศัพท์พลังงาน, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_kdglossary&view=glossary&category=2&Itemid=229.
- [2] International Standard. ISO22301:2012 Societal security - Business continuity management systems – Requirement. 2012.
- [3] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก.22301-2556. ระบบการบริหารความต่อเนื่องทางธุรกิจ – ข้อกำหนด. 2556.
- [4] Proxisis Consultant (n.d.). Defining RTO, RPO and MTPOD. [Online], Available: <https://www.proxisisgroup.com/artikel/bagaimana-proses-business-continuity-management-bcm-dalam-perusahaan-saat-menghadapi-kondisi-di-luar-normal>.

- [5] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. แผนวิสาหกิจ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2558-2568. 2558.
- [6] International Standard. ISO22313:2012 Societal security - Business continuity management systems - Guidance. 2012.
- [7] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. คู่มือการบริหารความเสี่ยง ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 8. 2555.
- [8] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. แผนบริหารความเสี่ยง กฟผ. ประจำปี 2558. 2558.
- [9] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. เกณฑ์มาตรฐานการให้บริการพลังงานด้านกิจการไฟฟ้า. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.erc.or.th/ERCWeb2/Upload/Document/เอกสารแนบศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า_หลังประชุมver1_กฟผFinal.pdf.



การจัดการนวัตกรรมในสถาบันอุดมศึกษา กรณีศึกษาศูนย์กลางนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย **Innovation Management in Higher Education A Case Study of Chula Engineering Innovation Hub**

ศรีพิไล ชุตไธสง* นภัสวงศ์ โอสธสิลป์ และณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย

Sripilai Chudthaisong, Napatsawong Osothsilp and Natcha Thawesaengskulthai

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

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

*E-mail: thunder00jib@gmail.com, napassavong.o@chula.ac.th and natcha_t@hotmail.com
Telephone Number: +66863932090 and +66858115075

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ สร้างกรอบการบริหารจัดการนวัตกรรมศูนย์กลางนวัตกรรม (Chula Engineering Innovation Hub) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งก่อตั้งขึ้นมาใหม่เพื่อสนับสนุนและบ่มเพาะนวัตกรรมสำหรับผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในคณะฯ ได้แก่ นิสิต อาจารย์ บุคลากร และศิษย์เก่า โดยผู้วิจัยได้ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัย กรอบ และมาตรฐานการจัดการนวัตกรรม ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษา เพื่อหาคุณลักษณะทางคุณภาพ (Quality Attributes) ในการสร้างข้อคำถามความต้องการผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย จากนั้นได้จำแนกความต้องการตามโมเดลของคาโน (Kano's Model) แล้วแปลงความต้องการมาสู่ความต้องการด้านการออกแบบหรือคุณลักษณะทางเทคนิค (Technical Descriptors) โดยใช้การกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment ; QFD) ซึ่งพบว่าคุณลักษณะทางเทคนิคที่มีความสำคัญสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ 1) มีช่องทางในการประสานงานกับหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน 2) คณะฯ มีกลยุทธ์ในการสนับสนุนการสร้างนวัตกรรม และ 3) มีระบบการสร้างร่วมมือภายในคณะฯ ตามลำดับ จากนั้นได้เข้าสู่การศึกษาแนวคิดให้สอดคล้องกับองค์กร สุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ กรอบการจัดการนวัตกรรม ได้แก่ 1) ขั้นตอนการสร้างแนวคิด กระบวนการ และทักษะในการคิดแบบนวัตกรรม 2) ขั้นตอนปฏิบัติการเพื่อนำไปสู่การสร้างนวัตกรรม และ 3) ขั้นตอนไปสู่เป้าหมาย นั่นก็คือการนำผลงานไปสู่เชิงพาณิชย์และสังคม

ABSTRACT

The purpose of this research is to build an innovation management framework for Chula Engineering Innovation Hub of the faculty of Engineering, Chulalongkorn University. This Hub has an aim to support and incubate innovation for stakeholders in the organization, which include students,

lecturers, staff and alumni. This research first studied literature on factors, frameworks and standard of innovation management used in industries and academic institutions. The purpose of the study is to find out quality attributes for developing questionnaire to receive requirements from the stakeholders. Next these attributes were classified according to Kano's Model. Then, the customer requirements were translated into technical descriptors using Quality Function Deployment (QFD) technique. The most top three important technical descriptors are 1) Collaboration with governmental and private organizations, 2) innovation strategy and 3) system to support collaboration within the faculty. Next, Idea generation which suits the hub was studied. Finally, the innovation management framework for the hub was built. The framework consisting of 3 phases, are 1) phase for generating mindset, process and skill of innovation, 2) Practitioner phase to creation of innovation and 3) Commitment phase to spin-off the developed innovation to commerce and society.

Keywords: Kano's Model, Innovation Management framework, Quality Function Deployment (QFD)

1. บทนำ

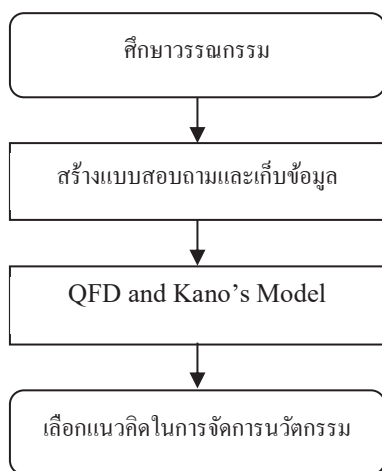
ปัจจุบันนวัตกรรมเป็นสิ่งที่เป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดความแตกต่างในภาคธุรกิจ เกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและยั่งยืนในตลาดที่มีการแข่งขันสูง ดังที่ Gerard H. Gaynor [1] ได้กล่าวไว้ว่า “ทุกองค์กรไม่ได้เป็นแค่เพียงธุรกิจ สิ่งที่ต้องการคือความสามารถในการแข่งขัน” และ Chandrajit Banerjee [2] ที่กล่าว “ในปัจจุบันนวัตกรรมเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนายั่งยืนในตลาดที่มีการแข่งขันสูง” และจากจัดอันดับความสามารถในการแข่งขันของแต่ละประเทศระดับโลก โดย World Economic Forum ปี ค.ศ. 2014-2015 [3] ได้นำปัจจัยย่อยด้านนวัตกรรมมาพิจารณาในการจัดอันดับการแข่งขัน อันได้แก่ ความสามารถทางด้านนวัตกรรม คุณภาพของสถาบันวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ ค่าใช้จ่ายที่ลงทุนในด้านวิจัยและพัฒนาของบริษัท ความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยและภาคอุตสาหกรรมในด้านวิจัยและการจัดการซื้อผลิตภัณฑ์ด้านเทคโนโลยีของรัฐบาล จำนวนนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร และ จำนวนทรัพย์สินทางปัญญา ซึ่งจากปัจจัยย่อยเหล่านี้จะพบว่าสถาบันการศึกษามีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลักดันให้เกิดการสร้างนวัตกรรมขึ้นมา งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างกรอบการจัดการนวัตกรรมในสถาบันอุดมศึกษาโดยมีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นกรณีศึกษา ซึ่งวิสัยทัศน์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยคือ “คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย เป็นสถาบันที่สร้างวิศวกรและนวัตกรรมเพื่อสังคมโลก” จึงได้จัดตั้งโครงการแหล่งรวมนวัตกรรมแห่งคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (Chula Engineering Innovation Hub) ขึ้น มา โดยมีวัตถุประสงค์ในการกระตุ้นและบ่มเพาะให้เกิดนวัตกรรมในองค์กร โดยมีผู้มีส่วนได้ส่วนเสียคือ นิสิต อาจารย์ บุคลากร และศิษย์เก่า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการสร้างกรอบการจัดการนวัตกรรม (Innovation Management Framework) สำหรับสถาบันอุดมศึกษา โดยมี Chula Engineering Innovation Hub (ศูนย์กลางนวัตกรรมแห่งคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) เป็นกรณีศึกษา

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในอันดับแรกนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัย กรอบ และมาตรฐานการจัดการนวัตกรรม ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษา เพื่อหาคุณลักษณะทางคุณภาพในการสร้างข้อคำถามความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย จากนั้นได้จำแนกกลุ่มของความพึงพอใจตาม Kano's Model แล้วจึงประยุกต์ Kano's Model ไปใช้ในส่วนของการความต้องการของลูกค้า (Customer requirements; whats) ใน QFD เพื่อแปลงความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียมาสู่ความต้องการด้านการออกแบบ (Technical Descriptors; Hows) หรือคุณลักษณะทางเทคนิค (Specification) ซึ่ง

คะแนนน้ำหนักความสัมพันธ์จาก Hows ที่มีค่าสูง จะบ่งบอกถึงการเน้นความสำคัญในการจัดการนวัตกรรมในเรื่องนั้น แต่อย่างไรก็ตามคุณลักษณะทางเทคนิคทุกคุณลักษณะควรได้รับการจัดการนวัตกรรมเพื่อให้ได้ผลตามที่คาดหวัง และสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ กรอบการจัดการนวัตกรรมในโครงการ Chula Engineering Innovation Hub โดยการสร้างแนวคิดคุณลักษณะตามความสอดคล้องกับโครงสร้างการจัดการในองค์กร ซึ่งขั้นตอนหลักๆ ในการทำวิจัยแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำวิจัย

2.1 ศึกษาวรรณกรรมการจัดการนวัตกรรม

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัจจัย กรอบ และมาตรฐานการจัดการนวัตกรรม ทั้งในส่วนของภาคอุตสาหกรรมและสถาบันการศึกษา [1], [4-12] เพื่อหาปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยในการจัดการนวัตกรรม โดยการเปรียบเทียบปัจจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวถึงทุกปัจจัย ซึ่งจากการศึกษาพบว่า มีนักวิจัยหรือมาตรฐานที่ได้กล่าวถึงปัจจัยเหล่านั้นที่ซ้ำซ้อนกัน และนั่นสามารถ

ยืนยันได้ว่า ปัจจัยนั้นๆ มีความน่าเชื่อถือที่สามารถนำมาใช้ในการจัดการนวัตกรรมได้จริง และผลการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งได้ทั้งหมดเป็น 6 ปัจจัยหลักดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปัจจัยหลักในการจัดการนวัตกรรม

ปัจจัยหลักของคุณลักษณะทางคุณภาพในการจัดการประกอบด้วย 6 ปัจจัยหลัก และ 37 ปัจจัยย่อย คือ 1. สิ่งแวดล้อมภายนอกองค์กร (การสนับสนุนจากภายนอกองค์กร ความต้องการของสังคมหรือลูกค้า และกฎหมาย สังคม เศรษฐกิจและเทคโนโลยี) 2. สิ่งแวดล้อมภายในองค์กร (โครงสร้างองค์กร ภาวะความเป็นผู้นำของผู้บริหาร ความสามารถขององค์กร ระบบการจัดการภายใน นโยบายการสนับสนุนนวัตกรรม การมีส่วนร่วมของคนในองค์กร จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคประสิทธิภาพการเรียนรู้ของคนในองค์กร และความผูกพันของคนในองค์กร) 3. กลยุทธ์ (วิสัยทัศน์ วัฒนธรรม ค่านิยมและบรรยาการการทำงาน การสร้างทัศนคติและส่งเสริมการสร้างนวัตกรรม มีแนวทางในการสร้างนวัตกรรม และการรับผิดชอบต่อสังคม) 4. ทรัพยากร (เงินทุน ทรัพยากรที่จำเป็นต้องได้ ทรัพยากรบุคคล และความรู้) 5. การจัดการทรัพยากร (การจัดสรรทรัพยากรบุคคล การร่วมมือแบบข้ามสายงาน การสื่อสารและประชาสัมพันธ์ การจัดการความรู้และข่าวสาร การเชื่อมโยงกับหน่วยงาน/องค์กรอื่น การจัดการเวลาที่เหมาะสมในการสร้างนวัตกรรมออกสู่สังคม และการส่งเสริมวัฒนธรรมการคิดค้น) และ

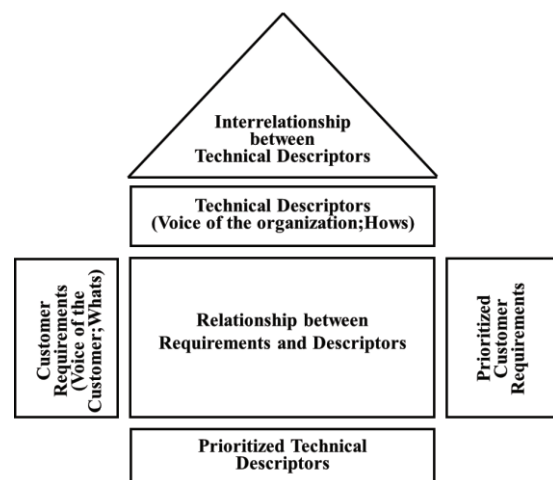
6. กระบวนการจัดการนวัตกรรม (กระบวนการสร้างนวัตกรรม การเล็งเล็งความคิดจากแนวคิดไปสู่การนำนวัตกรรมออกสู่สังคม, การเข้าสู่เชิงพาณิชย์ การจัดการผลงานนวัตกรรม การจัดการทรัพย์สินทางปัญญา การจัดการโครงการ ความก้าวหน้าของโครงการนวัตกรรม การเผยแพร่ นวัตกรรมออกสู่สังคม และการทบทวนและแก้ไขปัญหาในการจัดการนวัตกรรม)

2.2 ศึกษากระบวนการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD)

การกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) เป็นกระบวนการหรือเครื่องมือในการแปลงความต้องการและความคาดหวังของลูกค้าไปสู่ข้อกำหนดทางเทคนิค เพื่อให้ความพึงพอใจสูงขึ้น [13] เป็นการบูรณาการเชื่อมโยงความต้องการของลูกค้า ความต้องการด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ การวางแผนกระบวนการ และข้อกำหนดทางเทคนิคด้านการผลิตเข้าด้วยกันในระหว่างการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ที่ช่วยให้บริษัทสามารถระบุความต้องการของลูกค้าและแปลงความต้องการเหล่านี้ไปสู่ข้อกำหนดทางวิศวกรรม และในที่สุดก็จะได้รายละเอียดในการผลิตสินค้าที่สามารถผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ [14]

กระบวนการออกแบบ QFD ในตอนต้นนั้น ทีมออกแบบต้องระบุความต้องการของลูกค้าโดยพิจารณาเสียงของลูกค้า (Voice of the Customer; VOC) (หรือเรียกอีกอย่างว่า Whats) ซึ่งมาจากการแสดงความคิดเห็นของลูกค้า ไม่ว่าจะเป็นจากการสัมภาษณ์ และ/หรือแบบสอบถาม หลังจากที่มีการบ่งชี้ความต้องการของลูกค้า ได้มีการเปรียบเทียบคู่แข่งในเทอมของความพึงพอใจและความสำคัญโดยลูกค้าเองเพื่อหาเป้าหมายความพึงพอใจที่จะนำความต้องการของลูกค้าไปสู่เป้าหมายนั้นได้ หรือที่เรียกว่า อัตราส่วนการปรับปรุง (Improvement Ratio) ซึ่งได้จาก เป้าหมายต่อด้วยความพึงพอใจในปัจจุบัน และน้ำหนักความสัมพันธ์สุดท้าย (Final Relative Weight) จะได้จากผลคูณระหว่าง Improvement Ratio และความสำคัญ (Importance) ที่ได้จากลูกค้า หรือในบางครั้งอาจจะมีการพิจารณาถึงข้อมูลด้านการขายของบริษัทเพื่อ

สนับสนุนเป้าหมายในการขายของบริษัทนั้นๆ หลังจากนั้นได้กำหนดลักษณะทางเทคนิค (Technical Descriptors) (หรือเรียกอีกอย่างว่า Hows) ซึ่งได้จากการศึกษาวรรณกรรมและความสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมขององค์กร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าและลักษณะทางเทคนิคในเมตริกที่เรียกว่า บ้านแห่งคุณภาพ (House of Quality) ซึ่งส่วนบนจะแสดงความสัมพันธ์ของลักษณะทางเทคนิคในแต่ละหัวข้อ ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 บ้านคุณภาพ (House of Quality)

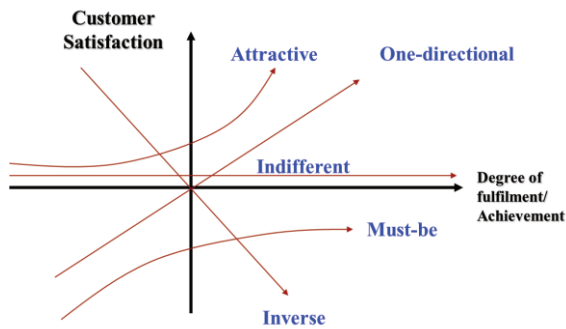
ที่มา : หนังสือ Total Quality Management Revised Edition For Anna University 3 (2012)

2.3 ศึกษากระบวนการแบบจำลองคาโน (Kano's Model)

การออกแบบคุณลักษณะทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการให้เกิดความพึงพอใจนั้น จำเป็นต้องมีวิธีในการระบุความต้องการของผู้ใช้บริการให้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วผู้ใช้บริการมักจะไม่สามารถระบุความต้องการได้ชัดเจน แบบจำลองคาโน (Kano's Model) จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการจัดกลุ่มความต้องการของลูกค้า [15] โดยแบบจำลองคาโน (Kano's Model) นี้ได้ถูกแบ่งประเภทความต้องการออกเป็น 3 ประเภท ตามความสัมพันธ์ระหว่างความพึงพอใจของลูกค้ากับระดับประสิทธิภาพของสินค้าและ

บริการ [14], [16] ได้แก่ คุณภาพที่จำเป็นต้องมี (Must-be attributes) คุณภาพในทิศทางเดียว (One-dimensional attributes) และคุณภาพที่น่าดึงดูด (Attractive attributes)

ต่อมาได้มีการพัฒนาการแบ่งกลุ่มความต้องการออกเป็น 5 ประเภท [17] ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองคาโน (Kano's Model)

ที่มา : Kano et al. (1984)

จากรูปที่ 4 การแบ่งกลุ่มความต้องการออกเป็น 5 ประเภท

- 1) คุณภาพที่จำเป็นต้องมี (Must-be attributes; M) เมื่อไม่ได้ลักษณะทางคุณภาพนี้แล้วจะรู้สึกไม่พอใจ แต่หากขาดไปแม้เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้รู้สึกไม่พอใจเป็นอย่างมาก
- 2) คุณภาพในทิศทางเดียว (One-dimensional attributes; O) เมื่อลักษณะทางคุณภาพเพิ่มสูงขึ้นระดับความพึงพอใจจะเพิ่มสูงขึ้นเป็นสัดส่วน ในทางกลับกันถ้าไม่ได้รับมากเท่าไรจะทำให้รู้สึกไม่พึงพอใจมากเท่านั้น
- 3) คุณภาพที่น่าดึงดูด (Attractive attributes; A) เมื่อได้รับลักษณะทางคุณภาพนี้แล้วจะรู้สึกประทับใจ ในทางกลับกันถ้าไม่มีจะไม่ทำให้รู้สึกไม่พึงพอใจ
- 4) คุณภาพที่มี หรือ ไม่มีก็ได้ (Indifferent attributes; I) ถึงแม้ว่าลักษณะทางคุณภาพนี้จะมีหรือไม่มีก็ตามก็ไม่ได้ทำให้รู้สึกพึงพอใจหรือไม่พึงพอใจแต่อย่างใด

- 5) คุณภาพที่สวนทาง (Inverse or Reverse attributes; R) ถ้าได้รับลักษณะทางคุณภาพนี้แล้วจะทำให้รู้สึกไม่พอใจ ในทางกลับกันหากไม่ได้รับจะรู้สึกพึงพอใจ

2.4 สัมประสิทธิ์ความพึงพอใจของลูกค้า (Customer Satisfaction Coefficient)

Berger และคณะ [17] ได้กล่าวถึงสัมประสิทธิ์ความพึงพอใจของลูกค้า (CS Coefficient) ที่แสดงค่าความพึงพอใจและไม่พึงพอใจเมื่อได้รับหรือไม่ได้รับคุณภาพตามความต้องการ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้า หรือความไม่พึงพอใจของลูกค้า โดยค่า CS สามารถคำนวณค่าดัชนีความพึงพอใจ (Satisfaction Index) ได้จากการรวมผลของค่าเฉลี่ยของประเด็นคุณภาพที่น่าดึงดูด (A) กับประเด็นคุณภาพในทิศทางเดียวกัน (O) ส่วนด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยประเด็นคุณภาพที่น่าดึงดูด (A) คุณภาพในทิศทางเดียวกัน (O) คุณภาพที่จำเป็นต้องมี (M) และคุณภาพที่มีหรือไม่มีก็ได้ (I) ดังสมการที่ 1 ส่วนดัชนีความไม่พึงพอใจ (Dissatisfaction Index) ได้จากการรวมผลของค่าเฉลี่ยของประเด็นคุณภาพที่จำเป็นต้องมี (M) กับประเด็นคุณภาพในทิศทางเดียวกัน (O) ส่วนด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยประเด็นคุณภาพที่น่าดึงดูด (A) คุณภาพในทิศทางเดียวกัน (O) คุณภาพที่จำเป็นต้องมี (M) และคุณภาพที่มีหรือไม่มีก็ได้ (I) ดังสมการที่ 2

$$\text{Satisfaction index (SI)} = \frac{(A + O)}{(A + O + M + I)} \quad (1)$$

$$\text{Dissatisfaction index (DI)} = -\frac{(M + O)}{(A + O + M + I)} \quad (2)$$

โดยเครื่องหมาย (-) แสดงให้เห็นถึงความไม่พึงพอใจขนาดของค่า CS จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่าเข้าใกล้ 1 นั้นหมายความว่า ลักษณะของผลิตภัณฑ์มีผลต่อความไม่พึงพอใจของลูกค้าสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าเข้าใกล้ 0

หมายความว่าลักษณะของผลิตภัณฑ์มีผลต่อความไม่พึงพอใจของลูกค้าต่ำ และสำหรับค่าที่เป็นบวกนั้นยิ่งเข้าใกล้ 1 นั้นหมายความว่าลักษณะของผลิตภัณฑ์มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าสูง ในทางตรงกันข้ามยิ่งเข้าใกล้ 0 นั้นหมายความว่า ลักษณะของผลิตภัณฑ์มีผลต่อความไม่พึงพอใจของลูกค้าต่ำ และค่า 0 นั้นหมายความว่า ไม่มีผลต่อความพึงพอใจหรือไม่ถึงพอใจแต่อย่างใด

2.5 การประยุกต์ Kano's Model ไปใช้ใน QFD

จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายท่านนำ Kano's Model ไปประยุกต์ให้กับ QFD ในปี 1998 Mazler และ Hinterhuber [18] ได้กล่าวถึงประโยชน์ของการนำสัมประสิทธิ์ความพึงพอใจของลูกค้ามาใช้ในกระบวนการของ QFD ว่า ผลิตภัณฑ์ควรจะมาจากความคาดหวังขั้นพื้นฐาน แข่งขันได้โดยความต้องการด้านการประสิทธิภาพ และสร้างความโดดเด่นตามความต้องการที่น่าตื่นเต้น แต่ไม่ได้อธิบายวิธีการในการประยุกต์ Kano's Model ไปใช้ใน QFD

Tan และ Shen [19] ได้เสนอการปรับอัตราส่วนการปรับปรุงที่ปรับแก้แล้ว (Adjustment Improvement Ratio) ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความพึงพอใจของลูกค้า และประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์หรือบริการ ตามรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า คุณภาพที่น่าดึงดูดได้สร้างความพึงพอใจต่อลูกค้าขึ้นเรื่อยๆ ตามประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น มากกว่าคุณภาพในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเพื่อให้บรรลุประสิทธิภาพความพึงพอใจ นักวิจัยจึงได้พิสูจน์สมการจากความสัมพันธ์นี้ จนได้สมการที่ 3

$$IR_{adj} = (IR_0)^{1/k} \quad (3)$$

โดย IR_{adj} คือ อัตราส่วนการปรับปรุงที่ปรับแก้แล้ว (Adjust Improvement Ratio), IR_0 คือ อัตราส่วนการปรับปรุงแบบดั้งเดิม (Traditional Improvement Ratio) และ k คือ ค่าปัจจัยการปรับแก้ (Adjustment

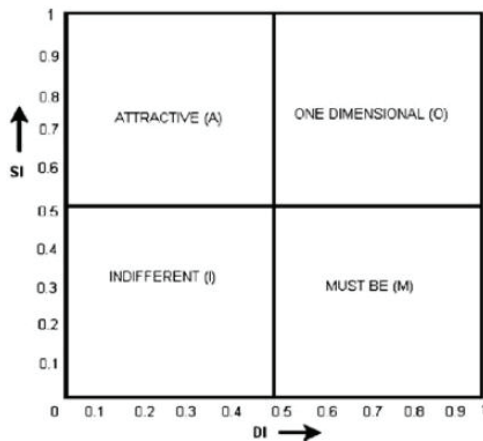
Factor) โดยค่า k จะเปลี่ยนไปตามประเภทความต้องการตาม Kano's Model โดยใช้แบบสอบถามกับลูกค้า โดยค่าน้ำหนักสุดท้ายจะมาจากการคูณระหว่างความสำคัญ (Raw Importance) กับ อัตราส่วนการปรับปรุงปรับแก้ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้กล่าวถึงค่า k โดยกำหนดให้เท่ากับ 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับประเภทของความต้องการพื้นฐาน, คุณภาพในทิศทางเดียวและคุณภาพที่น่าดึงดูดตามลำดับ และยังระบุว่า ไม่ได้บังคับว่าต้องใช้ค่านี้กับประเภทความต้องการของ Kano's Model

Tontini G. [20] ได้ปรับเปลี่ยนแบบสอบถามของ Kano's Model โดยใช้ Likert Scale ในการบ่งชี้ระดับความพึงพอใจหรือไม่พึงพอใจของลูกค้าและปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ CS จากวิธีการของ Berger โดยใช้ระดับความพึงพอใจตามสเกล ผู้วิจัยได้นำเสนอค่าดัชนีผกผัน (Reverse Index; RI) ที่ประกอบด้วยค่า SI และ DI โดยค่าปัจจัยการปรับแก้ได้จากการคำนวณตามสมการ $1 + \max(|SI|, |DI|)$ และค่าความสำคัญสุดท้ายได้จากการคูณระหว่างอัตราส่วนการปรับแก้กับค่าปัจจัยการปรับแก้ของแต่ละความต้องการ ต่อมา Tontini G. [21] ได้นำเสนอการใช้สัมประสิทธิ์ความพึงพอใจของลูกค้า (Customer Satisfaction Coefficient) โดยตรงใน QFD (บ้านหลังที่ 1) ในคอลัมน์ของค่าความสำคัญจะถูกแทนที่ด้วยค่าปัจจัยปรับแก้ ตามสมการที่ 4

$$\text{Adjustment factor} = \max(|SI|, |DI|) \quad (4)$$

โดย SI และ DI คือ ดัชนีความพึงพอใจ และความไม่พึงพอใจ [17] โดยปัจจัยการปรับแก้ที่มีค่าสัมบูรณ์มากกว่าเป็น SI นั้นแสดงว่าเมื่อได้รับความต้องการนั้นจะนำไปสู่ความพึงพอใจของลูกค้า ในทางตรงกันข้ามหากเป็น DI หากได้รับความต้องการนั้นจะนำไปสู่ความไม่พึงพอใจของลูกค้า สำหรับการแยกประเภทของความต้องการนั้น

สามารถทำได้โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่า DI-SI [17], [20], [21] ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจำแนกประเภทตามความต้องการตาม Kano's Model

Chaudha และคณะ [14] ได้นำเสนอฟังก์ชันใหม่ที่ใช้ทั้งผลของพารามิเตอร์ความสำคัญจากทฤษฎีของ Kano ที่สามารถใช้ในฟังก์ชันก็ไปจนถึงการปรับแก้อัตราส่วนการปรับปรุงแบบดั้งเดิม (เป้าหมาย/ระดับความพึงพอใจของลูกค้า) ซึ่งอัตราส่วนการปรับปรุงที่ถูกปรับแก้แล้วจะนำไปคูณกับความสำคัญจากการประเมินโดยตนเอง (Self-Stated Importance) โดยอัตราส่วนการปรับปรุงที่ถูกปรับแก้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$IR_{adj} = (1+m)^k \times IR_0 \quad (5)$$

โดยที่ $m = \max(|SI|, |DI|)$ และ ค่า k คือ ค่าปัจจัยการปรับแก้ในแต่ละประเภทของ Kano ที่แบ่งแยกประเภทได้จากการพล็อตกราฟ DI-SI [20] ค่า k ที่นำมาใช้ ได้แก่ 0, 0.5, 1 และ 1.5 สำหรับคุณภาพที่มีหรือไม่มีก็ได้ คุณภาพที่จำเป็นต้องมี คุณภาพในทิศทางเดียว และ คุณ ภาพ ำ พ ที่ นำดึงดูด ตามลำดับ

2.6 การสร้างแบบสอบถามและเก็บข้อมูล

ก่อนที่จะสร้างแบบสอบถามการประเมินคุณภาพการจัดการนวัตกรรมนั้น ผู้วิจัยได้ปรับแก้คำถามคุณลักษณะทางคุณภาพจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการนวัตกรรมทั้งหมด 37 ปัจจัย เพื่อให้สอดคล้องกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตามที่ประชุมกับคณะกรรมการนวัตกรรม (Innovation Core Team Meeting) ซึ่งประกอบด้วยคณาจารย์ผู้เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรม และเพื่อให้ข้อคำถามนั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยจึงได้ใช้เครื่องมือแบบสอบถามในการหาค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item Objective Congruence; IOC) ประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมทั้งหมด 5 ท่าน ซึ่งข้อคำถามประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป จำนวน 4 ข้อ และตอนที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อการจัดการนวัตกรรมในคณะฯ จำนวน 37 ข้อ ผลที่ได้พบว่า ตอนที่ 1 สามารถนำข้อคำถามไปใช้ได้ทุกข้อ และตอนที่ 2 ข้อคำถามที่สามารถนำไปใช้ได้จำนวน 24 ข้อ ไม่สามารถนำมาใช้ได้ 13 ข้อ ซึ่งข้อคำถามเหล่านั้นเมื่อผ่านการพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรมแล้วพบว่าบางคำถามมีความซ้ำซ้อน และไม่สอดคล้องกับโครงสร้างองค์กรและบริบทขององค์กร

หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างแบบสอบถามประเมินคุณภาพการจัดการนวัตกรรม โดยมีทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป เพื่อทราบสถานะของผู้ตอบแบบสอบถาม แนวโน้มในการเข้าร่วมโครงการฯ และความเข้าใจถึงความหมายของนวัตกรรม ตอนที่ 2 ความคาดหวัง โดยใช้ Likert scale เพื่อใช้ในการวัดความคาดหวังของผู้ตอบแบบสอบถาม และคุณภาพการจัดการนวัตกรรม เพื่อศึกษาความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเมื่อได้รับ (Functional) และไม่ได้รับ (Dysfunctional) การจัดการด้านต่างๆ และตอนที่ 3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

สำหรับขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ได้นำวิธีคิดแบบ Toru Yamane [22] มาใช้ โดยแบ่งประชากรออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผู้มีส่วนได้ส่วน

เสียที่อยู่ในองค์กรอันประกอบด้วยนิสิต อาจารย์ และบุคลากร ในปีการศึกษา 2558 ซึ่งมีจำนวนประชากรที่แน่นอน และกลุ่มที่ 2 คิษย์เก่า ซึ่งไม่สามารถหาจำนวนประชากรที่แน่นอน และยากต่อการเก็บข้อมูล ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดประชากรจากคิษย์เก่าที่เข้าร่วมโครงการ Innovation Hub จำนวน 28 ท่าน ได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงจำนวนประชากร (N) และขนาดตัวอย่าง (n)

ตารางที่ 1 จำนวนประชากรและขนาดตัวอย่าง

ประชากร	N	n
นิสิต	5,209	337
อาจารย์	292	19
บุคลากร	282	19
คิษย์เก่า	28	27

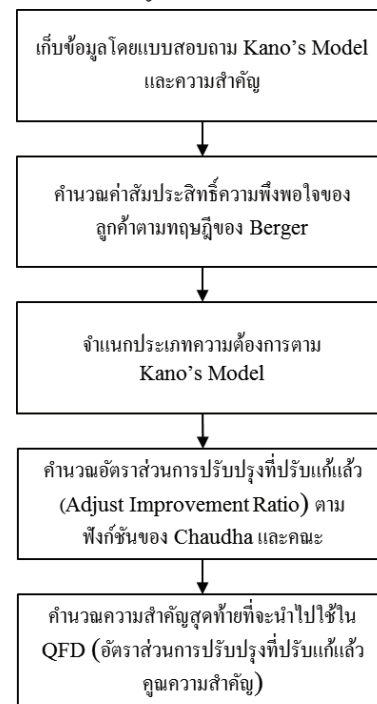
จากตารางที่ 2 พบว่า ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขนาดตัวอย่าง คือนิสิตจำนวน 337 ท่าน คณาจารย์จำนวน 19 ท่าน บุคลากรจำนวน 19 ท่าน และ คิษย์เก่าจำนวน 27 ท่าน

2.7 กรณีศึกษา

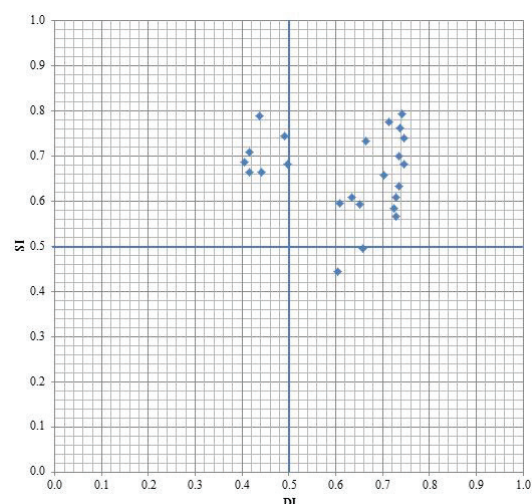
สำหรับกรณีศึกษานี้เป็นการแสดงวิธีการได้มาซึ่งแนวทางในการจัดการนวัตกรรมในโครงการ Innovation Hub ซึ่งเน้นการจัดการที่มีคุณภาพ โดยการจัดการนี้สามารถตอบสนองความต้องการของคนในองค์กร และมีแนวทางที่เชื่อถือได้จากการศึกษามาตรฐาน งานวิจัย และมาตรฐานการจัดการนวัตกรรม โดยประยุกต์ใช้เครื่องมือที่แปลงความต้องการของลูกค้าไปสู่ข้อกำหนดทางเทคนิค นั่นก็คือ QFD ร่วมกับเครื่องมือที่สามารถบ่งชี้ได้ถึงประเด็นคุณภาพที่สร้างความประทับใจให้แก่ลูกค้าในการเข้ามาในโครงการฯ นี้ นั่นก็คือ Kano's Model

ซึ่งขั้นตอนย่อยในการการประยุกต์ Kano's Model ไปใช้ใน QFD สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งหลังจากได้ทำการเก็บข้อมูลจากอาจารย์ นิสิต บุคลากร และคิษย์เก่า ซึ่งค่าเฉลี่ยจากแบบสอบถามในส่วนของความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเมื่อได้รับ (Functional) และไม่ได้รับการจัดการ (Dysfunctional) จะนำไปคำนวณหาค่า

สัมประสิทธิ์ความพึงพอใจของลูกค้า (CS) โดยทฤษฎีของ Berger (ดังแสดงตามตารางที่ 2) เพื่อทำการจำแนกประเภทความต้องการตาม Kano's Model โดยการพล็อตกราฟ DI-SI ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 ขั้นตอนการหาความสำคัญสุดท้ายของประเด็นคุณภาพ



รูปที่ 7 พล็อตกราฟ DI-SI จำแนกประเภทความต้องการตาม Kano's Model

จากนั้นเข้าสู่การคำนวณอัตราส่วนการปรับปรุงที่ปรับแก้แล้ว (Adjust Importance Ratio) ตามสมการของ Chaudha และคณะ ซึ่งจะมการเปรยบเทยบคู่แข่งแต่กรณีศกษานี้การเปรยบเทยบคู่แข่งเป็นไปไดยาก เนองจากกลุ่มตัวอย่างมไม่มประสบกรณ์และความรู้เกยวกับคู่แข่งเพ่อให้เกิดความพมพอใจที่สุงที่สุดผู้วจยจตั้งค่าเป้าหมายตาม Likert Scale ที่สุงที่สุด เท่ากับ 5 และองกรณ์ยงไม่เคยมระบบการจัดการนวัตกรรมมาก่อนจให้ความพมพอใจของกลุ่มตัวอย่างต่ำสุดคือ 1 จงทำให้อัตราส่วนค่า

เป้าหมายเท่ากันทุกข้อ ดังนั้นผู้วจยจได้ตัดเทอมของอัตราส่วนการปรับปรุงแบบคั้งเดิม (IR_0) และสุดท้ายจะไดค่าความสำคัญ (Final Importance) ซึ่งได้จากการนำผลเฉลี่ยจากแบบสอบถามความสำคัญ (Self-stated Importance) ของประเด็นคุณภาพคู่กับความสำคัญที่ถูกปรับแก้ (Adjust Importance) ที่จะนำไปใช้ในส่วบ้านคุณภาพ (HoQ) ต่อไป ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่า SI, DI และประเภทความต้องการตาม Kano's Model

ลำดับ		ประเด็นคุณภาพ	SI	DI	ประเภท
1	ส่เงดล่อม ภายนอกองค์กร	การสนับสนุนจากภายนอกองค์กร	0.6 87	0.4 05	A
2		การสนับสนุนการสร้างนวัตกรรมตามความต้องการของสังคม/ลูกค้า	0.7 64	0.7 36	O
3	ส่เงดล่อม ภายในองค์กร	ภาวะความเป็นผู้นำของผู้บริหารด้านการจัดการนวัตกรรม	0.6 09	0.6 34	O
4		ความสามารถในด้านการตลาด นวัตกรรม เทคโนโลยี และการแข่งขัน	0.5 97	0.6 07	O
5		นโยบายในการสนับสนุนการสร้างนวัตกรรมของคณะฯ	0.6 09	0.7 26	O
6		การมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการสร้างนวัตกรรม	0.4 45	0.6 04	M
7	กลยุทธ์	ความชัดเจนของวิสัยทัศน์ กลยุทธ์ และเป้าหมาย	0.7 01	0.7 34	O
8		การสนับสนุนการสร้างนวัตกรรมโดยการสร้างวัฒนธรรม ค่านิยม และบรรยากาศ	0.7 41	0.7 44	O
9		ความชัดเจนของแนวทางในการสร้างสรรค์นวัตกรรม	0.5 85	0.7 24	O

ลำดับ		ประเด็นคุณภาพ	SI	DI	ประเภท
10	ทรัพยากร	เงินทุนในการสนับสนุนการสร้างวัดกรรม	0.7 09	0.4 15	A
11		ทรัพยากรที่จำเป็นต้องใช้ในการสนับสนุน	0.7 91	0.4 35	A
12		การจัดสรรบุคลากรในการดูแลรับผิดชอบในแต่ละโครงการวัดกรรม	0.5 92	0.6 49	O
13		องค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการสร้างวัดกรรม	0.6 67	0.4 40	A
14	การจัดการ ทรัพยากร	ความพร้อมของการจัดสรรทรัพยากรบุคคล	0.5 67	0.7 26	O
15		การร่วมมือกันแบบข้ามสายงานและทีมงานที่มีความหลากหลาย	0.6 67	0.4 15	A
16		การสื่อสารและประชาสัมพันธ์นโยบายที่ทั่วถึง	0.7 34	0.6 64	O
17		การจัดการความรู้และข้อมูลข่าวสารที่เกี่ยวข้องกับการสร้างวัดกรรม	0.6 34	0.7 34	O
18		การจัดการระบบเชื่อมโยงกับหน่วยงานที่เป็นเครือข่าย	0.6 84	0.4 95	A
19	กระบวนการ จัดการวัดกรรม	การนำเสียงความคิดเห็นจากคณาจารย์วัดกรรมจนไปสู่การนำออกสู่สังคมที่เป็นแบบแผน	0.7 76	0.7 14	O
20		แนวทางในการการเข้าสู่เชิงพาณิชย์	0.7 44	0.4 90	A
21		การจัดการด้านทรัพย์สินทางปัญญาที่ถูกต้อง	0.7 94	0.7 41	O
22		โครงการวัดกรรมแต่ละโครงการมีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง	0.6 59	0.7 01	O

ลำดับ		ประเด็นคุณภาพ	SI	DI	ประเภท
23		การเผยแพร่ข่าวสารออกสู่สังคม	0.6 84	0.7 44	O
24		การทบทวนปัญหาเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาในการจัดการนวัตกรรมต่อไป	0.4 98	0.6 57	M

ตารางที่ 3 ค่า Final Importance ของความต้องการ โดยให้ CR01, 02, 03... คือ Customer Requirement ลำดับที่ 1, 2, 3... ในตารางที่ 2 ตามลำดับ

ประเด็นคุณภาพ	ประเภท	Self-stated Importance	m	k	Adjusted Importance	Final Importance
CR01	A	4.63	0.687	2.000	2.84	13.18
CR02	O	4.13	0.764	1.000	1.76	7.29
CR03	O	4.06	0.634	1.000	1.63	6.64
CR04	O	4.27	0.607	1.000	1.61	6.86
CR05	O	4.70	0.726	1.000	1.73	8.12

ตารางที่ 3 (ต่อ) ค่า Final Importance ของความต้องการ โดยให้ CR01,02,03... คือ Customer Requirement ลำดับที่ 1,2,3... ในตารางที่ 2 ตามลำดับ

ประเด็นคุณภาพ	ประเภท	Self-stated Importance	m	k	Adjusted Importance	Final Importance
CR06	E	3.59	0.604	0.500	1.27	4.55
CR07	O	4.03	0.734	1.000	1.73	6.98
CR08	O	4.62	0.744	1.000	1.74	8.05
CR09	O	3.34	0.724	1.000	1.72	5.76
CR10	A	4.81	0.709	2.000	2.92	14.03
CR11	A	4.71	0.791	2.000	3.21	15.10
CR12	O	3.71	0.649	1.000	1.65	6.12
CR13	A	4.31	0.667	2.000	2.78	11.98
CR14	O	4.19	0.726	1.000	1.73	7.24
CR15	A	4.25	0.667	2.000	2.78	11.81
CR16	O	4.69	0.734	1.000	1.73	8.13
CR17	O	4.01	0.734	1.000	1.73	6.96
CR18	A	4.62	0.684	2.000	2.84	13.10
CR19	O	4.10	0.776	1.000	1.78	7.29
CR20	A	4.16	0.744	2.000	3.04	12.65
CR21	O	4.58	0.794	1.000	1.79	8.22
CR22	O	3.94	0.701	1.000	1.70	6.71
CR23	O	4.54	0.744	1.000	1.74	7.91
CR24	E	3.71	0.657	0.500	1.29	4.78

เมื่อได้ค่า Final Importance แล้วลำดับต่อไปคือ การใช้เครื่องมือ QFD เพื่อแปลงความต้องการของลูกค้า

(VoCs) ไปสู่ลักษณะทางเทคนิค (Hows) ตามรูปที่ 3 ซึ่งในที่นี้ก็คือ ลักษณะทางเทคนิคในการจัดการนวัตกรรม ซึ่ง

หัวข้อที่ได้นั้นได้จากการนำการเสนอวรรณกรรมที่ได้ศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมขององค์กรต่อการประชุมคณะผู้บริหารที่มีความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับนวัตกรรม สามารถจำแนกประเด็นลักษณะทางเทคนิคได้ 4 ประเภท คือ ด้านทรัพยากรบุคคล, แนวคิดและผลงาน, สิ่งแวดล้อม และเงินทุน โดยในแต่ละประเภทนี้ได้จำแนกลักษณะทางเทคนิค ได้ดังตารางที่ 4

จากนั้นได้สร้างบ้านคุณภาพ (HoQ) ในเฟสของการวางแผน (สัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ใน HoQ ตามรูปที่ 8) อันประกอบด้วยหลังคาบ้าน ดังแสดงตามรูปที่ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประเด็นลักษณะทางเทคนิค และทิศทางการจัดการนวัตกรรม โดยพิจารณาจากสภาพปัจจุบันขององค์กร ยกตัวอย่างเช่น ประเด็น TD01 มีระบบการสร้างความร่วมมือภายในคณะฯ หากพิจารณาสภาพปัจจุบันของคณะฯ แล้วมีการร่วมมือกันระหว่างหน่วยงานในคณะฯ แต่ยังไม่เป็นรูปธรรม ดังนั้นทิศทางการพัฒนาจึงเป็นไปในทางที่เพิ่มขึ้นไปสู่เป้าหมาย (Objective is To Maximize)

และในส่วนของตัวบ้านคุณภาพนั้น ส่วนบนจะเป็นลักษณะทางเทคนิค (Hows) ด้านซ้ายคือเสียงจากลูกค้าประกอบไปด้วย (Whats) ซึ่งในส่วนนี้จะนำผล Final Importance ที่ได้จาก Kano's Model มาใช้ โดยผลลัพธ์ที่ได้ นั่นก็คือผลรวมในรูปที่ 10 เกิดจากการผลรวมของ Final Importance คูณกับความสัมพันธ์ระหว่าง Whats และ Hows ในแนวนอน ผลที่ได้นั้นแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของประเด็นคุณภาพที่สามารถตอบสนองได้ โดยลักษณะทางเทคนิคนั้นๆ

Legend		
	Strong relationship	9
	Moderate relationship	3
	Weak relationship	1
	Strong Positive Correlation	++
	Positive Correlation	+
	Negative Correlation	-
	Strong Negative Correlation	--
	Objective Is To Minimize	-
	Objective Is To Maximize	+
	Objective Is To Hit Target	0

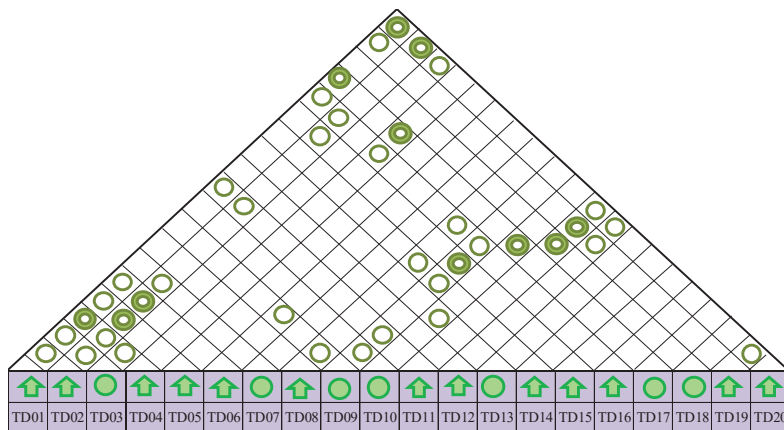
รูปที่ 8 สัญลักษณ์ที่ใช้ใน HoQ

ในส่วนของ Absolute Weight ตามรูปที่ 10 นั้นเกิดจากผลรวมของ Final Importance คูณกับความสัมพัทธ์ระหว่าง Whats และ Hows ในแนวตั้ง และเพื่อความสะดวกผู้วิจัยได้แปลงให้เป็นจำนวนร้อยละ (% Relative Weight) ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า ซึ่งในการวางแผนการจัดการนวัตกรรมจะพิจารณาในส่วนนี้เป็นหลัก โดยจากการประชุมได้กำหนดให้ร้อยละ Relative Weight ของลักษณะทางเทคนิคที่มีค่ามากกว่าร้อยละ 5 ถือว่าเป็นลักษณะทางเทคนิคที่ต้องมุ่งประเด็นสำคัญ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังไม่ละทิ้งลักษณะทางเทคนิคอื่นๆ ซึ่งลักษณะทางเทคนิคที่มีค่ามากกว่า 5 ได้แก่ TD01 TD02 TD05 TD11 TD15 TD16 TD18 TD19 และ TD 2

ตารางที่ 4 การบ่งชี้ลักษณะทางเทคนิคตามประเภทที่แบ่งตามโครงสร้างการบริหารขององค์กร โดยให้ TD01, 02, 03... คือ Technical Descriptors ลำดับที่ 1, 2, 3... ตามลำดับ

ประเภท	ลำดับ	ลักษณะทางเทคนิค	ประเภท	ลำดับ	ลักษณะทางเทคนิค
ทรัพยากรบุคคล	TD01	มีระบบการสร้างความร่วมมือภายในคณะฯ	แนวคิดและผลงาน (ต่อ)	TD11	มีระบบเผยแพร่ผลงานออกสู่สังคม
	TD02	มีช่องทางการประสานงานทั้งภาครัฐและเอกชน		TD12	มีการสร้างแรงจูงใจในการสร้างนวัตกรรม
	TD03	มีเจ้าหน้าที่ติดต่ออำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน		TD13	มีแนวทางในการปรับปรุงการจัดการนวัตกรรม

	TD04	มีแนวทางการจัดสรรทรัพยากรบุคคล		TD14	มีพื้นที่ในการพบปะ สร้างสรรค์ผลงาน
แนวคิด และผลงาน	TD05	มีช่องทางการผลิตรองรับ	สิ่งแวดล้อม	TD15	มีเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสร้าง Prototype
	TD06	มีช่องทางการค้า		TD16	มีระบบการจัดการความรู้
	TD07	มีแนวทางในการจัดการทรัพยากรสิ่งต่าง ๆ		TD17	มีระบบที่ปรึกษาประจำโครงการ
	TD08	มีระบบสนับสนุนการคิดค้นนวัตกรรม		TD18	กลยุทธ์สนับสนุนการสร้างนวัตกรรม
	TD09	มีกระบวนการสร้างนวัตกรรมให้เกิดขึ้นจริง		TD19	มีช่องทางการประชาสัมพันธ์ภายในองค์กร
	TD10	มีการติดตามความก้าวหน้าโครงการนวัตกรรม	เงินทุน	TD20	มีแหล่งเงินทุนในการสนับสนุน



รูปที่ 9 HoQ ในส่วนของความสัมพันธ์ของลักษณะทางเทคนิคในแต่ละประเด็น และทิศทางการจัดการนวัตกรรม

Hows Whats		Final Important	ทรัพย์สินทางปัญญา				แนวคิดและผลงาน										สิ่งแวดล้อม					เงินทุน	รวม
			TD01	TD02	TD03	TD04	TD05	TD06	TD07	TD08	TD09	TD10	TD11	TD12	TD13	TD14	TD15	TD16	TD17	TD18	TD19	TD20	
สิ่งแวดล้อม	CR01	13.18	0	▲	●	0	▲	0	0	0	0	0	●	0	●	0	●	●	0	0	0	●	395.27
	CR02	7.29	●	●	0	0	●	0	0	0	▲	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	116.64
สภาพแวดล้อม ภายในองค์กร	CR03	6.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	0	0	59.74
	CR04	6.86	▲	●	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	109.84
	CR05	8.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	0	▲	0	0	97.39
	CR06	4.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	0	▲	0	0	54.60
กลยุทธ์	CR07	6.98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	0	▲	0	0	69.82
	CR08	8.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	0	0	0	●	0	▲	●	0	177.08
	CR09	5.76	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	●	●	▲	0	0	0	0	●	0	0	121.06
ทรัพยากร	CR10	14.03	●	●	0	0	●	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	224.55
	CR11	15.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	▲	0	0	0	0	0	271.77
	CR12	6.12	●	0	●	▲	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110.12
	CR13	11.98	●	●	●	0	0	0	0	●	0	0	0	0	0	0	0	▲	●	0	0	0	239.56
การจัดการ ทรัพยากร	CR14	7.24	●	0	●	▲	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	130.26
	CR15	11.81	▲	●	0	●	0	0	●	0	0	0	0	0	0	0	0	●	●	0	0	0	283.38
	CR16	8.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	●	0	0	▲	0	121.92
	CR17	6.96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	▲	0	0	▲	0	132.21
	CR18	13.10	0	▲	0	0	●	●	0	0	0	0	●	0	0	0	●	0	0	0	0	●	261.98
กระบวนการ จัดการนวัตกรรม	CR19	7.29	0	0	0	0	●	●	0	●	▲	0	0	0	0	0	0	●	0	0	0	0	123.92
	CR20	12.65	0	●	0	0	0	▲	0	0	0	0	▲	0	0	0	0	0	0	0	0	●	278.29
	CR21	8.22	0	0	0	0	0	0	▲	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73.95
	CR22	6.71	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60.36
	CR23	7.91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	0	0	0	0	0	0	0	●	0	94.92
	CR24	4.78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	▲	0	0	0	0	0	0	0	43.00
Absolute weight			308.02	391.81	91.57	155.61	201.07	160.43	126.67	78.40	131.21	78.71	252.99	141.68	108.06	135.88	188.51	280.19	93.07	326.30	183.66	217.78	3651.62
Relative weight (%)			8.44	10.73	2.51	4.26	5.51	4.39	3.47	2.15	3.59	2.16	6.93	3.88	2.96	3.72	5.16	7.67	2.55	8.94	5.03	5.96	100.00

รูปที่ 10 HoQ ในส่วนของตัวบ้านคุณภาพ

2.8 การเลือกแนวคิดในการจัดการนวัตกรรม

ในการเลือกแนวคิดนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลจาก QFD เข้าการประชุมคณะผู้บริหารที่เชี่ยวชาญด้านนวัตกรรม โดยได้พิจารณาถึงความสอดคล้องระหว่างคุณลักษณะทางเทคนิคกับทรัพยากรและช่องทางในการสนับสนุนที่คณะฯ มีอยู่ โดยเน้นความสำคัญที่ลักษณะทางเทคนิคที่มีค่าร้อยละ Relative Weight มากกว่า 5 ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งทรัพยากรและช่องทางสนับสนุนการจัดการนวัตกรรม จะแสดงในรูปที่ 11

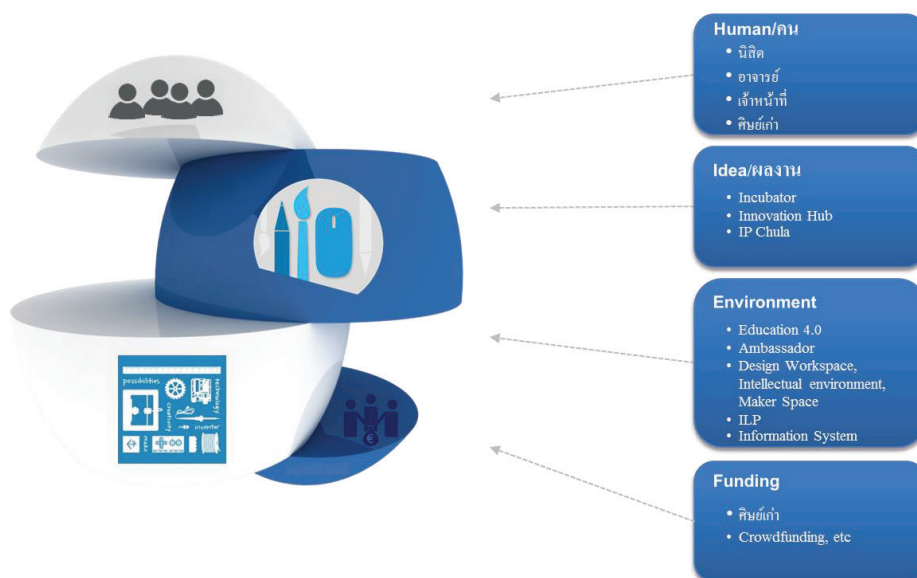
จากรูปที่ 11 จะแบ่งออกทรัพยากรและช่องทางสนับสนุนตามประเภทของคุณลักษณะทางเทคนิคได้ 4 ด้าน

อันได้แก่ 1. ทรัพยากรบุคคลประกอบไปด้วย นิสิต อาจารย์ บุคลากร และศิษย์เก่า 2. แนวคิดและผลงาน ประกอบด้วย 3 หน่วยงานที่สำคัญที่ทำให้เกิดแนวคิดและผลงาน นวัตกรรมขึ้นมา ได้แก่ ศูนย์บ่มเพาะงานวิจัย (Incubator) ซึ่งมีหน้าที่ในการบ่มเพาะให้เกิดการสร้างนวัตกรรมใน คณะฯ ประสานงานกับหน่วยงานอื่นเพื่อให้เกิดการ ขับเคลื่อนนวัตกรรม และออกไปสู่สังคมและพาณิชย์, Innovation Hub ที่ทำหน้าที่ในการกระตุ้นให้เกิดการ สร้างนวัตกรรมในองค์กร โดยเน้นการสร้างนวัตกรรมและ ธุรกิจโดยไม่หวังผลตอบแทน หน่วยงานทรัพย์สินทาง ปัญหาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (IP Chula) ทำหน้าที่

ให้คำแนะนำ และเป็นที่ปรึกษาด้านทรัพย์สินทางปัญญา 3. สิ่งแวดล้อม ประกอบไปด้วย 3 หน่วยงานอันได้แก่ Education 4.0 ทำหน้าที่ในการพัฒนาหลักสูตรการเรียนการสอน ส่งเสริมทักษะแก่นักคิดให้คิดเป็นทำเป็น และเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรมและภายนอกองค์กร Ambassador ทำหน้าที่ในการส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพของนักคิดให้มีความรู้ความสามารถในด้านต่างๆ เป็นตัวแทนที่เป็นแบบอย่างที่ดีต่อนักคิดรุ่นต่อไป และส่งเสริมการสร้างพันธมิตรกับองค์กรต่างๆ สถานที่ (Design Workspace, Intellectual Environment, Maker Space หรือ i-Maker) ทำหน้าที่ให้สร้าง

บรรยากาศให้เหมาะแก่การทำงาน โดยให้พื้นที่การทำงาน ไม่ว่าจะเป็นห้องปฏิบัติการ ห้องประชุม และสถานที่ทำงาน ILP (Industrial Liaison Program) ทำหน้าที่สนับสนุนการวิจัยและพัฒนาในภาคอุตสาหกรรม การพัฒนานักคิดให้เป็นวิศวกรที่มีคุณภาพ และสามารถช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของบุคลากร อาจารย์ และนักคิดของคณะฯ รวมทั้งของบริษัทที่เป็นสมาชิก,

Information System ทำหน้าที่ในการสรรหาผู้เชี่ยวชาญในการให้ข้อมูล และคำปรึกษา 4. เงินทุน (Funding) ได้แก่ กองทุนศิษย์เก่าเพื่อพัฒนาคณะฯ และ Crowdfunding



รูปที่ 11 ทรัพยากรและช่องทางสนับสนุนการจัดการนวัตกรรม

ตารางที่ 6 การเชื่อมโยงแนวทางที่สอดคล้องกับทรัพยากรและช่องทางสนับสนุนในคณะฯ

ประเภท	ลักษณะทางเทคนิค	%Relative Weight	แนวทางที่สอดคล้องกับสภาพปัจจุบัน	ทรัพยากรและช่องทางสนับสนุน
ทรัพยากรบุคคล	TD01	8.44	โครงสร้างองค์กรแบบเมตริก มีการสร้างความร่วมมือระหว่างหน่วยงานสนับสนุนภายในคณะฯ ที่มีความเชี่ยวชาญต่างกัน	Chula Engineering Ambassador, Education 4.0, กิจกรรมค่าย, Incubator, Innovation Hub, ILP
	TD02	10.73	สร้างความร่วมมือกับหน่วยงานภายนอก	ILP และศิษย์เก่า
	TD03	2.51	เจ้าหน้าที่ที่มีความสามารถในการติดต่อประสานงาน	Innovation Hub
	TD04	4.26	จัดสรรทรัพยากรบุคคลให้เพียงพอ กำหนดหน้าที่ชัดเจน	Innovation Hub
แนวคิดและผลงาน	TD05	5.51	สร้างเครือข่ายเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรมที่เป็นเครือข่ายของคณะฯ	Incubator, ILP และศิษย์เก่า

ประเภท	ลักษณะทางเทคนิค	%Relative Weight	แนวทางที่สอดคล้องกับสภาพปัจจุบัน	ทรัพยากรและช่องทางสนับสนุน
	TD06	4.39	สร้างเครือข่ายเชื่อมโยงกับภาคอุตสาหกรรมที่เป็นเครือข่ายของคณะฯ	Incubator, ILP และศิษย์เก่า
	TD07	3.47	สร้างความร่วมมือกับหน่วยงานด้านทรัพย์สินทางปัญญา	IP Chula
	TD08	2.15	สร้างทักษะการคิดในเชิงนวัตกรรม (Innovative Mindset) คิดเป็น ทำเป็นและจัดทำ Road Map ด้านนวัตกรรม	Education 4.0 (Internship, Senior Project, Applied Lab, Content Innovation, CDIO, Evaluation) และ Innovation Hub
	TD09	3.59	สร้างนวัตกรรมตามกระบวนการสร้างนวัตกรรม โดยคำนึงถึงความต้องการของสังคม และกลุ่มลูกค้า	Innovation Hub และ Information System
	TD10	2.16	รายงานความก้าวหน้าของโครงการนวัตกรรม	Innovation Hub
	TD11	6.93	จัดนิทรรศการเพื่อเผยแพร่ผลงาน	Innovation Hub, Education 4.0
	TD12	3.88	รางวัลนวัตกรรมยอดเยี่ยม	Innovation Hub
	TD13	2.96	ทบทวนปัญหา และแก้ไข	Innovation Hub
สิ่งแวดล้อม	TD14	3.72	มีพื้นที่อำนวยความสะดวกสำหรับประชุม ทำงาน สร้างผลงาน และจัดนิทรรศการ	Design Workspace, Intellectual environment และ i – Maker
	TD15	5.16	เครื่องมือและห้องปฏิบัติการในการสร้างสรรค์ผลงาน	Design Workspace, Intellectual environment และ i – Maker
	TD16	7.67	Workshop, ฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์	Innovation Hub และ Information System
	TD17	2.55	สรรหาผู้เชี่ยวชาญในแต่ละสาขา	Innovation Hub และ Information System
	TD18	8.94	"เน้นการสร้างนวัตกรรมและธุรกิจให้แก่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ภายใต้ชื่อวิศวะ จุฬาฯ โดยไม่หวังผลตอบแทน"	"คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นสถาบันที่สร้างวิศวกรและนวัตกรรมเพื่อสังคมโลก"
	TD19	5.03	มีการประชาสัมพันธ์ภายในองค์กร ผ่านทาง Facebook, เว็บไซต์คณะ, ป้ายประชาสัมพันธ์ และนิทรรศการ	Innovation Hub
เงินทุน	TD20	5.96	ตั้งกองทุนนวัตกรรม, ร่วมทุนกับภายนอก	ศิษย์เก่า, Crowdfunding และอื่นๆ

3. ผลการวิจัย

จากการเชื่อมโยงแนวทางที่สอดคล้องกับทรัพยากรและช่องทางสนับสนุนในคณะฯ ตามตารางที่ 6 สามารถสรุปแนวทางการจัดการนวัตกรรมได้โดยการจัดการตามระดับชั้น ตามรูปที่ 12 ซึ่งจากรูปจะมีการจัดการเป็นลำดับขั้นจากพื้นฐานไปสู่เป้าหมายซึ่งในที่นี้ก็คือ “การสร้างนวัตกรรมและธุรกิจให้แก่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ภายใต้ชื่อวิศวะ จุฬาฯ โดยไม่หวังผลตอบแทน” ตามลักษณะโครงสร้างการจัดการในคณะฯ โดยมีระบบสนับสนุนด้านซ้ายมือและด้านขวาคือผลลัพธ์ที่ได้จากการสนับสนุนในแต่ละขั้น โดยพื้นฐานแรกในการจัดการคือ การสร้างแนวคิด กระบวนการ และทักษะในการคิดแบบนวัตกรรม

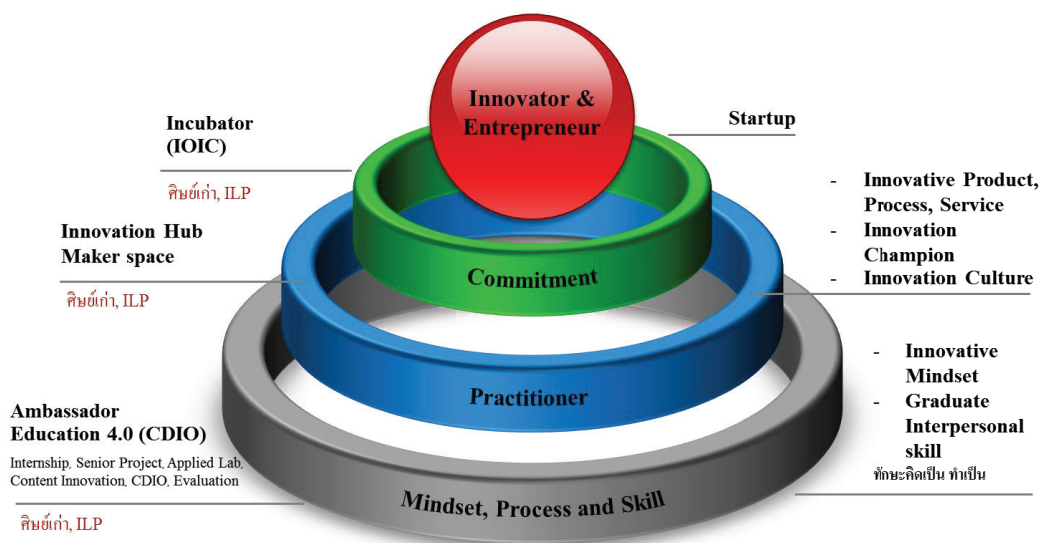
(Mindset, Process และ Skill) มีหน่วยงานที่ทำหน้าที่

ในการสนับสนุนในส่วนนี้ได้แก่ Education 4.0 Ambassador ศิษย์เก่าและ ILP โดยจะส่งเสริมในด้านการสร้างทักษะจากการฝึกงาน งานวิจัย หัวข้อนวัตกรรมจากภาคอุตสาหกรรมและแก้ปัญหาสังคม การเรียนการสอนแบบ CDIO ที่เน้นการคิดวิเคราะห์ ระบุปัญหา ออกแบบ และหาแนวทางแก้ปัญหา ดำเนินการประยุกต์แก้ไขปัญหา และพัฒนาและควบคุม และสุดท้ายคือการประเมินผลด้านการเรียนของนิสิต

ขั้นที่ 2 คือขั้นตอนการปฏิบัติการ (Practitioner) มีหน่วยงานสนับสนุนได้แก่ Innovation Hub Maker

Space ศิษย์เก่าและ *ILP* โดยจะสนับสนุนให้เกิดนวัตกรรมกรรมไม่ว่าจะเป็นด้านผลิตภัณฑ์ (Product) กระบวนการ (Process) บริการ (Service) และอื่นๆ ผู้มีบทบาทด้านการจัดการด้านวัฒนธรรม (Innovation Champion) และการสร้างนวัตกรรม (Innovation Culture)

ขั้นที่ 3 คือขั้นตอนไปสู่เป้าหมาย (Commitment) มีหน่วยงานสนับสนุน ได้แก่ ศูนย์บ่มเพาะงานวิจัย (Incubator) ซึ่งจะมีการจัดตั้งสมาคมการลงทุน (Intania Open Innovation Club ; IOIC) ศิษย์เก่าและ ILP โดยจะสนับสนุนให้เกิดการนำผลงานด้านนวัตกรรมไปสู่เชิงพาณิชย์และสังคม



รูปที่ 12 ภาพรวมการจัดการนวัตกรรมในคณะฯ

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้มีจุดมุ่งหมายในการวางแผนการจัดการนวัตกรรม โดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือ Kano's Model และ QFD โดย Kano's Model นี้เป็นเครื่องมือที่ช่วยแบ่งประเภทความสำคัญของความต้องการ ทำให้ทราบว่าความต้องการนั้นมีผลต่อความพึงพอใจอย่างไร ซึ่งจะช่วยเสริมให้เครื่องมือ QFD มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยความสำคัญสุดท้าย (Final Importance) ที่ได้จากวิธีการของ Kano's Model จะนำไปใช้ในส่วน VoCs ของเครื่องมือ QFD เพื่อแปลงความต้องการไปสู่ลักษณะทางเทคนิค และสุดท้ายจะได้คะแนนร้อยละ Relative Weight ซึ่งบ่งบอกถึงความสำคัญของลักษณะทางเทคนิค

ที่ส่งผลต่อความต้องการของลูกค้า อันจะนำไปสู่การสร้าง ความพึงพอใจแก่ลูกค้าสูงสุดได้

และจากผลการวิจัยสรุปได้ว่า ลักษณะด้านเทคนิคที่ควรมุ่งประเด็นสำคัญโดยเรียงลำดับตามร้อยละ Relative Weight จากมากไปน้อย ได้แก่ 1. สร้างช่องทางการประสานงานทั้งภาครัฐและเอกชน โดยเครือข่ายองค์กร 2. กลยุทธ์สนับสนุนการสร้างนวัตกรรม นำโดยการกำหนดวิสัยทัศน์ที่ชัดเจน 3. มีระบบการสร้างความร่วมมือภายในคณะฯ โดยโครงสร้างองค์กรแบบเมตริก มีการเชื่อมโยงหน่วยงานสนับสนุนภายในคณะฯ 4. มีระบบการจัดการความรู้ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ขึ้นอย่างยั่งยืนโดยการจัดการอบรมเชิงปฏิบัติการ และบริการฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการสร้างนวัตกรรม 5. มีระบบเผยแพร่

ผลงานออกสู่สังคมเพื่อให้สังคมได้นำไปใช้ประโยชน์หรือพัฒนาต่อไป โดยการจัดนิทรรศการเพื่อเผยแพร่ผลงาน 6. มีแหล่งเงินทุนในการสนับสนุน ผ่านการระดมทุนไม่ว่าจะเป็นภายในองค์กร (IOIC) หรือ Crowdfunding จากประชาชนทั่วไป หรือสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน 7. มีช่องทางการผลิตรองรับ โดยเครือข่ายองค์กร 8. มีเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสร้าง Prototype โดยมีการสนับสนุนพื้นที่ให้บริการด้านเครื่องมืออุปกรณ์ และ 9. มีช่องทางการประชาสัมพันธ์ภายในองค์กร เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงเป้าหมายและตระหนักถึงความสำคัญของการสร้างนวัตกรรม โดยการประชาสัมพันธ์ภายในองค์กร ผ่าน Facebook ป้ายประชาสัมพันธ์ และนิทรรศการ

ข้อจำกัดของที่สำคัญของงานวิจัยนี้ คือ แนวทางการจัดการนวัตกรรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหน่วยงานการศึกษาระดับอุดมศึกษาและอื่นๆ หรือหน่วยงานที่ไม่หวังผลกำไร โดยวิธีการจัดการขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดการขององค์กร สำหรับหน่วยงานภาครัฐกิจ หรืออุตสาหกรรม สามารถนำประเด็นคุณภาพและวิธีการไปใช้ในการออกแบบแนวการจัดการนวัตกรรม และเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ควรมีการเปรียบเทียบกับคู่แข่งจากข้อมูลด้านการตลาดด้วย

สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจจะมีการนำเครื่องมืออื่นๆ มาประยุกต์ใช้กับ QFD ให้เหมาะสมตามจุดประสงค์ของงานวิจัย และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบอื่นๆ ได้ และการบ่งชี้ประเด็นความต้องการและลักษณะทางเทคนิคก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมขององค์กรนั้นๆ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าการออกแบบการจัดการนวัตกรรม โดยการประยุกต์ใช้ Kano's Model กับ QFD จะเป็นตัวเลือกหนึ่งในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในอนาคตได้ไม่มากนัก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารด้านนวัตกรรมของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ให้ข้อมูลในวาระการประชุมเพื่อร่วมกันหาแนวทางในการจัดการนวัตกรรมในคณะฯ นำโดยโครงการศูนย์กลางนวัตกรรม (Chula Engineering Innovation Hub) ตลอดจนบุคลากรในโครงการฯ ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลคณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gaynor, G. H. The innovation dilemma. *Engineering Management Review*, 2012; 40.
- [2] Dutta, S., Lanvin, B., and Wunsch-Vincent, S. The Global Innovation Index 2014. Cornell University, INSEAD, and the World Intellectual Property Organization (WIPO), 2014.
- [3] Schwab, K. and Sala-i-Martin, X. The Global Competitiveness Report 2014–2015. 2014.
- [4] Pakdeelao, W. The Study of Characteristics of Innovative Organization: Case Studies from Awarded Organizations. Master of Science (Human Resource and Organization Development), National Institute of Development Administration (NIDA), 2011.
- [5] Karave, C. and Chandrachai, E. A. (2013). Factors Affecting the Innovation Capacity of Thai Textile and Clothing Industries in Thailand. *International Journal of Research in Management & Technology*, 2013; 3(1).
- [6] Jaruzelski, B., Staack, V., and Brad, G. The 2014 Global Innovation 1000: Proven paths to innovation success. Strategy&Formerly Booz&Company, PWG, 2014.
- [7] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. ระบบบริหารจัดการนวัตกรรมทั้งองค์กร. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.nia.or.th/nia/culture/total-innovation-management/>

- [8] Aujirapongpan, S. A Model of Autonomous University Innovation Management. *Songklanakarin Journal of Social Sciences & Humanities*, 2011; 12.
- [9] Karaveg, C., Thawesaengskultha, N. and Chandrachai A. Evaluation model for research and development commercialization capability. *Production & Manufacturing Research*, 2014; 2: 586-602.
- [10] BSI. BS 7000-1:2008 Design management systems – Part 1: Guide to managing innovation. ed. 3rd, 2008.
- [11] Niche Business Excellence Standard for Innovation. ed. 1: Business Excellence Niche Standards, Spring Singapore, 8.
- [12] Wang, C.H., Lu, I.Y., and Chen, C.B. Evaluating firm technological innovation capability under uncertainty. *Technovation*, 2008; 28: 349-363.
- [13] Chen, L.H. and Ko, W.C. Fuzzy approaches to quality function deployment for new product design. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009; 160: 2620-2639.
- [14] Chaudha, A., Jain, R., Singh, A. R., and Mishra, P. K. Integration of Kano's Model into quality function deployment (QFD). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011; 53: 689-698.
- [15] Liu, H. Research on Module Selection Method Based on the Integration of Kano Module with QFD Method. *Journal of Service Science and Management*, 2012; 5: 206-211.
- [16] Kano, N, Takahashi, F., Tsuji, S. Attractive quality and must be quality. *The Japan Society for Quality Control*, 1984; 14(2): 39-48.
- [17] Berger, C., Blauth, R., Boger, D., Bolster, C., Burchill, G., DuMouchel, W., Pouliot, F., Richter, R., Rubinoff, A., Shen, D., Timko, M., Walden. Kano's Methods for Understanding Customer-defined Quality. *Center for Quality Management Journal*, 1993; 2(4): 2-36.
- [18] Matzler, K. and Hinterhuber, H. H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment. *Technovation*, 1998; 18: 25-38.
- [19] Tan, K. C. and Shen, X. X. Integrating Kano's model in the planning matrix of quality function deployment. *Total Quality Management*, 2000; 11: 1141-1151.
- [20] Totini, G. Deployment of customer needs in the QFD using a modified Kano Model. *Journal of Academy of Business and Economics*, 2003; 2.
- [21] Tontini G. and Silveira, A. Identification of critical attributes of success in products and services: an alternative to importance-performance analysis. 2005 BALAS Annual Conference, Madrid, 2005; 1-20.
- [22] Yamane, T. Statistics An Introductory Analysis 2nd Edition. Newyork: Harper and Row, 1973.
- [23] Vorasaiharit, N. and Thawesaengskulthai, N. Integration of SERVQUAL Model with Quality Function Deployment to enhance Library's Service Quality. International Conference on Engineering Technologies and Big Data Analytics (ETBDA'2016), Bangkok, Thailand, 2016.
- [24] Sener, Z. and Karsak, E. E. A combined fuzzy linear regression and fuzzy multiple objective programming approach for setting target levels in quality function deployment. *Expert Systems with Applications*, 2011; 38: 3015-3022.



การจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาในธุรกิจบริการโทรคมนาคม Man – Power Planning in a Telecom Service Branch

คัชลิณี อัสรณาสกร* และ ปวีณา เชาวลิตวงศ์

Kachalinee Apsornpasagorn* and Paveena Chaovalitwongse

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand

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

*E-mail: kikkik_kacha@hotmail.com, Telephone Number: 091-6966134

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบวิธีการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาในธุรกิจบริการโทรคมนาคมให้รองรับความต้องการของลูกค้าตลอดระยะเวลาเปิดร้านสาขา ซึ่งต้องมีพนักงานให้บริการลูกค้าคนแรกที่มาใช้บริการและคนสุดท้ายของการเปิดร้านสาขาในช่วงโมงสุดท้าย ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการศึกษาการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาในปัจจุบัน จากนั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อระบุประเด็นปัญหา ซึ่งพบว่าวิธีการดำเนินงานจัดเตรียมกำลังคนในปัจจุบันยังขาดมาตรฐานการทำงานในแต่ละร้านสาขา การดำเนินงานปัจจุบันอาศัยตามทักษะและความเชี่ยวชาญรายบุคคลของผู้จัดการร้านสาขา ส่งผลให้มีบางร้านสาขาไม่สามารถจัดเตรียมกำลังคนเพื่อให้บริการลูกค้าได้อย่างเพียงพอ อีกทั้งวิธีการปัจจุบันเป็นการดำเนินงานระหว่างหน่วยงานของฝ่ายประเมินกำลังคนและผู้จัดการร้านสาขา ก่อให้เกิดความล่าช้าของการรับส่งหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหน่วยงาน ส่งผลต่อประสิทธิภาพและประสิทธิผลการจัดเตรียมกำลังคน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ การแปลงความต้องการใช้บริการเป็นจำนวนพนักงาน การจัดกะทำงาน การจัดวันหยุด และการจัดช่วงเวลาพักรับประทานอาหารกลางวัน งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์โปรแกรมเชิงเส้นในการจัดวันหยุดและการจัดช่วงเวลาพัก ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย คือ วิธีการทำงานมาตรฐานสำหรับการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอสามารถรองรับความต้องการใช้บริการรายชั่วโมงของร้านสาขา อีกทั้งช่วยลดการตัดสินใจของการประเมินกำลังคนซ้ำซ้อน เกิดประสิทธิภาพของการจัดการการทำงานจากวิธีการที่เป็นมาตรฐาน รวมถึงสามารถลดช่องว่างจากทักษะและความชำนาญของผู้จัดการจึงสามารถนำไปปฏิบัติหรือประยุกต์ใช้ได้จริงในการดำเนินงาน

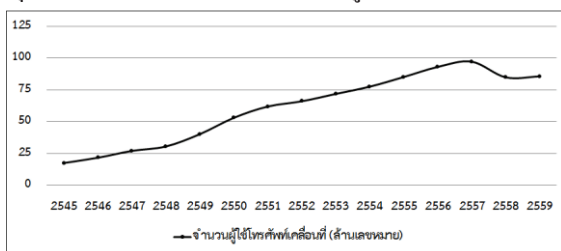
ABSTRACT

This research aims to design a method for man-power planning in a Telecom service branch to serve all customer demand (under hourly interval time). The research starts with studying current process of man-power planning, then analyzing data to define statement of the problem. Under current method, it is found that there is no standard method for service branch manager of each location who is responsible for man-power planning. Since the planning method is purely based on branch manager's skills and experiences, some service branches have no enough man-powers to serve their demands. In addition, the branch managers must coordinate with the head office then there might be some delay of information updates or exchanges. As a result, the current method is not effective and efficient. In this paper, method for man-power planning is proposed. The proposed method is comprised of 4 sections: Job demand conversion, Shift scheduling, Working days off optimization, and Lunch break optimization. The linear programming technique is applied to determine Working days off and Lunch

break problems. The output of this research is a standard process for man-power planning in a Telecom service branch. The proposed process is embedded with decision making models which can eliminate performance gap caused by human skills and experiences. The proposed method can be effective and it can be implemented or applied in real operation.

1. บทนำ

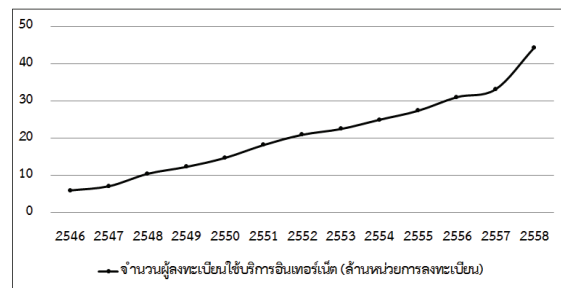
ธุรกิจบริการโทรคมนาคม ประกอบด้วย การให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ การให้บริการโทรศัพท์ประจำที่ การให้บริการอินเทอร์เน็ต และการให้บริการช่องรายการโทรทัศน์แบบบอกรับสมาชิก ซึ่งแนวโน้มจำนวนผู้ใช้บริการ โทรศัพท์เคลื่อนที่และการให้บริการอินเทอร์เน็ตเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 1 และ 2 ภายใต้อิทธิพลของการขยายใหญ่เพียงไม่กี่บริษัท ส่งผลต่อการแข่งขันของธุรกิจก่อนข้างสูง ทำให้ลูกค้ามีอำนาจการตัดสินใจเลือกใช้บริการ โดยอาจเปลี่ยนใจใช้บริการจากบริษัทหนึ่งไปยังอีกบริษัทหนึ่งได้ ดังนั้น นอกจากคุณภาพของตัวบริการที่ต้องสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าสำหรับการดูแลและเอาใจใส่จากงานบริการหลังการขายย่อมมีความสำคัญต่อความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจ ซึ่งปัจจุบันผู้ให้บริการล้วนมีการเปิดร้านสาขาเพื่อให้บริการงานหลังการขายให้แก่ลูกค้าและเป็นช่องทางการจำหน่ายสินค้าและบริการเพื่อเพิ่มยอดขายให้แก่บริษัท โดยมีจำนวนร้านสาขาครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศทั้งเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล รวมถึงเขตภูมิภาค



รูปที่ 1 แนวโน้มจำนวนผู้ใช้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่

ร้านสาขา คือ ศูนย์บริการที่เป็นช่องทางการจัดจำหน่ายสินค้า ช่องทางการรับชำระค่าบริการ หรือช่องทางการให้บริการในด้านต่าง ๆ ซึ่งตัวอย่างที่ลูกค้ามาใช้บริการที่ร้านสาขา ได้แก่ ลูกค้าประจำมาซื้อเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ ประสงค์ติดต่อเพื่อใช้บริการอินเทอร์เน็ตภายในที่อยู่อาศัย ประสงค์ติดต่อเพื่อรับชม

ช่องรายการโทรทัศน์ภายในที่อยู่อาศัย ประสงค์มาชำระค่าบริการ หรือประสงค์มาเปลี่ยนแปลงการให้บริการ เป็นต้น โดยทรัพยากรหลักของร้านสาขา คือ พนักงาน ซึ่งถือเป็นตัวแทนของบริษัทที่ลูกค้าสามารถสัมผัสได้จากการได้รับบริการโดยตรง ดังนั้น การให้บริการของพนักงานในร้านสาขาจึงส่งผลต่อภาพลักษณ์องค์กรทั้งเชิงบวกและเชิงลบ

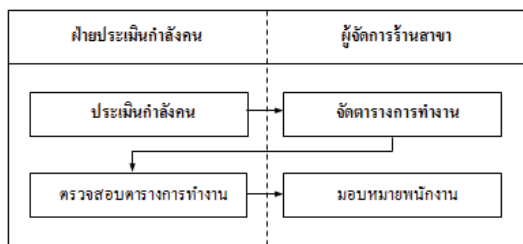


รูปที่ 2 แนวโน้มจำนวนผู้ใช้บริการอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง

จากจำนวนผู้ใช้บริการที่เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ปริมาณความต้องการใช้บริการของร้านสาขามีปริมาณมาก ดังนั้นร้านสาขาจำเป็นต้องจัดเตรียมกำลังคน (พนักงานให้บริการ) เพื่อให้บริการลูกค้าได้อย่างเพียงพอ กล่าวคือรองรับการให้บริการของลูกค้าทุกคน รองรับการใช้บริการทุกประเภทความต้องการและรองรับการให้บริการทุกช่วงเวลาตลอดระยะเวลาเปิดร้านสาขา โดยไม่กระทบต่อตัวชีวิตสมรรถนะการให้บริการของร้านสาขา (ระยะเวลารอคอยรับบริการของลูกค้า)

การจัดเตรียมกำลังคน คือ การประเมินจำนวนพนักงานให้บริการจากความต้องการของลูกค้าที่มาใช้บริการในร้านสาขา ซึ่งต้องมีการมอบหมายงานรายบุคคลตามทักษะการทำงาน of พนักงาน จัดกะทำงานให้ครอบคลุมระยะเวลาเปิดร้านสาขา จัดตารางการทำงานที่ระบุนวันหยุดและช่วงเวลาพักรับประทานอาหารให้กับพนักงานเพื่อให้บริการลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีการจัดเตรียมกำลังคนในปัจจุบัน เป็นการดำเนินงานระหว่างฝ่ายประเมินกำลังคนจากส่วนกลาง และผู้จัดการร้านสาขาในแต่ละพื้นที่ตั้ง ซึ่งผลลัพธ์ของการจัดเตรียมกำลังคน คือ แผนการทำงานของพนักงานรายชั่วโมงที่ต้องจัดส่งให้ฝ่ายกำลังคนตรวจสอบความถูกต้อง แต่ที่สุดท้ายของการจัดเตรียมกำลังคนกลับเกิดขึ้นที่ร้านสาขา ทำให้เกิดระยะเวลาในการส่งข้อมูลระหว่างกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการจัดเตรียมกำลังคน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การส่งต่อข้อมูลระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องของการจัดเตรียมกำลังคน

ผู้จัดการการทำงานในปัจจุบัน ได้แก่ ผู้จัดการร้านสาขา หรือผู้ได้รับมอบหมาย ซึ่งบางร้านสาขามีผู้จัดการมากกว่า 1 คน แล้วจึงรวบรวมเป็นแผนการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา จากการสัมภาษณ์ผู้จัดการแต่ละร้านสาขา พบว่าขาดวิธีการจัดการการทำงานที่เป็นมาตรฐาน ทำให้ต้องอาศัยทักษะและความชำนาญช่วยตัดสินใจ ดังนั้น หากผู้จัดการขาดทักษะอาจส่งผลกระทบต่อจำนวนพนักงานให้บริการไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า

ทักษะการทำงานของพนักงานในปัจจุบันแบ่งตามกิจกรรมที่ลูกค้ามาใช้บริการ ซึ่งงานบางงานพนักงานมีทักษะที่สามารถทำงานข้ามกันได้ หรือทำงานทดแทนกันได้ แต่กลับถูกแยกประเภทจากกันอย่างอิสระ ทำให้ภาพรวมของการจัดเตรียมกำลังคนอาจมีจำนวนพนักงานเกินจริง

ปริมาณความต้องการใช้บริการของร้านสาขาในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งบางร้านสาขามีลูกค้ามาใช้บริการหนาแน่นในช่วงพักกลางวันหรืออาหารกลางวัน และจำนวนลูกค้าลดลงในช่วงเวลาสายของวัน จากนั้น

กลับมีปริมาณลูกค้าหนาแน่นอีกครั้งในช่วงเย็น ส่งผลต่อการจัดเตรียมกำลังคนซึ่งต้องรองรับความต้องการที่ผันแปรรายชั่วโมง

จากความซับซ้อนของความต้องการใช้บริการรายชั่วโมงและเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของการจัดการการทำงานจากวิธีการที่เป็นมาตรฐาน รวมถึงเพื่อลดช่องว่างจากทักษะและความชำนาญของผู้จัดการ ดังนั้น งานวิจัยจึงนำเสนอวิธีการจัดเตรียมกำลังคนเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้บริการ และเป็นมาตรฐานการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา

2. การทบทวนวรรณกรรม

ธุรกิจบริการย่อมมีความต้องการบริหารจัดการทรัพยากรให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า โดยเฉพาะทรัพยากรหลักที่สร้างคุณค่าให้กับบริการ ได้แก่ ทรัพยากรบุคคลเพื่อให้บริการแก่ลูกค้า ยานพาหนะเพื่อขนส่งสินค้าจากสถานีสั่งทางไปยังสถานีปลายทาง เป็นต้น ซึ่งปัญหาที่พบส่วนใหญ่แบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกคือ ปัญหาการจัดบุคลากรหรือการจัดยานพาหนะที่มีวัตถุประสงค์เพื่อวางแผนจำนวนพนักงาน [1] หรือเพื่อแก้ปัญหาการจัดบุคลากรพยาบาล [2] รวมทั้งการออกแบบระบบการจัดเตรียมยานพาหนะสำหรับการขนส่ง [3] เป็นต้น กลุ่มที่สองคือ ปัญหาการมอบหมายงานให้เหมาะสมกับทักษะของพนักงาน ยกตัวอย่างเช่น นำเสนอการแก้ปัญหาการมอบหมายงานให้พนักงานสายการบิน [4]

วิธีการแก้ไขปัญหาจากการเลือกคำตอบที่เหมาะสมบนพื้นฐานของการตัดสินใจที่พบในงานวิจัยแบ่งเป็น 2 วิธี คือ 1) Analytic model และ 2) Heuristic โดยในกลุ่ม Analytic model ได้แก่ Mathematic model, Linear programming และ Integer programming เป็นต้น โดยกำหนดให้วัตถุประสงค์ของการหาคำตอบหรือการแก้ปัญหาให้เกิดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำที่สุด หรือให้เกิดภาระงานของพนักงานต่ำที่สุด ยกตัวอย่างเช่น วัตถุประสงค์ให้เกิดค่าใช้จ่ายในการเดินทางของ

พนักงานขับรถต่ำที่สุด [5], วัตถุประสงค์ให้เกิดค่าใช้จ่ายรายปีต่ำสุดของแผนการเช่ารถ [3] และวัตถุประสงค์ให้เกิดค่าใช้จ่ายรายสัปดาห์ของการจัดพนักงานต่ำที่สุด [6]

วิธีการจัดบุคลากรในงานวิจัยที่ศึกษา แบ่งได้ 2 ส่วนหลัก คือ การวางแผนจำนวนบุคลากร และการจัดตารางบุคลากร โดยทำการพยากรณ์ความต้องการรายชั่วโมง และเปลี่ยนเป็นความต้องการพนักงานรายชั่วโมง ถัดไปจึงจัดกะทำงานรายวัน [1]

การประยุกต์ใช้การจัดบุคลากรเกิดขึ้นกับหลากหลายกลุ่มธุรกิจบริการ ได้แก่ Telephone Operator, Call Center, Health care, Fast-food และ Airline เป็นต้น [1] ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการให้บริการลูกค้าของร้านสาขาในงานวิจัย

3. การศึกษากระบวนการดำเนินงานในปัจจุบัน

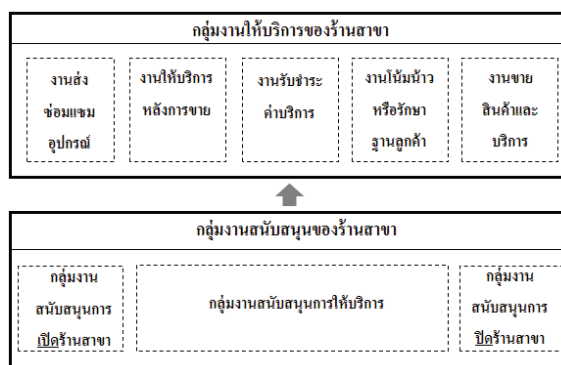
การศึกษากระบวนการปัจจุบันนั้นจะใช้วิธีการสัมภาษณ์ผู้จัดการในหลายสาขาและหน่วยงานรวมทั้งการศึกษาเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดความเข้าใจธรรมชาติของร้านสาขาและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดเตรียมกำลังคน ได้แก่ การดำเนินงานของร้านสาขา, รูปแบบการสนองความต้องการลูกค้าของร้านสาขา, ทักษะการให้บริการของพนักงาน และวิธีการจัดเตรียมกำลังคน มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การดำเนินงานของร้านสาขา

ร้านสาขา คือ ศูนย์บริการที่เป็นช่องทางการจัดจำหน่ายสินค้าและให้บริการด้านต่าง ๆ กับลูกค้า ได้แก่ จัดจำหน่ายเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่หรืออุปกรณ์เสริม, ให้บริการด้านอินเทอร์เน็ตหรือให้บริการช่องรายการโทรทัศน์ภายในที่อยู่อาศัย, รับชำระค่าบริการ และเปลี่ยนแปลงการใช้บริการตามความต้องการของลูกค้า เป็นต้น

การดำเนินงานของร้านสาขาสามารถแบ่งตามลักษณะกลุ่มงานที่เกิดขึ้นได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มงานให้บริการ หมายถึง กลุ่มงานที่ให้บริการลูกค้าโดยตรง และกลุ่มงานสนับสนุนการให้บริการ หมายถึง กลุ่มงานที่สนับสนุนให้

การดำเนินงานของกลุ่มงานแรกไหลลื่น ไม่ติดขัด ประกอบด้วยกลุ่มงานย่อย คือ 1) กลุ่มงานสนับสนุนการเปิดร้านสาขา 2) กลุ่มงานสนับสนุนการให้บริการ และ 3) กลุ่มงานสนับสนุนการปิดร้านสาขา ดังรูปที่ 4 แสดงรายละเอียดของงานย่อยดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การดำเนินงานของร้านสาขาแบ่งตามกลุ่มงาน



รูปที่ 5 กลุ่มงานสนับสนุนของร้านสาขาแบ่งตามงานย่อย

3.2 รูปแบบการสนองความต้องการลูกค้าของร้านสาขา

การสนองความต้องการลูกค้าของร้านสาขา ได้แก่ การจัดจำหน่ายสินค้าเมื่อได้รับคำสั่งซื้อสินค้า, การติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อและกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตหรือช่องรายการโทรทัศน์เมื่อได้รับคำสั่งติดตั้งบริการ, การให้บริการเมื่อได้รับคำสั่งชำระค่าบริการหรือคำสั่งเปลี่ยนแปลงบริการ เป็นต้น

จากการศึกษาพบว่าร้านสาขามีรูปแบบการสนองความต้องการลูกค้า 2 แบบ คือ Make to stock และ

Make to order ตามลักษณะความต้องการใช้บริการของลูกค้า โดยรูปแบบแรกจะเกิดเมื่อลูกค้าประสงค์มาซื้อสินค้า ซึ่งสินค้าถูกจัดเก็บในคลังสินค้าเพื่อรอรับคำสั่งซื้อหรือคำสั่งใช้บริการภายในที่อยู่อาศัย ซึ่งโครงข่ายอินเทอร์เน็ตถูกสร้างให้ครอบคลุมเขตพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล รวมถึงเขตภูมิภาคเพื่อรอรับคำสั่งติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อและกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ต สำหรับรูปแบบที่สองจะเกิดเมื่อลูกค้ามีคำสั่งใช้บริการ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบการสนองความต้องการลูกค้าของร้านสาขา

รูปแบบ	คำสั่งงาน	ประเภทงาน	ตัวอย่าง
1	Make to stock	งานขายสินค้าและบริการ	1) สินค้า ได้แก่ เครื่องโทรศัพท์ หรือ อุปกรณ์เชื่อมต่อและกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ต 2) บริการ ได้แก่ อินเทอร์เน็ต หรือ ช่องรายการโทรทัศน์
2	Make to order	1) งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ฯ 2) งานบริการหลังการขาย 3) งานรับชำระค่าบริการ 4) งานโน้มน้าวและรักษาสถานลูกค้า	

3.3 ทักษะการให้บริการของพนักงาน

จากการศึกษาพบว่ามีกระบวนการแบ่งทักษะการให้บริการของพนักงานจากกิจกรรมที่ลูกค้ามาใช้บริการ แบ่งเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ 1) งานขายสินค้าและบริการ 2) งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ฯ 3) งานบริการหลังการขาย 4) งานรับชำระค่าบริการ และ 5) งานโน้มน้าวและรักษาสถานลูกค้า ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบทักษะการทำงานของพนักงานแบ่งตามประเภทงาน

รูปแบบ	ประเภทงาน
1	งานขายสินค้าและบริการ
2	งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ฯ
3	งานบริการหลังการขาย
4	งานรับชำระค่าบริการ
5	งานโน้มน้าวและรักษาสถานลูกค้า

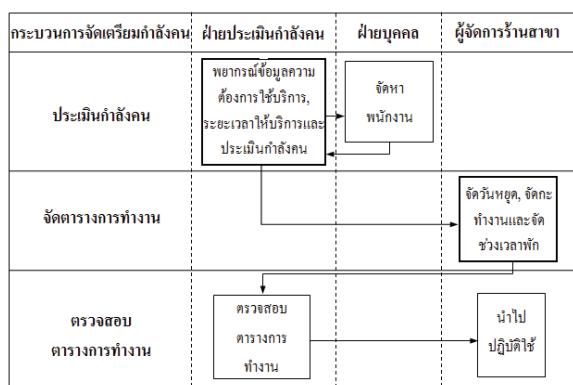
3.4 การจัดเตรียมกำลังคน

จากการศึกษากระบวนการจัดเตรียมกำลังคนด้วยการสัมภาษณ์หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดเตรียมกำลังคน ได้แก่ ฝ่ายประเมินกำลังคน ฝ่ายบุคคล และผู้จัดการร้านสาขา ในขั้นตอนการดำเนินงาน 3 ส่วนหลัก (ดูรูปที่ 6) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การประเมินกำลังคน เริ่มจากฝ่ายประเมินกำลังคนพยากรณ์จำนวนความต้องการใช้บริการของลูกค้าและระยะเวลาการให้บริการของพนักงานจากข้อมูลในอดีต โดยจะกำหนดระยะเวลาเผื่อของพนักงานให้บริการและระบุตัวชี้วัดสมรรถนะของร้านสาขา (ระดับการให้บริการด้วยระยะเวลารอคอยรับบริการ) จากนั้นตรวจสอบกำลังคนที่ประเมินได้ว่าเพียงพอต่อการให้บริการลูกค้าหรือไม่ (ไม่กระทบกับระดับการให้บริการ) หากพบว่าไม่เพียงพอจะส่งความต้องการพนักงานไปหาฝ่ายบุคคลให้จัดหาจำนวนพนักงานเพิ่ม แต่ถ้าเพียงพอจะจัดส่งกำลังคนที่ประเมินได้ให้ร้านสาขา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นแผนกำลังคนรายชั่วโมงของแต่ละประเภทงานจำนวน 30 วัน

2) การจัดตารางการทำงาน เริ่มจากผู้จัดการร้านสาขาระบายชื่อพนักงานตามจำนวนที่มีในร้านสาขา โดยจะไม่อ้างอิงแผนกำลังคนรายชั่วโมงทั้งหมด แต่จะจัดตารางการทำงานให้ไม่กระทบกับระดับการให้บริการ ซึ่งขั้นตอนการจัดตารางการทำงานต้องอาศัยทักษะและความชำนาญของผู้จัดตารางในการตัดสินใจมอบหมายพนักงานเป็นรายบุคคล ได้แก่ การระบุนวันหยุด (วันหยุดในสัปดาห์, วันหยุดนักขัตฤกษ์ และวันลาพักผ่อนประจำปี) การระบุ

กะทำงาน ให้มีจำนวนพนักงานใกล้เคียงกันในแต่ละกะ การระบุช่วงเวลาพักรับประทานอาหาร (หนึ่งชั่วโมงในวัน) และการระบุประเภทงานให้ตรงกับทักษะของพนักงาน ซึ่งผู้จัดการบางร้านสาขาอาจมีมากกว่า 1 คน เกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละขั้นตอนอาจแตกต่างกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นตารางการทำงานของพนักงานรายชั่วโมง จำนวน 30 วัน และจัดส่งให้ฝ่ายประเมินกำลังคน ตรวจสอบในขั้นถัดไป



รูปที่ 6 กระบวนการจัดเตรียมกำลังคนในปัจจุบัน

3) การตรวจสอบตารางการทำงาน ทางฝ่ายประเมินกำลังคนตรวจสอบความถูกต้องของตารางการทำงานโดยตรวจสอบจากเงื่อนไข เช่น ต้องมีพนักงานทุกประเภทงาน, พนักงานทุกคนต้องได้พักรับประทานอาหารกลางวัน, และระดับการให้บริการของร้านสาขาต้องผ่านเกณฑ์ของสาขา หากไม่ถูกต้องจะจัดส่งให้ร้านสาขาแก้ไขตารางการทำงานอีกครั้ง

3.5 การวิเคราะห์ปัญหา

จากการศึกษากระบวนการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา สามารถสรุปประเด็นปัญหา ได้ 3 ประเด็น คือ 1) มีการตัดสินใจซ้ำซ้อนของการประเมินกำลังคนที่เกิดขึ้นจากฝ่ายประเมินกำลังคนและผู้จัดการร้านสาขา 2) ขาดมาตรฐานการจัดตารางการทำงานให้กับผู้จัดการร้านสาขา และ 3) การจัดรูปแบบทักษะการทำงานของพนักงานไม่เหมาะสม แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

1) มีการตัดสินใจซ้ำซ้อนของการประเมินกำลังคนระหว่างฝ่ายประเมินกำลังคนและผู้จัดการร้านสาขา โดยที่ผู้จัดการร้านสาขาไม่ได้อ้างอิงจำนวนกำลังคนที่ได้รับการประเมินทั้งหมด แต่ให้น้ำหนักของการจัดตารางโดยต้องไม่กระทบกับระดับการให้บริการของร้านสาขา (ระยะเวลารอคอยรับบริการ) ซึ่งสอดคล้องกับระดับนโยบาย นอกจากนี้หากฝ่ายหนึ่งฝ่ายใดต้องการแลกเปลี่ยนข้อมูลหรือปฏิเสธข้อมูลต้องมีการส่งประสานระหว่างหน่วยงานส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการจัดเตรียมกำลังคน ดังรูปที่ 6

2) ขาดมาตรฐานการจัดตารางการทำงานให้กับผู้จัดการร้านสาขา เกิดช่องว่างของการจัดตารางการทำงานจากทักษะและความชำนาญรายบุคคล รวมถึงบางสาขาที่มีผู้จัดการมากกว่า 1 คน ทำให้เกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละขั้นตอนอาจแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่นการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา A และ B ซึ่งผู้จัดการเป็นผู้จัดการร้านสาขา โดยเงื่อนไขของร้านสาขาก็มีกะทำงานของพนักงานเท่ากัน คือ 3 กะทำงาน และมีขนาดของร้านสาขานาขนาดเดียวกัน แต่ผลลัพธ์ของการจัดเตรียมกำลังคนแตกต่างกัน กล่าวคือ จำนวนพนักงานที่ผู้จัดการจัดสรรในแต่ละประเภทงานตั้งแต่วันที่ 7 ถึงวันที่ 13 กันยายน พ.ศ.2558 มีจำนวนไม่เท่ากัน โดยวันที่ 7 ร้านสาขา B จัดสรรพนักงานในงานบริการหลังการขาย เป็นสองเท่าของร้านสาขา A ดังรูปที่ 7 และ 8

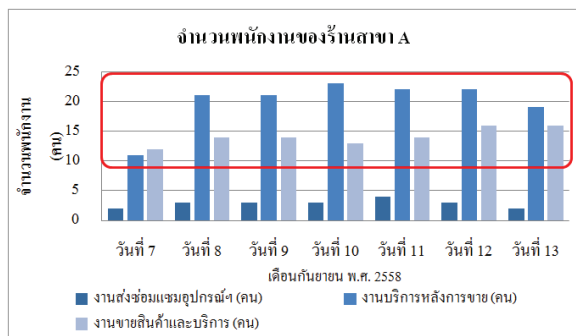
3) การจัดรูปแบบทักษะการทำงานของพนักงานไม่เหมาะสม มีการแบ่งทักษะการทำงานของพนักงานตามกิจกรรมที่ถูกนำมาให้บริการ ซึ่งงานบางงานสามารถทำงานทดแทนกันได้ ทำให้จำนวนพนักงานในภาพรวมเกินจริง โดยวันที่ 10 ถึง 12 กันยายน พ.ศ. 2558 มีจำนวนพนักงานของทักษะการให้บริการหลังการขายอยู่ที่ 23, 22 และ 22 คน ตามลำดับ ซึ่งพบว่าจำนวนดังกล่าวไม่กระทบกับระยะเวลารอคอยรับบริการของร้านสาขา แต่เมื่อเปรียบเทียบจำนวนพนักงานในบางวันของสัปดาห์ ได้แก่ วันที่ 7 และวันที่ 13 พบว่าผู้จัดการจัดสรรจำนวนพนักงานไว้น้อยกว่า คือ 11 และ 19 คน ตามลำดับ ซึ่งยังคงสามารถให้บริการลูกค้าได้ผ่านตัวชี้วัดด้านระยะเวลา

รอคอยรับบริการ ทำให้ภาพรวมของจำนวนพนักงาน
รายวันต่ำกว่าวันที่ 10 ถึง 12 กันยายน ดังตารางที่ 3

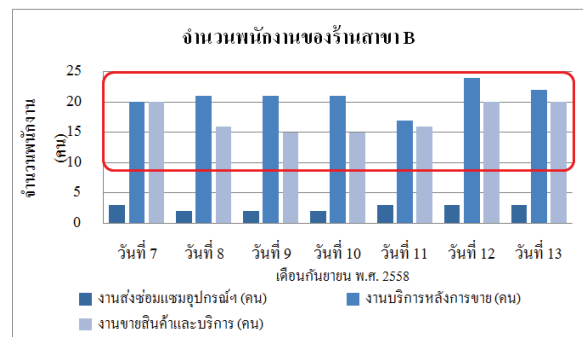
ตารางที่ 3 การจัดสรรจำนวนพนักงานตามรูปแบบทักษะการทำงานแบ่งตามกิจกรรมที่ถูกนำมาให้บริการ (ข้อมูลวันที่ 7 ถึง 13 กันยายน พ.ศ. 2558 ของร้านสาขา A)

ร้านสาขา A	จำนวนพนักงาน (คน)						
	วันที่ 7	วันที่ 8	วันที่ 9	วันที่ 10	วันที่ 11	วันที่ 12	วันที่ 13
รวมทั้งหมด	25	38	38	39	40	41	30
งานส่งซ่อม	2	3	3	3	4	3	2
งานหลังการขาย	11	21	21	23	22	22	19
งานขาย	12	14	14	13	14	16	9
ร้านสาขา A	ระยะเวลาารอคอยเทียบกับตัวชี้วัด (0/1 = ไม่ผ่านตัวชี้วัด/ ผ่านตัวชี้วัด)						
	วันที่ 7	วันที่ 8	วันที่ 9	วันที่ 10	วันที่ 11	วันที่ 12	วันที่ 13
งานส่งซ่อม	0	1	1	1	1	1	0
งานหลังการขาย	1	1	1	1	1	1	1
งานขาย	1	1	1	1	1	1	1

จากเหตุดังกล่าว เพื่อเป็นการลดการตัดสินใจของการ
ประเมินกำลังคนซ้ำซ้อน และเกิดประสิทธิภาพของการจัด
ตารางการทำงานจากวิธีการที่เป็นมาตรฐาน รวมถึงเพื่อลด
ช่องว่างจากทักษะและความชำนาญของผู้จัดตาราง ดังนั้น
งานวิจัยจึงนำเสนอวิธีการจัดเตรียมกำลังคนเพื่อให้เพียงพอ
ต่อความต้องการใช้บริการ และเป็นมาตรฐานการจัดเตรียม
กำลังคนของร้านสาขา



รูปที่ 7 จำนวนพนักงานที่ได้จากวิธีการจัดเตรียมกำลังคน
ของร้านสาขา A

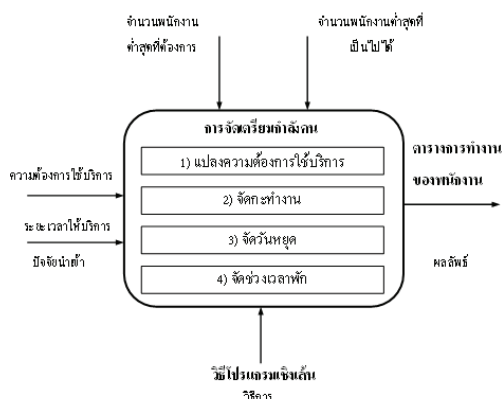


รูปที่ 8 จำนวนพนักงานที่ได้จากวิธีการจัดเตรียมกำลังคน
ของร้านสาขา B

4. วิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่น่าสนใจ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดบุคลากร
และแนวความคิดการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีหาคำตอบที่เหมาะสม
จึงนำเสนอวิธีการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาซึ่ง
ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ 1) การแปลงความต้องการ
ใช้บริการเป็นจำนวนพนักงาน 2) การจัดกะทำงาน 3) การ
จัดวันหยุด และ 4) การจัดช่วงเวลาพักรับประทานอาหาร

กลางวัน โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์โปรแกรมเชิงเส้นในการจัดวันหยุดและการจัดช่วงเวลาพักฯ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย คือ วิธีการทำงานมาตรฐานสำหรับการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่นำเสนอ

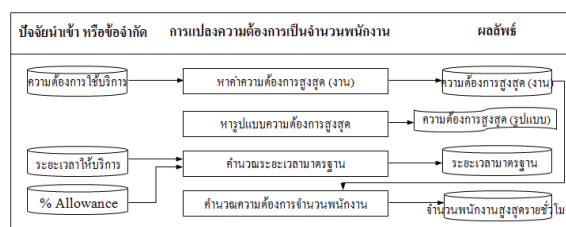
วิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่นำเสนอ เริ่มจากการจัดกลุ่มรูปแบบทักษะการให้บริการของพนักงานเป็น 2 รูปแบบ คือ ทักษะการทำงานแบบอิสระต่อกัน และทักษะการทำงานแบบข้ามหรือทดแทนกันได้ ซึ่งรูปแบบแรกจำเป็นต้องใช้ทักษะเฉพาะงาน ไม่สามารถทำงานข้ามหรือทดแทนกันได้ และรูปแบบที่สองพนักงานมีทักษะการทำงานข้ามหรือทดแทนกันได้ แสดงรายละเอียดของงานในแต่ละทักษะการให้บริการดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รูปแบบทักษะการทำงานของพนักงานแบ่งตามทักษะการให้บริการ

รูปแบบ	ทักษะการให้บริการ	ประเภทงาน
1	ทักษะการทำงานแบบอิสระต่อกัน	1) งานขายสินค้าและบริการ 2) งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ฯ
2	ทักษะการทำงานแบบข้ามกันหรือทดแทนกันได้	1) งานบริการหลังการขาย 2) งานรับชำระค่าบริการ 3) งานโน้มน้าวและรักษารฐานลูกค้า

4.1 การแปลงความต้องการเป็นจำนวนพนักงาน

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนพนักงานสูงสุดที่ต้องการรายชั่วโมงและศึกษารูปแบบความต้องการใช้บริการรายสัปดาห์เพื่อลดจำนวนครั้งของการจัดเตรียมกำลังคน ซึ่งการแปลงความต้องการเริ่มจากหาค่าความต้องการสูงสุดของประเภทงานมาศึกษารูปแบบความต้องการรายสัปดาห์ จากนั้นแปลงจำนวนความต้องการเป็นจำนวนพนักงานจากค่าระยะเวลามาตรฐานของงานแต่ละประเภท โดยผลลัพธ์ที่ได้ คือ จำนวนพนักงานสูงสุดรายชั่วโมง ดังรูปที่ 10 แสดงรายละเอียดดังนี้ และนำไปเป็นปัจจัยนำเข้าในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 10 การแปลงความต้องการเป็นจำนวนพนักงานของร้านสาขา

1) การหาค่าความต้องการสูงสุด เริ่มจากข้อมูลความต้องการใช้บริการเฉลี่ยในงานแต่ละประเภทของร้านสาขา รายสัปดาห์ช่วงระยะเวลา 1 เดือน เพื่อศึกษารูปแบบความต้องการใช้บริการว่ามีรูปแบบเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร ยกตัวอย่างเช่น นำค่าความต้องการเฉลี่ยของงานบริการหลังการขายตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 4 ของเดือนกันยายน พ.ศ. 2558 ดังรูปที่ 11 พบว่าในแต่ละวันมีค่าความเฉลี่ยของงานใกล้เคียงกันสามารถคัดเลือกตัวแทนวันในสัปดาห์ (จันทร์ ถึง อาทิตย์) จากสัปดาห์ใดสัปดาห์หนึ่งเพื่อให้ครอบคลุมความต้องการใช้บริการรายเดือน

จากรูปที่ 11 พบว่าในช่วงระยะเวลา 1 เดือน ความต้องการรายสัปดาห์มีรูปแบบคล้ายคลึงกัน จึงคำนวณหาความต้องการสูงสุดรายสัปดาห์ในส่วนถัดไปเพื่อให้ครอบคลุมการให้บริการรายเดือน และลดปริมาณงานของการจัดตารางการทำงานของร้านสาขา

ค่าเฉลี่ยของ สัปดาห์ที่	ค่าความต้องการใช้บริการเฉลี่ยของ งานบริการหลังการขาย (งาน)						
	จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
1	31	35	33	26	31	32	33
2	31	31	36	31	29	19	36
3	30	35	31	19	28	30	34
4	31	30	30	29	27	32	34

รูปที่ 11 ความต้องการใช้บริการเฉลี่ยของงานบริการ
หลังการขาย

2) การหารูปแบบความต้องการสูงสุด เพื่อยืนยันว่าความต้องการใช้บริการสูงสุดรายสัปดาห์สามารถครอบคลุมความต้องการใช้บริการรายเดือน ยกตัวอย่างเช่น นำค่าความต้องการสูงสุดของงานบริการหลังการขายตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ถึงสัปดาห์ที่ 4 ของเดือนกันยายน พ.ศ. 2558 มาหาค่าความต้องการสูงสุดรายวัน เพื่อคัดเลือกตัวแทนความต้องการสูงสุดของวันในสัปดาห์ (จันทร์ ถึง อาทิตย์) จากสัปดาห์ใดสัปดาห์หนึ่งเป็นตัวแทนความต้องการรายเดือน ดังรูปที่ 12

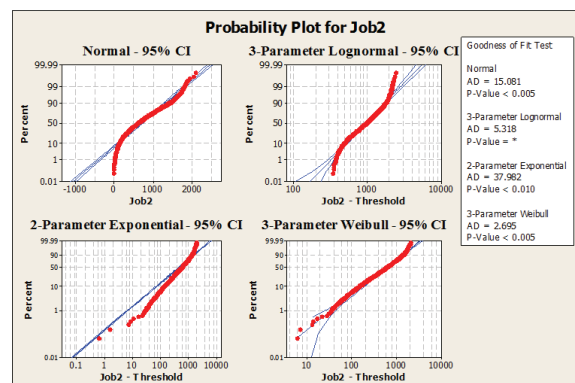
ค่าสูงสุดของ สัปดาห์ที่	ค่าความต้องการใช้บริการสูงสุดของ งานบริการหลังการขาย (งาน)						
	จันทร์	อังคาร	พุธ	พฤหัสบดี	ศุกร์	เสาร์	อาทิตย์
1	41	49	48	43	38	39	48
2	40	52	47	42	35	39	47
3	40	49	43	42	35	40	44
4	40	43	47	42	39	39	43
ทุกสัปดาห์	41	52	48	43	39	40	48

รูปที่ 12 ความต้องการใช้บริการสูงสุดของงานบริการ
หลังการขาย

จากรูปที่ 12 พบว่ารูปแบบความต้องการสูงสุดรายสัปดาห์สามารถครอบคลุมความต้องการใช้บริการรายเดือนได้ ดังนั้นจะได้ตัวแทนวันจันทร์, อังคาร, พุธ, พฤหัสบดี, ศุกร์, เสาร์ และอาทิตย์ จากสัปดาห์ที่ 1, 2, 1, 1, 4, 3 และ 1 ตามลำดับ

3) การคำนวณระยะเวลามาตรฐาน เป็นการคำนวณค่าระยะเวลาให้บริการที่ใช้ต่อการทำงาน 1 งาน

เพื่อใช้แปลงเป็นจำนวนพนักงานในขั้นถัดไป โดยมีแนวคิดเพื่อให้เกิดความแม่นยำของข้อมูลระยะเวลาให้บริการของพนักงาน จึงเริ่มจากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลระยะเวลาให้บริการเพื่อคัดเลือกระหว่างการหาค่ากลางมาเป็นตัวแทนของค่าสังเกตก่อนไปคำนวณค่าระยะเวลามาตรฐานของงานประเภทนั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น นำค่าระยะเวลาให้บริการที่ได้จากฐานข้อมูลของธุรกิจกรณีศึกษาตั้งแต่วันที่ 7 ถึง 13 กันยายน พ.ศ. 2558 ของงานบริการหลังการขายมาหาลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าข้อมูลไม่เป็น Normal เนื่องจากค่า p value < 0.05 จากนั้นพิจารณาข้อมูลแบบ Non normal โดยเปรียบเทียบค่า AD เพื่อหาค่าที่ต่ำสุด ซึ่งจากกราฟ ของลักษณะการกระจายตัวแบบ 3 parameter weibull มีลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงแสดงว่าเป็นรูปแบบการกระจายตัวที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การกระจายตัวของข้อมูลระยะเวลาให้บริการ
หลังการขาย

จากนั้นสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ของการแจกแจงแบบ 3 parameter weibull จะได้ค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ 1) Shape parameter (β) และ 2) Scale parameter (δ) ดังรูปที่ 14 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากลางของข้อมูลจากสมการที่ 1, 2 และ 3

ML Estimates of Distribution Parameters				
Distribution	Location	Shape	Scale	Threshold
Normal*	710.65707		472.75732	
3-Parameter Lognormal	6.86034		0.46335	-346.90380
2-Parameter Exponential			711.29730	-0.64023
3-Parameter Weibull		1.49560	791.73395	-6.14566
Smallest Extreme Value	958.66516		500.71754	
Largest Extreme Value	489.18379		376.87911	
3-Parameter Gamma		1.96895	372.50960	-22.79635
Logistic	674.60923		275.88977	
3-Parameter Loglogistic	6.72467		0.32130	-225.90768
Johnson Transformation*	0.00314		1.01266	

รูปที่ 14 พารามิเตอร์ของการแจกแจงข้อมูลระยะเวลาให้บริการหลังการขาย

สมการ

$$\text{Mean} = \delta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (1)$$

$$\beta = (1 + \frac{1}{\beta}) \quad (2)$$

$$\Gamma(\beta) = (\beta - 1)! \quad (3)$$

โดยที่

Shape parameter (β) คือ พารามิเตอร์ของการแจกแจง

Scale parameter (δ) คือ พารามิเตอร์ของการแจกแจง

เมื่อคำนวณค่ากลางของข้อมูลระยะเวลาให้บริการของงานบริการหลังการขายจากสมการที่ 1, 2 และ 3 ได้แล้ว จะเป็นตัวแทนของค่าสังเกตของข้อมูล ซึ่งในตัวอย่างนี้ คำนวณค่าสังเกตของระยะเวลาให้บริการของร้านสาขาในงานบริการหลังการขาย เท่ากับ 8.82 นาที ดังรูปที่ 15 จากนั้นนำไปคำนวณค่าระยะเวลามาตรฐานจากสมการที่ 1 และ 2

สมการ

$$\text{Standard time} = \text{Normal time} (1 + \text{Allowance}) \quad (1)$$

$$\text{Normal time} = \text{Observed time} \times \frac{\text{Rating}}{100} \quad (2)$$

โดยที่

Standard time คือ ค่าระยะเวลามาตรฐาน

Normal time คือ ค่าระยะเวลากปกติ

Observed time คือ ค่าระยะเวลาที่ได้จากการสังเกต ซึ่งขึ้นกับลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลระยะเวลาให้บริการ

Allowance คือ ค่าเผื่อของพนักงานจากความจำเป็นขั้นพื้นฐาน กำหนดให้ Allowance เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์

Rating คือ ความสามารถของพนักงาน กำหนดให้ Rating = 100

จากการแทนค่าสังเกต ค่า Allowance และ Rating ในสมการที่ 1 และ 2 สามารถคำนวณระยะเวลาให้บริการมาตรฐานได้ ซึ่งในตัวอย่างนี้ จะได้ค่าระยะเวลามาตรฐานของงานบริการหลังการขายมีค่าเท่ากับ 12.72 นาที ดังรูปที่ 15

ตัวแปร	ค่า
shape parameter (β)	1.50
scale parameter (δ)	791.73
ระยะเวลาให้บริการ (นาที) = Mean = $\delta \Gamma(1 + 1/\beta)$ = Observe time (นาที)	8.82
% Allowance	0.44
% Allowance + 1	1.44
ระยะเวลาให้บริการมาตรฐาน (นาที)	12.72

รูปที่ 15 ระยะเวลามาตรฐานของงานบริการหลังการขาย

จากค่าระยะเวลามาตรฐานที่คำนวณได้เป็นค่าระยะเวลาให้บริการที่ใช้ในการทำงานจำนวนหนึ่งงาน ดังนั้นสามารถหาจำนวนงานที่ทำได้รายชั่วโมง แล้วจึงหาจำนวนความต้องการพนักงาน (คน) ในส่วนถัดไป

4) การคำนวณค่าความต้องการจำนวนพนักงานสูงสุด เป็นการแปลงความต้องการใช้บริการเป็นจำนวนพนักงาน สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนเริ่มจากการแบ่งช่วงเวลาของเวลาที่เปิดร้านสาขาทั้งหมดเพื่อให้สามารถจัดเตรียมกำลังคนให้เพียงพอตลอดระยะเวลาที่เปิดร้าน ตามประเภทกะทำงาน ซึ่งกะทำงานของร้านสาขาที่ศึกษาแบ่งได้ 3 กะทำงานตามนโยบายของสำนักงานใหญ่ ได้แก่ กะทำงานที่ 1 เริ่ม 9:30 – 18:30 น. กะทำงานที่ 2 เริ่ม 11:30 – 20:30 น. และกะทำงานที่ 3 เริ่ม 9:30 – 20:30 น. ดังรูปที่ 16

เวลา	จำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงาน (คน)						
	จ	อ	ท	พ	ศ	ส	อา
09:30-10:30							
10:30-11:30							
11:30-12:30							
12:30-13:30							
13:30-14:30							
14:30-15:30							
15:30-16:30							
16:30-17:30							
17:30-18:30							
18:30-19:30							
19:30-20:30							

รูปที่ 16 ประเภทกะทำงานของร้านสาขา

จากนั้นแบ่งช่วงระยะเวลาตามกะทำงานโดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาที่ 1 คือ จุดเวลาเปิดร้านสาขาของกะทำงานแรกถึงจุดเวลาสุดท้ายก่อนเริ่มกะทำงานที่ 2 กล่าวคือ ตั้งแต่ 9:30 – 11:30 น. ส่วนช่วงเวลาที่ 2 คือ จุดเวลาสิ้นสุดการให้บริการของกะทำงานที่ 1 ถึงจุดเวลาการให้บริการของกะทำงานที่ 2 แล้วเสร็จ กล่าวคือ ตั้งแต่ 18:30 – 20:30 น. และช่วงเวลาที่ 3 คือ จุดเวลาของการให้บริการในกะทำงานที่ 1 และ 2 ร่วมกัน กล่าวคือ ตั้งแต่ 11:30 – 18:30 น. ดังรูปที่ 17

เวลา	จำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงาน (คน)						
	จ	อ	ท	พ	ศ	ส	อา
09:30-10:30							
10:30-11:30							
11:30-12:30							
12:30-13:30							
13:30-14:30							
14:30-15:30							
15:30-16:30							
16:30-17:30							
17:30-18:30							
18:30-19:30							
19:30-20:30							

รูปที่ 17 การแบ่งช่วงเวลาของระยะเวลาที่เปิดร้านสาขา

จากนั้นหาค่าความต้องการใช้บริการตามช่วงเวลาของวันในสัปดาห์ ซึ่งตัวอย่างนี้จะได้อาณาความต้องการใช้บริการตามช่วงเวลาของงานบริการหลังการขายประจำวันจันทร์ คือ ช่วงเวลาที่ 1 เท่ากับ 27 งาน, ช่วงเวลาที่ 2

เท่ากับ 41 งาน และช่วงเวลาสุดท้าย เท่ากับ 40 งาน ดังรูปที่ 18

เวลา	ความต้องการใช้บริการของวันในสัปดาห์ (งาน)							ความต้องการใช้บริการตามช่วงเวลาของวันในสัปดาห์ (งาน)						
	จ	อ	ท	พ	ศ	ส	อา	จ	อ	ท	พ	ศ	ส	อา
	จ	อ	ท	พ	ศ	ส	อา	จ	อ	ท	พ	ศ	ส	อา
09:30-10:30	22	6	16	10	10	21	19	27	34	39	24	30	30	41
10:30-11:30	27	34	39	24	30	30	41							
11:30-12:30	37	36	48	25	33	29	31							
12:30-13:30	27	39	28	43	37	33	37							
13:30-14:30	40	30	32	30	31	40	35							
14:30-15:30	31	33	35	35	33	30	46	40	39	48	43	39	40	48
15:30-16:30	34	36	35	20	25	36	45							
16:30-17:30	38	29	43	21	39	37	48							
17:30-18:30	32	33	31	35	26	33	32							
18:30-19:30	41	52	36	30	22	26	18	41	52	36	30	22	26	18
19:30-20:30	15	12	15	10	8	14	10							

รูปที่ 18 ความต้องการใช้บริการของงานบริการหลังการขายตามช่วงเวลาที่เปิดร้านสาขาของวันในสัปดาห์

จากนั้นจึงนำค่าระยะเวลามาตรฐานที่คำนวณได้มาหาค่าจำนวนงานต่อคนที่สามารถให้บริการได้ในรายชั่วโมง ซึ่งในที่นี้ค่าระยะเวลามาตรฐานของงานบริการหลังการขาย เท่ากับ 12.72 นาทีในการทำงานจำนวน 1 งาน ดังนั้นในหนึ่งชั่วโมงจำนวนงานที่พนักงานสามารถทำได้ จะเท่ากับ 60 นาทีหารด้วย 12.72 นาที จะได้จำนวนงานต่อคนเท่ากับ 5 งาน ดังรูปที่ 19

จากนั้นแปลงความต้องการใช้บริการตามช่วงเวลาของวันในสัปดาห์ (งาน) ให้เป็นความต้องการจำนวนพนักงาน (คน) จากสมการที่ 1

$$\text{ความต้องการพนักงาน (คน)} = \frac{\text{ความต้องการใช้บริการ(งาน)}}{\text{จำนวนงานที่พนักงานทำได้ ต่อ คน}} \quad (1)$$

เวลา	ความต้องการใช้บริการตาม ช่วงเวลาของวันในสัปดาห์ (งาน)						ระยะเวลา ให้บริการ มาตรฐาน (นาที)	จำนวนงานต่อคน (รายชั่วโมง)
	จ	อ	ท	พ	ศ	อา		
09:30-10:30	27	34	39	24	30	30	12.72	5
10:30-11:30								
11:30-12:30								
12:30-13:30								
13:30-14:30								
14:30-15:30	40	39	48	43	39	40		
15:30-16:30								
16:30-17:30								
17:30-18:30								
18:30-19:30	41	52	36	30	22	26	18	
19:30-20:30								

รูปที่ 19 การหาจำนวนงานที่พนักงานที่ทำได้ของงาน
บริการหลังการขายต่อคน

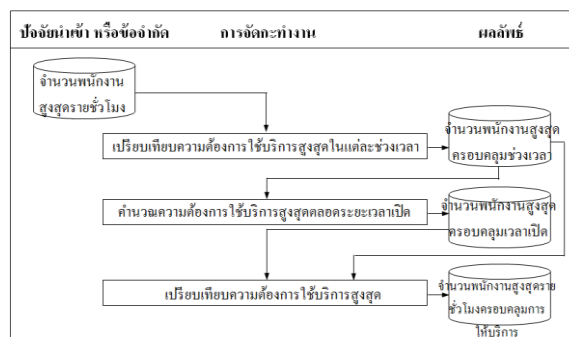
ยกตัวอย่างเช่น ความต้องการจำนวนพนักงาน (คน)
ของงานบริการหลังการขายในวันจันทร์ของช่วงเวลา
ที่ 1 จากการแทนค่าในสูตร จะได้ 27หาร 5 เท่ากับ 6 คน และ
หาค่าความต้องการจำนวนพนักงาน (คน) ของช่วงเวลา
ที่ 2 เท่ากับ 9 จะได้ค่าความต้องการจำนวนพนักงานของ
ช่วงเวลา
ที่ 1 และ 2 รวมกันจะเท่ากับ 14 (6, 9 และ 14
เป็นค่าที่คำนวณได้แล้วปัดเศษขึ้นเป็นเลขจำนวนเต็ม) ดัง
รูปที่ 20 โดยผลลัพธ์ที่ได้คือ จำนวนพนักงานที่ต้องการ
สูงสุดเพื่อรองรับการให้บริการ โดยใช้เป็นปัจจัยนำเข้าของ
ขั้นตอนถัดไป

เวลา	ความต้องการใช้บริการตาม ช่วงเวลาของวันในสัปดาห์ (งาน)						จำนวนงานต่อ คน (รายชั่วโมง)	ความต้องการจำนวนพนักงาน (คน)					
	จ	อ	ท	พ	ศ	อา		จ	อ	ท	พ	ศ	อา
09:30-10:30	27	34	39	24	30	30	5	6	7	8	5	6	9
10:30-11:30													
11:30-12:30													
12:30-13:30													
13:30-14:30													
14:30-15:30	40	39	48	43	39	40		8	8	10	9	8	10
15:30-16:30													
16:30-17:30													
17:30-18:30													
18:30-19:30	41	52	36	30	22	26	18	9	11	8	6	5	4
19:30-20:30								14	18	16	11	12	13

รูปที่ 20 การแปลงความต้องการใช้บริการเป็นจำนวน
พนักงานให้บริการของงานบริการหลังการขาย

4.2 การจัดกะทำงาน

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนพนักงาน
สูงสุดในแต่ละกะทำงานรายวันให้สามารถครอบคลุม
ความต้องการใช้บริการของลูกค้าตั้งแต่ชั่วโมงแรกที่เปิด
ร้านสาขาตลอดจนชั่วโมงสุดท้ายก่อนปิดร้านสาขา ให้
มั่นใจได้ว่าลูกค้าที่เข้าใช้บริการทุกคนได้รับการ โดย
ผลลัพธ์ที่ได้ คือ จำนวนพนักงานสูงสุดรายชั่วโมงที่
ครอบคลุมการให้บริการของร้านสาขา ดังรูปที่ 21 และนำ
เป็นปัจจัยนำเข้าในขั้นตอนถัดไป โดยที่การจัดกะทำงาน
แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 21 การจัดกะทำงานของร้านสาขา

1) การเปรียบเทียบความต้องการใช้บริการสูงสุดใน
แต่ละช่วงเวลา เริ่มจากการหาค่าความต้องการพนักงาน
สูงสุดในแต่ละช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลาที่ 1, 2 และ 3
ยกตัวอย่างเช่น ความต้องการจำนวนพนักงาน (คน) ของ
งานบริการหลังการขายในวันจันทร์ของช่วงเวลา
ที่ 1 เท่ากับ 6 คน ช่วงเวลาที่ 2 เท่ากับ 9 และช่วงเวลา
ที่ 3 เท่ากับ 8 เป็นต้น จากนั้นเปรียบเทียบค่าที่ได้ในช่วงเวลาที่
1, 2 และ 3 เพื่อหาค่าความต้องการใช้บริการสูงสุดในแต่ละ
ช่วงเวลา ซึ่งในตัวอย่างนี้ก็คือ 9 คน

2) การคำนวณความต้องการใช้บริการสูงสุดตลอด
ระยะเวลาเปิดร้านสาขาเป็นการหาค่าความต้องการ
พนักงานสูงสุดที่ครอบคลุมตลอดระยะเวลาเปิดร้านสาขา
รายชั่วโมง เกิดจากค่าความต้องการจำนวนพนักงานใน
ช่วงเวลา
ที่ 1 และ 2 รวมกันเพื่อให้ทราบถึงจำนวน
พนักงานที่ต้องพิจารณาในการจัดกะทำงานให้ครอบคลุม
ความต้องการใช้บริการในช่วงต้นของการเปิดร้าน และ

ช่วงท้ายของการปิดร้าน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากข้อ 1) ยกตัวอย่างเช่น ค่าความต้องการจำนวนพนักงานของงานบริการหลังการขายในวันจันทร์ช่วงเวลาที่ 1 และ 2 รวมกันจะเท่ากับ 14 คน

3) การเปรียบเทียบความต้องการใช้บริการสูงสุดเป็นการเปรียบเทียบความต้องการพนักงานที่ได้จากข้อ 1 และ 2 เพื่อจัดพนักงานลงกะทำงานโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้จำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดแต่ต้องครอบคลุมความต้องการใช้บริการรายชั่วโมง

จากตัวอย่างนี้จะพบว่า ค่าความต้องการที่ได้จากข้อ 1 เท่ากับ 9 และค่าความต้องการที่ได้จากข้อ 2 คือ 14 ซึ่งค่าความต้องการของช่วงเวลาที่ 1 น้อยกว่าช่วงเวลาที่ 2 ดังนั้นพิจารณาการจัดกะทำงานภายใต้เงื่อนไขแรกคือ จัดจำนวนพนักงานที่ต้องการของช่วงเวลาที่ 1 ในที่นี้คือ 6 ลงกะทำงานที่ 1 และจัดจำนวนพนักงานที่ต้องการของช่วงเวลาที่ 2 ในที่นี้คือ 9 ลงกะทำงานที่ 2 ตามลำดับ แสดงตัวอย่างการจัดกะทำงาน ดังรูปที่ 22

เวลา	จำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงาน (คน)						
	จ	อ	ท	พ	ก	ส	อา
09:30-10:30	6	7	8	5	6	6	9
10:30-11:30							
11:30-12:30							
12:30-13:30							
13:30-14:30							
14:30-15:30							
15:30-16:30							
16:30-17:30							
17:30-18:30							
18:30-19:30	9	11	8	6	5	6	4
19:30-20:30							

รูปที่ 22 การระบุจำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงานของงานบริการหลังการขาย

จากนั้นนำค่าจำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงาน (คน) ในวัน มารวมกันเป็นจำนวนพนักงานทุกกะทำงานตามช่วงเวลา เพื่อหาค่าความต้องการจำนวนพนักงานสูงสุดที่ครอบคลุมทุกกะทำงานในหนึ่งวัน ยกตัวอย่างเช่น จำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงาน (คน) ในกะทำงานที่

1 เท่ากับ 6 คน และกะทำงานที่ 2 เท่ากับ 9 คน ดังนั้นในช่วงเวลาที่ 1 จะมีจำนวนพนักงานของกะทำงานที่ 1 เป็น 6 คน และช่วงเวลาที่ 2 จะมีจำนวนพนักงานของกะทำงานที่ 2 เป็น 9 คน ส่วนช่วงเวลาที่ 3 จะมีจำนวนพนักงานของกะทำงานที่ 1 และ 2 รวมกัน ได้แก่ 6 และ 9 เป็น 15 คน เป็นต้น ดังรูปที่ 23 และทำเช่นเดียวกันในทุกตัวแทนวันของสัปดาห์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดกะทำงานคือ จำนวนพนักงานที่ต้องการของทุกกะทำงานตามช่วงเวลารายชั่วโมง เพื่อใช้เป็นปัจจัยนำเข้าในขั้นตอนถัดไป ดังรูปที่ 24 เมื่อจัดกะทำงานของพนักงานที่มีหน่วยเวลาใหญ่กว่าแล้วเสร็จ ต่อไปจึงจัดวันหยุดและจัดช่วงเวลาพัก ซึ่งมีหน่วยเวลาย่อยลงมา จะอธิบายรายละเอียดในส่วนถัดไป

เวลา	จำนวนพนักงานของแต่ละกะทำงาน (คน)		จำนวนพนักงานทุกกะทำงานตามช่วงเวลา	จำนวนพนักงานทุกกะทำงานรายชั่วโมง
	จันทร์		จันทร์	จันทร์
09:30-10:30	6		6	6
10:30-11:30				6
11:30-12:30			15	15
12:30-13:30				15
13:30-14:30				15
14:30-15:30				15
15:30-16:30				15
16:30-17:30				15
17:30-18:30				15
18:30-19:30		9	9	9
19:30-20:30				9
			Max = 15	

รูปที่ 23 การหาจำนวนพนักงานทุกกะทำงานตามช่วงเวลาของงานบริการหลังการขายสำหรับตัวแทนวันจันทร์

เวลา	จำนวนพนักงานทุกกะทำงานตามช่วงเวลา						
	จ	อ	พ	พฤ	ศ	ส	อา
09:30-10:30	6	7	8	5	6	6	9
10:30-11:30							
11:30-12:30	15	18	16	11	11	12	13
12:30-13:30							
13:30-14:30							
14:30-15:30							
15:30-16:30							
16:30-17:30							
17:30-18:30							
18:30-19:30	9	11	8	6	5	6	4
19:30-20:30							
	15	18	16	11	11	12	13

รูปที่ 24 จำนวนพนักงานที่ต้องการของตัวแทนวันในสัปดาห์ทุกกะทำงานตามช่วงเวลา

4.3 การจัดวันหยุด

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนพนักงานต่ำสุดที่หยุดรายวัน ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาต่ำสุด ด้วยวิธีโปรแกรมเชิงเส้นจาก Excel Solver ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Min } Z = \text{Min } \sum_{i=1}^n X_{2i} \quad (1)$$

ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัด

$$X_{1ij} = 0, 1 ; i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{2i} \geq 0 ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$Y_{1j} - \sum_{i=1}^n (X_{1ij} \times X_{2i}) = 0 ; i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$Y_{2j} - Y_{3j} = 1 ; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$Y_{1j} - Y_{2j} \geq 0 ; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

โดยที่

Z คือ จำนวนพนักงานรวมที่ใช้ทุกวันหยุดที่เป็นไปได้ที่ i วันหยุด

X_{1ij} คือ จำนวนเชิงปริมาณแทนวันหยุดหรือวันทำงานของวันหยุดที่เป็นไปได้ที่ i ณ วันที่ j ซึ่ง $X_{1i} = 1$ เมื่อเป็นวันทำงาน และ $X_{1i} = 0$ เมื่อเป็นวันหยุด

X_{2i} คือ จำนวนพนักงานที่ใช้ต่อวันหยุดที่เป็นไปได้ที่ i วันหยุด

Y_{1j} คือ ผลรวมของจำนวนเชิงปริมาณแทนวันหยุดหรือวันทำงานและจำนวนพนักงานที่ใช้ต่อวันหยุดที่เป็นไปได้ที่ i วันหยุด

Y_{2j} คือ ผลรวมของจำนวนพนักงานขั้นต่ำที่ใช้และจำนวนพนักงานที่เพื่อสำหรับจัดช่วงเวลาพัก

Y_{3j} คือ จำนวนพนักงานพนักงานขั้นต่ำที่ต้องการ

i คือ จำนวนวันหยุดที่เป็นไปได้ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

j คือ ลำดับวันในสัปดาห์ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)

ผลลัพธ์ที่ได้ คือ จำนวนพนักงานต่ำสุดรายวันของแต่ละวันหยุดที่เป็นไปได้ และนำไปเป็นปัจจัยนำเข้าในขั้นตอนถัดไป

4.4 การจัดช่วงเวลาพักรับประทานอาหาร

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนพนักงานต่ำสุดที่พักรับประทานอาหารในวัน โดยมีค่าใช้จ่ายในการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขาต่ำสุด ซึ่งได้ประยุกต์วิธีโปรแกรมเชิงเส้นจาก Excel Solver สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\text{Min } Z = \text{Min } \sum_{i=1}^n (X_{2i} \times X_{3i}) \quad (1)$$

ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัด

$$X_{1ij} = 0, 1 ; i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{2i} \geq 0 ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$X_{3i} = 1, 3 \quad (4)$$

$$Y_{1j} \geq Y_{2j} ; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

$$Y_3 - \sum_{i=1}^n X_{2i} \geq 0 \quad (6)$$

$$Y_{1j} - \sum_{i=1}^n (X_{1ij} \times X_{2i}) = 0 ; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

โดยที่

Z คือ จำนวนพนักงานที่ใช้ทุกช่วงเวลาพักรับประทานอาหารกลางวันที่ i ช่วงเวลาพักรับประทานอาหารกลางวัน

X_{1ij} คือ จำนวนเชิงปริมาณแทนชั่วโมงพักรับประทานอาหารหรือชั่วโมงทำงานของช่วงเวลาพักรับประทานอาหารที่เป็นไปได้ที่ i ณ วันที่

- j ซึ่ง $X_{1i} = 1$ เมื่อเป็นชั่วโมงทำงาน และ $X_{1i} = 0$ เมื่อเป็นชั่วโมงพัก
- X_{2i} คือ จำนวนพนักงานที่ใช้ต่อช่วงเวลาพักที่เป็นไปได้ที่ i ช่วงเวลาพักรับประทานอาหาร
- X_{3i} คือ จำนวนเชิงปริมาณแทนค่าน้ำหนักแต่ละช่วงเวลาพักที่เป็นไปได้ที่ i ซึ่ง $X_{3i} = 1$ แสดงค่าน้ำหนักมีความสำคัญมาก และ $X_{3i} = 3$ แสดงค่าน้ำหนักมีความสำคัญน้อย
- Y_{1j} คือ ผลรวมของจำนวนเชิงปริมาณแทนชั่วโมงพักหรือชั่วโมงทำงานและจำนวนพนักงานที่ใช้ต่อช่วงเวลาพักที่เป็นไปได้ที่ i ช่วงเวลาพักรับประทานอาหาร
- Y_{2j} คือ จำนวนพนักงานต่ำสุดที่ต้องการ
- Y_3 คือ จำนวนพนักงานต่ำสุดที่ใช้ในวันใดๆ
- i คือ จำนวนช่วงเวลาพักรับประทานอาหารกลางวันที่เป็นไปได้ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
- j คือ ลำดับชั่วโมงในช่วงเวลาเปิดร้านสาขา ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
- ผลลัพธ์ที่ได้ คือ จำนวนพนักงานต่ำสุดรายวันของแต่ละช่วงเวลาพักที่เป็นไปได้

5. การทดสอบวิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่นำเสนอ

การทดสอบวิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่นำเสนอ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ระหว่างวิธีการที่นำเสนอและวิธีการปัจจุบัน โดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบประกอบด้วย 1) สามารถจัดกะทำงานให้ครอบคลุมระยะเวลาเปิดร้านสาขาหรือไม่ 2) สามารถจัดตารางการทำงานที่ระบุวันหยุดและช่วงเวลาพักหรือไม่ และ 3) ไม่เกิดผลกระทบกับระดับการให้บริการของร้านสาขา (ระยะเวลารอคอยรับบริการ) เครื่องมือที่ทำการทดสอบเป็นการจำลองสถานการณ์การให้บริการของร้านสาขาโดยประยุกต์จาก Excel Spreadsheet เพื่อรองรับความต้องการใช้บริการของร้านสาขาจากระยะเวลาการให้บริการของพนักงาน

5.1 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

ข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากแผนการจัดเตรียมกำลังคนรายชั่วโมง กล่าวคือจำนวนพนักงานที่ใช้ในวัน กะทำงาน วันหยุดและช่วงเวลาพักของพนักงานลงใน Excel Spreadsheet จะได้จุดเวลาที่เคาน์เตอร์พร้อมให้บริการ ดังรูปที่ 25 ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในส่วนถัดไป สำหรับข้อมูลย้อนหลังที่ได้จากระบบคิว ได้แก่ ข้อมูลความต้องการใช้บริการของลูกค้าซึ่งก็คือ จุดเวลาเข้ารับบริการ และข้อมูลระยะเวลาให้บริการของพนักงาน ตั้งแต่วันที่ 7-13 กันยายน พ.ศ. 2558 ของร้านสาขา A และ B ซึ่งร้านสาขามีกะทำงานเท่ากัน คือ 3 กะทำงาน (ดูรูปที่ 26)

5.2 วิธีการทดสอบ

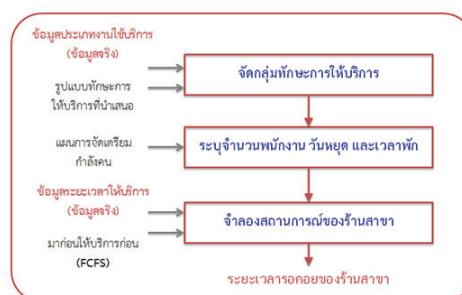
วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) จัดกลุ่มทักษะการให้บริการ โดยนำค่าความต้องการใช้บริการที่ได้จากฐานข้อมูลมาจัดกลุ่มทักษะการทำงานตามรูปแบบทักษะการให้บริการที่นำเสนอ 2) ระบุจำนวนพนักงานวันหยุด และเวลาพักที่ได้จากแผนการจัดเตรียมกำลังคน และ 3) จำลองสถานการณ์ของร้านสาขาด้วยเงื่อนไขการให้บริการแบบลูกค้าที่เข้ามาก่อนจะได้รับบริการก่อน (First Come First Serve: FCFS) โดยข้อมูลระยะเวลาให้บริการที่ใช้ได้มาจากฐานข้อมูลของธุรกิจกรณีศึกษาในช่วงที่ทดสอบ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ คือ ค่าระยะเวลารอคอยรับบริการของร้านสาขา เพื่อเปรียบเทียบกับตัวชี้วัดสมรรถนะของร้านสาขา ดังรูปที่ 27

จุดเวลาที่เคาน์เตอร์พร้อมให้บริการ		
1	2	3
9:30:00	11:30:00	11:30:00
11:19:07	11:30:00	11:30:00
11:47:47	11:30:00	11:30:00
11:47:47	11:57:25	11:30:00
11:47:47	11:57:25	12:06:02
12:12:18	11:57:25	12:06:02
12:12:18	12:05:04	12:06:02
12:21:43	12:05:04	12:06:02
12:55:51	12:05:04	12:06:02
13:23:47	12:05:04	12:06:02
13:23:47	13:31:17	12:06:02
16:07:10	16:17:10	16:07:41
18:50:24	18:47:43	18:47:00
18:50:24	18:47:43	18:53:52
18:50:24	18:56:46	18:53:52
18:53:17	18:56:46	18:53:52
19:19:51	18:56:46	18:53:52
19:19:51	18:56:46	19:10:47
19:19:51	19:18:35	19:10:47

รูปที่ 25 ข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้จากแผนการจัดเตรียมกำลังคนรายชั่วโมง (วิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่น่าสนใจของงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ ร้านสาขา B วันที่ 8 ก.ย. 2558)

ลำดับงาน	จุดเวลาเข้ารับบริการ	ระยะเวลาให้บริการ (ชั่วโมง: นาที: วินาที)
1	11:14:02	0:05:05
2	11:37:26	0:10:21
3	11:40:07	0:17:18
4	11:46:46	0:19:16
5	11:56:37	0:15:41
6	12:02:04	0:03:00
7	12:16:11	0:05:32
8	12:44:56	0:10:55
9	13:19:32	0:04:15
10	13:22:50	0:08:27
30	15:54:04	0:01:13
55	18:36:23	0:03:21
56	18:36:42	0:06:52
57	18:39:18	0:09:03
58	18:43:05	0:02:53
59	18:43:15	0:26:34
60	18:51:44	0:16:55
61	19:14:51	0:03:44

รูปที่ 26 ข้อมูลย้อนหลังที่ได้จากระบบคิว (งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ ร้านสาขา B วันที่ 8 ก.ย. 2558)



รูปที่ 27 วิธีการทดสอบวิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่น่าสนใจ

ขั้นตอนการจำลองสถานการณ์ของร้านสาขา จะอธิบายผ่านการออกแบบ Excel Spreadsheet แบ่งเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 28 โดยเริ่มจากการนำข้อมูลจริงที่ได้จากฐานข้อมูลของธุรกิจกรณีศึกษา คือ ค่าความต้องการใช้บริการของร้านสาขา และค่าระยะเวลาให้บริการของพนักงานที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลาที่ทดสอบมาเป็นปัจจัย

นำเข้า แสดงดังหมายเลข 1 จากนั้นนำแผนการจัดตารางการทำงานที่ได้จากการจัดเตรียมกำลังคนมาระบุไว้ในแต่ละกะทำงานต้องใช้พนักงานกะละกี่คน แต่ละกะทำงานมีจุดเวลาเริ่มต้นให้บริการที่เวลาใด เช่น กะทำงานที่ 1 เริ่มให้บริการได้ที่เวลา 9:30 น. จำนวน 1 คน และกะทำงานที่ 2 เริ่มให้บริการได้ที่เวลา 11:30 น. จำนวน 2 คน จากนั้นจึงระบุวันหยุดและช่วงเวลาพักที่ได้จากแผนการจัดเตรียมกำลังคนว่า มีจำนวนกี่คนที่หยุดหรือพักรับประทานอาหาร โดยระบุไว้ที่หมายเลข 3 สำหรับเงื่อนไขการให้บริการภายในร้านสาขาที่แสดงที่หมายเลข 3 เป็นการแสดงว่าพนักงานคนใดพร้อมให้บริการภายใต้เงื่อนไขว่าลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการก่อนจะได้รับการบริการก่อน จากนั้นจะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ที่หมายเลข 4

3) FCFS									
ลำดับงาน	จุดเวลาเข้ารับบริการ	ระยะเวลาให้บริการ (ชั่วโมง: นาที: วินาที)	ระยะเวลาการคอยรับบริการ (ชั่วโมง: นาที: วินาที)	จุดเวลาให้บริการเสร็จ	เคาน์เตอร์ที่รับบริการ	จุดเวลาที่เคาน์เตอร์พร้อมให้บริการ			
						1	2	3	
1	11:14:02	0:05:05	0:00:00	11:19:07	1	9:30:00	11:30:00	11:30:00	
2	11:37:26	0:10:21	0:00:00	11:47:47	1	11:19:07	11:30:00	11:30:00	
3	11:40:07	0:17:18	0:00:00	11:57:25	2	11:47:47	11:57:25	11:30:00	
4	11:46:46	0:19:16	0:00:00	12:06:02	3	11:47:47	11:57:25	12:06:02	
5	11:56:37	0:15:41	0:00:00	12:12:18	1	12:12:18	11:57:25	12:06:02	
6	12:02:04	0:03:00	0:00:00	12:05:04	2	12:12:18	12:05:04	12:06:02	
7			0:00:00	12:21:43	1				
8	1) ความต้องการให้บริการ และ ระยะเวลาให้บริการ		0:00:00	12:55:51	1	2) แผนการจัดเตรียม กำลังคน			
9			0:00:00	13:23:47	1				
10			0:00:00	13:31:17	2				
30			0:11:35	16:07:10	1				
55	18:36:23	0:03:21	0:07:16	18:47:00	3	18:50:24	18:47:43	18:47:00	
56	18:36:42	0:06:52	0:10:18	18:53:52	3	18:50:24	18:47:43	18:53:52	
57	18:39:18	0:09:03	0:08:25	18:56:46	2	18:50:24	18:56:46	18:53:52	
58	18:43:05	0:02:53	0:07:19	18:53:17	1	18:53:17	18:56:46	18:53:52	
59	18:43:15	0:26:34	0:10:02	19:19:51	1	19:19:51	18:56:46	18:53:52	
60	18:51:44	0:16:55	0:02:08	19:10:47	3	19:19:51	18:56:46	19:10:47	
61	19:14:51	0:03:44	0:00:00	19:18:35	2	19:19:51	19:18:35	19:10:47	
				0:01:10					

4) ระยะเวลาการคอยรับบริการ

รูปที่ 28 ขั้นตอนการจำลองสถานการณ์ของร้านสาขา (วิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่น่าเสนอของงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ ร้านสาขา B วันที่ 8 ก.ย. 2558)

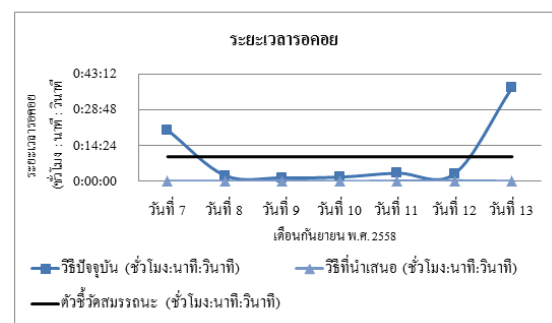
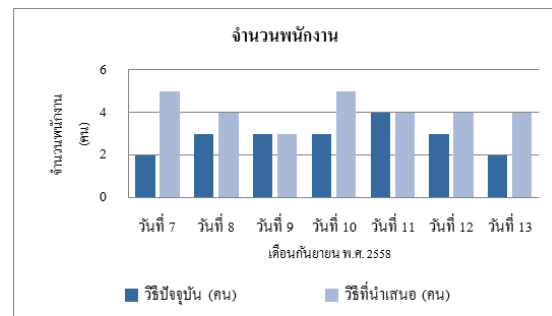
5.3 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบของ 2 ร้านสาขาด้วยวิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่น่าเสนอตรงตามวัตถุประสงค์การทดสอบ คือ 1) จัดกะทำงานให้ครอบคลุมระยะเวลาเปิดร้านสาขา 2) จัดตารางการทำงานที่ระบุวันหยุดและช่วงเวลาพัก และ 3) ไม่กระทบกับระดับการให้บริการของร้านสาขาในงานทุกประเภท (งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์, งานบริการหลังการ

ขาย และงานขายสินค้าและบริการ) แสดงรายละเอียดได้ดังนี้

การจัดเตรียมกำลังคน พบว่า วิธีการปัจจุบันมีการจัดเตรียมกำลังคนไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้บริการในบางวันของสัปดาห์ กระทั่งระดับการให้บริการของร้านสาขา ได้แก่ งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ของร้านสาขา A มี 2 วันในสัปดาห์ที่จัดสรรจำนวนพนักงานแล้วกระทบกับตัวชี้วัดระยะเวลาการคอยรับบริการของร้านสาขา คือ วันที่ 7 และวันที่ 13 ดังรูปที่ 29 รวมถึงงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ของร้านสาขา B มี 1 วันในสัปดาห์ที่จัดสรรจำนวนพนักงานแล้วกระทบกับตัวชี้วัดระยะเวลาการคอยรับบริการของร้านสาขา คือ วันที่ 8 ดังรูปที่ 30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำนวนพนักงานที่จัดสรรด้วยวิธีปัจจุบันยังไม่สามารถตอบวัตถุประสงค์ของการทดสอบข้อ 3) คือ ไม่กระทบกับระดับการให้บริการของร้านสาขาในงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์

งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ (ร้านสาขา A)



รูปที่ 29 ผลการทดสอบของวิธีปัจจุบันและวิธีที่น่าเสนอของงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ (ร้านสาขา A)

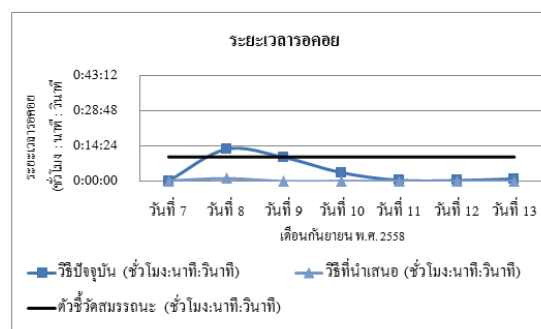
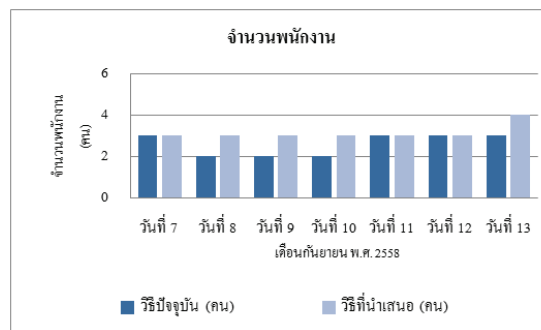
สำหรับวิธีการจัดเตรียมกำลังคนในปัจจุบันของงานขายสินค้าและบริการ พบว่า มีธรรมชาติของการจัดสรรจำนวนพนักงานมากกว่าวิธีที่นำเสนอ (ดูรูปที่ 31 และ 34) เพื่อสร้างรายได้เข้าบริษัทเมื่อเทียบกับงานประเภทบริการ หลังการขายที่ไม่ก่อให้เกิดรายได้ แต่ยังคงพบว่ามีบางวันในสัปดาห์ที่จัดสรรจำนวนพนักงานแล้วกระทบกับตัวชี้วัดระยะเวลาการคอยรับบริการของร้านสาขา A คือ วันที่ 10 ของร้านสาขา A ที่จัดสรรจำนวนพนักงานแล้วกระทบกับตัวชี้วัดระยะเวลาการคอยรับบริการของร้านสาขา ดังรูปที่ 31 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำนวนพนักงานที่จัดสรรด้วยวิธีปัจจุบันยังไม่สามารถตอบวัตถุประสงค์ของการทดสอบข้อ 3) คือ ไม่กระทบกับระดับการให้บริการของร้านสาขาในงานขายสินค้าและบริการ

ในทางกลับกัน พบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถให้บริการโดยไม่กระทบกับระยะเวลาการคอยรับบริการแม้แต่วันเดียว เห็นได้จากระยะเวลาการคอยของวันที่ 7-13 กันยายน พ.ศ.2558 ต่ำกว่าตัวชี้วัดสมรรถนะในงานทุกประเภท ได้แก่ งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์ (ดูรูปที่ 29- 30), งานบริการหลังการขาย (ดูรูปที่ 32-33) และงานขายสินค้าและบริการ (ดูรูปที่ 31 และ 34)

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ระยะเวลาการคอยต่ำกว่าตัวชี้วัดในงานแต่ละประเภท ดังรูปที่ 35 กล่าวคือ วิธีปัจจุบันของงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์มีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ระยะเวลาการคอยต่ำกว่าตัวชี้วัดของร้านสาขา A และ B อยู่ที่ 71% (5 วันในสัปดาห์ที่ไม่กระทบกับตัวชี้วัด) และ 86% (6 วันในสัปดาห์ที่ไม่กระทบกับตัวชี้วัด) ตามลำดับ สำหรับงานขายสินค้าและบริการของร้านสาขา A มีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ระยะเวลาการคอยต่ำกว่าตัวชี้วัดอยู่ที่ 86% (6 วันในสัปดาห์ที่ไม่กระทบกับตัวชี้วัด) ขณะที่วิธีที่นำเสนอสามารถให้บริการโดยไม่กระทบกับระยะเวลาการคอยรับบริการแม้แต่วันเดียว มีเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวันที่ระยะเวลาการคอยต่ำกว่าตัวชี้วัดอยู่ที่ 100% (ทุกวันในสัปดาห์ที่ไม่กระทบกับตัวชี้วัด)

การจัดเตรียมกำลังคนด้วยวิธีที่นำเสนอนอกจากจะสามารถจัดเตรียมกำลังคนได้ตรงตามวัตถุประสงค์แล้ว มีงานบางประเภทที่สามารถลดจำนวนพนักงานลงได้ โดยที่ไม่กระทบกับระดับการให้บริการ ยกตัวอย่างเช่น การจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขา A ในงานบริการหลังการขายด้วยวิธีปัจจุบันตั้งแต่วันที่ 8 ถึงวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2558 ดังรูปที่ 32 พบว่าวิธีปัจจุบันจัดเตรียมกำลังคนไว้ที่ 19 ถึง 23 คนซึ่งสามารถรองรับการให้บริการโดยระยะเวลาการคอยรับบริการผ่านตัวชี้วัด แต่เมื่อใช้แผนการจัดเตรียมกำลังคนจากวิธีที่นำเสนอสามารถลดจำนวนพนักงานลงได้ รวมถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบยังมีค่าระยะเวลาการคอยรับบริการผ่านตัวชี้วัดเช่นเดียวกับวิธีปัจจุบัน แสดงรายละเอียดการเปรียบเทียบจำนวนพนักงานที่ลดลงได้ดังรูปที่ 36 เช่น วันที่ 8 สามารถลดจำนวนพนักงานจาก 21 คน เป็น 17 คน โดยที่ไม่กระทบกับระยะเวลาการคอยของร้านสาขา เป็นต้น

งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์^๑ (ร้านสาขา B)

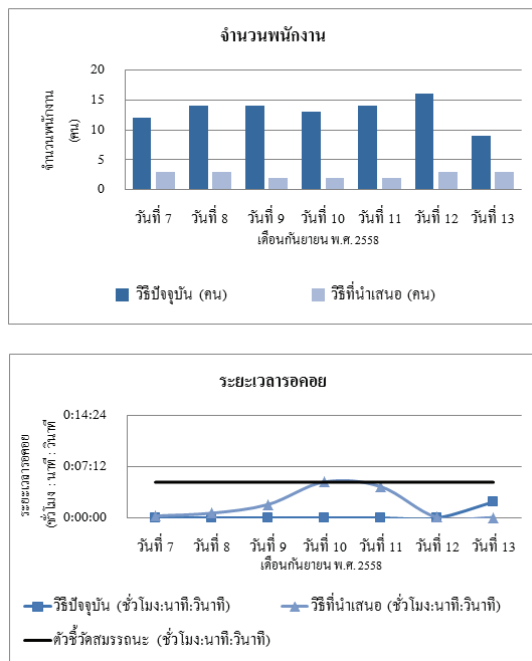


รูปที่ 30 ผลการทดสอบของวิธีปัจจุบันและวิธีที่นำเสนอของงานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์^๑ (ร้านสาขา B)

การจัดกะทำงาน พบว่า หากจัดกะทำงานไม่ครอบคลุมความต้องการใช้บริการรายชั่วโมงแม้ว่าจะประเมินกำลังคนได้จำนวนสูง จะกระทบกับระดับการให้บริการ ดังผลการทดสอบของร้านสาขา A ที่จัดด้วยวิธีการปัจจุบันของวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2558 ซึ่งจัดกะทำงาน 3 กะทำงานด้วยระยะเวลาเริ่มต้นที่ 11:30 น. แต่จุดเวลาที่ลูกค้าคนแรกมาใช้บริการ คือ เวลา 10:09 น. เกิดการรอคอยรับบริการ ดังรูปที่ 34

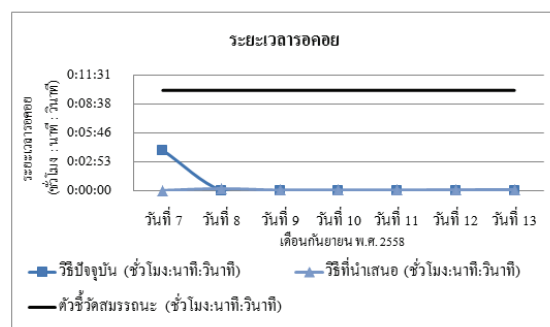
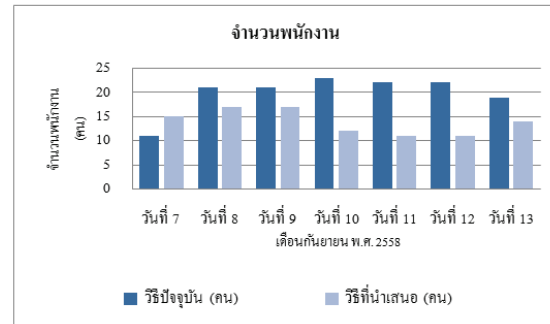
จากผลการทดสอบข้างต้น วิธีการจัดเตรียมกำลังคนที่นำเสนอสามารถตอบวัตถุประสงค์ของการทดสอบได้ทั้ง 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) สามารถจัดกะทำงานให้ครอบคลุมระยะเวลาเปิดร้านสาขา 2) สามารถจัดตารางการทำงานที่ระบุวันหยุดและช่วงเวลาพักฯ และ 3) ไม่เกิดผลกระทบกับระดับการให้บริการของร้านสาขา (ระยะเวลารอคอยรับบริการ)

งานขายสินค้าและบริการ (ร้านสาขา A)



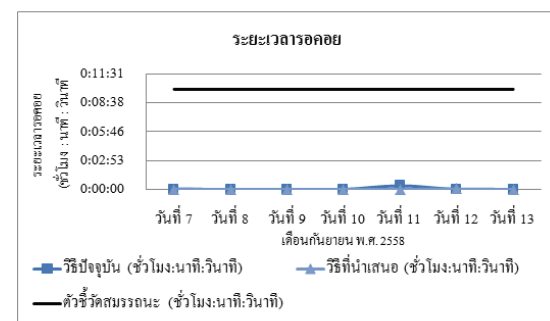
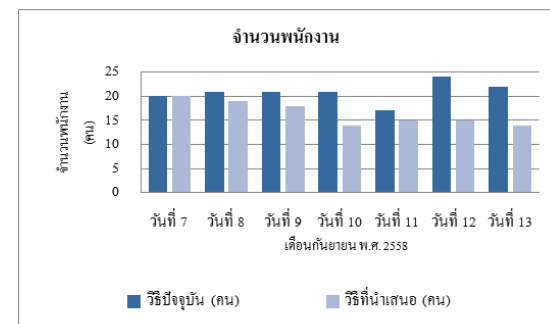
รูปที่ 31 ผลการทดสอบของวิธีปัจจุบันและวิธีที่นำเสนอของงานขายสินค้าและบริการ (ร้านสาขา A)

งานบริการหลังการขาย (ร้านสาขา A)



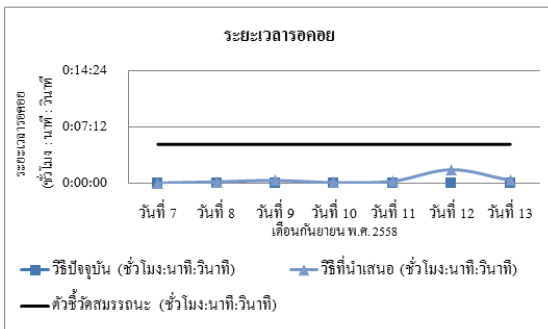
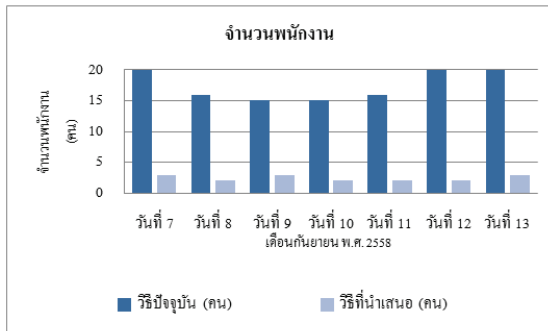
รูปที่ 32 ผลการทดสอบของวิธีปัจจุบันและวิธีที่นำเสนอของงานบริการหลังการขาย (ร้านสาขา A)

งานบริการหลังการขาย (ร้านสาขา B)



รูปที่ 33 ผลการทดสอบของวิธีปัจจุบันและวิธีที่นำเสนอของงานบริการหลังการขาย (ร้านสาขา B)

งานขายสินค้าและบริการ (ร้านสาขา B)



รูปที่ 34 ผลการทดสอบของวิธีปัจจุบันและวิธีที่นำเสนอของงานขายสินค้าและบริการ (ร้านสาขา B)

ร้านสาขา A	จำนวนวันที่ระยะเวลาคอยต่ำกว่าตัวชี้วัด			
ประเภทงานให้บริการ	จำนวนวัน		% ที่ต่ำกว่า	
	วิธีปัจจุบัน	วิธีใหม่	วิธีปัจจุบัน	วิธีใหม่
งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์	5	7	71%	100%
งานบริการหลังการขาย	7	7	100%	100%
งานขายสินค้าและบริการ	6	7	86%	100%

ร้านสาขา B	จำนวนวันที่ระยะเวลาคอยต่ำกว่าตัวชี้วัด			
ประเภทงานให้บริการ	จำนวนวัน		% ที่ต่ำกว่า	
	วิธีปัจจุบัน	วิธีใหม่	วิธีปัจจุบัน	วิธีใหม่
งานส่งซ่อมแซมอุปกรณ์	6	7	86%	100%
งานบริการหลังการขาย	7	7	100%	100%
งานขายสินค้าและบริการ	7	7	100%	100%

รูปที่ 35 เปอร์เซนต์ของจำนวนวันที่ระยะเวลาคอยรับบริการมีค่าต่ำกว่าตัวชี้วัด

ร้านสาขา A	วันที่ 7		วันที่ 8		วันที่ 9		วันที่ 10		วันที่ 11		วันที่ 12		วันที่ 13	
	เดิม	ใหม่	เดิม	ใหม่	เดิม	ใหม่	เดิม	ใหม่	เดิม	ใหม่	เดิม	ใหม่	เดิม	ใหม่
รวม	25	23	38	24	38	22	39	19	40	17	41	18	30	21
งานส่งซ่อม	2	5	3	4	3	3	5	4	4	3	4	2	4	4
งานหลังการขาย	11	15	21	17	21	17	23	12	22	11	22	11	19	14
งานขาย	12	3	14	3	14	2	13	2	14	2	16	3	9	3
ระยะเวลาคอย	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
เทียบกับตัวชี้วัด	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
งานขาย	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

0 = ไม่ผ่านตัวชี้วัด, 1 = ผ่านตัวชี้วัด

รูปที่ 36 จำนวนพนักงานของงานบริการหลังการขายและระยะเวลาคอยรับบริการเทียบกับตัวชี้วัดของร้านสาขา

6. สรุปผล

วิธีการจัดเตรียมกำลังคนของร้านสาขานำเสนอ ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ 1) การแปลงความต้องการใช้บริการเป็นจำนวนพนักงาน 2) การจัดกะทำงาน 3) การจัดวันหยุด และ 4) การจัดช่วงเวลาพักรับประทานอาหารกลางวัน สามารถรองรับความต้องการใช้บริการรายชั่วโมงของทุกร้านสาขา อีกทั้งช่วยลดการตัดสินใจของการประเมินกำลังคนซ้ำซ้อน เกิดประสิทธิภาพของการจัดการตารางทำงานจากวิธีการที่เป็นมาตรฐาน รวมถึงสามารถลดช่องว่างจากทักษะและความชำนาญของผู้จัดการ จึงสามารถนำไปปฏิบัติหรือประยุกต์ใช้ได้จริงในการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jurgen, S. and Rene, S. Modelling and Solving Workforce Scheduling Problems. [Online] available: <https://www.researchgate.net>.
- [2] จุฑามาศ เทวินบูรานวงศ์. การประยุกต์เงินเนติกอัลกอริทึมสำหรับการจัดการตารางเวรของพยาบาลประจำการ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

- [3] ปณิฉัตร นุชจาวิทยาพร. การออกแบบระบบการจัดเตรียมยานพาหนะสำหรับระบบการขนส่ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [4] ศุภกร สุเมธาภิวัฒน์ บุญฤทธิ์ อินทยศ และชวลิต จินอนันต์. เทคนิคคอลัมน์เจเนอเรชันสำหรับปัญหาการมอบหมายงานให้กับพนักงานที่มีการปรับดูแลภาระงานและรายได้. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 2556; 277 – 286.
- [5] นกัศวรณ มั่งมี. ระบบสนับสนุนการมอบหมายงานให้กับพนักงานขับรถที่มีรูปแบบการเดินรถแบบต่อเนื่องในอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [6] Fred, G., Claude, M.M. The general employee scheduling problem: An integration of MS and AI. *Computer and Operation Research*, 1986;13: 563–573.



การสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบาง

ไร้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลว

Axisymmetric Free Vibration of Fluid-Filled Membrane

วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา^{1,*}

Weeraphan Jiammeepreecha^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Suranarai Rd., Nai-Muang, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

*E-mail: weeraphan.ji@rmuti.ac.th, Tel. 091-779-0935, Fax. 044-233-074

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวรูปทรงกลมที่มีฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นภายใต้การจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร การคำนวณหารูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงค้ำจะอาศัยหลักการของเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ การสร้างฟังก์ชันพลังงานของระบบโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงค้ำและของเหลวที่บรรจุจะอาศัยหลักการของงานเสมือนในเทอมของค่าการเสียรูปและใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงค้ำ โดยการจำลองโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงค้ำด้วยชิ้นส่วนของคานแบบ 1 มิติ แบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้วแบบทรงกลม ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจะพบว่าโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและค่าแรงดันภายในเริ่มต้นจะให้โหมดการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนใกล้เคียงกับโครงสร้างเปลือกบางแบบไม่ได้นบรรจุของเหลวที่พิจารณาผลของแรงค้ำจากงานวิจัยเดิม

ABSTRACT

Axisymmetric free vibration of fluid-filled clamped membrane under constraint volume is presented in this paper. Differential geometry is introduced in order to compute the membrane geometry. Energy functional of the membrane and internal fluid are derived in terms of displacement from the principle of virtual work. Natural frequencies and mode shapes of the fluid-filled membrane can be obtained using finite element method. The membrane is simulated using one-dimensional beam elements described in spherical polar coordinates. Numerical results indicate that the axisymmetric mode shapes of the fluid-filled membrane under constraint volume condition and initial internal pressure are similar to the empty shell as well as available data in the existing literatures.

1. บทนำ

การสั่นของโครงสร้างเปลือกบางรูปครึ่งทรงกลม (Spherical Cap) มีความสำคัญเป็นอย่างมากในงาน

ทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างและวิศวกรรมอากาศยานฝั่งทะเล [1-3] เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและสามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้เป็นอย่างดี

โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงกระทำจากลม, แผ่นดินไหว หรือ คลื่นทะเล เป็นต้น ซึ่งเป็นแรงกระทำแบบพลศาสตร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณา ค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นของโครงสร้าง เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากปัญหา การสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งจะเป็นผลทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ ดังนั้นจึงได้เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับการสั่นของโครงสร้างเปลือกบาง โดยเริ่มต้นจากงานวิจัยของ Kalnins [4] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของแรงคดที่มีต่อค่าการสั่นแบบอิสระตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลมแบบตื้น (Shallow Shell) กับแบบลึก (Deep Shell) โดยใช้ฟังก์ชันลาเจนเดอร์ (Legendre Function) ในการวิเคราะห์ปัญหา ต่อมา Ross [5] ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Approximate Analysis) เพื่อคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นอิสระตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางโดยใช้ฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งจะพบว่ามีความใกล้เคียงกันกับงานวิจัยของ Kalnins [4] จากนั้น Niordson [6] ได้ทำการศึกษาการสั่นอิสระแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลมโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ที่ถูกเขียนใหม่ในรูปแบบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Invariant Form) พร้อมด้วยเงื่อนไขขอบเขตแบบจลนศาสตร์และแบบสถิตศาสตร์ นอกจากนี้ Artioli และ Viola [7] ได้ทำการวิเคราะห์การสั่นอิสระของโครงสร้างเปลือกบางภายใต้การแปรเปลี่ยนเงื่อนไขของฐานรองรับและมุมที่รองรับส่วนโค้งสำหรับโครงสร้างเปลือกบางโดยวิธี Generalized Differential Quadrature (G.Q.D.) และเปรียบเทียบกับคำตอบกับงานวิจัยของ Singh และ Mirza [8] สำหรับการสั่นในโหมดที่ไม่สมมาตรตามแนวแกน (Asymmetric Modes) จะพบว่าให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันและยังสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยของ Lee [9] ที่ได้

ทำการศึกษารูปแบบการสั่นของโครงสร้างเปลือกบางโดยใช้วิธี Pseudospectral

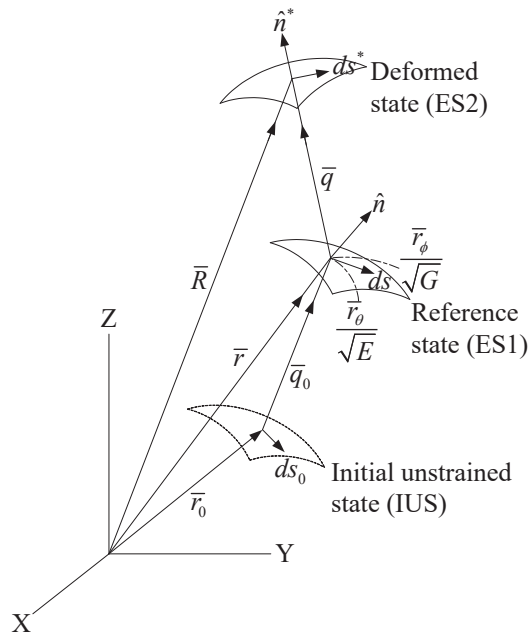
จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น จะพบว่างานวิจัยส่วนมากจะทำการศึกษาเฉพาะค่าการสั่นของโครงสร้างเปลือกบางที่รวมผลของพลังงานความเครียดเนื่องจากแรงคดและแรงคดโดยใช้ทฤษฎีเชลล์ (Shell Theory) เท่านั้น แต่สำหรับในกรณีของโครงสร้างเปลือกบางที่มีความหนา น้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวรัศมีของโครงสร้างที่มีค่า พลังงานความเครียดที่เกิดจากแรงคดจึงมีค่าน้อยมาก สามารถใช้ทฤษฎีเมมเบรน (Membrane Theory) ในการวิเคราะห์ปัญหาแทนได้ โดยจะคิดเฉพาะพลังงาน ความเครียดจากแรงคดเท่านั้น โดยที่โครงสร้างลักษณะ ดังกล่าวนี้นี้จะเรียกว่าโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด สามารถพบได้จากงานวิจัยของ Phadke และ Cheung [10], Wang และคณะ [11], และ Jiammeepreecha และคณะ [12, 13] ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีการศึกษาเรื่องการสั่นน้อยมาก

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้คือเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดรูปครึ่งทรงกลมที่บรรจุของเหลวภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลง ปริมาตร และเนื่องจากการพิจารณาเฉพาะการสั่นแบบ สมมาตรตามแนวแกน ดังนั้นเส้นโค้งเมริเดียน (Meridional Curve) จึงถูกนำมาใช้เป็นเส้นโค้งของ โครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดเพื่อการศึกษา ซึ่ง ลักษณะปัญหาดังกล่าวจะสามารถเขียนได้ในรูปแบบการ แปรผัน (Variational Form) โดยใช้ทฤษฎีของเมมเบรน [14] การหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขสำหรับค่าความถี่ธรรมชาติ และโหมดการสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกน สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการของงานเสมือน [15] และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [16]

2. แบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด

สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์การสั่นอิสระแบบ สมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด

ในการศึกษาครั้งนี้คือวัสดุของโครงสร้างมีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น, ความหนาของโครงสร้างมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการเสียรูป และเงื่อนไขของฐานรองรับจะเป็นแบบยึดหมุนและยึดแน่นอย่างสมบูรณ์ ถ้าพิจารณาสถานะพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดทั้ง 3 สถานะดังแสดงในรูปที่ 1



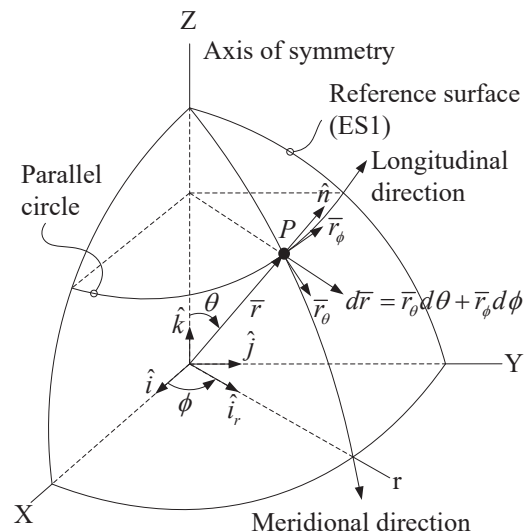
รูปที่ 1 เวกเตอร์ระบุตำแหน่งของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด

จากรูปจะเห็นได้ว่าที่สถานะเริ่มต้นจะเป็นสถานะที่โครงสร้างไม่ได้บรรจุของเหลวและปราศจากค่าความเครียด (Initial Unstrained State) หรือ IUS จากนั้นเมื่อโครงสร้างถูกบรรจุของเหลวและค่าแรงดันภายในเกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวเป็นค่าคงที่เท่ากันตลอดความยาวเส้นเมริเดียนโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความลึกจะเรียกว่าสถานะดังกล่าวว่า สถานะอ้างอิง (Reference State) หรือ ES1 ซึ่งจะสามารถคำนวณหารูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างได้ที่สถานะนี้ แต่เนื่องจากค่าความเครียดเริ่มต้นและระยะการเสียรูปที่สถานะนี้มีค่าน้อย จึงใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางแบบดั้งเดิม (Traditional Shell Analysis) [17] ในการ

คำนวณ สำหรับสถานะสุดท้ายคือสถานะการเสียรูป (Deformed State) หรือ ES2 ของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่บรรจุของเหลวภายใต้แรงกระทำจากภายนอก

2.1 รูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบาง

พื้นผิวอ้างอิงของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด (ES1) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะนิยามได้ด้วยสมการ $X = X(\theta, \phi)$, $Y = Y(\theta, \phi)$ และ $Z = Z(\theta, \phi)$ โดยที่ θ และ ϕ คือค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิว (Surface Parameters) ที่วัดตามแนวเส้นพิกัดเมริเดียนและลองจิจูด ตามลำดับ



รูปที่ 2 พื้นผิวอ้างอิงของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด

สำหรับกรณีที่พื้นผิวมีความสมมาตรตามแนวแกนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะเส้นเมริเดียนเท่านั้น ดังนั้นจึงกำหนดให้ $\bar{r} = \bar{r}(\theta, \phi)$ เป็นเวกเตอร์ระบุตำแหน่งบนพื้นผิวอ้างอิงที่จุด P ซึ่งจะสามารถนิยามได้ด้วยสมการ

$$\bar{r} = r \cos \phi \hat{i} + r \sin \phi \hat{j} + z \hat{k} \quad (1)$$

เมื่อ $r = r(\theta)$ และ $z = z(\theta)$ ถ้าโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดเกิดการเสียรูปจะทำให้พื้นผิวอ้างอิงเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ที่เวลา t ใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง $\bar{R} = \bar{R}(\theta, \phi, t)$ บนพื้นผิวที่เกิดการเสียรูป (ES2) โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของเวกเตอร์

ระบุตำแหน่ง $\bar{r} = \bar{r}(\theta, \phi)$ บนพื้นผิวที่อ้างอิงที่ตำแหน่งเดียวกันคือ

$$\bar{R}(\theta, \phi, t) = \bar{r}(\theta, \phi) + \bar{q}(\theta, \phi, t) \quad (2)$$

เมื่อ $\bar{q} = \bar{q}(\theta, \phi, t)$ คือเวกเตอร์ของการเคลื่อนที่ซึ่งขึ้นกับเวลา t ใดๆ จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{q}(\theta, \phi, t) = \frac{\bar{r}_\theta}{\sqrt{E}} u + \frac{\bar{r}_\phi}{\sqrt{G}} v + \hat{n} w \quad (3)$$

เมื่อ u , v และ w คือค่าการเสียรูปตามแนวเส้นเมอร์ริเดียน, แนวเส้นลองจิจูดและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนตามลำดับ แต่เนื่องจากเป็นปัญหาของการวิเคราะห์แบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัต ดังนั้นเทอมของ $(\bar{r}_\phi / \sqrt{G})v$ ในสมการที่ (3) จะมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับตัวห้อย θ และ ϕ จะแสดงถึงอนุพันธ์ย่อยตามแนวระบบพิกัดของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัต

จากหลักการเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ (Differential Geometry) จะสามารถคำนวณหาค่าความยาวส่วนโค้งของพื้นผิวอ้างอิง (ES1) และความยาวส่วนโค้งของพื้นผิวการเสียรูป (ES2) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$ds^2 = d\bar{r} \cdot d\bar{r} = Ed\theta^2 + 2Fd\theta d\phi + Gd\phi^2 \quad (4)$$

$$ds^{*2} = d\bar{R} \cdot d\bar{R} = E^*d\theta^2 + 2F^*d\theta d\phi + G^*d\phi^2 \quad (5)$$

โดยที่ $d\bar{r} = \bar{r}_\theta d\theta + \bar{r}_\phi d\phi$ และ $d\bar{R} = \bar{R}_\theta d\theta + \bar{R}_\phi d\phi$ คือผลรวมเชิงอนุพันธ์ของความยาวชิ้นส่วน $\bar{r} = \bar{r}(\theta, \phi)$ และ $\bar{R} = \bar{R}(\theta, \phi, t)$ ตามลำดับ สำหรับค่าเมตริกซ์เทนเซอร์ (Metric Tensor) ของพื้นผิวอ้างอิง (ES1) และพื้นผิวการเสียรูป (ES2) ดังแสดงในสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ จะสามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$E = \bar{r}_\theta \cdot \bar{r}_\theta \quad F = \bar{r}_\theta \cdot \bar{r}_\phi \quad G = \bar{r}_\phi \cdot \bar{r}_\phi \quad (6)$$

$$E^* = \bar{R}_\theta \cdot \bar{R}_\theta \quad F^* = \bar{R}_\theta \cdot \bar{R}_\phi \quad G^* = \bar{R}_\phi \cdot \bar{R}_\phi \quad (7)$$

จากรูปที่ 2 กำหนดให้ $\hat{n}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอ้างอิง (ES1) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\hat{n} = \frac{\bar{r}_\theta \times \bar{r}_\phi}{|\bar{r}_\theta \times \bar{r}_\phi|} = \frac{-rZ_\theta \cos \phi \hat{i} - rZ_\theta \sin \phi \hat{j} + rr_\theta \hat{k}}{D} \quad (8)$$

โดยที่ $D = |\bar{r}_\theta \times \bar{r}_\phi| = \sqrt{EG - F^2} = r\sqrt{r_\theta^2 + Z_\theta^2}$ จากหลักการเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์จะได้ค่าเมตริกซ์ความโค้ง (Metric Curvature) ของพื้นผิวอ้างอิง (ES1) ดังนี้

$$e = \bar{r}_{\theta\theta} \cdot \hat{n} \quad f = \bar{r}_{\theta\phi} \cdot \hat{n} \quad g = \bar{r}_{\phi\phi} \cdot \hat{n} \quad (9)$$

ดังนั้นค่าความโค้งหลัก (Principal Curvatures) ของพื้นผิวอ้างอิง (ES1) จะสามารถหาได้จากสมการ

$$\kappa = \frac{ed\theta^2 + 2fd\theta d\phi + gd\phi^2}{Ed\theta^2 + 2Fd\theta d\phi + Gd\phi^2} \quad (10)$$

ในกรณีของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัตที่มีความสมมาตรตามแนวแกนจะพบว่าเส้นโค้งหลักจะซ้อนทับกับเส้นพิกัด แสดงว่าค่า $F = f = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (10) จะได้ค่าความโค้งหลักดังนี้คือ $\kappa_1 = e / E$ และ $\kappa_2 = g / G$

สำหรับค่าความเร็วและความเร่งของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัตจะสามารถหาได้โดยการอนุพันธ์สมการที่ (2) เทียบกับเวลาดังสมการต่อไปนี้

$$\bar{V} = \dot{\bar{R}}(\theta, \phi, t) = \frac{\bar{r}_\theta}{\sqrt{E}} \dot{u} + \frac{\bar{r}_\phi}{\sqrt{G}} \dot{v} + \dot{\hat{n}} \dot{w} \quad (11)$$

$$\bar{a} = \ddot{\bar{R}}(\theta, \phi, t) = \frac{\bar{r}_\theta}{\sqrt{E}} \ddot{u} + \frac{\bar{r}_\phi}{\sqrt{G}} \ddot{v} + \ddot{\hat{n}} \ddot{w} \quad (12)$$

โดยที่ ตัวยก $(\cdot)$ จะแสดงถึงอนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลา t

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเสียรูป

เมื่อพิจารณาความยาวชิ้นส่วนใดๆ บนพื้นผิวที่สภาวะเริ่มต้น (IUS) และที่สภาวะการเสียรูป (ES2) จะมีระยะ ds_0 และ ds^* ตามลำดับ ดังนั้นความสัมพันธ์

ระหว่างความเครียดกับการเสีรูปตามนิยามของความเครียดแบบโททอลลากรองจ์ (Total Lagrange Strains) จะสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon^L = \varepsilon_0 \frac{ds^2}{ds_0^2} + \varepsilon \frac{ds^2}{ds_0^2} \quad (13)$$

เมื่อ ε_0 และ ε คือค่าความเครียดเริ่มต้นแบบออยเลอร์ (Initial Eulerian Strains) และค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้น (Added Strains) ตามลำดับ สำหรับกรณีของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่มีความสมมาตรตามแนวแกนจะปราศจากค่าความเครียดเฉือน (Shearing Strains) ดังนั้นจากสมการที่ (13) จะสามารถเขียนค่าความเครียดแบบโททอลลากรองจ์ได้ในเทอมของเมตริกซ์เทนเซอร์ดังนี้

$$\varepsilon_\theta^L = \frac{1}{2} \left(\frac{E^*}{E_0} - 1 \right) = (\varepsilon_{0\theta} + \varepsilon_\theta) T_{\theta\theta} \quad (14)$$

$$\varepsilon_\phi^L = \frac{1}{2} \left(\frac{G^*}{G_0} - 1 \right) = (\varepsilon_{0\phi} + \varepsilon_\phi) T_{\phi\phi} \quad (15)$$

เมื่อ E_0 และ G_0 คือค่าเมตริกซ์เทนเซอร์ (Metric Tensor) ของพื้นผิวที่สภาวะเริ่มต้น (IUS) โดยที่ $F_0 = 0$ เนื่องจากเป็นโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดแบบสมมาตร ดังนั้นจะได้ว่า

$$D_0 = \sqrt{E_0 G_0} = D \sqrt{(1 - 2\varepsilon_{0\theta})(1 - 2\varepsilon_{0\phi})} \quad (16)$$

จากสมการที่ (14) และ (15) จะสามารถเขียนได้ในรูปแบบเมตริกซ์ดังนี้

$$\{\varepsilon^L\} = [T](\{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}) \quad (17)$$

$$\text{โดยที่ } \varepsilon_{0\theta} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_0}{E} \right) \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{E^*}{E} - 1 \right) \quad (18)$$

$$\varepsilon_{0\phi} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{G_0}{G} \right) \quad \varepsilon_\phi = \frac{1}{2} \left(\frac{G^*}{G} - 1 \right) \quad (19)$$

และ $[T]$ คือเมตริกซ์ในแนวทแยงระหว่างชิ้นส่วนกับวัสดุ (Diagonal Material-Element Matrix) ซึ่งจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & T_{\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\text{โดยที่ } T_{\theta\theta} = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 - 2\varepsilon_{0\theta}} \quad (21)$$

$$T_{\phi\phi} = \frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 - 2\varepsilon_{0\phi}} \quad (22)$$

กำหนดให้ $A = \sqrt{E}$ และ $B = \sqrt{G}$ ดังนั้นถ้าแทนสมการที่ (7) ลงในสมการที่ (18) และ (19) จะเขียนค่าความเครียดที่เพิ่มขึ้นในเทอมของการเสีรูปได้ดังนี้

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{A} u_\theta - \frac{e}{E} w = [L_1] \{g\} \quad (23)$$

$$\varepsilon_\phi = \frac{B_\theta}{D} u - \frac{g}{G} w = [L_2] \{g\} \quad (24)$$

$$\text{โดยที่ } [g] = [u \quad w \quad u_\theta \quad w_\theta] \quad (25)$$

$$[L_1] = [0 \quad -e/E \quad 1/A \quad 0] \quad (26)$$

$$[L_2] = [B_\theta/D \quad -g/G \quad 0 \quad 0] \quad (27)$$

2.3 พลังงานความเครียดของระบบโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด

พลังงานความเครียดสำหรับโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นทั่วไป จะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \{\varepsilon^L\}^T [C'] \{\varepsilon^L\} t D_0 d\phi d\theta \quad (28)$$

$$\text{โดยที่ } [C'] = \frac{E'}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

เมื่อ $[C']$ คือเมตริกซ์คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคด, h คือความหนาของโครงสร้าง, E' คือโมดูลัสยืดหยุ่น และ ν คืออัตราส่วนปัวส์ซอง ถ้าแทนค่าสมการที่ (16) และ (17) ลงในสมการที่ (28) จะได้ว่า

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2} (\{\varepsilon_0\}^T + \{\varepsilon\}^T) [C] (\{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}) d\theta \quad (30)$$

โดยที่ $[C] = 2\pi [T]^T [C'] [T] h D_0 \quad (31)$

จากสมการที่ (30) จะสามารถจัดรูปแบบใหม่ได้ในรูปแบบที่เหมาะสม [18] ดังสมการ

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \{g\}^T \left(\{\tilde{c}\} + \frac{1}{2} [\tilde{k}] \{g\} \right) d\theta \quad (32)$$

โดยที่ $\{\tilde{c}\} = \begin{Bmatrix} [L_1] \\ [L_2] \end{Bmatrix}^T [C] \begin{Bmatrix} \{\varepsilon_{0\theta}\} \\ \{\varepsilon_{0\phi}\} \end{Bmatrix} \quad (33)$

$$[\tilde{k}] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 C_{ij} \begin{Bmatrix} [L_i] \\ [L_j] \end{Bmatrix}^T \quad (34)$$

จากสมการที่ (34) จะพบว่าเมตริกซ์ $[\tilde{k}]$ เป็นเมตริกซ์สมมาตร ดังนั้นการแปรผันของพลังงานความเครียด δU สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta \{g\}^T \left(\{\tilde{c}\} + [\tilde{k}] \{g\} \right) d\theta \quad (35)$$

2.4 พลังงานความเครียดของของเหลวที่บรรจุ

กำหนดให้ค่าแรงดันภายในที่สถานะอ้างอิง (ES1) มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียดโดยปริมาตรดังนี้

$$p_0 = -k_0 \left(\frac{\Delta V_{ow}}{V_{ow}} \right) \quad (36)$$

เมื่อ k_0 คือโมดูลัสเชิงปริมาตรของของเหลว (Bulk Modulus), V_{ow} คือปริมาตรของของเหลวที่สถานะเริ่มต้นปราศจากค่าความเครียด (IUS), ΔV_{ow} คือการเปลี่ยนการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของของเหลวภายในที่บรรจุจากสถานะเริ่มต้น (IUS) ไปยังสถานะอ้างอิง (ES1)

ดังนั้นค่าพลังงานความเครียดของของเหลวที่บรรจุจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Gamma = \frac{1}{2} k_0 \left[\frac{\Delta V_{ow} + \Delta V}{V_{ow}} \right]^2 V_{ow} \quad (37)$$

เมื่อ ΔV คือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายในของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดกับปริมาตรของเหลวภายในที่บรรจุจากสถานะอ้างอิง (ES1) ไปยังสถานะการเสียรูป (ES2) ซึ่งจะมีค่าดังสมการ

$$\Delta V = \frac{1}{3} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} (\bar{R}_\theta \times \bar{R}_\phi \cdot \bar{R} - \bar{r}_\theta \times \bar{r}_\phi \cdot \bar{r}) d\phi d\theta \quad (38)$$

แทนค่าสมการที่ (1) และ (2) ลงในสมการที่ (38) จากนั้นจัดรูปใหม่จะได้ค่าการแปรผันของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดกับปริมาตรของของเหลวภายในที่บรรจุ $\delta(\Delta V)$ ดังนี้

$$\delta(\Delta V) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta \{g\}^T \{\tilde{v}\} d\theta \quad (39)$$

เมื่อ $[\tilde{v}] = [\tilde{v}_1 \quad \tilde{v}_2 \quad \tilde{v}_3 \quad \tilde{v}_4]$ คือเวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\tilde{v}_1 = \frac{2\pi}{3} \left(B_\theta (\bar{r} \cdot \hat{n}) - \frac{Be}{A^2} (\bar{r} \cdot \bar{r}_\theta) \right) \quad (40)$$

$$\tilde{v}_2 = \frac{2\pi}{3} \left(-\frac{Ag}{B} (\bar{r} \cdot \hat{n}) - \frac{Be}{A} (\bar{r} \cdot \hat{n}) + AB \right) \quad (41)$$

$$\tilde{v}_3 = \frac{2\pi}{3} (B (\bar{r} \cdot \hat{n})) \quad (42)$$

$$\tilde{v}_4 = \frac{2\pi}{3} \left(-\frac{B}{A} (\bar{r} \cdot \bar{r}_\theta) \right) \quad (43)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (36) ลงในสมการที่ (37) จากนั้นจะได้ค่าการแปรผันของพลังงานความเครียดของของเหลวที่บรรจุ $\delta \Gamma$ ดังสมการต่อไปนี้

$$\delta \Gamma = -(p_0 + \lambda) \delta(\Delta V) \quad (44)$$

โดยที่ $\lambda = -k_0 (\Delta V / V_{0w})$ คือค่าการปรับเปลี่ยนแรงดันภายในจากสถานะอ้างอิง (ES1) ไปยังสถานะการเสียรูป (ES2) จากความสัมพันธ์ของค่า p_0 และ λ จะได้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta V + \frac{V}{k_0 - p_0} \lambda = 0 \quad (45)$$

2.5 งานเสมือนเนื่องจากแรงเฉื่อยของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัต

งานเสมือนเนื่องจากแรงเฉื่อยของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัตจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\delta I = -2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\rho_s \ddot{u} \{\delta u\} + \rho_s \ddot{w} \{\delta w\}) h D d\theta \quad (46)$$

เมื่อ ρ_s คือความหนาแน่นของวัสดุโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัต, $\ddot{u}$ และ $\ddot{w}$ คือองค์ประกอบสำหรับเวกเตอร์ความเร่งของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัต

2.6 ผลรวมของงานเสมือน

ผลรวมของงานเสมือนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัตสำหรับบรรจุของเหลวภายในจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\delta \pi = \delta U + \delta \Gamma - \delta I \quad (47)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ (35), (39), (44) และ (46) ลงในสมการที่ (47) จะได้ว่า

$$\delta \pi = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta \{g\}^T \left(\{\tilde{c}\} - (p_0 + \lambda) \{\tilde{v}\} + [\tilde{k}] \{g\} \right) d\theta + 2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\rho_s \ddot{u} \{\delta u\} + \rho_s \ddot{w} \{\delta w\}) h D d\theta \quad (48)$$

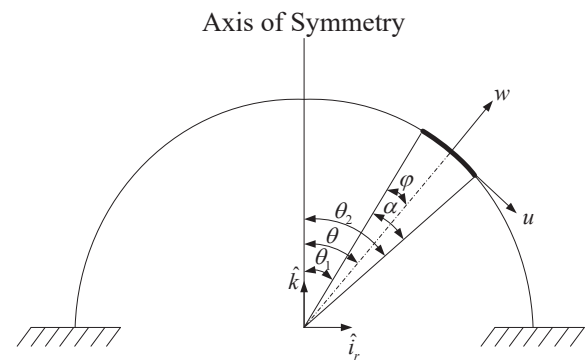
จากสมการที่ (47) จะได้ว่าโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัตที่บรรจุของเหลวจะสมดุลที่สถานะอ้างอิง (ES1) นั่นคือ λ และ $\{g\}$ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta \{g\}^T (\{\tilde{c}\} - p_0 \{\tilde{v}\}) d\theta = 0 \quad (49)$$

เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นจะต้องเป็นจริงและใช้ในการหาค่าความเครียดเริ่มต้น (ε_0)

3. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาการสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัตจะสามารถทำได้โดยการแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยตามแนวพิทัก θ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชิ้นส่วนทั่วไปและระยะพิทัก

ดังนั้นเมื่อพิจารณาชิ้นส่วนใดๆ จะได้ว่าค่าการประมาณการเคลื่อนที่ ณ จุดต่าง ๆ บนชิ้นส่วนย่อยสามารถทำได้โดยการกำหนดให้แต่ละจุดขั้วของชิ้นส่วนย่อยมีดีกรีอิสระเท่ากับ 4 และใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่สาม (Cubic Polynomial) เป็นฟังก์ชันการเคลื่อนที่เพื่อหาฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Functions) และประมาณค่าการเสียรูปในแนวสัมผัสและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน u และ w ตามลำดับ ดังสมการต่อไปนี้

$$\{g\} = [\psi] \{d\} \quad (50)$$

เมื่อ $\{g\}$ คือเวกเตอร์การเคลื่อนที่ที่จุดต่อ, $[\psi]$ คือเมตริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างโพลิโนเมียลอันดับที่สาม และ $\{d\}$ คือเวกเตอร์ของดีกรีอิสระที่จุดต่อ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\{g\}^T = [u(\varphi) \quad w(\varphi) \quad u_\theta(\varphi) \quad w_\theta(\varphi)] \quad (51)$$

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u(0) & w(0) & u_\theta(0) & w_\theta(0) \\ u(\alpha) & w(\alpha) & u_\theta(\alpha) & w_\theta(\alpha) \end{Bmatrix}^T \quad (52)$$

$$[\psi] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & | & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & | & 0 & N_3 & 0 & N_4 \\ N_{1,\varphi} & 0 & N_{2,\varphi} & 0 & | & N_{3,\varphi} & 0 & N_{4,\varphi} & 0 \\ 0 & N_{1,\varphi} & 0 & N_{2,\varphi} & | & 0 & N_{3,\varphi} & 0 & N_{4,\varphi} \end{bmatrix} \quad (53)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ (50) ลงในสมการที่ (48) จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \delta\pi = & \{\delta d\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\psi]^T (\{\tilde{c}\} - (p_0 + \lambda)\{\tilde{v}\}) d\theta \\ & + \{\delta d\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\psi]^T [\tilde{k}] [\psi] d\theta \{d\} \\ & + 2\pi \{\delta u\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} \{\psi_u\} \rho_s \{\psi_u\}^T h D d\theta \\ & + 2\pi \{\delta w\}^T \int_{\theta_1}^{\theta_2} \{\psi_w\} \rho_s \{\psi_w\}^T h D d\theta \end{aligned} \quad (54)$$

จากหลักการของงานเสมือน [15] จะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างเปลือกบางได้จากสมการที่ (54) ดังนี้

$$[m]\{\ddot{d}\} + [k]\{d\} = \{f\} \quad (55)$$

เมื่อ $[m]$ คือเมตริกซ์มวลของชิ้นส่วนย่อย (Element Mass Matrix), $[k]$ คือเมตริกซ์สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย (Element Stiffness Matrix), $\{f\}$ คือเวกเตอร์ของแรง (Force Vector), $\{d\}$ คือเวกเตอร์การเคลื่อนที่ (Displacement Vector) และ $\{\ddot{d}\}$ คือเวกเตอร์ความเร่ง (Acceleration Vector) ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} [m] = & 2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \{\psi_u\} \rho_s \{\psi_u\}^T h D d\theta \\ & + 2\pi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \{\psi_w\} \rho_s \{\psi_w\}^T h D d\theta \end{aligned} \quad (56)$$

$$[k] = \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\psi]^T [\tilde{k}] [\psi] d\theta \{d\} \quad (57)$$

$$[f] = \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\psi]^T (\{\tilde{c}\} - (p_0 + \lambda)\{\tilde{v}\}) d\theta \quad (58)$$

เนื่องจากดีกรีอิสระเฉพาะที่ (Local Degree of Freedom) $\{d\}$ จะเหมือนกับดีกรีอิสระรวม (Global Degree of Freedom) $\{D\}$ ดังนั้นผลรวมของงานเสมือนสำหรับระบบโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคัดสามารถรวมได้โดยตรงโดยใช้สมการที่ (54) ซึ่งจะเขียนได้ดังนี้

$$[M]\{\ddot{D}\} + [K]\{D\} = \{F\} \quad (59)$$

จากสมการที่ (45) จะได้สมการเงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ดังนี้

$$\{D\}^T \{V\} + \frac{V}{k_0 - p_0} \lambda = 0 \quad (60)$$

จากสมการที่ (55) และ (56) จะสามารถเขียนรวมได้ในรูปเมตริกซ์สมมาตรดังนี้

$$[\tilde{M}]\{\ddot{D}\} + [\tilde{K}]\{D\} = \{\tilde{F}\} \quad (61)$$

โดยที่

$$[\tilde{M}] = \begin{bmatrix} [M] & | & \{0\} \\ \hline \{0\}^T & | & 0 \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$[\tilde{K}] = \begin{bmatrix} [K] & | & -\{V\} \\ \hline -\{V\}^T & | & -V/(k_0 - p_0) \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$\{\tilde{F}\} = \begin{Bmatrix} p_0 \{V\} - \{C\} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (64)$$

$$\{\mathbf{D}\} = \begin{Bmatrix} D_i \\ - \\ \lambda \end{Bmatrix} \quad \{\ddot{\mathbf{D}}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{D}_i \\ - \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (65)$$

สำหรับการวิเคราะห์การสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวจะได้โดยการกำหนดให้ $\{\tilde{\mathbf{F}}\}$ ในสมการที่ (61) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะสามารถเขียนใหม่เป็นสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic Equation) ได้ดังนี้

$$[\tilde{\mathbf{K}}] - \omega_n^2 [\tilde{\mathbf{M}}] = 0 \quad (66)$$

ซึ่งเป็นปัญหาค่าเฉพาะ (Eigenvalue Problem) ในที่นี้ ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) แบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลว

เนื่องจากเป็นปัญหาที่มีความสมมาตรตามแนวแกน ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งปลายบนสุดของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดจะมีค่าดังนี้

$$u = w_\theta = 0 \quad (67)$$

สำหรับเงื่อนไขที่บริเวณฐานรองรับจะพิจารณาได้ดังนี้

$$\text{แบบยึดหมุน : } u = w = 0 \quad (68)$$

$$\text{แบบยึดแน่น : } u = w = w_\theta = 0 \quad (69)$$

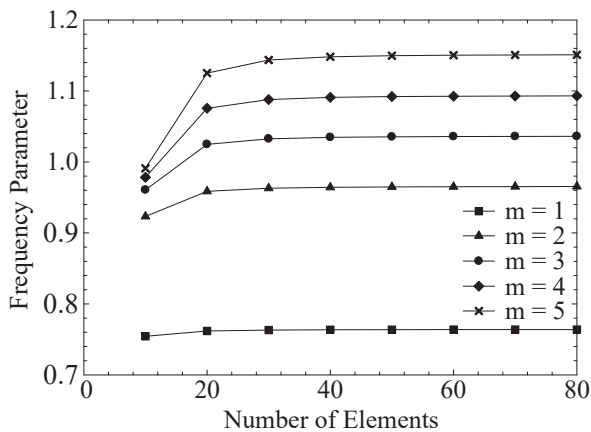
4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยที่คุณสมบัติของโครงสร้างเปลือกบางสำหรับการคำนวณในครั้งนี้จะใช้ตามตารางที่ 1

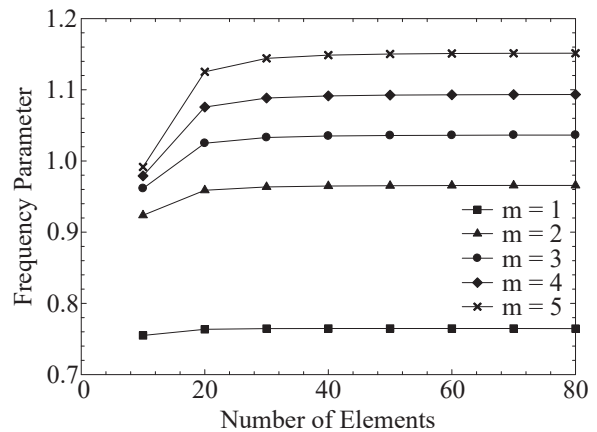
ตารางที่ 1 ข้อมูลและคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์

รายการ	ปริมาณ	หน่วย
ความยาวรัศมีของโครงสร้าง (a)	3	เมตร
ความหนาของโครงสร้าง (h)	0.03	เมตร
ความหนาแน่นของวัสดุ (ρ_s)	7670	กก./ม ³
โมดูลัสยืดหยุ่น (E')	180×10^9	นิวตัน/ม ²
อัตราส่วนปัวซอง (ν)	0.3	-
แรงดันภายในเริ่มต้น (p_0)	1×10^7	นิวตัน/ม ²
โมดูลัสเชิงปริมาตรของของเหลว (k_0)	∞	นิวตัน/ม ²

รูปที่ 4 แสดงผลของการแปรเปลี่ยนจำนวนชิ้นส่วนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกน $\Omega = \omega_n a \sqrt{\rho_s / E'}$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการแบ่งจำนวนชิ้นส่วนออกเป็น 60 ชิ้นส่วนจะให้คำตอบที่มีความถูกต้องสูงใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการแบ่งชิ้นส่วนที่ละเอียดกว่านี้ ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้จำนวนชิ้นส่วนเท่ากับ 60 ชิ้นส่วนเท่านั้น หลังจากนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่มีความสมมาตรตามแนวแกนโดยชิ้นส่วนแบบ MAX1 และ MAX2 ซึ่งมีการประมาณค่าการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (Linear Membrane) และแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับสอง (Quadratic Membrane) ตามลำดับ สำหรับการจำลองคุณสมบัติของของเหลวจะเลือกใช้ชิ้นส่วนแบบ FAX2 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีค่าแรงดันแบบสถิต (Hydrostatic Fluid Element) และมีการประมาณค่าการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (Linear Fluid Element) ซึ่งผลที่ได้จะพบว่าให้คำตอบที่มีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 2



(ก) ฐานรองรับแบบยึดหมุน



(ข) ฐานรองรับแบบยึดแน่น

รูปที่ 4 การหาคำตอบของค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนสำหรับโครงสร้างเปลือกบาง
ไว้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลว

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไว้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดหมุน

โหมดการสั่น	MAX1	MAX2	งานวิจัยนี้
1	0.761	0.759	0.764
2	0.960	0.960	0.965
3	1.027	1.031	1.036
4	1.080	1.088	1.093
5	1.133	1.147	1.150

การเปรียบเทียบโหมดการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางแบบไว้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดหมุนจะมีโหมดการสั่นเหมือนกับผลที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป จะแสดงในรูปที่ 5 นอกจากนี้ยังพบว่าโหมดการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางแบบไว้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวจะคล้ายกับโหมดการสั่นของโครงสร้างเปลือกบางที่ไม่ได้บรรจุของเหลว จากงานวิจัยของ Artioli และ Viola [7] ซึ่งจะรวมผลของพลังงานความเครียดเนื่องจากแรงค้ำด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6 ภายใต้งานไขว้ของฐานรองรับแบบยึดแน่นเหมือนกัน ตารางที่ 3 และ 4 จะแสดงผลการแปรเปลี่ยนความหนาของโครงสร้างเปลือกบางไว้แรงค้ำสำหรับ

บรรจุของเหลวที่ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนสำหรับฐานรองรับแบบยึดหมุนและแบบยึดแน่น ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลของอัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความหนาของโครงสร้างที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไว้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดหมุน

โหมดการสั่น	a/h				
	300	200	100	50	25
1	0.796	0.781	0.764	0.753	0.746
2	1.036	1.001	0.965	0.945	0.934
3	1.166	1.103	1.036	1.000	0.981
4	1.292	1.197	1.093	1.036	1.006
5	1.426	1.296	1.150	1.070	1.026

ตารางที่ 4 ผลของอัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความหนาของโครงสร้างที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไว้แรงค้ำสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่น

โหมดการสั่น	a/h				
	300	200	100	50	25
1	0.797	0.782	0.765	0.754	0.747
2	1.037	1.002	0.965	0.946	0.934

ตารางที่ 4 ผลของอัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความหนาของโครงสร้างที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่น (ต่อ)

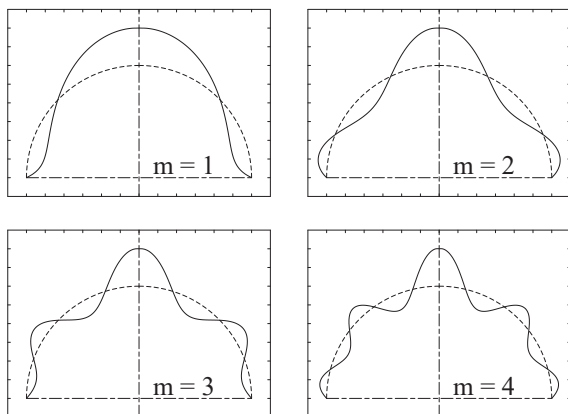
โหมดการสั่น	a/h				
	300	200	100	50	25
3	1.167	1.103	1.036	1.000	0.981
4	1.293	1.197	1.093	1.036	1.006
5	1.427	1.297	1.151	1.070	1.026

ซึ่งจะพบว่าการแปรเปลี่ยนอัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลว (a/h) ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกน (Ω) โดยตรง นั่นคืออัตราส่วนความยาวรัศมีต่อความหนาของโครงสร้างจะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วน โดยตรงกับค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนสำหรับทุกๆ โหมดการสั่น

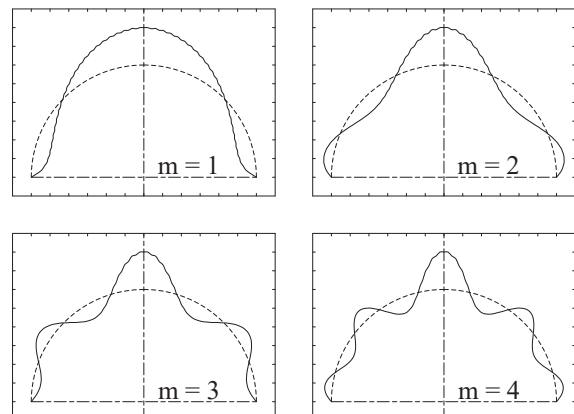
สำหรับการศึกษาผลของการแปรเปลี่ยนแรงดันภายในเริ่มต้นของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวที่ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่

ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนสำหรับฐานรองรับแบบยึดหมุนและแบบยึดแน่น จะแสดงไว้ในตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จากการศึกษาจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกน (Ω) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนแรงดันภายในเริ่มต้นต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงดันภายในของโครงสร้างเป็นแฟกเตอร์ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดให้มีโหมดการสั่นสอดคล้องกับโหมดการสั่นสำหรับโครงสร้างเปลือกบาง ดังแสดงในรูปที่ 6 สำหรับโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่บรรจุของเหลวและไม่ได้บรรจุของเหลว

สำหรับผลของการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของฐานรองรับสำหรับโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่บรรจุของเหลวเป็นแบบยึดหมุนและแบบยึดแน่น จะพบว่าส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 6 และไม่มีผลต่อโหมดการสั่น ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ 6(ข) สำหรับเงื่อนไขของฐานรองรับแบบยึดหมุนและแบบยึดแน่นตามลำดับ

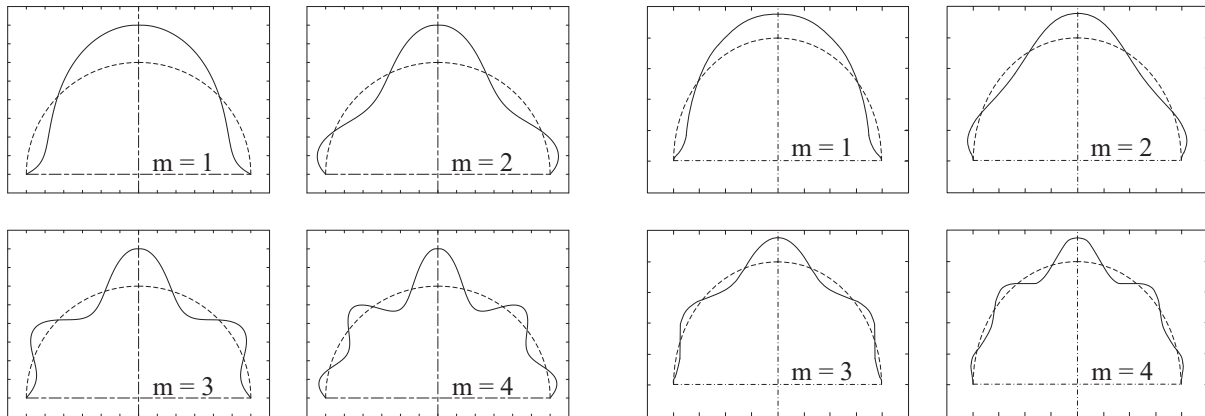


(ก) งานวิจัยนี้



(ข) โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบโหมดการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดที่บรรจุของเหลว



(ก) โครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลว

(ข) โครงสร้างเปลือกบางที่ไม่ได้บรรจุของเหลว [7]

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบ โหมดการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนของ โครงสร้างเปลือกบาง

ตารางที่ 5 ผลของอัตราส่วนแรงคดภายในเริ่มต้นต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดหมุน

โหมดการสั่น	p_0/E'				
	3×10^{-5}	4×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}	7×10^{-5}
1	0.754	0.758	0.762	0.765	0.769
2	0.947	0.954	0.961	0.968	0.975
3	1.003	1.016	1.029	1.041	1.054
4	1.041	1.061	1.082	1.101	1.121
5	1.077	1.106	1.135	1.163	1.190

ตารางที่ 6 ผลของอัตราส่วนแรงคดภายในเริ่มต้นต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดสำหรับบรรจุของเหลวที่มีฐานรองรับแบบยึดแน่น

โหมดการสั่น	p_0/E'				
	3×10^{-5}	4×10^{-5}	5×10^{-5}	6×10^{-5}	7×10^{-5}
1	0.755	0.759	0.763	0.766	0.770
2	0.947	0.955	0.962	0.969	0.975
3	1.003	1.016	1.029	1.042	1.054
4	1.041	1.062	1.082	1.102	1.121
5	1.077	1.106	1.135	1.163	1.191

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นอิสระแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดรูปครึ่งทรงกลมที่บรรจุของเหลวภายใต้เงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร จะสามารถเขียนปัญหาในรูปแบบการแปรผันและใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดด้วยชิ้นส่วนของคานแบบ 1 มิติในการหาค่าตอบเชิงตัวเลขที่เป็นปัญหาแบบค่าเจาะจง

จากผลการศึกษาจะสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขการจำกัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและค่าแรงคดภายในเริ่มต้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นแบบสมมาตรตามแนวแกนของโครงสร้างเปลือกบางไร้แรงคดให้โหมดการสั่นสอดคล้องกับโครงสร้างเปลือกบางที่มีผลของแรงคด นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของโครงสร้างเปลือกบางกับค่าแรงคดภายในเริ่มต้นที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวจะส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ความถี่ธรรมชาติ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของฐานรองรับจะส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยมาก

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสาน ที่ได้สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไป
ได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yasuzawa, Y. Structural Response of Underwater Half Drop Shaped Shell. Proceedings of the 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference 1993, Singapore, 1993.
- [2] Jiammeepreecha, W., Chucheeepsakul, S. and Huang, T. Nonlinear Static Analysis of Deep Water Axisymmetric Half Drop Shell Storage Container with Constrained Volume. Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference 2012, Rhodes, Greece, 2012.
- [3] วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา สมชาย ชูชีพสกุล และ Tseng Huang. การวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้างเปลือกบางแบบครึ่งทรงกลมที่มีความสมมาตรตามแนวแกนที่ตั้งในทะเลลึก. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., 2557; 37: 239 – 255.
- [4] Kalnins, A. Effect of bending on vibrations of spherical shells. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1964; 36(1): 74–81.
- [5] Ross, E.W. Natural frequencies and mode shapes for axisymmetric vibration of deep spherical shells. *Journal of Applied Mechanics*, 1965; 32(3): 553–561.
- [6] Niordson, F.I. Free vibrations of thin elastic spherical shells. *International Journal of Solids and Structures*, 1984; 20(7): 667–687.
- [7] Artioli, E. and Viola, E. Free vibration analysis of spherical caps using a G.D.Q. numerical solution. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2006; 128(3): 370–378.
- [8] Singh, A.V. and Mirza, S. Asymmetric modes and associated eigenvalues for spherical shells. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1985; 107(1): 77–82.
- [9] Lee, J. Free vibration analysis of spherical caps by the pseudospectral method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009; 23: 221–228.
- [10] Phadke, A.C. and Cheung, K.F. Nonlinear response of fluid-filled membrane in gravity waves. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003; 129(7): 739–750.
- [11] Wang, C.M., Vo, K.K. and Chai, Y.H. Membrane analysis and minimum weight design of submerged spherical domes. *Journal of Structural Engineering*, 2006; 132(2): 253–259.
- [12] Jiammeepreecha, W., Chucheeepsakul, S. and Huang, T. Nonlinear static analysis of an axisymmetric shell storage container in spherical polar coordinates with constraint volume. *Engineering Structures*, 2014; 68: 111–120.
- [13] Jiammeepreecha, W., Chucheeepsakul, S. and Huang, T. Parametric study of an equatorially anchored deepwater fluid-filled periodic symmetric shell with constraint volume. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015; 141(8): 04015-04019.
- [14] Langhaar, H.L. Foundations of Practical Shell Analysis, Department of Theoretical and Applied Mechanics. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 1964.
- [15] Langhaar, H.L. Energy Methods in Applied Mechanics. ISBN: 0-47151-711-9, John Wiley & Sons, New York, 1962.
- [16] Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. and Witt, R.J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th edition, ISBN: 0-47135-605-0, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [17] Flügge, W. Stresses in Shells. 2nd edition, ISBN: 0-38705-322-0, Springer-Verlag, Berlin, 1973.



ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางโพโตโครมิกของ MoO_3 เจือด้วย Cu_2O

Photochromic Characteristics of MoO_3 Doped Cu_2O Thin Films

ปิยวิทย์ สุวรรณ¹ มหามะสุไฮมี มะแซ^{*1} ปณุมารต ชูพูล² เกริกเกียรติ รักศรี¹ สุตติพงศ์ ศรีทอง¹
Piyavit Suwan¹, Mahamasuhaimi Masae ^{*1}, Parnumart Choopool², Krakkiat Ragsri¹,
Suttipong Srithong¹

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hatyai, 90110, Thailand

*E-mail: susumeme1983@yahoo.com, Telephone Number: 089-6540828

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางของโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) เจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ได้ติดบนกระจกโซดาไลม์โดยวิธีการเคลือบ โครงสร้างของเฮกซะโกนอลโมลิบดีนัม ($h\text{-MoO}_3$) ได้ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการตกตะกอน การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างกึ่งเสถียรของเฮกซะโกนอล กล้องส่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ศึกษาลักษณะโครงสร้างเฮกซะโกนอลที่มีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมที่เป็นแท่งยาว ผลการทดลองจากเครื่องวัดสีแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณของโมลิบดีนัมออกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะสีจากสีขาวจะกลายเป็นสีฟ้า และเมื่อมีปริมาณโมลิบดีนัมเจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ เปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีฟ้าอ่อนเมื่อได้รับแสงยูวี ผลการทดลองการวัดการเลื่อนของแสงด้วยเทคนิคคูเบลกา-มังก์ Kubelka–Munk (K–M) ได้มีการเลื่อนของแสงที่เลื่อนเข้าสู่ช่วงแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่ในช่วง 2.25-3.15 eV จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสะดวกและประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในงานด้านการเปลี่ยนสีทั้งด้านที่มีลักษณะฟิล์มและผงต่อไปได้

ABSTRACT

Thin films of molybdenum oxide (MoO_3) doped cuprous oxide (Cu_2O) was fabricated on soda lime glass substrated by casting coating technology. Hexagonal molybdenum oxide ($h\text{-MoO}_3$) was synthesized by a solution based precipitation technique. Analysis by X-ray diffraction (XRD) confirmed that the as-synthesized powder had a metastable hexagonal structure. Scanning electron microscopy (SEM) images clearly depicted the morphology and size of $h\text{-MoO}_3$. The morphology study had showed that the product enclose hexagonal rods. From the color measurement, the result of the color changes properties showed that 100% MoO_3 was white colored changed to a blue color and the 1% Cu_2O doped MoO_3 was light brown colored changed to a light blue color when they all were exposed to UV irradiation. The optical band gap energy was estimated from the Kubelka–Munk (K–M) function and was found in range 2.25-3.15 eV. It has shown that this convenient and efficient approach could be applied in the mass-production of functional powders and films materials.

1. บทนำ

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีกระจกเพื่อป้องกันรังสีและความร้อนจากดวงอาทิตย์เพื่อการประหยัดพลังงานที่ใช้สำหรับแสงสว่าง และลดค่าไฟฟ้า การประยุกต์ใช้กระจกฉลาด เช่น กระจกประตู หน้าต่าง สำหรับอาคาร บ้านเรือน รถยนต์ หรือแม้กระทั่งสำหรับวัสดุตัวรับรู้ (Sensor) วัสดุที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีกระจกฉลาดในปัจจุบันหรือที่เรียกว่าโฟโตโครมิก (Photochromic) คือสมบัติของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงการเปลี่ยนสีเกิดจาก 2 กระบวนการ คือ การดูดซับรังสีซึ่งมีพลังงานกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อยกว่า และกระบวนการพลังงานแสงกระตุ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำ ขึ้นไปสู่ระดับพลังงานชั้นที่สูงกว่า และเกิดการให้หรือรับอิเล็กตรอนระหว่างอนุภาคใกล้เคียงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขวาเลนซ์ (Valency) จึงทำให้เกิดสีที่แตกต่างจากเดิม[1] การศึกษาทางด้านวัสดุการเปลี่ยนสีเมื่อกระตุ้นด้วยแสงของกระบวนการโฟโตโครมิกทั้งสแตนไดรออกไซด์ (WO_3) และ โมลิบดีนัมไดรออกไซด์ (MoO_3)[2-3] มีสมบัติพิเศษที่สามารถเปลี่ยนสีได้หลายกรณีคือ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ภายใต้สภาวะก๊าซที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน กระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต หรือการให้กระแสไฟฟ้า ทำให้เปลี่ยนสีจากสีขาว หรือใส เป็น สีฟ้าเข้ม แต่พบว่าสมบัติโฟโตโครมิกและเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนสีกลับใช้เวลานานหลังจากหยุดกระตุ้นด้วยแสง หรือใช้อุณหภูมิถึง 300°C ในการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสีภายใต้สภาวะอากาศ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการใช้สารเจือร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น คอมพอสิต (วัสดุผสม) ของสารประกอบ WO_3 และ MoO_3 ด้วยกันเองหรือคอมพอสิตสารประกอบอื่นๆ ทำให้สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานต่ำลง คือ แสงช่วงที่มองเห็น ให้สีที่หลากหลายมากขึ้น เปลี่ยนกลับไปกลับมาได้เร็วขึ้น [2] การพัฒนาเดิมสารเจือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถถูกกระตุ้นได้ในแสงช่วงที่มองเห็น สารเจือที่เป็นโลหะ เช่น ทองคำ (Au) และ

แพลตตินัม (Pt) [3] แต่เนื่องจากโลหะทองคำ (Au) และแพลตตินัม (Pt) มีราคาแพง จึงมีการศึกษาสารเจือเซอร์โคเนียม (Zr) ก็สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงในช่วง 900 nm ได้ [4] การศึกษาสารเจือด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแคบ ทำให้สามารถใช้พลังงานแสงช่วงที่มองเห็นที่มีพลังงานต่ำกว่ากระตุ้น เช่น แคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) มีช่องว่างแถบพลังงานเพียง 2.51 eV [5] ที่ไวต่อแสงและอุณหภูมิกระตุ้น อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ของ CdSe ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันของ MoO_3 และถูกกักไว้ในออกซิเจนวาเลนซ์ของ MoO_3 ซึ่งกลไกเหมือนกับ WO_3 และเปลี่ยนสีได้ในเวลาเพียง 40 นาติ สารเจือซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe) ก็สามารถช่วยเพิ่มสมบัติโฟโตโครมิกของ MoO_3 ได้ดี ซึ่งกลไกคล้ายกันกับแคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe)[6] สารเจือระหว่าง $\text{CdSe}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$ [7] ทางเลือกของสารเจือที่มีสมบัติทางแสงที่สามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงที่มองเห็นได้เพื่อให้อิเล็กตรอนที่ดี เช่น คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ที่นอกจากไม่เป็นพิษ และราคาถูกแล้ว ยังถูกใช้งานแพร่หลายในงานด้านโฟโตแคตะลิสต์ ซึ่งพบว่า Cu_2O มีประสิทธิภาพด้านโฟโตแคตะลิสต์ดี เมื่อเจือบนแผ่นนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) สามารถดูดกลืนแสงช่วงมากกว่า 400 นาโนเมตร [8] และช่วยเพิ่มสมบัติโฟโตแคตะลิสต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงที่มองเห็นได้ เนื่องจาก Cu_2O มีแถบพลังงานแคบเมื่อเทียบกับ TiO_2 และมีแถบคอนพลังงานสูงกว่าจึงเป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดีเมื่อถูกแสงกระตุ้น [9-10] ได้มีการศึกษาสมบัติทั้งสแตนไดรออกไซด์ (WO_3) และ โมลิบดีนัมไดรออกไซด์ (MoO_3) [3,11] เป็น โลหะ ท ร าน ชี ชั น ที่ เ ป น ส าร กั ง ตั ว น ำ (Semiconductor) ชนิดเอ็น (n-type) มีช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ประมาณ 3.0 ถึง 3.4 eV และระดับชั้นพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level, E_F) อยู่ ในช่วง $4.3\text{-}4.9\text{ eV}$ มี สม บั ตี โฟ ต โคร มิก (Photochromic) เทอร์โมโครมิก (Thermochromic) และอิเล็กโตรโครมิก (Electrochromic) โครงสร้างเพอร์สไกต์ (Perovskite) ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน

6 อะตอม จับกันแบบออกทระฮีดรอล ที่ช่องว่างถูกแทนที่ด้วยอะตอม W สำหรับ WO_3 หรืออะตอม Mo ใน MoO_3 และแต่ละหน่วยเซลล์เชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนที่ขอบหรือมุมร่วมกัน WO_3 และ MoO_3 มีโครงสร้างผลึกได้หลายแบบ (Polymorphism) WO_3 มีโครงสร้างผลึกเป็น Monoclinic II (ϵ - WO_3 , $< -43^\circ\text{C}$) $\rightarrow$ Triclinic (δ - WO_3 , -43°C ถึง 17°C) $\rightarrow$ Monoclinic I (γ - WO_3 , 17°C ถึง 330°C) $\rightarrow$ Orthorhombic (β - WO_3 , 330°C ถึง 740°C) $\rightarrow$ Tetragonal (α - WO_3 , $> 740^\circ\text{C}$) [12] ได้มีการศึกษาฟิล์มที่สังเคราะห์จากยูรีเทนเรซินมีส่วนผสมของทั้งสแตนออกไซด์ (WO_3) สามารถดูดกลืนแสงช่วง 650 และ 900 นาโนเมตร ความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทั้งสแตนออกไซด์เดิมลงไปสามารถเปลี่ยนสีภายใน 40 นาที แต่เปลี่ยนกลับใช้เวลาถึง 90 ชั่วโมง เมื่อเก็บไว้ในห้องที่มืด ซึ่งการสังเคราะห์ฟิล์มยูรีเทนเรซินที่มีส่วนผสมของทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยคอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2) สามารถช่วยเพิ่มความเข้มในการดูดกลืนสูงสุดที่อัตราส่วนของแดงต่อทั้งสแตน Cu/W เท่ากับ 0.1 [13] ทั้งสแตนออกไซด์และโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) สามารถสังเคราะห์ให้เกิดวัสดุโฟโตโครมิกได้ เมื่อทำให้ WO_3 และ MoO_3 มีอุณหภูมิสูงขึ้น 350°C และ 100°C ในสุญญากาศ ตามลำดับ [14] อนุภาคยูรีดิวซ์ ซึ่งจากการศึกษาด้วยเทคนิค XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) พบว่าวัสดุชนิดนี้มีเลขออกซิเดชันในโมเลกุล $6+$ ลดลงเหลือ $5+$ และ $4+$ อิเล็กตรอนถูกจับด้วยออกซิเจนวาเลนซ์ ทำให้เปลี่ยนเป็นสีฟ้าเข้ม และเกิดการกระโดดของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในสภาพการมีออกซิเดชันแตกต่างกันไปบริเวณข้างเคียง การเปลี่ยนสีกลับทำได้โดยการให้ความร้อนในบรรยากาศออกซิเจนทำให้เกิดออกซิเดชัน เลขออกซิเดชันในโมเลกุล $6+$ และอนุภาคเปลี่ยนเป็นสีขาวที่อุณหภูมิ 500°C [15-16] การพัฒนาสมบัติเทอร์โมโครมิก WO_3 และ MoO_3 สามารถทำได้โดยการเจือคอมพอสิต (วัสดุผสม) ของสารประกอบ WO_3 และ MoO_3 ด้วยกันเอง หรือวัสดุผสมของสารประกอบอื่นๆ เช่นเมื่อให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มอะมอร์

ฟัสสมระหว่าง WO_3/MoO_3 จะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง และที่ 400°C มีผลในการจัดเรียงโครงสร้างผลึกใหม่ ทำให้ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy gap, E_g) ก่อนและหลังเผาลดลงจากเดิมโดยในฟิล์มผสมลดลงจาก 3.23 เหลือเพียง 2.9 eV [17] ได้มีการศึกษาสมบัติวัสดุเทอร์โมโครมิกของสารทั้งสแตน (W) เจือลงไปร่วมกับคอปเปอร์โมลิบดีนัมออกไซด์ (CuMoO_4) โดยใช้สารตั้งต้นคือคอปเปอร์ไนเตรต แอมโมเนียมโมลิเบตและแอมโมเนียมเมตาทั้งสแตนผสมในอัตราส่วน Cu:Mo:W=1:1-x:x เมื่อค่า x อยู่ในช่วง ($x=0.04-0.12$) จากผลการทดลองได้เตรียมเป็นผงซึ่งผงวัสดุนั้นสามารถเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 100°C จากสีแดงส้มเป็นสีเหลือง ที่อัตราส่วนค่า $x=0.06$ [18] จากการอ้างอิงเอกสารการวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นแทบจะไม่มีงานวิจัยที่มีการผสมร่วมกันระหว่างคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) และ โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) ที่สังเคราะห์เป็นฟิล์มวัสดุโฟโตโครมิกที่มีการเปลี่ยนสีได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็ว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์ฟิล์มโฟโตโครมิกของ โมลิบดีนัมออกไซด์ผสมร่วมกับคิวปรัสออกไซด์ เป็นวัสดุที่สามารถกระตุ้นด้วยแสงที่สังเคราะห์เป็นฟิล์มเคลือบกระจกที่มีการเปลี่ยนสีได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็วภายในระยะเวลาไม่เกิน 30 นาที

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติโฟโตโครมิกของโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3)
2. เพื่อศึกษาสมบัติโฟโตโครมิกของโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ผสมคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O)
3. เพื่อให้ได้ฟิล์มโฟโตโครมิกที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่อกระตุ้นด้วยแสงยูวี

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

- แอมโมเนียม โมลิเบต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) คอปเปอร์อะซิเตต ($\text{CH}_3\text{COO}_2\text{CuH}_2\text{O}$) กรด

ไนตริก (HNO_3) เอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) กรดวิตามินซี (Ascorbic acid) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไดเมทิลฟอร์มามิด (Dimethylformamide, DMF) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) และ น้ำกลั่น

- กระดาษโซดาไลม์ (Soda lime glass) แทนให้ความร้อน (Hot plate) เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) เตาอบ (Oven) กล่องฉายแสง (UV-Box) และเครื่องวัดสี (Color meter)

- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นรุ่น Shimadzu UV-2450 Spectrophotometer สแกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-800 นาโนเมตร และรายงานผลการวิเคราะห์ออกมาในรูปของกราฟเส้นที่แสดงถึงการเลื่อน (Shift to Visible) ของกราฟไปทางช่วงความยาวคลื่นแสงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และคำนวณแถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์จากคัมการที่ (1) และ (2) [19]

$$E_g = 1239.8 / \lambda \quad (1)$$

$$(\alpha h\nu)^2 = C(h\nu - E_g)^n \quad (2)$$

เมื่อ E_g คือ แถบช่องว่างแถบพลังงาน (อิเล็กทรอนิกส์โวลต์)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.67×10^{-34} จูลวินาที)

c คือ ความเร็วของแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

λ คือ ความยาวคลื่นที่ดูดกลืน (นาโนเมตร)

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ (The absorption coefficient)

ν คือ ความถี่ของแสง (เฮิร์ตซ์, Hz)

n คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 1/2 สำหรับการคำนวณแถบพลังงานโดยตรง (Direct band gap)

- เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD: X-ray Diffraction) รุ่น X' Pert MPD Philips เพื่อศึกษาโครงสร้างของผงที่สังเคราะห์ได้และคำนวณหาขนาดผลึกของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเคลือบ โดยใช้สมการ Scherer [20] ดังสมการที่ (3)

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos \theta_B \quad (3)$$

เมื่อ t คือ ขนาดของผลึก (นาโนเมตร)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ ($\text{CuK}_\alpha = 0.15406$ นาโนเมตร)

β คือ Line width at half maximum height (เรเดียน)

θ คือ มุมสะท้อน (องศา)

2.2 วิธีการเตรียมสารโฟโตโครมิก

ก. การสังเคราะห์โมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3 100%)

แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ปริมาณ 2.5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ละลายที่อุณหภูมิ 60°C เวลา 30 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิที่ 85°C หลังจากนั้นเติมกรดไนตริก (HNO_3) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 85°C เวลา 1 ชั่วโมง รอให้เย็นตัวและตกตะกอน 24 ชั่วโมง เทน้ำที่เป็นสารแขวนลอยออก ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง จากนั้นเติมเอทานอล ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เป็นผงโมลิบดีนัมออกไซด์

ข. การสังเคราะห์คิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O 100%)

คอปเปอร์อะซิเตต ($\text{CH}_3\text{COO}_2\text{CuH}_2\text{O}$) ปริมาณ 0.1 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นาน 30 นาที เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.2 กรัมละลายน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร สารละลายกลายเป็นสีฟ้า แล้วเติมน้ำละลายกรดวิตามินซี (Ascorbic acid) ปริมาณ 0.132 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร จนกลายเป็นสารละลายสีเขียว กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สารละลายกลายเป็นสีส้ม ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเทน้ำออก เก็บอนุภาคและล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง แต่ละครั้งรอให้ตกตะกอนก่อนเทน้ำทิ้ง หลังจากนั้นเติมเอทานอล 10 มิลลิลิตร อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผงคิวปรัสออกไซด์

ค. การสังเคราะห์โมลิบดีนัม (MoO_3) ผสมคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)

ผสมผงโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) ต่อผงคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) คือ 99.5:0.5, 99:1, 98:2 และ 95:5 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1) และเติมเอทานอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 60 นาที นำมาเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผงวัสดุผสม

ง. ฟิล์มโฟโตโครมิก

ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide, DMF) ปริมาตร 30 มิลลิลิตรผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ปริมาณ 2.0 กรัม ละลายที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 30 นาที จนสารละลายใส เติมผงตัวอย่างที่ได้ในข้อ ค. ปริมาณ 2.0 กรัม กวนทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปเคลือบบนวัสดุที่เราต้องการในที่นี้ใช้แผ่นกระจกซึ่งอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

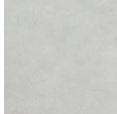
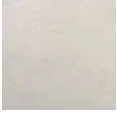
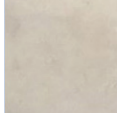
ตัวอย่าง	MoO_3 (%)	Cu_2O (%)	NaOH (g)	Ascorbic acid (g)	HNO_3 (ml)	Ethanol (ml)
A	99.5	0.5	0.2	0.132	30	10
B	99.0	1.0	0.2	0.132	30	10
C	98.0	2.0	0.2	0.132	30	10
D	95.0	5.0	0.2	0.132	30	10
E	100.0	0.0	0.2	0	30	10

3. ผลการวิจัย

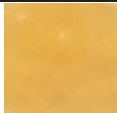
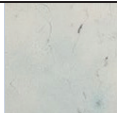
3.1 ลักษณะสีที่วิเคราะห์จากเครื่องวัดสี (Color Meter)

ผลการศึกษาฟิล์มโฟโตโครมิกทั้ง 5 อัตราส่วน คือ A, B, C, D และ E อัตราส่วนที่มีการเปลี่ยนสีที่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนจากการมองด้วยตาและจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี คือ ตัวอย่าง E ที่มีส่วนของโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ 100 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 1) ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงของสีที่วัดได้สูงถึง 35 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 2) ในขณะที่เมื่อเติมคิวปริสออกไซด์ลงไป จะเห็นได้ว่าตัวอย่าง B จะมีความแตกต่างของสีอยู่ที่ 14 เปอร์เซ็นต์ คือ เติมคิวปริสออกไซด์ที่ 1 เปอร์เซ็นต์นั่นเอง สำหรับอัตราส่วนของคิวปริสออกไซด์ที่อัตราส่วนอื่นๆ ค่าความแตกต่างของสีอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2) ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเปลี่ยนสีของโมลิบดีนัมไดรอกไซด์เปลี่ยนจากสีขาวครีมไปเป็นสีน้ำเงิน ในขณะที่คิวปริสออกไซด์ที่มีสีน้ำตาลแดงเข้มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงสี ทำให้ตัวอย่าง E มีค่าการเปลี่ยน

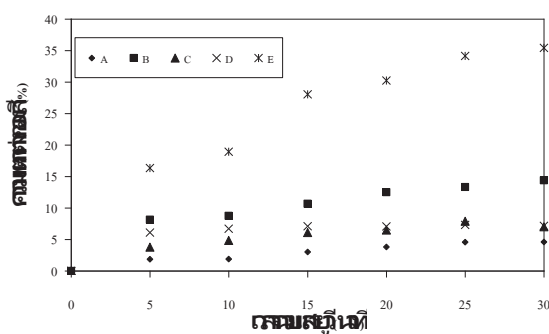
สีสูงที่สุด ในขณะที่การเติมคิวปริสออกไซด์มากเกินไปจะทำให้ตัวอย่าง C และ D มีสีน้ำตาลมากขึ้น เมื่อฉายแสงจึงมีการเปลี่ยนแปลงสีต่ำลงและสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน

ตัวอย่าง	เวลาเริ่มต้น (0 นาที)	เวลาฉายแสงยูวี 30 นาที
A		
B		
C		

รูปที่ 1 แสดงลักษณะการเปลี่ยนสีของ MoO_3 ผสม Cu_2O ที่เวลาฉายแสงยูวี 0-30 นาที

ตัวอย่าง	เวลาเริ่มต้น (0 นาที)	เวลาฉายแสงยูวี 30 นาที
D		
E		

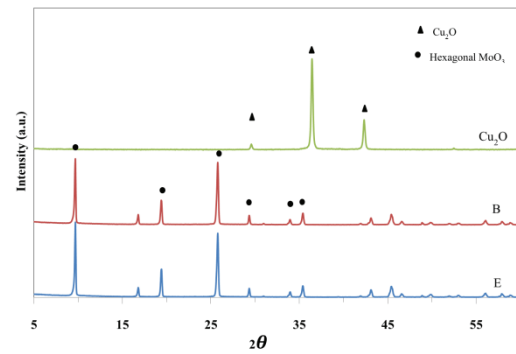
รูปที่ 1 (ต่อ) แสดงลักษณะการเปลี่ยนสีของ MoO_3 ผสม Cu_2O ที่เวลาฉายแสงยูวี 0-30 นาที



รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนสีจากการฉายแสงของสาร โฟโตโครมิกฟิล์ม MoO_3 ผสม Cu_2O เวลาฉายแสง 0-30 นาที

3.2 ผลการวิเคราะห์สารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) และ คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

จากการวิเคราะห์หาเฟสของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) มีเฟสของเฮกซะโกนอลโมลิบดีนัม ($h\text{-MoO}_3$) ที่แสดงตำแหน่งกราฟหลักที่ 9.68° , 19.43° , 25.78° , 29.33° , 34.08° และ 35.48° และพบเฟสของคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) เกิดขึ้นที่ 29.68° , 36.43° และ 42.33° (รูปที่ 3) ซึ่งเป็นเฟสที่มีความไวต่อแสง เมื่อนำไปคำนวณหาขนาดผลึกของโมลิบดีนัม (MoO_3) มีขนาดผลึก 54.02 นาโนเมตร โมลิบดีนัมผสมคิวปริสออกไซด์ ($99\%\text{MoO}_3$ $1\%\text{Cu}_2\text{O}$) มีขนาดผลึก 54.01 นาโนเมตร และคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) มีขนาดผลึก 34.76 นาโนเมตร (ตารางที่ 2)



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) และคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)

ตารางที่ 2 ขนาดผลึกของสารเคลือบโมลิบดีนัมออกไซด์ และคิวปริสออกไซด์

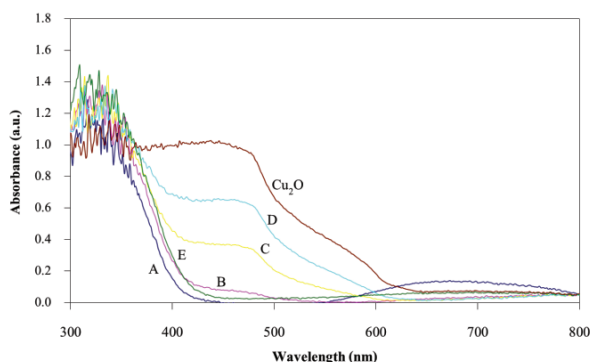
ตัวอย่าง	ขนาดผลึก (nm)
E	54.02
B	54.01
คิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)	34.76

3.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Absorption Spectra)

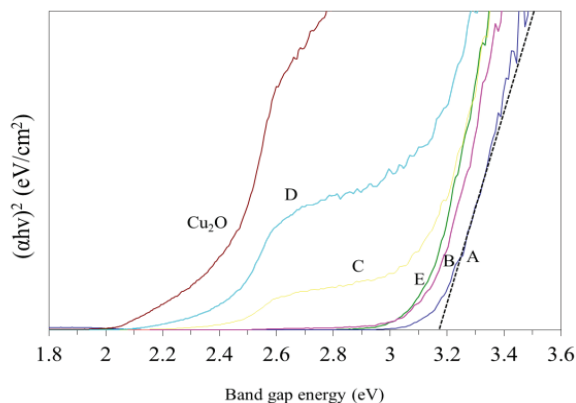
ผลศึกษาการดูดกลืนสเปกตรัม (UV-Vis Absorption Spectra) (รูปที่ 4 ก) ของสารโฟโตโครมิกโมลิบดีนัมเจือด้วยคิวปริสออกไซด์เพิ่มมากขึ้น พบว่าสารโฟโตโครมิกจะมีการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางแสงช่วงที่มองเห็นได้ (Visible light) มากขึ้น ในขณะที่โมลิบดีนัม (MoO_3) ตัวอย่าง E (เส้นสีเขียวในรูปที่ 4) มีผลการดูดกลืนแสงได้สูงที่สุดในช่วงแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งผลของการเจือคิวปริสออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การดูดกลืนแสงช่วงที่มองเห็นได้เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการทำงานของสารโฟโตโครมิกที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งอัตราส่วนคิวปริสออกไซด์ที่เจือลงไปเพื่อให้สารโฟโตโครมิกสามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานต่ำลง (รูปที่ 4 ข) ส่งผลต่อแถบพลังงานของวัสดุ คือ ทำให้วัสดุมีแถบพลังงานลดลง ผลของแถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดลงทำให้วัสดุโฟโตโครมิกใช้พลังงานแสงในการกระตุ้นน้อยลงตามไปด้วย (ตารางที่ 3) นั่นคือ สามารถทำงานในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นที่สูง คือ แสงช่วงที่มองเห็นได้

ตารางที่ 3 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) ผสมคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O)

ตัวอย่าง	แถบพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (eV)
Cu_2O	2.25
A	3.15
B	3.10
C	3.05
D	2.40
E	3.10



ก)



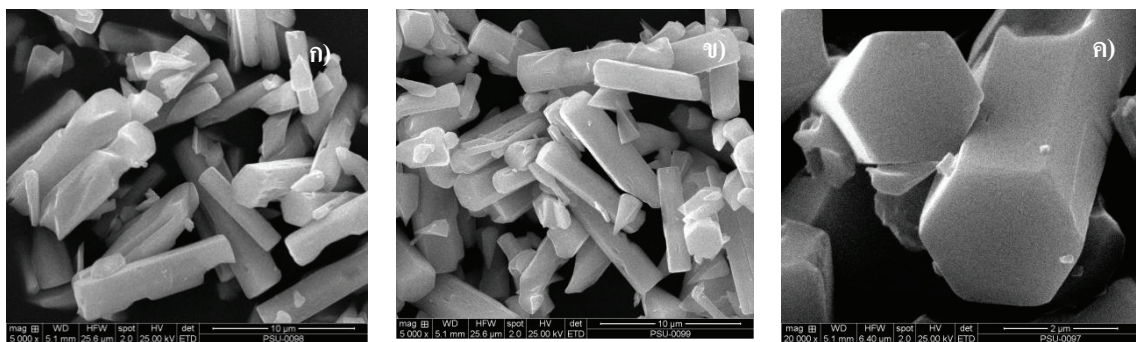
ข)

รูปที่ 4 ดูดกลืนสเปกตรัมของสารเคลือบโมลิบดีนัม (MoO_3) และคิวปริสออกไซด์ (Cu_2O) ความสัมพันธ์ระหว่าง
ก) การดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่น ข) $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน (Photon energy)

3.4 โครงสร้างจุลภาคของสารโฟโตโครมิกที่ส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายที่แตกต่างกัน พบว่าผงเฮกซะโกนอลโมลิบดีนัมออกไซด์ ($h\text{-MoO}_3$) ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นแท่ง ดังรูปที่ 5 ก) และ ข) และเมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างที่กำลังขยาย 20,000 เท่า รูปที่ 5 ค) พบว่าแท่งเหล่านี้มีลักษณะเป็นแท่งปริซึมฐานหกเหลี่ยมอย่างชัดเจน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ ~ 300 นาโนเมตร และมีความยาว 800 นาโนเมตร ซึ่งลักษณะของโมลิบดีนัม

ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเฮกซะโกนอลนี้ มีผลต่อกลไกการเปลี่ยนแปลงสีของ MoO_3 โดยเมื่ออนุภาค Cu_2O และ MoO_3 ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงยูวี ทำให้อิเล็กตรอนของอนุภาคทั้งสองถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำและทำปฏิกิริยากับน้ำในโมเลกุล เกิดไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอิเล็กตรอนจำนวนมาก ไอออนเหล่านี้เข้าไปแทรกในวาเลนซ์ที่มีอยู่จำนวนมากของโครงสร้างเฮกซะโกนอล MoO_3 และเกิดไฮโดรเจนบรอนซ์ (H_xMoO_3) และเลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนลดลงจาก 6+ เป็น 5+ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yao และ Chithambararaj และคณะ [3,21]



รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่าง B ที่กำลังขยาย ก) และ ข) 5,000X ค) 20,000X

4. สรุปผลการศึกษา

การเตรียมฟิล์มบางของโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_3) เจือด้วยคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ได้เคลือบติดบนกระจกโซดาไลม์โดยวิธีการเคลือบ ซึ่งวิธีการตกตะกอนสามารถเตรียมโมลิบดีนัมออกไซด์โครงสร้างเฮกซะโกนอล ($h\text{-MoO}_3$) ลักษณะเป็นแท่ง 6 เหลี่ยม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ ~ 300 นาโนเมตร ในขณะที่การเจือโมลิบดีนัมออกไซด์ด้วยคิวปรัสออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีตกตะกอน ทำให้วัสดุผสมมีแถบพลังงานลดลงต่ำสุดถึง 2.40 eV และวัสดุผสมมีสมบัติดูดกลืนแสงเลื่อนไปสู่แสงช่วงที่มองเห็นได้เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งวัสดุ

ผสมโมลิบดีนัมออกไซด์ด้วยคิวปรัสออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์ แสดงสมบัติโฟโตโครมิคดีที่สุดเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่นๆ และเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีฟ้าอ่อนเมื่อกระตุ้นด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 30 นาที

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ฝ่ายวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากงบรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dürr, H. and Bouas-Laurent, H. Photochromism: molecules and systems: molecules and systems. *Gulf Professional Publishing*, 2003.
- [2] He, T. and Yao, J. Photochromism in composite and hybrid materials based on transition-metal oxides and polyoxometalates. *Progress in Materials Science*, 2006; 51: 810-879.
- [3] Yao, J., Yang, Y. and Loo, B. Enhancement of photochromism and electrochromism in MoO_3/Au and MoO_3/Pt thin films. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1998; 102: 1856-1860.
- [4] Avellaneda, C. Photochromic properties of WO_3 and $\text{WO}_3\text{:X}$ ($\text{X}=\text{Ti, Nb, Ta}$ and Zr) thin films. *Solid State Ionics*, 2003; 165: 117-121.
- [5] Quevedo-Lopez, M., Mendoza-Gonzalez, O., Reidy, R., Ramirez-Bon, R. and Orozco-Teran, R. Effect of energetic treatments on the structure and resistivity of evaporated MoO_3 films on cadmium sulfide substrates. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2000; 61: 727-734.
- [6] Tomás, S.A., Arvizu, M.A., Zelaya-Angel, O. and Rodríguez, P. Effect of ZnSe doping on the photochromic and thermochromic properties of MoO_3 thin films. *Thin Solid Films*, 2009; 518: 1332-1336.
- [7] Kim, H.I., Kim, J., Kim, W. and Choi, W. Enhanced photocatalytic and photoelectrochemical activity in the ternary hybrid of $\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{WO}_3$ through the cascaded electron transfer. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011; 115: 9797-9805.
- [8] Li, L. and Zhang, M. Preparation, Characterization, and Photocatalytic Property of $\text{Cu}_2\text{O}-\text{TiO}_2$ Nanocomposites. *International Journal of Photoenergy*, 2011; 2012: 1-4.

- [9] Yasomane, J.P. and Bandara, J. Multi-electron storage of photoenergy using $\text{Cu}_2\text{O-TiO}_2$ thin film photocatalyst. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008; 92(3): 348-352.
- [10] Liu, L., Gu, X., Sun, C., Li, H., Deng, Y., Gao, F. and Dong, L. In situ loading of ultra-small Cu_2O particles on TiO_2 nanosheets to enhance the visible-light photoactivity. *Nanoscale*, 2012; 4(20): 6351-6359.
- [11] Cui, H.N. Preparation and characterization of optical multilayered coatings for smart windows applications. University of Minho, 2005, 109-112.
- [12] Zheng, H., Ou, J.Z., Strano, M.S., Kaner, R.B., Mitchell, A. and Kalantar-zadeh, K. Nanostructured tungsten oxide-properties, synthesis, and applications. *Advanced Functional Materials*, 2011; 21(12): 2175-2196.
- [13] Miyazaki, H., Baba, Y., Inada, M., Nose, A., Suzuki, H. and Ota, T. Fabrication of photochromic tungsten oxide based composite film using peroxyisopolytungstic acid. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 2011; 84(12): 1390-1392.
- [14] Siokou, A., Leftheriotis, G., Papaefthimiou, S. and Yianoulis, P. Effect of the tungsten and molybdenum oxidation states on the thermal coloration of amorphous WO_3 and MoO_3 films. *Surface science*, 2001; 482: 294-299.
- [15] Leftheriotis, G., Papaefthimiou, S., Yianoulis, P. and Siokou, A. Effect of the tungsten oxidation states in the thermal coloration and bleaching of amorphous WO_3 films. *Thin solid films*, 2001; 384(2): 298-306.
- [16] Romanyuk, A. and Oelhafen, P. Evidence of different oxygen states during thermal coloration of tungsten oxide. *Solar energy materials and solar cells*, 2006; 90(13): 1945-1950.
- [17] Gesheva, K., Szekeres, A. and Ivanova, T. Optical properties of chemical vapor deposited thin films of molybdenum and tungsten based metal oxides. *Solar energy materials and solar cells*, 2003; 76(4): 563-576.
- [18] Yanase, I., Mizuno, T. and Kobayashi, H. Structural phase transition and thermochromic behavior of synthesized W-substituted CuMoO_4 . *Ceramics International*, 2013; 39(2): 2059-2064.
- [19] Liuxue, Z., Peng, L. and Zhixing, S. Photocatalysis anatase thin film coated PAN fibers prepared at low temperature. *Materials chemistry and physics*, 2006; 98(1): 111-115.
- [20] Farooq, W.A., Baig, M.R., Fatehmulla, A., Al-Salhi, M.S., Al-Ghamdi, S.S. and Oghlu, F.Y. Controlling of optical band gap of allyl diglycol carbonate polymer with ultraviolet laser radiation. *Acta Physica Polonica A*, 2013; 123(1); 106-110.
- [21] Chithambararaj, A. and Bose, A.C. Investigation on structural, thermal, optical and sensing properties of meta-stable hexagonal MoO_3 nanocrystals of one dimensional structure. *Beilstein journal of nanotechnology*, 2011; 2(1): 585-592.



การลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนในการ ผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ในอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมผ้าฝ้าย

Reduction of Cycle Time of Sulfolane Recovery Process in Cyanuric Fluoride Manufacturing in Textile Dye Industry

อริยา สุวรรณนิกรกุล* และ นภัสดวงศ์ โอสธศิลป์

Areeya Suwannikornkul* and Napassavong Osothsilp

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

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

*E-mail: blueboney@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อรอบเวลา ความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน ในกระบวนการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ และหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้รอบเวลา ความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารซัลโฟลันลดลง โดยใช้การทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองชนิดบ็อกซ์-เบห์นเคน พบว่าในขั้นตอนการตกตะกอนมีสภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการไหลเท่ากับ 1,115 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเท่ากับ 0.5 รอบต่อนาที และช่วงเวลารอกการตกตะกอนเท่ากับ 0 ชั่วโมง สำหรับขั้นตอนการกลั่นแห้งมีสภาวะที่เหมาะสมคือ ความดันเท่ากับ 30 มิลลิบาร์ อุณหภูมิเท่ากับ 180°C และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งเท่ากับ 20 รอบต่อนาที ผลของการปรับปรุงสรุปได้ว่ารอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนการตกตะกอนลดลงจาก 12 ชั่วโมง/รอบการผลิต เหลือ 9.406 ชั่วโมง/รอบการผลิต และรอบเวลาเฉลี่ยของขั้นตอนการกลั่นแห้งลดลงจาก 12 ชั่วโมง/รอบการผลิต เหลือ 9.6393 ชั่วโมง/รอบการผลิต สำหรับค่าความเข้มข้นของเกลือและค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันยังอยู่ในช่วงกำหนดของโรงงาน

คำสำคัญ: สภาวะที่เหมาะสม, วิธีพื้นผิวตอบสนอง, บ็อกซ์-เบห์นเคน, รอบเวลา

ABSTRACT

In this study, Response Surface Methodology (RSM) with the Box-Behnken design is employed to evaluate the effects of factors on the cycle time, salt content and sulfolane content including the optimal settings of these factors. The results from RSM analysis indicate that the optimal condition of sedimentation step is flow rate of 1,115 kilogram/hour, speed agitator of sedimentation tank of 0.5 round/minute and waiting time of sedimentation of 0 hours and the optimal condition of distillation step is pressure of 30 mbar, temperature of 180°C and speed agitator of vertical dryer of 20 round/minute. After improvement, the cycle time of sedimentation step is reduced from 12 hour/batch to 9.406 hour/batch. The cycle time of distillation step is reduced from 12 hour/batch to 9.6393 hour/batch. Moreover, the salt content and the sulfolane content correspond to the factory specification.

Keywords: Optimal Conditions, Response Surface Methodology, Box-Behnken, Cycle Time

1. บทนำ

สารโซลันทรินฟลูออไรด์เป็นสารที่นำมาใช้เป็นหมักเยาะผ้าฝ้ายและผสมกับสีย้อมผ้า เพื่อให้สีสามารถเกาะติดกับผ้าได้ กระบวนการผลิตสารโซลันทรินฟลูออไรด์แบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิต และกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน ซึ่งสารซัลโฟลันเป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตสารโซลันทรินฟลูออไรด์ จากการศึกษารอบเวลากระบวนการผลิตสารโซลันทรินฟลูออไรด์พบว่า กระบวนการผลิตมีรอบเวลาโดยเฉลี่ย 8 ชั่วโมง และกระบวนการนำสารกลับคืนมีรอบเวลาโดยเฉลี่ย 12 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ารอบเวลาของกระบวนการนำสารกลับคืนมากกว่ากระบวนการผลิต ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ลดรอบเวลาของกระบวนการนำสารกลับคืนให้น้อยกว่าเท่ากับรอบเวลาของกระบวนการผลิตคือ 8 ชั่วโมง เพื่อให้ทำให้กระบวนการผลิตสารโซลันทรินฟลูออไรด์มีรอบเวลาดลดลงจาก 12 ชั่วโมงเป็น 8 ชั่วโมง

หลังจากที่ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนแล้วจึงแบ่งกระบวนการออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังต่อไปนี้ ขั้นตอนการตกตะกอน ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง ขั้นตอนการกลั่นแห้ง ตามลำดับ

ในขั้นตอนการตกตะกอน เริ่มจากการปล่อยสารละลายซัลโฟลันจากถังพักส่งไปยังถังตกตะกอน โดยแบ่งการรับสารเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกปล่อยสารมาเติมถังตกตะกอน จากนั้นรอเกลือตกตะกอนประมาณ 1 ชั่วโมง ระหว่างนี้จะต้องควบคุมให้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง $145 - 155^{\circ}\text{C}$ และความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเท่ากับ 0.5 รอบ/นาที การตกตะกอนนั้นจะทำให้เกิดการแยกของแข็ง ซึ่งก็คือ เกลือโซเดียมคลอไรด์และเกลือโซเดียมฟลูออไรด์ออกจากสารซัลโฟลัน หลังจากครบ 1 ชั่วโมงจึงจะเริ่มทำการรับสารครั้งที่สอง นั่นก็คือ การรับสารละลายซัลโฟลันส่วนที่เหลือเข้ามาด้วยอัตราการไหลที่ช้า เพื่อไม่ให้เกลือที่ตกตะกอนอยู่ฟุ้งกระจาย ระหว่างการปล่อยสารส่วนนี้จะทำให้สารที่อยู่ถังตกตะกอนค่อยๆ ล้นออกมาซึ่งจะนำไปเก็บในถังน้ำล้น (Overflow Tank) แล้วทำการตรวจสอบ

ความเข้มข้นของเกลือ (Salt Content) ซึ่งกำหนดว่าต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1% จากนั้นจึงปั๊มเกลือไปยังเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (Vertical Dryer) เป็นอันสิ้นสุดขั้นตอนการตกตะกอน ต่อจากขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการกลั่นสาร ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง และขั้นตอนการกลั่นแห้ง

สารที่ทำการกลั่นในขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง คือ สารที่ล้นออกมาจากถังตกตะกอน หลังจากที่ผ่านมาการตรวจสอบความเข้มข้นของเกลือแล้ว จึงนำไปกลั่นต่อที่เครื่องกลั่นระเหยแห้ง (Evaporator) กระบวนการของเครื่องกลั่นระเหยแห้งนี้คือให้ความร้อนกับสาร เพื่อให้สารซัลโฟลันระเหยแยกออกจากเกลือโดยใช้สมบัติของสารที่มีจุดเดือดแตกต่างกัน ก่อนการกลั่นจะทำการควบคุมความดันอากาศจากปกติ 1,000 มิลลิบาร์ ให้เหลือประมาณ $40 - 60$ มิลลิบาร์ เพื่อให้จุดเดือดของสารซัลโฟลัน (286°C) ลดลงเหลือประมาณ $160 - 200^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะทำให้การควบคุมความดันและอุณหภูมิไปเช่นนี้ตลอดขั้นตอน สารซัลโฟลันที่ระเหยจะส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อเปลี่ยนสถานะจากแก๊สกลับเป็นของเหลว จากนั้นจะส่งไปยังถังรับ (Receiver Tank) ซึ่งถึงนี้จะทำหน้าที่ในการรับสารและนำไปตรวจสอบปริมาณน้ำในสารซัลโฟลันที่กลั่นเสร็จ (Water Content) ว่าน้อยกว่า 0.1% หรือไม่ เนื่องมาจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีน้ำเจือปนเข้ามาภายในระบบ ก่อนที่จะส่งไปเก็บที่ถังเก็บสารซัลโฟลัน (Sulfolane Storage Tank)

ในขั้นตอนการกลั่นแห้ง จะทำการกลั่นเกลือที่ถูกปั๊มมาจากถังตกตะกอน กระบวนการทำงานของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งคล้ายกันกับเครื่องกลั่นระเหยแห้ง แต่เครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งจะมีใบพัดไว้สำหรับคนสารให้เข้ากันเพิ่มเติม ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้งที่ใช้อยู่เท่ากับ 20 รอบ/นาที ภายหลังจากการกลั่นจะได้เกลือจำนวนมาก ซึ่งจะนำไปตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน (Sulfolane Content) ว่าไม่น้อยกว่า 3% หรือไม่ ก่อนถูกส่งไปกำจัดทิ้ง ส่วนสารซัลโฟลันที่กลั่นมาได้นั้นจะถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่น แล้วนำไปตรวจสอบ

ปริมาณน้ำในสารละลายโฟลันเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้ง ก่อนนำไปเก็บที่ถังเก็บสารละลายโฟลัน เพื่อนำไปใช้ต่อไปในการผลิตไซยานูริกฟลูออไรด์ต่อไป

สรุปรอบเวลาเฉลี่ยของแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้ ขั้นตอนการตกตะกอนและขั้นตอนการกลั่นแห้งนั้นใช้ระยะเฉลี่ยเท่า ๆ กันที่ 12 ชั่วโมง ขั้นตอนการกลั่นระเหยแห้งนั้นใช้รอบเวลาเฉลี่ยประมาณ 8 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าขั้นตอนที่ทำให้กระบวนการนำสารละลายโฟลันกลับคืนยาวนานคือ ขั้นตอนการตกตะกอนและขั้นตอนการกลั่นแห้ง ดังนั้นขอบเขตงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะ 2 ขั้นตอนดังกล่าว

จุดประสงค์ของขั้นตอนการตกตะกอนคือ ต้องการให้มีเกลือตกตะกอนอยู่บริเวณก้นถังตกตะกอนมากที่สุด และสารที่ล้นออกมามีเกลือปะปนน้อยที่สุดโดยใช้รอบเวลาน้อยที่สุด ถ้าหากต้องการใช้เวลาในขั้นตอนการตกตะกอนน้อย อัตราเร็วในการปล่อยสารลงในถังตกตะกอนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบกับรอบเวลา ในงานวิจัยของ Goula กล่าวว่า การปล่อยสารลงในถังตกตะกอนสามารถปล่อยด้วยอัตราการไหลเร็วได้ นอกจากจะทำให้ลดรอบเวลาในการรอการปล่อยสารแล้ว ยังทำให้เพิ่มจำนวนอนุภาคนาโนเล็กบริเวณก้นถังได้ ทั้งนี้ต้องไม่ทำให้อนุภาคที่รวมอยู่บริเวณก้นถังก่อนหน้านั้นฟุ้งกระจาย [1] นอกจากอัตราเร็วในการปล่อยสารที่ส่งผลต่อรอบเวลา และความเข้มข้นของอนุภาคที่ล้นออกจากถังตกตะกอนแล้วยังมีอีกปัจจัยหนึ่งคือความเร็วใบพัดในการคนสารของถังตกตะกอน Rieger และ Ditzl ได้ทำการศึกษาการแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่อยู่ใต้มัน ซึ่งมีการคนสารตลอดรอบเวลาปฏิบัติงาน พบว่าการเพิ่มความเร็วของใบพัดจะทำให้อนุภาคของแข็งฟุ้งกระจายมากขึ้น [2] Rieger ได้นำงานวิจัยดังกล่าวมาศึกษาต่อพบว่า ถ้าหากความเข้มข้นของอนุภาคสูงขึ้น จะต้องเพิ่มความเร็วในการคนสาร เพื่อให้ตกตะกอนเร็วขึ้น จึงจะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอนลดลง [3] ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงความเข้มข้นของเกลือที่ล้นออกจากถังตกตะกอนต้องไม่เกิน 1%

จุดประสงค์ของขั้นตอนการกลั่นแห้ง คือ ต้องการกลั่นเกลือที่บ่มออกจากถังตกตะกอนให้แห้งมากที่สุดโดยใช้รอบเวลาน้อยที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาในขั้นตอนนี้คือ ความดันและอุณหภูมิของเครื่องกลั่นแห้งแนวดิ่ง จากงานวิจัยของ Thomson และ Senol พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิแปรผันตามกันซึ่งเป็นไปตามสมการ Antoine กล่าวคือ ถ้าหากว่าลดความดันลงจะทำให้จุดเดือดของสารลดลง [4, 5] แต่ในความเป็นจริงแล้วสามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องให้มากกว่าจุดเดือดของสารได้ เพราะยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นก็ยิ่งทำให้สารละลายโฟลันระเหยเร็วขึ้น ทั้งนี้ต้องระวังไม่ให้อนุภาคของเกลือฟุ้งติดไปกับสารละลายโฟลันที่ระเหย เมื่อทำการลดความดันมากเกินไป ดังนั้นจึงต้องการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิและความดันที่จะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนนี้ลดลง และความเข้มข้นของสารละลายโฟลันในเกลือที่กลั่นออกมาไม่เกิน 3%

จากงานวิจัยในอดีตนั้น ได้กล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อรอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอนและการกลั่นแห้ง แต่ไม่ได้ทำการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่อาจส่งผลต่อรอบเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย รวมทั้งศึกษาปัจจัยอื่นๆที่อาจส่งผลกระทบต่อรอบเวลาของทั้งสองขั้นตอนร่วมด้วย

มีงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาเกี่ยวกับการลดรอบเวลาในการผลิต ซึ่งเริ่มการดำเนินงานวิจัยด้วยการวิเคราะห์หาสาเหตุและผลกระทบ จากนั้นจึงใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง ประเภทการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อหาค่าปรับตั้งเครื่องจักรที่ดีที่สุดเพื่อให้รอบเวลาในการผลิตต่ำที่สุดในขณะที่ต้องสามารถควบคุมไม่ให้ตัวแปรตอบสนองอื่นเกินกว่าค่าที่กำหนด สุดท้ายจึงทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าการตั้งค่าเครื่องจักรใหม่สามารถลดรอบเวลาและสามารถควบคุมตัวแปรตอบสนองอื่นได้จริง [6] ในงานวิจัยดังกล่าวมีวัตถุประสงค์และขั้นตอนการดำเนินงานใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ เพียงแต่เป็นอุตสาหกรรมที่แตกต่าง

กัน จึงต้องปรับขั้นตอนการดำเนินงานและเลือกแบบการทดลองให้มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการตกตะกอนและขั้นตอนการกลั่นแห้งของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืน โดยศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อรอบเวลาแต่ละขั้นตอนและกำหนดค่าของตัวแปรเพื่อให้ได้รอบเวลาน้อยที่สุด รวมถึงพิจารณาตัวแปรตอบสนองอื่นๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการจัดตั้งทีมงานเพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลาในขั้นตอนทั้งสอง ต่อจากนั้นจึงคัดเลือกปัจจัยที่จะทำการปรับปรุงโดยใช้หลักการพาเรโต (Pareto) ในการคัดเลือกและแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ปัจจัยที่จะต้องนำไปทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่สามารถนำไปแก้ไขได้ทันที สำหรับปัจจัยที่จะต้องนำไปทำการทดลองจะนำมาพิจารณาเพื่อหาแบบการทดลองที่เหมาะสม แล้วจึงทำการทดลองและนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านั้น

2.1 การจัดตั้งทีมงานเพื่อกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลา

ทีมงานที่จัดตั้งขึ้น ซึ่งภายในทีมประกอบไปด้วยผู้จัดการฝ่ายผลิต นักเคมีฝ่ายผลิต และหัวหน้างาน จำนวน 3 คน จากนั้นจึงระดมสมองหาปัจจัยและผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาที่ละขั้นตอน โดยนำเกณฑ์ของการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis) มาประยุกต์ใช้ให้มีความเหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่เกณฑ์ในเรื่อง ความรุนแรง (Severity: S) ความถี่ในการเกิด (Occurrence) และ ความสามารถในการตรวจจับ (Detection)

Sellappan และ Palanikumar ได้เสนอว่า ในกรณีที่ถูกคลนในทีมให้คะแนนแตกต่างกัน ควรใช้ค่าเฉลี่ย RPN

(Risk Priority Number) เป็นตัวเลขแสดงความเสี่ยงซึ่งได้มาจากค่าเฉลี่ยของผลคูณที่เป็นไปได้ทั้งหมดของค่า S, O และ D หลังจากได้ค่าเฉลี่ย RPN แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการคัดเลือกเรื่องที่จะนำมาปรับปรุงแก้ไข โดยปกติแล้วจะเลือกเรื่องที่มีค่า RPN สูงมาปรับปรุงก่อน [7] แต่ถ้าหากเป็นเรื่องที่มีผลกระทบรุนแรงต่อความปลอดภัยของชีวิตหรือเกี่ยวข้องกับกฎหมาย จะนำเรื่องดังกล่าวมาปรับปรุงก่อน แล้วจึงเลือกเรื่องที่มีค่า RPN สูงตามมา [8]

2.2 การคัดเลือกปัญหาและแบ่งประเภทของปัจจัย

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบแล้ว จึงนำค่า RPN เฉลี่ยของปัจจัยแต่ละปัจจัยมาเรียงลำดับเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไข โดยใช้หลักการพาเรโตกล่าวคือจะเลือกเรื่องที่มีผลกระทบเป็น 80% ของค่า RPN ของเรื่องทั้งหมด

หลังจากคัดเลือกปัจจัยที่จะนำไปศึกษาต่อแล้ว จึงแบ่งประเภทของปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยที่สามารถนำไปแก้ไขได้ทันที และปัจจัยที่จะต้องนำไปทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย

2.3 การเลือกแบบการทดลอง

สำหรับปัจจัยที่ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมจะทำการทดลอง โดยใช้แบบการทดลองชนิดพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าตามต้องการ โดยการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์นี้มีหลายแบบการทดลองด้วยกัน เช่น การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) การออกแบบเฟส-เซ็นเตอร์ เซ็นทรัลคอมโพสิท (Face Centered Central Composite Design) และการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นต้น [9] การตัดสินใจเลือกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของแบบการทดลอง จำนวนปัจจัย และจำนวนการทดลอง

2.4 การทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากเลือกแบบการทดลองแล้ว จึงสร้างเมตริกซ์การออกแบบ (Design Matrix) ตามที่ได้เลือกไว้ โดย

แบ่งเป็น 2 แบบ สำหรับขั้นตอนการตกตะกอนและขั้นตอนการกลั่นแห้ง

ต่อมาจึงเริ่มทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง โดยจะทำการทดลองและวิเคราะห์ผลขั้นตอนการตกตะกอนก่อน จึงนำสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการตกตะกอนไปใช้สำหรับทดลองและวิเคราะห์ผลในขั้นตอนการกลั่นแห้งต่อไป

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ การใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plots) ในการอธิบายทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย และการหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอน สมการความสัมพันธ์จะแสดงอยู่ในรูปแบบสมการถดถอยแบบกำลังสอง (Second-order Polynomial Regression) [9] ดังสมการนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j$$

โดยที่ $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ x_i คือตัวแปรอิสระ

แปรอิสระ

สำหรับการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญทางสถิติของสมการความสัมพันธ์จะประเมินด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ (Analysis of Variance, ANOVA) ที่นัยสำคัญ 0.05 โดยที่ความเหมาะสมของสมการความสัมพันธ์จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ร่วมด้วย

2.5 การยืนยันผลสมการความสัมพันธ์

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ว่าสามารถนำไปใช้ในการทำนายได้อย่างน่าเชื่อถือหรือไม่ จึงต้องทำการยืนยันผล โดยจะทำการยืนยันในขั้นตอนการตกตะกอนก่อน ต่อมาจึงทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการกลั่นแห้ง และทำการยืนยันผลในขั้นตอนการกลั่นแห้ง การยืนยันผลของแต่ละขั้นตอนจะทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 3 ครั้งการทดลอง แล้วจึงทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนายของสมการความสัมพันธ์

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

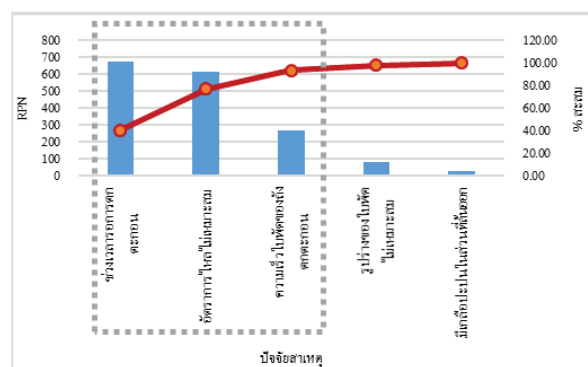
3.1 ผลการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อรอบเวลา

ผลการระดมสมองเพื่อวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและกระทบของทีมงานแสดงในตารางที่ 1 - 2

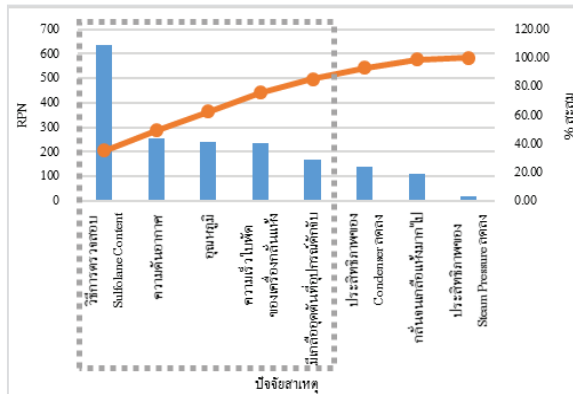
3.2 ผลการกรองปัญหา

นำผลการวิเคราะห์หาปัจจัยจากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 มากรองปัจจัยโดยใช้หลักการพาเรโต เพื่อทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาของกระบวนการนำสารกลับคืน ดังแสดงในรูปที่ 1 - 2 ตามลำดับ

สรุปปัจจัยที่จะทำการศึกษาและนำไปทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการตกตะกอน ได้แก่ ช่วงเวลาการตกตะกอน อัตราการไหล และความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน ขั้นตอนการกลั่นแห้ง ได้แก่ ความดันอากาศ อุณหภูมิ และความเร็วใบพัดเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง สำหรับวิธีการตรวจสอบความเข้มข้นของสารซัลโฟลันนั้นได้ทำการแก้ไขโดยส่งไปตรวจสอบที่ห้องทดลองนอกโรงงาน และปัญหาเรื่องเกลืออุดตันที่อุปกรณ์คัดจับนั้นได้จัดการทำความสะอาดก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 1 แผนภูมิพาเรโตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RPN กับปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาขั้นตอนการตกตะกอน



รูปที่ 2 แผนภูมิฟารโตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า RPN กับปัจจัยที่มีผลต่อรอบเวลาขั้นตอนการกลั่นแห้ง

3.3 ผลการออกแบบการทดลอง

3.3.1 กำหนดตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนการตกตะกอนมี 2 ค่า คือ รอบเวลาเมื่อสิ้นสุดการปั่นเกลี่ยออกจากถังตกตะกอน (y_1) และค่าความเข้มข้นของเกลี่ยของสารที่ปั่นออกจากถัง (y_2) ซึ่งกำหนดว่าต้องน้อยกว่า 1% สำหรับขั้นตอนการกลั่นแห้งมีตัวแปรตอบสนอง 2 ค่า เช่นกัน คือ รอบเวลาเมื่อสิ้นสุดการกลั่นแห้ง (y_3) และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันในเกลี่ยที่กลั่นเสร็จ (y_4) ซึ่งกำหนดว่าต้องน้อยกว่า 3%

3.3.2 เลือกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้เลือกแบบการทดลองบอกซ์-เบห์นเคนในการทำการทดลอง เนื่องจากการออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนมีจำนวนครั้งการทดลองที่น้อยกว่าการออกแบบส่วนประสมกลาง โดยการออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนมี 15 ครั้ง การทดลองและการออกแบบส่วนประสมกลางมี 20 ครั้ง การทดลองสำหรับ 3 ปัจจัย [10] นอกจากนี้ยังมีค่า Resolution เท่ากับ IV ซึ่งสามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic Effects) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Interaction Effects) ได้ [11] โดยผลกระทบหลัก (Main Effects) จะปะปน (Confounding) กับผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัยซึ่งทำให้ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยปะปนกัน

ในการศึกษานี้ต้องใช้เวลาน้อย 12 ชั่วโมงต่อการทดลอง ซึ่งใช้ระยะเวลาในการทดลองนาน จึงจำเป็นต้องเลือกแบบการทดลองที่มีจำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด แม้ว่าจะมีคุณภาพของผลการทดลองที่ต่ำกว่าแบบการทดลองอื่นๆ เช่น แบบการทดลองส่วนประสมกลาง แต่พิจารณาถึงระยะเวลาในการทำการทดลองแล้ว จึงควรเลือกแบบการทดลองบอกซ์-เบห์นเคน

3.3.3 ระดับของปัจจัยที่ทดลอง

ปัจจัยต่างๆจะถูกกำหนดระดับการทดลองเป็น 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) กลาง (0) และสูง (+1) ดังตารางที่ 3 - 4

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยในขั้นตอนการตกตะกอน

ปัจจัย	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	1
อัตราการไหล (Flow: F)	กิโลกรัม/ชั่วโมง	500	850	1,200
ความเร็วใบพัด (Speed of Agitator: L)	รอบ/นาที	0.5	2.25	4
ช่วงเวลารอกการตกตะกอน (Sediment: S)	ชั่วโมง	0	0.5	1

การกำหนดระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนการตกตะกอน มีรายละเอียดการตั้งค่าดังนี้ “อัตราการไหล (F)” กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 500 – 1,200 กิโลกรัม/ชั่วโมง และ “ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (L)” กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0.5 – 4 รอบ/นาที เนื่องจากเป็นช่วงการปฏิบัติงานในปัจจุบัน จึงกำหนดขอบเขตการทดลองให้อยู่ในช่วงดังกล่าว ปัจจัยสุดท้ายคือ “ช่วงเวลารอกการตกตะกอน (S)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0 – 1 ชั่วโมง เนื่องจากการตั้งค่าในสภาวะปัจจุบันอยู่ที่ 1 ชั่วโมงทุกรอบการผลิต ถ้าหากต้องการลดรอบเวลาของขั้นตอน จึงต้องกำหนดให้ช่วงเวลารอกการตกตะกอนต่ำลง ซึ่งในที่นี้ผู้วิจัยได้กำหนดระดับต่ำของการทดลองให้เท่ากับ 0 ชั่วโมง เนื่องจากมี

ความเป็นไปได้ที่ไม่จำเป็นต้องรอตกตะกอน และกำหนดระดับสูงของการทดลองให้เท่ากับสภาวะปัจจุบัน

ตารางที่ 4 ระดับของปัจจัยในขั้นตอนการกลั่นแห้ง

ปัจจัย	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
		-1	0	1
ความดัน (Pressure: P)	มิลลิบาร์	30	45	60
อุณหภูมิ (Temperature: T)	°C	160	180	200
ความเร็วใบพัด (Speed of Agitator: V)	รอบ/นาที	10	15	20

การกำหนดระดับของปัจจัยที่ทดลองในขั้นตอนการกลั่นแห้ง สำหรับปัจจัยแรกคือ “ความดัน (P)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 30 – 60 mbar เนื่องจากเป็นช่วงปฏิบัติงานในปัจจุบัน ซึ่ง 30 mbar เป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้ ปัจจัยต่อมาคือ “อุณหภูมิ (T)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ช่วง 160 – 200°C เนื่องจากเป็นช่วงปฏิบัติงานในปัจจุบัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมกับความดันตามสมการ Antoine [4, 5] สำหรับปัจจัยสุดท้ายคือ “ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งแนวตั้ง (V)” สาเหตุที่กำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 10 – 20 รอบ/นาที เนื่องจากการตั้งค่าความเร็วใบพัดในสภาวะปัจจุบันอยู่ที่ 20 รอบ/นาที ซึ่งเป็นการตั้งค่าที่สูงที่สุดของเครื่องจักร สาเหตุที่ต้องตั้งค่าสูงสุดเพราะคาดว่าสารที่อยู่ในเครื่องกลั่นแห้งน่าจะมีลักษณะเป็นของหนืดค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องค่าสูงสุดเพื่อให้มีแรงในการคนสาร แต่อาจจะมีความเป็นไปได้ว่าสารที่อยู่ในเครื่องกลั่นแห้งนั้นไม่ได้มีลักษณะเป็นของหนืดมากตามที่คาดการณ์ไว้ จึงกำหนดให้ระดับต่ำของการทดลองเท่ากับ 10 รอบ/นาที ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางที่เครื่องจักรสามารถตั้งค่าได้

3.3.4 เมตริกซ์การออกแบบ

เมตริกซ์การออกแบบของทั้งสองขั้นตอนแสดงใน 4 คอลัมน์แรกของตารางที่ 5 - 6

3.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองของทั้งสองขั้นตอนแสดงในคอลัมน์ที่ 5 - 6 ของตารางที่ 5 - 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 เมตริกซ์การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของขั้นตอนการตกตะกอน

การทดลอง ที่	ตัวแปร			รอบเวลา (ชม.)	ความเข้มข้น เกลือ (%)
	F (กก./ชม.)	L (รอบ/นาที)	S (ชม.)		
1	850	0.5	1	11.9	0.7
2	1,200	2.25	0	9.1	0.89
3	500	2.25	1	17.1	0.59
4	1,200	2.25	1	10.	0.9
5	850	0.5	0	10.5	0.53
6	850	4	0	10.6	0.9
7	850	2.25	0.5	11.0	0.81
8	500	2.25	0	12.4	0.61
9	500	0.5	0.5	15.9	0.5
10	500	4	0.5	16.4	0.8
11	850	2.25	0.5	11.2	0.87
12	850	4	1	11.8	0.96
13	1,200	4	0.5	9.6	1.17
14	1,200	0.5	0.5	9.5	0.73
15	850	2.25	0.5	11.4	0.89

ตารางที่ 6 เมตริกซ์การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของขั้นตอนการกลั่นแห้ง

การทดลอง ที่	ตัวแปร			รอบเวลา (ชม.)	ความเข้มข้น ซัลโฟ ลัน (%)
	P (มิลลิบาร์)	T (°C)	V (รอบ/นาที)		
1	45	160	20	12.7	1.92
2	30	180	10	10.7	1.02
3	60	180	20	12.5	2.79
4	30	160	15	11.0	1.22
5	45	180	15	11.5	1.53
6	45	200	10	13.1	1.46
7	60	160	15	14.9	3.13
8	45	160	10	13.8	1.96
9	30	180	20	10.0	0.82
10	60	200	15	14.2	1.78
11	45	200	20	12.2	1.44
12	45	180	15	11.4	1.72
13	45	180	15	11.6	1.55
14	30	200	15	11.5	1.32
15	60	180	10	13.6	2.86

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนการตกตะกอน

Process Function	Failure Mode	Effects of Failure Mode		Severity		Causes of Failure Mode	Occurrence			Current Control	Detection			RPN	RPN Average	Rank
		เร็ว: เกิดข้อผิดพลาดที่ส่วนที่ลิ้นอก	ช้า: รอบเวลานาน	NTP	NDN	SS	NTP	NDN	SS		NTP	NDN	SS			
ขั้นตอนการตกตะกอน	อัตราการไหลที่เร็วเกินไปไม่เหมาะสม	เร็ว: เกิดข้อผิดพลาดที่ส่วนที่ลิ้นอก		9	9	9	8	8	8	จับเวลา	8	8	9	576, 648	612	2
	มีเกลือปะปนในส่วนที่สั้นออกมา	เร็ว: เกิดข้อผิดพลาดที่ส่วนที่ลิ้นอก		7	8	8	2	2	2	Temperature Gauge	2	2	2	28, 32	30	5
	ความเร็วในการไหลของตกตะกอนที่เร็วเกินไปไม่เหมาะสม	เร็ว: เกิดข้อผิดพลาดที่ส่วนที่ลิ้นอก		8	9	9	9	9	9	หน้าอควบคุม	3	4	4	216, 288, 243, 324	267.75	3
	ช่วงเวลารอคอยตกตะกอนที่เร็วเกินไปไม่เหมาะสม	น้อย: เกิดข้อผิดพลาดที่ส่วนที่ลิ้นอก		9	9	9	10	10	10	จับเวลา	8	8	7	630, 720	675	1
	รูปร่างของใบพัดไม่เหมาะสม	ไม่สามารถคนสารได้อย่างทั่วถึง		5	5	4	3	3	3	ใช้สายตาในการตรวจสอบ	6	6	6	72, 90	81	4

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของขั้นตอนการกลั่นแห้ง

Process Function	Failure Mode	Effects of Failure Mode	Severity			Causes of Failure Mode	Occurrence			Current Control	Detection			RPN Average	Rank
			NTP	NDN	SS		NTP	NDN	SS		NTP	NDN	SS		
ขั้นตอนการกลั่นแห้ง	ความเร็วในการปั๊มของเครื่องกลั่นแห้งที่ใช้ไม่เหมาะสม	เร็ว: เกิดเสียงดังผิดปกติที่ระเหยช้า: รอบเวลานาน	8	8	9	ไม่มีอาการกำหนดความเร็วในปั๊มที่เฉพาะสม	8	8	8	หน้าจอบวม	3	4	4	192, 256, 216, 288	4
	ความดันอากาศที่ใช้ไม่เหมาะสม	ลดมากไป: เกิดเสียงดังผิดปกติส่วนที่ระเหยลดน้อยไป: รอบเวลานาน	8	7	8	ไม่มีอาการกำหนดความดันที่เหมาะสม	8	8	9	Pressure Transmitter	4	4	4	224, 252, 256, 288	2
	อุณหภูมิที่ใช้ไม่เหมาะสม	สูง: เกิดเสียงดังทั้งในเครื่องต่ำ: รอบเวลานาน	8	7	8	ไม่มีอาการกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสม	8	8	8	Temp. Transmitter	4	4	4	224, 256, 240	3
	กลิ่นแรงเกินไป	รอบเวลานาน	5	5	4	ไม่มีเวลาหยุดกลิ่นที่เหมาะสม	3	4	3	ใช้สายดาใน การตรวจสอบ	7	7	7	84, 112, 105, 140	7
	ประสิทธิภาพของ Steam Pressure ลดลง	รอบเวลานาน	8	9	8	Boiler มีปัญหาไม่ทำงาน	1	1	1	Pressure Transmitter	2	2	2	16, 18	8
	ประสิทธิภาพของ Condenser ลดลง	รอบเวลานาน	8	8	8	เกลืออุดตันอยู่ภายใน Condenser	3	4	4	อัตราการกลั่น	5	5	5	120, 160	6
	มีเกลืออุดตันที่อุปกรณ์ดักจับ (Demister)	สารไหลไปยัง Condenser ช้า ทำให้รอบเวลานาน	8	8	7	ไม่ทำความสะอาด สะอาดอุปกรณ์ดักจับ	4	5	5	Pressure Transmitter	5	5	5	140, 175, 160, 200	5
	วิธีการตรวจสอบ Sulfolane Content ไม่ถูกต้อง	ผลการทดสอบไม่น่าเชื่อถือ	9	8	9	ไม่ทราบวิธีการตรวจสอบที่น่าเชื่อถือ	10	10	10	Reduced Pressure Filtration	7	8	7	560, 640, 630, 720	1

3.4.1 สมการความสัมพันธ์

จากผลการทดลองตารางที่ 5 - 6 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัยหลังจากตัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญด้วยวิธี Stepwise ออกไปแล้ว จะได้รูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 รูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสม

สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและปัจจัย	R ² (%)
$y_1 = 22.7 - 0.02376F + 6.66S + 0.000011F^2 - 0.00543FS$	96.38%
$y_2 = 0.1511 + 0.000425F + 0.0979L + 0.312S - 0.257S^2$	94.11%
$y_3 = 108.18 + 0.28P - 1.143T - 0.095V + 0.003277T^2 - 0.001PT$	98.34%
$y_4 = -6.02 + 0.1837P + 0.0404T + 0.000948P^2 - 0.001208PT$	94.87%

คุณภาพของสมการความสัมพันธ์ซึ่งประเมินได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) พบว่ามีค่ามากกว่า 80% ทั้ง 4 สมการ แสดงว่าสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ดี และมีความแม่นยำในการทำนายผลลัพธ์

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระในแต่ละพจน์ของสมการความสัมพันธ์สามารถคำนวณได้จากโปรแกรม MINITAB ซึ่งนัยสำคัญทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวหาได้จากค่า P-value เมื่อพิจารณาสมการ y₁ พจน์ที่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ อัตราการไหล (F) ช่วงเวลาการตกตะกอน (S) พจน์กำลังสองของอัตราการไหล (F²) และพจน์อิทธิพลร่วมอัตราการไหลและช่วงเวลาการตกตะกอน (FS) เมื่อพิจารณาสมการ y₂ พจน์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ อัตราการไหล (F) ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอน (L) ช่วงเวลาการตกตะกอน (S) และพจน์กำลังสองของช่วงเวลาของการตกตะกอน (S²) ในขณะที่ไม่มีพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยใดมีนัยสำคัญต่อสมการ y₂ เมื่อพิจารณา

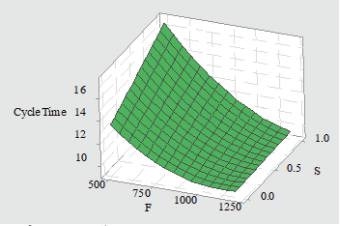
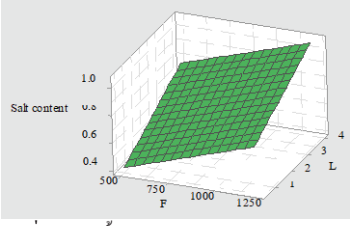
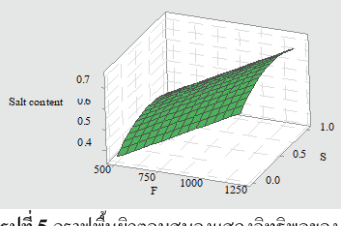
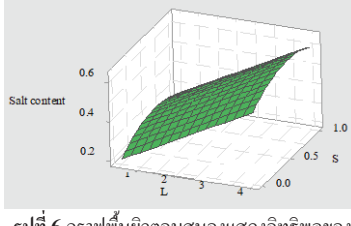
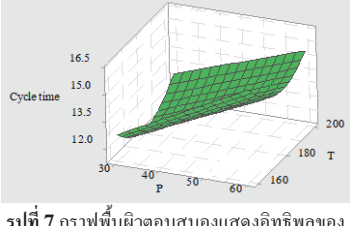
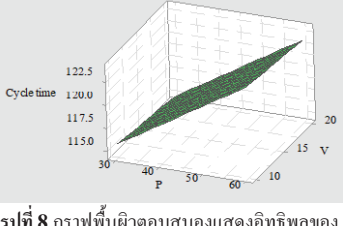
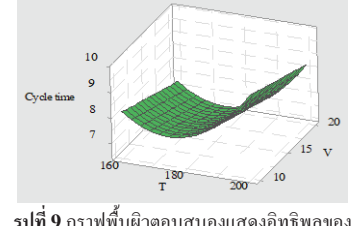
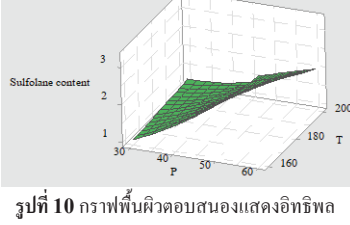
สมการ y₃ พจน์ที่มีนัยสำคัญต่อรอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้ง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) ความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง (V) พจน์กำลังสองของอุณหภูมิ (T²) และพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (PT) สุดท้ายเมื่อพิจารณาสมการ y₄ พจน์ที่มีนัยสำคัญต่อค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟแลน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แก่ ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) พจน์กำลังสองของความดัน (P²) และพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิ (PT)

3.4.2 กราฟพื้นผิวตอบสนอง

จากสมการ y₁ จะเห็นได้ว่าพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการไหลและช่วงเวลาการตกตะกอนมีนัยสำคัญ จึงอธิบายได้ว่า การลดลงของช่วงเวลาการตกตะกอนจะทำให้รอบเวลาลดลงมากที่อัตราการไหลต่ำ แต่การลดลงของช่วงเวลาการตกตะกอนที่อัตราการไหลสูงไม่ทำให้รอบเวลาเปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้รอบเวลาลดลงแบบเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3

จากสมการ y₂ จะเห็นได้ว่าไม่มีพจน์อิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย เมื่อพิจารณาการลดลงของอัตราการไหล จะทำให้ความเข้มข้นของเกลือลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 และเมื่อพิจารณาการลดลงของความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือลดลงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 6 สำหรับช่วงเวลาการตกตะกอนกับความเข้มข้นของเกลือมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งคว่ำ โดยช่วงกลางของช่วงเวลาการตกตะกอนจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือสูงกว่า เมื่อเทียบกับช่วงต่ำและสูง ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6

จากสมการ y₃ จะเห็นได้ว่ามีเพียงพจน์อิทธิพลร่วมระหว่างความดันและอุณหภูมิที่มีนัยสำคัญ จึงอธิบายได้ว่า การลดลงของความดันที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้รอบเวลาลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 7 และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิกับรอบเวลาที่มีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยช่วงกลางของอุณหภูมิจะทำให้รอบเวลาดำกว่าเมื่อเทียบกับช่วงต่ำและสูง ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 9

Y ₁		 รูปที่ 3 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ อัตราการไหลและช่วงเวลารอการตกตะกอนต่อ รอบเวลาของขั้นตอนการตกตะกอน	
Y ₂	 รูปที่ 4 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ อัตราการไหลและความเร็วใบพัดของถัง ตกตะกอนต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ	 รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ อัตราการไหลและช่วงเวลารอการตกตะกอนต่อ ค่าความเข้มข้นของเกลือ	 รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนและช่วงเวลารอ การตกตะกอนต่อค่าความเข้มข้นของเกลือ
Y ₃	 รูปที่ 7 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ ความดันและอุณหภูมิต่อรอบเวลาของขั้นตอน การกลั่นแห้ง	 รูปที่ 8 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ ความดันและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง ต่อรอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้ง	 รูปที่ 9 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของ อุณหภูมิและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งต่อ รอบเวลาของขั้นตอนการกลั่นแห้ง
Y ₄	 รูปที่ 10 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพล ของความดันและอุณหภูมิต่อค่าความเข้มข้นของ สารซัลโฟลัน		

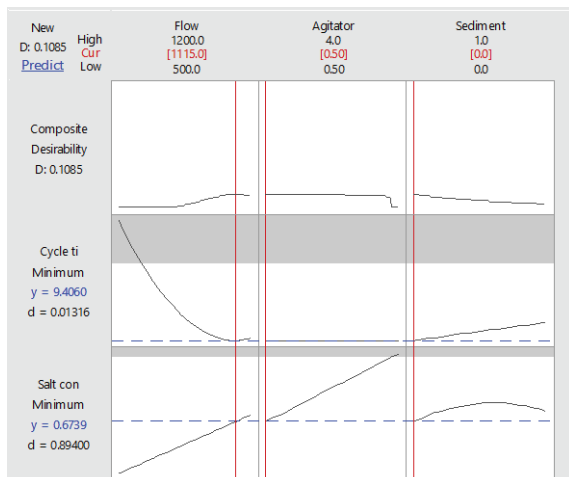
สำหรับการเพิ่มขึ้นของความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง แนวตั้งจะทำให้รอบเวลาลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 จากสมการ y₄ จะเห็นได้ว่าพจน์อิทธิพลร่วมระหว่าง ความดันและอุณหภูมิมีนัยสำคัญ จึงอธิบายได้ว่า การ เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟ ลานเพิ่มขึ้นไม่มากนักที่ความดันต่ำ แต่การเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิจะทำให้ความเข้มข้นของสารซัลโฟลานลดลงมาก

ที่ความดันสูง และความดันลดลงจะทำให้ความเข้มข้นของ สารซัลโฟลานลดลงแบบเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 10

3.4.3 สภาวะที่เหมาะสม

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของตัวแปรได้แก่ อัตรา การไหล ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนและช่วงเวลารอ การตกตะกอน เพื่อให้ได้รอบเวลาขั้นตอนการตกตะกอน และค่าความเข้มข้นของเกลือที่น้อยที่สุดหาได้จากสมการ y₁ และ y₂ ซึ่งพบว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการ

ตกตะกอนคือ อัตราการไหลเท่ากับ 1,115 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วใบพัดเท่ากับ 0.5 รอบ/นาที และช่วงเวลารอการตกตะกอนเท่ากับ 0 ชั่วโมง ดังรูปที่ 11 ซึ่งจะให้รอบเวลาขั้นตอนการตกตะกอนเท่ากับ 9.406 ชั่วโมงและความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 0.6739%

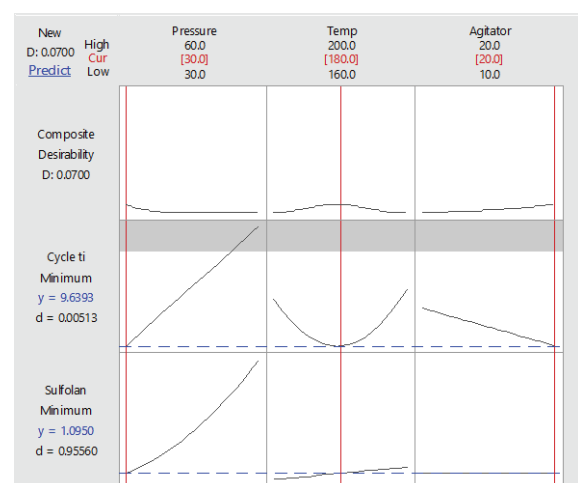


รูปที่ 11 กราฟแสดงสถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนการตกตะกอน

สำหรับการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมตัวแปรได้แก่ ความดัน อุณหภูมิและความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้ง เพื่อให้ได้รอบเวลาขั้นตอนการกลั่นแห้งและค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันน้อยที่สุดหาได้จากสมการ y_3 และ y_4 ซึ่งพบว่าค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการกลั่นแห้งคือ ความดัน 30 มิลลิบาร์ อุณหภูมิ 180°C และความเร็วใบพัด 20 รอบ/นาที ซึ่งจะทำให้รอบเวลาขั้นตอนการกลั่นแห้งเท่ากับ 9.6393 ชั่วโมง และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันเท่ากับ 1.095% ดังแสดงในรูปที่ 12

3.5 การยืนยันผลการทดลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นทั้ง 4 สมการ ว่าสามารถนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาใช้ในการทำนายรอบเวลา ค่าความเข้มข้นของเกลือ และค่าความเข้มข้นของสารซัลโฟลันได้หรือไม่จึงนำสถานะที่เหมาะสมดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.4.3 ไปทำการทดลองจริง ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากสมการทดลองเพื่อยืนยันสมการความสัมพันธ์



รูปที่ 12 กราฟแสดงสถานะที่เหมาะสมของขั้นตอนการกลั่นแห้ง

ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8 - 9 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าออกติพบว่ายู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือไม่ควรมากเกิน 5% [12] แสดงให้เห็นว่าสถานะที่เหมาะสมทั้งสองสถานะของทั้งสองขั้นตอนที่ได้จากสมการความสัมพันธ์มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ในการทำนายได้

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการตกตะกอน

เงื่อนไขที่เหมาะสม	รอบเวลาขั้นตอนการตกตะกอน (y_1)		ค่าอคติ ² (%Bias)	ความเข้มข้นของเกลือ (y_2)		ค่าอคติ ² (%Bias)
	ค่าที่ได้จากการทดลอง ¹	ค่าที่ได้จากสมการ		ค่าที่ได้จากการทดลอง ¹	ค่าที่ได้จากสมการ	
อัตราการไหล (1,115 กก./ชม.)	9.616	9.406	2.23	0.643	0.6739	4.536
ความเร็วใบพัด (0.5 รอบ/นาติ)						
ช่วงเวลารอคอยตกตะกอน (0 ชม.)						

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการกลั่นแห้ง

เงื่อนไขที่เหมาะสม	รอบเวลาขั้นตอนการกลั่นแห้ง (y_3)		ค่าอคติ ² (%Bias)	ความเข้มข้นของสารซัลโฟลัน (y_4)		ค่าอคติ ² (%Bias)
	ค่าที่ได้จากการทดลอง ¹	ค่าที่ได้จากสมการ		ค่าที่ได้จากการทดลอง ¹	ค่าที่ได้จากสมการ	
ความดัน (30 มิลลิบาร์)	9.556	9.6393	0.864	1.143	1.095	4.384
อุณหภูมิ (180°C)						
ความเร็วใบพัด (20 รอบ/นาติ)						

¹ค่าที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยจำนวน 3 ครั้ง

²Bias คำนวณได้จาก $[(\text{ค่าที่ได้จากสมการ} - \text{ค่าที่ได้จากการทดลอง}) / \text{ค่าที่ได้จากสมการ}] \times 100$

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวตอบสนองและการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับทำนาย และหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรของขั้นตอนการตกตะกอนและขั้นตอนการกลั่นแห้งของกระบวนการนำสารซัลโฟลันกลับคืนได้เป็นอย่างดี โดยสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการตกตะกอน คือ อัตราการไหลเท่ากับ 1,115 กิโลกรัม/ชั่วโมง ความเร็วใบพัดของถังตกตะกอนเท่ากับ 0.5 รอบ/นาติ และช่วงเวลารอคอยการตกตะกอนเท่ากับ 0 ชั่วโมง จะทำให้รอบเวลาของขั้นตอนนี้เท่ากับ 9.406 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยลง จากเดิมใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง และความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 0.6739% ซึ่งยังอยู่ภายในช่วงที่กำหนดไว้คือน้อยกว่า 1% สำหรับ

ขั้นตอนการกลั่นแห้งมีสภาวะที่เหมาะสมคือ ความดันเท่ากับ 30 มิลลิบาร์ อุณหภูมิเท่ากับ 180 °C และความเร็วใบพัดของเครื่องกลั่นแห้งเท่ากับ 20 รอบ/นาติ จะทำให้ได้รอบเวลาของขั้นตอนนี้เท่ากับ 9.6393 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยลง จากเดิมใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง และความเข้มข้นของสารซัลโฟลันเท่ากับ 1.095% ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ คือน้อยกว่า 3% อย่างไรก็ตามจากการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ในงานวิจัยนี้ได้ปรับตั้งค่าระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษาไว้ในขอบเขตที่ปฏิบัติงานในปัจจุบัน ซึ่งมีบางปัจจัยที่สามารถปรับตั้งให้อยู่นอกขอบเขตที่ทำการวิจัยได้ จึงแนะนำให้ทำการทดลองเพิ่มเติมในช่วงของปัจจัยที่อยู่นอกขอบเขตของงานวิจัยซึ่งอาจจะทำให้ได้ค่าของตัวแปรตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น อีกทั้งอาจมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปร

ตอบสนองที่งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษา จึงควรศึกษาเพิ่มเติม
ในการวิจัยครั้งต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท บริษัท อันท์แมน (ประเทศไทย)
จำกัด สำหรับการสนับสนุนและอนุเคราะห์ในการ
ศึกษาวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณนพณัช ขจรไพศาลและ
หน่วยงานผลิต ที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา
คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Goula, A.M., Kostoglou, M. and Karapantsios, T.D. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks on potable water treatment: Case study: The influence of a feed flow control baffle. *Chemical Engineering Journal*, 2008; 140(1-3):110-121.
- [2] Rieger, F. and Dittl, P. Suspension of solid particles. *Chemical Engineering Science*, 1994; 49(14): 2219-2227.
- [3] Rieger, F. Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension. *Chemical Engineering and Process Intensification*, 2002; 41(4): 381-384.
- [4] Thomson, G.W. The Antoine equation for vapor-pressure data. *Chemical Reviews*, 1946; 38(1): 1-39.
- [5] Senol, A. Solvation-based vapour pressure model for (solvent + salt) systems in conjunction with the Antoine equation. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2013, 67: 28-39.
- [6] Buddhachakara, S. Cycle time reduction in ball bearing production process. MEng Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2013.
- [7] Sellappan, N. and Palanikumar, K. Development of modified evaluation and prioritization of risk priority number in FMEA. *International Journal of Engineering (IJE)*, 2013; 7(1): 32-43.
- [8] Miller, B.M. and Chetty, I.J. An alternative metric for detecting high-severity incident reports analyzed using FMEA. *International Journal of Radiation Oncology*, 2015; 93(3): S16.
- [9] Montgomery D.C. Design and Analysis of Experiments. 8 ed., John Wiley & Sons, New York, 2013.
- [10] Jamchue, P. Reduction of Bubble Defects in Plastic Packaging Production Process. The IE Network Conference 2011, Chonburi, Thailand, 2011.
- [11] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2551.
- [12] Worapun, I., Chooppava, C. and Thinvongpituk, C. Optimal conditions of friction welding process for AISI 1015 steel using response surface methodology. *KKU Research Journal*, 2013; 18(6): 909-924.



การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสม สำหรับการผลิตโฟมกลาสจากเศษแก้วสีอำพัน Education Factors Suitable for The Production of Foam Glass Foam Amber Glass Splinter

บุญญิตี พันธุ์ประสิทธิ์เวช และ ปฏิพัทธ์ หงษ์สุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000

Banyat Panprasitvech and Patipat Hongsuwan

Department of Industrial Engineering and Management,

Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.

E-mail: otani1443@yahoo.co.th โทรศัพท์ 092 3432389

บทคัดย่อ

การศึกษานงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษากระบวนการผลิตโฟมกลาส ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาส ซึ่งทำการทดสอบสาร 2 ชนิด คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตที่เวลาและอุณหภูมิเดียวกัน เพื่อหาชนิดของสารที่ดีที่สุดในการพองตัว โดยการออกแบบการทดลองโดยใช้การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในขั้นตอนการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาขนาดของผงแก้วที่เหมาะสม และการทดลองเพื่อหาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตโฟมกลาสด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องมีด้วยกัน 3 ปัจจัย คือ สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส เวลาในการแช่ อุณหภูมินั้น ๆ และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส จากการศึกษาข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Minitab ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ขนาดของผงแก้วที่เหมาะสมคือน้อยกว่า 75 ไมครอน สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาสต้องมีส่วนผสมของโพแทสเซียมคาร์บอเนต เพราะโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งทำให้มีการพองตัวได้ดีกว่าการใช้โซเดียมคาร์บอเนต อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาโฟมกลาสที่เหมาะสมคืออุณหภูมิที่ 840 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการแช่ 20 นาที

คำสำคัญ: โฟมกลาส การทดลองแฟกทอเรียล

ABSTRACT

The purpose of this research aims to investigate the factors affecting foaming of foam glass performed with two substances which are Potassium Carbonate and Sodium Carbonate at the same operating period and temperature. The best foaming substance could be found out by full factorial experiment. The study is divided into two main parts. The first one is an experiment on the appropriate size of the glass powder then finding the factors and the finally is suitable condition for foam glass production by response surface technique. The considered factors are the formula used in the foam glass production, the soaking period at a specified temperature and the temperature in foam glass burning by Minitab Program at a level of 0.05 significance. The statistical analysis shows that the appropriate size of the glass powder is 75 microns. The recipe to produce foam glass must have Potassium Carbonate ingredient since the substance could be disintegrated at a lower temperature compared with Sodium

Carbonate thus better inflation could be formed. The suitable temperature period for foam glass burning is 840°C and the soaking period at this temperature is 20 minutes.

Keywords: Foam Glass, Factorial Design

1. บทนำ

ในปัจจุบันเราได้ตระหนักถึงปัญหาของสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างไม่ระมัดระวัง ซึ่งส่งผลกระทบต่อและก่อให้เกิดปัญหาในด้านต่าง ๆ รวมถึงปัญหาปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้น วรรณดา ต.แสงจันทร์ [1] กล่าวว่าประเทศไทยมีเศษแก้วที่อยู่ประมาณ 40,000 ตันต่อปี ได้นำเศษแก้วมาบดและเผาขึ้นรูปเพื่อคุณสมบัติเพื่อสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตแก้ว ซึ่งเศษแก้วเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมในอนาคต ทำให้หน่วยงานรัฐและเอกชนต่าง ๆ ได้ร่วมรณรงค์ให้มีการนำวัสดุที่เหลือใช้นี้กลับมาใช้ใหม่ (Recycling) และการใช้ซ้ำ (Reuse) จึงเป็นแนวทางตลอดจนมาตรการในการจัดการกับวัสดุขยะที่ยังมีศักยภาพในการใช้ประโยชน์เหล่านี้ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการบูรณาการองค์ความรู้อื่นเข้าไปมีส่วนร่วมในการจัดการ ก็ยังเป็นการเพิ่มทางออกที่หลากหลายให้กับการแก้ปัญหาดังกล่าวได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทำโฟมกลาส จากเศษแก้วโดย นำแก้วที่บดละเอียดผสมกับสารที่ให้ก๊าซหรือสารก่อฟอง (Gasifier or Foaming Agent) ส่วนมากเป็นพวกคาร์บอน หรือสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous Substances) ซึ่งการทำอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว จะสามารถใช้เป็นฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารบ้านเรือน การทำโฟมกลาสจากเศษแก้วทำได้โดยนำเศษแก้วมาบดให้ละเอียด จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยสารประกอบที่ต่างกัน Yigit Attila [2] ได้กล่าวถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ 700 - 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่สามารถบอกถึง ขนาดความโตของผงแก้วที่นำมาทดลอง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้สำหรับการทดลองการผลิตโฟมกลาส มีผลต่อคุณสมบัติการผลิตโฟมกลาสอย่างไร

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบการทดลองโดยใช้การทดลองแฟคทอเรียล และใช้โปรแกรม Minitab ในการตรวจสอบว่าสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส อุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อคุณสมบัติของโฟมกลาส โดยกำหนดให้การเผาโฟมกลาสที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกัน เพื่อหาสูตรที่ใช้ผลิต เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำโฟมกลาสจากเศษแก้ว เพื่อเป็นแนวทางเลือกในอุตสาหกรรมวัสดุและการศึกษาต่อไปในการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนต่างๆ ได้ เช่น ผนัง ฉนวนกันความร้อน สำหรับอาคารบ้านเรือน หรือ อุตสาหกรรมงานก่อสร้าง และอื่นๆ

วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาส

ขอบเขตการวิจัย

1. กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย มีลักษณะเป็น 2 กลุ่มทดลอง ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของโฟมกลาส สูตร A และสูตร B ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนผสมของโฟมกลาส

ส่วนผสม	สูตร A (เปอร์เซ็นต์)	สูตร B (เปอร์เซ็นต์)
ผงแก้ว	86.54	86.54
โซเดียมซิลิเกต	6.73	6.73
กลีเซอรอล	2.88	2.88
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	3.85	-
โซเดียมคาร์บอเนต	-	3.85

* ผงแก้วที่นำมาทดลองเป็นผงแก้วที่ได้มาจากขวดเบียร์ลิโ

2. ตัวแปรที่ศึกษา

2.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ ขนาดความละเอียดผงแก้ว และสูตร

2.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ การพองตัวของโฟมกลาส

2.3 ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ระยะเวลาในการบดผง แก้ว อุ่นหมุ่ในการเผา และเวลาในการแช่ของอุณหภูมิ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา [3] กล่าวว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรปัจจัย หรือตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนอง หรือตัวแปร ว่ามีความสัมพันธ์กันใดในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในด้านการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม (ค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ) สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยจะออกมาในรูปแบบสมการการพยากรณ์ ($Y=f(x)$) เพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต ส่วนการออกแบบการทดลองผลลัพธ์ที่ได้จะทราบว่าปัจจัยหรือตัวแปรอิสระใดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง

2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเชิงแฟกทอเรียลระดับ 2^k และ 3^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่ปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลางและสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ

2.3 พื้นผิวผลตอบสนอง

ปารเมศ ชูดิมา [4] ได้กล่าวไว้ว่าวิธี (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ ตัว และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาส มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาขนาดผงแก้วที่เหมาะสม

นำเศษแก้วสีขามาบดหยาบด้วยเครื่องบด Ball Mill จากนั้นนำผงแก้วที่ผ่านการบดหยาบมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 125 และ 75 ไมครอนตามลำดับ โดยผงแก้วที่ผ่านการร่อนจะมีขนาดของผงแก้วดังนี้

- 1) ค่าเฉลี่ยผงแก้วที่มีขนาด 1-75 ไมครอน
- 2) ค่าเฉลี่ยผงแก้วที่มีขนาด 75-125 ไมครอน
- 3) ค่าเฉลี่ยผงแก้วที่มีขนาด 125-150 ไมครอน
- 4) ค่าเฉลี่ยผงแก้วที่มีขนาดโตกว่า 150 ไมครอน

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาสเท่ากับ 700 840 และ 940 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างขนาดของผงแก้ว

นำผงแก้วที่ผ่านการแยกขนาดเรียบร้อยแล้วมาทดลองผสมสูตร 2 สูตร โดยสูตร A ใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตและสูตร B โซเดียมคาร์บอเนต ปริมาณเท่ากัน 3.85% ในการทำทดลองผลิตเม็ดโฟมกลาส ดังตารางที่ 1 แล้วจะนำไปขึ้นรูปด้วยบล็อกเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มม.หนา 10 มม. ซึ่งเป็นการใช้กำลังมือในการกดอัดให้เป็นเม็ด ให้มีน้ำหนักเม็ดละ 10 กรัม จากนั้นทดลองเผาที่อุณหภูมิ 700, 840 และ 980 องศาเซลเซียส และการแช่ไว้ที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน เวลาใช้การแช่ 10, 20 และ 30 นาที แล้วทำการเก็บข้อมูลในตารางบันทึกผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายเพื่อหาขนาดผงแก้วที่เหมาะสมที่สามารถนำไปทดลองได้โดยการวัดค่าความหนาแน่นของโฟมกลาสจากสูตร

$$\text{จากสูตร } \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi r^2 h}$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของวัตถุ (kg/m^3)

m คือ น้ำหนักของวัตถุ (kg)

V คือ ปริมาตรของวัตถุ (m^3)

3.2 การออกแบบการทดลอง

เมื่อทดลองและวัดค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม Minitab 17 เพื่อหาขนาดของผงแก้วที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลอง

การกำหนดสมมติฐาน รูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย มีลักษณะความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{สมการเส้นตรงเต็มรูป : } Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

เมื่อวิเคราะห์หาผงแก้วที่เหมาะสมแล้ว ให้ทำการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และ 3^k ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ศึกษาพื้นผิวตอบสนองด้วยการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และ 3^k

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย			หน่วย
		Low (-1)	Medium (0)	High (1)	
สูตร	Formula	A	-	B	-
เวลา	Time	10	20	30	Minute
อุณหภูมิ	Temperature	700	840	980	°C

ทำการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และ 3^k โดยมีการทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง ดังนั้นจะได้การทดลอง 90 การทดลอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อเป็นการลดค่าความแปรปรวน

3.3 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และ 3^k

นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์และสรุปผลโดยใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป ซึ่งมีขั้นตอนหลัก ๆ อยู่ 2 ขั้นตอน คือ การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy

Checking) และการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโพลีเมส โดยศึกษาจากพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

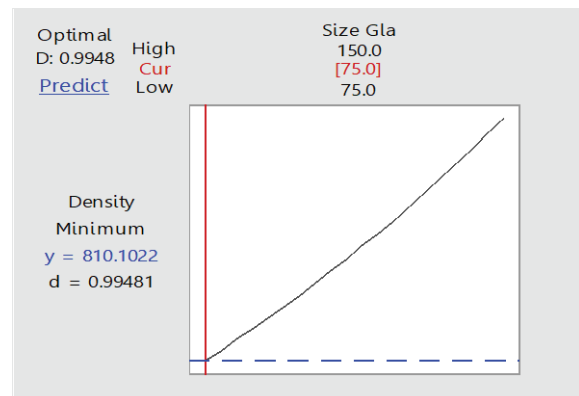
4.1 การทดลองเบื้องต้นโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis)

จากการทดลองเพื่อหาขนาดของผงแก้วที่ดีที่สุดในการนำไปวิเคราะห์หาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการพองตัวของโพลีเมส การทดลองนี้จะนำผงแก้วทั้งสามขนาดไปผสมทั้ง 2 สูตร จากนั้นนำไปขึ้นรูปและเผาที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งใช้เวลาในการแช่ 20 นาที ดังผลการทดลองตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงความหนาแน่นของโพลีเมสทั้ง 2 สูตร

No.	ค่าเฉลี่ยของผงแก้ว (μm)	ความหนาแน่น (Kg/m^3)	
		สูตรที่ A	สูตรที่ B
1	1 - 75	806.31	896.74
2	75 - 125	889.93	1,007.80
3	125 - 150	1,098.36	1,537.58

ขนาดผงแก้ว ที่มีขนาดโตกว่า 150 ไมครอนไม่สามารถทำการทดลองได้จากข้อมูลผลการทดลองเบื้องต้น ทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า ขนาดของผงแก้วที่เหมาะสมในการนำไปทดลองขั้นต่อไป คือ ผงแก้วที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงขนาดของผงแก้วที่เหมาะสม โดยใช้ Optimization Plot

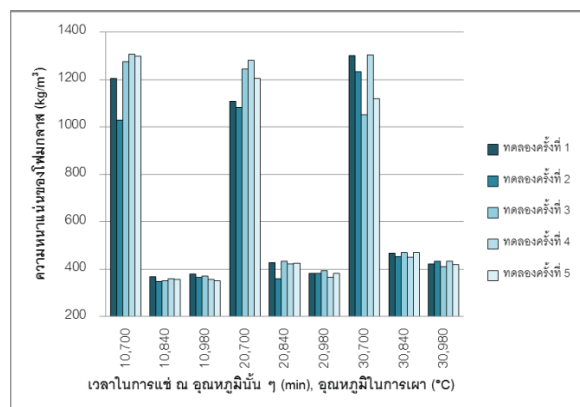
4.2 การทดลองโดยใช้การออกแบบ การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและสามระดับ

เพื่อหาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการพองตัวของโฟมกลาสขึ้นตอนต่อไปก็คือ การดำเนินการ

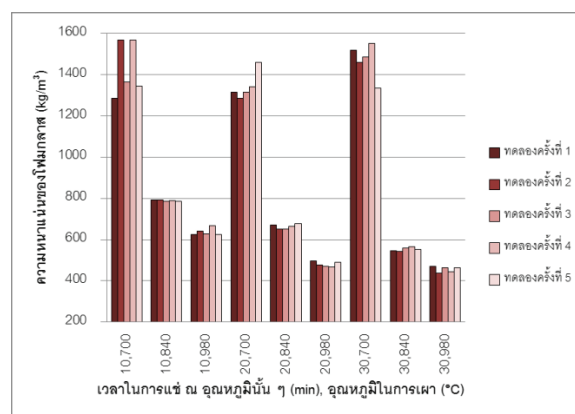
ทดลองตามรูปแบบการทดลองที่ได้ออกแบบ พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง และผลการทดลองโดยกำหนดค่า α ไว้ที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และ 3^k ที่มีการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

Run Order	Factor			Density				
	Formula	Time	Tempe-rature	1	2	3	4	5
1	-1	-1	-1	1,204.33	1,029.86	1,275.78	1,306.19	1,297.78
2	-1	-1	0	1,107.29	1,082.86	1,244.73	1,280.61	1,203.58
3	-1	-1	1	1,300.30	1,234.18	1,051.07	1,303.27	1,120.26
4	-1	0	-1	366.83	349.24	350.92	358.70	356.43
5	-1	0	0	428.80	359.91	434.03	421.04	425.15
6	-1	0	1	467.52	452.49	469.89	451.04	471.48
7	-1	1	-1	377.96	364.10	369.49	357.95	351.23
8	-1	1	0	381.81	382.87	392.72	366.08	382.87
9	-1	1	1	421.63	433.60	411.56	434.24	418.00
10	1	-1	-1	1,283.67	1,567.43	1,363.61	1,568.15	1,344.93
11	1	-1	0	1,314.91	1,283.67	1,314.91	1,341.49	1,458.11
12	1	-1	1	1,518.24	1,458.11	1,486.05	1,550.21	1,333.30
13	1	0	-1	791.19	791.48	787.21	787.54	786.52
14	1	0	0	669.41	650.15	651.57	663.38	677.91
15	1	0	1	547.52	541.34	560.47	567.17	553.93
16	1	1	-1	624.39	639.82	628.23	668.36	626.52
17	1	1	0	497.49	477.97	471.48	465.94	491.48
18	1	1	1	469.08	437.74	465.12	445.78	462.80



รูปที่ 3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการแช่และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (°C) กับความหนาแน่นของโฟมกลาส (kg/m^3) ของสูตร A

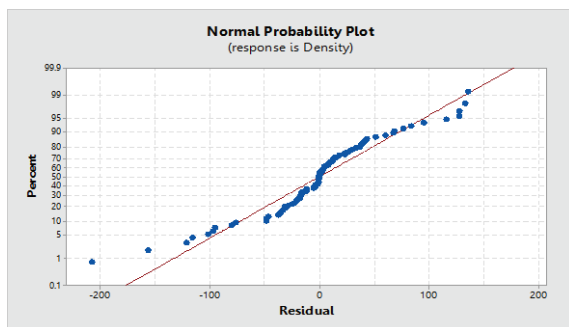


รูปที่ 4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการและอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (°C) กับความหนาแน่นของโฟมกลาส (kg/m^3) ของสูตร B

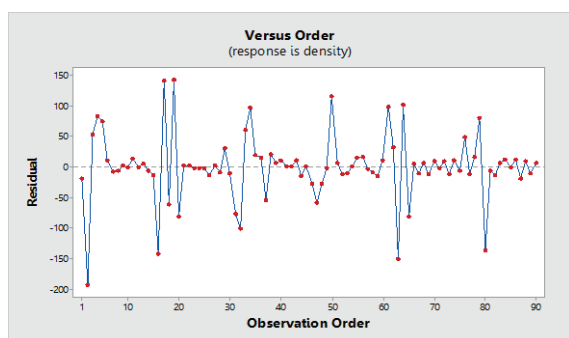
จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่า ค่าความหนาแน่นของโพลีกลาสมีค่าไม่เท่ากันที่ช่วงเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนาแน่นของโพลีกลาสแปรผันตามเวลาในการแช่และอุณหภูมิในการเผา

4.3 ตรวจสอบผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและสามระดับ (2^k and 3^k Factorial Design)

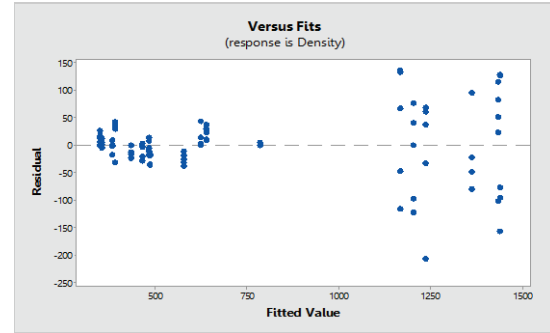
จากตารางที่ 4 นำมาตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติตามแนวเส้นตรง มีรูปแบบเป็นอิสระและมีความใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง ทำให้ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน จึงมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้ ดังรูปที่ 5 ก ข และ ค



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 แสดงการตรวจสอบของค่า Residual (2^k and 3^k Factorial Design)

หลังจากขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองแล้ว นำข้อมูลในตารางที่ 4 ไปทำการวิเคราะห์ทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และ 3^k โดยจะมีรูปแบบเทอมการทดลองทั้งหมด 4 แบบ คือ Linear, Linear + Square, Linear + Interaction และ Full Quadratic เพื่อหาสมการถดถอยที่ดีที่สุดในการหาพื้นที่ผิวตอบสนอง ซึ่งจากการทดลองพบว่ารูปแบบเทอม Full Quadratic ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากที่สุด ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยเลือกรูปแบบเทอมแบบ Full Quadratic

Response Surface Regression: Density versus Formular, Time, Temperature.						
Formular*Temperature	1	21956	21956	4.04	0.048	
Time*Temperature	1	12693	2693	2.34	0.130	
Error	81	440139	5434			
Lack-of-Fit	9	180861	20096	5.58	0.000	
Pure Error	72	259278	360			
Total	89	14737115				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
73.7144	97.014	96.724	96.234			
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		14809	576	25.72	0.000	
Formula	1191	596	118	5.04	0.000	57.72
Time	-3.32	-1.66	9.55	-0.17	0.862	100.72
Temperature	-62.64	-31.32	1.34	-23.36	0.000	417.63
Time*Time	0.722	0.361	0.165	2.19	0.031	49.00
Temperature* Temperature	.034042	0.017021	0.000785	21.68	0.000	410.63
Formula* Time	-17.24	-8.62	1.90	-4.53	0.000	8.00
Formula* Temperature	-0.528	-0.264	0.131	-2.01	0.048	52.72
Time* Temperature	-0.02457	-0.01228	0.00804	-1.53	0.130	57.72
Regression Equation in Units						
Density = 14382 + 1229 + 0.56 Time – 0.21538 Temperature + 0.00361 Time*Time + 0.000001 Temperature* Temperature – 1.724 Formula*Time – 0.00364 Formula* Temperature – 0.000008 Time* Temperature						

4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนของการพองตัวของโฟมกลาส

ด้วยหลักการทางสถิติดังตารางที่ 5 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาสอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) คือ สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) เวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ

สมมติฐาน อิทธิพลของสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส อุณหภูมิในการเผาโฟมกลาสและเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ

$$H_0 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0$$

(สมการที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส อุณหภูมิในการเผาโฟมกลาสและเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของโฟมกลาส)

$$H_1 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัว ไม่เท่ากับศูนย์}$$

(สมการที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส อุณหภูมิในการเผาโฟมกลาสและเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ ไม่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของโฟมกลาส)

เมื่อ

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส

β คือ อิทธิพลที่เกิดจากอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส

γ คือ อิทธิพลที่เกิดจากเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ

จากสมมติฐาน พบว่า สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาสมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของโฟมกลาส แต่เวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ ที่ได้ไม่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของโฟมกลาส สามารถเขียนแบบจำลองสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์

ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาส ได้สมการดังนี้

$$Y = 14382 + 1229x_1 + 0.56x_2 - 0.21538x_3 + 0.00361x_2^2 + 0.000001x_3^2 - 1.724x_1x_2 - 0.0036x_1x_3 - 0.000008x_2x_3 \quad (1)$$

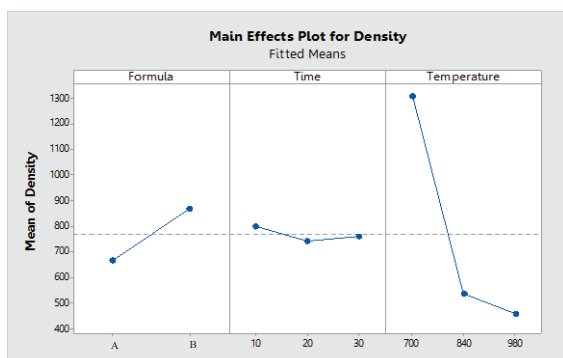
เมื่อ y คือ ค่าความหนาแน่นการพองตัวของโฟมกลาส

x_1 คือ สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส

x_2 คือ เวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น

x_3 คือ อุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดกันใจ (R-Sq และ R-Sq(adj)) พบว่า R-Sq(adj) มีค่าเท่ากับ 96.72% หมายความว่า สมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลในระดับดีที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้แบบจำลองถดถอยที่อยู่ในรูปแบบทอม Full Quadratic ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมกลาส



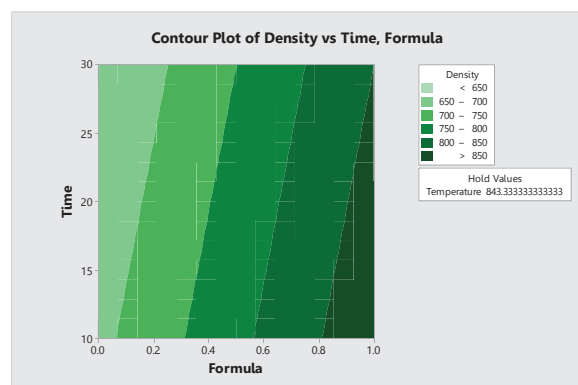
รูปที่ 6 กราฟแสดงอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัย

เมื่อพิจารณารกราฟอิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยของการพองตัวของโฟมกลาส ดังรูปที่ 6 พบว่า สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาสที่ A จะให้ค่าความหนาแน่นน้อยกว่าสูตรที่ B ในลักษณะแบบ Linear และเมื่อพิจารณาเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ พบว่า เวลาส่งผลต่อการพองตัวของโฟมกลาสแบบ Linear โดยเมื่อเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของโฟมกลาสมีแนวโน้มลดน้อยลง ส่วนอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส พบว่า

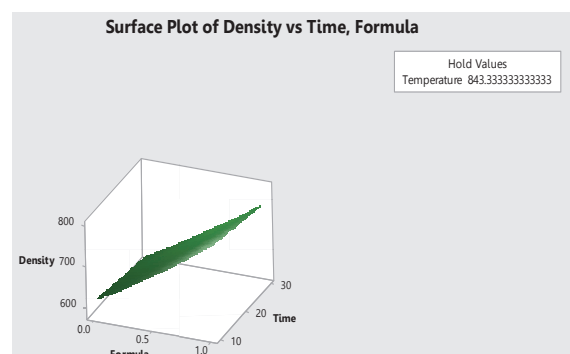
อุณหภูมิในการเผาโฟมกลาสสูงขึ้น ค่าความหนาแน่นของโฟมกลาสจะลดน้อยลง แบบ Linear เช่นกัน คือ เมื่อค่าความหนาแน่นของโฟมกลาสลดน้อยลง การพองตัวของโฟมกลาสก็จะมากขึ้นด้วย

4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการพองตัวของโฟมกลาส ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและสามระดับ

จากทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการพองตัวของโฟมกลาส โดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Respond Optimizer ในโปรแกรม Minitab ใช้ในการประมวลผลในลักษณะของวิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) จะสามารถแสดงผลพล็อตออกมาเป็น โครงร่าง และพื้นผิวตอบสนอง ดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 12

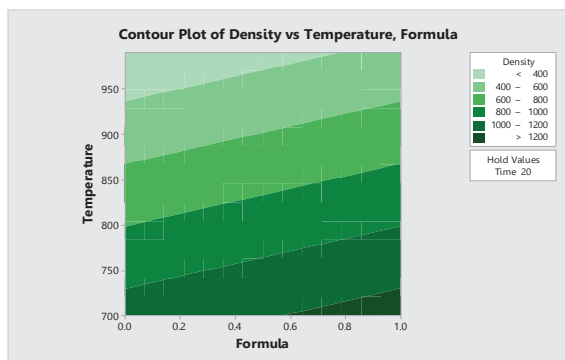


รูปที่ 7 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) และเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ (Time)

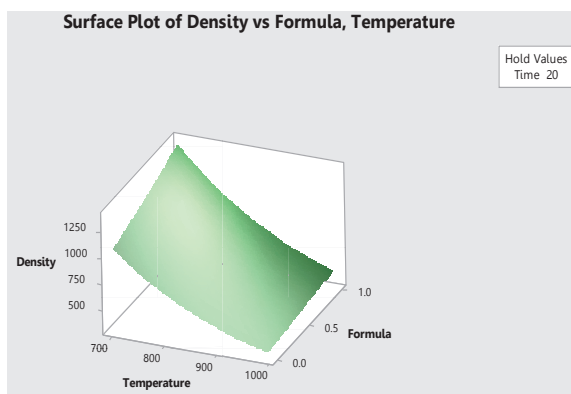


รูปที่ 8 พื้นผิวตอบสนองระหว่างสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) และเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ (Time)

จากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 เป็นกราฟแสดงโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) และเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ (Time) สามารถระบุระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการพองตัวของโฟมกลาส โดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Respond Optimizer พบว่า ระดับอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (Temperature) ที่เหมาะสมอยู่ที่ 843.333 หรือประมาณ 840 องศาเซลเซียส

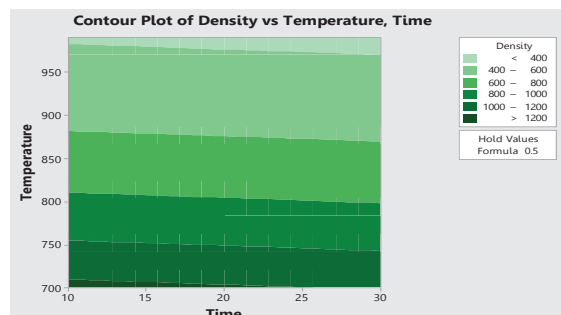


รูปที่ 9 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (Temperature)



รูปที่ 10 พื้นผิวตอบสนองระหว่างสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (Temperature)

จากรูปที่ 9 และรูปที่ 10 เป็นกราฟแสดงโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (Temperature) สามารถระบุระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการพองตัวของโฟมกลาส โดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Respond Optimizer ในโปรแกรม Minitab Version 17 พบว่า ระดับเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ (Time) ที่เหมาะสมอยู่ที่ 20 นาที

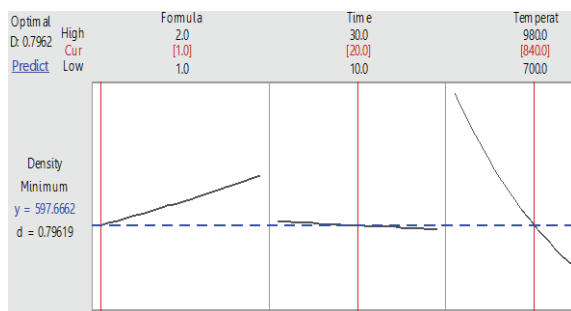


รูปที่ 11 โครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ (Time) และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (Temperature)

จากรูปที่ 11 เป็นกราฟแสดงโครงร่างและพื้นผิวตอบสนองระหว่างเวลาในการแช่ ณ อุณหภูมินั้น ๆ และอุณหภูมิในการเผาโฟมกลาส (Temperature) สามารถระบุระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการพองตัวของโฟมกลาส โดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Respond Optimizer ตารางที่ 6 พบว่า สูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมกลาส (Formula) ที่เหมาะสมคือ สูตรที่ A ที่มีส่วนผสมเป็นสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมในการพองตัวของโฟมกลาส

ตารางที่ 6 Output Optimization Point

Response Optimization: Density						
Parameter						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Density	Minimum		349.240	1568.15	1	1
Variable Ranges						
Variable	Values					
Formula	1					
Time	20					
Temperature	840					
Response Optimization: Density						
Solution						
Density Composite						
Solution	Fomula	Time	Temperature	Fit	Desirability	
1	1	20	840	597.666	0.796190	
Multiple Response Prediction						
Variable	Setting					
Formula	1					
Time	20					
Temperature	840					
Respons	Fit	SE	Fit	95% CI		
Density	597.67	3.62	(590.61,604.81)			



รูปที่ 12 กราฟแสดงผลตอบสนองของระดับปัจจัยที่เหมาะสม

จากการทดลองใช้ Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า จะต้องใช้สูตรผสม A หรือสูตรที่ 1 และต้องเผาที่อุณหภูมิประมาณ 840 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการแช่ที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาส โดยการประยุกต์ใช้หลักการของการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment) ในการศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพองตัวของโฟมกลาส ซึ่งผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐาน การปรับเปลี่ยนระดับปัจจัยจะส่งผลต่อการพองตัวของโฟมกลาส จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเชิงสถิติ จากการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเชิงสถิติ สามารถแสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อการพองตัวการผลิตโฟมกลาส ซึ่งจากการทดลองสูตร 2 สูตร ผลจากการทดลองพบว่า สูตรที่ A ที่มีส่วนผสมสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต มีการพองตัวของโฟมกลาสที่ดีกว่าการใช้สารโซเดียมคาร์บอเนต เนื่องจากสารโพแทสเซียมคาร์บอเนต

จะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าสารโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งการลดลงของค่าความหนาแน่น แสดงถึงการพองตัวของโฟมกลาส เนื่องจากการสลายตัวของสารก่อฟอง ชนิด Carbonate compounds เมื่อสลายตัว ทำให้ความหนาแน่นของโฟมกลาสลดลง ซึ่งการลดลงของความหนาแน่น จะส่งผลต่อน้ำหนักของโฟมกลาสด้วย อุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะสมในการพองตัวของโฟมกลาสที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการ แห้งที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

6. ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงสูตรที่ใช้ในการผลิต อุณหภูมิในการเผา และเวลาในการแห้ง ณ อุณหภูมินั้น ๆ ของการเผาโฟมกลาสเท่านั้น ซึ่งถ้าต้องการนำไปใช้งาน เช่น สร้างอาคารบ้านเรือน ทำถนน สร้างสะพาน ควรมี การศึกษาการทดสอบในเรื่องของค่าความหนาแน่นค่า

ความแข็งของโฟมกลาส สารแต่งเติมที่ใช้ในการผสม รวมถึงคุณสมบัติของแก้วแต่ละชนิด เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ถูกต้องตามความเหมาะสมกับประเภทของงานนั้น ๆ เนื่องจากโฟมกลาสมีน้ำหนักเบาจึงถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนเช่น อิฐมอญและคอนกรีตบล็อก เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นทางเลือกใหม่สำหรับอุตสาหกรรม การก่อสร้าง ที่สามารถนำไปเป็นทางเลือกใหม่ให้กับอุตสาหกรรมต่อไปในการเลือกวัสดุทดแทน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และการจัดการ และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาวัสดุขั้นสูงและนาโนเทคโนโลยี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทคนิคการตกแต่งผลิตภัณฑ์เซรามิกด้วยเศษแก้ว [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา : <http://ceramic.dss.go.th/index.php/en/knowledge/article/164-ceramic>, 2012.
- [2] Attila, Y., Guidenben, M., Tasdemirci, A. Foam glass processing using a polishing glass powder residue. *Ceramics International*, 2013; 39(5): 5869-5877.
- [3] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ท็อปจำกัด, 2551; 103.
- [4] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545, 449.



คุณสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาวผสมร่วมกับ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น

Properties of Cement Composite Fabricated from White Rice Husk Ash Incorporated with Short Single-Walled Carbon Nanotubes

สุชาติ จันทรามณี^{1*} วาสนา แก่นทองแดง² ภัทรพาน โสสุวรรณ² และ ดนุพล ตันนโยภาส²
Suchart Chantaramanee^{1*} Wassana Keanthongdang² Phattaraparn I-suwan²
and Danupon Tonnayopas²

^{*1} สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000 ประเทศไทย

² ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 ประเทศไทย

^{*1}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000 Thailand

²Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand

*E-mail: suchart.c@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ รายงานผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาว และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ทั้งหมด 12 ชุดการทดลอง ใส่เถ้าแกลบขาวร้อยละ 10, 20 และ 30 โดย น้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตามลำดับ และท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นร้อยละ 0.05 และ 0.20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ทั้งไม่บ่มและบ่มความชื้น 28 วัน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.4 ตลอดการศึกษา ได้ทดสอบความหนาแน่นรวม การดูดซึมน้ำ การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ความแข็งแรง และกำลังอัด วิเคราะห์แร่ประกอบและโครงสร้างจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และการถ่ายภาพ จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างเพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบขาวร้อยละ 10 ใส่ท่อ นาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นร้อยละ 0.20 และบ่ม 28 วัน มีค่าสูงสุด คือ 36.45 เมกะพาสคัล การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงปริมาณเถ้าแกลบขาวที่ผสมทำให้เกิดวัฏภาคปอซโซลานของแร่แฮทรไรต์ ในขณะที่ภาพถ่ายจุลทรรศน์แสดงท่อนาโน คาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นกระจายตัว ตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น ได้ให้ค่าความหนาแน่นรวม เพิ่มขึ้นและการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรลดลงตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผลของการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: วัสดุผสมซีเมนต์, ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น, เถ้าแกลบขาว, ความต้านทานไฟฟ้า, ความแข็งแรงแบบชอร์

ABSTRACT

This paper reported physical and mechanical properties of cement composites blended from white rice husk ash (WRHA) and short single-walled carbon nanotubes (CNT). Twelve experiments of 10, 20 and 30 wt.% WRHA and type I Portland cement including 0, 0.05 and 0.20 wt.% CNT were carried out with no-water curing and 28 days water curing. The water to binder ratio (w/b) was 0.4 throughout the study. The performance of the cement composites was evaluated by conducting the following tests: bulk density, water absorption, volumetric drying shrinkage, resistivity, Shore hardness and compressive strength. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were also used to characterize specimens. The test results showed that the highest compressive strength belongs to 10 wt.% WRHA with 0.20 wt.% CNT of 36.45 MPa. XRD analysis showed pozzolanic phase of hatrurite while SEM technique displayed dispersion of CNT. The specimens with CNT provided higher bulk density with reduction of volumetric drying shrinkage following the increase of CNT content. Moreover, higher content of CNT resulted in higher water absorption and reduction of Shore hardness. **Keywords:** Cement composites, Short single-walled carbon nanotubes, White rice husk ash, Resistivity, Shore hardness

1. บทนำ

ปัจจุบัน อุตสาหกรรมก่อสร้างมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจจากการสนับสนุนของรัฐ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ ๆ ขึ้นมา เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในการก่อสร้าง วัสดุหลักที่สำคัญคือ คอนกรีต แต่เนื่องจากคอนกรีตยังมีต้นทุนและราคาแพง [1] ดังนั้น จึงได้มีแนวความคิดที่จะลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลรวมโดยการนำวัสดุเหลือใช้ในภาคการเกษตร เช่น เถ้าแกลบขาว (White Rice Husk Ash, WRHA) เพื่อมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกข้าวทั้งหมด 75.91 ล้านไร่ ให้ผลผลิต 36.62 ล้านตัน และผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 482 กิโลกรัม [2] ซึ่งจะได้แกลบที่เหลือจากกระบวนการสีข้าว นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งช่วยอนุรักษ์พลังงานและทรัพยากรประการหนึ่งด้วย และสิ่งเหลือจากกระบวนการเชื้อเพลิงคือ เถ้าแกลบ ซึ่งเป็นสิ่งที่จะก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเถ้าแกลบมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมโลหะ การป้องกันแมลง วัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา [3] ซิลิกอนชิป อุตสาหกรรมการผลิตอิฐทนไฟ อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต และที่สำคัญคือ การนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง ผลการศึกษาของนักวิจัยก่อนนี้ เช่น Sensale [4] ได้พัฒนาคอนกรีตกำลังสูงโดยผสมเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 10

และ 20 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50, 0.40 และ 0.32 พบว่าเมื่อเติมเถ้าแกลบ ค่ากำลังอัด (Compressive Strength) เพิ่มขึ้นเมื่อบ่ม 91 วัน ซึ่งค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 Khan et al. [5] ได้ศึกษาการลดมลภาวะของสิ่งแวดล้อมโดยนำเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ พบว่าเติมเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนัก ค่ากำลังอัดใกล้เคียงและดีกว่ามีปูนซีเมนต์ล้วน และ Kachwala et al. [6] ได้ศึกษาความแข็งแรงและกำลังอัดของคอนกรีตโดยผสมเถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก บ่มเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่าความหนาแน่นและค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่สูงขึ้น และค่ากำลังอัดแปรผันตามกับอายุบ่มของคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ ในการนำมาใช้เป็นตัวเสริมแรง (Reinforcement) กับวัสดุหลักเพราะให้สมบัติทางกลที่ดีเยี่ยมโดยมีค่ากำลังแรงดึง 100 เท่า และมีน้ำหนักที่เบากว่าถึง 6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก และจากสมบัติทางกลดังกล่าวค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ค่ากำลังแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าเท่ากับ 1 เทระพาสคัล และ 200 จิกะพาสคัล ตามลำดับ [7] ท่อนาโนคาร์บอนจึงถูกเลือกเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุหลักหลายชนิด เช่น โลหะ [8] พอลิเมอร์

[9] และเชรามิก [10] และนอกจากนี้เมื่อนักวิจัยได้นำท่อนาโนคาร์บอนมาศึกษา ทดลอง วิจัย และปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ กับวัสดุผสมซีเมนต์ ที่เติมตัวเสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอน ดังเช่น งานวิจัยของ Chaipanich et al. [7] ได้ศึกษาสมบัติกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมซีเมนต์และมอร์ต้าร์กับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs) ที่ร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก และไม่เติมและเติมเถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ บ่มเป็นเวลา 7 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัด เมื่อเติมปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 และปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนร้อยละ 1.0 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 51.8 เมกะพาสคัล และโครงสร้างจุลภาคโดยรวมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้วัสดุผสมซีเมนต์กับท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs พบว่ามีความพรุนลดลงและโพรงใหญ่ (Mesopores) ที่เกิดขึ้นระหว่างเฟสไฮเดรชันก็ลดลงด้วยเช่นกัน เมื่อเติมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น [11] ต่อมา Hu et al. [12] ศึกษา กำลังอัดและกำลังดัดของวัสดุผสมซีเมนต์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs และ MWCNTs-COOH ปริมาณร้อยละ 0 ถึง 0.1 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังดัดของวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่อเติม MWCNTs ในขณะที่กำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏพรุนมีขนาด 25 ถึง 50 ไมครอน และจำนวนรูพรุนลดลงด้วยเมื่อเติมด้วยท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองชนิด ยังพบว่าสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่เติมท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWCNTs ในช่วงร้อยละ 0 ถึง 0.2 โดยน้ำหนัก ให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และ 15 ตามลำดับ เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนที่ร้อยละ 0.1 บ่มที่ 7 และ 28 วัน [13]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุผสมซีเมนต์ ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 และเถ้าแกลบขาวจากการเผาทิ้งภายหลังจากการทำเชื้อเพลิงมาเป็นวัสดุหลัก โดยมีท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวชนิดสั้นเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาสู่การประยุกต์ใช้ในคอนกรีตกำลังสูงที่มีน้ำหนักเบา และเป็น

แนวทางในการผลิตวัสดุผสมซีเมนต์ เพื่อช่วยลดมลภาวะจากสิ่งเหลือใช้และช่วยประหยัดพลังงาน

2. การดำเนินงานวิจัย

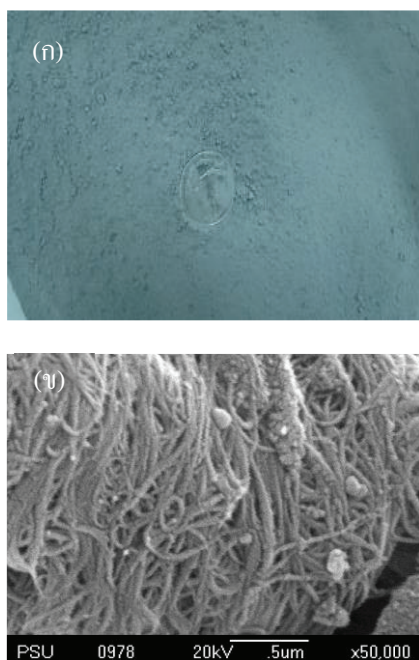
2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I, PC) เถ้าแกลบสีขาว (WRHA) จากโรงสีข้าวในจังหวัดนราธิวาส โดยนำมาบดลดขนาดด้วยหม้อบดขนาดเล็ก (Jar Mill) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วคัดขนาดเล็กลงกว่า 45 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบสีขาวด้วยวิธี X-Ray Fluorescence (XRF) ดังในตารางที่ 1 และท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวชนิดสั้น (Short Single-Walled Carbon Nanotubes, CNT) รหัสผลิตภัณฑ์ SS1240 มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 1 ถึง 2 นาโนเมตร และ 0.8 ถึง 1.6 นาโนเมตร ตามลำดับ ความยาว 1 ถึง 3 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ มากกว่าร้อยละ 90 สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) หรือเรียกว่าการตกสะสมไอเคมี ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดี่ยวชนิดสั้น มีลักษณะเป็นเส้นโค้งและอยู่รวมเป็นมัด (Bundled) อัดกันแน่น และเมื่อ EDS สเปกตรัมของ CNT มีธาตุเจ้าหลักคือ C และสิ่งเจือปนปรากฏคือ Cr, Co, Fe, Si, S, Cl, O และน้ำประปาสะอาดในการหล่อเป็นตัวอย่างเพสต์

2.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบขาวจากโรงสีข้าวในจังหวัดนราธิวาส ด้วยวิธีการวาวแสงรังสีเอกซ์ (XRF) แบบกึ่งปริมาณ ดังแสดงในตารางที่ 1 มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) รวมกันร้อยละ 91.68 มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 0.76 และปริมาณ Cl เท่ากับร้อยละ 0.12 ดังนั้น เถ้าแกลบขาวจากโรงสีข้าวมีสมบัติเทียบเคียงได้กับวัสดุปอซโซลาน Class F ซึ่งมีผลรวมทั้งหมดของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3

มากกว่าร้อยละ 70 ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C618 [14]



รูปที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ (ก) เถ้าแกลบขาวคัดขนาด และ (ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบขาวและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยวิธี XRF

Chemical Composition	Content wt. %	
	WRHA	PC
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	91.55	18.29
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.14	-
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	3.18	4.96
ฟอสฟอรัสไดออกไซด์ (P_2O_5)	1.72	2.46
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.16	1.42
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.76	67.88
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.24	-
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	0.13	3.52
น้ำหนักสูญหายหลังเผา (LOI)	2.06	1.47

2.3 การเตรียมตัวอย่างและอัตราส่วนซีเมนต์เพสต์

ตัวอย่างเตรียมจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เถ้าแกลบขาว เดิม 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30

โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นร้อยละ 0.05 และ 0.20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.40 คงที่ตลอดการศึกษา กำหนดสัญลักษณ์และอัตราส่วนของตัวอย่างงานนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์และอัตราส่วนของตัวอย่างงานนี้ (%)

Code	PC	WRHA	CNT
PC	100.00	-	-
PC:CNT0.05	99.95	-	0.05
PC:CNT0.20	99.80	-	0.20
PC:WRHA10	90.00	10.00	-
PC:WRHA20	80.00	20.00	-
PC:WRHA30	70.00	30.00	-
PC:WRHA10 :CNT0.05	87.95	10.00	0.05
PC:WRHA10 :CNT0.20	89.80	20.00	0.20
PC:WRHA20 :CNT0.05	79.96	30.00	0.05
PC:WRHA20 :CNT0.20	79.80	10.00	0.20
PC:WRHA30 :CNT0.05	69.95	20.00	0.05
PC:WRHA30 :CNT0.20	69.80	30.00	0.20

ในขั้นตอนการหล่อตัวอย่างให้นำส่วนผสมของปัจจัยหลักของแต่ละส่วนผสมลงในบีกเกอร์ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน เติมน้ำประปาสะอาดลงไปแล้วใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากันอีกครั้ง และเพื่อให้ส่วนผสมที่ได้เป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น ด้วยเครื่องผสมชนิดใช้แท่งกระจายคลื่น (Probe-Type Ultrasonic Processor) ยี่ห้อ Sonics Model VC 750 ใช้พลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกในช่วงกว้างของคลื่นร้อยละ 50 เวลาที่ใช้ในการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในการผสมเป็นเวลา 5 นาที เมื่อผสมเรียบร้อยแล้ว นำเทใส่เบ้าหล่อทรงกระบอกทำด้วย PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร ตามอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของ ASTM C39/C39M [15] ที่ภายในทาด้วยขี้ผึ้ง ปิดขึ้นตัวอย่างไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบาง เมื่อครบ

กำหนดถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวอย่างที่บ่มในน้ำอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน และที่ไม่บ่ม ครอบกำหนดนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่จัดเตรียมไว้

2.4 วิธีการทดสอบ

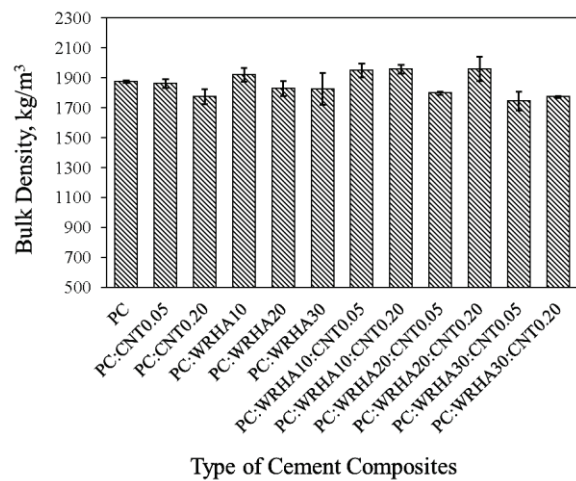
ตัวอย่างที่บ่มครบ 28 วัน มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำตาม ASTM C642 [16] ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และวัดการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรระยะเวลา 6 สัปดาห์สำหรับสมบัติทางกล ได้แก่ การทดสอบความแข็งชอร์ (Shore Hardness Test) ด้วยเครื่อง Hardness Tester (EQUOTIP รุ่น CA 6525) และกำลังอัดตาม ASTM C39/C39M [15] นอกจากนี้ตรวจโครงสร้างจุลภาค ด้วยภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และวิเคราะห์วัฏภาคแร่ (Mineral Phases) ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างมีกำลังอัดสูงสุด ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

3. ผลและการอภิปรายผลการทดลอง (Results and Discussion)

3.1 ความหนาแน่นรวม

ตัวอย่างสูตร PC:WRHA10:CNT0.20 มีค่าความหนาแน่นรวมสูงสุด 1,960 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร บรรดาตัวอย่างที่เติม WRHA และ CNT มีค่าอยู่ในช่วง 1,920 ถึง 1,960 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่หากใส่ WRHA เกินร้อยละ 20 และ CNT ปริมาณเท่าใดก็ตาม ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงอยู่ในช่วง 1,750 ถึง 1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังในรูปที่ 2 ซึ่งค่าความหนาแน่นรวมที่มีค่าสูงสุดนี้สอดคล้องกับการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของวัสดุผสมซีเมนต์ที่มีค่าการหดตัวน้อยที่สุด จึงทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chaipanich et al. [7] ได้ศึกษาสมบัติกำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมซีเมนต์และมอร์ตาร์กับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น พบว่าค่ากำลังอัดและโครงสร้างจุลภาคโดยรวมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เมื่อ

เติมท่อนาโนคาร์บอนและเถ้าลอยลงไปในวัสดุผสมซีเมนต์และมอร์ตาร์



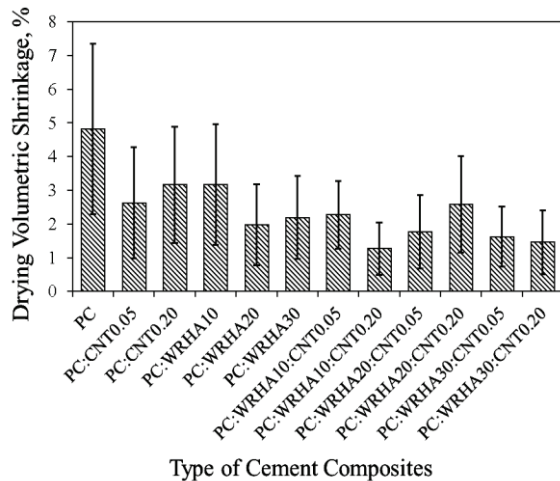
รูปที่ 2 ความหนาแน่นรวมของวัสดุผสมซีเมนต์

3.2 การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตร

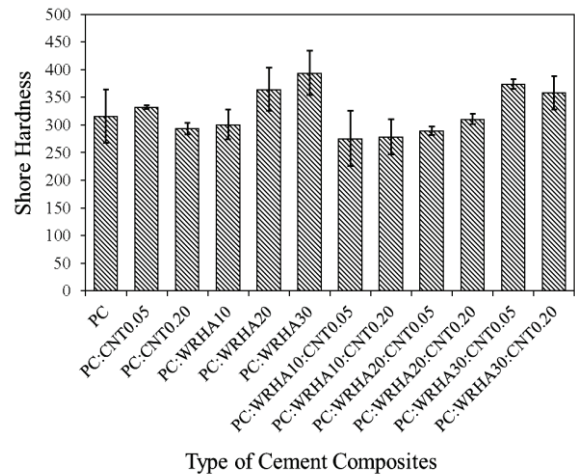
ตัวอย่างควบคุมมีการหดตัวแบบเปียกเชิงปริมาตรมากที่สุด (ร้อยละ 4.62) ในขณะที่ตัวอย่างที่ผสม CNT และ WRHA ลดลงตามลำดับ (รูปที่ 3) ดังนั้นตัวอย่างที่ผสมวัสดุทั้งสองจึงมีการหดตัวน้อยที่สุด นั่นคือการเติมวัสดุทั้งสองช่วยลดการหดตัวได้อย่างดี อันเนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน [1] ทำให้ความพรุนลดลงและโพรงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจุลภาคลดลงด้วยเช่นกัน เมื่อเติมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับในผลงานของ Nochaiya and Chaipanich [11]

3.3 การดูดซึมน้ำ

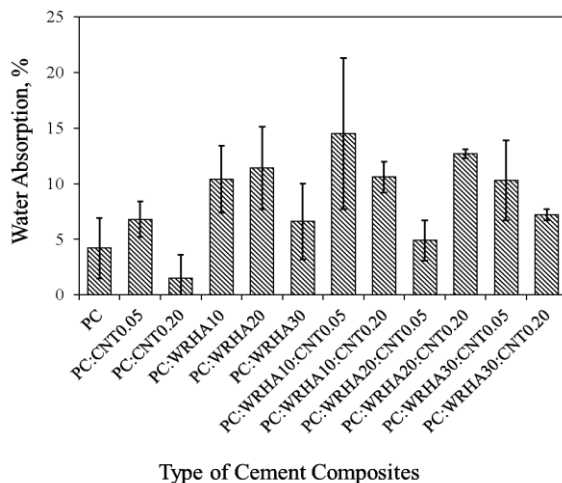
ในภาพรวมตัวอย่างควบคุม (PC) ได้ดูดซึมน้ำน้อยสุด ขณะที่ตัวอย่างที่ใส่ CNT ดูดซึมน้ำมากกว่า และตัวอย่างผสมเถ้าลอยดูดซึมน้ำมากที่สุด โดยเฉพาะกลุ่มตัวอย่างผสมทั้งสองคือ PC:WRHA10:CNT0.05 ดูดซึมน้ำได้ถึงร้อยละ 14.50 (รูปที่ 4) ดังนั้นการที่ส่วนผสมนี้มีค่าการดูดซึมน้ำสูง ก็สืบเนื่องจากภายในเนื้อตัวอย่าง (Matrix) มีโพรงจากท่อนาโนอยู่ น้ำจึงซึมผ่านเข้าไปได้ค่อนข้างสะดวกอย่างง่ายมากขึ้น



รูปที่ 3 การหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรของวัสดุผสมซีเมนต์



รูปที่ 5 ความแข็งชอร์ของวัสดุผสมซีเมนต์



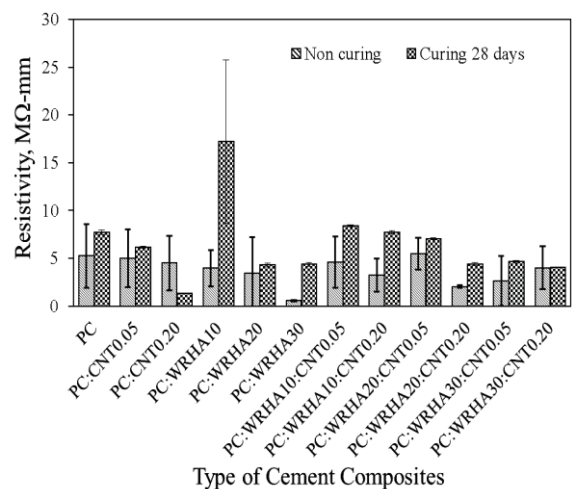
รูปที่ 4 การดูดซึมน้ำของวัสดุผสมซีเมนต์

3.4 ความแข็งแรง

กลุ่มตัวอย่างที่ผสม WRHA และใส่ CNT มีค่าความแข็งแรงน้อยสุด (รูปที่ 5) โดยเฉพาะสูตร PC:WRHA10:CNT0.05 มีค่า 275.3 แต่หาก WRHA เกินร้อยละ 20 และ CNT มีค่าเกิน 0.05 ทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับการที่ค่าดูดซึมน้ำและความหนาแน่นรวมสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่ำ

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

ความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่ใส่ CNT ลดลง 4 ถึง 6 เมกะโฮห์ม-มิลลิเมตร จากตัวอย่างควบคุม 7 เมกะโฮห์ม-มิลลิเมตร ในขณะที่ตัวอย่างผสม WRHA มีค่าสูงขึ้น 4 ถึง 17 เมกะโฮห์ม-มิลลิเมตร ส่วนตัวอย่างที่ใส่ทั้ง CNT และ WRHA มีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง 4 ถึง 8 เมกะโฮห์ม-มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าตัว WRHA มีองค์ประกอบซิลิกาทำให้เนื้อตัวอย่างประกอบด้วยสารเป็นฉนวนขึ้น และตัว CNT นำไฟฟ้าได้ดี อายุขัยมีส่วนทำให้ค่านี้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากการเกิดสารปอซโซลานขึ้นมา จึงช่วยให้เนื้อตัวอย่างมีความเป็นฉนวนไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น



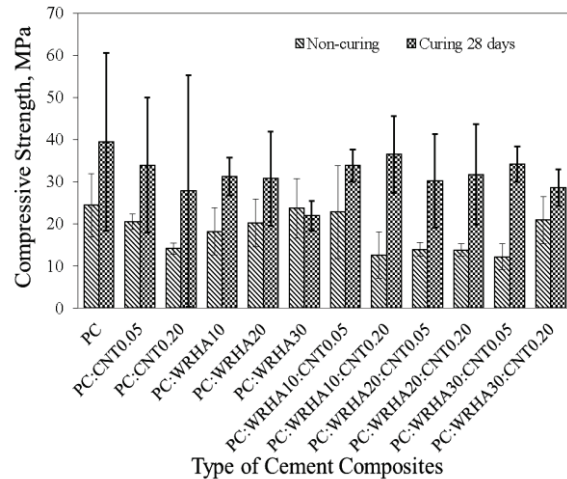
รูปที่ 6 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุผสมซีเมนต์

3.6 กำลังอัด

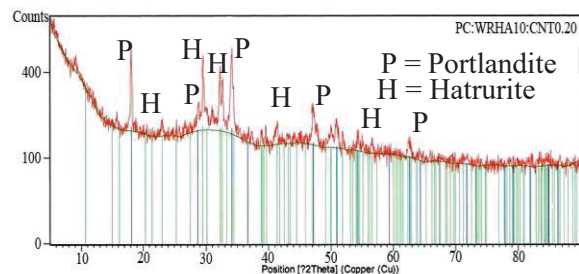
ในตัวอย่างที่ผสม CNT หรือ WRHA อย่างเดียวมีค่ากำลังอัดลดลงจากตัวอย่างควบคุม (39 เมกะพาสคัล) ประมาณร้อยละ 12 ถึง 28 และ 20 ถึง 31 ตามลำดับ (รูปที่ 7) แต่เมื่อเติมทั้งสองรวมกันค่าลดลงเหลือร้อยละ 7 โดยเฉพาะตัวอย่าง PC:WRHA10:CNT0.20 มีค่า 36.45 เมกะพาสคัล และค่านี้แปรผกผันกับค่าความแข็งแรง อายุบ่มก็มีอิทธิพลต่อกำลังอัดอย่างเป็นนัยสำคัญทั้งเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานต้องใช้เวลาระยะหนึ่งจึงพัฒนากำลังอัดขึ้นมาได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaipanich et al. [7] พบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น เมื่อเติมปริมาณเถ้าลอยและปริมาณของท่อคาร์บอนที่อายุบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 51.8 เมกะพาสคัล นอกจากนี้ Xu et al. [13] ยังพบว่าสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เติมด้วยท่อคาร์บอนชนิด MWCNTs ให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เติมท่อคาร์บอนที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และ 15 ตามลำดับเช่นกัน

3.7 วิเคราะห์ประกอบ

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ผสม PC:WRHA10:CNT 0.20 ที่มีกำลังอัดสูงสุดบ่ม 28 วัน ด้วย XRD พบแร่พอร์ตแลนด์ไดต์ (Portlandite, P) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแฮทรูไรต์ (Hatrurite, Ca_3SiO_5) ซึ่งแฮทรูไรต์ได้เสริมให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 กำลังอัดของวัสดุผสมซีเมนต์

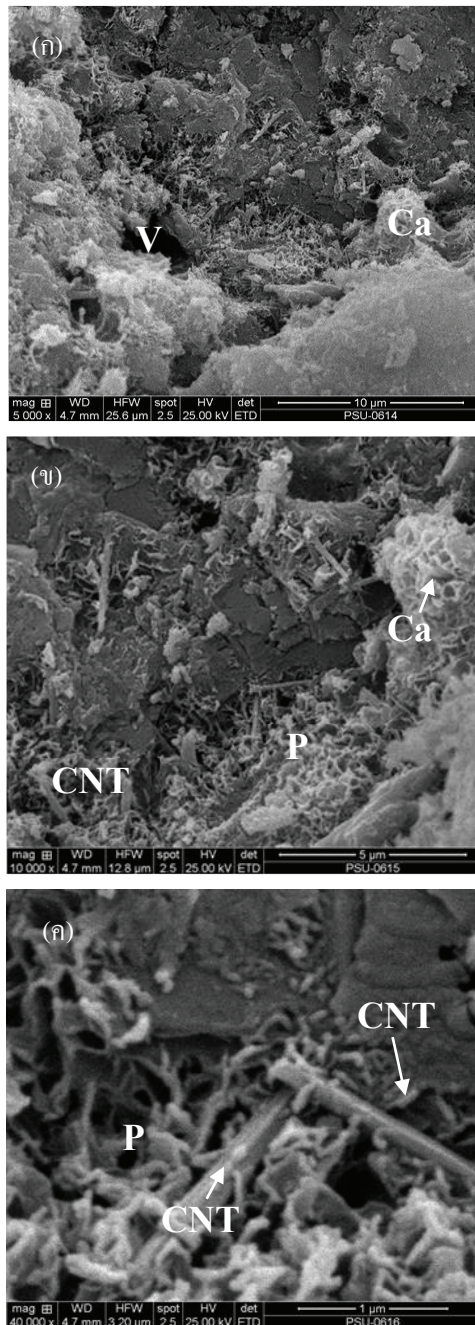


รูปที่ 8 ลายเส้นการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง

PC:WRHA10:CNT0.20 อายุบ่ม 28 วัน

3.8 โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์จากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเนื้อตัวอย่าง PC:WRHA10:CNT0.20 มีรูโพรง (V) และก้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนไขว้ขวางกัน (รูปที่ 9 ก และ ข) พอร์ตแลนด์เป็นเส้นพันรอบท่อคาร์บอนผนังเดี่ยวชนิดสั้นชิดติดกันไว้ (รูปที่ 9 ข และ ค)



รูปที่ 9 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่าง PC:WRHA10:CNT0.20 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย (ก) 5000 เท่า (ข) 10000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

4. บทสรุป

ผลการทดสอบสมบัติวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาวผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิด

สั้น มีค่ากำลังอัดที่ดีคือ สูตร PC:WRHA10:CNT0.20 และ PC:WRHA10:CNT0.05 อายุบ่ม 28 วัน โดยเฉพาะตัวอย่าง PC:WRHA10:CNT0.20 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ความหนาแน่นรวมสูงสุด และการหดตัวแบบแห้งเชิงปริมาตรน้อยสุด เท่ากับ 36.45 เมกะพาสคัล 1,960 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และร้อยละ 1.26 ± 0.77 ตามลำดับ และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมซีเมนต์ ซึ่งกำลังอัดนี้มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากเถ้าแกลบขาวและท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น เข้าไปแทนที่ในช่องว่างทำให้ความพรุนและโพรงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจุลภาคลดลง ในขณะที่ก้อนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีลักษณะเป็นก้อนไขว้ขวางกันกับพอร์แลนด์เป็นเส้นพันรอบท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นยึดติดกันไว้ สำหรับค่าการดูดซึมน้ำตัวอย่างที่ผสมเถ้าแกลบดูดซึมน้ำมากที่สุดและค่าความแข็งแรงน้อยสุด โดยเฉพาะกลุ่มตัวอย่างผสมทั้ง WRHA และ CNT คือ PC:WRHA10:CNT0.05 ดูดซึมน้ำได้ถึงร้อยละ 14.50 และค่าความแข็งแรงมีค่าเท่ากับ 275.3 ตามลำดับ และค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะตัวอย่างใส่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี ในขณะที่เถ้าแกลบขาวมีส่วนสนับสนุนให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลตัวอย่างสมบัติฉนวนไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้นจากสมบัติวัสดุผสมซีเมนต์ผลิตจากเถ้าแกลบขาวผสมร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสั้น สามารถนำมาพัฒนาเป็นคอนกรีตกำลังอัดสูงที่มีน้ำหนักเบาและนำไฟฟ้าได้อย่างแม้ว่าท่อนาโนคาร์บอนนั้นยังมีราคาต่อหน่วยที่สูงอยู่ แต่ด้วยใส่ปริมาณน้อยก็สามารถเป็นวัสดุซีเมนต์ที่มีสมบัติพิเศษคือ แข็งแรงและมีสภาพการนำไฟฟ้าดี โดยเฉพาะนำไปประยุกต์ในส่วนประกอบหอคอยเก็บพลังงานประจุไฟฟ้าที่มีดินแหล่งผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

ศรวิชัย ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ และหน่วย อนุเคราะห์และสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ สถานที่ในการ
 วิจัยธรณีเทคนิคและนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง คณะ ดำเนินการวิจัยในครั้งนี้
 วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tonnayopas, D. and Suwan, C. Properties of Koh Yor sandstone aggregate concrete blended with Song Yod rice husk ash. *Ladkrabang Engineering Journal*, 2015; 32(1): 55-60.
- [2] ชานูพิทยา จิมพาล. ทิศทางและศักยภาพการผลิตข้าวไทย. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.dft.go.th/LinkClick.aspx?fileticket=p6iLTgSSD_4%3D&tabid=401
- [3] Tonnayopas, D., Tekasakul, P. and Jaritgnam, S. Effects of Rice Husk Ash on Characteristics of Lightweight Clay Brick. The 2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008), Khon Kaen, Thailand, 2008.
- [4] Sensale De, G.R. Strength developments of concrete with rice-husk ask. *Cement & Concrete Composite*, 2006; 28: 158-160.
- [5] Khan, R., Jabbar, A., Ahmad, I., Khan, W., Khan, A.N. and Mirza, J. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Construction and Building Materials*, 2012; 30: 360-365.
- [6] Kachwala, A., Pamnani, A. and Raval, A. Effect of rice husk ash as a partial replacement of ordinary Portland cement in concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2015; 175-177.
- [7] Chaipanich, A., Nochaiya, T., Wongkeo, W. and Torkittikul, P. Compressive strength and microstructure of carbon nanotubes-fly ash cement composites. *Materials Science and Engineering A*, 2010; 527: 1063-1067.
- [8] Nai, S. M. L., Gupta, M. and Wei, J. Development of novel lead-free solders composites using carbon nanotube reinforcements. *International Journal of Nanoscience*, 2005; 4(4): 423-429.
- [9] Coleman, N.J., Khan, U., Blau, W.J. and Gun'ko, Y.K. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*, 2006; 44: 1624-1652.
- [10] Peigney, A., Laurent, C., Flahaut, E. and Rousset, A. Carbon nanotubes in novel ceramic matrix nanocomposites. *Ceramics International*, 2000; 26: 677- 683.
- [11] Nochaiya, T. and Chaipanich, A. Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials. *Applied Surface Science*, 2011; 257: 1941-1945.
- [12] Hu, Y., Luo, D., Li, P., Li, Q. and Sun, G. Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-wall carbon nanotubes. *Construction and Building Materials*, 2014; 70: 332-338.
- [13] Xu, S., Liu, J. and Li, Q. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste. *Construction and Building Materials*, 2015; 76: 16-23.
- [14] ASTM C618 - 17a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- [15] ASTM C39/C39M - 03. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- [16] ASTM C642 - 06H. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete



การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงานของต้นทุนในกระบวนการผลิต และปรับปรุงงานบำรุงรักษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน กรณีศึกษาอุตสาหกรรมผลิตมอเตอร์ไฟฟ้า

Analysis of the Energy Cost in a Production Process and Maintenance Improvement to Increase Energy Efficiency Case Study of Electric Motor Production Industry

ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม*

Chamni Jaipradidtham

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, 10250,
Thailand

*E-mail: j_chamni@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอถึงการวิจัยในการลดค่าใช้จ่ายพลังงานของต้นทุนการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าในอุตสาหกรรม เพื่อประหยัดพลังงาน และใช้เทคโนโลยีในการปรับปรุงงาน ควบคุมคุณภาพ การจัดการชิ้นส่วนและการลดเวลาการทำงาน โดยใช้หลักการของวัฏจักรเดมมิ่ง PDCA ซึ่งเป็นหลักการดำเนินงานในรูปแบบของการวางแผนงานและวิธีการทำงานเพื่อตอบสนองนโยบายของบริษัทที่มุ่งเน้นในการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายพลังงาน จึงทำให้เกิดการประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตและทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานของพนักงาน ซึ่งในขั้นตอนการดำเนินงานนี้ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการทำงานด้านต่างๆภายในแผนกงาน Logistics Control Division (LCD) วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงานพร้อมกับการปรับปรุงในการทำงานและแก้ปัญหาที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลและทำการปฏิบัติงานจริงโดยผ่านการทำกิจกรรมเพื่อเป็นข้อมูลในการประเมินผลและสรุปผลเป็นลักษณะงานวิจัย ผลของงานวิจัยนี้เป็นไปตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่กำหนดไว้คือสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายพลังงานของการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าได้ สามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการผลิตทำให้มีการประหยัดพลังงานได้ประมาณ 70% และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ประมาณ 80%

ABSTRACT

This paper presents the research on reducing energy costs of electric motor production in the industry to save energy, and using technology for job improvement, quality control, component management and reduced work time, by using the principles of the PDCA Deming cycle, which is a guiding principle in the form of job planning and work processes, to meet company-focused policies to reduce the cost of energy costs. It saves energy in the production process and maximizes employee productivity. In this process, the researcher studies the various processes within the Logistics Control Division (LCD), analyzes energy costs, improves work performance, and solves problems that cause

unnecessary costs. The researcher collected the data and performed the actual task through the activity to be used as the information to evaluate and summarize the research result. The results of this research are in line with the intended purpose and goal of reducing the energy cost of electric motor production. It can reduce production costs, can energy saving by approximately 70% and can increase energy efficiency by approximately to 80%.

1. บทนำ

ค่าใช้จ่ายพลังงานในกระบวนการผลิตจะพิจารณาถึงต้นทุนของผู้ประกอบการธุรกิจ ในอาคารและโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภทถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายพลังงานจะมีสัดส่วนไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายส่วนอื่นๆ ได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าซื้อวัตถุดิบและค่าการตลาด [1] แต่ในการลดค่าใช้จ่ายพลังงานนี้จะช่วยเพิ่มกำไรให้แก่ผู้ประกอบการธุรกิจได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันนี้การแข่งขันทางภาคธุรกิจจะมีความรุนแรงมากขึ้น ในขณะที่ค่าแรงงาน ค่าวัตถุดิบเป็นต้นทุนที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างไรก็ตามการลดค่าใช้จ่ายพลังงานจะเกิดประโยชน์ผลได้ต้องรู้จักเลือกใช้เทคโนโลยีหรือเทคนิคให้เหมาะสมกรณีการจัดเก็บและการค้นหาชิ้นส่วนจะใช้เวลาานาน ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นแผนก Logistics Control Division มีหน้าที่จัดเก็บและจัดจ่ายชิ้นส่วนให้กับสายงานการผลิต จึงทำการสำรวจสภาพปัญหาจากพื้นที่การทำงานจริง และรวบรวมปัญหาเพื่อนำมาแก้ไขปรับปรุงการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลจากการรวบรวมปัญหาพบว่า ปัญหาที่ต้องการแก้ไขโดยทันทีคือพื้นที่การจัดเก็บ การวางชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตจะวางบนแนวราบทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการจัดวางและเก็บชิ้นส่วน บทความวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายพลังงาน ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายพลังงานของการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำเนินการ ศึกษาการทำงานโดยใช้เทคโนโลยีการปรับปรุงงานและควบคุมคุณภาพในงานอุตสาหกรรมการผลิต ทดสอบและเก็บข้อมูลรวบรวมจาก บริษัท ฮิตาชิ ออโตเมชัน เทคโนโลยี จำกัด ภายในอาคาร A เป็นอาคารที่ผลิตมอเตอร์ไฟฟ้า วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเป็นการวางแผนงาน บำรุงรักษา วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน [2] ก่อนและหลังในการปรับปรุงงาน ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการ

ผลิตและลดจำนวนพนักงานให้เหมาะสมกับลักษณะงาน เทียบกับเวลาทำงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และควบคุมคุณภาพการผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้า

2. แนวคิดและทฤษฎี

2.1 แนวคิดการดำเนินงานวิจัย

ศึกษา วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงและแก้ไขงาน วางแผนกิจกรรม วิธีการดำเนินงานตามแผนที่กำหนด ตรวจสอบและสรุปผลที่ได้ของการดำเนินงาน วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน ตรวจสอบการใช้พลังงาน วิเคราะห์ด้วยศักยภาพในการประหยัดพลังงาน กำหนดเป้าหมาย วางแผนในการลงทุน ติดตามและประเมินผล เป็นต้น

2.2 กระบวนการประหยัดพลังงานในการผลิต

กระบวนการประหยัดพลังงาน หมายถึง ขั้นตอนในการลดค่าใช้จ่ายพลังงานโดยไม่ทำให้ผลผลิตเสียหาย การประหยัดพลังงานจะประกอบด้วยสิ่งสำคัญ 2 ประการ คือ การเลือกใช้เทคนิคการประหยัดพลังงานให้เหมาะสมและการนำเทคนิคไปใช้ได้อย่างเป็นระบบ

2.3 ทฤษฎีวัฏจักรของเดมมิงแบบ PDCA

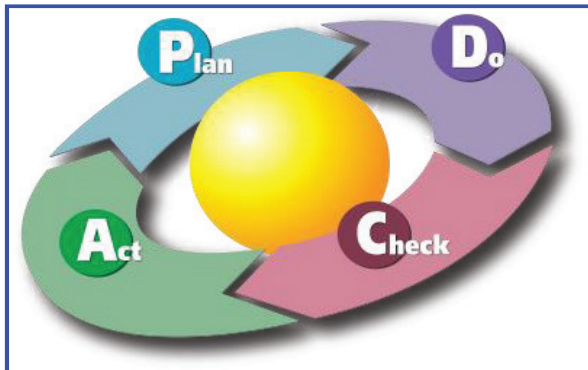
PDCA หมายถึง ทฤษฎีวัฏจักรในการบริหารงานที่มีคุณภาพของเดมมิง ซึ่งเป็นการดำเนินงานในการบริหารและจัดการพลังงานแสดงดังรูปที่ 1 จะประกอบด้วย

P = Plan คือ การวางแผนงานที่ทำจากวัตถุประสงค์และกำหนดเป้าหมายที่ได้วางแผนงานไว้ เพื่อให้เกิดการทำงานมีประสิทธิภาพและสามารถบรรลุผลสำเร็จ

D = Do คือ การปฏิบัติตามขั้นตอนในแผนงานที่ได้เขียนไว้อย่างเป็นระบบและมีความต่อเนื่องอย่างถูกต้อง

C = Check คือ การตรวจสอบผลการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนของแผนงานที่อาจจะมีปัญหาเกิดขึ้นได้ และจะต้องเปลี่ยนแปลงแก้ไขแผนงานในขั้นตอนต่อไป

A = Action คือ การปรับปรุงแก้ไขส่วนที่มีปัญหา ถ้าไม่มีปัญหาใดๆก็ให้ยอมรับแนวทางการปฏิบัติตามแผนงานที่ได้ผลสำเร็จ เพื่อนำไปใช้ในการทำงานต่อไป



รูปที่ 1 วงจรการบริหารงานคุณภาพของเดมมิ่ง
ที่มา : [2] Prachuap Glomjit, (2012)

จากรูปที่ 1 เมื่อกำหนดวางแผนงาน (P)ไว้ จึงนำไปปฏิบัติงาน (D) ในระหว่างปฏิบัติก็ดำเนินการตรวจสอบ (C) พบปัญหาที่ทำการแก้ไขหรือปรับปรุง (A) ต่อไป

2.4 ค่าบำรุงรักษาและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การพิจารณาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่มีความเหมาะสม ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ในระหว่างการผลิต และการบำรุงรักษาแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้ดัชนีวัดค่าการใช้พลังงานต่อความสามารถเชิงปริมาณการผลิต คือ การใช้ดัชนีวัดค่าพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC) ซึ่งเป็นค่าดัชนี SEC ที่แสดงติดตามผลประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและการปรับปรุงบำรุงรักษา โดยวัดปริมาณพลังงานที่ใช้ในหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) เทียบกับปริมาณผลผลิตในหน่วยตัน (Ton) เพื่อใช้ตรวจสอบและประเมินค่าความต้องการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตหาดังนี้

$$SEC = \frac{\text{พลังงานที่ใช้}}{\text{ปริมาณผลผลิต}} \quad (1)$$

ค่าดัชนี SEC มีความสัมพันธ์กับปริมาณของผลผลิตซึ่งหมายถึงผลผลิตที่เกิดขึ้น (Output) จะเป็นผลลัพธ์จาก

กระบวนการผลิตสินค้าหรือวัสดุโดยจะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มผลผลิต (Productivity) หาค่าจากสมการที่ (2) ดังนี้

$$\text{การเพิ่มผลผลิต} = \frac{\text{ผลิตผล}}{\text{ทรัพยากรผลิต}} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \quad (2)$$

ทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปคือ หลัก 6 M [3] ได้แก่ วิธีการ (Method), วัสดุ (Material), เครื่องจักร (Machine), การตลาด (Marketing), เงิน (Money) และคน (Man) ทรัพยากรการผลิตด้านเครื่องจักรจะพิจารณาถึงความพร้อมใช้งานที่มีคุณภาพคืออยู่เสมอก็จะต้องบำรุงรักษา (Maintenance) ซึ่งเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่น่าไปใช้ในการจัดการให้บรรลुวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตให้เป็นไปตามคุณลักษณะเงื่อนไขการทำงาน ส่วนการลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานนั้น โดยการปรับลดเวลาปฏิบัติงานจะสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายของงานบำรุงรักษาเครื่องจักรให้น้อยลงได้ ซึ่งจะหมายถึงช่วยลดทรัพยากรและเพิ่มผลผลิตในงานอุตสาหกรรม โดยพิจารณาจากสมการที่ (3) ดังนี้

$$\text{ค่าบำรุงรักษา/ชั่วโมง} = \frac{\text{ผลรวมค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา}}{\text{จำนวนชั่วโมงแรงงาน}} \quad (3)$$

สมการที่ (3) จะเห็นว่าการลดจำนวนชั่วโมงแรงงานของการทำงานให้น้อยลงนั้น ทำให้ผลรวมของค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาลดลงด้วย และจะส่งผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่อหน่วยผลผลิตลดลง เมื่อเทียบกับผลผลิตเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงหาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ได้จากสมการที่ (4) คือ

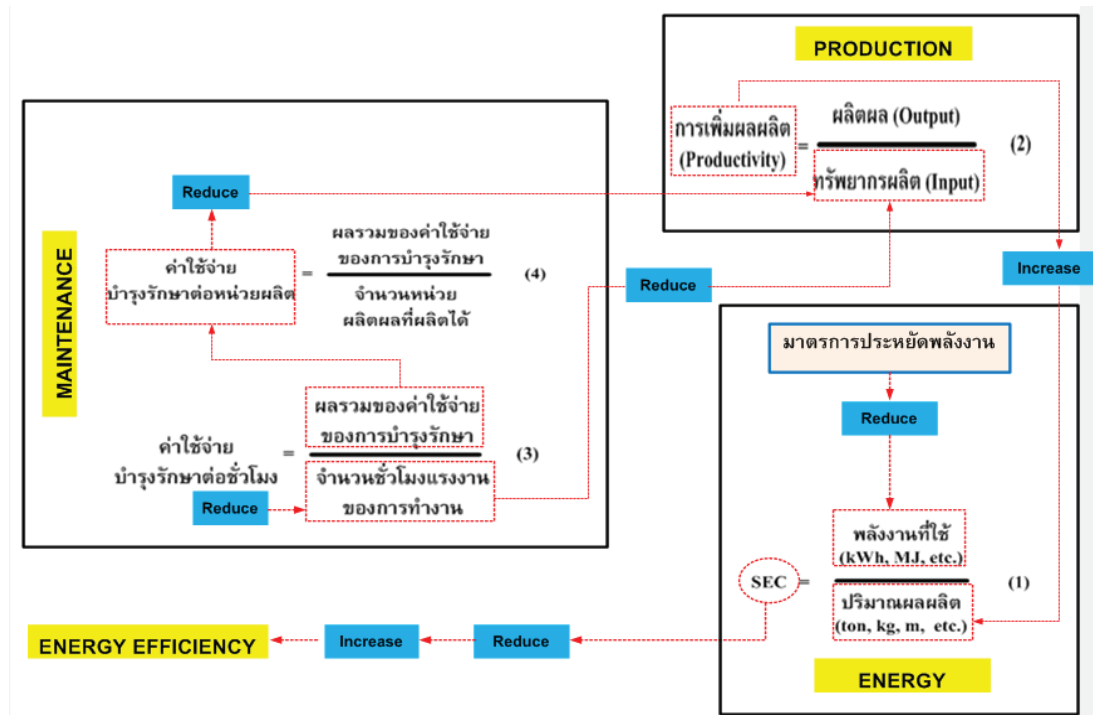
$$\text{ค่าบำรุงรักษา/หน่วย} = \frac{\text{ผลรวมค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา}}{\text{จำนวนหน่วยผลผลิต}} \quad (4)$$

2.5 คำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานทั้งหมดในการผลิต

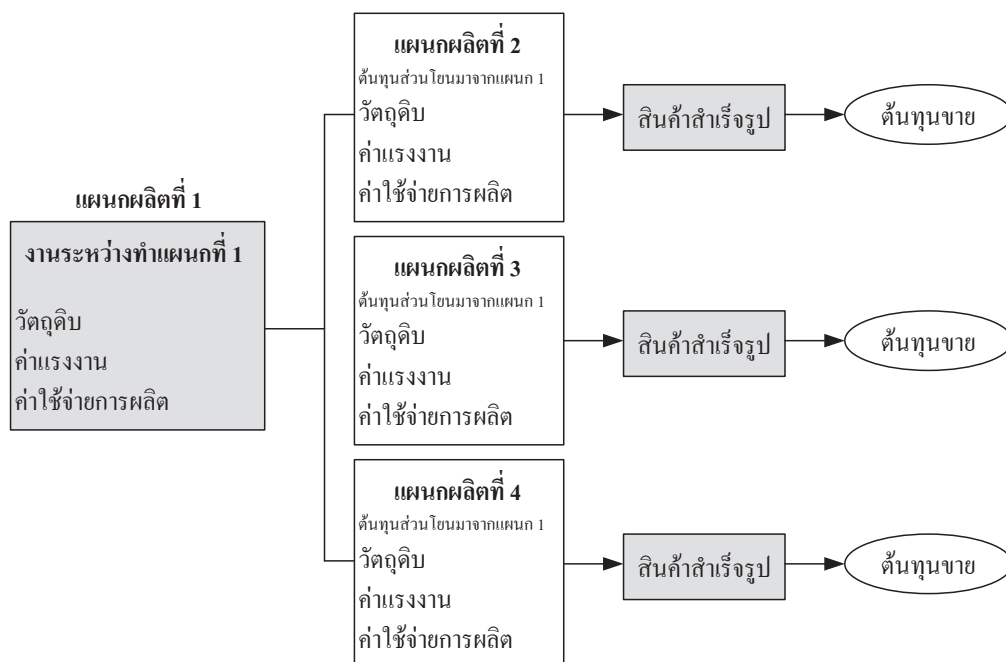
2.5.1 คำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานของชิ้นส่วนการผลิต

การคำนวณหาพลังงานสูญเสียที่ใช้งานไปคิดเป็นค่าใช้จ่ายของต้นทุนการผลิต ในช่วงแรกทำการคำนวณหา

ค่าใช้จ่ายชิ้นส่วนวัสดุ อัตราค่าไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายพลังงานสูญเสียต่อหน่วย ณ ปีที่ t [4] ดังนั้นสามารถพิจารณาจากโครงสร้างการผลิตที่จำแนกในแต่ละแผนกเพื่อศึกษาถึงหาต้นทุนการขายแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการผลิต การบำรุงรักษา และพลังงานกับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน [3]



รูปที่ 3 โครงสร้างการผลิตที่จำแนกตามลักษณะแผนกในแต่ละแผนกการผลิต

- ค่าใช้จ่ายขึ้นส่วนหรือค่าวัสดุในการประหยัดพลังงานประเภท Z (บาทต่อหน่วย) ในปี t สามารถหาค่าได้ดังนี้ [5]

$$C_{zt} = C_{z0} \prod_{i=1}^t (1 + RI_{zi}) \quad (5)$$

กำหนดให้

C_{zt} คือ ค่าใช้จ่ายขึ้นส่วนหรือวัสดุที่ประหยัดพลังงานประเภท Z (บาทต่อหน่วย) ในปี t

C_{z0} คือ ค่าใช้จ่ายขึ้นส่วนหรือวัสดุประหยัดพลังงานประเภท Z (บาทต่อหน่วย) ในตอนเริ่มต้น

RI_{zi} คือ อัตราเพิ่มขึ้น (+) หรือลดลง (-) ของค่าใช้จ่ายขึ้นส่วนหรือวัสดุประหยัดพลังงานในปีแรกคือปีที่ 1

- อัตราค่าไฟฟ้าประเภท x ในปี t หาได้ดังนี้

$$P_{xt} = P_{x0} \prod_{i=1}^t (1 + RI_{xi}) \quad (6)$$

กำหนดให้

P_{xt} คือ อัตราค่าไฟฟ้าประเภท x ในปี t

P_{x0} คือ อัตราค่าไฟฟ้าประเภท x หน่วยบาทต่อปี

RI_{xi} คือ อัตราการเพิ่มขึ้น (+) หรือลดลง (-) ของอัตราค่าไฟฟ้าประเภท x ในปี t

- พลังงานสูญเสียที่ใช้งานประเภท y ในปี t ดังนี้

$$\varphi_t = \varphi_0 \prod_{i=1}^t (1 + RQ_{yi}) \quad (7)$$

กำหนดให้

Q_{yt} คือ พลังงานสูญเสียที่ใช้งานประเภท y ในปี t

Q_{y0} คือ พลังงานสูญเสียที่ใช้งานประเภท y ในปี t

RQ_{yi} คือ อัตราการเพิ่มขึ้น (+) หรือลดลง (-) ของราคาพลังงานสูญเสียประเภท y ในปี t

2.5.2 คำนวณค่าใช้จ่ายพลังงานที่ประหยัดได้ในการผลิต

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของขึ้นส่วนหรือวัสดุใดๆ ในงานอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ณ ปีที่ t สามารถหาค่าได้ดังนี้ [6]

$$FI_t = \sum_z K_{zt} (C_{zt} + IC_{zt}) \quad (8)$$

กำหนดให้

FI_t คือ ค่าใช้จ่ายเงินในการลงทุน ณ ปีที่ t

K_{zt} คือ จำนวนขึ้นส่วนหรือวัสดุประหยัดพลังงานประเภท Z ที่ได้ลงทุนตามมาตรการในปี t (กรณีมีค่าเป็นลบ — ถ้าเป็นขึ้นส่วนที่ประหยัดได้)

K_{zn} คือ จำนวนราคาเทียบเท่าของขึ้นส่วนหรือวัสดุที่ประหยัดพลังงานประเภท Z ที่มีอายุการใช้งานเริ่มต้นการทำงานในปีที่ n โดยพิจารณาในการคำนวณจากค่าสัดส่วนของอายุการใช้งานที่ยังเหลือ [7]

C_{zt} คือ ราคาขึ้นส่วนหรือวัสดุประหยัดพลังงาน ของประเภท Z ต่อหน่วยในปี t

- ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้โดยทั่วไป ในปี t สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$EFS_t = \sum_x D_x \times P_{xt} + \sum_y E_y \times Q_{yt} \quad (9)$$

กำหนดให้

EFS_t คือ ค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ประหยัดในปี t

D_x คือ ค่าไฟฟ้าประเภท x ที่ประหยัดพลังงานได้ หมายถึงค่าค่าไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเดือน

P_{xt} คือ อัตราค่าไฟฟ้าประเภท x ที่สามารถประหยัดพลังงานได้ในปีที่ t

E_y คือ ปริมาณพลังงานประเภท y ที่ประหยัดได้ต่อปี คือพลังงานไฟฟ้า

- ค่าใช้จ่ายพลังงานที่ประหยัดได้โดยคิดในปีใดๆ กรณีพิจารณา ก่อนและหลังดำเนินการในการประหยัดพลังงาน สามารถหาได้ดังนี้ [8]

$$\Delta E_{adj} = E_{adj,1} - E_2 \quad (10)$$

กำหนดให้

ΔE_{adj} คือ อัตราค่าใช้พลังงานที่ประหยัดได้จริง

$E_{adj,1}$ คือ ค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้ก่อนดำเนินการ

E_2 คือ ค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้หลังดำเนินการ

- ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ ในกรณีก่อนทำการปรับปรุง เมื่อปรับจำนวนวันบันทึกการใช้พลังงาน หาค่าได้ดังนี้

$$E_{adj,1} = E_1 \times \frac{d_2}{d_1} \quad (11)$$

กำหนดให้

$E_{adj,1}$ คือ ค่าใช้จ่ายพลังงานที่ก่อนปรับจำนวนวัน

E_1 คือ ค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้ก่อนปรับปรุง

d_1 คือ จำนวนวันที่บันทึกก่อนปรับปรุง

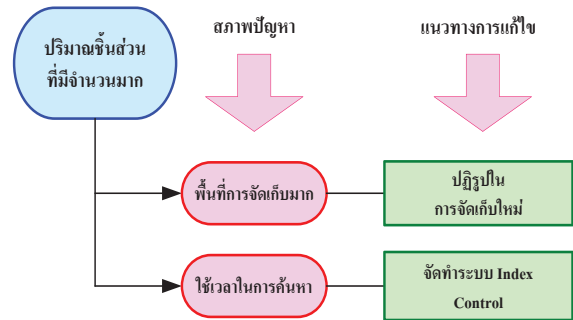
d_2 คือ จำนวนวันที่บันทึกหลังปรับปรุง

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

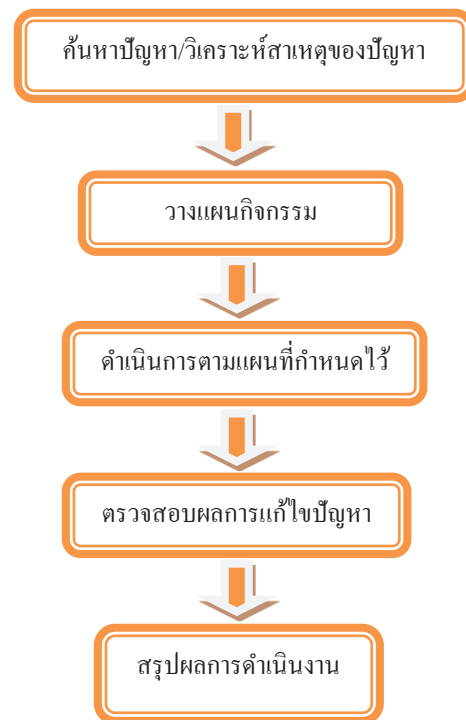
มีขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานจากการศึกษา ค้นคว้า สภาพปัญหาและแนวทางการแก้ไขต่างๆ โดยการนำทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาปรับปรุงการใช้งาน ทำให้เข้าใจถึงสาเหตุและแนวทางการแก้ไข เพื่อให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ซึ่งมีขั้นตอนการควบคุมคุณภาพของเดมมิ่ง PDCA [9] แสดงดังรูปที่ 5

3.1 ศึกษาสภาพการทำงานในปัจจุบัน และหาสาเหตุ

สภาพปัญหาในปัจจุบันจึงพบว่าค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานด้านต่างๆของฝ่ายงาน LCD ในปี พ.ศ. 2559 มีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อบริษัทโดยตรง ดังนั้นฝ่ายงาน LCD จึงได้ดำเนินการค้นหาสาเหตุและวิธีการแก้ไขเพื่อให้ปัญหาลดลงหรือหมดไปซึ่งแสดงแผนภูมิรูปที่ 4 โดยการลงพื้นที่หาข้อมูลของปัญหา และศึกษาผลกระทบจากสถานที่ทำงานภายในพื้นที่จัดเก็บ



รูปที่ 4 แผนภูมิวิเคราะห์และหาแนวทางแก้ไข



รูปที่ 5 ขั้นตอนการควบคุมคุณภาพในการดำเนินงานวิจัย โดยใช้หลักการเดมมิ่ง PDCA

3.2 วางแผนกิจกรรมและดำเนินการตามแผนที่กำหนด

การดำเนินการวิจัย โดยเริ่มจากการจัดเก็บชิ้นส่วนนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามแผนที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งจะต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบบริหารงานจัดเก็บใหม่ มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

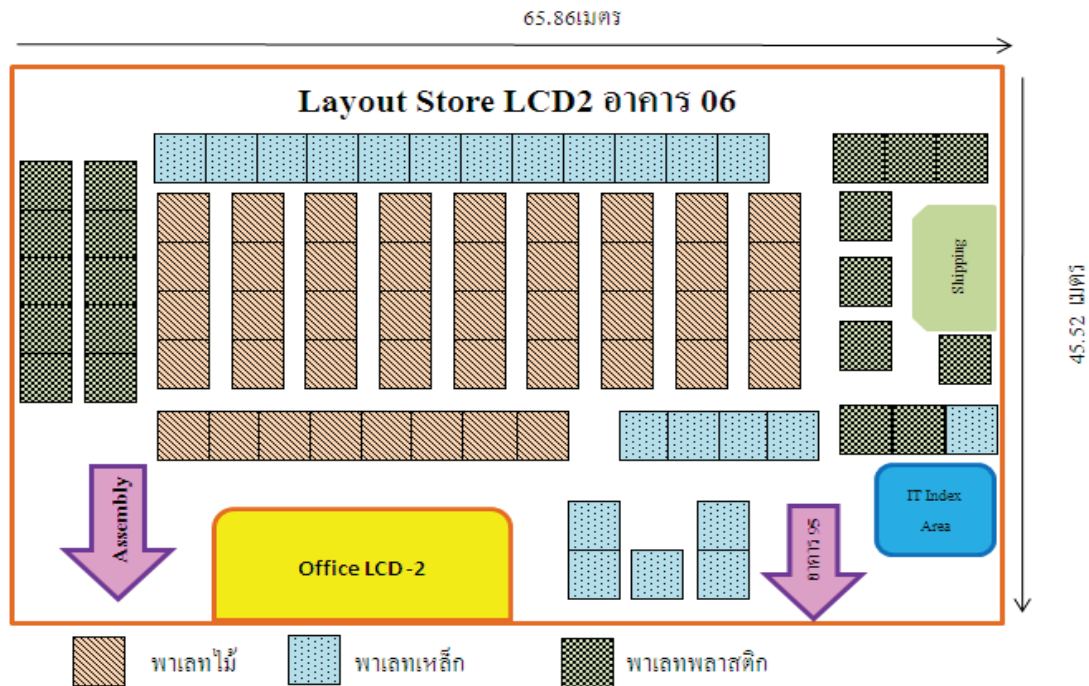
ขั้นที่ 1 ลงพื้นที่สำรวจและวัดพื้นที่ก่อนทำการปรับปรุง

เริ่มจากลงพื้นที่สำรวจการทำงานจริง เพื่อทำการวัดพื้นที่และวิเคราะห์สภาพการทำงานในพื้นที่ การวัดพื้นที่ใช้วางชิ้นส่วนจึงได้พื้นที่ 2,997.95 ตารางเมตร

ขั้นที่ 2 การปรับปรุงพื้นที่การทำงานเพื่อการบำรุงรักษา

ผู้วิจัยได้ดำเนินการ โดยศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นและใช้หลักการทำงานในการบริหารจัดการเข้ามาช่วยแก้ปัญหา เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงาน โดยทำการปรับเปลี่ยน

พื้นที่ Lay Out สำหรับใช้จัดเก็บภายในคลังสินค้าแบบใหม่ โดยการนำทฤษฎี 5 ส. จัดการในคลังสินค้าเข้ามาใช้ เพื่อให้สามารถรองรับการจัดเก็บได้จำนวนมากและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพคลังสินค้าแสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 แบบแปลนพื้นที่ Lay Out ก่อนทำการปรับปรุง

ขั้นที่ 3 ออกแบบลักษณะรูปแบบชั้นวางชั้นส่วน

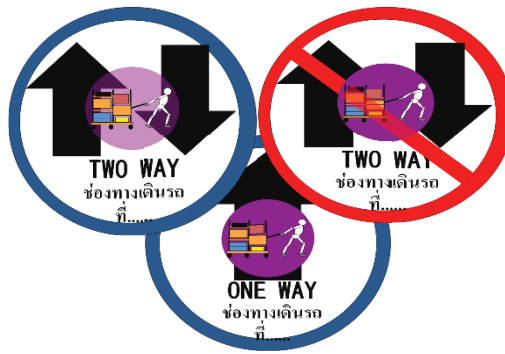
กำหนดใช้แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพคลังสินค้า โดยจัดหาอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุที่เหมาะสมและปรับเปลี่ยนระบบการจัดเก็บ โดยศึกษาสัญลักษณ์เส้นทางการเดินรถขนชั้นส่วนแสดงดังรูปที่ 8 ผู้วิจัยได้พิจารณาการปฏิรูปการจัดเก็บใหม่ทั้งหมดจะต้องประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่าย



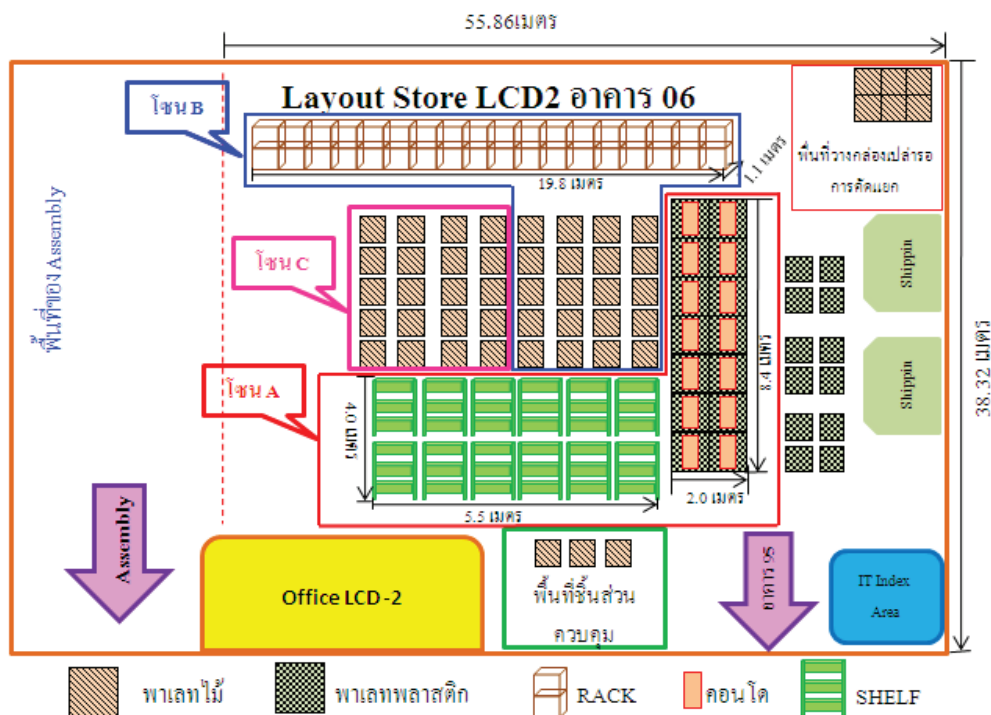
รูปที่ 7 เส้นแนวทางการเดินกับพื้นที่จัดเก็บชั้นส่วนในบริเวณคลังสินค้าของบริษัท

3.3 ตรวจสอบพื้นที่เพื่อตรวจวัดพื้นที่หลังการปรับปรุง

ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เพื่อทำการวัดพื้นที่ทั้งหมดใหม่อีกครั้งหนึ่ง หลังจากทำการปรับปรุง พร้อมทั้งตรวจสอบการใช้งานของชั้นวางต่างๆ และตรวจสอบระยะเวลาในการทำงานให้เป็นไปตามแผนงานที่กำหนด ผลที่ได้จากการตรวจสอบพบว่า พื้นที่หลังการปรับปรุงมีพื้นที่ลดลงคือ 2,140.56 ตารางเมตรจากพื้นที่เดิม จะมีพื้นที่ในการวางชั้นส่วนลดลงคือ 857.39 ตารางเมตร และมีระยะเวลาดำเนินงานตามแผนงานในพื้นที่ใหม่แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 สัญลักษณ์เส้นทางการเดินรถขึ้นชั้น



รูปที่ 9 การจัดชั้นวางชิ้นส่วนและแบ่งโซนพื้นที่ใหม่ภาย หลังทำการปรับปรุงและแก้ไข

3.4 การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

สำหรับการดำเนินกิจกรรมการจัดเก็บชิ้นส่วนในชั้นวาง SHELF เพื่อปรับปรุงพื้นที่ทำงานและเพื่อบำรุงรักษาชิ้นส่วนแสดงดังรูปที่ 10 สำหรับการจัดเก็บชิ้นส่วนในพื้นที่ผู้วิจัยไม่พบปัญหา ดังนั้นสามารถดำเนินการตามแผนงานที่ได้กำหนดไว้แต่ถ้ามีการตรวจผลดำเนินงานที่เกิดปัญหาขึ้น จะต้องแก้ไขปัญหาลักษณะสาเหตุอื่นๆ

3.4.1 ศึกษาเวลาการทำงาน และนับเวลาในการทำงานของพนักงานโดยการค้นหา

เพื่อในการจัดเก็บและการจัดจ่ายชิ้นส่วน โดยเริ่มนับเวลาตั้งแต่พนักงานรับชิ้นส่วนจากจุดรับชิ้นส่วน ค้นหาชิ้นส่วนไปจนถึงขั้นตอนการจัดเก็บโดยเวลามาตรฐานนั้นทางบริษัทจะเป็นผู้กำหนดการทำงาน

3.4.2 เลือกโปรแกรมที่จะนำมาใช้งาน

ใช้แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพคลังสินค้าและเป็นการประยุกต์ใช้ระบบเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับงานคลังสินค้ามาเป็นแนวทางในการปฏิบัติงาน และดำเนินการ

จัดทำ Index Control ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม Microsoft Office Excel 2003 ช่วยในการค้นหาชิ้นส่วนแสดงผลหน้าจอโปรแกรมดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ชั้นเก็บชิ้นส่วนในชั้นวาง SHELF

4. การวิเคราะห์

4.1 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน

เมื่อศึกษาค่าใช้จ่ายพลังงานในแต่ละขั้นตอนแล้วต่อไปทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน โดยคิดจากดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ SEC สามารถช่วยในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน ดังเกิดลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับเวลาโดยศึกษาจากข้อมูลการใช้

พลังงานรายเดือนในอดีตอย่างน้อย 1 ปี ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้ได้มาจากใบแจ้งค่าใช้จ่ายพลังงาน ดังนั้นสามารถอธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงานแสดงดังรูปที่ 12

4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน

ปริมาณการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุจากปริมาณการผลิตที่เพิ่มขึ้น ผู้ใช้ไฟฟ้าของบริษัทจึงใช้ค่าดัชนีการใช้พลังงาน SEC ช่วยวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงาน โดยผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เก็บข้อมูล พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายพลังงานที่เกิดขึ้นของบริษัท อิตาชิ ออโตเมชัน เทคโนโลยี จำกัดซึ่งเป็นบริษัทอุตสาหกรรมการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าโดยเริ่มศึกษาดำเนินงานฝ่าย LCD ในปี พ.ศ.2559 จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงานแสดงผลดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าบริษัทมีศักยภาพในการประหยัดพลังงานค่อนข้างสูง คือสามารถทำการปรับปรุงเพื่อลดการใช้พลังงานได้ และมีปริมาณผลผลิตสูงสุดในเดือนเมษายน คือ 2,217 ตัน แต่จะมีพลังงานที่ใช้ไปน้อยที่สุดในเดือนกุมภาพันธ์ประมาณ 987,248 kWh จะต้องชำระเงินค่าไฟฟ้าน้อยลงเป็นเงิน 1,835,293 บาท

Microsoft Excel - 3.IT INDEX FOR KEEP _PlantDel_2010

FileEditViewInsertFormatToolsDataWindowHelp

Type a question for help

Q1-6305-000

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF
1	Part_no	Dim	Supp	Area	Exp	Inv_2k_spr	Delay_glas	20100426				20100427				20100428				20100429				20100430				20100431				
2								Mon_2009	Tue_2009	Wed_2009	Thu_2009	Mon_2009	Tue_2009	Wed_2009	Thu_2009	Mon_2009	Tue_2009	Wed_2009	Thu_2009	Mon_2009	Tue_2009	Wed_2009	Thu_2009	Mon_2009	Tue_2009	Wed_2009	Thu_2009	Mon_2009	Tue_2009	Wed_2009	Thu_2009	
166	QC1-5244-000	K342	206-06-01	1.622000	71	-																										
167	QC1-5556-000	T123	205-07-04	1.622000	840	-																										
168	QC1-5558-000	P125	205-05-05	1.622000	71	-																										
169	QC1-6281-000	F484	206-05-05	1.622000	1107	-																										
170	QC1-6285-000	X411	204-01-04	1.622000	847	-																										
171	QC1-6288-000	K215	206-06-05	1.622000	387	-																										
172	QC1-6287-000	F484	206-05-05	1.622000	1107	-																										
173	QC1-6204-000	T481	212-05-01	1.622000	1380	-																										
174	QC1-6286-000	P125	205-05-05	1.622000	2208	-																										
175	QC1-6305-000	P125	205-05-05	1.622000	2208	-																										
176	QC1-6308-000	F484	206-07-04	1.622000	2800	-																										
177	QC1-6309-000	G481	206-07-05	1.622000	3068	-																										
178	QC1-6311-000	K342	206-06-01	1.622000	847	-																										
179	QC1-6312-000	K411	212-05-01	1.622000	1110	-																										
180	QC1-6318-000	P125	205-05-05	1.622000	1407	-																										
181	QC1-6389-000	G481	206-07-05	1.622000	3068	-																										
182	QC1-6429-000	F484	206-05-05	1.622000	1107	-																										
183	QC1-6444-000	F484	206-05-05	1.622000	1107	-																										
184	QC1-6448-000	K215	206-06-05	1.622000	387	-																										
185	QC1-6455-000	F484	206-07-05	1.622000	3068	-																										
186	QC1-6456-000	F484	206-07-05	1.622000	3068	-																										
187	QC1-6474-000	P125	205-05-05	1.622000	2208	-																										
188	QC1-6549-000	K411	212-05-01	1.622000	1110	-																										
189	QC1-6550-000	K120	212-05-01	1.622000	6100	-																										
190	QC1-6553-000	P125	205-05-05	1.622000	2208	-																										
191	QC1-6556-000	C150	212-04-03	1.622000	1800	-																										

Resp / Inv_8998 / Inv_2200 / Inv_2300 / Plan_2200 / Plan_2300 / Del_2200 / Del_2300 / Table / Puling

start

Project

used 3 Cost Down In...

Microsoft Excel - 3.IT...

Microsoft PowerPoint ...

NUM

EN

13

รูปที่ 11 หน้าจอโปรแกรมแสดงชิ้นส่วนต้องการจัดเก็บ



รูปที่ 12 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายพลังงาน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงานและปริมาณผลผลิตในกระบวนการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าของบริษัท

เดือน	รายการพลังงานไฟฟ้าของการผลิตในปี 2559			
	พลังงานที่ใช้ไป	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ปริมาณผลผลิต	ดัชนีการใช้
	(kWh)		(ตัน)	(บาท/ตัน)
ม.ค.	1,092,787	2,480,783	2,008	1,235.45
ก.พ.	987,248	1,835,293	1,999	1,155.23
มี.ค.	1,187,424	2,675,169	1,728	1,548.13
เม.ย.	1,181,952	2,666,046	2,217	1,202.54
พ.ค.	1,153,498	2,618,605	1,605	1,631.53
มิ.ย.	1,123,200	2,507,087	2,201	1,139.07
ก.ค.	1,104,096	2,487,438	1,913	1,300.28
ส.ค.	1,104,096	2,487,438	2,164	1,149.46
ก.ย.	1,080,576	2,484,824	1,728	1,437.97
ต.ค.	1,133,261	2,572,664	2,150	1,196.59
พ.ย.	1,021,680	2,359,178	1,938	1,217.33
ธ.ค.	1,093,680	2,463,972	2,144	1,149.24
รวม	13,263,498	29,638,497	23,795	15,362.82

5. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานจากการสำรวจพื้นที่ทำกิจกรรมในการวางแผนงานและจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายพลังงานแล้ว เพื่อลดค่าใช้จ่ายพลังงานในการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าของบริษัทโดยทำการติดตามและประเมินผล และทำการเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้ไปหลังดำเนินการประหยัดพลังงานกับค่าใช้จ่ายพลังงานที่ใช้ก่อนดำเนินการ ดังนั้นผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องทราบว่าอาคารหรือโรงงานที่จะทำการประหยัดพลังงานมีการใช้พลังงาน ใช้เชื้อเพลิงชนิดใด ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายพลังงาน ได้แก่ อัตราการผลิต พื้นที่ใช้งาน จำนวนพนักงาน เวลาทำงาน สภาพแวดล้อมและจะต้องเข้าใจถึงอัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้เหมาะสมกับกิจการที่ดำเนินการ งานวิจัยนี้ที่เกี่ยวข้องคือ ศึกษาการจัดการใช้พลังงาน วางแผนงาน พัฒนาระบบผลิตไฟฟ้า และการเพิ่มผลผลิตในการใช้พลังงาน (ตัน) เทียบกับเวลาที่ใช้ไปในการผลิตในแต่ละเดือนแสดงดังรูปที่ 15

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบก่อน และหลังปรับปรุงการใช้พลังงานจากการติดตามและประเมินผลในปี พ.ศ.2559

รายการปรับปรุง	พลังงานที่ใช้ไป (kWh)	ค่าใช้จ่ายพลังงาน (บาท)	จำนวนวันในใบเสร็จ (วัน)	อัตราค่าพลังงาน (บาท/หน่วย)
ก่อน	13,273,498	30,112,497	31	2.0
หลัง	12,750,560	21,094,250	30	2.7
ผลต่าง	522,938	9,018,247	1	0.7

จากผลตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าก่อนและหลังในการดำเนินการประหยัดพลังงานแตกต่างกัน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ก่อนดำเนินการควรปรับให้ตรงกับเงื่อนไขในการใช้งานแสดงผลรูปที่ 13 และรูปที่ 14 ดังนั้นพลังงานที่ใช้ก่อนปรับปรุงที่ปรับจำนวนวันบันทึกการใช้พลังงาน $E_{adj,1}$ หาค่าดังนี้

$$E_{adj,1} = 13,273,498 \times \frac{30}{31} = 12,845,321 \text{ kWh.}$$

$$1. \text{ พลังงานที่ประหยัดได้} = 12,845,321 - 12,750,560 = 94,761 \text{ kWh.}$$

2. ทำการปรับอัตราค่าพลังงานเฉลี่ยต่อหน่วย

$$\begin{aligned}\text{ค่าใช้จ่ายพลังงานทั้งหมด} &= 94,761 \text{ kWh} \times 2.7 \\ &= 255,854.70 \text{ บาท}\end{aligned}$$

ดังนั้นผลการคำนวณเมื่อทำการปรับอัตราค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ไปต่อหน่วย จะมีค่าใช้จ่ายพลังงานทั้งหมดเป็นเงิน 255,854.70 บาท

ตารางที่ 3 ปรับอัตราค่าพลังงานที่ประหยัดพลังงานได้

พลังงานที่ประหยัดได้ (kWh)	อัตราค่าพลังงานเฉลี่ย ต่อหน่วย (บาท/ kWh)
94,761	2.7

3. การคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU

เนื่องจากบริษัทนี้ผู้วิจัยได้คำนวณใช้อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU (Time of Use) คือ อัตราค่าไฟฟ้าที่คิดตามช่วงเวลาของการใช้ไป เพื่อกระตุ้นให้ผู้ที่ใช้ไฟฟ้าของบริษัทลดการใช้พลังงานในช่วงเวลากลางวัน ค่าไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นในช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามก (On Peak) และค่าไฟฟ้าจะถูกกลงในช่วงเวลาที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย (Off Peak) จากผลการใช้พลังงานไฟฟ้าในเวลากลางวันใน 1 เดือนแสดงดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเดือนเมษายนมีพลังงานที่ใช้ไปคือ 1,181,952 kWh จำนวนหาดังนี้

- ช่วง On Peak
(วันจันทร์-ศุกร์ เวลา 9.00 น.–22.00 น.)
= 530,200 kWh.

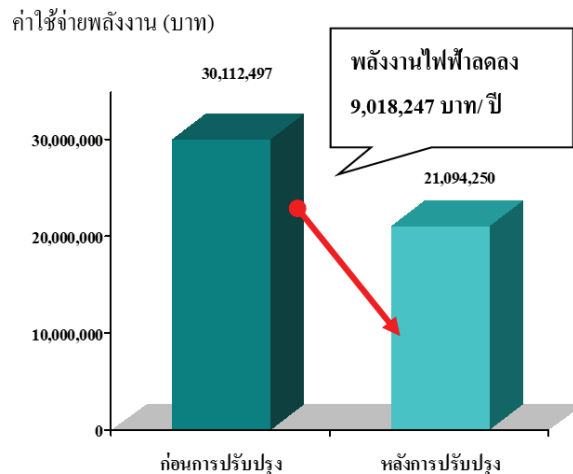
- ช่วง Off Peak
(วันจันทร์-ศุกร์ เวลา 22.00 น.–9.00 น. และวันเสาร์-อาทิตย์, วันหยุดราชการทั้งวัน.)
= 651,752 kWh.

รวมพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด = 1,181,952 kWh.

จากการดำเนินงานปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงการจัดเก็บทำให้ฝ่ายงาน LCD สามารถลดต้นทุนในการดำเนินงานได้เป็นอย่างดี

ผลการดำเนินงานช่วงที่ 1 การปฏิบัติการจัดเก็บชิ้นส่วน

การปฏิบัติการจัดเก็บชิ้นส่วนเพื่อลดพื้นที่จริง ผู้วิจัยพบปัญหาที่ทำให้บริษัทสูญเสียต้นทุนคือการวางงานบนพาเลทในแนวนานและใช้พาเลทวางพื้นที่ที่ไม่จำเป็น



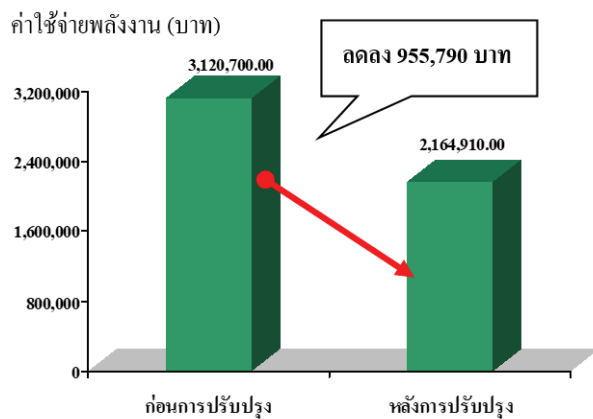
รูปที่ 13 กราฟผลค่าใช้จ่ายพลังงานที่ลดลงในช่วงการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าหลังทำการปรับปรุงแล้ว

วิธีการคิดหามูลค่าพื้นที่ของราคาพื้นที่ในบริษัทนี้ผู้วิจัยได้กำหนดไว้จะมีมูลค่าถึง 1,000 บาทต่อตารางเมตร ดังนั้นสามารถหามูลค่าพื้นที่ในการทำกิจกรรมจากสมการที่ (12) มีดังนี้

$$\text{มูลค่าพื้นที่} = \text{พื้นที่ลดลง (m}^2\text{)} \times \text{ราคาพื้นที่ (Baht/m}^2\text{)} \quad (12)$$

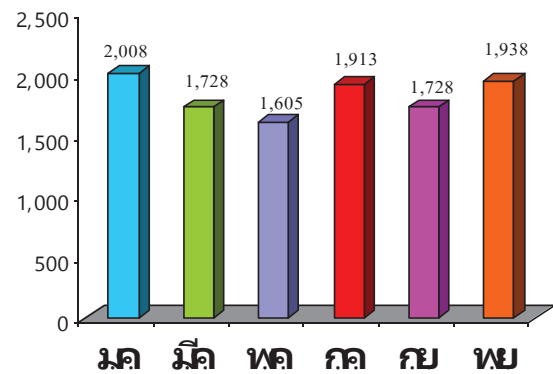
ผลการดำเนินงานช่วงที่ 2 จัดทำระบบ Index control

การจัดทำระบบ Index control สามารถช่วยลดเวลาในการจัดเก็บ เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้กับพนักงานและเป็นการเสริมสร้างทักษะความรู้ให้กับพนักงานในการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 16 ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานดีขึ้น และผลตารางที่ 4 จะเห็นว่าก่อนทำการปรับปรุงฝ่ายงาน LCD จะใช้เวลาไปกับการค้นหาและการจัดเก็บชิ้นส่วนของพนักงานในกระบวนการผลิตวันละ 7.8 ชั่วโมงต่อคน



รูปที่ 14 กราฟผลค่าใช้จ่ายพลังงานที่ลดลงในการจัดการพื้นที่คลังสินค้าก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ผลผลิตการใช้พลังงาน (ตัน)



เวลาที่ใช้ไป (เดือน)

รูปที่ 15 ผลผลิตการใช้พลังงาน (ตัน) เทียบกับเวลาที่ใช้ไปในการผลิตในแต่ละเดือนของปี พ.ศ.2559

ตารางที่ 4 ผลการนำระบบ Index Control มาใช้ในพื้นที่คลังสินค้าก่อนและหลังการปรับปรุง

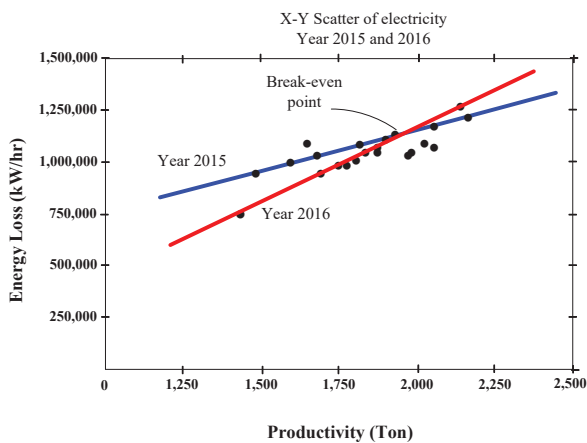
รายละเอียดพนักงาน	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
เวลาค้นหาเพื่อจัดจ่าย	3.4 ชั่วโมง	1.5 ชั่วโมง
เวลาค้นหาเพื่อจัดเก็บ	4.4 ชั่วโมง	2.0 ชั่วโมง
รวมทั้งหมด	7.8 ชั่วโมง	3.5 ชั่วโมง

CONTROL PART 1									
รายการผลิตต่อวัน									
UNIT:	QX13-2858-000			DATE:	30 April 2010			QTY:	87
NO.	PART NO.	SUP	USAGE	PLAN	ISSUE QTY	ผู้จัดจ่าย	ผู้รับ	PART	ASS'Y: 1, 7
1	QA4-100-000			87		YUPIN		F15-05-03	SHELF NO.2 ชั้นที่ 1
2	QA4-100-000			174		YUPIN			ชั้นที่ 1
7	QC1-4938-000		1	87		YUPIN		F13-04-01	SHELF NO.2 ชั้นที่ 2
8	QC1-4938-000		1	87		YUPIN		A03-01-01	SHELF NO.6 ชั้นที่ 2
9	QC1-4940-000		1	87		YUPIN		E08-07-03	SHELF NO.2 ชั้นที่ 2
10	QC1-4951-000		1	87		YUPIN		Z01-01-03, A01-01-02	SHELF NO.2 ชั้นที่ 2
11	QC1-4952-000		1	87		YUPIN		E08-07-05	SHELF NO.2 ชั้นที่ 3
12	QC1-4952-000		1	87		YUPIN		E08-07-05	SHELF NO.2 ชั้นที่ 3
13	QC1-5000-000		1	87		YUPIN		E03-08-04	ชั้นที่ 3
14	QC1-5049-000		1	87		YUPIN		F13-04-03	SHELF NO.1 ชั้นที่ 1
15	QC1-5050-000		1	87		YUPIN		B07-08-01	SHELF NO.1 ชั้นที่ 1
16	QC1-5058-000		1	87		YUPIN			ชั้นที่ 1
17	QC1-5059-000		1	87		YUPIN		F15-05-03	SHELF NO.3 ชั้นที่ 1
18	QC1-5100-000		1	87		YUPIN		F15-05-03	SHELF NO.3 ชั้นที่ 1
19	QC1-5101-000		1	87		YUPIN			ชั้นที่ 1
20	QC1-5103-000		1	87		YUPIN			ชั้นที่ 1
21	QC1-5104-000		1	87		YUPIN		F15-05-03	SHELF NO.3 ชั้นที่ 1
22	QC1-5105-000		1	87		YUPIN		F13-03-02	SHELF NO.4 ชั้นที่ 1
23	QC1-5109-000		1	87		YUPIN			ชั้นที่ 1
24	QC1-5141-000		1	87		YUPIN		F13-04-03	SHELF NO.4 ชั้นที่ 1
25	QC2-5237-000		1	87		YUPIN		F12-02-02	SHELF NO.4 ชั้นที่ 1
26	QC2-5238-000		1	87		YUPIN		F12-02-02	SHELF NO.4 ชั้นที่ 1
27	QC2-5238-000		1	87		YUPIN			ชั้นที่ 1
28	QC2-5237-000		1	87		YUPIN		E08-07-05	SHELF NO.4 ชั้นที่ 2
29	QC2-5270-000		1	87		YUPIN		Z01-01-02	SHELF NO.4 ชั้นที่ 2
30	QC2-5321-000		1	87		YUPIN		A05-01-02	SHELF NO.4 ชั้นที่ 2
31	QC2-5054-000		1	87		YUPIN		F13-04-03	SHELF NO.4 ชั้นที่ 2
32	Q54-2137-000		1	87		YUPIN		E08-07-03	SHELF NO.1 ชั้นที่ 2
33	Q54-2138-000		2	174		YUPIN		E08-07-03	SHELF NO.1 ชั้นที่ 2
34	Q54-2138-000		2	174		YUPIN		E08-07-03	SHELF NO.1 ชั้นที่ 2
35	Q54-2139-000		1	87		YUPIN			SHELF NO.1 ชั้นที่ 2

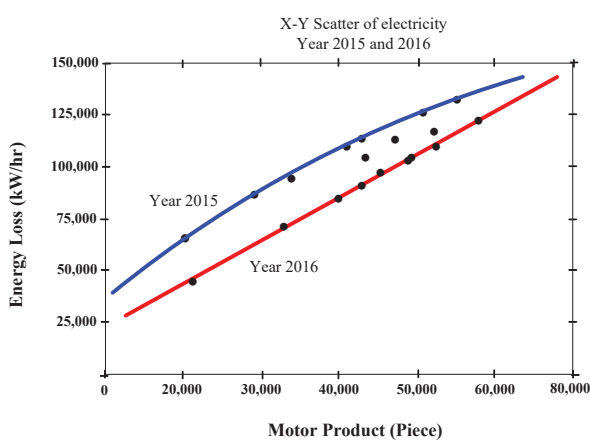
รูปที่ 16 หน้าจอโปรแกรมผลเมื่อกรอกรหัสผลิตภัณฑ์มอเตอร์ไฟฟ้าในระบบ Index control

ตารางที่ 5 ผลการทำการกิจกรรมทั้งหมดของพนักงานก่อนและหลังการปรับปรุงเพื่อลดค่าใช้จ่าย

หัวข้อกิจกรรม ค่าใช้จ่ย ที่ลดลง	ก่อนทำ	หลังทำ	ปริมาณ
(บาท/ปี)			
1.ปฏิรูปจัดเก็บ			
ขึ้นส่วนเพื่อลดพื้นที่ (ตร.เมตร)	2,997.9	2,140.5	857.4
			857,400
2.นำ Index Control			
มาใช้เพื่อค้นหา	10	5	5
ขึ้นส่วนผลทำให้			
ลดคนได้ (คน)			
รวมค่าใช้จ่ยทั้งหมดที่ลดลงเป็นเงิน 1,607,400 บาทต่อปี			



รูปที่ 17 ผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลผลิต (ตัน) กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป (kWh)



รูปที่ 18 ผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผลผลิตของมอเตอร์ไฟฟ้า (เครื่อง) กับพลังงานที่ใช้ (kWh)

6. สรุปผล

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ยพลังงานเป็นการประเมินผลศักยภาพในการประหยัดพลังงานของการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีค่าดัชนีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นหรือลดลง ถ้าค่าดัชนีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเฉพาะบางเดือนและลักษณะการใช้พลังงานเปลี่ยนแปลงผิดปกติแสดงว่ามอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องจักรทำงานผิดปกติ ดังนั้นสามารถอธิบายผลการวิเคราะห์มีดังนี้ 1. ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ยพลังงานสามารถใช้เป็นข้อมูล เพื่อพิจารณาในการตัดสินใจเลือกใช้สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าและอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อปีได้อย่างเหมาะสม 2. ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ยพลังงานจะเห็นว่าบริษัทอุตสาหกรรมการผลิตมอเตอร์ไฟฟ้านี้มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานได้ดี สามารถทำการปรับปรุงเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 3.ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ยพลังงานสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลที่สำคัญสำหรับใช้วิเคราะห์หาค่าใช้จ่ยพลังงานในอนาคตได้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจสอบการใช้พลังงาน 4.ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ยพลังงานสามารถช่วยให้พนักงานได้คำนึงถึงความสำคัญของค่าใช้จ่ยพลังงานมากยิ่งขึ้น 5.เมื่อทำการปรับปรุงบำรุงรักษาโดยการนำเอา Index Control มาใช้ในการทำงาน ทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลงประมาณ 55 % นั่นคือเวลาทำงานลดลงเหลือเวลา 3.5 ชั่วโมงต่อคนต่อรอบ และ 6. จากผลการปรับปรุงงานบำรุงรักษาช่วยให้ประหยัดพลังงานของพนักงานจากเดิมที่ใช้พนักงานจำนวน 10 คน แต่หลังจากการทำการกิจกรรมส่งผลทำให้ฝ่าย LCD สามารถลดจำนวนพนักงานให้เหลือเพียง 5 คนโดยที่ให้พนักงานจำนวน 1 คนที่มีรายได้โดยเฉลี่ยเป็นเงิน 568.18 บาทต่อวัน เมื่อบริษัทได้กำหนดให้พนักงานทุกคนเข้ามาทำงานประมาณ 22 วันต่อเดือน (รายได้ส่วนนี้จะรวมถึงเบี้ยขยันค่าครองชีพ ค่านอกเวลาทำงานและค่าอาหาร) รวมเป็นเงินทั้งหมด 12,500 บาทต่อเดือนและภายหลังจากการดำเนินงานแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้พนักงานลดลงจากเดิม 10 คนเหลือ 5 คนและทำให้ลดต้นทุนค่าใช้จ่ยเป็นเงิน 62,500 บาทต่อเดือนหรือเป็นเงิน

ประมาณ 750,000 บาทต่อปี เมื่อมีการปฏิรูปในการ
จัดเก็บและการจัดจ่าย ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์และทำการ
ปฏิบัติงานจริงโดยผ่านการทำกิจกรรม เพื่อใช้เป็นข้อมูล
พิจารณาและสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการผลิตได้
ประมาณ 70 % และสามารถประหยัดพลังงานในโรงงาน

อุตสาหกรรมผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้
สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ซึ่งตรงตาม
เป้าหมายในการใช้พลังงานไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Teerayut Sonseup. Management Components to Reduce the Cost of Production in the Industry Faculty. Thesis, Valaya Alongkorn Rajabhat University, Thailand, 2009.
- [2] Glomjit, P. Industrial Design to Increase Electrical Energy Productivity. *Journal of Energy Research*, 2012; 1: 24-56.
- [3] Poolee, S. and et al. Improving Maintenance Working to Increase Energy Efficiency in Industry. *Journal of Energy Research*, 2012; 24-38.
- [4] Arunrat, T. and et al. Energy Conservation for the Arc Furnace. *Journal Research*, 2010; 19: 58-75.
- [5] Mangwititgun, W. Processes and Techniques to Reduce Energy Cost. Taylor & Francis, Philadelphia, 2005.
- [6] Vutisirisat, C. and et al. Control of Water Steel Crucible Heated with Electric Arc Furnace. The 8th Conference of the E-NET, Mahasarakham, Thailand, 2-4 May, 2012.
- [7] Manoh Jangrajang and et al, Improvement of Water Heated Crucible Steel in Electric Arc Furnaces. *Journal of Energy Research*, 2012; 33-47.
- [8] Myers, R.H. and Montgomery, D.C. Response Surface Methodology: Process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [9] Sathyajith M.E. and et al. Wind energy fundamentals for resource and economics price cost analysis. 2006 International Conference on Power System Technology, Berlin, 2006; 348-362.



ขั้นตอนวิธีการไหลกำลังสำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีการพิจารณาอุณหภูมิสายส่ง

Power Flow Algorithm for Electric Power System Considering Transmission Line Temperature

วันวิสาข์ รื่นจิตต์¹ เชวศักดิ์ รักเป็นไทย^{1*} และ เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์²

Wanwisa Ruenjitt¹ Chawasak Rakpenthai^{1*} and Serm Sak Uatrongjit²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

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

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

*E-mail: chawasak@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีการไหลกำลังสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการพิจารณาการแปรผันอุณหภูมิตัวนำสายส่ง สมการได้ดุลความร้อนของตัวนำสายส่งบนพื้นฐานของสภาพอากาศแวดล้อมและกำลังสูญเสียของสายส่งถูกใช้เพื่อคำนวณอุณหภูมิของตัวนำสายส่ง โดยสมมติให้ข้อมูลสภาพอากาศ ได้แก่ อุณหภูมิโดยรอบ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ สามารถได้มาจากการวัดสภาพอากาศ ตัวแปรสถานะของปัญหาการไหลกำลังประกอบด้วยขนาดแรงดัน บัส มุมเฟส และอุณหภูมิสายส่ง ผลการจำลองบนระบบ IEEE ขนาด 14 บัสและ 118 บัส แสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีนำเสนอให้ผลลัพธ์แม่นยำมากกว่าผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีการไหลกำลังดั้งเดิม

ABSTRACT

This paper presents a power flow algorithm for electric power system considering the transmission line conductor's temperature variation. A heat balance equation of line conductor based on weather environment and power loss of line is used to calculate the transmission line temperature. It is assumed that the weather data, i.e. the ambient temperature, the wind speed, the wind direction and the solar radiation, are available from weather measurement. The bus voltage magnitudes, the phase angles, and the transmission line temperatures are the state variables of the power flow problem. Simulation results on the IEEE 14-bus and 118-bus systems indicate that the proposed algorithm provides more accurate results than that obtained by the conventional power flow algorithm.

1. บทนำ

การศึกษาการไหลกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังมักกำหนดให้อุณหภูมิของตัวนำสายส่งมีค่าคงที่ พารามิเตอร์สายส่งที่อุณหภูมิคงที่นั้นจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณการไหลกำลังซึ่งใช้กระบวนการของนิวตันราฟสัน (Newton

Raphson) [1] ในทางปฏิบัติตัวนำสายส่งจะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสภาพแวดล้อมรอบตัวนำและปริมาณกระแสที่ไหลผ่านตัวนำสายส่ง [2-4] การวิเคราะห์การไหลกำลังที่ใช้อุณหภูมิคงที่ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิจริงของตัวนำจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ไม่สอดคล้องกับสภาพ

จริงของระบบไฟฟ้ากำลัง กำลังผลิตที่ได้จากการวิเคราะห์ อาจจะเกินพอหรือไม่เพียงพอต่อความต้องการของภาระไฟฟ้า กำลังสูญเสียในสายส่งอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนไปมากจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง ส่งผลกระทบต่อการวางแผนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและปลอดภัย

บทความ [5] ได้นำเสนอวิธีการจำลองสายส่งที่พารามิเตอร์สายส่งขึ้นกับอุณหภูมิ และศึกษาความไวของแบบจำลองสายส่งต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมโดยใช้เทคนิคแบ่งสายส่งออกเป็นช่วงย่อยแล้วประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละส่วน เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิสายส่งในกรณีสายส่งมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้น การศึกษาได้จำลองระบบแล้วเปรียบเทียบการถ่ายโอนกำลังสูงสุดและการลดทอนแรงดันในสายส่งกรณีที่มีสายส่งเส้นเดียวกันมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการแบ่งช่วงย่อยและการประมาณอุณหภูมิเฉลี่ย และพบว่า ถ้าสายส่งเส้นเดียวกันมีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งเส้นแล้ว การคำนวณการไหลกำลังโดยใช้การแบ่งสายส่งออกเป็นช่วงย่อยจะสามารถเพิ่มความแม่นยำของผลการวิเคราะห์การไหลกำลังได้ดีกว่า

ในบทความ [6] ได้นำเสนอวิธีคำนวณการไหลกำลัง ซึ่งรวมการประมาณอุณหภูมิและความต้านทานของสายส่ง เข้ากับสมการการไหล อุณหภูมิของสายส่งจะถูกประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิสภาพแวดล้อมบวกกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกำลังสูญเสียในสาย การหาผลเฉลยสมการการไหลกำลังจะใช้วิธีนิวตันราฟสัน โดยอุณหภูมิสายส่งจะถูกเพิ่มเป็นตัวแปรในปัญหาการไหลกำลัง ในแต่ละรอบการวนซ้ำนั้นความต้านทานของสายส่งจะถูกปรับให้สอดคล้องกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ของสายส่ง แต่กำหนดให้รีแอกแตนซ์ของสายส่งมีค่าคงที่ ผลการจำลองได้เปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีดั้งเดิมซึ่งกำหนดให้สายส่งมีอุณหภูมิคงที่ และพบว่า วิธีนำเสนอจะช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานและกำลังสูญเสียที่ประมาณได้ของสายส่ง

บทความ [7] ได้นำเสนอการไหลกำลังเหมาะสมที่สุด (optimal power flow) ที่พิจารณาสภาพอากาศ

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีฟาร์มลม อุณหภูมิสายส่งจะเชื่อมโยงกับค่าความต้านทานและพิกัดสายพลวัต (dynamic line rating) ปัญหาการไหลกำลังที่เหมาะสมที่สุด มีรูปแบบเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไม่เชิงเส้นที่มีเงื่อนไขบังคับ ในการศึกษากำหนดให้ความต้านทานของสายส่งเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงค่าตามอุณหภูมิของตัวนำสายส่ง ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศจะกระทบต่อการจัดสรรพลังงานระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและฟาร์มลม วิธีการที่นำเสนอช่วยปรับปรุงความถูกต้องของการประเมินความต้านทานของสายส่ง และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแบบพลวัต ตลอดจนการจัดอันดับความร้อนที่จะเกิดขึ้นในสายส่งได้

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาอุณหภูมิตัวนำของสายส่งเป็นตัวแปรเพิ่ม ข้อมูลสภาพแวดล้อมรอบสายส่ง ได้แก่ อุณหภูมิสภาพอากาศ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ จะถูกพิจารณา ร่วมกับการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาการไหลกำลังพารามิเตอร์อนุกรมของสายส่ง (ความต้านทานและรีแอกแตนซ์) จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสายส่ง จากผลการศึกษาพบว่า วิธีนำเสนอสามารถให้ผลการคำนวณกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และกำลังสูญเสียของสายส่งซึ่งแม่นยำกว่าผลการคำนวณจากวิธีดั้งเดิม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พารามิเตอร์สายส่งที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

ปกติแล้วผู้ผลิตตัวนำของสายส่งจะให้ข้อมูลตัวนำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลตัวนำและข้อมูลการติดตั้งสายส่งบนเสาไฟฟ้าถูกนำไปใช้ในการคำนวณความต้านทานรีแอกแตนซ์ อนุกรม และคาปาซิแตนซ์ขนานของวงจรสมมูลสายส่ง ในทางปฏิบัติความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของสายส่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวนำสายส่ง เราสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของสายส่งและอุณหภูมิของตัวนำได้จาก [5]

$$R_l = R_0 (1 + \tau_r (T_c - T_0)) \quad (1)$$

โดยที่

T_c คือ อุณหภูมิของตัวนำ หน่วย องศาเซลเซียส

R_0 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T_0 หน่วย โอห์ม

R_l คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ T_c หน่วย โอห์ม

τ_r คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน หน่วยต่อองศาเซลเซียส

ความสัมพันธ์ระหว่างรีแอกแตนซ์ของสายส่งและอุณหภูมิของตัวนำสามารถคำนวณได้จาก [8]

$$X_l = X_0 (1 + \tau_x (T_c - T_0)) \quad (2)$$

โดยที่

X_0 คือ รีแอกแตนซ์ที่อุณหภูมิ T_0 หน่วย โอห์ม

X_l คือ รีแอกแตนซ์ที่อุณหภูมิ T_c หน่วย โอห์ม

τ_x คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของรีแอกแตนซ์ หน่วยต่อองศาเซลเซียส

จากสมการที่ (1) และ (2) จะเห็นได้ว่า ความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อสายส่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความต้านทานและรีแอกแตนซ์จะลดลงเมื่อสายส่งมีอุณหภูมิลดลง

แม้ว่าความสูงเฉลี่ยของสายส่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของตัวนำส่งผลให้ค่าปาริแดนซ์ของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าปาริแดนซ์จะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในที่นี้จะสมมติให้ค่าปาริแดนซ์ของสายส่งมีค่าคงที่

2.2 สมดุลทางความร้อนของตัวนำ

ขนาดกระแสที่ไหลผ่านสายส่งในสภาวะอยู่ตัวจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของตัวนำและสภาพแวดล้อมรอบตัวนำ ในการศึกษาจะใช้มาตรฐาน IEEE 738 [4] ในการคำนวณสมดุลทางความร้อนของตัวนำสายส่ง ดังนี้

$$I^2 R(T_c) = q_c + q_r - q_s \quad (3)$$

โดยที่

I คือ ค่าประสิทธิผลของกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ หน่วย แอมแปร์

$R(T_c)$ คือ ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำ หน่วย โอห์มต่อเมตร ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ T_c อุณหภูมิตัวนำ

q_c คือ อัตราสูญเสียการพาความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร

q_r คือ อัตราสูญเสียการแผ่รังสีความร้อน หน่วย วัตต์ต่อเมตร

q_s คือ อัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ หน่วย วัตต์ต่อเมตร

อัตราสูญเสียการพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยกลไกภายนอกจะบังคับของไหลให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็ง อัตราสูญเสียการพาความร้อนคำนวณได้ ดังนี้

$$q_c = \max([q_{c1}, q_{c2}, q_{cn}]) \quad (4)$$

ในที่นี้ q_{c1} , q_{c2} และ q_{cn} คือ อัตราสูญเสียการพาความร้อนของความเร็วลมต่ำ ความเร็วลมสูง และความเร็วลมหมุนเวียนธรรมชาติ ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$q_{c1} = 2T_{film} k_f K \left[1.01 + 0.372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] \quad (5)$$

$$q_{c2} = 2.0238 T_{film} k_f K \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \quad (6)$$

$$q_{cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (2T_{film})^{1.25} \quad (7)$$

$$K = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi) \quad (8)$$

$$\rho_f = \frac{1.293 - (1.525 \times 10^{-4}) H_e + (6.379 \times 10^{-9}) H_e}{1 + 0.003679 T_{film}} \quad (9)$$

$$T_{film} = \frac{T_c - T_a}{2} \quad (10)$$

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383.4} \quad (11)$$

$$k_f = 2.424 \times 10^{-2} + (7.477 \times 10^{-5}) T_{film} - (4.407 \times 10^{-9}) T_{film}^2 \quad (12)$$

โดยที่

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ หน่วย มิลลิเมตร

V_w คือ อัตราเร็วของการไหลเวียนอากาศรอบตัวนำ หน่วย เมตรต่อวินาที

T_c คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของตัวนำ หน่วย องศาเซลเซียส

T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม หน่วย องศาเซลเซียส

K คือ ปัจจัยทิศทางลม คำนวณจากสมการที่ (8)

ϕ คือ มุมระหว่างทิศทางลมและแกนของตัวนำ หน่วย องศา

μ_f คือ ความหนืดไดนามิกของอากาศ หน่วย ปาสกาล-วินาที

ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเมตร

k_f คือ การนำความร้อนของอากาศ ณ T_{film} หน่วย วัตต์ต่อ (เมตร-องศาเซลเซียส)

H_e คือ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของสายส่ง หน่วย เมตร

อัตราสูญเสียการแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนรอบตัวทุกทิศทางโดยไม่อาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน อัตราสูญเสียการแผ่รังสีความร้อน (หน่วยวัตต์ต่อเมตร) คำนวณได้จาก

$$q_r = 0.0178 D \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

โดยที่ ε คือ การแผ่รังสีความร้อน (0.23 ถึง 0.91)

อัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์

การแผ่รังสีดวงอาทิตย์จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นบนตัวนำของสายส่ง อัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ (หน่วยวัตต์ต่อเมตร) คำนวณได้จาก

$$q_s^{meas} = \alpha A Q_{solar} \sin(\theta) \quad (14)$$

โดยที่

α คือ การดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ (0.23 ถึง 0.91)

A คือ พื้นที่ฉายของตัวนำต่อหน่วยความยาว หน่วย ตารางเมตรต่อเมตร

θ คือ มุมประสิทธิภาพของรังสีดวงอาทิตย์ หน่วย องศา

Q_{solar} คือ การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ หน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร

3. วิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์การไหลกำลังที่พิจารณาอุณหภูมิของตัวนำสายส่งให้เป็นตัวแปรที่ต้องประมาณค่าด้วย ข้อมูลสภาพแวดล้อมรอบสายส่งอาจจะได้มาจากสถานีวัดสภาพอากาศบริเวณใกล้กับสายส่งหรือจากการทำนายล่วงหน้า รูปที่ 1 แสดงผังงานอย่างง่ายของขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลกำลังที่นำเสนอ สังเกตว่าจะมี 2 ขั้นตอนหลัก คือ (1) การคำนวณการไหลกำลัง และ (2) การปรับอุณหภูมิตัวนำสายส่งแต่ละเส้นโดยใช้เงื่อนไขสมดุลทางความร้อน

แรกเริ่มจะสมมติให้ตัวนำมีอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส แล้วคำนวณการไหลกำลังด้วยวิธีการนิวตันราฟสัน ซึ่งเป็นการหาแรงดันบัสที่จะทำให้สมการที่ (15) เท่ากับศูนย์ แล้วใช้พารามิเตอร์โครงข่ายร่วมกับแรงดันบัสที่ประมาณได้เพื่อคำนวณหาการไหลกำลังในระบบ [1]

$$g(x) = \begin{bmatrix} P(x) - P_{sch} \\ Q(x) - Q_{sch} \end{bmatrix} \quad (15)$$

โดยที่

x คือ ตัวแปรที่จะประมาณค่า ได้แก่ มุมเฟสและขนาดแรงดันแต่ละบัส ยกเว้นมุมเฟสของบัสอ้างอิง

P_{sch} และ Q_{sch} คือ กำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟที่ฉีดเข้าบัส ตามลำดับ

$P(x)$ และ $Q(x)$ คือ ฟังก์ชันหาค่ากำลังจริงและกำลังรีแอทีฟที่พิกัดเข้าบัส ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้โดยใช้พารามิเตอร์โครงข่ายและ x

ผลเฉลยการไหลกำลังด้วยวิธีการนิวตันราฟสันจะได้อาจมาจากการวนซ้ำสมการที่ (16) และ (17) จนกระทั่ง $\|g(x^k)\|$ น้อยกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้

$$\Delta x = -G^{-1} g(x^k) \quad (16)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (17)$$

โดยที่

ด้วย k คือ รอบการวนซ้ำ k

G คือ เมทริกซ์จาโคเบียนของ $g(x^k)$

ค่าผลเฉลย x ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะถูกนำไปคำนวณกำลังไฟฟ้าและกำลังสูญเสียในสายส่ง ค่ากำลังสูญเสียต่อหน่วยความยาว ($P_{loss} = I^2 R(T_c)$) ของสายส่งแต่ละเส้น และข้อมูลสภาพอากาศรอบสายส่งแต่ละเส้น (อุณหภูมิ สภาพอากาศ ความเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์) จะถูกนำไปคำนวณอัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ หรือ q_s^{cal} ดังนี้

$$q_s^{cal} = q_c + q_r - I^2 R(T_c) \quad (18)$$

สังเกตว่า q_c และ q_r ในสมการที่ (18) จะได้มาจากการคำนวณในสมการที่ (4) และ (13)

การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ Q_{solar}^{meas} ซึ่งได้จากการวัดจะถูกใช้เพื่อคำนวณอัตราขยายความร้อนจากดวงอาทิตย์ หรือ q_s^{meas} ดังนี้

$$q_s^{meas} = \alpha A Q_{solar}^{meas} \sin(\theta) \quad (19)$$

เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของตัวนำ วิธีการที่นำเสนอจะใช้ผลต่าง $\Delta q = q_s^{meas} - q_s^{cal} = f(T_c)$ มาเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ของการหาผลเฉลยด้วยวิธีการนิวตัน เพื่อหา T_c ที่จะทำให้ $f(T_c)$ มีขนาดเข้าใกล้ศูนย์ โดยจะถือว่าค่า x คงที่ ค่าอุณหภูมิใหม่ที่ประมาณได้จะถูกนำไปใช้คำนวณพารามิเตอร์อนุกรม (ความต้านทานและรีแอ

แตนซ์) ของสายส่งแล้วคำนวณการไหลกำลังด้วยวิธีการนิวตันราฟสันอีกครั้ง การวนซ้ำทั้ง 2 ขั้นตอนจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิของตัวนำสายส่งที่ประมาณได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (ในที่นี้ใช้เงื่อนไข $\|\Delta T_c\| < 10^{-3}$)

สำหรับผลเฉลยรวมที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลกำลังที่นำเสนอจะเป็นแรงดันบัส มุมเฟส และอุณหภูมิของสายส่งแต่ละเส้น ผลเฉลยจะถูกนำไปใช้คำนวณกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การไหลกำลัง การไหลกระแสและกำลังสูญเสียในโครงข่ายของระบบ

4. ผลการจำลอง

โปรแกรมวิเคราะห์การไหลกำลังตามวิธีที่นำเสนอได้รับการพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB การทดสอบทั้งหมดดำเนินการบนคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลางชนิด Intel® Core™ i5 2.27 GHz และหน่วยความจำขนาด 6 GB การทดสอบใช้ระบบ IEEE ขนาด 14 บัส และ 118 บัส ที่ถูกปรับแต่งโดยสมมติสภาพแวดล้อมรอบ ๆ สายส่ง และอุณหภูมิตัวนำสายส่งแต่ละเส้น ข้อมูลสภาพแวดล้อมมีการป้อนสัญญาณรบกวนที่สัมพันธ์กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด กำหนดให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดอุณหภูมิ อัตราเร็วลม ทิศทางลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ เป็นร้อยละ 5, 5, 10 และ 5 ของค่าที่วัดได้ตามลำดับ และให้ทั้ง τ_r และ τ_x มีค่าเป็น 0.0039 ต่อองศาเซลเซียส ค่าจริงของการไหลกำลังได้มาจากการวิเคราะห์โดยใช้พารามิเตอร์อนุกรมของสายส่งซึ่งคำนวณอุณหภูมิตัวนำแต่ละเส้น

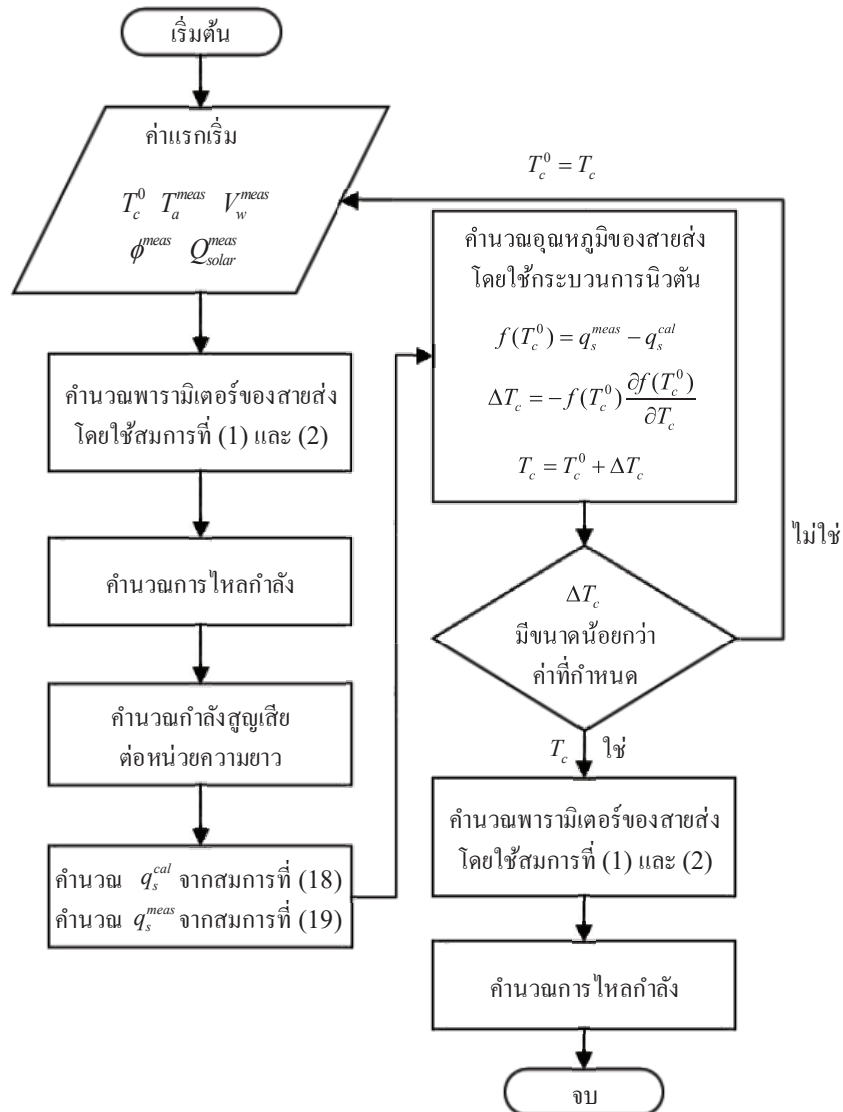
การทดสอบจะเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์การไหลกำลัง 2 วิธี ดังนี้

วิธีดั้งเดิม: ตัวนำสายส่งแต่ละเส้นมีอุณหภูมิกงที่เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

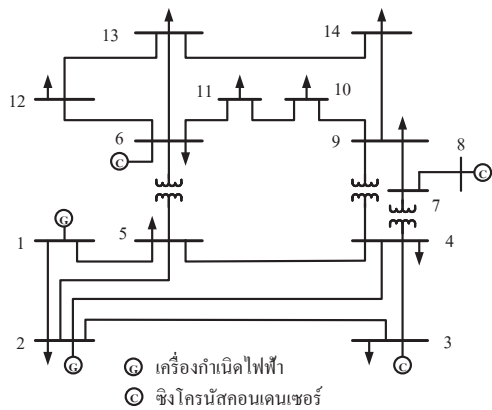
วิธีนำเสนอ: ตัวนำสายส่งแต่ละเส้นมีอุณหภูมิขึ้นอยู่กับกำลังสูญเสียในสายส่งและสภาพแวดล้อมโดยรอบ

4.1 ระบบ IEEE ขนาด 14 บัส

ในรูปที่ 2 แสดงแผนภาพเส้นเคี้ยวของระบบทดสอบ IEEE ขนาด 14 บัส กำลังผลิตและความผิดพลาดของกำลังผลิตที่คำนวณได้แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณการไหลกำลังที่นำเสนอ



รูปที่ 2 ระบบทดสอบ IEEE ขนาด 14 บัส

ตารางที่ 1 กำลังผลิตที่คำนวณได้

บัส	วิธีดั้งเดิม		วิธีนำเสนอ	
	P	Q	P	Q
1	232.39	-16.89	233.99	-19.50
2	40.00	42.40	40.00	45.39
3		23.40		26.76
6		12.24		13.43
8		17.36		18.01

หมายเหตุ P คือ กำลังจริง หน่วย เมกกะวัตต์

Q คือ กำลังรีแอกทีฟ หน่วย เมกกะวาร์

ตารางที่ 2 ความผิดพลาดของกำลังผลิตที่คำนวณได้

บัส	วิธีดั้งเดิม		วิธีนำเสนอ	
	P	Q	P	Q
1	1.531	-2.525	-0.072	0.084
2	0.000	2.941	0.000	-0.050
3		3.180		-0.189
6		1.123		-0.062
8		0.637		-0.031

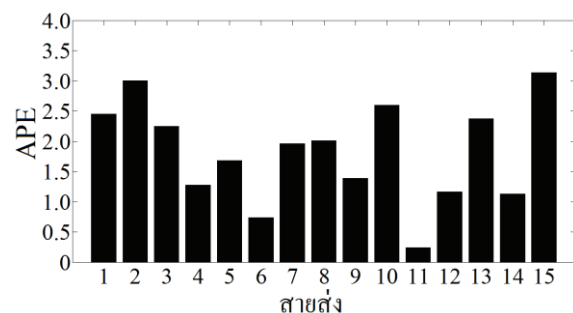
นอกจากนี้วิธีนำเสนอยังสามารถประมาณค่าอุณหภูมิตัวนำของสายส่งแต่ละเส้น โดยมีค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (Absolute of Percentage Error: APE) ของอุณหภูมิตัวนำของสายส่งแสดงดังในรูปที่ 3 สังเกตว่า สำหรับระบบ 14 บัส ซึ่งมีสายส่ง 15 เส้น ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ได้ภายใต้สภาวะการ

จำลองจะไม่เกิน 3.5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้จากการจำลองยังพบว่า ถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลวัดสภาพแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ประมาณได้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งของระบบ 14 บัส ซึ่งได้จากวิธีดั้งเดิมและวิธีที่นำเสนอ แสดงดังในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอสามารถให้การประมาณกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งแต่ละเส้นได้แม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม กำลังสูญเสียที่ได้จากวิธีนำเสนอมีความผิดพลาดไม่เกิน 1.0 เปอร์เซ็นต์ และความผิดพลาดของขนาดกระแสสายส่งไม่เกิน 0.4 เปอร์เซ็นต์ ขนาดกระแสที่ไหลในสายส่งมีความสำคัญต่อการประเมินความจุทางความร้อนของสายส่งแต่ละเส้น เพื่อให้การไหลกำลังในสายส่งแต่ละเส้นยังคงอยู่ภายใต้เงื่อนไขความปลอดภัยในการใช้งานสายส่ง

4.2 ระบบ IEEE ขนาด 118 บัส

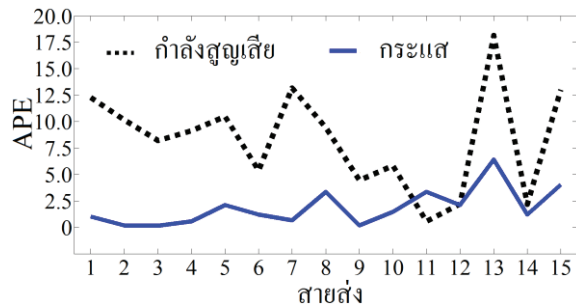
ระบบ 118 บัสมีสายส่ง 170 เส้น ในรูปที่ 6 แสดงค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุณหภูมิสายส่งในระบบ 118 บัส สังเกตว่า ความผิดพลาดของอุณหภูมิที่คำนวณได้จะไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์



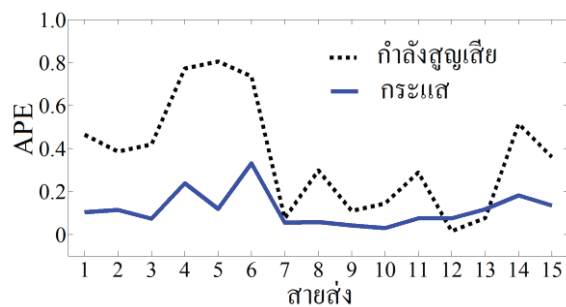
รูปที่ 3 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุณหภูมิสายส่งในระบบ 14 บัส

ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งของระบบ 118 บัส ซึ่งได้จากวิธีดั้งเดิมและวิธีนำเสนอ แสดงดังในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า วิธีนำเสนอสามารถประมาณกำลัง

สูญเสียและขนาดกระแสที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้นได้อย่างแม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม ในกรณีระบบ 118 บัส วิธีนำเสนอมีความผิดพลาดของกำลังสูญเสียและขนาดกระแสไม่เกิน 5.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



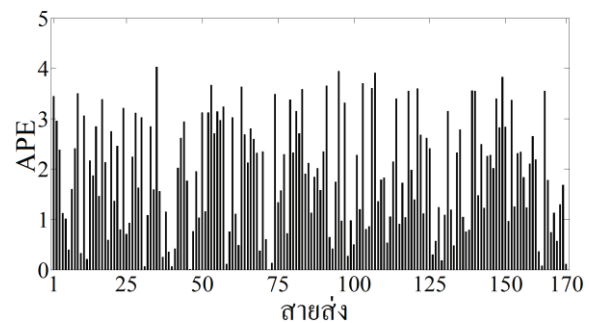
รูปที่ 4 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 14 บัส จากวิธีดั้งเดิม



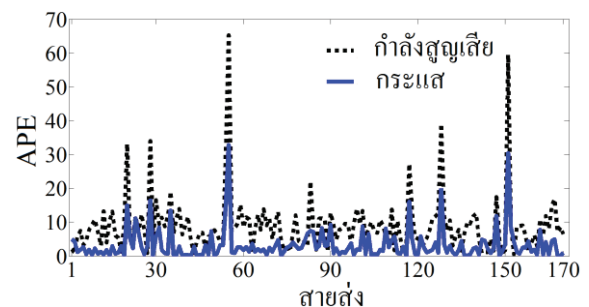
รูปที่ 5 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 14 บัส จากวิธีนำเสนอ

เมื่อพิจารณาเวลาเฉลี่ยในการคำนวณการไหลกำลังพบว่า วิธีดั้งเดิมใช้เวลาเฉลี่ยสำหรับระบบ 14 บัส และ 118 บัส เป็น 0.06 วินาที และ 0.16 วินาที ตามลำดับ ขณะที่ขั้นตอนวิธีนำเสนอใช้เวลาเฉลี่ยสำหรับระบบ 14 บัส และ 118 บัส เป็น 0.12 วินาที และ 0.19 วินาที ตามลำดับ สังเกตว่า ในระบบขนาดเล็กนั้นขั้นตอนวิธีนำเสนอต้องการเวลาในการคำนวณน้อยกว่าวิธีดั้งเดิมอย่างชัดเจน แต่สำหรับระบบขนาดใหญ่ที่ขั้นตอนวิธีนำเสนอต้องการเวลาในการคำนวณใกล้เคียงกับวิธีดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม วิธีที่นำเสนอสามารถให้ผลการวิเคราะห์การ

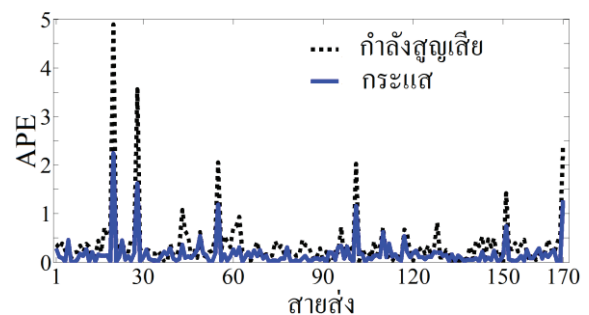
ไหลกำลังที่มีความแม่นยำสูงกว่า เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลกำลังจะถูกใช้สำหรับการวางแผนในการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้น ความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์จะมีความสำคัญมากกว่าความเร็วในการประมวลผล



รูปที่ 6 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของอุณหภูมิสายส่งในระบบ 118 บัส



รูปที่ 7 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 118 บัส จากวิธีดั้งเดิม



รูปที่ 8 ค่าสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระบบ 118 บัส จากวิธีนำเสนอ

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การไหลกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาอุณหภูมิตัวนำสายส่งเป็นตัวแปรเพิ่ม และใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมรอบสายส่งมาช่วยในการประมาณค่าอุณหภูมิตัวนำ การศึกษาได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การไหลกำลังระหว่างขั้นตอนวิธีที่มีการพิจารณาอุณหภูมิสายส่งและขั้นตอนวิธีดั้งเดิมที่กำหนดอุณหภูมิสายส่งคงที่

ผลการจำลองบนระบบทดสอบ IEEE ขนาด 14 บัส และ 118 บัส แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์การไหลกำลังที่พิจารณาอุณหภูมิตัวนำสามารถให้การประมาณกำลังสูญเสียและขนาดกระแสในสายส่งแต่ละเส้นได้

แม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม นอกจากนี้ กำลังผลิตที่คำนวณได้ก็มีความผิดพลาดต่ำกว่า ดังนั้น หากนำข้อมูลกำลังผลิตที่ได้ไปใช้สำหรับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ กำลังที่โหลดได้รับก็ควรจะมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่ได้วางแผนไว้มากกว่าการใช้ผลการวิเคราะห์จากวิธีดั้งเดิม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยพะเยา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RSA5780064 คณะผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Glover, J., Sarma, S., and Overbye, T. Power System Analysis and Design, 5th edition, Cengage Learning, USA, 2011.
- [2] Callahan, P. M., and Douglass, D. A. An experimental evaluation of a thermal line uprating by conductor temperature and weather monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988; 3(4): 1960-1967.
- [3] Douglass, D. A., and Edris, A. A. Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996; 11(3): 1407-1418.
- [4] IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors. IEEE Std. 738-2006, 2007.
- [5] Cecchi, V., Leger, A. St., Miu, K., and Nwankpa, C. Incorporating temperature variations into transmission line models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011; 26(4): 2189-2196.
- [6] Frank, S., Sexauer, J., and Mohagheghi, S. Temperature-dependent power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013; 28(4): 4007-4018.
- [7] Cao, J., Du, W., and Wang, H. F. Weather-based optimal power flow with wind farms integration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016; 31(4): 3073-3081.
- [8] Leger, A. St., and Nwankpa, C. OTA-based transmission line model with variable parameters for analog power flow computation. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2010; 38(2): 199-220.



อุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังอัตโนมัติขนาดเล็ก สำหรับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อย Automatic mini power factor compensation controller for load center

บุญธง วสุรีย์^{1*} และ อานนท์ อิศรมงคลรักษ์²

Boonthong Wasuri^{1*} and Arnon Isaramongkolrak²

¹สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

85 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

*wasuribt@gmail.com, Tel : 08-1493-4971, Fax: 034-261-060, 034-261-065

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอหลักการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังโดยอาศัยการทำงานด้วยโซลิดสเตต รีเลย์ (solid state relay : SSR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตัดต่อที่มีราคาประหยัด และอาศัยการรับสัญญาณด้วยระบบไร้สาย (wireless) เพื่อควบคุมให้ SSR ทำงาน โดยการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังนี้จะมีระดับการทำงานเป็น 4 ระดับคือ 0.145kvar, 0.290kvar, 0.436kvar และ 0.580kvar อีกทั้งได้ประเมินการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังนี้โดยต่อทำงานร่วมกับโหลดที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าสามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังได้จริงโดยมีค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 22 และได้ทดสอบการทำงานเมื่ออาศัยหลักการควบคุมผ่านระบบไร้สายโดยการต่อร่วมกับศูนย์ควบคุมการไฟฟ้าย่อย จะเห็นได้ว่า การทำงานของอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังนี้สามารถชดเชยค่าตัวประกอบกำลังได้จริงและมีความแม่นยำในการส่งสัญญาณ ซึ่งสามารถนำไปเป็นต้นแบบเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่มีขนาดใหญ่ให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติได้

ABSTRACT

This paper presents the operating principle of the automatic power factor compensation controller (APFCC) by using solid state relay (SSR) which is inexpensive device and allows wireless control. For the APFCC, there are 4 levels of operation including 0.145kvar 0.290kvar 0.436kvar and 0.580kvar. In addition, the APFCC has been evaluated by supplying the different loads. In conclusion, it is clear that the power factor has been 22 percent increase in compensation. Furthermore, the wireless control testing has been executed within load panel center. It is found that the APFCC can compensate the power factor of system with reliability and be able to carry out pilot-scale test to large-scale system eventually

1. บทนำ

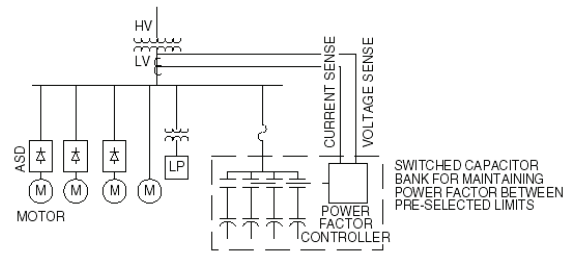
กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าประกอบไปด้วย 3 ชนิด คือ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน และกำลังไฟฟ้าปรากฏ โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริงจะมีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

ต่อการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเครื่องจักรกลไฟฟ้า เนื่องจากเป็นกำลังงานที่เครื่องจักรอุปกรณ์จะนำไปใช้งานจริง [1] เมื่อจำนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลต่อขนาดของ

กำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของโหลด ทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความสูญเสียมากขึ้น ระบบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏนั้นคือมีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 1.0 จะถือว่าระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากที่สุดในการส่งกำลังไฟฟ้าไปยังผู้ใช้งาน [2] ดังนั้นบทความนี้จะได้สังเกตเห็นความสำคัญของค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า โดยได้จัดสร้างอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังเพื่อใช้ในระบบไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบอัตโนมัติด้วยด้วยโซลิตสแตตริสส์ (SSR) ที่มีระดับการชดเชย 4 ระดับ พร้อมทั้งได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เมื่อใช้งานร่วมกับโหลดทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือ มอเตอร์ขนาด 0.5Hp ส่วนไฟฟ้าขนาด 400W และ เต้าอินฟาเรด ขนาด 1,000W อีกทั้งได้ประยุกต์ใช้ระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ การส่งสัญญาณด้วยระบบไร้สาย และระบบฝังตัวมาเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และได้ออกแบบให้ระบบการทำงานมีความง่ายไม่ซับซ้อน มีความสะดวกสบายสามารถนำไปใช้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2. ตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า

ในระบบจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor : PF) มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง แต่มีหลายครั้งที่ผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งผู้ออกแบบระบบหรือผู้รับผิดชอบในการจ่ายไฟฟ้าอาจไม่ให้ความสำคัญมากนัก โดยทั่วไปผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้กำลังงานมากกว่า 30kW จำเป็นต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (reactive power) เสมอ [3] ทั้งนี้เพื่อรักษาคุณภาพของกำลังไฟฟ้าจะต้องทำการปรับค่าตัวประกอบกำลังให้เป็นไปตามนโยบายของการไฟฟ้าที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 0.85 [4] การแก้ไขปัญหาจากตัวประกอบกำลัง สามารถทำได้โดยการต่ออุปกรณ์สำหรับแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (power factor) เช่น การต่อคาปาซิเตอร์ (capacitor bank) หรือซิงโครนัสมอเตอร์ (synchronous motor) ขนานเข้าไปในระบบไฟฟ้า [3] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแก้ปัญหาตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยการต่อขนานตัวเก็บประจุเข้ากับระบบไฟฟ้า

3. การคำนวณค่าความจุไฟฟ้า

บทความนี้ได้ดำเนินการออกแบบเพื่อจัดสร้างอุปกรณ์สำหรับชดเชยค่าตัวประกอบกำลังโดยกำหนดไว้ที่ 0.95 เมื่อพิจารณาโหลดสูงสุด 1,000VA สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่สามารถจ่ายได้ดังสมการที่ 1 และ คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนได้ดังสมการที่ 2 [5]

$$P = \sqrt{3}VI \cos \theta \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{3}VI \sin \theta \quad (2)$$

จะมีค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดเท่ากับ 949.81W และ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเป็น 312.83var ซึ่งการติดตั้งใช้งานคาปาซิเตอร์ควรจะต้องใส่โหลดชนิดอินดักทีฟให้มากที่สุดเพื่อลดกระแสไฟฟ้าและความสูญเสีย ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าคาปาซิเตอร์ได้ดังสมการที่ 3 [5]

$$Q_c = \frac{|V_i|^2}{X_c} \quad (3)$$

เมื่อ Q_c คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการชดเชย (var)

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีค่าเป็น 220V

X_c คือ รีแอกแตนซ์เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้า (Ω)

แทนค่าในสมการที่ (3) จะได้ค่ารีแอกแตนซ์เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าเป็น 155 Ω และจะได้ค่าคาปาซิเตอร์เป็น 20.60 μF จากข้อมูลการออกแบบได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ให้สามารถปรับได้เป็น 4 ระดับ

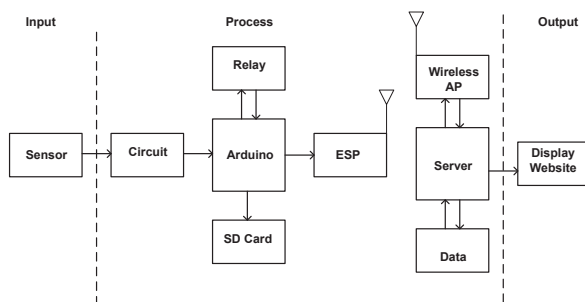
ที่มากที่สุดที่ไม่เกินขีดจำกัดของพอร์ตเอาต์พุตของชุดคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง

ขั้นที่	ความถี่ (Hz)	คาปาซิแตนซ์ (μF)	กระแสไฟฟ้า (A)
1	50	9.9	0.66
2	50	20.60	1.32
3	50	29.70	1.98
4	50	33.00	2.20

4. การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน

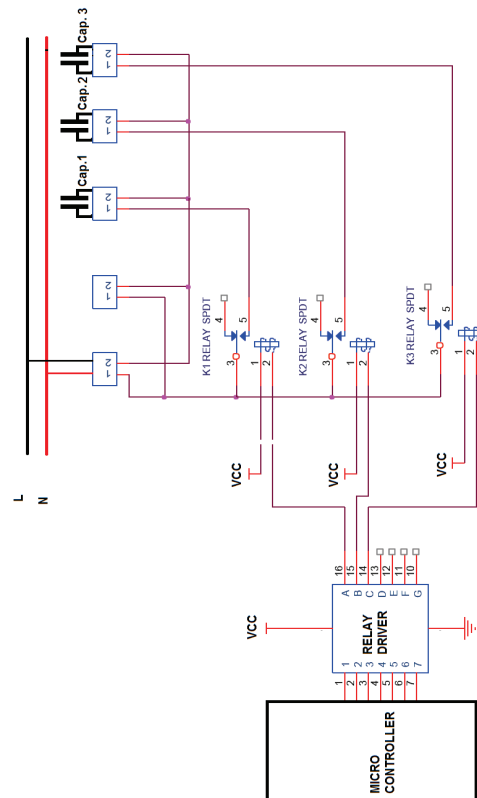
บทความนี้ได้อาศัยการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รับสัญญาณเข้าผ่านระบบไร้สาย (wireless) [6] ซึ่งแผนภาพการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 2



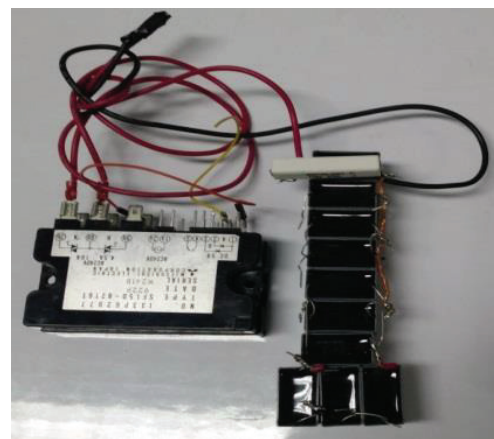
รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมของอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง

โดยการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังนั้นอาศัยการติดต่อตัวเก็บประจุด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3

สำหรับตัวควบคุมกำลังนั้นบทความนี้อาศัยการทำงานของ SSR เชื่อมต่อกับวงจรที่ได้ออกแบบ เนื่องจากมีค่าการทนแรงดันสูงกว่ารีเลย์มีวงจรสับเบอร์และไม่ใช่เป็นการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 4

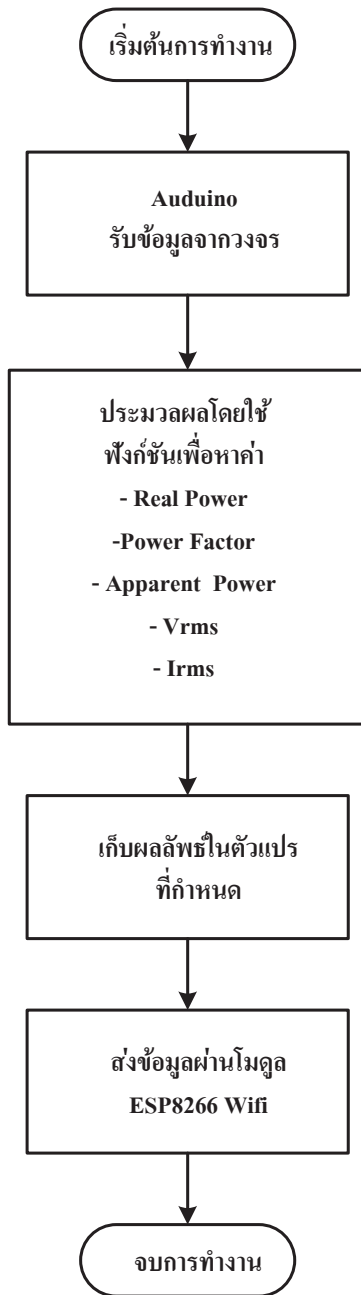


รูปที่ 3 การทำงานของตัวเก็บประจุควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4 โซลิตสเตทรีเลย์เพื่อใช้ตัดต่ออุปกรณ์กำลัง

จากการออกแบบสามารถเขียนแผนภาพการทำงานโดยรวมของอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังและระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ชุดเซชตัวประกอบกำลังและระบบควบคุมการทำงาน

5. ผลการทดสอบ

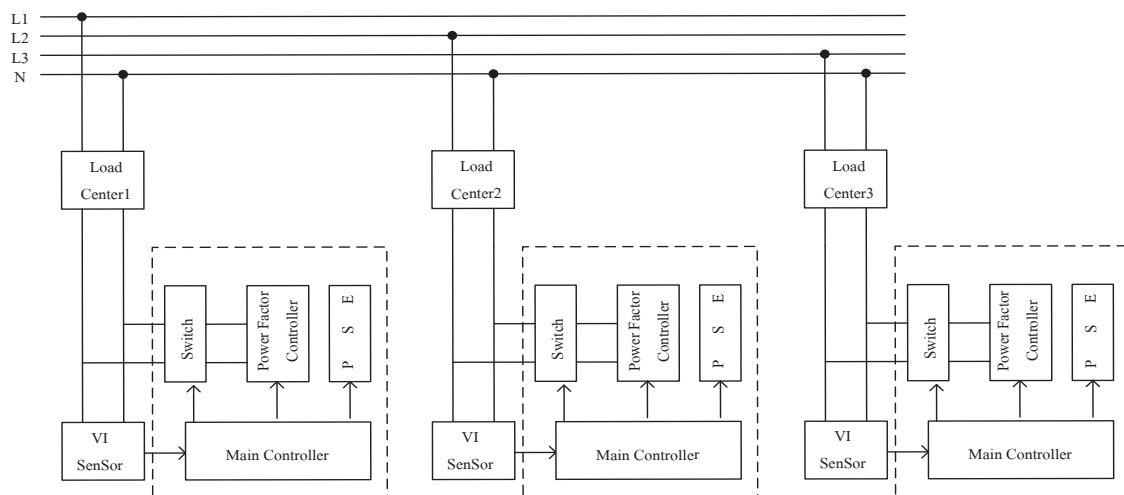
บทความนี้ได้ทำการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ชุดเซชกำลังไฟฟ้าโดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ พิจารณาประสิทธิภาพของอุปกรณ์นี้ด้วยการต่อร่วมกับภาระงานทางไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการซึ่งประกอบด้วย

มอเตอร์ขนาด 0.5Hp ส่วนไฟฟ้าขนาด 400W และเตาอบอินฟราเรดขนาด 1000W โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบคือ แรงดันที่จ่ายให้กับโหลด 220V 50Hz และจะทำการทดสอบแยกส่วนของโหลดเพื่อให้เห็นถึงการทำงานของอุปกรณ์ชุดเซชตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการทดสอบของโหลดเตาอบอินฟราเรด และผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ชุดเซชตัวประกอบกำลังเมื่อต่อร่วมกับภาระทางไฟฟ้า

เมื่อต่ออุปกรณ์นี้ทำงานร่วมกับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยใน 3 ขนาด คือ ศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยที่ 1 ใช้ควบคุมห้องบรรยายขนาดใหญ่ที่มีโหลดทางไฟฟ้าประกอบไปด้วยเครื่องปรับอากาศ 2 เครื่อง เครื่องฉาย หลอดไฟแสงสว่างจำนวน 48 หลอด จอรับภาพ และโทรทัศน์ขนาด 42 นิ้ว ส่วนศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยที่ 2 ใช้ควบคุมห้องบรรยายขนาดเล็กที่มี โหลดทางไฟฟ้าประกอบไปด้วยเครื่องปรับอากาศ 1 เครื่อง เครื่องฉาย และหลอดไฟแสงสว่างจำนวน 24 หลอด และศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยที่ 3 ใช้ควบคุมห้องสำนักงานที่มีโหลดทางไฟฟ้าประกอบไปด้วยเครื่องปรับอากาศ 2 เครื่อง เครื่องคอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง เครื่องพิมพ์ 3 เครื่อง และหลอดไฟแสงสว่างจำนวน 36 หลอด แสดงแผนภาพการต่อดังรูปที่ 7 และผลการทดสอบเมื่อต่อใช้งานจริงร่วมกับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยแสดงได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 7 การต่ออุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังร่วมกับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อย

ตารางที่ 2 ผลการทดลองการทำงานของอุปกรณ์เมื่อทำงานร่วมกับโหลดที่แตกต่างกัน

โหลด	ครั้งที่	ก่อนการชดเชย						หลังการชดเชย					
		V (V)	I(A)	PF	P (W)	Q(var)	S(VA)	V (V)	I(A)	PF	P (W)	Q(var)	S(VA)
มอเตอร์ 0.5 Hp	1	219.57	1.20	0.63	165.99	164.31	263.48	221.53	0.87	0.94	181.17	105.31	192.73
	2	220.35	1.35	0.67	199.31	168.68	297.47	222.64	0.81	0.93	167.71	146.50	180.34
สว่านไฟฟ้า 400 W	1	220.15	1.48	0.71	231.33	314.87	325.82	221.22	0.91	0.92	185.21	109.04	201.31
	2	222.52	1.50	0.73	243.66	268.72	333.78	224.42	0.84	0.91	171.55	141.87	188.51
เตาอบอินฟราเรด	1	222.85	2.13	0.69	327.52	396.40	474.67	223.01	1.45	0.82	265.16	208.46	323.36
	2	224.25	2.24	0.69	346.60	419.49	502.32	224.52	1.52	0.83	283.25	266.26	341.27

จากผลการทดลองในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังก่อนการชดเชยของโหลดทั้ง 3 ชนิดจะเห็นว่า ค่าตัวประกอบกำลังจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.69 แต่เมื่อได้ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังขนาดเล็กเข้ากับระบบจะทำให้ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบกำลังทั้ง 3 โหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นคิดเป็น 0.89 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 22.47 ซึ่งการชดเชยตัวประกอบกำลังของโหลดทั้ง 3 กรณีมีค่าของกำลังไฟฟ้าเสมือนสูงสุดที่ 419.49var ซึ่งอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังนี้สามารถชดเชยได้สูงสุด 580var ซึ่งเป็นระดับที่มากที่สุด

และเมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและกำลังไฟฟ้าจริงก่อนการชดเชยจะเห็นว่า มีค่าผลต่างที่แตกต่างกัน และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีค่าสูง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่ามาก และเมื่อได้ติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเข้ากับระบบจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและกำลังไฟฟ้าจริงมีผลต่างที่น้อยลงและมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าน้อยลง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่าน้อยลงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการทำงานของอุปกรณ์เมื่อต่อร่วมกับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อย (load panel/load center)

Load Panel	ครั้งที่	ก่อนการชดเชย						หลังการชดเชย					
		V (V)	I (A)	PF	P (W)	Q(var)	S(VA)	V (V)	I(A)	PF	P (W)	Q(var)	S (VA)
1	1	225.60	8.20	0.63	1165.45	1153.65	1849.92	226.44	7.50	0.74	1256.74	592.61	1698.30
	2	227.50	10.35	0.67	1577.60	1335.17	2354.63	228.44	9.45	0.69	1489.54	1802.79	2158.76
2	1	224.35	5.84	0.71	930.24	1266.17	1310.20	225.32	4.91	0.79	873.99	980.04	1106.32
	2	224.40	7.25	0.73	1187.64	1309.81	1626.90	225.44	5.84	0.79	1040.09	1166.29	1316.57
3	1	223.25	7.66	0.69	1179.97	1428.11	1710.10	224.51	4.50	0.71	717.31	976.34	1010.30
	2	223.52	6.54	0.69	1008.66	1220.78	1461.82	224.48	5.52	0.72	892.17	1233.69	1239.13

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังที่ต่อร่วมกับศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยจะเห็นได้ว่าเมื่อยังไม่มีการต่ออุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังเฉลี่ยของศูนย์ควบคุมไฟฟ้าย่อยมีค่าเป็น 0.69 และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังจะทำให้ค่าตัวประกอบกำลังเพิ่มขึ้นเป็น 0.74 แต่ทั้งนี้เนื่องจากขีดความสามารถของระดับการชดเชยซึ่งสามารถชดเชยได้มากที่สุดเพียง 4 ระดับทำให้อุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังชดเชยได้คิดเป็นร้อยละ 6.75 เท่านั้น

6. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยตัวประกอบกำลังเมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบกำลังก่อนชดเชยและหลังการชดเชยจะเห็นว่า มีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้ง 3 กรณีที่มีโหลดแตกต่างกันเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 22 อีกทั้งเมื่อพิจารณาการทำงานของระบบควบคุมที่อาศัยการส่งสัญญาณผ่านระบบไร้สาย เพื่อตัดต่อระบบและอุปกรณ์ชดเชยค่าตัวประกอบกำลังด้วย SSR จะเห็นได้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพซึ่งมีราคาต้นทุนในการผลิตที่ถูก เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในบริเวณที่มีโหลดทางไฟฟ้าไม่สูงมาก เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Glover, J. D. and Mulukatla, S. S. Power System Analysis and Design. 3rd edition, Brook and Cole, USA, 2001.
- [2] Mohan, N., Undeland, T. M. and Robbins, W. P. Power Electronics. 2nd edition, John Willey and Sons INC, USA, 1995.
- [3] Grainger, J.J., William, D. and Stevenson, J.R. Power System Analysis. Mc Graw Hill, Singapore, 1994.
- [4] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ 2542. วารสารนโยบายพลังงาน, 2542: 46 [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www2.eppo.go.th/vrs/VRS46-05-PF.html>
- [5] ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์. เอกสารประกอบการสอน การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2550.
- [6] Ferreira, H.C., Lampe, L., Newbury, J. and Swart, T. G. Power Line Communications Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines. Willey and Sons INC, USA, 2011.



การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางสำหรับการวางแผนการผลิต/สินค้าคงคลัง ที่มีปริมาณความต้องการไม่แน่นอน แบบมีเงื่อนไขการผลิต

Benders Decomposition combining with a special purpose method for production/inventory planning having uncertain demand under production constraints

อภิศักดิ์ วิทยาประภากร^{1*} และ พีรยุทธ์ ชาญเศรษฐิกุล²

Aphisak Wittayapraphakorn^{1*} and Peerayuth Charnsethikul²

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

* Kasetsart University, 50 Ngam Wong Wan Road, Ladyao, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

* E-mail:¹ aphisak.wi@up.ac.th, E-mail:² fengprc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์วิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์กับปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแบบมีเงื่อนไขในการผลิต โดยประยุกต์ออกเป็น 2 วิธีเรียกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน และวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน จากผลการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นพบว่า ทั้ง 2 วิธีสามารถหาคำตอบมีคุณภาพไม่ต่างจากวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นเมื่อทดสอบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดย วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนมีค่าตอบแตกต่างจากขอบเขตล่างเฉลี่ย 0.0475% ในขณะที่วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนและวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีค่าเฉลี่ย 0.0495% และ 0.0556% ตามลำดับ ในส่วนของเวลาประมวลผลกรณีปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน จะใช้เวลาน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน แต่กรณีปัญหาที่มีขนาดใหญ่วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนจะใช้เวลาน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน ในขณะที่วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นไม่สามารถหาคำตอบได้ถ้าปัญหาที่มีขนาดที่ใหญ่เกินไป

คำสำคัญ: กำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่ม, การวางแผนการผลิตภายใต้ความต้องการไม่แน่นอน, ปัญหากำหนดการเชิงเส้นขนาดใหญ่, วิธีการแบ่งส่วนของเบนเดอร์

ABSTRACT

This article aims to present how to apply Benders Decomposition to the problem of production planning having uncertain demand within a finite horizon under production constraints that the application is divided into 2 methods called “Single Step Bender” and “Bi Step Bender”. According to the experimental results comparing with the result of Integer programming, it is found that both methods can cause the quality results not being different from the result performed by Integer programming with the statistic significant level 0.05. For this experiment, Bender 1 Step leads to the different result from lower bound with the average value 0.0475%, but Bender 2 Step and Integer programming have the average value 0.0495% and 0.0556% respectively. In part of processing time, if it is not a big problem,

Bender 2 Step will use time lower than Bender 1 Step. On the other hand, if it is a big problem, Bender 1 Step will use time lower than Bender 2 Step. Moreover, Integer programming cannot provide the answer in case of too big problem.

Keywords: Stochastic linear programming, Production planning under the uncertain demand, Large-scale linear programming problems, Benders Decomposition.

1. บทนำ

โดยทั่วไปการผลิตสินค้าสำหรับผู้ผลิตต้องการทราบคือ ควรผลิตสินค้าจำนวนเท่าใดจึงใช้ต้นทุนน้อยที่สุด ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้หากต้องการหาคำตอบด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) จะต้องแบ่งต้นทุนออกเป็น 3 ส่วนคือต้นทุนการผลิต ต้นทุนสินค้าคงคลังและต้นทุนค่าเสียโอกาส พร้อมทั้งกำหนดค่าความต้องการของลูกค้าเป็นค่าคงที่ จากนั้นจึงสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์แล้วหาคำตอบด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) แต่ในความจริงความต้องการของลูกค้าจะเป็นค่าไม่คงที่เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงใช้วิธีจำลองสถานการณ์ขึ้นมาตามความน่าจะเป็นหลายๆสถานการณ์ แล้วหาคำตอบด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้น ซึ่งวิธีนี้เรียกว่าวิธีการกำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่ม (Stochastic Linear Programming) [1] แต่การใช้วิธีการกำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่มถ้าหากต้องการหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้น จำเป็นจะต้องจำลองสถานการณ์ให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทำให้โครงสร้างปัญหาที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ต้องใช้เวลาที่ยาวนานในการหาคำตอบหรืออาจจะหาคำตอบไม่ได้

จากสิ่งที่เกิดขึ้นผู้วิจัยจึงนำวิธีแบ่งส่วนเบนด์ (Benders decomposition) เข้ามาประยุกต์กับปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาแบบมีเงื่อนไขในการผลิต ซึ่งวิธีการประยุกต์สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีแบ่งส่วนเบนด์แบบ 1 ขั้นตอนและวิธีแบ่งส่วนเบนด์แบบ 2 ขั้นตอน โดยมีการทดลองด้านเวลาในการประมวลผลและคุณภาพด้านเวลาในการหาคำตอบเปรียบเทียบกับวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นแบบสุ่ม (Stochastic Integer Programming)

2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การหาคำตอบด้วยวิธีกำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่มนำเสนอโดย Dantzig [1] ในปี ค.ศ. 1955 เป็นวิธีใช้แก้ไขปัญหาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการข้อจำกัดทางซ้ายมือหรือค่าคงที่ทางขวามือมีความไม่แน่นอนมาเกี่ยวข้อง ซึ่งวิธีการนี้ส่งผลให้โครงสร้างของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเฉพาะตัว ทำให้ในปี ค.ศ. 1962 Bender [2, 3] นำลักษณะเฉพาะตัวที่เกิดขึ้นมาสร้างเป็นวิธีแบ่งส่วนของเบนด์เพื่อลดจำนวนตัวแปรที่ต้องหาคำตอบ จากนั้นในปี ค.ศ. 1975 Wagner [4] ได้นำเสนอ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์การผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลา โดยมีความไม่แน่นอนก็คือค่าความต้องการที่เกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถแก้ปัญหาได้โดยวิธีการกำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่ม ต่อมาในปี ค.ศ. 1994 Infanger [5] ได้นำวิธีการแบ่งส่วนของเบนด์และการสุ่มแบบมอนติคาร์โร (Monte Carlo Sampling) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาคำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่มโดยการจำลองสถานการณ์ผ่านการสุ่มแบบมอนติคาร์โรเพื่อสร้างโครงสร้างทางคณิตศาสตร์แล้วแก้ปัญหาด้วยวิธีแบ่งส่วนของเบนด์

จากทฤษฎีที่กล่าวมา งานวิจัยชิ้นนี้สร้างรูปแบบของปัญหาโดยอาศัยพื้นฐานจากตัวแบบการผลิตของ Wagner [4] แล้วนำแนวคิดของ Infanger [5] มาใช้ในการแก้ไข

ปี ค.ศ. 2008 ได้มีการทดลองนำปัญหาโภชนาการที่มีความไม่แน่นอนมาเกี่ยวข้อง มาเปรียบเวลาในการหาคำตอบด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้นแบบสุ่มแบบใช้ข้อจำกัดทุกทางเลือก และแบบการรวมทางเลือกของ

สมการข้อจำกัด โดย วณิศาและคณะ[6] ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีการกำหนดการเชิงเส้นเป็นรูปแบบการรวมทางเลือกใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่า เนื่องจากมีข้อจำกัด และจำนวนตัวแปรที่น้อยกว่ากรณีแบบใช้ข้อจำกัดทุกทางเลือก แต่ทั้ง 2 กรณีจะให้คำตอบที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ พิสิษฐ์และคณะ[7] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการหาคำตอบของปัญหาวางแผนการผลิตรวมโดยผู้มีความต้องการ กรณีใช้ข้อจำกัดทุกทางเลือก และกรณีลดข้อจำกัด ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากรณีลดข้อจำกัดโดยผู้มีความต้องการใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่า แต่คำตอบที่ได้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันนอกจากนั้นแล้วในปีเดียวกัน วิชัย [8] นำเสนองานวิจัยเรื่องแก้ปัญหาควบคุมสินค้าคงคลังในกรณีความต้องการสินค้าไม่แน่นอน โดยใช้วิธีการกำหนดการเชิงพลวัต (Dynamic Programming) และวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นแบบคู่ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นแบบคู่ใช้เวลาประมวลผลที่น้อยกว่าวิธีกำหนดการเชิงพลวัต แต่ถ้าหากมีการเพิ่มจำนวนคาบเวลาที่มาเกินไปจะทำให้ปัญหามีโครงสร้างที่ใหญ่และอาจต้องใช้เวลากำหนดคำตอบที่ยาวนาน

ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 ได้มีการนำตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของ Wagner [4] มาปรับปรุงให้เป็นปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาแบบเป็นคู่ตามทฤษฎีของ Infanger [5] มาทดลองเปรียบเทียบวิธีการหาคำตอบ 3 วิธี คือ วิธีกำหนดการเชิงเส้นจากตัวแบบหลัก (Primal Problem), วิธีกำหนดการเชิงเส้นจากตัวแบบคู่ควบ (Dual Problem) และวิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์ โดย สุพัฒตราและคณะ [9] จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า วิธีกำหนดการเชิงเส้นจากตัวแบบหลักใช้เวลาที่น้อยที่สุด แต่วิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์ใช้เวลานานที่สุด ซึ่งผลที่เกิดขึ้นทำให้ทราบว่าเพราะเหตุใดที่ผ่านมาจึงไม่มีการประยุกต์ใช้วิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์กับตัวแบบปัญหาการผลิตของ Wagner [4] ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 ผู้วิจัย [10] สร้างวิธีเฉพาะสำหรับหาคำตอบในปัญหาย่อยของวิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์

สำหรับประยุกต์ใช้ในปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาส่งผลให้การหาคำตอบด้วยวิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์มีความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองเปรียบเทียบกับวิธีกำหนดการเชิงเส้นจากตัวแบบหลัก พบว่าเมื่อโครงสร้างของปัญหามีขนาดใหญ่ วิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาจะหาคำตอบเร็วกว่า ในขณะที่โครงสร้างของปัญหามีขนาดเล็กเวลาในการหาคำตอบของวิธีกำหนดการเชิงเส้นจากตัวแบบหลักจะมีความเร็วมากกว่า แต่เวลาจะต่างกันเพียงไม่กี่วินาที และผลลัพธ์ของคำตอบ (ค่าเป้าหมาย) ไม่แตกต่างกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาถึงแม้จะมีผู้ประยุกต์ใช้วิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์กับปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาไปแล้ว แต่ในการผลิตสินค้านั้นมักจะมีข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตเสมอ ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้เสนอวิธีการประยุกต์การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาแบบมีข้อจำกัดในการผลิต ซึ่งตัวแบบการผลิตมีอัตราการใช้วัตถุดิบ 1 ชิ้นต่อสินค้าหลายชิ้น และมีข้อจำกัดด้านกำลังการผลิต ต่างจากงานวิจัยในปี ค.ศ. 2016 ของผู้วิจัย [10] ที่การผลิตมีอัตราการใช้วัตถุดิบ 1 ชิ้นต่อสินค้า 1 ชิ้น และไม่มีข้อจำกัดของกำลังการผลิต

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

สำหรับขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการแก้ปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาแบบมีข้อจำกัดในการผลิต
2. ศึกษาวิธีการแบ่งส่วนของเบนเดอร์เพื่อประยุกต์ใช้กับปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามคาบเวลาแบบมีข้อจำกัดในการผลิต
3. สร้างวิธีการหาคำตอบโดยในงานวิจัยนี้มี 2 วิธี คือ วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน และวิธีเบนเดอร์ 2

ขั้นตอนสำหรับรายละเอียดของทั้ง 2 วิธีจะอยู่ในหัวข้อที่ 5

4. ทดสอบวิธีการที่พัฒนาขึ้นด้วยการนำมาแก้ปัญหาที่มีโครงสร้างตามที่กำหนดไว้ในงานวิจัยจนกว่าจะสามารถหาคำตอบได้แล้วเปรียบเทียบระยะเวลาการประมวลผลและคุณภาพคำตอบของปัญหาการผลิตสินค้าภายใต้ความไม่แน่นอนและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา 3 วิธี คือ การหาคำตอบด้วยวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นโดยอาศัยตัวแบบ (1), การหาคำตอบด้วยวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนและการหาคำตอบด้วยวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน

4. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.1 สัญลักษณ์

- Z คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของตัวแบบ (1)
- W คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของตัวแบบ (2)
- T คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของตัวแบบ (3)
- x_i คือ ตัวแปรตัดสินใจสำหรับจำนวนวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ผลิตสินค้าในในตัวแบบ (1)
- $D_{i,k}$ คือ ปริมาณความต้องการสินค้าเวลา i ภายใต้สถานการณ์ k ใช้ในทุกตัวแบบ
- $I_{i,k}^+$ คือ ปริมาณสินค้าคงคลังในช่วงเวลา i ภายใต้สถานการณ์ k ใช้ในตัวแบบ (1)
- $I_{i,k}^-$ คือ ปริมาณสินค้าที่ขาดในช่วงเวลา i ภายใต้สถานการณ์ k ใช้ในตัวแบบ (1)
- c_i คือ ต้นทุนแปรรูปวัตถุดิบต่อหน่วยในช่วงเวลาที่ i ใช้ในตัวแบบ (1), (3), (4), (5), (6)
- h_i คือ ต้นทุนค่าเช่ารถบรรทุกในช่วงเวลาที่ i ใช้ในตัวแบบ (1), (2), (4)
- g_i คือ ต้นทุนค่าเช่ารถบรรทุกในช่วงเวลาที่ i ใช้ในตัวแบบ (1), (2), (4)
- $y_{i,k}$ คือ ตัวแปรตัดสินใจของตัวแบบ (2)

$y_{i,k,j}^*$ คือ คำตอบของตัวแปรตัดสินใจ $y_{i,k}$ จากตัวแบบที่ (2) ในรอบที่ j ใช้ในตัวแบบ (3), (5), (6)

x_i^* คือ ค่าตั้งต้น x_i ที่อยู่ในช่วงคำตอบที่เป็นไปได้จากตัวแบบ (1) หรือคำตอบ x_i จากตัวแบบ (3) โดยนำค่าที่ได้มาแทนลงใน x_i^* ใช้ในตัวแบบ (2)

$y_{i,k,r}^*$ คือ คำตอบของตัวแปรตัดสินใจ $y_{i,k}$ จากตัวแบบที่ (2) ในรอบการใส่เงื่อนไขจำนวนเต็มที่ r ใช้ในตัวแบบ (6)

L_i คือ จำนวนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตได้หรือกำลังการผลิตแต่ละช่วงเวลา i

a คือ ปริมาณสินค้าที่ผลิตได้จากวัตถุดิบ 1 ชิ้น

Sce คือ จำนวนของสถานการณ์ที่ได้จำลองขึ้นมาเพื่อสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับหาคำตอบ

4.2 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

ตัวแบบปัญหาหลัก (1)

$$\text{Minimize } Z = \sum_i c_i x_i + \frac{1}{Sce} \sum_i g_i \sum_k I_{i,k}^- + \frac{1}{Sce} \sum_i h_i \sum_k I_{i,k}^+ \quad (1.1)$$

$$ax_i - I_{i,k}^+ + I_{i,k}^- = D_{i,k} \quad \forall k \quad (1.2)$$

$$ax_i + (I_{i-1,k}^+ - I_{i-1,k}^-) - (I_{i,k}^+ - I_{i,k}^-) = D_{i,k} \quad 2 \leq i \leq n, \forall k \quad (1.3)$$

โดยที่ n คือจำนวนเวลา

$$x_i \leq L_i \quad (1.4)$$

$$x_i, I_{i,k}^+, I_{i,k}^- \geq 0, \text{Integer} \quad (1.5)$$

ตัวแบบ (1) เป็นตัวแบบปัญหาหลักที่มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในปัญหาการผลิตภายใต้ความต้องการไม่แน่นอนของ Wagner [4] โดยสมการ (1.1) เป็นการตั้งเป้าหมายให้ต้นทุนในการผลิตรวมต่ำที่สุด มีต้นทุนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ต้นทุนจากการผลิตในทุกเวลาเวลารวมกัน ต้นทุนจากค่าเสียโอกาสทุกเวลาและทุกสถานการณ์รวมกัน ต้นทุนคงคลังทุกเวลาและทุกสถานการณ์รวมกัน สมการ (1.2) และ

(1.3) เป็นการกำหนดให้จำนวนวัตถุดิบที่ผลิตเป็นสินค้าในอัตราส่วน 1 ต่อ a รวมกับจำนวนสินค้าคงคลังและสินค้าขาดส่งต้องมีปริมาณเท่ากับความต้องการของลูกค้า สมการ (1.4) เป็นการกำหนดถึงกำลังการผลิตหรือปริมาณวัตถุดิบที่สามารถใช้ผลิตได้ในแต่ละคาบเวลา สมการ (1.5) เป็นการบังคับให้จำนวนวัตถุดิบต้องเป็นจำนวนเต็มและมีค่ามากกว่า 0

ตัวแบบปัญหาคู่ควบ (2)

$$\text{Maximize } W = \sum_i \sum_k (D_{i,k} - ax_i^*) y_{i,k} \quad (2.1)$$

$$\frac{-h_i}{Sce} \leq y_{i,k} - y_{i+1,k} \leq \frac{g_i}{Sce} \quad 1 \leq i \leq n-1, \forall k \quad (2.2)$$

$$\frac{-h_n}{Sce} \leq y_{n,k} \leq \frac{g_n}{Sce} \quad \forall k \text{ โดย } n \text{ คือจำนวนคาบเวลา} \quad (2.3)$$

ตัวแบบ (2) เป็นตัวแบบปัญหาคู่ควบที่แปลงมาจากตัวแบบ (1) ในกรณีที่แทนค่า x_i ด้วย x_i^* ซึ่งเป็นค่าคงที่แล้วย้ายค่า x_i^* จากทางด้านซ้ายไปไว้ด้านขวาของสมการ (1.2) และ (1.3) เป็นตัวแบบที่เกิดจากวิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์

ตัวแบบสมการตัดเหมาะสมที่สุดแบบเพิ่มเงื่อนไข (3)

$$\text{Minimize } T \quad (3.1)$$

$$T \geq \sum_i \sum_k D_{i,k} y_{i,k}^* - \sum_i [a \sum_k y_{i,k}^* - c_i] x_i \quad \forall j \quad (3.2)$$

$$x_i \leq L_i \quad (3.3)$$

$$x_i \geq 0, \text{ Integer} \quad (3.4)$$

โดย j คือจำนวนรอบที่หาคำตอบโดยตัวแบบที่ (2)

ตัวแบบ (3) เป็นตัวแบบโครงสร้างพิเศษจากวิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์ [2, 3] โดยค่า $y_{i,k}^*$ คือค่า $y_{i,k}$ จากตัวแบบ (2) ในรอบที่ j และมีการเพิ่มเงื่อนไขกำลังการผลิตและจำนวนเต็มลงไปในรูปแบบของสมการ (3.3) และ (3.4)

5. วิธีหาคำตอบในงานวิจัยที่พัฒนาในงานวิจัย

ในส่วนของการหาคำตอบที่พัฒนาขึ้นมาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ การหาค่า $y_{i,k}$ ในตัวแบบ (2) และวิธีการประยุกต์ใช้หาคำตอบ ซึ่งการหาค่า $y_{i,k}$ ในตัวแบบ (2) สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

5.1 วิธีการหาค่า $y_{i,k}$ ในตัวแบบ (2) ด้วยวิธีการเฉพาะทาง

โดยปกติการหาค่าของตัวแปรตัดสินใจที่ทำให้สมการเป้าหมายมีค่ามากที่สุด เราสามารถใช้การพิจารณาสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรตัดสินใจในสมการเป้าหมายหาคำตอบได้ถ้าตัวแปรตัดสินใจเป็นอิสระต่อกัน ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้ เมื่อสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรตัดสินใจในสมการเป้าหมายมากกว่าหรือเท่ากับ 0 ค่าของตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นขอบเขตบน เมื่อสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรตัดสินใจในสมการเป้าหมายมีค่าน้อยกว่า 0 ค่าตัวแปรตัดสินใจต้องเป็นขอบเขตล่าง จะส่งผลให้ค่าเป้าหมายมากที่สุดจากหลักคิดดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าหากสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของตัวแบบ (2) ให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นอิสระต่อกันได้ก็จะสามารถหาคำตอบโดยใช้สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรตัดสินใจในสมการเป้าหมายมาตัดสินใจได้ทันที

จากหลักคิดที่กล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงกำหนดตัวแปร $u_{i,k}$ ขึ้นมาเพื่อนำไปปรับปรุงโครงสร้างของตัวแบบ (2) ดังแสดงต่อไปนี้

ขั้นตอน 1 ทำการนิยามตัวแปร $u_{i,k}$ ให้มีค่า $y_{i,k} = y_{i+1,k} + u_{i,k}$

ขั้นตอน 2 แทนค่า $y_{i+1,k} + u_{i,k}$ ลงในตัวแปร $y_{i,k}$ ในสมการ (2.1) ทำให้สมการเป้าหมายมีรูปแบบใหม่ดังนี้

$$\sum_k \sum_{j=1}^{n-1} [(\sum_{i=1}^j (D_{i,k} - ax_i^*)) u_{j,k}] + \sum_k [(\sum_{i=1}^n (D_{i,k} - ax_i^*)) y_{n,k}]$$

ขั้นตอน 3 แทน $y_{i+1,k} + u_{i,k}$ ลงในตัวแปร $y_{i,k}$ ในสมการ (2.2) แล้วทำการปรับปรุงโครงสร้างตัวแบบ (2) ได้โครงสร้างใหม่ดังต่อไปนี้

ตัวแบบสำหรับวิธีการเฉพาะทาง (4)

$$\begin{aligned} \text{Maximize } W = & \sum_k \sum_{j=1}^{n-1} \left[\left[\sum_{i=1}^j (D_{i,k} - ax_i^*) \right] u_{j,k} \right] \\ & + \sum_k \left[\left[\sum_{i=1}^n (D_{i,k} - ax_i^*) \right] y_{n,k} \right] \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$y_{i,k} = y_{i+1,k} + u_{i,k} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq i \leq n-1, \forall k \quad (4.2)$$

$$\frac{-h_n}{Sce} \leq y_{n,k} \leq \frac{g_n}{Sce} \quad (4.3)$$

$$\frac{-h_i}{Sce} \leq u_{i,k} \leq \frac{g_i}{Sce} \quad \text{โดยที่ } 1 \leq i \leq n-1, \forall k \quad (4.4)$$

จากตัวแบบ (4) ตัวแปร $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ เป็นอิสระต่อกันและค่าสัมประสิทธิ์ข้างหน้าตัวแปร $u_{j,k}$ จะเป็นค่าสะสมของสัมประสิทธิ์ $(D_{i,k} - ax_i^*)$ ตั้งแต่ $i=1$ ถึง j ทำให้เราสามารถหาค่าของตัวแปร $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ ด้วยวิธีเฉพาะทางได้ตามวิธีการดังต่อไปนี้

1. ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์หน้า $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ มีค่าเป็นบวก ให้กำหนดค่า $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ ให้มีค่าเป็น $\frac{g_i}{Sce}$ และ $\frac{g_n}{Sce}$ ตามลำดับ

2. ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์หน้า $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ มีค่าเป็นลบให้กำหนดค่า $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ ให้มีค่าเป็น $\frac{-h_i}{Sce}$ และ $\frac{-h_n}{Sce}$ ตามลำดับ

จากนั้นนำค่า $u_{i,k}$ และ $y_{n,k}$ ที่ได้ไปหาค่า $y_{i,k}$ ผ่านสมการ (4.2) ก็จะได้ค่า $y_{i,k}$ ที่เป็นคำตอบของตัวแบบ (2)

ในส่วนของการหาคำตอบที่ผู้วิจัยคิดขึ้นมี 2 วิธี คือ วิธีประยุกต์การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาย่อยแบบมีข้อจำกัดในการผลิตกรณี 1 ขั้นตอนและ วิธีประยุกต์การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาย่อยแบบมีข้อจำกัดในการผลิตกรณี 2 ขั้นตอน โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะเรียกชื่อย่อว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน และวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน

5.2 วิธีประยุกต์การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาย่อยแบบมีข้อจำกัดในการผลิตกรณี 1 ขั้นตอน

วิธีนี้คล้ายวิธีหาคำตอบในงานวิจัยของอภิศักดิ์และพิรยุทธ [10] แต่แตกต่างกันที่งานวิจัยชิ้นนี้ต้องเพิ่ม

เงื่อนไขของจำนวนเต็มและกำลังการผลิตโดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอน 1 ทำการกำหนดค่าตอบเริ่มต้นด้วยตนเอง (x_i) โดยที่ค่าตอบเริ่มต้นต้องอยู่ในช่วงคำตอบที่เป็นไปได้ตามเงื่อนไขของตัวแบบที่ (1)

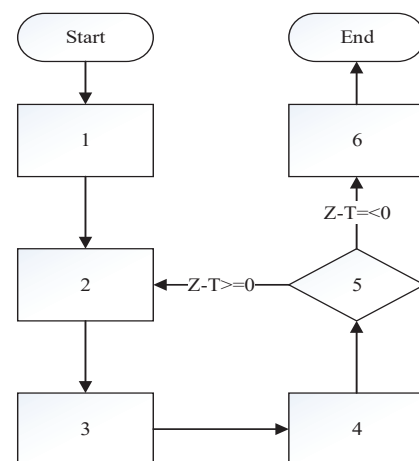
ขั้นตอน 2 นำค่า x_i ในขั้นตอน 1 หรือขั้นตอน 3 แทนลงใน x_i^* ของตัวแบบ (2) จากนั้นหาค่า $y_{i,k}$ ด้วยวิธีการเฉพาะทางซึ่งแสดงในหัวข้อที่ 4

ขั้นตอน 3 นำค่า $y_{i,k}$ ที่หาได้จากขั้นตอน 2 รอบที่ j แทนลงใน $y_{i,k,j}^*$ ของตัวแบบ (3) จากนั้นหาค่า T และ x_i ในตัวแบบ (3) ด้วยวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้น (Integer Programming)

ขั้นตอน 4 นำค่า x_i ที่ได้ไปหาค่า Z โดยอาศัยตัวแบบที่ (1)

ขั้นตอน 5 นำค่า Z ที่ได้จากขั้นตอน 4 มาเปรียบเทียบกับค่า T ในขั้นตอน 3 ถ้า $Z-T$ มากกว่า 0 ให้หาค่า x_i จากขั้นตอน 3 ย้อนกลับไปค้นหาค่า $y_{i,k}$ ในขั้นตอน 2 ใหม่อีกครั้ง จนกว่า $Z-T$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 ให้ไปยังขั้นตอน 6

ขั้นตอน 6 คำตอบที่ได้จากกรณีที่ $Z-T$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 จะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดพร้อมทั้งหยุดหาคำตอบ



ภาพที่ 1 แสดงการหาคำตอบของวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน

5.3 วิธีประยุกต์การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาย่อยแบบมีข้อจำกัดในการผลิตกรณี 2 ขั้นตอน

วิธีนี้มี 2 ขั้นตอนใหญ่ในการหาคำตอบ คือ ขั้นตอน ที่ 1 เป็นการผ่อนคลายเงื่อนไขจำนวนเต็มเพื่อสร้างโครงสร้างของสมการ (6.2) ขั้นตอนที่ 2 เป็นการเพิ่มเงื่อนไขจำนวนเต็มลงไปหลังจากมีโครงสร้างสมการ (6.2) โดย วิธีนี้จะมีการสร้างตัวแบบ 2 ตัวแบบ ตัวแบบสมการตัดเหมาะที่สุดแบบเพิ่มเงื่อนไขเฉพาะกำลังการผลิต (5)

$$\text{Minimize } T \quad (5.1)$$

$$T \geq \sum_i \sum_k D_{i,k} y_{i,k,j}^* - \sum_i [a \sum_k y_{i,k,j}^* - c_i] x_i \quad \forall j \quad (5.2)$$

$$x_i \leq L_i \quad (5.3)$$

$$x_i \geq 0 \quad (5.4)$$

ตัวแบบ (5) มีโครงสร้างเหมือนกับตัวแบบ (3) เพียงแต่ไม่มีการใส่เงื่อนไขจำนวนเต็มของตัวแปร x_i ตัวแบบสมการตัดเหมาะที่สุดแบบเพิ่มเงื่อนไขและมีโครงสร้างผ่อนคลายจำนวนเต็ม (6)

$$\text{Minimize } T \quad (6.1)$$

$$T \geq \sum_i \sum_k D_{i,k} y_{i,k,j}^* - \sum_i [a \sum_k y_{i,k,j}^* - c_i] x_i \quad \forall j \quad (6.2)$$

$$T \geq \sum_i \sum_k D_{i,k} y_{i,k,r}^* - \sum_i [a \sum_k y_{i,k,r}^* - c_i] x_i \quad \forall r \quad (6.3)$$

$$x_i \leq L_i \quad (6.4)$$

$$x_i \geq 0, \text{ Integer} \quad (6.5)$$

ตัวแบบ (6) เป็นการนำสมการ (5.2) ของตัวแบบ (5) มาใช้ในสมการ (6.2) พร้อมทั้งเพิ่มเติมเงื่อนไขจำนวน

เต็มและสมการ (6.3) ซึ่งเกิดจากการใส่เงื่อนไขจำนวนเต็มเพิ่มเติมลงไป

โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอน 1 ทำการกำหนดคำตอบเริ่มต้นด้วยตนเอง (x_i) โดยที่คำตอบเริ่มต้นต้องอยู่ในช่วงคำตอบที่เป็นไปได้ตามเงื่อนไขของตัวแบบที่ (1)

ขั้นตอน 2 นำค่า x_i ที่กำหนดขึ้นในขั้นตอน 1 หรือหามาจากขั้นตอน 3 แทนลงใน x_i^* ของตัวแบบ (2) จากนั้นหาค่า $y_{i,k}$ ด้วยวิธีการเฉพาะทางซึ่งแสดงในหัวข้อที่ 4

ขั้นตอน 3 นำค่า $y_{i,k}$ ที่หาได้จากขั้นตอน 2 รอบที่ j แทนลงใน $y_{i,k,j}^*$ ของตัวแบบ (5) จากนั้นหาค่า T และ x_i ในตัวแบบ (5) ด้วยวิธีซิมเพล็กซ์

ขั้นตอน 4 นำค่า x_i ที่ได้ไปหาค่า Z โดยอาศัยตัวแบบที่ (1)

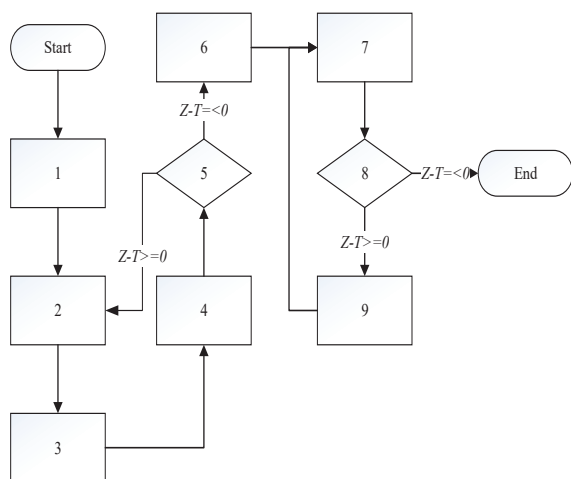
ขั้นตอน 5 นำค่า Z ที่ได้จากขั้นตอน 4 มาเปรียบเทียบกับค่า T ในขั้นตอน 3 ถ้า $Z-T$ มากกว่า 0 ให้นำค่า x_i จากขั้นตอน 3 ย้อนกลับไปค้นหาค่า $y_{i,k}$ ในขั้นตอน 2 ใหม่อีกครั้ง จนกว่า $Z-T$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 ให้ไปยังขั้นตอน 6

ขั้นตอน 6 นำสมการ (5.2) ไปใส่ในสมการ (6.2) ของตัวแบบ (6) จากนั้นหาค่า T และ x_i ในตัวแบบ (6) ด้วยวิธีการหาค่าเชิงเส้นจำนวนเต็ม

ขั้นตอน 7 นำค่า x_i จากตัวแบบ (6) ไปหาค่า Z โดยอาศัยตัวแบบที่ (1)

ขั้นตอน 8 นำค่า Z ที่ได้จากขั้นตอน 7 มาเปรียบเทียบกับค่า T ในขั้นตอน 6 ถ้า $Z-T$ มากกว่า 0 ไปขั้นตอน 9 แต่ถ้าหาก $Z-T$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 จะหยุดการหาคำตอบ

ขั้นตอน 9 นำค่า x_i ที่มาจากขั้นตอน 6 แทนลงใน x_i^* ของตัวแบบ (2) จากนั้นหาค่า $y_{i,k}$ ด้วยวิธีการเฉพาะทางในรอบที่ r แล้วแทนลงใน $y_{i,k,r}^*$ ของตัวแบบ (6) กลับไปยังขั้นตอน 7



ภาพที่ 2 แสดงการหาคำตอบของวิธีเบนครอร์ 2 ขั้นตอน

6. ผลการทดสอบกับปัญหาสำหรับการทดลอง

ปัญหาสำหรับการทดลองจะเป็นปัญหาที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมาเองโดยมีปัญหทั้งหมด 2 ข้อ และความต้องการของลูกค้ามีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution)

6.1 ปัญหาที่ 1 สำหรับการทดลอง

สำหรับปัญหาที่ 1 สำหรับการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลของปัญหาที่ 1 สำหรับการทดลอง

คาบเวลา ที่	ความ ต้องการ	ต้นทุน ผลิต/ วัตถุดิบ 1 ชิ้น	ต้นทุน คลัง	ต้นทุน เสีย โอกาส
1	[20,30]	3	0.3	2.5
2	[50,70]	2.5	0.25	1.5
3	[40,50]	4	0.4	2
4	[70,120]	3.5	0.35	2
5	[30,70]	2.75	0.275	1.5
6	[20,50]	3.25	0.325	1.5
7	[80,150]	2.45	0.195	2.25
8	[40,80]	5	0.455	1.75
9	[10,60]	6.5	0.5	1.85
10	[25,95]	4.5	0.275	2.45

สำหรับปัญหาที่ 1 วัตถุดิบ 1 ชิ้นจะสามารถผลิตสินค้าได้ทั้งหมด 3 ชิ้นและแต่ละคาบเวลาจะใช้วัตถุดิบได้ไม่เกิน 80 ชิ้น

6.2 ปัญหาที่ 2 สำหรับการทดลอง

สำหรับปัญหาที่ 2 สำหรับการทดลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ข้อมูลของปัญหาที่ 2 สำหรับการทดลอง

คาบเวลา ที่	ความ ต้องการ	ต้นทุน ผลิต/ วัตถุดิบ 1 ชิ้น	ต้นทุน คลัง	ต้นทุน เสีย โอกาส
1	[20,30]	10	3	15
2	[50,70]	20	2.5	14
3	[40,50]	25	4	15
4	[70,120]	24	3.5	12
5	[30,70]	15	2.75	15
6	[20,50]	20	3.25	15
7	[80,150]	23	1.5	20
8	[40,80]	17	4.5	13
9	[10,60]	14	5	10
10	[25,95]	20	8.5	12

สำหรับปัญหาที่ 2 วัตถุดิบ 1 ชิ้นจะสามารถผลิตสินค้าได้ทั้งหมด 3 ชิ้นและแต่ละคาบเวลาจะใช้วัตถุดิบได้ไม่เกิน 80 ชิ้น

6.3 สถานการณ์การทดสอบ

สำหรับผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของเวลาประมวลผลและคุณภาพของคำตอบ โดยในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองทั้งหมด 5 รูปแบบ ดังนี้

- การทดลองรูปแบบ 6 คาบเวลาของปัญหาที่ 1 จำลองสถานการณ์ตั้งแต่ 400 ถึง 4,000 สถานการณ์
- การทดลองรูปแบบ 8 คาบเวลาของปัญหาที่ 1 จำลองสถานการณ์ตั้งแต่ 200 ถึง 2,000 สถานการณ์
- การทดลองรูปแบบ 10 คาบเวลาของปัญหาที่ 1 จำลองสถานการณ์ตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 สถานการณ์

- การทดลองรูปแบบ 10 คาบเวลาของปัญหาที่ 2 จำลองสถานการณ์ตั้งแต่ 1,000 ถึง 5,000 สถานการณ์
- การทดลองรูปแบบ 10 คาบเวลาของปัญหาที่ 2 จำลองสถานการณ์ตั้งแต่ 10,000 ถึง 50,000 สถานการณ์

ผลทดลองเกิดจากการทดลอง 30 ครั้งมาค่าเฉลี่ยต่อ 1 ผล การทดลอง เปรียบเทียบระหว่าง 3 วิธีคือ วิธีจำนวนเต็ม

เชิงเส้นโดยอาศัยตัวแบบ (1), วิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอนและวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอน ซึ่งวิธีทั้งหมดใช้โปรแกรมแมทแล็บ (Matlab V.2015) ในการทดลอง และใช้คอมพิวเตอร์ Spec: Core i7-5500U RAM 8GB

6.4 ผลการทดลองด้านเวลาประมวลผล

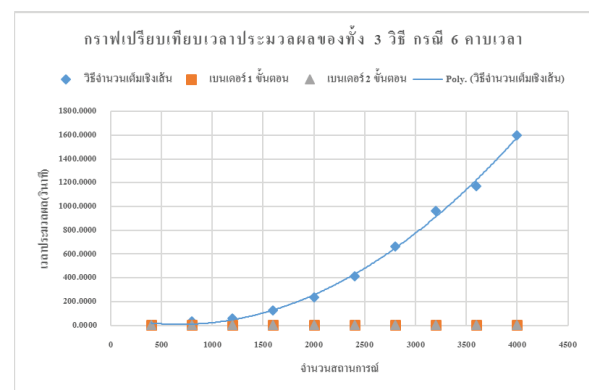
ผลการทดลองสามารถแสดงเป็นตารางและกราฟได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 เวลาประมวลผลการทดลองแบบ 6 คาบเวลาของปัญหาที่ 1

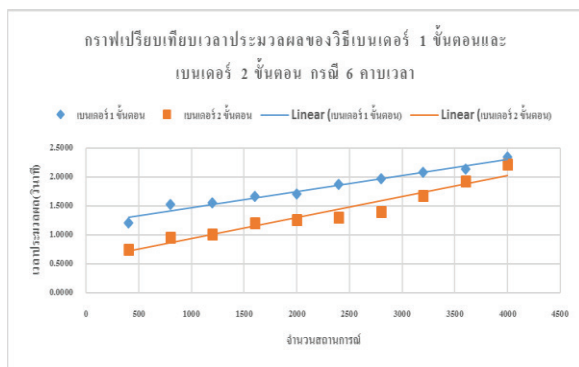
จำนวน			เวลาประมวลผล (วินาที)		
สถานการณ์	ตัวแปร	เงื่อนไข	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบเนดอร์ 1 ขั้นตอน	เบเนดอร์ 2 ขั้นตอน
400	4,806	2,400	1.4417	1.2105	0.7523
800	9,606	4,800	31.9041	1.5238	0.9531
1,200	14,406	7,200	59.2786	1.5459	1.0055
1,600	19,206	9,600	126.8947	1.6568	1.2084
2,000	24,006	12,000	235.8654	1.703	1.2584
2,400	28,806	14,400	410.0683	1.8636	1.3072
2,800	33,606	16,800	662.8587	1.9676	1.402
3,200	38,406	19,200	961.1762	2.0849	1.6758
3,600	43,206	21,600	1,172.6577	2.1305	1.928
4,000	48,006	24,000	1,597.4909	2.349	2.219

จากข้อมูลในตารางที่ 3 ปัญหาที่มีรูปแบบเดียวกันวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอน ใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุดในขณะที่วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นใช้เวลาประมวลผลมากที่สุด เพื่อให้เห็นรูปแบบของเวลาที่เพิ่มขึ้นจึงนำเวลาประมวลผลของทั้ง 3 วิธีไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบดังแสดงในภาพที่ 3

จากภาพที่ 3 เมื่อสถานการณ์มีจำนวนมากขึ้นเวลาประมวลผลของวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของเวลาเป็นสมการพหุนามคือ $y = 0.0001x^2 - 0.1941x + 73.693$ โดย y คือเวลาและ x คือจำนวนสถานการณ์ มีค่า $R^2 = 0.9974$ ส่วนอีก 2 วิธีจะแสดงรายละเอียดในภาพที่ 4 เพราะเวลาประมวลผลต่างกับวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมากเกินกว่าจะแสดงให้เห็นในภาพที่ 3 ได้



ภาพที่ 3 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของทั้ง 3 วิธี กรณี 6 คาบเวลา



ภาพที่ 4 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของวิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอนและเบเนดอร์ 2 ขั้นตอน กรณี 6 คาบเวลา

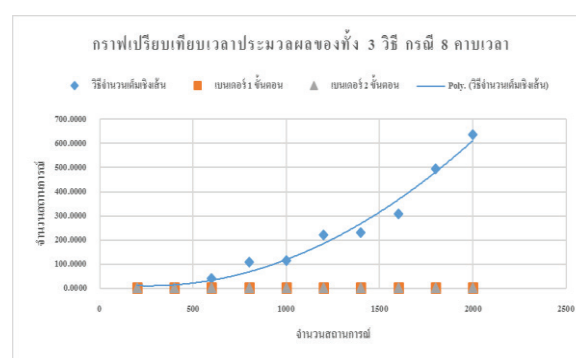
จากภาพที่ 4 วิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอนจะช้ากว่าวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอนในทุกการทดลอง แต่หากสังเกตจะเห็นว่า

กราฟของวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอนมีความชันที่มากกว่าวิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอน โดยทั้ง 2 วิธีมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของเวลาเป็นสมการเชิงเส้นตรงแสดงได้ดังนี้ วิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอนจะมีสมการคือ $y = 0.0003x + 1.1942$ มีค่า $R^2 = 0.9719$ วิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอนจะมีสมการคือ $y = 0.0004x + 0.5708$ มีค่า $R^2 = 0.9402$ โดย y คือเวลา และ x คือจำนวนสถานการณ์ จากสมการจะเห็นว่าความชันของวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอน มีความชันมากกว่าวิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอน ตามที่ได้ตั้งข้อสังเกตไว้ทำให้มีแนวโน้มว่าถ้าหากขยายขนาดของปัญหาให้ใหญ่ขึ้นสุดท้ายแล้ววิธีเบเนดอร์ 1 ขั้นตอน จะใช้เวลาที่น้อยกว่าวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอน

ตารางที่ 4 เวลาประมวลผลการทดลองแบบ 8 คาบเวลาของปัญหาที่ 1

จำนวน			เวลาประมวลผล (วินาที)		
สถานการณ์	ตัวแปร	เงื่อนไข	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบเนดอร์ 1 ขั้นตอน	เบเนดอร์ 2 ขั้นตอน
200	3,208	1,600	0.5038	2.9099	1.8083
400	6,408	3,200	0.7505	3.0574	2.1386
600	9,608	4,800	41.1196	3.1801	2.2411
800	12,808	6,400	107.7245	3.1465	2.3248
1,000	16,008	8,000	116.5133	3.2526	2.4617
1,200	19,208	9,600	221.3621	3.4145	2.5413
1,400	22,408	11,200	230.7802	3.5313	2.7758
1,600	25,608	12,800	309.0761	3.6046	2.7458
1,800	28,808	14,400	496.171	3.8537	2.9689
2,000	32,008	16,000	636.6649	3.8779	3.2067

จากข้อมูลในตารางที่ 4 ผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับตารางที่ 3 คือวิธีเบเนดอร์ 2 ขั้นตอนใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุด ในขณะที่วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นใช้เวลาประมวลผลนานที่สุด แต่สิ่งที่น่าสนใจก็คือถ้าปัญหาที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ปัญหากรณี 8 คาบเวลาจะใช้เวลาโดยเฉลี่ยนานกว่า 6 คาบเวลา เพื่อหารูปแบบแนวโน้มของเวลาประมวลผลที่เพิ่มขึ้นจึงนำเวลาประมวลผลของทั้ง 3 วิธีไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบดังแสดงในภาพที่ 5



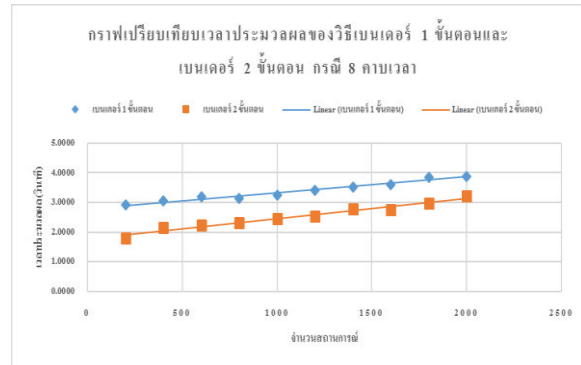
ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของทั้ง 3 วิธีกรณี 8 คาบเวลา

จากภาพที่ 5 เมื่อสถานการณ์มีจำนวนมากขึ้นเวลาประมวลผลของวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีรูปแบบการเพิ่มขึ้น

ของเวลาเป็นสมการโพลิโนเมียลแสดงได้เป็นสมการคือ $y = 0.0002x^2 - 0.1039x + 24.13$ โดย y คือเวลา และ x คือจำนวนสถานการณ์ มีค่า $R^2 = 0.9974$ จากสมการเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์หน้า x^2 ของกรณี 8 คาบเวลามีค่ามากกว่า กรณี 6 คาบเวลาซึ่งสอดคล้องกับสิ่งที่สังเกตไว้ว่าจำนวนคาบเวลาจะส่งผลต่อเวลาประมวลผล ส่วนอีก 2 วิธีจะแสดงรายละเอียดในภาพที่ 6 เพราะเวลาประมวลผลต่างกับวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมากเกินกว่าจะแสดงให้เห็นในภาพที่ 5 ได้

จากภาพที่ 6 วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน ทุกการทดลอง ซึ่งวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนจะมีสมการคือ $y = 0.0005x + 2.792$ มีค่า $R^2 = 0.969$ วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนจะมีสมการ $y = 0.0007x + 1.7762$ มีค่า $R^2 = 0.9699$ โดย y คือเวลา และ x คือจำนวนสถานการณ์ จากสมการความชันของวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน

จะมากกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน จึงมีแนวโน้มที่วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนจะใช้เวลาประมวลผลมากกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนเมื่อมีการจำลองสถานการณ์มากขึ้น



ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนและเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน กรณี 8 คาบเวลา

ตารางที่ 5 เวลาประมวลผลการทดลองแบบ 10 คาบเวลาของปัญหาที่ 1

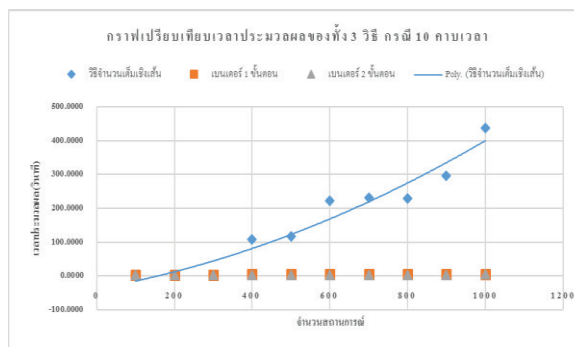
จำนวน			เวลาประมวลผล (วินาที)		
สถานการณ์	ตัวแปร	เงื่อนไข	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
100	2,010	1,000	0.5038	3.1662	1.817
200	4,010	2,000	0.7505	3.2014	1.7755
300	6,010	3,000	1.1196	3.4444	2.0696
400	8,010	4,000	107.7245	3.8476	2.1884
500	10,010	5,000	116.5133	4.2471	2.633
600	12,010	6,000	221.3621	4.3665	3.174
700	14,010	7,000	230.7802	4.5719	3.2715
800	16,010	8,000	229.0761	4.6152	3.4286
900	18,010	9,000	296.171	4.7359	3.5999
1,000	20,010	10,000	436.6649	4.8501	3.8873

จากข้อมูลในตารางที่ 5 ผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับตารางที่ 3, 4 คือวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุด ในขณะที่วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นใช้เวลาประมวลผลนานที่สุด นอกจากนั้นแล้วในปัญหาที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่คาบเวลาต่างกัน ปัญหาที่คาบเวลามากกว่ามีแนวโน้มจะใช้เวลาประมวลผลที่มากกว่า เพื่อหารูปแบบแนวโน้มของเวลาประมวลผลที่เพิ่มขึ้นจึงนำเวลาประมวลผลของทั้ง 3 วิธีไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบดังแสดงในภาพที่ 7

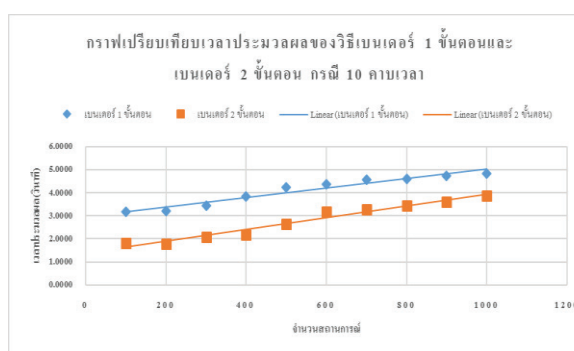
จากภาพที่ 7 เมื่อสถานการณ์มีจำนวนมากขึ้นเวลาประมวลผลของวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นของเวลาเป็นสมการโพลิโนเมียลแสดงได้เป็นสมการคือ $y = 0.0002x^2 + 0.2029x - 37.87$ มีค่า $R^2 = 0.9426$ จากสมการสัมประสิทธิ์หน้า x^2 มีค่าเท่ากับกรณี 8 คาบเวลา แต่สัมประสิทธิ์หน้า x มีค่ามากกว่ากรณี 8 คาบเวลา ทำให้มีแนวโน้มว่าคาบเวลาจะส่งผลให้เวลาประมวลผลยาวนานขึ้นถึงแม้จะมีขนาดโครงสร้างที่ใกล้เคียงกัน ส่วนอีก 2 วิธีจะแสดงรายละเอียดในภาพที่ 8

ภาพที่ 8 วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน ทุกการทดลอง ซึ่งวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนจะมีสมการคือ $y = 0.0021x + 2.9699$ มีค่า $R^2 = 0.9439$ วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนจะมีสมการ $y = 0.0025x + 1.3849$ มีค่า $R^2 = 0.9664$ โดย y คือเวลา และ x คือจำนวนสถานการณ์ จากผลที่ได้เมื่อนำความชันหน้า x ของการทดลองอื่นมาเปรียบเทียบกับกันมีแนวโน้มว่าเมื่อคาบเวลามากขึ้นจะส่งผลให้เวลาประมวลผลมากตามไปด้วย แม้จะมีขนาดโครงสร้างปัญหาใกล้เคียงกัน

การทดลองต่อไปจะเป็นการทดลองเพื่อดูว่าขอบเขตในการประมวลผลของวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี โดยอาศัยโจทย์ที่ 2 กรณี 10 คาบเวลา สามารถแสดงดังตารางที่ 6



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของทั้ง 3 วิธี กรณี 10 คาบเวลา



ภาพที่ 8 กราฟเปรียบเทียบเวลาประมวลผลของวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนและเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน กรณี 10 คาบเวลา

ตารางที่ 6 ผลทดลองหาขอบเขตในการประมวลผลของวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี

จำนวน			เวลาประมวลผล (วินาที)		
สถานการณ์	ตัวแปร	เงื่อนไข	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
1,000	20,010	10,000	156.126	11.1768	5.1748
2,000	40,010	20,000	868.4458	11.9818	6.026
3,000	60,010	30,000	-	12.3945	7.5908
4,000	80,010	40,000	-	12.4406	8.2834
5,000	100,010	50,000	-	13.059	9.2176

จากตารางที่ 6 วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นจะไม่สามารถหาคำตอบได้เมื่อมีขนาดสถานการณ์ 3,000 สถานการณ์ ในขณะที่อีก 2 วิธียังคงหาคำตอบได้ ดังนั้นอีก 2 วิธี จึงมีความเหมาะสมในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่มากกว่าวิธี

จำนวนเต็มเชิงเส้น นอกจากนั้นเพื่อดูแนวโน้มของเวลาในการประมวลผลระหว่างวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน และวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน จึงได้ขยายขนาดของปัญหาและทดลองเพิ่มในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เวลาประมวลผลกรณีปัญหามีขนาดใหญ่

จำนวน			เวลาประมวลผล (วินาที)		
สถานการณ์	ตัวแปร	เงื่อนไข	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
10,000	200,010	100,000	-	19.1241	17.9392
20,000	400,010	200,000	-	23.2117	27.778
30,000	600,010	300,000	-	27.9338	39.2835
40,000	800,010	400,000	-	30.5834	54.2738
50,000	1000,010	500,000	-	34.4027	60.6424

จากตารางที่ 7 เมื่อทำการขยายขนาดปัญหาไปเรื่อยๆ พบว่าสุดท้ายแล้ววิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนจะใช้เวลาประมวลผลน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนตามที่ได้ตั้งข้อสังเกตไว้จากการทดลองก่อนหน้านี้

จากผลการทดลองด้านเวลาประมวลผลพบว่าในกรณีที่โครงสร้างปัญหามีขนาดไม่ใหญ่วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนใช้เวลาประมวลผลน้อยที่สุด แต่ในกรณีที่โครงสร้างปัญหามีขนาดใหญ่วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนใช้เวลาการประมวลผลน้อยกว่า สาเหตุเพราะวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน ใช้การสร้างเงื่อนไข 2 รอบ โดยรอบแรกสร้างสมการ (5.2) อาศัยวิธีกำหนดการเชิงเส้นจากตัวแบบ (5) เพื่อส่งต่อเงื่อนไขไปสมการ (6.2) ทำให้การหาคำตอบจำนวนเต็มจากตัวแบบ (6) ด้วยวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้น ใช้เวลาไม่นาน เนื่องจากหาคำตอบกรณีผ่อนคลายเงื่อนไขจำนวนเต็มมาแล้ว (Lower Bound) จากตัวแบบ (5) เพียงแต่การหาคำตอบ 2 รอบ มีผลให้จำนวนรอบการหาคำตอบด้วยวิธีแบ่งส่วนของเบนเดอร์ (จะหยุดหาเมื่อค่า $Z=T$) มากกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน ซึ่งกรณีปัญหามีขนาดไม่ใหญ่วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนจะเร็วกว่าเนื่องจากขั้นตอนที่ 1 ใช้วิธีกำหนดการเชิงเส้นลดเวลาในการหาคำตอบขั้นต้นก่อนใช้วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นเพื่อหาคำตอบในขั้นสุดท้าย ต่างจากวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนใช้วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นหาคำตอบตั้งแต่แรกทำให้ใช้เวลาที่นานกว่าถึงแม้จะมีจำนวนรอบหาคำตอบน้อยกว่าก็ตาม แต่กรณีที่ปัญหามีขนาดใหญ่วิธีกำหนดการเชิงเส้นในขั้นตอนที่ 1 ของวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน จะใช้เวลาประมวลผลมากขึ้น ในขณะที่จำนวนรอบหาคำตอบก็มากกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน ส่งผลให้

เวลาประมวลผลด้วยวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอนในปัญหามีขนาดใหญ่

ในกรณีที่ค่าเวลามีจำนวนมากขึ้นเวลาประมวลผลก็จะมีแนวโน้มมากขึ้นในทุกๆวิธี ถึงแม้จะมีขนาดของปัญหาใกล้เคียงกัน เพราะการเพิ่มค่าเวลาปัญหาที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนมากกว่าการเพิ่มจำนวนสถานการณ์ เนื่องจาก

การเพิ่มค่าตัวแปรเพิ่มขึ้น 3 ชนิด คือ x_i , $I_{i,k}^+$, $I_{i,k}^-$ ในขณะที่การเพิ่มจำนวนสถานการณ์ตัวแปรจะเพิ่มแค่ 2 ชนิดคือ $I_{i,k}^+$, $I_{i,k}^-$

6.5 ผลการทดลองด้านคุณภาพของคำตอบ

ในการทดลองด้านคุณภาพของคำตอบ เป็นการนำวิธีทั้ง 3 มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่ต่างจากค่าขอบเขตล่างที่เป็นไปได้ (คำตอบที่ได้จากการกำหนดการเชิงเส้นกรณีผ่อนคลายเงื่อนไขจำนวนเต็ม) เพื่อแสดงถึงคุณภาพของคำตอบ โดยผลการทดลองแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 8 วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0727% ถึง 0.0824% พิสัย 0.0096% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0774% วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0721% ถึง 0.0799% พิสัย 0.0079% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0756% วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0729% ถึง 0.0825% พิสัย 0.0096% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0765% จากค่าที่ได้ วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอน จะมีคุณภาพในการหาคำตอบมากที่สุด เพียงแต่ค่าที่ได้แตกต่างกันน้อยมากจนสามารถกล่าวได้ว่าทั้ง 3 วิธีมีคุณภาพที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 8 ผลการทดลองด้านคุณภาพคำตอบ กรณี 6 คาบเวลา โจทย์ที่ 1

จำนวน สถานการณ์	เปอร์เซ็นต์ความต่างจากขอบเขตล่าง		
	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
400	0.0814%	0.0799%	0.0825%
800	0.0729%	0.0721%	0.0729%
1,200	0.0782%	0.0764%	0.0782%
1,600	0.0808%	0.0749%	0.0758%
2,000	0.0824%	0.0791%	0.0809%
2,400	0.0741%	0.0734%	0.0734%
2,800	0.0759%	0.0756%	0.0756%
3,200	0.0823%	0.0792%	0.0792%
3,600	0.0731%	0.0731%	0.0731%
4,000	0.0727%	0.0727%	0.0732%

ตารางที่ 9 ผลการทดลองด้านคุณภาพคำตอบ กรณี 8 คาบเวลา โจทย์ที่ 1

จำนวน สถานการณ์	เปอร์เซ็นต์ความต่างจากขอบเขตล่าง		
	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
200	0.0504%	0.0498%	0.0533%
400	0.0546%	0.0526%	0.0552%
600	0.0603%	0.0581%	0.0601%
800	0.0481%	0.0471%	0.0489%
1,000	0.0486%	0.0487%	0.0512%
1,200	0.0522%	0.0510%	0.0541%
1,400	0.0543%	0.0508%	0.0536%
1,600	0.0517%	0.0517%	0.0532%
1,800	0.0512%	0.0499%	0.0527%
2,000	0.0515%	0.0503%	0.0555%

จากตารางที่ 9 วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0481% ถึง 0.0603% พิสัย 0.0121% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0523% วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0471% ถึง 0.0581% พิสัย 0.011% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.051% วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0489% ถึง 0.0601% พิสัย 0.0113% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.054% จากค่าที่ได้ ผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกับ ตารางที่ 8 คือวิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนจะมีคุณภาพมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาแล้วค่าที่ได้แทบไม่แตกต่าง

ตารางที่ 10 ผลการทดลองด้านคุณภาพคำตอบ กรณี 10 คาบเวลา โจทย์ที่ 1

จำนวน สถานการณ์	เปอร์เซ็นต์ความต่างจากขอบเขตล่าง		
	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
100	0.0363%	0.0361%	0.0363%
200	0.0477%	0.0428%	0.0441%
300	0.0506%	0.0461%	0.0472%
400	0.0422%	0.0389%	0.0383%
500	0.0456%	0.0436%	0.0467%
600	0.0453%	0.0437%	0.0451%
700	0.0435%	0.0420%	0.0423%
800	0.0400%	0.0395%	0.0427%
900	0.0398%	0.0389%	0.0443%
1,000	0.0378%	0.0367%	0.0425%

จากตารางที่ 10 วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0363% ถึง 0.0506% พิสัย 0.0143% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0429% วิธีเบนเดอร์ 1 ขั้นตอนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0361% ถึง 0.0461% พิสัย 0.0101% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0408% วิธีเบนเดอร์ 2 ขั้นตอน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0363% ถึง 0.0472% พิสัย 0.0109% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0429% จากค่าที่ได้ ผลการทดลองมีแนวโน้มเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

ตารางที่ 11 ผลการทดลองด้านคุณภาพคำตอบ กรณี 10 คาบเวลา โจทย์ที่ 2

จำนวน สถานการณ์	เปอร์เซ็นต์ความต่างจากขอบเขตล่าง		
	จำนวนเต็มเชิงเส้น	เบนเดอร์ 1 ขั้นตอน	เบนเดอร์ 2 ขั้นตอน
1,000	0.0235%	0.0203%	0.0223%
2,000	0.0304%	0.0251%	0.0283%
3,000	-	0.0223%	0.0239%
4,000	-	0.0219%	0.0231%
5,000	-	0.0207%	0.0219%
10,000	-	0.0259%	0.0263%
20,000	-	0.0223%	0.0235%
30,000	-	0.0227%	0.0268%
40,000	-	0.0227%	0.0263%
50,000	-	0.0203%	0.0223%

จากตารางที่ 11 วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นจะไม่สามารถหาคำตอบได้ครบทุกการทดลองเนื่องจากปัญหามีขนาด

ใหญ่เกินไป มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0235% ถึง 0.0304% พิสัย 0.0068% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0269% วิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0203% ถึง 0.0259% พิสัย 0.0057% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0224% วิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0219% ถึง 0.0283% พิสัย 0.0064% และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0245% จากค่าที่ได้จะเห็นได้ว่าเมื่อปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นจะไม่สามารถหาคำตอบได้ในขณะที่วิธีอื่นยังสามารถหาคำตอบได้อยู่ ส่วนด้านคุณภาพมีแนวโน้มไม่ต่างจากการทดลองก่อนหน้านี้คือ วิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอน จะให้ค่าเฉลี่ยและพิสัยต่ำสุด

จากผลการทดลองวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนจะมีค่าที่ดีที่สุดเสมอเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี ส่วนวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นและวิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอนเมื่อเปรียบเทียบกันจะมีผลลัพธ์ทั้ง 3 รูปแบบคือน้อยกว่า, มากกว่าหรือเท่ากัน เพียงแต่ค่าเฉลี่ยรวมของวิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอนจะดีกว่าวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอน จะใช้วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นพิจารณาเพียงแค่ตัวแปร x_i แล้วค่อยหาค่าตัวแปรอื่นๆ ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นที่พิจารณาทุกตัวแปรแล้ววิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอน ย่อมรับภาระในการพิจารณาตัวแปรที่น้อยกว่าซึ่งส่งผลให้หาคำตอบได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นที่ต้องพิจารณาทุกตัวแปร ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอน วิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนย่อมให้ผลที่ดีกว่าเสมอเนื่องจากวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนใช้วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นพิจารณาทุกตัวแปรตั้งแต่เริ่มแรก ในขณะที่วิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอน ไม่ได้ใช้วิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นตั้งแต่เริ่มแรกทำให้ค่าที่ดีที่สุดอาจถูกตัดทิ้งเพราะเงื่อนไขที่เกิดจากวิธีกำหนดการเชิงเส้นในตอนต้น

ถึงแม้ว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนให้ค่าที่ดีที่สุดเสมอในการทดลองเดียวกัน แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวมค่าที่ได้

แทบไม่แตกต่างกันมากนัก จากจุดนี้ผู้วิจัยจึงนำผลการทดลองไปทดสอบความแตกต่างทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One Way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้ค่า P-Value ที่ 0.174 ซึ่งมากกว่า 0.05 ทำให้สรุปได้ว่าทั้ง 3 วิธีให้ผลที่ไม่แตกต่างกันในทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

7. สรุปผล

จากผลการทดลองด้านคุณภาพ คำตอบที่ได้จากทั้ง 3 วิธีให้ผลที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติในระดับนัยสำคัญที่ 0.05 หากแต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดคำตอบที่ได้จากวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนจะดีกว่าเสมอในทุกผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับทุกวิธี โดยมีค่าเฉลี่ย 0.0475% เมื่อเทียบกับขอบเขตล่าง ในขณะที่วิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอนและวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีค่าเฉลี่ย 0.0495% และ 0.0556% ตามลำดับ ส่วนผลการทดลองด้านเวลาการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่วิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอนจะใช้เวลาน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอน ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้มีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาประมวลกับขนาดของปัญหาเป็นสมการเชิงเส้นตรงเพียงแต่วิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนจะมีความชันที่น้อยกว่าทำให้ในกรณีที่ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นวิธีเบนเดอร์ 1 ขึ้นตอนจะใช้เวลาน้อยกว่าวิธีเบนเดอร์ 2 ขึ้นตอน ในส่วนของวิธีจำนวนเต็มเชิงเส้นมีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาประมวลกับขนาดของปัญหาเป็นสมการพหุนามกำลังสอง ทำให้เมื่อปัญหาที่มีขนาดใหญ่จะใช้เวลามากกว่า 2 วิธีที่กล่าวมาอย่างชัดเจน รวมทั้งอาจไม่สามารถหาคำตอบได้เพราะปัญหามีขนาดที่ใหญ่เกินไป นอกจากนั้นแล้วยังสามารถสรุปได้เพิ่มเติมว่า การเพิ่มคาบเวลาจะส่งผลให้ใช้เวลาหาคำตอบมากกว่าการเพิ่มจำนวนสถานการณ์ในโครงสร้างปัญหาชนิดนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dantzig, G.B. Linear Programming Under Uncertainty. *Management Science*, 1995; 1: 197-206.
- [2] Benders, J. F. Partitioning procedures for solving mixed- variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 1962; 4(3): 238-252.
- [3] Leon, S. L. Optimization Theory for Large Systems. Mineola, New York: Dover Publications, 2002; 523.
- [4] Wagner, H.M. Principles of Operations Research. Prentice-Hall, Inc., 1975.
- [5] Infanger, G. Planning Under Uncertainty. The Scientific Press Series, Boy and Fraser, 1994.
- [6] วณิดา เลิศพัฒนานนท์ สุภัสญา โชตยะกุล ศิริประภา มโนมัยย์ และพิรยุทธ ชาญเศรษฐีกุล. การแก้ปัญหาการกำหนดการ फैนกลุ่มด้วยวิธีการรวมทางเลือกของข้อจำกัด กรณีศึกษาปัญหาโภชนาการ. การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ, 2557; 5-7.
- [7] พิธิษฐ์ แสงชูโต พิษณุ ทองขาว สมศักดิ์ เชื้อกิตติศักดิ์ และพิรยุทธ ชาญเศรษฐีกุล. การวางแผนการผลิตรวมภายใต้ปริมาณความต้องการไม่แน่นอนโดยใช้วิธีกำหนดการ फैนกลุ่ม. การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ, 2551; 25-32.
- [8] วิชัย รุ่งเรืองอนันต์. การหาปริมาณการสั่งซื้อที่มีความต้องการผันแปรแบบไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรั ดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.
- [9] สุพัฒตรา เกษราพงศ์ มิตรมานิ ดรีวัฒนาวงศ์ ประภาพรรณ เกษราพงศ์ มาริสา แก้วสุวรรณ แก้วปิ่น อมตเวทย์ และพิรยุทธ ชาญเศรษฐีกุล. การแก้ปัญหาการควบคุมสินค้าคงคลังภายใต้ความต้องการที่มีความไม่แน่นอนและผันแปรตามเวลา. *วารสาร Thai VCML*, 2552; 2(2): 133-145.
- [10] อภิศักดิ์ วิทยาประชากร พิรยุทธ ชาญเศรษฐีกุล และพิเชฐ พุ่มเกสร. การแบ่งส่วนของเบนเดอร์ร่วมกับวิธีเฉพาะทางในการแก้ปัญหาที่ย่อยที่เกี่ยวข้องสำหรับการวางแผนการผลิต/สินค้าคงคลัง ที่มีปริมาณความต้องการไม่แน่นอนในช่วงเวลาจำกัด. การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติ, 2559; 23-31.



พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ในการควบคุมอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ Heat Transfer Behavior of Phase Change Material for Controlling Solar Cell Module Temperature

วาท ชุน¹, อรรถกร อาสนคำ^{1*}, ธรณิศว์ ดีทยา¹, วรศิษฐ์ ตรุทัศน์วิน² และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์¹
Vat Sun¹, Attakorn Asanakham^{1*}, Thoranis Deethayat¹, Warasid Trutassanawint² and
Tanongkiat Kiatsirirot¹

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ 10400

¹Thermal System Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of
Engineering, Chiang Mai University
239 Huaykaew Road, Muang District, Chiang Mai 50200

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahidol University, Bangkok 10400
*E-mail: attakorn_asanakham@hotmail.com

บทคัดย่อ

สารเปลี่ยนสถานะเชิงพาณิชย์ RT42 ถูกบรรจุด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของ
โมดูล โดยสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิจุดหลอมตัวประมาณ 42°C จะช่วยลดอุณหภูมิโมดูลเมื่อรับรังสีอาทิตย์ ไม่ให้มีค่า
สูงมาก ทำให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าโมดูลปกติ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ศึกษาทดสอบจะเป็นชนิดโพลีคริสตัลไลน์
ขนาด 195.6 cm x 99.2 cm กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 250 Wp เอียงทำมุม 10° จากแนวระดับ หันหน้าทางทิศใต้ และ
สารเปลี่ยนสถานะมีความหนา 5 cm เมื่ออุณหภูมิในชั้นสารเปลี่ยนสถานะถึงจุดหลอมตัว สารเปลี่ยนสถานะจะอยู่ในสภาพ
ของเหลวและรอยต่อระหว่างเฟสจะเลื่อนลงมาเรื่อย ๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วง
ที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง จากการทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิโมดูลจากประมาณ 57°C จะลดลงเหลือ
ประมาณ 49.8°C อุณหภูมิในชั้นสารเปลี่ยนสถานะจะถูกคำนวณโดยวิธีการคำนวณเอนทัลปีในรูปไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์
เชิงเลข แบบหนึ่งมิติ เมื่อเทียบกับผลการทดสอบจริง ภายใต้สภาพอากาศจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งพบว่าสามารถทำนายอุณหภูมิ
สารเปลี่ยนสถานะที่บริเวณผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ค่อนข้างดี แต่จะต้องมีการปรับค่าสภาพการนำความร้อน ในบริเวณ
ที่สารเปลี่ยนสถานะเริ่มอยู่ในรูปของเหลวเนื่องจากผลของการพาความร้อน จากการทดสอบในวันที่อากาศมีอุณหภูมิสูง
และท้องฟ้าแจ่มใส พบว่าสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ทดสอบ ควรมีความหนาน้อยกว่า 5 cm ซึ่งสารจะไม่หลอมตัวหมด
คำสำคัญ: โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ สารเปลี่ยนสถานะ การควบคุมอุณหภูมิ วิธีเอนทัลปี การคำนวณเชิงตัวเลข

ABSTRACT

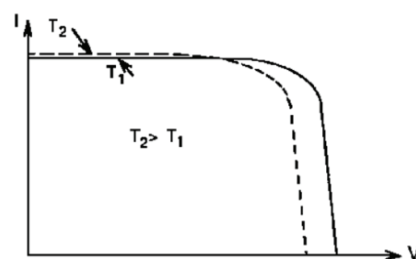
A commercial RT42 phase change material (PCM) contained at the back of a solar cell module for controlling the module temperature. The PCM melting point was around 42°C which could reduce the module temperature to be lower than that of the normal solar cell module thus more power generation could be obtained. The studied module was polycrystalline type of which the dimensions

were 1956 mm x 992 mm and the peak power was 250 Wp. The module was facing south with 10° inclination. The PCM thickness was 5 cm. As the PCM temperature reached the melting point the PCM was in liquid phase and the phase boundary was moving into the neighbor solid region thus the solar cell module temperature could be reduced, especially the unit operating under high solar radiation level which was around 57°C to be 49.8°C . The PCM temperature was predicted by one-dimensional finite difference enthalpy method. The simulated results were quite close to those of the experimental data but the thermal conductivity should be modified in the PCM liquid region due to the convection effect. The PCM thickness should be over 5 cm to prevent melting throughout the whole body.

Keywords: Solar cell module, Phase change material, Enthalpy method, Numerical calculation

1. บทนำ

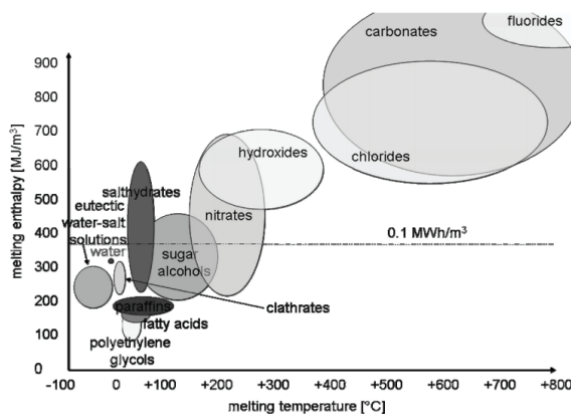
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด โพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline solar cell) นิยมนำมาใช้ในโซลาร์ฟาร์ม (Solar farm) และโซลาร์รูฟท็อป (Solar rooftop) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากมีอายุการทำงานที่ยาวนาน ราคาไม่แพงและประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบุที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak power output) ซึ่งจะได้จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานที่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ $1,000 \text{ W/m}^2$ และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 25°C ซึ่งในความเป็นจริง ค่าความเข้มรังสีส่วนใหญ่จะต่ำกว่า และอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงกว่าเงื่อนไข การทดสอบที่มาตรฐาน ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมาตรฐาน ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจะลดลง 0.4% ถึง 0.5% ในทุกๆ 1°C ที่เพิ่มขึ้น [1-3] รูปที่ 1 แสดง I-V curve ของโมดูล [4] จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเซลล์หรือโมดูลเพิ่มขึ้น จะให้กำลังไฟฟ้าที่ลดลง โดยค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) จะมีค่าลดลงชัดเจน ขณะที่ค่ากระแสลัดวงจร (Short circuit current) มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นการระบายความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นในการลดอุณหภูมิโมดูล เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1 โค้ดแกรม I-V ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [4]

การระบายความร้อนมีหลายรูปแบบส่วนใหญ่เป็นการระบายความร้อนแบบแอคทีฟ (Active cooling) เช่น การระบายความร้อนของ Abdozadeh and Ameri [5] โดยสเปรย์น้ำลงบนหน้าโมดูลทำให้อุณหภูมิโมดูลมีค่าใกล้เคียงกับอากาศโดยรอบ นอกจากนี้มีการใช้น้ำมาระบายความร้อนที่ได้โมดูล ซึ่งจะได้น้ำร้อนมาใช้ประโยชน์ด้วย นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้า [6] Teo et al. [7] อรรถกร อาสนคำและคณะ [8] ได้ทำการทดสอบการระบายความร้อน โดยมีการเป่าระบายลมด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ระดับหนึ่ง ธนัญญ์ ลังกาดี และอรรถกร อาสนคำ [9] ยังได้ใช้เทคนิคข้างต้น ช่วยในการควบคุมอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีการติดตั้งบนหลังคา ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าในช่วงที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูงเพิ่มจากเดิมประมาณ 10% อย่างไรก็ตาม การระบายความร้อนแบบแอคทีฟมีการใช้พลังงานจากภายนอก ทำให้กำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้เพิ่มขึ้นมาก และกำลังไฟฟ้าสุทธิอาจต่ำกว่าค่าที่ได้จากโมดูลปกติ

การใช้สารเปลี่ยนสถานะ เพื่อลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้สารเปลี่ยนสถานะในรูปของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid phase change material, PCM) ซึ่งจะเป็นวิธีแบบพาสซีฟ (Passive technique) โดยที่ไม่มีการใช้พลังงานจากภายนอก ความร้อนจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้สารเปลี่ยนสถานะหลอมตัวเป็นของเหลว ทำให้อุณหภูมิโมดูลลดลงเข้าสู่ใกล้จุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ และสารทำงานที่อยู่ในสภาพของเหลวจะคืนตัวกลับเป็นของแข็งในเวลากลางคืน ทำให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ในตอนกลางวัน



รูปที่ 2 ค่าเอนทัลปีในการหลอมเหลวและอุณหภูมิในการหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะชนิดต่างๆ [10]

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเอนทัลปีในการเปลี่ยนสถานะ (Melting enthalpy) และอุณหภูมิหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ๆ [10] สารประเภทพาราฟิน กรดไขมัน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะมีจุดหลอมตัว ระหว่าง 0-130 °C ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สาร RT42 ที่มีจุดหลอมตัวประมาณ 42°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมพอสมควร ซึ่งจะคงสภาพเป็นของแข็งอยู่ได้ก่อนนำมาใช้งาน รวมถึงมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวค่อนข้างสูง

งานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวกับการใช้สารเปลี่ยนสถานะ มาใช้ในรูปแบบตัวเก็บสะสมพลังงานความร้อน Charvát et al. [11] ได้ใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นระบบเก็บรักษาพลังงานความร้อนในช่วงการทำงานอุณหภูมิ

แคบๆ ของระบบผลิตอากาศร้อน Kosny [12] Mehling et al. [13] ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร ช่วยลดการใช้พลังงานในอาคาร Alawadhi [14] ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับกำแพงอิฐ ช่วยลดความร้อนเข้าในตัวอาคารในช่วงอากาศร้อน นอกจากนี้มีการนำสารเปลี่ยนสถานะ RT25 ไว้ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นส่วนหนึ่งของอาคาร (Building integrated PV, BiPV) เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิโมดูล [15] ซึ่งพบว่าอุณหภูมิโมดูลสามารถควบคุมให้ต่ำกว่า 29°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 750 W/m² และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ 23°C

จากงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเห็นได้ว่าการใช้สารเปลี่ยนสถานะติดตั้งด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยดึงความร้อนจากโมดูล โดยใช้ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิโมดูล โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาโมเดลเพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิในชั้นสารเปลี่ยนสถานะ และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในชั้นสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เอนทัลปี และเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณ คือ วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบเอ็กซ์พลิซิท (Explicit finite difference) แบบหนึ่งมิติ เนื่องจากมุมเอียงของโมดูลไม่สูงมากประมาณ 10° จากแนวระดับ โดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณาจะเป็นโมดูลชนิดโพลีคริสตัลไลน์ กำลังผลิตสูงสุดที่มาตรฐาน 250 W_p โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ RT42 แนบติดอยู่ด้านหลังโมดูล

2. การวิเคราะห์เอนทัลปี

การวิเคราะห์สมบัติสารเปลี่ยนสถานะในรูปแบบเอนทัลปีสามารถวิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงการรับความร้อนที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ และช่วงที่สารเปลี่ยนสถานะหลอมตัว สมการการนำความร้อนสามารถเขียนในรูป

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T). \quad (1)$$

h คือเอนทัลปีจำเพาะ ρ คือความหนาแน่น k คือสภาพการนำความร้อน และ T คืออุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะ

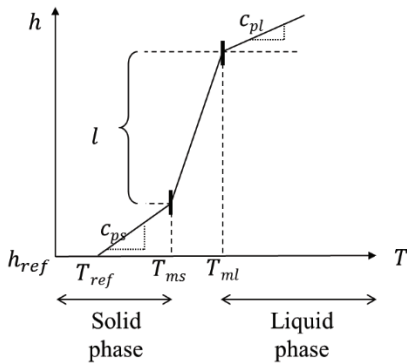
รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของเอนทัลปีจำเพาะที่อุณหภูมิต่างๆ โดยขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากสารทำงานส่วนใหญ่เป็นพวกพาราฟิน อุณหภูมิสารทำงานขณะที่เปลี่ยนสถานะจะมีค่าไม่คงที่

ขณะเปลี่ยนสถานะ:

$$\begin{aligned} h &= c_{ps}(T - T_{ref}), T < T_{ms} \\ &= c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + \frac{T - T_{ms}}{T_{ml} - T_{ms}}l, \\ &= c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + l + c_{pl}(T - T_{ml}), \\ &T > T_{ml} \end{aligned} \quad (2)$$

ดังนั้นค่าอุณหภูมิสามารถจัดได้ในรูป

$$\begin{aligned} T &= T_{ref} + \frac{h}{c_{ps}}, h < c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) \\ &= T_{ms} + \frac{[h - c_{ps}(T_{ms} - T_{ref})](T_{ml} - T_{ref})}{l}, \\ c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) &\leq h \leq c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + l \\ &= T_{ml} + \frac{h - l}{c_{pl}} - \frac{c_{ps}}{c_{pl}(T_{ms} - T_{ref})}, \\ h &> c_{ps}(T_{ms} - T_{ref}) + l \end{aligned} \quad (3)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีจำเพาะและอุณหภูมิ

ในระหว่างที่มีการหลอมตัว สมบัติทางความร้อนต่างๆ จะพิจารณาจากสัดส่วนเชิงมวลในการผสมของแต่ละเฟส (Phase) โดยความหนาแน่นของสาร 2 สถานะ:

$$\rho = (1 - g)\rho_s + g\rho_l. \quad (4)$$

สภาพการนำความร้อนของสาร 2 สถานะ:

$$k = (1 - g)k_s + gk_l. \quad (5)$$

ตัวห้อย s และ l แสดงสถานะของแข็งและของเหลวตามลำดับ g คือสัดส่วนของเหลวเชิงมวลซึ่งสามารถคำนวณจาก

$$g = \begin{cases} 0, & T < T_m \\ \frac{h - c_{ps}(T_m - T_0)}{l}, & T = T_m \\ 1, & T > T_m \end{cases} \quad (6)$$

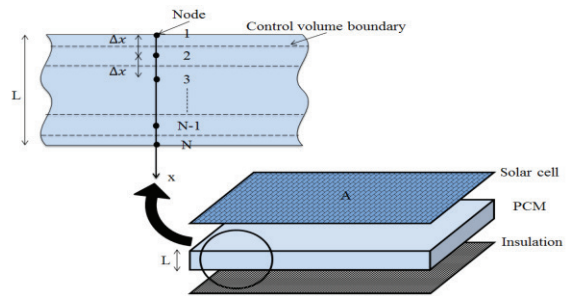
3. การคำนวณเชิงเลข

สารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ด้านหลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะรับความร้อนจากโมดูล และถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมตัว บางส่วนของสารเปลี่ยนสถานะจะเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้อุณหภูมิโมดูลลดต่ำลง โดยพยายามเข้าใกล้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ

ในการประเมินหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชั้นของสารเปลี่ยนสถานะจะใช้วิธีการเชิงเลข โดยแบ่งชั้นสารเปลี่ยนสถานะ ออกเป็นชั้นย่อยๆ หนา Δx ดังแสดงในรูปที่ 4 และกำหนด Node ตามจำนวนชั้น ทั้งนี้การคำนวณจะพิจารณาการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิเพียง 1 มิติ โดยสมมุติการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นถ่ายเทตามทิศทางความหนาของสารเปลี่ยนสถานะเท่านั้น ค่าความหนาของชั้นย่อย Δx จะคำนวณได้จาก

$$\Delta x = \frac{L}{N - 1}. \quad (7)$$

L คือความหนาของสารเปลี่ยนสถานะ และ N คือจำนวน Nodes



รูปที่ 4 การแบ่งชั้นการคำนวณในชั้นของสารเปลี่ยนสถานะ

ที่ Node ใดๆ โดย $i=2, 3, \dots, N-1$ สมดุลพลังงานที่ Node นั้น จะพิจารณาจากอัตราความร้อนที่เกิดจากการนำ

ความร้อน และพลังงานสะสมใน Node นั้น แต่ละ Node มีความหนา Δx ซึ่งสามารถเขียนในรูป

$$\dot{Q}_{i-1 \rightarrow i} + \dot{Q}_{i+1} = \rho(A\Delta x) \frac{dh}{dt},$$

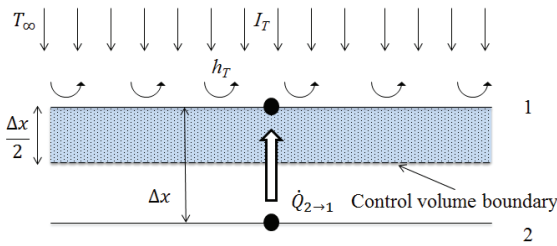
$$\frac{kA}{\Delta x}(T_{i+1}^t - T_i^t) + \frac{kA}{\Delta x}(T_{i-1}^t - T_i^t) = \rho(A\Delta x) \frac{h_i^{t+\Delta t} - h_i^t}{\Delta t},$$

นั่นคือ

$$h_i^{t+\Delta t} = h_i^t + \frac{k}{\rho \Delta x^2} (T_{i+1}^t + T_{i-1}^t - 2T_i^t) \Delta t. \quad (8)$$

สารเปลี่ยนสถานะที่ Node 1 จะมีความหนา $\Delta x/2$ อุณหภูมิที่ Node 1 จะถือว่าเท่ากับอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สมมติว่าบางมาก อุณหภูมิโมดูลจะมีค่าเท่ากับทั้งหมด สมดุลพลังงานที่ Node 1 ในรูปที่ 5 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{sr} + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{cv} + \dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{\partial h_1}{\partial t},$$



รูปที่ 5 การถ่ายเทความร้อนที่ Node 1

จากรูปที่ 5 จะได้

$$(\tau\alpha)I_T A + h_T A(T_\infty - T_1) + \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_{sky}^4) + \frac{kA}{\Delta x}(T_2^t - T_1^t) = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{h_1^{t+\Delta t} - h_1^t}{\Delta t},$$

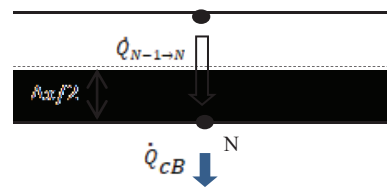
$$h_1^{t+\Delta t} = h_1^t + 2 \frac{k}{\rho \Delta x^2} (T_2^t - T_1^t) \Delta t + 2 \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} [h_T(T_\infty - T_1^t) + I_T(\tau\alpha) + \varepsilon\sigma(T_1^t - T_{sky}^t)]. \quad (9)$$

I_T คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์บนระนาบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ($\tau\alpha$) คือผลคูณการส่องผ่านและดูดกลืนรังสีของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ A คือพื้นที่รับรังสี T_∞ คืออุณหภูมิอากาศโดยรอบ T_{module} คืออุณหภูมิโมดูล h_T คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณจาก [18]

$$h_T = 3.0 w + 2.8. \quad (10)$$

w คือความเร็วลมในหน่วย m/s ซึ่งในงานนี้ใช้ที่ค่า 1.4 m/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ยของจังหวัดเชียงใหม่ [15] ε คือค่าสภาพการเปล่งรังสีความร้อน (Thermal emissivity) ของผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า 0.91 [HYPERLINK \l "Arm101" 14]. σ คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann constant มีค่าเท่ากับ $5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ T_{sky} และ T_∞ คืออุณหภูมิท้องฟ้าและอุณหภูมิอากาศในหน่วย K คำนวณจาก [16]

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_\infty^{1.5}. \quad (11)$$



รูปที่ 6 ทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ Node N

รูปที่ 6 แสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อนที่ Node N และสมดุลพลังงานที่ Node N จะอยู่ในรูป

$$\dot{Q}_{N-1 \rightarrow N} + \dot{Q}_{CB} = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{\partial h_N}{\partial t},$$

$$\frac{kA}{\Delta x}(T_{N-1}^t - T_N^t) + h_B \cdot A \cdot (T_\infty^t - T_N^t) = \rho \left(A \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{h_N^{t+\Delta t} - h_N^t}{\Delta t},$$

จะได้

$$h_N^{t+\Delta t} = h_N^t + 2 \frac{k}{\rho \Delta x^2} (T_{N-1}^t - T_N^t) \Delta t + 2 \frac{k}{\rho \Delta x^2} h_B (T_\infty^t - T_N^t) \Delta t. \quad (12)$$

h_B ใช้ค่าในสมการ (10) เช่นเดียวกัน แต่กำหนดให้ความเร็วเข้าใกล้ศูนย์ และในการจำลองการทำงาน Δx และ Δt ใช้ค่า 1 mm และ 1 s ตามลำดับ

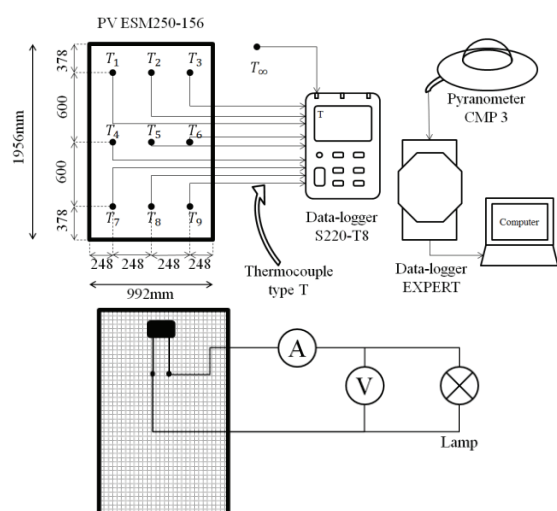
4. การทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (EVEREXCEED EMS250-156) ขนาด 195.6 cm x 99.2 cm ซึ่งให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 250W_p ที่ สภาวะทดสอบมาตรฐาน (1,000 W/m² irradiance, Air mass AM1.5, Cell temperature 25°C) ด้านหลังโมดูลบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ

RUBITHERM RT42 หน้า 5 cm สมบัติของสารเปลี่ยนสถานะแสดงในตารางที่ 1 ขณะเดียวกัน จะมีโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่มีลักษณะและสมรรถนะเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมในการทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ สำหรับสาร RT42 สำหรับอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสถานะของสารดังกล่าวอยู่ที่ 38-43°C [17]

ตารางที่ 1 สมบัติสารเปลี่ยนสถานะ [17]

Model	RT35	RT42	RT47	RT55
Melting point [°C]	35	42	47	55
Latent heat [kJ/kg]	160	174	170	172
Specific heat [kJ/kg-K]	2			
Density [kg/m ³]	(s) 860 (l) 770	880 760	880 770	880 770
Thermal conductivity [W/m-K]	0.2			



รูปที่ 7 ลักษณะชุดทดสอบ และตำแหน่งในการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาทดสอบกลางแจ้ง โดยหันหน้าไปทางทิศใต้และเอียงทำมุม 10° จากแนวระดับ เทอร์โมคัปเปิลชนิด T จะถูกวัดที่ผิวของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสัมผัสกับสารเปลี่ยนสถานะ 9 จุด ตามตำแหน่งแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังมีการวัดอุณหภูมิใน

ชั้นความหนาของสารเปลี่ยนสถานะอีก 9 จุด ในลักษณะเดียวกันที่ความหนาถึงกลาง และที่ความหนา 5 cm นอกจากนี้ยังมีการวัดอุณหภูมิอากาศรอบๆ โดยความละเอียดของเครื่องมือวัด $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ค่ารังสีอาทิตย์บนระนาบโมดูลจะวัดด้วย CMP3 Pyranometer ความละเอียดในการวัด $\pm 10\%$ กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะวัดจาก Multi-meter UNI-T UT20 โดยมีภาระทางไฟฟ้าที่เป็นหลอดแสงสว่างขนาด 150 W (13117 150W GX5.3 17V 1CT) 2 ดวง

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูล จะคำนวณจาก

$$P_g = V \times I. \quad (13)$$

5. ผลการศึกษา

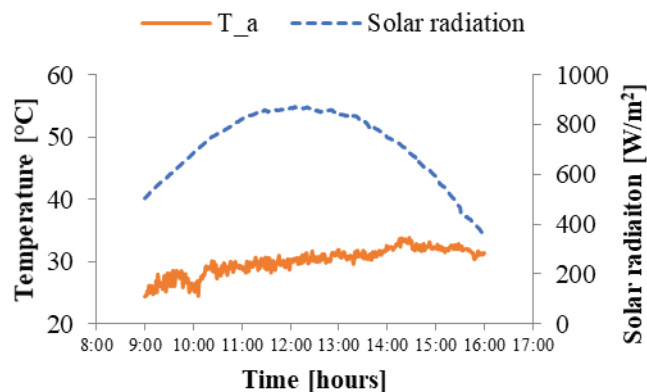
ในการศึกษาจะเลือกวันที่มีท้องฟ้าแจ่มใส ได้แก่ วันที่ 2 ธันวาคม 2558 การทดสอบใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ รูปที่ 8 แสดงข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิโมดูลก่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น โดยอุณหภูมิแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 1.5°C อุณหภูมิผิวด้านหน้าและด้านหลังของโมดูลพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1°C

รูปที่ 9 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่มีและไม่มีแผ่น PCM ที่ด้านหลังของโมดูล จะพบว่าความร้อนที่ดูดกลืนโดยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกถ่ายเทให้กับสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้อุณหภูมิโมดูลลดลงตั้งแต่เช้าถึงช่วงบ่าย ที่เวลาประมาณ 13:00 น. โมดูลที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะมีอุณหภูมิประมาณ 57°C โดยโมดูลที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิเพียง 49.8°C อย่างไรก็ตามในเวลาประมาณ ตั้งแต่ 15:00 น. เป็นต้นไป ความเข้มรังสีอาทิตย์ตกลงมาก อุณหภูมิโมดูลที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะลดลงอย่างรวดเร็ว ตามค่ารังสีอาทิตย์ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่โมดูลที่มีสารเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิจะค่อนข้างคงที่

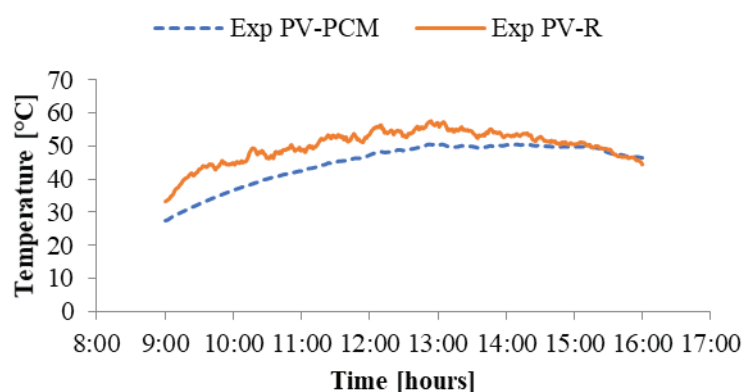
เนื่องจากการสะสมความร้อนในสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้อุณหภูมิโมดูลในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ มีแนวโน้มที่จะลดต่ำกว่าโมดูลที่มีการเปลี่ยนสถานะ

รูปที่ 10 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิในสารเปลี่ยนสถานะ บริเวณแกนกลางของโมดูล (T2, T5, T8) จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ Y คือระยะตามความยาวของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และ X คือระยะจากผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปในตอนเริ่มต้น อุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะจะมีค่าต่ำและค่อนข้างสม่ำเสมอในรูปของแข็ง ที่เวลาประมาณ 11:00 น. เมื่ออุณหภูมิผิวโมดูลสูงมากพอ จะทำให้ชั้นสารเปลี่ยนสถานะบางส่วนละลาย และมีความร้อนถูกถ่ายเทมายังชั้นถัดไป ซึ่งลักษณะ

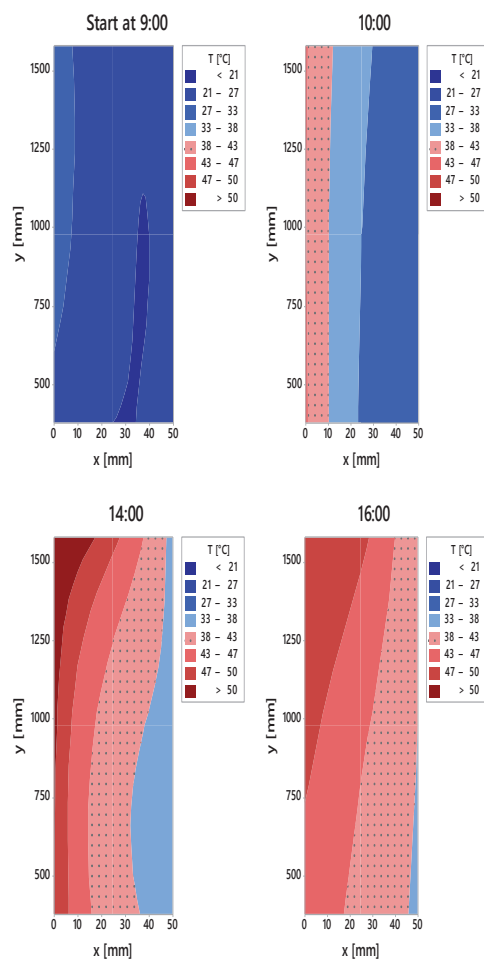
การแบ่งชั้นอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะจะมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ที่มีความหนาแต่ละชั้นค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่เมื่ออุณหภูมิโมดูลมีค่าสูงขึ้น ทำให้มีการหลอมตัวละลายเป็นของเหลวมากขึ้น จะมีผลของการพาความร้อนในชั้นของเหลว ดังเช่นที่เวลาประมาณ 14:00 น. สารเปลี่ยนสถานะบริเวณด้านบน (Y มีค่าสูง) ดูเหมือนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณส่วนล่าง ทำให้มีของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง อยู่ในปริมาณที่มาก ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังชั้นอื่นๆ ได้ดีกว่าบริเวณส่วนล่าง ทำให้ขอบเขตการเปลี่ยนสถานะลงมาถึงกว่าบริเวณส่วนของโมดูล (Y มีค่าต่ำ) และเมื่อเวลาประมาณ 16:00 น. สารเกือบทั้งหมดหลอมละลาย



รูปที่ 8 ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์บนระนาบ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส 2 ธันวาคม 2558



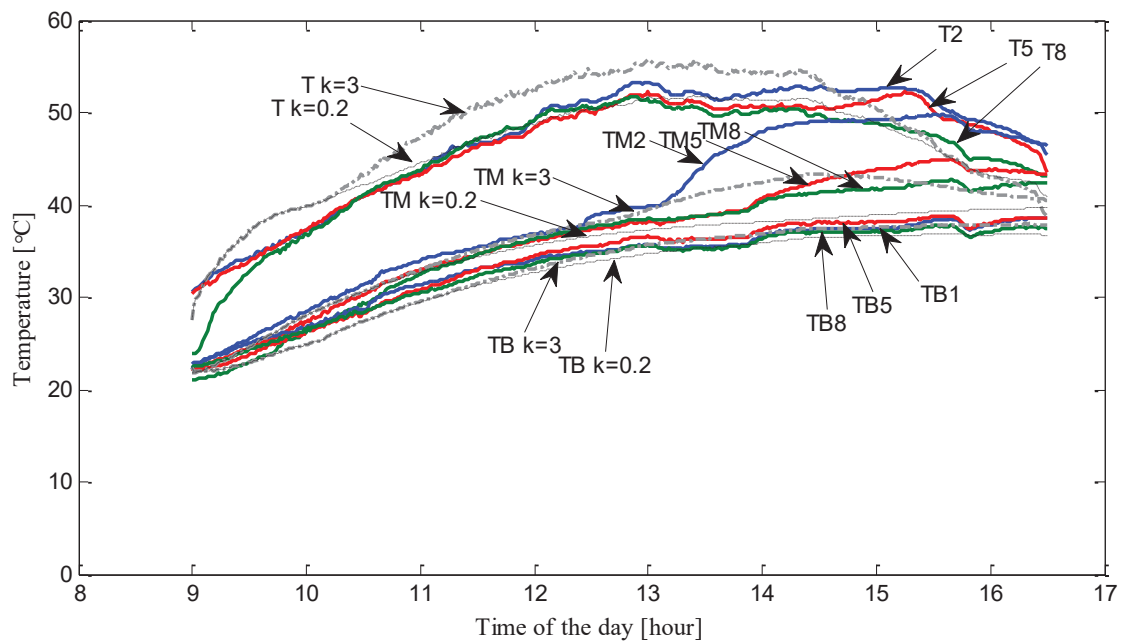
รูปที่ 9 ผลการทดสอบอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์กรณีมีและไม่มีติดตั้งสาร RT42 หนา 5 cm ช่วยในการระบายความร้อน การทดสอบวันที่ 2 ธันวาคม 2558 (PV-PCM คือโมดูลที่มี PCM PV-R คือโมดูลที่ไม่มี PCM)



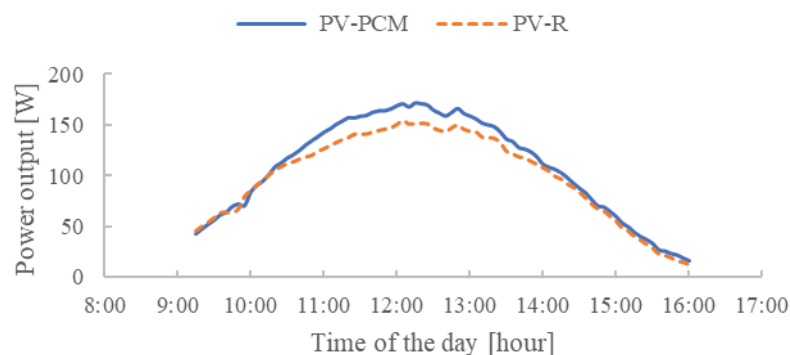
รูปที่ 10 ลักษณะการกระจายอุณหภูมิในสารเปลี่ยนสถานะตรงกับตำแหน่งที่ผิวบน ความลึกตรงกลาง และผิวล่างสุด การทดสอบ วันที่ 2 ธันวาคม 2558

รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่ระดับความลึกต่างๆ จากการคำนวณด้วยวิธีเอนทัลปี และผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าในช่วงเช้า อุณหภูมิสารทำงานยังไม่สูงมาก ผลการคำนวณยังสอดคล้องอย่างดีกับผลการทดลอง แต่ในช่วงบ่ายเช่น เวลาประมาณ 14:00 น. มีการหลอมละลายเป็นของเหลวมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณ

ตอนบนของสาร ซึ่งมีความหนาของของเหลวมากกว่า บริเวณตอนล่าง ในกรณีที่ใช้สมการคำนวณในลักษณะการนำความร้อนอย่างเดียว (Pure conduction) พบว่า การกระจายอุณหภูมิโดยเฉพาะที่บริเวณชั้นกลางของสาร ซึ่งอยู่ในสภาพ 2 สถานะ อุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองมาก อาจเกิน 20 % โดยเฉพาะในชั้นกลาง ซึ่งบางส่วนมีสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด และบางส่วนยังเป็นของแข็ง แต่เมื่อมีการปรับค่าสภาพการนำความร้อน k จาก $0.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ไปเป็นค่าในรูปแบบสภาพการนำความร้อนประสิทธิผล (Effective thermal conductivity) โดยรวมผลของการพาความร้อนด้วย โดยให้ k มีค่าสูงขึ้น เป็น $3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ในบริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่า 38°C ซึ่งพบว่า ค่าความแม่นยำในการทำนายจากสมการที่เสนอไว้ ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากขึ้น สำหรับการทำนายอุณหภูมิในชั้นล่างสุดให้ผลใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิสารไม่สูงมาก จึงอาจสรุปได้ว่าการใช้โมเดลการคำนวณเอนทัลปีแบบ 1 มิติ ให้ผลความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิได้ดีพอสมควร โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดของอุณหภูมิ ไม่เกิน 15 % อย่างไรก็ตาม การคำนวณด้วยวิธีเอนทัลปีในกรณีที่มีการหลอมเหลว ในชั้นสารเปลี่ยนสถานะ ควรจะมีการนำเทอมการพาความร้อนเข้ามาร่วมด้วย ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาโมเดลการคำนวณเพิ่มเติม เพื่อให้ผลการคำนวณแม่นยำมากขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่า ความหนาของสารเปลี่ยนสถานะไม่ควรต่ำกว่า 5 cm โดยที่สารเปลี่ยนสถานะบางส่วนยังอยู่ในสภาพของแข็ง เพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะยังสามารถรับความร้อนโดยใช้ผลของความร้อนแฝงอยู่ได้



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่ระดับความลึกต่างๆ จากการคำนวณด้วยวิธีเอนทัลปี เทียบกับค่าจากการทดลอง วันที่ 2 ธันวาคม 2558 ชุด TM, TB คือค่าอุณหภูมิ T2, T5 และ T8 ของสารเปลี่ยนสถานะ ที่ความลึกตรงกลางและด้านล่างสุดของชั้นสารเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ทดสอบ 2 ธันวาคม 2558 (PV-R คือโมดูลปกติ PV-PCM คือ โมดูลที่มีสาร PCM)

รูปที่ 12 แสดงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระที่เป็นหลอดไฟ ฟอสฟอเรสเซนต์ จากรูปจะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จากโมดูลสูงสุดที่เวลาประมาณ 12:20 น. มีค่าเท่ากับ 170.5 และ 151.84 W สำหรับโมดูลที่มีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ตามลำดับ โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 12.3%

6. สรุป

ผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า

1. สารเปลี่ยนสถานะ RT42 ช่วยลดอุณหภูมิโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้สามารถผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

2. เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะถึงจุดหลอมเหลว สารจะเปลี่ยนเป็นของเหลว และรอยต่อระหว่างชั้นของเหลว-ของแข็งจะเลื่อนตัวลงมาตามลำดับ ซึ่งพบว่าพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนแต่ละชั้นความลึกมีผลของการพาความร้อนเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นของเหลวด้วย และบริเวณด้านบนของสารเปลี่ยนสถานะรอยต่อระหว่างสถานะของเหลว-ของแข็งจะลงมาลึกกว่าบริเวณด้านล่าง เนื่องจากผลการพาความร้อน
3. วิธีคำนวณเอนทัลปี สามารถทำนายอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะได้ดีในระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องมี

การปรับค่า สภาพการนำความร้อนให้สูงขึ้น เมื่อสารหลอมตัวเป็นของเหลว

4. ในการทดสอบพบว่า ความหนาของสาร RT42 ไม่ควรต่ำกว่า 50 mm เพื่อสามารถทำงานตลอดวัน โดยไม่ละลายหมดสำหรับในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้อุปกรณ์สนับสนุนการวิจัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานหมุนเวียน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการสนับสนุนอุปกรณ์การทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Skoplaki, E. and J. A. Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 2009; 614-624.
- [2] Huang, M.J., Eames, P.C. and Norton, B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 2006; 6: 1121-1130.
- [3] Huang, M. J., Eames, P. C. and Norton, B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004; 2715-2733.
- [4] Jumrusprasert, P., Smith, G., and Kirkup, L. Comparing the Efficiency of Fixed Solar Cell Panels in a Tropical Location. Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V), Heidelberg, 2009; 1478-1483.
- [5] Abdolzadeh, M. and Ameri, M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*, 2009; 34: 91-96.
- [6] ณัฐนี วรรษวิภาวดี วงษ์สุวรรณ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ในประเทศไทย. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2552; 16 (2): 55-69.
- [7] Teo, H. G., Lee, P. S. and Hawlader, M. N. A. An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 2012; 90: 309-315.
- [8] อรรถกร อาสนคำ อิศระพงศ์ กันธิยะ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การทำนายสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ภายใต้การทำงานจริง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2558; 22 (3): 88-94.
- [9] ธนณัฐ ลังกาดี และ อรรถกร อาสนคำ. การประเมินสมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ในกรณีที่มีและไม่มีการระบายความร้อนด้วยอากาศ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*. 2559; 23 (3): 130-141.
- [10] Mehling, H. and Cabeza, L. F. Heat and Cold Storage with PCM-An Up to Date Introduction into Basis and Applications. Springer, 2008.
- [11] Charvát, P., Klimeš, L. and Ostrý, M. Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems. *Energy and Building*. 2014; 68: 488-497.

- [12] Kośny, J. PCM-Enhanced Building Components. Springer, 2015.
- [13] Al-Saadi, S. N. and Zhai, Z. Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 2013; 21: 659-673.
- [14] Biwole, P., Eclache, P. and Kuznik, F. Phase-change materials to improve solar panel's performance. *Energy and Building*. 2013; 62: 59-67.
- [15] เสริม จันท์ฉาย. Solar Radiation Data in Thailand, Laos, Cambodia and Myanmar (CD). บริษัทเพชรเกษมพรินติ้ง กรุ๊ป จำกัด, 2557.
- [16] Janna, W. S. Engineering Heat Transfer. CRC Press, 2009.
- [17] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, 2013.
- [18] [Online] Available: <https://www.econologie.info/share/partager/1239222906x5EDv2.pdf> (June 30, 2017).



การเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหิน ขนาดเล็กด้วยการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้า EFFICIENCY INCREASE ON SMALL COAL DUST PARTICLES CAPTURE BY ELECTRICAL - CHARGED WATER SPRAY

อรรถกร อาสนคำ ชัญญกร จันทพิมพะ และ พิเชษฐ์ ทานิล

Attakorn Asanakham, Chanyagrid Jantapimpa, and Piched Thanil

หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200

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

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

E-mail: attakorn_asanakham@hotmail.com

Telephone Number: 0918580668, 0924590550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินขนาดเล็กด้วยการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าเทียบกับการดักจับฝุ่นขนาดเล็กด้วยการสเปรย์น้ำที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและสร้างเครื่องต้นแบบในการดักจับอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กด้วยละอองน้ำที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งอนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ แป้งฝุ่นเป็นตัวแทนฝุ่นถ่านหิน ทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นโดยเปรียบเทียบจากน้ำหนักของแผ่นกรองก่อนและหลังการทดสอบ กรณีแรกจะทดสอบในห้องทดสอบขนาดสูง 3 เมตร กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร เพื่อหาประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค โดยฉีดสเปรย์น้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าขนาด 5 kV ที่อัตราการไหล 3.22 มิลลิลิตรต่อวินาที กรณีที่สองจะทดสอบจะทดสอบในอุโมงค์ลมวางในแนวนอน เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อการดักจับอนุภาคโดยทดสอบ 3 รูปแบบคือ ไม่มีการสเปรย์น้ำ สเปรย์น้ำ และสเปรย์น้ำที่มีการชาร์จประจุ

จากการคำนวณเพื่อป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าในอากาศจะติดตั้งลวดอิเล็กโทรดขนาดครีมี 0.05 เซนติเมตร ทำเป็นแบบวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร โดยให้เส้นลวดวางห่างจากหัวฉีด 2.2 เซนติเมตร การทดลองในกรณีแรกพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการสเปรย์น้ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคเพิ่มขึ้น กรณีที่สองพบว่าช่วงที่ความเร็วอากาศเป็น 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที เมื่อชาร์จประจุให้กับละอองน้ำ ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคจะสูงขึ้นประมาณ 35% และช่วงที่ความเร็วอากาศเป็น 0.3-1 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคของวิธีการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะเริ่มมีค่าลดลงเข้าใกล้กับวิธีที่สเปรย์น้ำที่ไม่มีประจุไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดักจับแบบที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าก็ยังคงมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 20 %
คำสำคัญ: ละอองน้ำที่มีประจุไฟฟ้า, ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น, อุโมงค์ลม, ความเร็วอากาศ, อิเล็กโทรดแบบวงแหวน
ซ่อนแกนร่วม

ABSTRACT

The goal of this research was to increase performance of small coal dust particles captured by electrical charged water spray compared with that by water spray only. A testing model for particle capture was constructed by electrical charged water spray. Particles used in the test were talc powder that is represented coal powder. The capture efficiency could be evaluated from the weights of the air filter before and after the test. The first experimental case was performed in a test room with dimensions of 3 m height x 2 m width x 2 m length. The capture efficiency by electrical charged water spray was done with 5 kV high voltages and the water flow rate of 3.22 ml/s. The second experiment case was performed in a horizontal wind tunnel for studying influence of air velocity effect on particle capture. Three methods, no water spray, water spray, and electrical charged water spray, were carried out.

To protect electrical breakdown, the appropriate electrode ring diameter with a wire having a radius of 0.05 cm was 4 cm with a distance 2.2 cm from the nozzle. From the first experiment, it was found that, the capture efficiency increased with the increased time of water spraying. For the second experiment, while the range of air velocity was 0.1-0.3 m/s with electrical charging, the capture efficiency increased about 35%. In addition, while the range of air velocity was 0.3-1 m/s, the capture efficiency of electrical charged water spray was reduced and close to that with no electrical charged condition. However, the capture efficiency of the electrical charging condition was about 20% higher on average.

Keywords: Electrical charged water spray, Capture efficiency, Air velocity, Ring-axis electrode

1. บทนำ

โรงไฟฟ้าถ่านหิน จะมีการลำเลียงถ่านหินจากลานกองถ่านหิน มาตามสายพานและเติมในอ่างเก็บถ่านหินเพื่อใช้สำหรับถ่านหินที่จะใช้เผาไหม้ [1] ทั้งนี้ขนาดของถ่านหินจะถูกบดให้มีขนาดละเอียดราว 200 mesh เพื่อป้อนเข้าห้องเผาไหม้ [2] ดังนั้นจึงเกิดปัญหาการฟุ้งกระจายของฝุ่นที่เกิดจากเชื้อเพลิงจำพวก ถ่านหิน ในระหว่างขนย้ายสำหรับเตรียมเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศบริเวณโรงไฟฟ้าและผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงานหรืออาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง [3] โดยปกติแล้วทางโรงไฟฟ้าจะแก้ปัญหานี้ด้วยการฉีดสเปรย์น้ำ [4] ส่งผลให้เชื้อเพลิงเกิดความชื้นขึ้นประสิทธิภาพในการเผาไหม้จึงลดลง [5] หรืออาจเสียเวลาในการลดความชื้นให้กับเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้

การใช้สนามไฟฟ้าแรงดันสูงสร้างประจุไฟฟ้าให้กับสเปรย์น้ำเพื่อใช้ในการดักจับอนุภาคฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย โดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงชาร์จประจุให้กับสเปรย์น้ำ ซึ่งเทคนิคนี้เรียกว่า Cloud Chamber Scrubber (CCS) และเทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคถึง 93% โดยสามารถลดปริมาณอนุภาคขนาดเล็ก

กว่า 1 ไมครอนที่แขวนลอยในอากาศได้สูงสุดถึง 87% [6]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่ในหอสครับเบอร์ได้ถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่สเปรย์น้ำแบบธรรมดา แต่หากความหนาแน่นของอนุภาคฝุ่นเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการดักจับจะมีค่าลดลง และอัตราการฉีดสเปรย์น้ำที่เพิ่มขึ้นจากการชาร์จประจุไฟฟ้าเท่าเดิม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับลดลงเช่นกัน [7] ซึ่งยังไม่มีการศึกษาผลของความเร็วอากาศและการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบเปิดในพื้นที่กว้าง

งานวิจัยนี้จึง มุ่งสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ อนุภาคฝุ่นถ่านหินที่เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศ เช่น ปัญหาการขนส่งถ่านหินในเหมืองถ่านหิน และศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหิน ด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับสเปรย์น้ำ

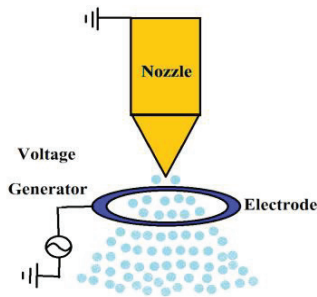
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยสเปรย์น้ำ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ

อนุภาคฝุ่นได้ด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่สเปรย์น้ำก่อนดับจับ เพื่อเพิ่มกลไกการใช้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตในการควบคุมอนุภาคที่ฟุ้งกระจายในอากาศ

2.1 กลไกการชาร์จประจุไฟฟ้า

ละอองน้ำที่ถูกสเปรย์ผ่านลวดวงแหวนที่มีสนามไฟฟ้า ส่งผลให้ละอองน้ำมีประจุไฟฟ้าตามหัวของแรงดันไฟฟ้าที่จ่าย ซึ่งลักษณะการชาร์จประจุไฟฟ้าแบบนี้เรียกว่า การชาร์จประจุแบบโคโรนา (Corona Charging) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การชาร์จประจุแบบโคโรนา

การชาร์จแบบโคโรนาเป็นการชาร์จประจุหลังจากการพ่นเป็นละอองไปแล้ว และการชาร์จประจุแบบโคโรนา นั้นจะให้ประจุไฟฟ้าที่ละอองของเหลวเป็นหัวเดียวกับแหล่งจ่าย ในการคำนวณหาค่าการชาร์จประจุไฟฟ้าในละอองน้ำ (q_d) ที่เกิดจากการอัดประจุแบบแพร่กระจายในสนามไฟฟ้าโคโรนา สามารถคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าได้ดังสมการ [8]

$$q_d = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left(\frac{E_r d_d^2}{4K_c e} \right) \left(\frac{\pi K_c e Z N t}{1 + \pi K_c e Z N t} \right) \quad (1)$$

โดย Nt คือผลคูณของค่าความเข้มข้นไอออนกับเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ [8]

$$Nt = \frac{I(R^2 - R_1^2)}{2RZeE_rQ} \quad (2)$$

หลักการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่ละอองน้ำ แบบโคโรนา นั้น มีพื้นฐานการทำงานคล้ายกับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต ที่ใช้กลไกในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่อนุภาคก่อนที่จะเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำไปยังขั้วเก็บอนุภาคในที่สุด เช่นเดียวกับการชาร์จประจุให้กับละอองน้ำ และให้ละอองน้ำที่มีประจุไฟฟ้าดึงดูดฝุ่นละออง และตกลงสู่ขั้วเก็บในลักษณะคล้ายกัน

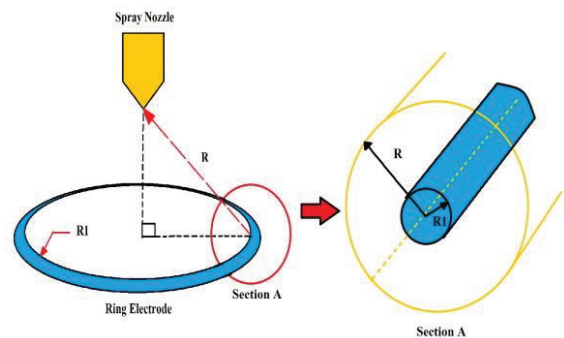
ค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนาสามารถคำนวณได้ดังนี้ [8]

$$I = \frac{8\pi\varepsilon_0 Z V (V - V_c)}{R^2 \ln\left(\frac{R}{R_1}\right)} \quad (3)$$

และค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนาจะคำนวณได้จาก [9]

$$V_c = E_b \times R_1 \ln\left(\frac{R}{R_1}\right) \quad (4)$$

การสร้างสนามไฟฟ้าจะต้องป้องกันการเกิด Electrical Breakdown ในการศึกษาครั้งนี้ลักษณะอิเล็กโทรดจะเป็นแบบวงแหวนซ้อนกันแนวลม ดังนั้นจึงต้องหาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับหัวฉีดให้เหมาะสม เมื่อพิจารณาที่ขนาดเส้นลวดวงแหวนกับระยะทางไปยังหัวฉีด จะเห็นได้ว่าต่างกันหลายเท่าทำให้สามารถมองเส้นลวดเป็นลักษณะของเส้นตรงดังรูปที่ 2 ที่ป็นอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวลมได้ โดยรัศมีของเส้นลวดคือ R_1 และระยะห่างจากเส้นลวดไปยังหัวฉีดเป็น R



รูปที่ 2 ลักษณะของอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวลม

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ระยะใดๆ จากตัวนำทรงกระบอกด้านใน สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$E_r = \frac{V_{rms}}{R_1 \ln \frac{R}{R_1}} \quad (5)$$

ค่าสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 30 kV_{peak}/cm และค่าสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนาของอิเล็กโตรดแบบทรงกระบอกซ้อนกันแนวนอน สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$E_c = 31 \times \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{R_1}} \right) \quad (6)$$

2.2 การคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในห้องทดสอบ

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคด้วยสเปรย์น้ำที่มีสนามไฟฟ้านั้น สามารถเพิ่มโดยต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปที่บริเวณวงแหวนอิเล็กโตรดรอบๆ หัวฉีด เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าในการชาร์จสนามไฟฟ้าให้แก่สเปรย์น้ำ จากนั้นสเปรย์น้ำที่มีสนามไฟฟ้าที่ถูกฉีดออกมา จะไปจับกับอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการคำนวณหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่มีการชาร์จสนามไฟฟ้าให้แก่สเปรย์น้ำนั้น สามารถคำนวณได้ดังสมการ [8]

$$\eta \cong 1 - \exp \left(- \frac{4K_c C_c q_p q_d N_d}{3\mu_g d_p} t_p \right) \quad (7)$$

โดยค่า N_d ในสมการหาประสิทธิภาพการดักจับคือ ค่าความเข้มข้นของละอองน้ำ (drop/m³) สามารถคำนวณได้จาก [8]

$$N_d = \frac{450Q \ln(t_d) / \pi d_d^3}{H_s \pi D_s^2 / 4} \quad (8)$$

ในส่วนของการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจากการทดสอบ จะนำค่าการวัดผลโดยการชั่งน้ำหนักของปริมาณอนุภาคที่เกาะบนแผ่นกรอง มาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงมวล โดยการคำนวณประสิทธิภาพเชิงมวลดังสมการ

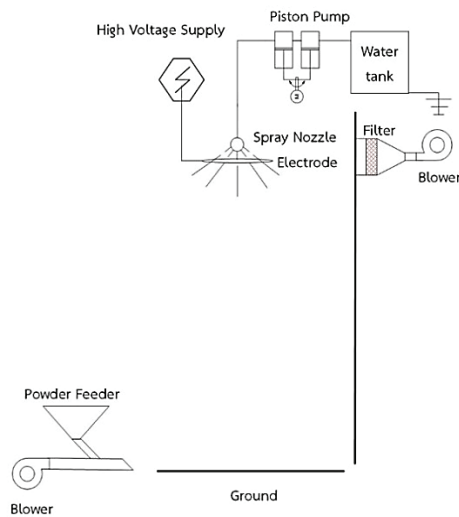
$$\eta_w = \frac{m_d - m_f}{m_d} \times 100\% \quad (9)$$

ค่า m_d และ m_f เป็นค่าที่ได้จากการวัดน้ำหนักรวมอนุภาคของฝุ่นละอองที่ถูกดักจับด้วยแผ่นกรองอากาศ ซึ่งจะต้องผ่านการอบไล่ความชื้นทุกครั้งก่อนทำการชั่งน้ำหนัก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

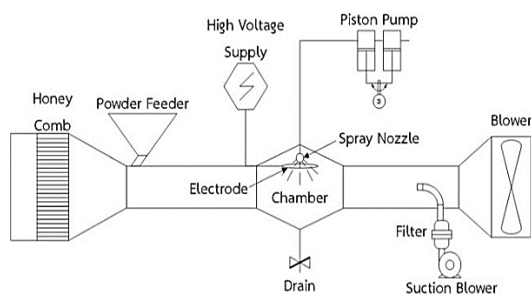
การทดสอบในห้องทดสอบ ขนาด 3 m x 2 m x 2 m เพื่อหาประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคที่ฟุ้งกระจายอยู่ในห้องทดสอบ โดยสนใจตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค คือ แรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับสเปรย์น้ำ และระยะเวลาในการฉีดสเปรย์น้ำ มีระบบการทดสอบดังรูปที่ 3

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากเตรียมอนุภาคแป้งฝุ่นและฝุ่นถ่านหิน ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยในช่วง 0.5 - 60 μ m และ 0.5 - 132 μ m ตามลำดับ โดยอนุภาคฝุ่นทั้งคู่ใช้ปริมาณ 20 g และ 30 g เป่าอนุภาคให้ฟุ้งในห้องทดสอบ เป็นระยะเวลา 40 sec จากนั้นฉีดละอองน้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าขนาด 5 kV ที่อัตราการไหล 3.22 ml/sec เป็นระยะเวลา 150-600 sec ปลอ่ยให้ละอองน้ำตกพื้นเป็นระยะเวลา 30 sec แล้วดูดฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่เป็นระยะเวลา 30 sec นำแผ่นกรองมาชั่งน้ำหนักบันทึกผลและคำนวณหาประสิทธิภาพ



รูปที่ 3 ระบบการทดสอบในห้องทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีผลต่อการดักจับอนุภาค จะทดสอบในอุโมงค์ลมดังรูปที่ 4 ในกรณีนี้จะใช้แป้งฝุ่นเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค แป้งฝุ่นและฝุ่นถ่านหินไม่แตกต่างกัน และมีความเสถียรของอนุภาคฝุ่น [10] โดยทำการทดสอบ 3 กรณี คือ ไม่นิดสเปรย์น้ำ, นิดสเปรย์น้ำที่ไม่มีสนามไฟฟ้า และนิดสเปรย์น้ำที่มีสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4 ระบบการทดสอบในอุโมงค์ลม

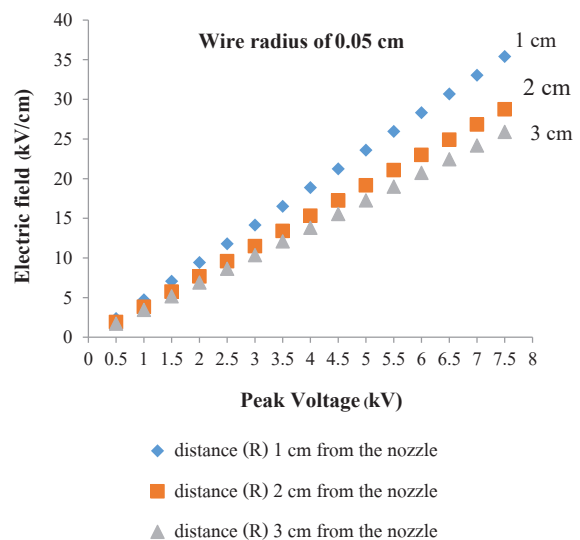
ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากเทแป้งฝุ่นลงบนตัวโปรยแป้ง 30 g และติดตั้งแผ่นกรอง เปิดสวิตช์พัดลมอุโมงค์ลม แล้วเปิดสวิตช์เครื่องเขย่าโปรยแป้งและสวิตช์พัดลมดูดอากาศผ่านแผ่นกรอง รอจนแป้งทั้งหมดโปรยลงสู่อุโมงค์ลม ปิดสวิตช์พัดลมดูดอากาศผ่านแผ่นกรอง และเครื่อง

เขย่า แล้วถอดเอาแผ่นกรองออกมาซึ่งน้ำหนักหลังการทดสอบ โดยกรณีที่มีการฉีดละอองน้ำ ต้องมีการอบไล่ความชื้นในแผ่นกรองก่อนทำการชั่งน้ำหนัก

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การเลือกระยะห่างอิเล็กโทรดของชุดหัวฉีดที่ออกแบบ

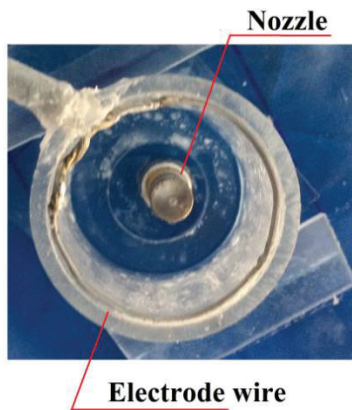
ชุดหัวฉีดได้ลักษณะและรูปแบบที่เหมาะสมของอิเล็กโทรดตามแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ในการชาร์จละอองน้ำให้มีประจุไฟฟ้า โดยลักษณะของเส้นลวดมีรัศมีขนาด 0.05 cm (R_I) เป็นแบบวงแหวน โดยใช้หลักการของอิเล็กโทรดแบบวงแหวนซ้อนกันที่ระยะห่างจากหัวฉีดใดๆ และเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0.5-7.5 kV จะเกิดค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณในสมการที่ 5 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้าของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับวงแหวน

จากรูปที่ 5 พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 7.5 kV_{peak} เมื่อวางลวดวงแหวนห่างจากหัวฉีด 1 cm ทำให้ค่าสนามไฟฟ้าเป็น 35.4 kV/cm ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิด break down ดังนั้นในการทดสอบนี้เพื่อให้ได้ค่าสนามไฟฟ้าที่สูงสุดและไม่เสี่ยงต่อการเกิด break down จึงวางลวดวง

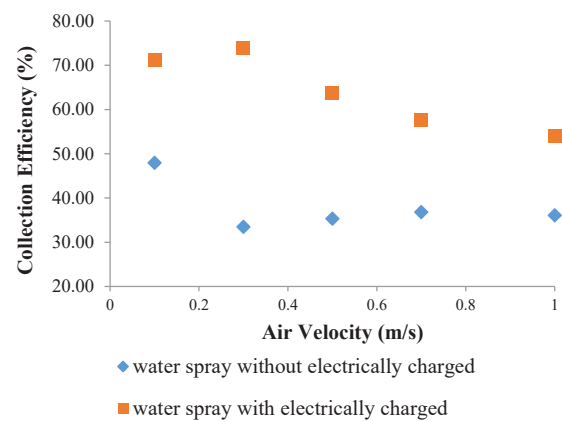
แหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 cm ห่างจากหัวฉีดเป็นระยะ 2.2 cm (R) ได้ลักษณะชุดหัวฉีดที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชุดหัวฉีดในการทดสอบ

4.2 ผลจากความเร็วของอากาศในอุโมงค์ลม

การทดสอบอิทธิพลของความความเร็วอากาศที่มีผลต่อการดักจับอนุภาค ด้วยการสเปรย์น้ำและการชาร์จสนามไฟฟ้าให้แก่ละอองน้ำ ในการทดสอบจะทำการสร้างข้อมูลเปรียบเทียบเบื้องต้น ซึ่งเกิดจากการเก็บข้อมูลผลต่างของน้ำหนักแผ่นกรองก่อนและหลังการทดสอบ โดยข้อมูลอ้างอิงนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลต่างของน้ำหนักแผ่นกรองก่อนและหลังการทดสอบ ในกรณีทำการสเปรย์น้ำและกรณีทำการสเปรย์น้ำที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่ละอองน้ำที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 7.5 kV_{peak} จำนวนอนุภาคฝุ่นที่ใช้ในการโปรยลงสู่อุโมงค์ลมจำนวน 50 g โดยโปรยอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าในช่องโปรยแบ่งในรูปที่ 4 ที่มีช่องกว้างเท่ากันตลอดความกว้างของอุโมงค์ลม โดยเขย่าในอัตราคงที่เป็นเวลา 3 นาที (อัตราการโปรยแบ่ง 15 g/min) และความเร็วของอากาศที่ใช้ดูดตัวอย่างอนุภาคฝุ่นที่แขวนลอยในอากาศด้วยความเร็ว 8.5 m/s จากการทดสอบได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคตามความเร็วของอากาศผสมอนุภาคฝุ่น ที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงไป

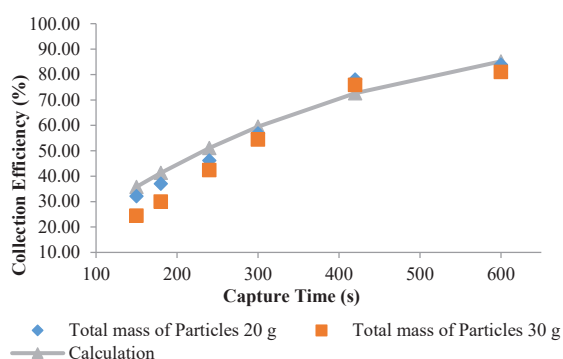
จากผลการทดสอบในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าที่ความเร็ว 0.1-0.3 m/s ($3000 < Re < 10,000$) จะเป็นช่วงของการไหลแบบ Transitional ที่จะเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งเป็นช่วงที่ความการไหลต่ำ พบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นแบ่งที่ใช้ทดสอบของวิธีการสเปรย์น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการสเปรย์น้ำธรรมดา โดยที่การวิธีการสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 70 ส่วนการสเปรย์น้ำแบบธรรมดาอยู่ที่ร้อยละ 35 ที่ความเร็ว 0.3 m/s ซึ่งที่ความเร็ว 0.1 m/s การสเปรย์ของน้ำแบบธรรมดาจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ความเร็ว 0.3 m/s เนื่องมาจากผลของการสเปรย์น้ำในอุโมงค์ลมจะเป็นตัวกั้นการไหลของอนุภาคฝุ่นไปตามการไหลของอากาศทำให้อนุภาคฝุ่นที่ไหลไปยังแผ่นกรองมีน้อยลง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่วนในการทดสอบที่ค่าความเร็วของอากาศเข้าสู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ที่ช่วงความเร็ว 0.3-1 m/s ($Re > 10,000$) ประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีการสเปรย์น้ำที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้า จะมีประสิทธิภาพลดลงเข้าหาประสิทธิภาพของการดักจับอนุภาคแบบสเปรย์น้ำธรรมดา แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

วิธีการสเปรย์น้ำแบบธรรมดาโดยเฉลี่ย ประมาณร้อยละ 20

4.3 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพการดักจับด้วยสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าในห้องทดสอบ

4.3.1 การทดสอบผลการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้งตามระยะเวลาในการสเปรย์น้ำ

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ $5 \text{ kV}_{\text{peak}}$ ในการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้ง ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 85.20% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 49.35% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 8

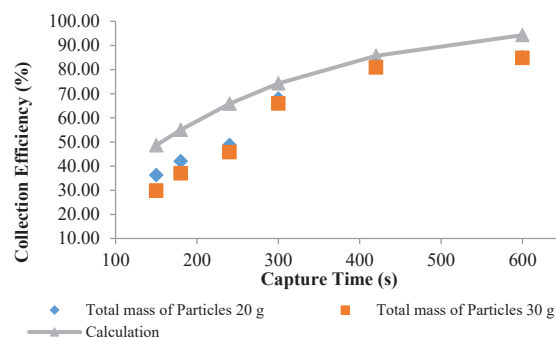


รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแป้งในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า $5 \text{ kV}_{\text{peak}}$

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 8 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 83.88% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 51.74% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 30 g ที่เวลา 600 s เป็น 81.03% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 56.59% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ $7.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$ ในการดักจับอนุภาคฝุ่นแป้ง ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น

94.30% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 45.67% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 9

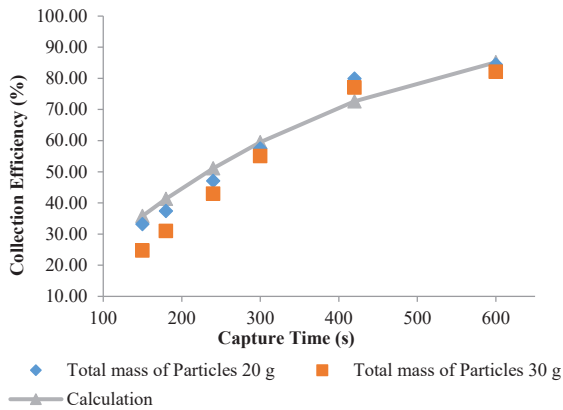


รูปที่ 9 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นแป้งในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า $7.5 \text{ kV}_{\text{peak}}$

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 9 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 85.11% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 48.80% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นแป้งปริมาณ 30 g ที่เวลา 600 s เป็น 84.80% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 54.94% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

4.3.2 การทดสอบผลการดักจับอนุภาคฝุ่นถ่านหินตามระยะเวลาในการสเปรย์น้ำ

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ $5 \text{ kV}_{\text{peak}}$ ในการดักจับอนุภาคถ่านหิน ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 85.20% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 49.35% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 10

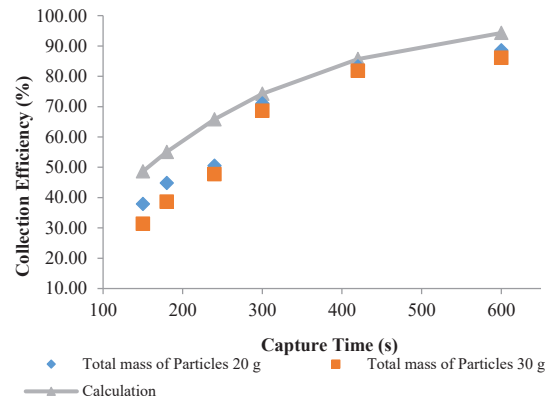


รูปที่ 10 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นถ่านหินในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV_{peak}

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 84.42% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 51.26% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 30 g ที่ระยะเวลา 600 s เป็น 82.10% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 57.43% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s

เมื่อชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับละอองน้ำ 7.5 kV_{peak} ในการดักจับอนุภาคถ่านหิน ได้ผลการคำนวณประสิทธิภาพการดักจับทางทฤษฎีที่เวลา 600 s เป็น 94.30% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 45.67% จากประสิทธิภาพการดักจับที่เวลา 150 s สำหรับการทดสอบการดักจับในห้องทดสอบ สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณได้ดังรูปที่ 11

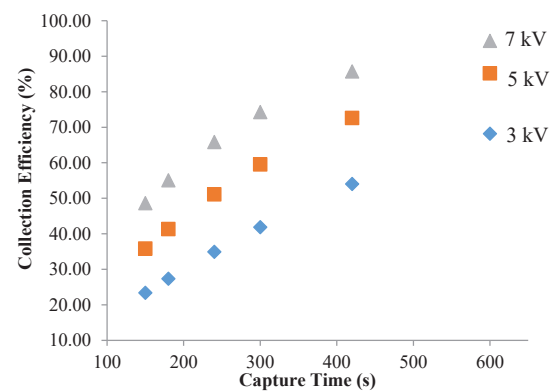
จากผลการทดสอบดังรูปที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 20 g ที่เวลา 600 s เป็น 88.59% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 50.73% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s และประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินปริมาณ 30 g ที่ระยะเวลา 600 s เป็น 86.10% ซึ่งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 54.79% จากระยะเวลาการทดสอบที่ 150 s



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นถ่านหินในห้องทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 7.5 kV_{peak}

จากผลการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพในการดักจับจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการดักจับจากการทดสอบจริง เมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะละอองน้ำที่มีสนามไฟฟ้าสามารถดักจับอนุภาคฝุ่นได้อย่างต่อเนื่องในระยะเวลาที่สูงขึ้น

ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในห้องทดสอบจากการคำนวณที่ปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำ ณ ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจาก 150 s – 600 s ดังรูปที่ 12 เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำ



รูปที่ 12 ประสิทธิภาพการดักจับในห้องทดสอบจากการคำนวณกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำ

จากรูปที่ 12 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ชาร์จให้กับละอองน้ำและระยะเวลาในการฉีดพ่นละอองน้ำที่เพิ่มขึ้น เป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ ซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเกิน 600 s ค่าประสิทธิภาพจะเริ่มคงที่

5. สรุปผลการวิจัย

- ชุดหัวฉีดมีเส้นลวดรัศมี 0.05 cm (R_f) ทำเป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm อิเล็กโทรดแบบซ้อนแกนร่วมวางห่างจากหัวฉีด 2.2 cm (R) สามารถรับแรงดันสูงสุดที่ 7.5 kV_{peak} และไม่เสี่ยงต่อการเกิดการลัดวงจรในอากาศ
- การทดสอบในอุโมงค์ลมที่ความเร็วอากาศ 0.1-0.3 m/s ประสิทธิภาพในการดักจับของวิธีการฉีดสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงถึง 70% ส่วนการฉีดละอองน้ำแบบธรรมดาอยู่ที่ 35% และในการทดสอบที่ค่าความเร็วของอากาศเข้าสู่ในช่วงของการไหลแบบปั่นป่วนในช่วงความเร็ว 0.3-1 m/s ประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาคฝุ่นด้วยวิธีการฉีดสเปรย์น้ำที่มีประจุไฟฟ้า จะมีค่าค่อนข้างลดลง แต่ประสิทธิภาพในการดักจับก็ยังสูงกว่าวิธีการสเปรย์น้ำแบบธรรมดาเฉลี่ยประมาณ 20%
- การทดสอบในห้องทดสอบพบว่าปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับคือแรงดันไฟฟ้าและระยะเวลาการฉีดสเปรย์น้ำ โดยที่แรงดันไฟฟ้า 5 kV ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินที่เวลา 600 s เท่ากับ 84.42% หรือมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 57.43% จากที่ระยะเวลา 150 s และที่แรงดันไฟฟ้า 7.5 kV_{peak} ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นถ่านหินที่เวลา 600 s เท่ากับ 88.59% หรือมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 50.73% จากที่ระยะเวลา 150 s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ

6. ข้อเสนอแนะ

- สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดักจับอนุภาคถ่านหินที่เกิดจากการฟุ้งกระจายที่จุดที่มีการขนย้ายถ่านหิน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบอนุภาคภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย รวมไปถึงอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

8. รายการสัญลักษณ์

ε	คือ ค่าคงที่ของความเป็นฉนวนในอากาศ (มีค่า 1.00059)
V	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จประจุ (kV)
V_c	คือ แรงดันไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (kV)
E_r	คือ สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จประจุ (kV/m)
e	คือ ประจุของอิเล็กตรอน (1.61×10^{-19} C)
Z	คือ ความสามารถในการเคลื่อนตัวของไอออน (1.15×10^{-4} m ² /Vs)
I	คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด (A)
R	คือ ระยะสนามไฟฟ้ารอบๆ อิเล็กโทรด (m)
E_r	คือ ค่าสนามไฟฟ้า (kV/m)
E_c	คือ สนามไฟฟ้าเริ่มเกิดโคโรนา (kV/m)
K_c	คือ ค่าคงที่จากสมการคูลอมบ์ (9×10^{-9} Nm ² /C ²)
C_c	คือ ตัวประกอบชดเชยของคันทิงแฮม
q_p	คือ ประจุไฟฟ้าของอนุภาค (C)
q_d	คือ ประจุไฟฟ้าของละอองน้ำ (C)
t_p	คือ เวลาในการดักจับอนุภาค (s)
μ_g	คือ ค่าความหนืดของอากาศ (68×10^{-9} kg/ms)
d_p	คือ ขนาดของละอองน้ำ (m)
Q	คือ อัตราการไหลของอากาศ (m ³ /s)
t_d	คือ เวลาในการฉีดละอองน้ำ (s)

H_s	คือ ความสูงของห้องทดสอบ (m)	m_d	คือ ปริมาณฝุ่นละอองที่แขวนลอยในระบบ (g)
D_s	คือ ความกว้างของห้องทดสอบ (m)	m_f	คือ ปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่บนแผ่นกรอง (g)
η_w	คือ ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาค		

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิริยะ ทองเขียว และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การประเมินปริมาณอากาศที่เหมาะสมต่อการสันดาปภายในหม้อไอน้ำ เชื้อเพลิง ถ่านหินบดละเอียด. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2010; 17(1): 60-71.
- [2] พัทธพันธ์ วงศ์ไพศาลฤทธิ์ ธรณิศวรรค์ ดิทยาพ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การกำหนดอากาศส่วนเกินเพื่อควบคุมอุณหภูมิเปลวไฟที่ก่อให้เกิดการหลอมตัวของเต้า ในหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีแคลเซียมออกไซด์สูง. *วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2016; 23(2): 81-91.
- [3] กรมควบคุมมลพิษ. เกร็ดความรู้เรื่องฝุ่นละออง. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, [Online] Available: http://www.pcd.go.th/info_serv/air_dust.htm, 2559.
- [4] ปราโมทย์ เชื้อวชาญ. สุขศาสตร์อุตสาหกรรม: การควบคุม หน่วยที่ 5 อุปกรณ์ควบคุมมลพิษอากาศชนิดอนุภาค. ตำราคณะวิทยาศาสตร์สุขภาพมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช, 2554.
- [5] Andrew B. C., Andrew D. O., Joseph S., Jay F. C., William R. F., Robert J. F., Jerry J., Randolph R., Patrick W. R., John R. R., and Mark J. S. Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. Report of Investigation, 2012: 61-76.
- [6] Tran, H., Fujita, H., Nishida, O. and Harano, W. Removal of Fine Particulate Matter (PM) from Boiler Exhaust Gas in Electrostatic Water Spraying Scrubber. *Journal of The Japan Institute of Marine Engineering*, 2010; 45: 968-973.
- [7] รัชมลกล ศรีวิภาต อรรถกร อาสนคำ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. การเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของสกรับเบอร์แบบสเปรย์น้ำ. การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายทอดผลงานความรู้และมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15, 30-31 มีนาคม 2559, สุราษฎร์ธานี.
- [8] Luca D. A. Wet electrostatic scrubbing for high efficiency submicron particle capture. Philosophy Doctor Dissertation, Department of Chemical Engineering, Universita' Federico II di Napoli, 2011.
- [9] สรรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ตำราภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [10] Asanakham A., Sriwiphat R., and Kiatsiriroat T. Increase of Fine Particle Precipitation by AC Electrical-Charged Mist. The International Conference on Advanced Manufacturing Technology and Applied Energy 2016 (AMTAE 2016), August 22-23, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในห้องทดสอบ
กรณีใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด $5 \text{ kV}_{\text{peak}}$ ชาร์จให้กับสเปรย์น้ำที่ระยะเวลา 600 s

ตารางที่ ก.1 พารามิเตอร์ศึกษา

พารามิเตอร์ศึกษา	ปริมาณที่ศึกษา
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V)	5 kV
รัศมีเส้นลวดอิเล็กโทรด (R_1)	0.05 cm
ระยะห่างระหว่างเส้นลวดกับหัวฉีด (R)	2 cm
ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Z	$0.000115 \text{ m}^2/\text{Vs}$
อัตราการไหลของอากาศ (Q)	$0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$
e (electron)	$1.61 \times 10^{-19} \text{ C}$
Dielectric Constant (3)	1
ขนาดหยดน้ำ (d_d)	0.00035 m
Constant Proportionality (K_c)	$8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$
Droplet Resident Times (t_d)	600 s
Particle Resident Times (t_p)	640 s
Room High (H_s)	2 m
Room Wide (D_s)	2 m
Particle Charging (q_d)	$4.1 \times 10^{-16} \text{ C}$
Gas Viscosity (μ_g)	0.0000186 kg/ms
Particle Diameters (d_p)	0.00001 m
Mean free path of air (λ_a)	0.000000068

$$\text{ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณ } V_{rms} = V / \sqrt{2} = 5 / \sqrt{2} = 3.53 \text{ kV}_{rms}$$

$$\text{คำนวณค่าสนามไฟฟ้า } E_r = \frac{V_{rms}}{R_1 \ln\left(\frac{R}{R_1}\right)} = \frac{3.53}{(0.05) \ln\left(\frac{2}{0.05}\right)} = 19.14 \text{ kV}_{rms} / \text{cm}$$

$$\text{คำนวณสนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนา } E_c = 31 \times \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{R_1}}\right) = 31 \times \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{0.05}}\right) = 73.70 \text{ kV}_{rms} / \text{cm}$$

$$\text{คำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนา } V_c = E_c r_1 \ln\left(\frac{R}{R_1}\right) = (73.70)(0.05) \ln\left(\frac{2}{0.05}\right) = 13.6 \text{ kV}$$

คำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนา

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0 ZV(V-V_c)}{R^2 \ln(\frac{R}{R_1})} = \frac{(8)(3.14)(8.854 \times 10^{-12})(0.000115)(3.53)(3.53-13.6)}{(2^2) \ln(\frac{2}{0.05})} = -6.16 \times 10^{-14} A$$

คำนวณค่าผลคูณของค่าความเข้มข้นไอออนกับเวลาที่ใช้ในการชาร์จประจุ

$$N_t = \frac{I(R^2 - R_1^2)}{2rZeE_rQ} = \frac{(-6.16 \times 10^{-14})(2^2 - 0.05^2)}{(2)(2)(0.000115)(1.61 \times 10^{-19})(19.14)(0.0005)} = -3.5 \times 10^{11} s/m^3$$

คำนวณค่าการอัดประจุ

$$q_p = \left(\frac{3\epsilon}{\epsilon + 2} \right) \left(\frac{E_r d_d^2}{4K_c e} \right) \left(\frac{\pi K_c e Z N_t}{1 + \pi K_c e Z N_t} \right)$$

$$= \left(\frac{(3)(1)}{1+2} \right) \left(\frac{(19.14)(0.00035^2)}{(4)(8.99 \times 10^9)(1.61 \times 10^{19})} \right) \left(\frac{(3.14)(8.99 \times 10^9)(1.61 \times 10^{19})(0.000115)(-3.5 \times 10^{11})}{1 + (3.14)(8.99 \times 10^9)(1.61 \times 10^{19})(0.000115)(-3.5 \times 10^{11})} \right)$$

$$= 6.522 \times 10^{-17} C$$

คำนวณค่าตัวประกอบชดเชยของคันทิ้งแสม

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda_a}{d_p} \left(1.257 + 0.4 \exp \left(-\frac{1.1d_p}{2\lambda_a} \right) \right)$$

$$= 1 + \frac{(2)(0.000000068)}{0.00001} \left(1.257 + (0.4) \exp \left(-\frac{(1.1)(0.00001)}{(2)(0.000000068)} \right) \right) = 1.0170952$$

คำนวณค่าความเข้มข้นของละอองน้ำ

$$N_d = \frac{450Q \ln(t_d) / \pi d_d^3}{H_s \pi D_s^2 / 4} = \frac{((450)(0.0005) \ln(600)) / (3.14)(0.00035^3)}{((2)(3.14)(2^2)) / 4} = 1702396306 \text{ drop} / m^3$$

คำนวณค่าประสิทธิภาพในการดักจับ

$$\eta \cong 1 - \exp \left(-\frac{4K_c C_c q_p q_d N}{3\mu_g d_p} t_p \right)$$

$$\cong 1 - \exp \left(-\frac{(4)(8.99 \times 10^9)(1.0170952)(6.522 \times 10^{-17})(4.1 \times 10^{-16})(1702396306)}{(3)(0.0000186)(0.00001)} (640) \right)$$

$$\cong 0.852 \cong 85.20\%$$



อิทธิพลของปริมาณยางรีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของยางคอมพาวนด์ในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง

Effect of Recycle Ratio on Die Swell Ratio of Rubber Compound in Tread Extrusion Process

ศุภชัย นาทะพันธ์* และ สมเกียรติ วัฒนปฐมทรัพย์

Supphachai Nathaphan* and Somkieat Watpathomsub

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170 ประเทศไทย

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering

Mahidol University, Nakhonpathom 73170, Thailand

*E-mail: supphachai.nat@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางในกระบวนการอัดรีด โดยการประยุกต์การทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย การทดลองมี 3 บล็อกของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (0, 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์) อัตราการบวมตัวของแต่ละบล็อก จะถูกวัด ณ โหลดในการอัดรีด 3 ระดับ (1.720 1.735 และ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร) โดยทดลองอัดรีดหน้ายางสำหรับ ยางล้อขนาด 225/65R17 102H หน้ายางถูกอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวและบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ความยาว 500 มิลลิเมตรเพื่อนำไปคำนวณค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์ รีไซเคิลมีอิทธิพลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายาง โดยที่อัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้ยางคอมพาวนด์ รีไซเคิลและอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อโหลดในการอัดรีดสูง ผู้ผลิตสามารถใช้ยางคอมพาวนด์ รีไซเคิลได้สูงสุดที่ 40 เปอร์เซ็นต์ และโหลดในการอัดรีดที่เหมาะสมเท่ากับ 1.720 กิโลกรัมต่อเมตรจึงจะทำให้อัตราการ บวมตัวของหน้ายางมีค่าอยู่ในขีดจำกัดข้อกำหนดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.60 ± 0.04

คำสำคัญ: การรีไซเคิลยางคอมพาวนด์ อัตราการบวมตัว หน้ายาง การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

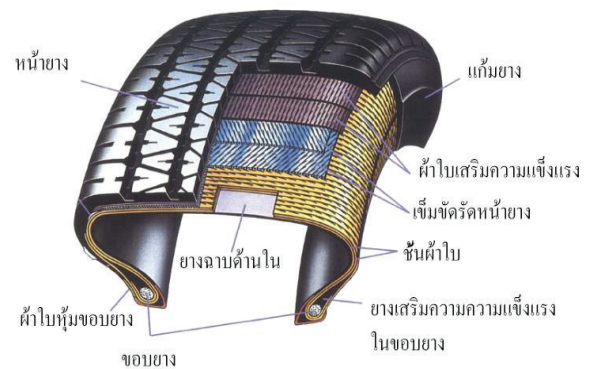
The objective of this research is to study the effect of recycled rubber compound volumes on die swell ratio of a tread in the extrusion process applying two-factor factorial design without interaction. There are three blocks of recycled rubber compound volumes (0, 20 and 40 percentage). The die swell ratio of each block is measured for each of three extrusion loads (1.720, 1.735 and 1.750 kg/m) by the experiment of a tread extrusion for the tire size 255/65R17 102H. The tread is extruded by single screw extruder and records a weight of tread at 500 millimeters for calculating a die swell ratio of tread. The results of analysis of variance showed that the use of recycled rubber compound influences the die swell ratio of the tread which the die swell ratio have a tendency of decrease when recycled rubber compound volume is used and die swell ratio have a tendency of increase when the extrusion load is high, the manufacturers can use the volume of recycled rubber compound up to 40 percent and the suitable extrusion load, equals 1.720 kg/m, make the die swell ratio of the tread in the specification limits that are 1.60 ± 0.04 .

Keyword: Recycled Rubber Compound, Die Swell Ratio, Tread, Experimental Design

1. บทนำ

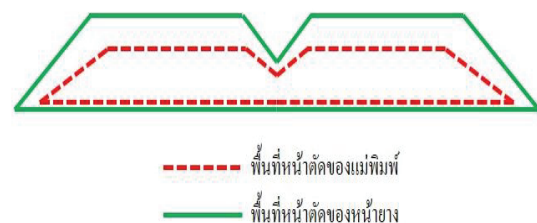
ทั่วโลกมีความต้องการยางล้อเพิ่มขึ้น 4.1% ต่อปี มีปริมาณมากถึง 3 พันล้านเส้นในปี พ.ศ.2562 มีมูลค่าการขายเพิ่มขึ้น 7% ต่อปี สูงถึง 258 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ การเติบโตมากกว่าครึ่งเกิดขึ้นในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก และเป็นภูมิภาคที่มีความต้องการยางล้อเติบโตอย่างรวดเร็วที่สุด (5.8% ต่อปี) ทำให้หลายประเทศในเอเชียแปซิฟิกได้รับผลประโยชน์ โดยเฉพาะประเทศไทย อินเดีย ประเทศอินโดนีเซีย และประเทศไทย [1] ประเทศไทยได้มีนโยบายเพื่อส่งเสริมและพัฒนาอุตสาหกรรมยางล้อ อาทิ โครงการจัดตั้งศูนย์ทดสอบยานยนต์และยางล้อแห่งชาติ เพื่อให้ประเทศไทยเป็นผู้นำด้านการทดสอบและรับรองผลิตภัณฑ์ยานยนต์และชิ้นส่วน และยางล้อ นำไปสู่การเป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วน และยางล้อของอาเซียน [2]

ยางล้อเป็นส่วนประกอบของล้อ ยางล้อประเภทอัดลมมีหน้าที่ คือ การรับน้ำหนักบรรทุก การรับแรงกระแทก การส่งผ่านแรงขับเคลื่อนและการเบรก การต้านทานการสึกหรอ การตอบสนองต่อพวงมาลัย แรงต้านทานมีเสียงรบกวน และการสิ้นเปลืองที่ต่ำ และความทนทานตลอดอายุการใช้งาน ยางล้อประกอบมาจากชิ้นส่วนย่อยหลายชิ้น เช่น หน้ายาง แก้มยาง ขางใน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 1 [3] ยางล้อหนึ่งเส้นนั้นมีวัตถุดิบหลายอย่าง เช่น คาร์บอนแบล็ค โลหะ สิ่งทอ สังกะสีออกไซด์ กำมะถัน สารเติมแต่ง และมีขางเป็นวัตถุดิบหลัก ในยางล้อรถยนต์หนึ่งมีขางเป็นส่วนผสมมากถึง 47% ซึ่งส่วนมากอยู่ในหน้ายาง (32.6% ของยางทั้งหมดโดยน้ำหนัก) [4] หน้ายางทำหน้าที่ต่อต้านการสึกหรอของยางล้อ ต่อต้านการขีดถู เพิ่มการยึดเกาะ ทำให้ความเร็วมีเสถียรภาพ และปกป้องโครงของยางล้อ อีกทั้งหน้ายางผลิตมาจากยางคอมพาวด์สำหรับต่อต้าน การสึกหรอ แรงดูด และการต้านทานการหมุนที่ต่ำ [5]

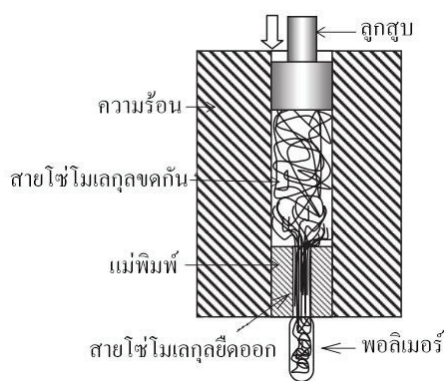


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของยางล้อรถยนต์นั่งประสิทธิภาพสูง [3]

หน้ายาง (Tread) ผลิตมาจากยางคอมพาวด์ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) คือการอัดรีดยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) ผ่านแม่พิมพ์ (Die) ทำให้เกิดโพรไฟล์ชั้นยาว (Extrudate) เป็นหน้ายาง ในกระบวนการนี้ผลิตภัณฑ์จะมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าแม่พิมพ์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การบวมตัว (Die swell, Extrudate swell หรือ Barus effect) แสดงดังรูปที่ 2 และสามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ด้วยทฤษฎีพลังงานสะสมแบบยืดหยุ่น นั่นคือในระหว่างที่ยางคอมพาวด์มีคุณสมบัติเป็นพอลิเมอร์หลอมเหลวในห้วงหลอมเหลว สายโซ่โมเลกุลจะขดกันเป็นกลุ่ม (Molecular entanglement) และถูกอัดรีดไหลผ่านแม่พิมพ์ ซึ่งในขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวอยู่ในแม่พิมพ์ สายโซ่โมเลกุลจะถูกยืดออก (Molecular disentanglement) และเก็บสะสมพลังงานเอาไว้ เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลพ้นแม่พิมพ์พลังงานที่สะสมไว้จะถูกปลดปล่อยทำให้สายโซ่โมเลกุลคืนสภาพ ส่งผลให้เกิดการบวมตัวแสดงดังรูปที่ 3 [6]



รูปที่ 2 การบวมตัวของหน้ายาง



รูปที่ 3 การบวมตัวของพอลิเมอร์
ตามทฤษฎีพลังงานสะสมแบบยืดหยุ่น [6]

หัวใจของกระบวนการอัดรีด คือ การควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ให้คงที่หรือการควบคุมอัตราการบวมตัว (Die swell ratio) กล่าวคือ ในกระบวนการอัดรีด พอลิเมอร์มีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [7] (1) ปัจจัยด้านสภาวะในการอัดรีด ประกอบด้วย อุณหภูมิในการอัดรีดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวลดลง [6], [8] ความเร็วของสกรูที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้น [6] อัตราเฉือน (Shear rate) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้น [8-9] โหลดในการอัดรีดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวเพิ่มขึ้น [10] (2) ปัจจัยด้านแม่พิมพ์ ประกอบด้วย ความยาวของแม่พิมพ์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวลดลง [9], [11] การออกแบบแม่พิมพ์ (Die design) ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [12] และ (3) ปัจจัยด้านคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ประกอบด้วย คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ต่างกันก็มีอิทธิพลส่งผลให้อัตราการบวมตัวแตกต่างกัน [13-14]

ในอุตสาหกรรมยางทั่วไปมักจะมีการรีไซเคิล (Recycle) ยางที่หมดอายุการใช้งาน (End of life) และการนำยางที่เป็นของเสียกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) เป็นเรื่องปกติ โดยมีปริมาณประมาณ 3-15 % และ 5-23% ตามลำดับ โดยทั่วไปในโรงงานจะมีของเสียเกิดขึ้นประมาณ 5-15 % และในการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอัดรีดที่เป็นกระบวนการสุดท้ายจะเกิดของ

เสียประมาณ 2-5% [16] กระบวนการผลิตหน้ายางของโรงงานที่ได้ทำการศึกษาเป็นการนำของเสียที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการอัดรีดหน้ายางที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ การเปลี่ยนรุ่นการผลิต และการทดลองแม่พิมพ์มารีไซเคิล แล้วนำกลับมาใช้ในกระบวนการอัดรีดอีกครั้งในกระบวนการผลิตหน้ายางทั้งหมดของโรงงาน พบว่า มีการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในปริมาณเฉลี่ย 15% เทียบกับยางคอมพาวนด์ทั้งหมดที่ใช้

ในกระบวนการอัดรีดหน้ายางพบปัญหาหน้ายางมีอัตราการบวมตัวไม่เป็นไปตามข้อกำหนด และจากงานวิจัยของ John S. Dick [15] ได้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสารเติมแต่งต่อคุณสมบัติหยุ่นหนืดของยางคอมพาวนด์ พบว่า สารเติมแต่งที่ต่างชนิดกันหรือมีปริมาณแตกต่างกันจะส่งผลต่ออัตราการบวมตัวที่ต่างจากกัน จากการศึกษาการคาดการณ์ว่าการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในกระบวนการอัดรีด อาจส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางแตกต่างกัน ดังนั้น การศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในกระบวนการอัดรีดหน้ายางจึงนำไปสู่การควบคุมอัตราการบวมตัว โดยการปรับโหลดในการอัดรีดให้เหมาะสมกับปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายาง โดยประยุกต์เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of experiments: DOE) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์และกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนด [17]

2. การทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอัดรีดหน้ายางสำหรับยางล้อรถยนต์นั่งอเนกประสงค์ (Sport utility vehicle: SUV) ขนาด 225/65R17 102H โดยมีอัตราการบวมตัวเป้าหมาย (Target) เท่ากับ 1.60 ± 0.04

2.1 วัสดุ

ยางคอมพาวนด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ยางคอมพาวนด์ที่มีคุณสมบัติ

- ค่าความหนืดมูนี (Mooney viscosity) เท่ากับ 57 ML1+4(100°C)

- ค่าความหนาแน่น (Density) เท่ากับ 1.145 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

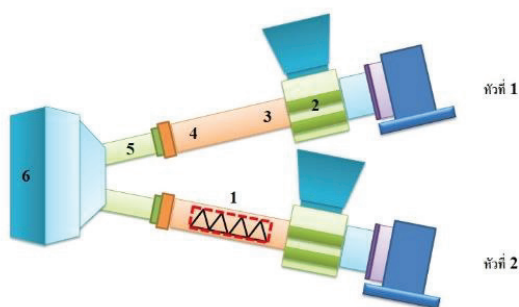
แม่พิมพ์หน้ายางที่ใช้ในงานวิจัยทำมาจากเหล็กเกรด S50C มีพื้นที่หน้าตัด (Cross-section area) เท่ากับ 16.87 ตารางเซนติเมตร

2.2 การเตรียมยางคอมพาวนด์รีไซเคิล

ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ในงานวิจัย คือ ยางคอมพาวนด์ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดมาแล้ว โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิลด้วยเครื่องผสมยางแบบปิดแบบบูร์ (Banbury internal mixer) โดยใช้อุณหภูมิห้องผสม (Chamber) และตัวผสม (Rotor) ที่ 80 °C

2.3 สภาพในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองอัดรีดหน้ายางด้วยเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวสองหัวแสดงดังรูปที่ 4 แต่ละหัวมีขนาดสกรูเท่ากับ 250 มิลลิเมตร ความเร็วสกรูเท่ากับ 8.7 รอบต่อนาที อุณหภูมิของ (1) สกรู, (2) บริเวณป้อนยางคอมพาวนด์, (3) บารเลบริเวณป้อนยาง, (4) บารเลบริเวณกลาง, (5) บารเลบริเวณหัว และ (6) หัว เท่ากับ 70, 60, 55, 50, 45 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 4 แผนภาพตำแหน่งจุดปรับตั้งอุณหภูมิในการอัดรีด

2.4 การวัดอัตราการบวมตัว

อัตราการบวมตัว (Die swell ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์กับพื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์ ดังสมการที่ (1) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วัดอัตราการบวมตัวของหน้ายางด้วยน้ำหนักและความยาวของหน้ายาง ดังสมการที่ (2) [6]

$$\text{Die swell ratio} = \frac{A'}{A} \quad (1)$$

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์

A' = พื้นที่หน้าตัดของหน้ายาง

เนื่องจาก

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของหน้ายาง} = \frac{\text{ปริมาตรของหน้ายาง}}{\text{ความยาวของหน้ายาง}}$$

โดยที่

$$\text{ปริมาตรของหน้ายาง} = \frac{\text{น้ำหนักของหน้ายาง}}{\text{ค่าความหนาแน่น}}$$

ดังนั้น

$$\text{Die swell ratio} = \frac{W}{D \cdot A \cdot L} \quad (2)$$

โดยที่ W = น้ำหนักของหน้ายาง

D = ค่าความหนาแน่น

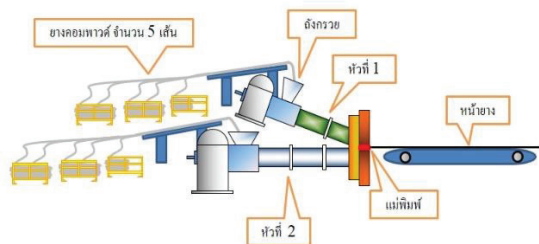
A = พื้นที่หน้าตัดของแม่พิมพ์

L = ความยาวของหน้ายาง

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองอัดรีดยางคอมพาวนด์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ส่งผลต่ออัตราการบวมของหน้ายางนั้น ปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (%R: A) หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ และโหลดในการอัดรีด (Load: B) หรือปริมาณยางคอมพาวนด์ที่ไหลออกจากแม่พิมพ์ หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง ขนาด 225/65R17 102H โดยมีการป้อนยางคอมพาวนด์

เข้าเครื่องอัดรีดที่เหมาะสมอยู่ที่จำนวน 5 เส้นต่อหัว แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการป้อนยางคอมพาวด์เข้าเครื่องอัดรีด

งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการทดลองแบบบล็อกโดยการทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เนื่องจากการเพิ่มโหลดในการอัดรีดหรือการเพิ่มปริมาณยาง (กิโลกรัมต่อเมตร) จะทำให้อัตราการบวมตัวของหน้ายางเพิ่มขึ้นไม่ว่าจะใช้ปริมาณยาง คอมพาวด์รีไซเคิลเท่าไรก็ตาม ดังนั้น เมื่อผู้ทดลองเข้าใจความสัมพันธ์อยู่แล้ว ผู้ทดลองสามารถลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยได้ กล่าวคือ การบล็อก (Blocking) ปริมาณยางคอมพาวด์รีไซเคิลที่ระดับแตกต่างกันเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการผสมยางคอมพาวด์รีไซเคิลเข้ากับยางคอมพาวด์บริสุทธิ์ต่ออัตราการบวม อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ในการเปรียบเทียบโหลดในการอัดรีดที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางร่วมกันได้อีกด้วย โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) วิเคราะห์ความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยและระดับปัจจัยที่แตกต่างกันส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ [18]

การกำหนดบล็อกของปริมาณยางคอมพาวด์รีไซเคิลที่ใช้ในการทดลอง คือ 0 เปอร์เซ็นต์ 20 เปอร์เซ็นต์ และสูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณยางที่ใช้ โดยพิจารณาจากปริมาณยางคอมพาวด์รีไซเคิลที่สามารถกำหนดได้ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นยางคอมพาวด์รีไซเคิลต่อเส้นยางคอมพาวด์บริสุทธิ์ อาทิ 1:4 หมายถึง การใช้ยางคอม

พาวด์รีไซเคิล 20 เปอร์เซ็นต์ต่อยางคอมพาวด์บริสุทธิ์ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการใช้ปริมาณยางคอมพาวด์รีไซเคิลเฉลี่ยอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น บล็อกสูงสุดจึงกำหนดเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์ การกำหนดระดับปัจจัยของโหลดในการอัดรีดกำหนดจากพิสัยของปริมาณยางคอมพาวด์เดิม แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 บล็อกและค่าระดับปัจจัยของการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		
	1	2	3
A: ปริมาณยางคอมพาวด์รีไซเคิล (%)	0	20	40
B: โหลดในการอัดรีด (กก./ม.)	1.720	1.735	1.750

ในการทดลองอัดรีดหน้ายางในแต่ละบล็อก ปริมาณยางคอมพาวด์รีไซเคิลจะดำเนินการทดลองปรับสภาวะโหลดในการอัดรีด (Load) แบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดในการทดลองจากปัจจัยรบกวน ในแต่ละสภาวะของการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง (Replication) และบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ความยาว 500 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การชั่งน้ำหนักตัวอย่าง

3. ผลการทดลอง

ผลการดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางคอมพาวด์รีไซเคิล (Block) ที่ส่งผลต่อการบวมตัวของหน้ายางแสดงค่าอัตราการบวมตัวในตารางที่ 2 จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน ความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง และวิเคราะห์หาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง โดยใช้โปรแกรม Minitab16

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง ขนาด 225/65R17 102H

ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (%)	โหลดในการอัดรีด (กิโลกรัม/เมตร)								
	1.720			1.735			1.750		
0	1.619	1.621	1.627	1.625	1.628	1.629	1.635	1.636	1.640
20	1.595	1.592	1.597	1.593	1.591	1.596	1.603	1.607	1.610
40	1.592	1.594	1.598	1.598	1.600	1.603	1.605	1.606	1.614

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของหน้ายางด้วยแบบจำลองทางสถิติสำหรับการทดลองปัจจัยตัวเชิงประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย แสดงดังสมการที่ (3) โดยแสดงผลวิเคราะห์ดังตารางที่ 3 พบว่าปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (%R) และปัจจัยโหลดในการอัดรีด (Load) มีอิทธิพลส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ ค่าวิกฤติมีค่าเท่ากับ $F_{0.05,2,22} = 3.44$ ภายใต้อัตราการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 96.25% และสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่มีการปรับค่า (Adjusted R^2) เท่ากับ 95.57%

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3 \\ k = 1, 2, 3 \end{matrix} \quad (3)$$

โดยที่ y_{ijk} หมายถึง ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางที่ k ทดลองภายใต้ระดับของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ j และภายใต้โหลดในการอัดรีดที่ i

μ หมายถึง ค่าเฉลี่ยรวมของอัตราการบวมตัว

τ_i หมายถึง ค่าผลกระทบของโหลดในการอัดรีดที่ i

β_j หมายถึง ค่าผลกระทบของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ j

ε_{ijk} หมายถึง ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง

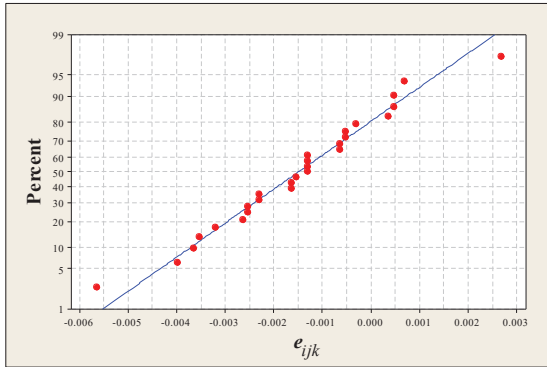
Source	DF	SS	MS	F
Load	2	0.0008916	0.0004458	41.61
%R	2	0.0051612	0.0025806	240.87
Error	22	0.0002357	0.0000107	
Total	26	0.0062885		
R-Sq = 96.25%			R-Sq(adj) = 95.57%	

3.2 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองในการทดลอง

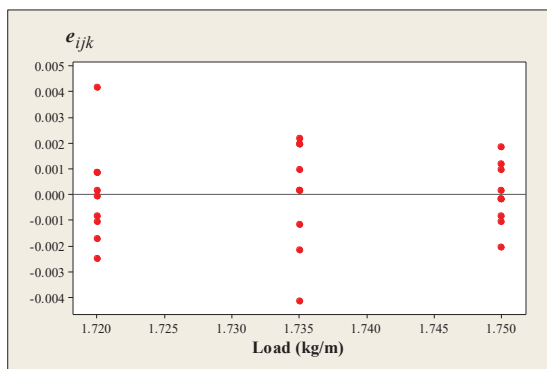
การตรวจสอบแบบจำลองทางสถิติดังสมการที่ (3) ของค่าสังเกตอัตราการบวมตัวที่ได้จากการทดลอง ภายใต้อสมมติฐาน $e_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$ โดยการวิเคราะห์ค่าตกค้าง (Residual analysis: e_{ijk}) กล่าวคือ ค่าสังเกตหรือค่าตกค้างต้องมีการแจกแจงปกติด้วยค่าความแปรปรวนที่เท่ากันสำหรับแต่ละระดับปัจจัย [18] สามารถวิเคราะห์ค่าตกค้างได้ดังต่อไปนี้

1) การแจกแจงปกติ โดยการพล็อตค่าตกค้างลงบนกราฟทดสอบการแจกแจงปกติ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าตกค้างเรียงตัวเป็นเส้นตรง เนื่องจากทุกจุดเมื่อคำนวณด้วยค่าตกค้างมาตรฐาน (d_{ijk}) แล้วไม่พบว่ามีจุดใดมีค่าเกิน ± 3

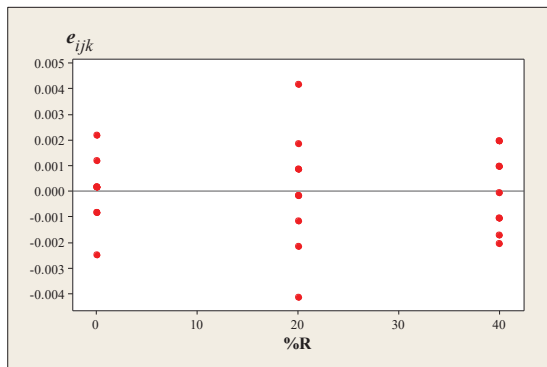
2) ความเท่ากันของความแปรปรวน โดยการพล็อตค่าตกค้างเทียบกับโหลดในการอัดรีด และเทียบกับบล็อกยางคอมพาวนด์รีไซเคิล ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าค่าตกค้างมีความแปรปรวนไม่แตกต่างกันและมีการกระจายอย่างสุ่ม



รูปที่ 7 ค่าตกค้างของอัตราการบวมตัวที่มี
การแจกแจงปกติ



(1) ค่าตกค้างเทียบกับโหลดในการอัดรีด



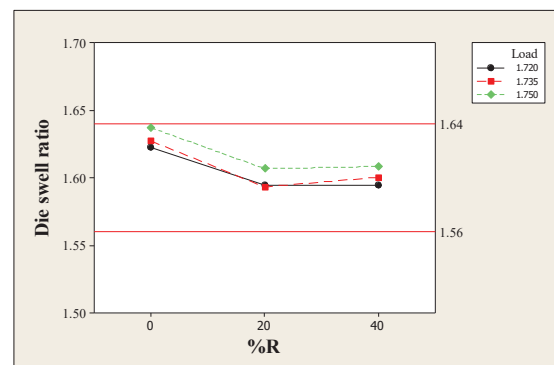
(2) ค่าตกค้างเทียบกับสล็อตยางคอมพาวนด์ไซเคิล

รูปที่ 8 กราฟตรวจสอบความแปรปรวน

สรุปได้ว่าแบบจำลองทางสถิติสำหรับการทดลอง
ปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง
ปัจจัยแสดงดังสมการที่ (3) แกร่ง (Robustness) กลุ่ม
ข้อมูลอัตราการบวมตัวที่ได้จากการทดลองมีความ
น่าเชื่อถือตามสมมติฐาน $e_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$

3.3 การวิเคราะห์หับล็อกและระดับปัจจัย

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยที่จำแนกตามบล็อก ภายใต้โหลด
ในการอัดรีดเท่ากับ 1.720 1.735 และ 1.750 กิโลกรัม
ต่อเมตร ดังรูปที่ 9 พบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์ไซเคิลจะ
ทำให้สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดมากขึ้น (เกิดการสะสม
พลังงานได้น้อยลง) ทำให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง
มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า คุณสมบัติ
ของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันจะมีอิทธิพลส่งผลให้อัตราการ
บวมตัวแตกต่างกัน [13-14] เมื่อโหลดในการอัดรีด
เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของยางคอมพาวนด์หลอมเหลวหลัง
พ้นหัวแม่พิมพ์ลดลง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยืดน้อยลง
ตามแนวสายพานทำให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมี
แนวโน้มเพิ่มขึ้น ในกระบวนการผลิตหน้ายางสามารถใช้
ยางคอมพาวนด์ไซเคิลได้สูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่า
อัตราการบวมตัวของหน้ายางเป็นไปตามข้อกำหนด คือ
 1.60 ± 0.04 อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างกันของ
โหลดในการอัดรีดด้วยวิธีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่
น้อยที่สุด (The least significant difference method:
LSD method) พบว่า โหลดในการอัดรีดเท่ากับ 1.750
กิโลกรัมต่อเมตร มีค่าอัตราการบวมตัวมากกว่าโหลดใน
การอัดรีดอื่น ขณะที่การใช้ยางคอมพาวนด์ไซเคิลที่ 20
เปอร์เซ็นต์ กับ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าอัตราการบวมตัวของ
หน้ายางน้อยกว่ายางคอมพาวนด์บริสุทธิ์อย่างมีนัยสำคัญ
ทางสถิติ ($\alpha = 0.05$)

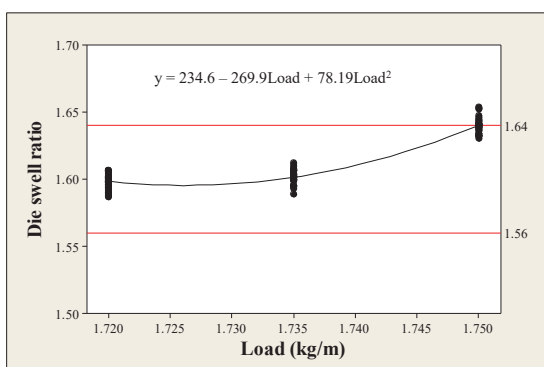


รูปที่ 9 กราฟค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายาง

4. การทดสอบเพื่อยืนยันผล

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของหน้ายาง พบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 เปอร์เซ็นต์ กับ 40 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) จึงได้ทำการยืนยันผลการทดลอง เพื่อหาโหลดในการอัดรีดที่เหมาะสมสำหรับการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิล ได้แก่ 1.720 1.735 และ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร ตามลำดับ ภายใต้ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (Block) เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ (1:4) และ 40 เปอร์เซ็นต์ (2:3) โดยทำการทดลองซ้ำ 15 ครั้ง แล้วพิจารณาค่าอัตราการบวมของหน้ายาง

ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล พบว่า โหลดในการอัดรีดที่เหมาะสมสำหรับปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 1.720 กิโลกรัมต่อเมตร เนื่องจากค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีค่าเท่ากับ 1.60 ± 0.01 และ 1.60 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าอัตราการบวมตัวเป้าหมายเท่ากับ 1.60 ± 0.04 โดยมีแบบจำลองการถดถอยเชิงพหุนามกำลังสอง เพื่อทำนายผลลัพธ์อัตราการบวมตัวของหน้ายางแสดงดังรูปที่ 10 ภายใต้สัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ R-Square = 92.0%



รูปที่ 10 แบบจำลองทำนายอัตราการบวมตัว

5. สรุป

จากผลการศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลในกระบวนการอัดรีดหน้ายางสำหรับยางล้อรถยนต์นั่งเอนกประสงค์ (Sport utility vehicle: SUV) ขนาด 225/65R17 102H โดยการประยุกต์การออกแบบการทดลองปัจจัยเชิงตัวประกอบแบบลดรูปของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ผลการวิจัยพบว่า การใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิลส่งผลให้ค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางมีแนวโน้มลดลง ภายใต้โหลดในการอัดรีดเท่ากับ 1.720, 1.735 และ 1.750 กิโลกรัมต่อเมตร ตามลำดับ โดยค่าอัตราการบวมตัวของหน้ายางที่ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ 20 กับ 40 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ ดังนั้นในการผลิตยางล้อรถยนต์สามารถเลือกใช้ยางคอมพาวนด์รีไซเคิล (Block) ที่ระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ได้ เมื่อหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมของโหลดในการอัดรีด พบว่า ปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ควรใช้โหลดในการอัดรีดหน้ายางเท่ากับ 1.720 กิโลกรัมต่อเมตร

ดังนั้น ในอุตสาหกรรมยางล้อ หากมีการนำยางคอมพาวนด์รีไซเคิลมาใช้ในกระบวนการอัดรีดหน้ายาง จะต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของปริมาณยางคอมพาวนด์รีไซเคิลที่ใช้ เพื่อที่จะสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีอัตราการบวมของหน้ายางให้เป็นไปตามข้อกำหนด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท สยามมิชลิน จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยจำนวน 127,500 บาท และสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tire demand to top three billion units by 2019. Rubber World, Freedonia Group, 2016; 253(4): 10.
- [2] Thailand Board of Investment. Next generation automotive - a new era for Thailand. *Thailand Investment Review*, 2017; 27(3): 5-7.
- [3] Rodgers, B. and Waddell, W. Tire Engineering. The science and technology of rubber, Waltham: Elsevier, 2013; 653-695.
- [4] Evans, A. and Evans, R. The composition of a tire: Typical components. *The Waste&Resources Action Programme*, 2016; 1-5.
- [5] Waddell, W. and Tsou, A.H. Butyl rubbers. Rubber compounding. Marcel Dekker, New York, 2014.
- [6] Intawong, N. Extrudate swell behavior of polymer melt in extrusion process. *The Journal of KMUTNB*, 2009; 19(3): 449-454.
- [7] Sirisinha, C. A review of extrudate swell in polymers. *Science Society of Thailand*, 1997; 23: 259-280.
- [8] Liang, J. Z. Effect of the die angle on the extrusion swell of rubber compound. *Materials Processing Technology*. 1995; 52: 207-212.
- [9] Liang, J. Z. A study of die-swell behavior of rubber compounds during short-die extrusion. *Materials Processing Technology*. 1996; 59: 268-271.
- [10] Wong, A. C. Y. and Liang, J. Z. Relationship between die swell ratio and melt flow index. *Chemical Engineering Science*. 1997; 52(18): 3219-3221.
- [11] Wang, K. Die swell of complex polymeric systems. Viscoelasticity-From theory to biological applications, ISBN: 978-953-51-0841-2, InTech, Rijeka, 2012.
- [12] Sombatsompop, N. and Dangtungee, R. Flow visualization and extrudate swell of natural rubber in a capillary rheometer: Effect of die/barrel system. *Journal of Applied Polymer Science*. 2001; 82: 2525-2533.
- [13] Koopmans, R. J. Die swell or extrudate swell. Polypropylene: An A-Z Reference. ISBN: 0-412-80200-7, Kluwer, Dordrecht, 1999.
- [14] Dangtungee, R., Desai, S. S., Tantayanon, S. and Supaphol, P. Melt rheology and extrudate swell of low-density polyethylene/ethylene-octene copolymer blends. *Polymer Testing*. 2006; 25: 888-895.
- [15] Dick, J.S., Norton, E. and Xue, T. Measuring the effects of filler variations on compound viscoelastic properties as measured by the capillary rheometer and RPA. *Rubber World*, 2016; 39-45.
- [16] Forrest, M. Overview of the world rubber recycling market. Recycling and Re-use of Waste Rubber, ISBN: 978-184735-684-0, Smithers Rapra, UK, 2014.
- [17] Tanakulchaitawee, K. and Nathaphan, S. Design of experiments to analyze factors affecting the main function of u-shaped plastic shopping bags. *Naresuan University Engineering Journal*, 2014; 9(12): 38-47.
- [18] Nathaphan, S. Basic Design and Analysis of Experiments. ISBN: 978-616-08-2475-5, Thailand, 2016.



การเปรียบเทียบวิธีระบบหลายอาณานิคมและวิธีระบบมด ในการแก้ปัญหการจัดเส้นทางรถที่มีความจุจำกัด

Comparing the Multi Colony Ant System and Ant System methods for solving the Capacitated Vehicle Routing Problem

อุดม จันทรจรัสสุข* และ กิตติโรจน์ สันติธายี

Udom Janjarassuk and Kittirod Santithayee

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Chalongkrung Road., Ladkrabang, Bangkok, 10520

*E-mail: kjudom@gmail.com, Telephone Number: 02-329-8339(228)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีระบบหลายอาณานิคม (Multi Colony Ant System; MCAS) ซึ่งเป็นวิธีใหม่ สำหรับแก้ปัญหการจัดเส้นทางรถที่มีความจุจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem; CVRP) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบวิธีใหม่ที่นำเสนอและเปรียบเทียบผลกับวิธีระบบมด (Ant System; AS) ที่ใช้กันทั่วไป วิธีระบบหลายอาณานิคมใช้มดหลายกลุ่มในการหาคำตอบ ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสที่จะเจอคำตอบที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีสลับสองตำแหน่ง (2-Opt) มาใช้ในการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ และได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดเส้นทางรถด้วยวิธีที่นำเสนอกับวิธีระบบมดโดยการทดลองกับตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางรถ 20 ตัวอย่างปัญหาจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) ผลการทดลองพบว่า วิธีระบบหลายอาณานิคมให้ผลดีกว่าวิธีระบบมดอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียง 0.68% เมื่อเทียบกับ 2.24% ของวิธีระบบมด

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางรถ, ระบบหลายอาณานิคม, การสลับสองตำแหน่ง

ABSTRACT

This research presents a new method called Multi Colony Ant System (MCAS) to solve the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). The objective is to test the new algorithm and compare the results with the traditional Ant System (AS) approach. The MCAS algorithm uses multiple colonies of ants to find routes, which increases the chance of obtaining better solutions. Our method also employs the 2-Opt local search to improve the solutions. The algorithm was implemented in C++. Experiments were conducted to test the effectiveness of the algorithm by using 20 CVRP instances from literature. The results were compared to those from AS and the known optimal solutions. From the results, our proposed MCAS method provides significant improvement over the traditional AS approach, with an average optimality gap of only 0.68% compared to 2.24% of the traditional AS approach.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Multi Colony Ant System, 2-Opt local search

1. บทนำ

การขนส่งสินค้าเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย และมีความเกี่ยวข้องกับการดำเนินธุรกิจในอุตสาหกรรมทั้งในด้านการจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตและการจำหน่ายสินค้าไปยังลูกค้าจากรายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทยของสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ในปี พ.ศ. 2559 โดยจำแนกตามรูปแบบการขนส่งสินค้าภายในประเทศ [1] พบว่าปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนนเป็นรูปแบบการขนส่งที่ใช่มากที่สุด คิดเป็น 80.86 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการขนส่งทั้งหมดในประเทศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ประกอบการส่วนใหญ่เลือกใช้การขนส่งทางถนนเป็นหลัก เนื่องจากเป็นรูปแบบการขนส่งที่สามารถส่งสินค้าได้ถึงมือผู้รับได้โดยตรง และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็วและสะดวกกว่ารูปแบบการขนส่งอื่นๆ อย่างไรก็ตาม การขนส่งทางถนนมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการขนส่งแบบอื่น เช่น ทางเรือหรือทางรถไฟ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สินค้าที่ขนส่งทางถนนมีราคาแพง ดังนั้น การลดต้นทุนการขนส่งจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งวิธีหนึ่งที่ทำให้ได้คือการวางแผนเส้นทางการขนส่งอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ปัญหาส่วนใหญ่ในปัจจุบันคือ ผู้ประกอบการยังคงใช้วิธีการจัดเส้นทางโดยอาศัยประสบการณ์เป็นหลัก ประกอบกับมีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดต่างๆ ในการจัดเส้นทาง เช่น มีจำนวนรถบรรทุกที่จำกัด เป็นต้น ทำให้เส้นทางที่ได้มีระยะการขนส่งรวมมากกว่าความจำเป็น ส่งผลให้ต้นทุนการขนส่งเพิ่มขึ้น

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางเพื่อหาวิธีการจัดเส้นทางการเดินทางที่ทำให้ระยะการขนส่งหรือต้นทุนการขนส่งรวมมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Programming Model) แต่ยังคงประสบปัญหาที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานโดยเฉพาะกับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมแก้ปัญหาด้วยวิธีฮิวริสติกส์

(Heuristic Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สามัญสำนึก และสามารถหาคำตอบในเวลาอันรวดเร็ว ถึงแม้อาจไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม ตัวอย่างของวิธีฮิวริสติกส์ ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) ขั้นตอนวิธีจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing Algorithm; SA) และขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization; ACO) เป็นต้น

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด เป็นวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของมด ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเชิงการจัด (Combinatorial Optimization Problem) ได้หลากหลาย และได้รับความนิยมในปัจจุบันเนื่องจากสามารถให้ผลลัพธ์ที่ดี [2] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอวิธีระบบหลายอาณานิคมมด (Multi Colony Ant System; MCAS) ซึ่งเป็นวิธีใหม่ โดยพัฒนาต่อจากวิธีระบบอาณานิคมมดมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางที่มีความจุรถจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem; CVRP) เพื่อหาเส้นทางการเดินทางที่สั้นที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบวิธีใหม่นี้ที่นำเสนอและทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับวิธีระบบมด

เนื้อหาส่วนที่เหลือของบทความนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางเดินทางหลักการทำงานของวิธีระบบหลายอาณานิคมมดที่ประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดเส้นทางเดินทาง รวมทั้งการทดลองกับตัวอย่างปัญหาและนำเสนอผลการทดลองที่ได้สรุปผลการวิจัยและปิดท้ายด้วยแนวทางการนำไปใช้งานและการพัฒนาต่อ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด เป็นวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของมด ซึ่งมดสำรวจจะใช้วิธีการเดินแบบสุ่มในการหาแหล่งอาหาร เมื่อมดตัวหนึ่งพบแหล่งอาหารมันจะทิ้งสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่าฟีโรโมน (Pheromone) ไว้บนเส้นทางที่เดินกลับสู่รัง เพื่อให้มดตัวอื่นสามารถติดตามเส้นทางไปยังแหล่งอาหารได้ เมื่อมด

ตัวอื่นๆไปยังแหล่งอาหาร มันก็จะทิ้งสารฟีโรโมนเพิ่มเติมบนเส้นทางที่เดินผ่าน ดังนั้น เส้นทางที่สั้นกว่าจึงมีความเข้มข้นของฟีโรโมนที่สูงกว่าเนื่องจากการเพิ่มสารฟีโรโมนที่บ่อยกว่า และเมื่อเวลาผ่านไปฟีโรโมนบนเส้นทางที่ยาวกว่าก็จะค่อยๆจางหายไป ทำให้เหลือเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมดได้ถูกนำเสนอโดย Colormi และ Dorigo [3] ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem; TSP) โดยใช้มดในการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด กระบวนการหาคำตอบจะอาศัยการทำซ้ำ โดยเส้นทางที่ดีจากการทำซ้ำก่อนหน้าจะถูกเพิ่มฟีโรโมนให้มีความเข้มข้นมากขึ้นเพื่อเป็นข้อมูลช่วยหัดมดตัวอื่นๆหาเส้นทางได้ดีขึ้นในรอบถัดไป ในขณะที่เดียวกันก็จะลดฟีโรโมนบนเส้นทางทั้งหมดเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสในการได้เส้นทางที่ไม่ดี

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง (Vehicle Routing Problem; VRP) เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดเส้นทางรถขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้าที่กระจายตามจุดต่างๆ [4] ภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดในการขนส่ง เช่น ความจุของรถบรรทุก ระยะเวลาในการส่งสินค้า เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเส้นทางการเดินทางที่สั้นที่สุด หรือมีต้นทุนการขนส่งที่น้อยที่สุด

ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางเป็นปัญหาเชิงการจัดที่มีความซับซ้อนในระดับ NP-Hard [5] และยากต่อการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) การแก้ปัญหาสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาที่ทำการศึกษาหรือลักษณะของวิธีที่ใช้แก้ปัญหา [6] โดย Zanakis et al. [7] ได้แนะนำให้ใช้วิธีฮิวริสติกส์ในการหาคำตอบแทนการใช้วิธีแม่นยำตรงสำหรับแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และต้องการคำตอบในเวลาอันสั้น Bullnheimer et al. [8] ได้ประยุกต์ใช้วิธีระบบมด (Ant System; AS) ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทางแล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการจัดเส้นทางทั้งหมด 3 วิธีคือ 1.วิธีค้นหาแบบทาบ (Tabu Search) 2.วิธีการจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing) และ

3.วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) จากผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีระบบมดสามารถให้คำตอบที่ดีโดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 4.43 เปอร์เซนต์ Gambardella et al. [9] ได้ประยุกต์ใช้วิธีระบบอาณานิคมมดหลายกลุ่ม (Multiple Ant Colony System; MACS) สำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถแบบมีกรอบเวลา (Vehicle Routing Problem with Time Window; VRPTW) จำนวน 17 ปัญหา โดยได้แบ่งมดออกเป็นสองกลุ่มสำหรับหาคำตอบคือ ใช้มดกลุ่มแรกในการหาจำนวนรถบรรทุกที่น้อยสุดที่ใช้ในการส่งสินค้า และใช้มดกลุ่มที่สองในการหาระยะทางการเดินทางที่น้อยที่สุด ซึ่งผลที่ได้พบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้คำตอบที่ดีกว่างานวิจัยของ Shaw [10] Rochart et al. [11] และ Taillard et al. [12] จำนวน 14 ปัญหา

วิธีการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธีการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับวิธีอาณานิคมมดเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น Bin et al. [13] ได้ประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมมดและการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt และการสลับเปลี่ยนลูกค้าระหว่างเส้นทาง (Exchange Customer) ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถแล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับวิธีการจัดเส้นทางที่ได้นำเสนอในงานวิจัยของ Bullnheimer et al. [8] ผลที่ได้พบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 0.14 เปอร์เซนต์ เช่นเดียวกับ ฐิตินันท์ และรพีพันธ์ [14] ได้ประยุกต์ใช้วิธีอาณานิคมมดและการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธีสลับเปลี่ยนลูกค้าระหว่างเส้นทาง การสลับสองตำแหน่ง (2-Opt) และการย้ายหนึ่งตำแหน่ง (One-Move) ในการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถของบริษัทเจียรนัยน้ำดื่ม ซึ่งผลที่ได้พบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอให้ผลลัพธ์อยู่ในระดับที่ดี โดยสามารถลดระยะทางการเดินทางลงได้ 24.46 เปอร์เซนต์จากระยะทางการเดินทางเดิม

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้หมัดหลายกลุ่มในการช่วยหาเส้นทางเพื่อแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสาร โดยผู้วิจัยคิดว่า การใช้หมัดหลายกลุ่มจะช่วยเพิ่มโอกาสในการพบคำตอบที่ดีเนื่องจากสร้างความหลากหลายมากขึ้น และยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการค้นหาคำตอบไปติดอยู่ในที่ใดที่หนึ่ง โดยผู้วิจัยจะทำการเก็บค่าฟีโรโมนแยกตามกลุ่มหมัด และใช้ฟีโรโมนส่วนกลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกลุ่ม เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนกับวิธีระบบอาณานิคมหมัดหลายกลุ่ม (MACS) ที่ได้ศึกษามา [9] ผู้วิจัยจึงได้เรียกวิธีที่นำเสนอใหม่เป็นระบบหลายอาณานิคมหมัด (MCAS) และได้รวมเอาวิธีการปรับปรุงคำตอบด้วยการสลับสองตำแหน่ง (2-Opt) เข้าด้วยกัน เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ดียิ่งขึ้น

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสาร

ปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสารที่ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสารที่มีความจุรถจำกัด (Capacitated Vehicle Routing Problem; CVRP) โดยลักษณะของปัญหาประกอบด้วยเซตของลูกค้า ศูนย์กระจายสินค้าหนึ่งแห่ง และรถบรรทุกที่ใช้ขนส่งสินค้าที่มีลักษณะและความจุที่เหมือนกัน (Homogenous Vehicle) [15] ซึ่งในการส่งสินค้าแต่ละครั้งรถบรรทุกจะต้องเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ศูนย์กระจายสินค้า โดยปริมาณสินค้ารวมที่ลูกค้าต้องการในแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินความจุของรถบรรทุก รถบรรทุกจะต้องส่งสินค้าให้กับลูกค้าจนครบทุกราย และลูกค้าแต่ละรายต้องรับสินค้าจากรถบรรทุกเพียงคันเดียว เป้าหมายของการจัดเส้นทางคือให้ต้นทุนหรือระยะการขนส่งรวมมีค่าน้อยที่สุด [16]

3.2 ขั้นตอนวิธีระบบหลายอาณานิคมหมัดสำหรับแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสาร

ระบบหลายอาณานิคมหมัดที่นำเสนอ มีความแตกต่างจากวิธีระบบอาณานิคมหมัดทั่วไปคือ มีการใช้หมัดหลายกลุ่มในการช่วยหาคำตอบโดยเก็บค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ (Local Pheromone) แยกตามกลุ่มหมัด และใช้ฟีโรโมนส่วนกลาง

(Global Pheromone) ในการแบ่งปันข้อมูลระหว่างกลุ่มระบบหลายอาณานิคมหมัดใช้วิธีค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด (Nearest neighbor search) ในการหาคำตอบเริ่มต้นเพื่อช่วยให้หมัดสามารถหาคำตอบที่ดีได้เร็วขึ้น การหาคำตอบของระบบหลายอาณานิคมหมัดจะแบ่งมคอออกเป็นหลายกลุ่ม โดยหมัดในแต่ละกลุ่มจะหาคำตอบที่เป็นไปได้จากค่าความน่าจะเป็นซึ่งคำนวณจากค่าของฟีโรโมนและค่าทัศนวิสัยของหมัด ในแต่ละรอบของการค้นหาคำตอบคำตอบของหมัดที่ดีที่สุดในแต่ละกลุ่มจะถูกนำไปปรับปรุงด้วยวิธีสลับสองตำแหน่ง (2-Opt) แล้วนำคำตอบที่ได้ไปปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ ส่วนคำตอบที่ดีที่สุดจากหมัดทุกกลุ่มจะถูกนำไปปรับค่าฟีโรโมนส่วนกลาง การหาคำตอบจะทำซ้ำจนกว่าจะครบรอบที่กำหนดไว้ แล้วนำคำตอบที่ดีที่สุดไปใช้จัดเส้นทางรถโดยสาร รายละเอียดของขั้นตอนการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถโดยสารด้วยระบบหลายอาณานิคมหมัดได้แสดงไว้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

กำหนดค่าพารามิเตอร์และค่าเริ่มต้นของฟีโรโมนส่วนกลางและฟีโรโมนเฉพาะที่

ขั้นตอนที่ 2

หาคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด

ขั้นตอนที่ 3

เมื่อยังไม่ถึงจำนวนรอบที่กำหนด

- สำหรับหมัดแต่ละกลุ่ม ทำขั้นตอนย่อยต่อไปนี้
 1. ค้นหาเส้นทางด้วยวิธีอาณานิคมหมัด
 2. นำคำตอบที่ดีที่สุดไปปรับปรุงด้วยวิธี 2-Opt
 3. นำคำตอบที่ปรับปรุงแล้วไปปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่
- คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากหมัดทุกกลุ่มเพื่อนำไปปรับค่าฟีโรโมนส่วนกลาง

ขั้นตอนที่ 4

ส่งคำตอบที่ดีที่สุด

3.2.1 การกำหนดค่าฟีโรโมน

การกำหนดค่าฟีโรโมนเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการหาคำตอบ โดยค่าฟีโรโมนที่มดใช้หาคำตอบจะมาจากค่าฟีโรโมนเฉพาะที่และค่าฟีโรโมนส่วนกลาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ค่าฟีโรโมนจะถูกเก็บไว้ในเมทริกซ์ขนาด $(n + 1) \times (n + 1)$ โดยที่ n คือ จำนวนลูกค้านั่งทั้งหมด เรียกเมทริกซ์นี้ว่า ฟีโรโมนเมทริกซ์ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วย $[\tau_{ij}]$ โดยที่ $i, j \in \{0, \dots, n\}$ เมื่อ 0 คือดัชนีของศูนย์กระจายสินค้า ในช่วงเริ่มต้น ค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนเฉพาะที่แต่ละค่าจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้งหมด

$$\tau_{ij} = \lambda \tau_{ij}^g + (1 - \lambda) \tau_{ij}^l ; \forall i \in \{1, \dots, L\} \quad (1)$$

โดย τ_{ij}^g คือค่าฟีโรโมนส่วนกลางระหว่างลูกค้า i กับลูกค้า j และ τ_{ij}^l คือค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ระหว่างลูกค้า i กับลูกค้า j ของมดกลุ่มที่ l โดยที่ L คือจำนวนกลุ่มของมดทั้งหมด ส่วน λ คือสัดส่วนระหว่างการใช้ค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $[0,1]$

3.2.2 การหาคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุด

การหาคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีค้นหาเพื่อนบ้านใกล้สุดเป็นวิธีการค้นหาเส้นทางโดยพิจารณาจากระยะทางที่น้อยที่สุดของลูกค้าข้างเคียงจากตำแหน่งลูกค้าปัจจุบัน โดยการค้นหาเส้นทางของมดแต่ละคันจะเริ่มจากศูนย์กระจายสินค้าไปส่งสินค้าให้กับลูกค้าที่ละราย จนกว่าปริมาณสินค้าที่เหลือมีไม่เพียงพอ หรือเมื่อลูกค้าได้รับสินค้าครบทุกราย แล้วจึงกลับมาที่ศูนย์กระจายสินค้า โดยลูกค้ารายหนึ่งจะรับสินค้าได้จากรถบรรทุกเพียงคันเดียวเท่านั้น

3.2.3 การเลือกเส้นทางจากค่าความน่าจะเป็น

การเลือกเส้นทางการเดินทางจะใช้ค่าความน่าจะเป็นซึ่งคำนวณจากปัจจัยที่สำคัญสองอย่างคือ ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมน (τ_{ij}) และค่าทัศนวิสัยของมด (η_{ij}) โดยค่าทัศนวิสัยของมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij} + \frac{d_{j0}}{b} + 1} ; \forall i, j \in \{0, \dots, n\} \quad (2)$$

โดย d_{ij} คือระยะทางจากลูกค้า i ไปยังลูกค้า j d_{j0} คือระยะทางจากลูกค้า j ไปยังศูนย์กระจายสินค้า b คือค่าคงที่ของการให้ความสำคัญกับลูกค้าที่อยู่ใกล้ศูนย์กระจายสินค้า และ n คือจำนวนลูกค้าทั้งหมด

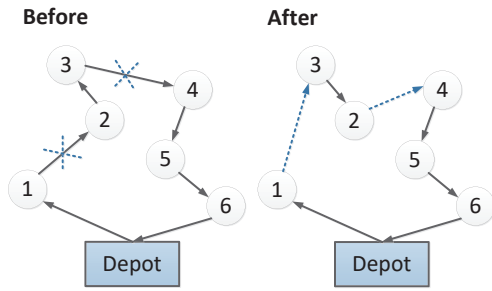
ในการเลือกลำดับของลูกค้านั่งถัดไป ค่าความน่าจะเป็นที่รถบรรทุกคันหนึ่งจะเลือกไปหาลูกค้า j จากตำแหน่งของลูกค้า i สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [17]

$$P_{ij} = \begin{cases} \max_{j \in S} [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta & \text{if } q \leq q_0 \\ \text{(exploitation)} \\ \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{z \in S} [\tau_{iz}]^\alpha [\eta_{iz}]^\beta} ; j \in S & \text{if } q > q_0 \\ \text{(exploration)} \end{cases} \quad (3)$$

โดย α และ β เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดคิทธิพลของการใช้ค่าความเข้มข้นของฟีโรโมนและค่าทัศนวิสัยของมดตามลำดับ S คือ เซตของลูกค้าที่ยังไม่ได้รับสินค้า q_0 เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเลือกค่าความน่าจะเป็นจากสมการ exploitation และ exploration และ q คือตัวแปรสุ่มที่ใช้เลือกค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $[0,1]$

3.2.4 การปรับปรุงคำตอบโดยใช้วิธีการค้นหาเฉพาะที่

วิธีการค้นหาเฉพาะที่เป็นวิธีที่ใช้สำหรับปรับปรุงคุณภาพของคำตอบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีสลับสองตำแหน่ง (2-Opt) ในการปรับปรุงเส้นทางที่ดีที่สุดที่ทำได้ของมดในแต่ละกลุ่ม โดยวิธีสลับสองตำแหน่งจะเลือกสลับสองเส้นเชื่อม (edge) ที่ไม่อยู่ติดกันบนเส้นทางเดิมเพื่อให้ได้เส้นทางใหม่ที่สั้นกว่าดังตัวอย่างในรูปที่ 1 การสลับจะสลับทุกเส้นเชื่อมที่เป็นไปได้ของรถบรรทุกแต่ละคันจนกว่าจะไม่สามารถสลับได้อีก เพื่อหาเส้นทางที่ให้ระยะทางสั้นที่สุด



รูปที่ 1 ตัวอย่างการปรับปรุงคำตอบด้วยวิธีสลับสองตำแหน่ง (2-Opt)

3.2.5 การปรับค่าฟีโรโมน

การปรับค่าฟีโรโมนเป็นการเพิ่มโอกาสให้มดสามารถหาเส้นทางที่ดีกว่าเดิม โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีที่เหมือนกันในการปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่และค่าฟีโรโมนส่วนกลาง การปรับค่าฟีโรโมนสามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ การลดค่าฟีโรโมน และการเพิ่มค่าฟีโรโมน

การลดค่าฟีโรโมนจะกระทำกับทุกค่าของกลุ่มอันดับ $[i, j]$ โดยฟีโรโมนเฉพาะที่และฟีโรโมนส่วนกลางทุกค่าจะถูกลดเป็นสัดส่วนที่เท่ากัน (กำหนดโดยอัตราการระเหย ρ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1) ซึ่งค่าฟีโรโมนใหม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) [18] โดย k คือดัชนีของฟีโรโมนเฉพาะที่ $(1, \dots, L)$ หรือฟีโรโมนส่วนกลาง (g)

$$\tau_{ij}^k = (1 - \rho)\tau_{ij}^k ; \forall i, j \in \{0, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, L; g\} \quad (4)$$

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างปัญหา

Instance	Detail (X, n, Z)	Instance	Detail (X, n, Z)
A-n33-k5	(5, 32, 100)	E-n76-k7	(7, 75, 220)
A-n53-k7	(7, 52, 100)	F-n45-k4	(4, 44, 2010)
A-n64-k9	(9, 63, 100)	F-n72-k4	(4, 71, 30000)
A-n80-k10	(10, 79, 100)	F-n135-k7	(7, 134, 2210)
B-n34-k5	(5, 33, 100)	M-n101-k10	(10, 100, 200)
B-n45-k5	(5, 44, 100)	M-n121-k7	(7, 120, 200)
B-n66-k9	(9, 65, 100)	P-n40-k5	(5, 39, 140)
B-n78-k10	(10, 77, 100)	P-n55-k7	(7, 54, 170)
E-n33-k4	(4, 32, 8000)	P-n76-k5	(5, 75, 280)
E-n51-k5	(5, 50, 160)	P-n101-k4	(4, 100, 400)

การเพิ่มค่าฟีโรโมนจะใช้คำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ของมดแต่ละกลุ่ม (d_k^*) ในการปรับค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ของมดกลุ่มนั้นๆ และใช้คำตอบที่ดีที่สุดจากมดทุกกลุ่มในการเพิ่มค่าฟีโรโมนส่วนกลาง โดย k แทนดัชนีของฟีโรโมนเฉพาะที่ $(1, \dots, L)$ หรือฟีโรโมนส่วนกลาง (g) การเพิ่มค่าจะเพิ่มเฉพาะเส้นเชื่อมที่อยู่บนเส้นทางของ d_k^* เท่านั้น โดยเพิ่มด้วยอัตราการเพิ่มของฟีโรโมน (Δ ; $\Delta > 0$) ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (5) [18]

$$\tau_{id_k^*(i)}^k = \tau_{id_k^*(i)}^k + \Delta ; \forall i \in \{0, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, L; g\} \quad (5)$$

โดย $d_k^*(i)$ คือ หมายเลขของลูกค้าที่ถัดจากลูกค้า i บนเส้นทาง d_k^*

4. การทดลองและผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบหลายอาณานิคมมดที่นำเสนอโดยใช้ภาษา C++ และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอกับวิธีระบบมด (Ant System; AS) โดยใช้ตัวอย่างปัญหาการจัดเส้นทางการเดินทาง 20 ปัญหาจากงานวิจัยของ Fukasawa et al. [19]

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างปัญหาที่ทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยชื่อของตัวอย่างปัญหา จำนวนรถบรรทุก (X) จำนวนลูกค้า (n) และความจุของรถบรรทุก (Z) ตามลำดับ

4.1 การทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีโดยใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and Error method) และได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลองดังนี้ จำนวนรอบในการหาคำตอบ (T) เท่ากับ 200 รอบ จำนวนกลุ่มมด (L) เท่ากับ 18 กลุ่ม จำนวนมดในแต่ละกลุ่ม (M) เท่ากับ 500 ตัว อิทธิพลของฟีโรโมน (α) เท่ากับ 1 อิทธิพลของทัศนวิสัยของมด (β) เท่ากับ 2 อัตราการระเหยของฟีโรโมน (ρ) เท่ากับ 0.04 อัตราการเพิ่มของฟีโรโมน (Δ) เท่ากับ 0.04 สัดส่วนระหว่างการใช้ค่าฟีโรโมนส่วนกลางและค่าฟีโรโมนเฉพาะที่ (λ) เท่ากับ 0.5 ค่าคงที่ b เท่ากับ 50 และค่าพารามิเตอร์ q_0 เท่ากับ 0.7 โดยทำการทดลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel® Core i3 ในแต่ละปัญหา ทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง บันทึกผลระยะทางสั้นที่สุดที่หาได้และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

4.2 ผลการทดลอง

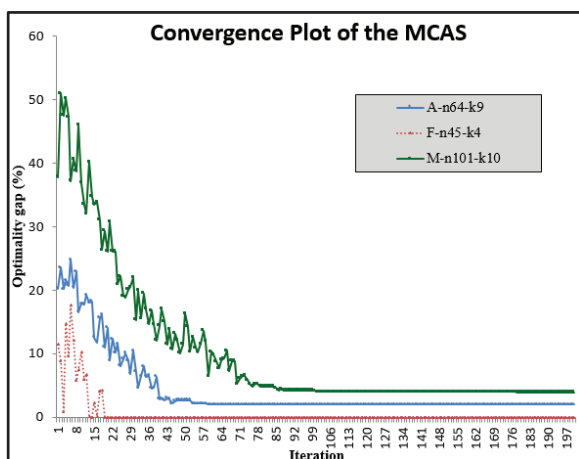
ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองจากตัวอย่างปัญหาที่ทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของคำตอบจากการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง (Average Value) ค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองทั้ง 10 ครั้ง (Best Value) และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการหาคำตอบ (Average Time) โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจากวิธีระบบหลายอาณานิคมมด (MCAS) และวิธีระบบมด (AS) ควบคู่กันไป ในส่วนของคำตอบได้คิดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในตัวอย่างปัญหา A-n33-k5 ค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธี MCAS มีค่าเท่ากับ 667.60 คิดเป็น 1.00% จากค่าที่เหมาะสมที่สุด ส่วนค่าเฉลี่ยที่ได้จากวิธี AS มีค่าเท่ากับ 672.00 คิดเป็น 1.66% จากค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยทั้งสองวิธีสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เท่ากับค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 661 โดยใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 67.25 และ 2.89 วินาที ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการทดลองจากตัวอย่างปัญหาที่ทดสอบ

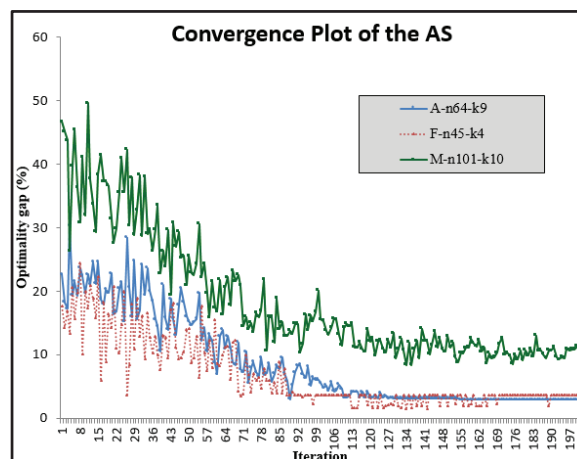
Instance	Optimal Value	Average Value				Best Value				Average time (sec)	
		MCAS		AS		MCAS		AS		MCAS	AS
		Value	% Gap	Value	% Gap	Value	% Gap	Value	% Gap		
A-n33-k5	661	667.60	1.00%	672.00	1.66%	661	0.00%	661	0.00%	67.25	2.89
A-n53-k7	1010	1022.30	1.22%	1038.60	2.83%	1017	0.69%	1017	0.69%	108.72	5.77
A-n64-k9	1401	1429.70	2.05%	1437.20	2.58%	1420	1.36%	1431	2.14%	129.28	7.92
A-n80-k10	1763	1800.20	2.11%	1820.40	3.26%	1784	1.19%	1797	1.93%	163.23	10.34
B-n34-k5	788	788.10	0.01%	788.80	0.10%	788	0.00%	788	0.00%	70.29	2.88
B-n45-k5	751	764.60	1.81%	787.00	4.79%	760	1.20%	778	3.60%	90.82	4.28
B-n66-k9	1316	1330.20	1.08%	1339.50	1.79%	1324	0.61%	1335	1.44%	132.36	7.71
B-n78-k10	1221	1236.50	1.27%	1271.60	4.14%	1224	0.25%	1261	3.28%	160.90	10.01
E-n33-k4	835	840.90	0.71%	841.90	0.83%	837	0.24%	841	0.72%	64.75	2.66
E-n51-k5	521	526.30	1.02%	543.90	4.40%	521	0.00%	539	3.45%	101.48	4.98
E-n76-k7	682	707.90	3.80%	723.20	6.04%	694	1.76%	713	4.55%	155.49	9.39
F-n45-k4	724	724.00	0.00%	732.90	1.23%	724	0.00%	732	1.10%	88.33	4.13
F-n72-k4	237	240.30	1.39%	244.50	3.16%	237	0.00%	242	2.11%	145.51	8.01
F-n135-k7	1162	1179.50	1.51%	1206.80	3.86%	1171	0.77%	1191	2.50%	385.30	21.67
M-n101-k10	820	851.60	3.85%	888.50	8.35%	840	2.44%	879	7.20%	247.54	14.25
M-n121-k7	1034	1050.80	1.62%	1084.30	4.86%	1038	0.39%	1048	1.35%	338.80	18.90
P-n40-k5	458	462.70	1.03%	465.70	1.68%	459	0.22%	463	1.09%	78.47	3.66
P-n55-k7	568	580.40	2.18%	587.30	3.40%	578	1.76%	583	2.64%	111.60	5.95
P-n76-k5	627	639.10	1.93%	662.00	5.58%	629	0.32%	647	3.19%	154.02	9.05
P-n101-k4	681	692.50	1.69%	702.30	3.13%	684	0.44%	694	1.91%	247.98	14.05
Average			1.56%		3.38%		0.68%		2.24%	152.11	8.43

4.3 กราฟการลู่เข้า

ผู้วิจัยได้แสดงกราฟการลู่เข้าของตัวอย่างปัญหาที่ทดสอบ โดยได้ยกตัวอย่างปัญหา 3 ปัญหา ซึ่งประกอบด้วย ตัวอย่างปัญหา F-n45-k4 ที่เป็นปัญหขนาดเล็ก ตัวอย่างปัญหา A-n64-k9 ที่เป็นปัญหขนาดกลาง และตัวอย่างปัญหา M-n101-k10 ที่เป็นปัญหขนาดใหญ โดยนำเสนอเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าที่หาได้กับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตามรอบการทำซ้ำ (Iteration) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 การลู่เข้าของคำตอบโดยใช้วิธีระบบหลายอาณานิคมมด (ก) และวิธีระบบมด (ข)

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีระบบหลายอาณานิคมมดร่วมกับวิธีปรับปรุงคำตอบด้วยการสลับสองตำแหน่ง (2-Opt) ในการแก้ปัญหการจัดเส้นทางรถที่มีความจุรถจำกัด และได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการจัดเส้นทางรถของวิธีที่นำเสนอกับวิธีระบบมดที่ใช้กันทั่วไป จากการทดลองกับตัวอย่างปัญหา 20 ปัญหาพบว่า วิธีระบบหลายอาณานิคมมดสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเพียง 0.68% ส่วนเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมีค่าเพิ่มขึ้นจากวิธี

รูปที่ 2 (ก) แสดงการลู่เข้าของคำตอบโดยใช้วิธีระบบหลายอาณานิคมมด จากรูปจะเห็นได้ว่าคำตอบมีการลู่เข้าที่ค่อนข้างเร็ว โดยใช้จำนวนรอบการทำซ้ำน้อยกว่า 100 รอบแม้ในปัญหขนาดใหญ รูปที่ 2 (ข) แสดงการลู่เข้าของคำตอบโดยใช้วิธีระบบมด จากรูปจะเห็นได้ว่าคำตอบมีการลู่เข้าที่ค่อนข้างช้า และยังคงมีการแกว่งในรอบการทำซ้ำหลายๆรอบแม้ในปัญหขนาดเล็ก โดยไม่มีแนวโน้มที่คำตอบจะมีค่าลดลง และจากการทดลอง การเพิ่มจำนวนรอบการทำซ้ำไม่ค่อยมีประโยชน์ต่อคำตอบสุดท้ายที่หาได้ ถึงแม้ว่าจะทำให้การแกว่งลดลงหรือหายไปก็ตาม

ระบบมดค่อนข้างมาก แต่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

6. แนวทางการนำไปใช้งานและการพัฒนาต่อ

ในสภาพความเป็นจริง การจัดเส้นทางรถมักมีปัจจัยที่ไม่แน่นอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างเช่น ลูกค้าน่าต้องการปริมาณสินค้าที่แตกต่างจากที่ได้คาดการณ์ไว้ ระยะทางที่สั้นที่สุดอาจไม่ใช่เส้นทางที่ดีที่สุด เนื่องจากสาเหตุของสภาพการจราจร เป็นต้น นอกจากนี้ การจัดเส้นทางในทางปฏิบัติยังขึ้นอยู่กับเงื่อนไขอื่นๆ เช่น ช่วงเวลาที่ต้องส่งสินค้า การกำหนดขอบเขตของรถบรรทุก

ในการส่งสินค้า เป็นต้น ดังนั้น เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาจริงได้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะปรับปรุงเพิ่มเติมดังนี้

- พิจารณาปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถที่มีค่าความต้องการเป็นแบบสโตแคสติก (Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand; VRPSD) [20] โดยใช้การแจกแจงความน่าจะเป็นในการแทนค่าความต้องการของลูกค้าที่ไม่ทราบค่าล่วงหน้า ในทางปฏิบัติ ผู้ใช้สามารถเก็บข้อมูลความต้องการของลูกค้าได้จากสถิติของข้อมูลเก่า การแก้ปัญหาก็จะแตกต่างจากปัญหาการจัดเส้นทางแบบเชิงกำหนดคือ ต้องใช้การหาค่าคาดหมาย (Expected Value) แทนการหาค่าต้นทุนหรือระยะทางแบบปกติ ซึ่งผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะใช้การสุ่มตัวอย่างในการประเมินค่าคาดหมายของสมการเป้าหมาย โดยคุณภาพของคำตอบที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (Sample Size) รวมทั้งการทำการทดลองซ้ำ
- ใช้เวลาในการขนส่งแทนระยะทาง โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ วันและเวลาที่ขนส่ง เวลาที่เริ่มการขนส่ง ระยะเวลาที่ใช้ในการขนส่ง

ระยะเวลาที่ใช้ในการให้บริการลูกค้า ซึ่งปัญหาในลักษณะแบบนี้เป็นปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถแบบพลวัต (Dynamic Vehicle Routing Problem; DVRP) [21] การแก้ปัญหาก็จะต้องทำร่วมกับการเก็บข้อมูลตามเส้นทางจริง รวมทั้งข้อมูลการจราจรในแต่ละช่วงเวลาของวันในพื้นที่ที่จัดเส้นทาง การค้นหาคำตอบจะใช้เวลามากขึ้นเนื่องจากไม่สามารถคำนวณเวลาการขนส่งไว้ล่วงหน้าเหมือนในกรณีของการคิดระยะทาง เพราะระยะเวลาการเดินรถอาจมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัช่วงเวลาในการขนส่ง ทำให้ต้องมีการคำนวณระยะเวลาใหม่ทุกครั้งในระหว่างการค้นหาคำตอบ

- เพิ่มเงื่อนไขขอบเขตการขนส่งของรถบรรทุก เช่น ในปัญหาการเก็บขยะซึ่งมีการแบ่งเขตหรือพื้นที่ในการให้บริการ ซึ่งการเพิ่มเงื่อนไขของปัญหาในลักษณะนี้สามารถทำได้โดยการแบ่งกลุ่มของลูกค้าตามเขตที่กำหนดไว้ เพื่อให้ไม่ให้เกิดไปส่งสินค้าให้กับลูกค้าที่อยู่ต่างเขตได้ แต่อาจอนุญาตให้มีการกำหนดพื้นที่ทับซ้อน เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. รายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทย. 2559, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.nesdb.go.th/ewt_dl_link.php?nid=6854
- [2] Carwalo, T. and Patil, V. Solving Vehicle Routing Problem using Ant Colony Optimization with Nodal Demand. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2015; 4: 679-682.
- [3] Colomi, A., Dorigo, M., Maniezzo, V. Distributed optimization by ant colonies. *Proceedings of the first European conference on artificial life*, 1991; 142: 134-142.
- [4] Laporte, G. The vehicle routing problem: An Overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operation Research*, 1992; 59: 345-358.
- [5] Mazzeo, S., Loiseau, I. An ant colony algorithm for the capacitated vehicle routing. *Discrete Mathematics*, 2004; 18: 181-186.
- [6] Toth, P. and Vigo, D. The Vehicle Routing Problem. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. SIAM, Philadelphia, 2002.
- [7] Zanakakis, S.H., Evans, J.R. Heuristic optimization: why, when, and how to use it. *Journal of Heuristics*, 1981; 11(5): 84-91.

- [8] Bullnheimer, B., Hartl, R. F. and Strauss, C. Applying the ant system to the vehicle routing problem. The second Metaheuristics International Conference, Sophia-Antipolis, France, 1997.
- [9] Gambardella, L. M., Taillard, E. and Agazzi, G. MACS-VRPTW: a multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. McGraw-Hill, New-York, NJ, 1999; 63-76.
- [10] Shaw, P. Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems. The fourth International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, Springer-Verlag, 1998; 417-431.
- [11] Rochat, Y. and Taillard, É. D. Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing. *Journal of Heuristics*, 1995; 1: 147-167.
- [12] Taillard, É. D., Badeau, P., Gendreau, M., Guertin, F. and Potvin, J. Y. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows. *Journal of Transportation Science*, 1997; 31: 170-186.
- [13] Bin, Y., Zhong-Zhen, Y. and Baozhen, Y. An improved ant colony optimization for vehicle routing problem. *European journal of operational research*, 2009; 196(1): 171–176.
- [14] จิตินันท์ ศรีสุวรรณดี และ รพีพันธ์ ปิตาคะโส. การแก้ปัญหาการจัดเส้นทางรถขนส่งยานพาหนะด้วยวิธีการอาณานิคมมด กรณีศึกษา บริษัทเจียรนัยน้ำดื่ม จำกัด. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น*, 2555; 17(5): 706-714.
- [15] Lui, R. and Jiang Z. The close-open mixed vehicle routing problem. *European Journal of Operation Research*, 2012; 220: 349-360.
- [16] Sun, X., Fu, Y. and Liu, T. A Hybrid ACO Algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problems. The second IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2017; 1(1): 510-514.
- [17] Dorigo, M. and Gambardella, L. M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1997; 1(1): 53-66.
- [18] Merkle, D. and Middendorf, M. Swarm Intelligence. New York, USA: Springer US, 2005; 401-435.
- [19] Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., Poggi de Aragao, M., Reis, M., Uchoa, E. and Werneck, R. F. Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Mathematical Programming*, 2006; 106(3): 491-511.
- [20] Gendreau, M., Laporte, G. and Seguin, R. Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 1996; 88(1): 3-12.
- [21] Zhang, J., Lam, W.H., Chen, B.Y. A stochastic vehicle routing problem with travel time uncertainty: trade-off between cost and customer service. *Journal of Networks and Spatial Economics*, 2013; 13(4): 471-496.



การวิเคราะห์การรับแรงกระแทกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มี อัตราส่วนของระยะช่วงเฉือนต่อความลึกต่างกัน Impact Analysis of RC Beams with Different Shear Span-to-Depth Ratios

ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา^{1*} และ ชยานนท์ ธรรมภิญโญ²

Piyapong Wongmatar and Chayanon Hansapinyo

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

²ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการภัยพิบัติทางธรรมชาติ (CENDIM)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

¹Department of Civil Engineering

²Center of Excellence for Natural Disaster Management

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 239 Huay Kaew Rd., Muang District,
Chiang Mai, Thailand, 50200

E-mail: ¹*piyapong.wongmatar@cmu.ac.th, ²chayanon@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

เพื่อความมั่นใจในความปลอดภัยของโครงสร้างภายใต้การกระทำแรงกระแทก มาตรฐานการออกแบบโดยทั่วไป แนะนำการใช้ตัวแปรแรงกระแทกด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าในการออกแบบโครงสร้างโดยไม่คำนึงถึงพฤติกรรมจากแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนของระยะช่วงเฉือนต่อความลึกของหน้าตัดต่างกันด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กระทำโดยการสอบเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบจากงานวิจัยในอดีต การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการตกกระแทกด้วยก้อนเหล็กมวล 400 กิโลกรัมที่ปล่อยจากความสูง 0.15, 0.30, 0.60 และ 1.20 เมตรประกอบด้วย 3 ตัวอย่างซึ่งมีค่าอัตราส่วนของระยะช่วงเฉือนต่อความลึกคือ 5.6, 4.7 และ 4.0 จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ระยะความสูงการปล่อยก้อนเหล็กที่เท่ากันนั้นขนาดของแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น ภายใต้อิทธิพลของการปล่อยก้อนที่ต่างกันพบว่าขนาดของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อย่างไรก็ตามขนาดของแรงเฉือนมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความสูงของการปล่อยก้อนที่เพิ่มขึ้นแต่การเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนในคานนั้นถูกจำกัดเฉพาะบริเวณช่วงกึ่งกลางคานซึ่งเป็นจุดที่ตกกระแทกโดยก้อนเหล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของอัตราส่วนระยะช่วงเฉือนต่อความลึกของคานมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การวิบัติแบบเฉือนจากแรงกระแทก ดังนั้นการใช้ตัวแปรแรงกระแทกในการออกแบบโครงสร้างโดยไม่คำนึงถึงพฤติกรรมจริงภายใต้แรงกระแทกของโครงสร้างนั้นสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแบบคดเป็นแบบเฉือนได้

ABSTRACT

To ensure structural safety under impact load, impact load factor is suggested in design codes base on an equivalent static approach without considering the actual impact behavior of the structure. Hence, this paper is aimed to study the impact behavior RC beams with different shear span-to-depth

ratios using finite element method. First, the accuracy of the finite element model was validated with a test from literature. Then, three reinforced concrete beams with the shear span-to-depth ratios of 5.6, 4.7 and 4.0 were impacted at mid-span by dropping 400 kg. weight at the heights of 0.15, 0.3, 0.6, 1.2 and 1.8 m. From the analysis, under an identical dropping height, the magnitude of the shear force increased when the depth of section increased. Under different dropping heights, the magnitude of the bending moment was changed insignificantly. However, the shear force was increased with the increase of dropping height. Nevertheless, the increase of shear forces was limited only in the mid-span region which is the impact position. Moreover, it is found that the decrease in shear span-to-depth ratio tends to increase the unfavorable shear failure under the impact load. Hence, using the impact load factor for the structural design without considering the actual impact behavior can lead to the failure mode alteration from the flexural failure to the shear failure.

1. บทนำ

มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงกระแทกโดยทั่วไปแนะนำวิธีการออกแบบโดยอาศัยตัวแปรแรงกระแทกซึ่งเป็นแรงสถิตเทียบเท่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยไม่ได้คำนึงถึงพฤติกรรมจริงของโครงสร้างภายใต้แรงกระแทก [1,2] การตอบสนองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระแทกนั้นไม่สามารถใช้เพียงการวิเคราะห์เชิงสถิตในการอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างได้ เนื่องจากหากมองที่สมมูลแรงของปัญหาการกระแทกพบว่าแรงที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยแรงกระแทกแรงปฏิกิริยา และแรงเฉื่อย [3] โดยนิยามของแรงเฉื่อยคือมวลคูณความเร่งในขณะนั้น ซึ่งแรงเฉื่อยนี้ไม่สามารถพบในปัญหาเชิงสถิต รูปแบบความเสียหายของคานที่ถูกออกแบบให้เสียหายในรูปของการคัดเมื่อพิจารณาจากแรงเชิงสถิตสามารถเปลี่ยนเป็นการเสียหายแบบเฉือนได้เมื่อแรงที่กระทำกับคานนั้นเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆและมีความเข้มของแรงสูง [4-6] โดยการเสียหายแบบเฉือนที่พบจากการกระแทกนั้นถูกแสดงในลักษณะของรอยร้าวเฉือนรูปกรวยคว่ำ (shear plug) ได้ตำแหน่งที่เกิดการกระแทก [7] Pham และ Hao [8] ศึกษาและเสนอไดอะแกรมของสมมูลแรงที่เกิดขึ้นในคานช่วงเดียว (simple beam) เมื่อรับแรงกระแทก โดยพบว่าการกระจายของแรงเฉื่อยในไดอะแกรมสมมูลแรงที่เสนอมีลักษณะการกระจายแบบเส้นตรงตลอดทั้งคาน และเมื่อพิจารณาแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากไดอะแกรมของสมมูลแรงดังกล่าวพบว่า ขณะที่เกิดแรงกระแทกสูงสุดค่าแรงเฉือนที่

เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงกระแทกดังกล่าว และ Wongmatar และ Hansapinyo [9] เสนอว่าในขณะที่เกิดแรงกระแทกสูงสุดนั้นแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับของคานมีค่าน้อยมากแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลาดังกล่าวแรงกระแทกที่เกิดขึ้นถูกต้านทานโดยแรงเฉื่อย พฤติกรรมดังกล่าวนี้ยังพบในการทดสอบอื่นที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของคานภายใต้แรงกระแทกที่มีอัตราการเกิดแรงสูง [10-12] นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของแรงเฉื่อยสามารถเห็นขี้นำให้เกิดโมเมนต์ดัดในทิศทางลบในคานช่วงเดียวซึ่งจะไม่พบจากปัญหาเชิงสถิต [13] Ozbolt และ Sharma [14] พบว่าระยะเรียงของเหล็กดัดมีผลอย่างมากต่อการกระจายของรอยแตกร้าวจากแรงกระแทกในคานรวมถึงรูปแบบการบิดของคาน

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนของระยะช่วงเฉือนต่อความลึกของหน้าตัดต่างกันด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอัตราส่วนของระยะช่วงเฉือนต่อความลึกที่ต่างกันเกิดจากการแปรผันขนาดความลึกของหน้าตัดคานแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สร้างด้วยโปรแกรม LS-DYNA และสอบเทียบความถูกต้องโดยเทียบผลวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Fujikake [15]

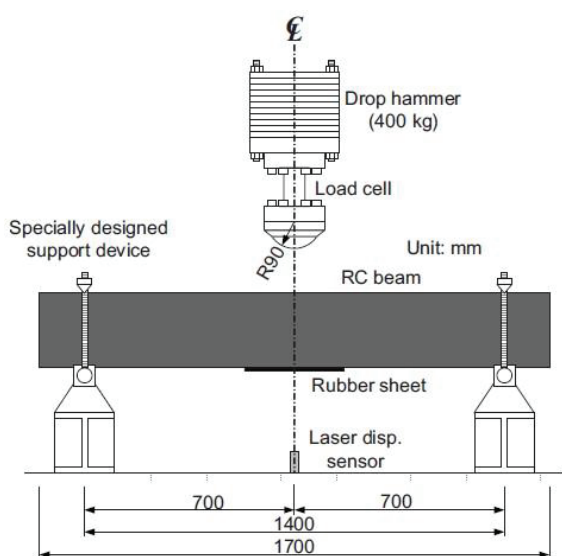
2. ความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ LS-DYNA และตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้จาก

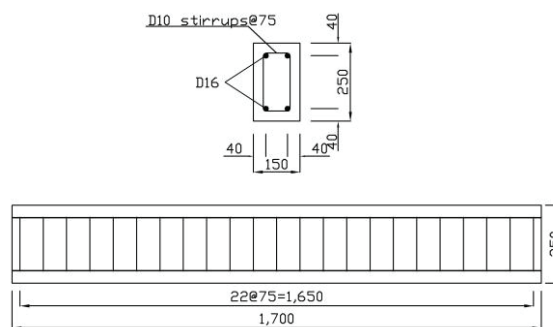
แบบจำลองนี้ โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับ
ผลทดสอบจริงจากงานวิจัยในอดีต

2.1 การทดสอบที่ใช้สอบเทียบแบบจำลอง

การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองใน
งานวิจัยนี้อาศัยผลการทดสอบการรับแรงกระแทกของคาน
คอนกรีตเสริมเหล็กของ Fujikake [15] ซึ่งใช้คอนกรีต
มวล 400 กิโลกรัมปล่อยตกอิสระจากความสูง 0.3, 0.6
และ 1.2 เมตร ตกกระแทกที่กึ่งกลางคานช่วงเดียวดังแสดง
ในรูปที่ 1 โดยมีมิติของคานทดสอบดังรูปที่ 2 สำหรับ
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 42 เมกะปาสกาล
(MPa) กำลังครากของเหล็กเสริมตามยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง
16 มิลลิเมตรเท่ากับ 426 MPa และกำลังครากของเหล็ก
ลวดขนาด 10 มม. เท่ากับ 295 MPa



รูปที่ 1 การทดสอบของ Fujikake [15]



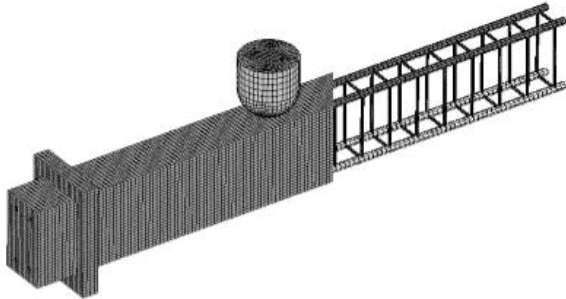
รูปที่ 2 ขนาดและมิติของคานจากการทดสอบ [15]

2.2 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กและเงื่อนไขการยึดรั้ง

แบบจำลอง 3 มิติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสร้าง
ขึ้นด้วยโปรแกรม LS-DYNA ดังแสดงในรูปที่ 3 จาก
การพิจารณาการเข้าสู่ของผลการวิเคราะห์ขนาดของเอลิ
เมนต์ 10 มม. นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในงานวิจัย
นี้โดยขนาดของเอลิเมนต์ที่เล็กลงไม่ส่งผลต่อผลการ
วิเคราะห์แต่ส่งผลให้เวลาในการวิเคราะห์มากขึ้น สำหรับ
แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนวัสดุคอนกรีต
จำลองโดยใช้เอลิเมนต์ eight-node constant stress
solid แบบ one-point Gauss integration เพื่อ
หลีกเลี่ยงการเสถียรแบบ nonphysical ซึ่งเป็นผลกระทบ
จากเอลิเมนต์ชนิดนี้ จึงเลือกใช้วิธีการควบคุม hourglass
mode โดยอาศัยหลักการ viscous form ที่เสนอโดย
Flanagan และ Belytschko [16] และการจำลองเหล็ก
เสริมภายในของคานใช้เอลิเมนต์ 2-node Hughes-Liu
beam แบบ 2x2 Gauss quadrature สำหรับพันธะ
ระหว่างเหล็กเสริมภายในและคอนกรีตจำลองโดยใช้
node ของเอลิเมนต์ร่วมกัน ในส่วนของค้อนเหล็กและ
ฐานรองรับจำลองโดยใช้เอลิเมนต์แข็ง (rigid)

การยึดรั้งของคานจำลองให้สอดคล้องกับการ
ทดสอบจริง โดยยึดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งไว้และปล่อยให้
จุดรองรับรองรับมีการหมุนแบบอิสระ บริเวณจุดที่เกิดการ
กระแทกระหว่างค้อนเหล็กและคานรวมถึงแรงกระแทกที่
เกิดขึ้นจำลองโดยใช้คำสั่ง *CONTACT AUTOMATIC
SURFACE TO SURFACE [17] ค่าสัมประสิทธิ์ทริความ

เสียหายของพื้นผิวบริเวณที่เกิดการกระแทกที่ใช้ในคำสั่งดังกล่าวเท่ากับ 0.5 [18] ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงจำลองโดยใช้คำสั่ง *LOAD BODY



รูปที่ 3 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กและค้อนเหล็ก

2.3 แบบจำลองวัสดุ

พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของวัสดุคอนกรีตจำลองขึ้นโดยใช้ *MAT CONCRETE DAMAGE REL3 ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวสามารถแสดงพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของคอนกรีตได้อย่างดี [17] นอกจากนี้เพื่อหลีกเลี่ยงผลวิเคราะห์ที่ผิดพลาดจากการบิดของเอลิเมนต์คอนกรีตในช่วงไม่เชิงเส้น คำสั่ง *MAT ADD EROSION ถูกใช้เพื่อลบเอลิเมนต์คอนกรีตที่เสียหายหนักและไม่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงของคานแล้ว โดยเอลิเมนต์ดังกล่าวจะถูกลบออกเมื่อมีค่า principal strain เท่ากับ 0.15 [17,19] สำหรับวัสดุของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กถูกตั้งในแบบจำลองนี้ใช้ *MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY และวัสดุของค้อนเหล็กและฐานรองรับจำลองโดย *MAT RIGID

2.4 ผลของอัตราการเกิดความเครียดต่อกำลังของวัสดุ

เป็นที่ทราบดีว่าอัตราการเกิดความเครียด (strain rate) ในคอนกรีตและเหล็กสามารถทำให้กำลังของวัสดุสูงขึ้นได้ แรงกระแทกเป็นแรงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นและมีความเข้มสูงจึงส่งผลให้อัตราการเกิดความเครียดในวัสดุสูง ดังนั้นในแบบจำลองนี้จึงมีการพิจารณาผลของ

อัตราการเกิดความเครียดที่มีต่อกำลังวัสดุคอนกรีตและเหล็ก

การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงของคอนกรีตซึ่งแปรผันตามอัตราการเกิดความเครียดหรือที่รู้จักในชื่อของ Dynamic Increase Factor (DIF) ในการศึกษาี้เลือกใช้สมการที่เสนอโดย CEB [3] ในการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังอัด (CDIF) และใช้สมการที่เสนอโดย Malvar และ Ross [20] ในการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (TDIF) โดยประกอบด้วยสมการต่อไปนี้

$$TDIF = \frac{f_t}{f_{ts}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ts}} \right)^{\delta} \quad \text{เมื่อ } \dot{\epsilon} \leq 1s^{-1} \quad (1)$$

$$TDIF = \frac{f_t}{f_{ts}} = \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ts}} \right)^{1/3} \quad \text{เมื่อ } \dot{\epsilon} > 1s^{-1} \quad (2)$$

โดย f_t คือกำลังรับแรงดึงที่อัตราการเกิดความเครียด ($\dot{\epsilon}$) ในขณะนั้น และ f_{ts} กำลังรับแรงดึงเมื่ออัตราการเกิดความเครียด ($\dot{\epsilon}_{ts}$) เท่ากับ 3×10^{-6} และ $\log \beta = 6\delta - 2$ สำหรับ f'_c คือกำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์และ $\delta = 1 / (1 + 8f'_c / f'_{co})$ เมื่อ f'_{co} คือกำลังอัดคงที่ 10 MPa สำหรับการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากอัตราการเกิดความเครียดเสนอด้วยสมการนี้

$$CDIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{cs}} \right)^{1.026\alpha} \quad \text{เมื่อ } \dot{\epsilon} \leq 30s^{-1} \quad (3)$$

$$CDIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \gamma (\dot{\epsilon})^{1/3} \quad \text{เมื่อ } \dot{\epsilon} > 30s^{-1} \quad (4)$$

โดย f_c คือกำลังรับแรงอัดที่อัตราการเกิดความเครียดในขณะนั้น f_{cs} คือกำลังอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์จากการทดสอบที่ $\dot{\epsilon}_{cs}$ เท่ากับ 3×10^{-6} $\log \gamma = 6.156\alpha - 0.49$ เมื่อ $\alpha = 1 / (5 + 3f_{cs})$

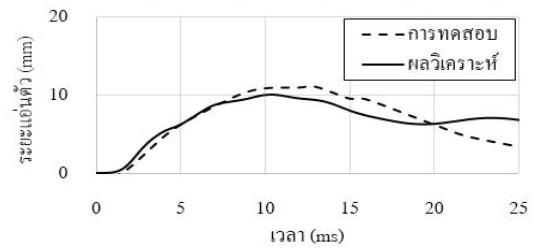
สำหรับผลของอัตราการเกิดความเครียดต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังครากของเหล็กพิจารณาจากสมการที่เสนอโดย Malvar [22] โดยสมการแสดงดังนี้

$$DIF = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-4}} \right)^{\alpha} \quad (5)$$

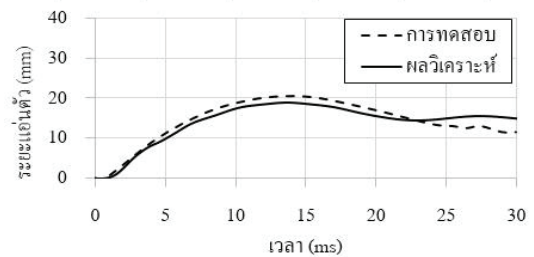
โดย $\alpha = 0.074 - 0.04f_y / 414$ และ f_y คือกำลังครากหน่วย MPa

2.5 สอเทียบผลวิเคราะห์จากแบบจำลอง

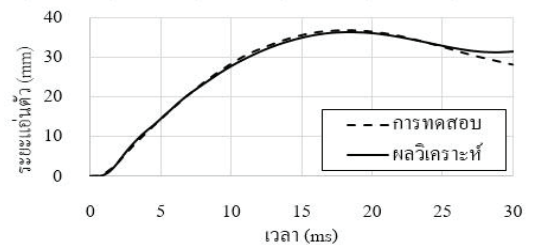
ผลการทดสอบของ Fujikake [15] นำมาใช้ในการสอเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง การเปรียบเทียบผลประกอบด้วยค่าระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน แรงกระแทกที่เกิดขึ้น และรูปแบบความเสียหายภายนอกจากการกระแทก กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าระยะการแอ่นตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานจากการกระแทกด้วยค้อนเหล็กที่ปล่อยจากความสูงที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 4 กราฟการเปรียบเทียบแรงกระแทกที่เกิดจากการกระแทกด้วยค้อนเหล็กที่กึ่งกลางคานแสดงดังรูปที่ 5 โดยค่าแรงกระแทกดังกล่าวเป็นค่าที่วัดได้จากค้อนเหล็ก และการเปรียบเทียบความเสียหายภายนอกที่เกิดจากการกระแทกแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งรูปแบบความเสียหายภายนอกจากการวิเคราะห์นั้นแสดงโดยค่า effective plastic strain ของเอลิเมนต์ จากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าผลวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลทดสอบจริง อีกทั้งรูปแบบความเสียหายของคานจากแรงกระแทกที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองนี้สอดคล้องกับความเสียหายจริงที่เกิดขึ้น ทั้งส่วนของลักษณะรอยร้าวและความเสียหายจากการอัดแตก (crushing) บริเวณจุดกระแทก ดังนั้นแบบจำลองในงานวิจัยนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจและมีความเหมาะสมในการใช้จำลองพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กต่อไป



(ก) ระยะตก 0.3 เมตร

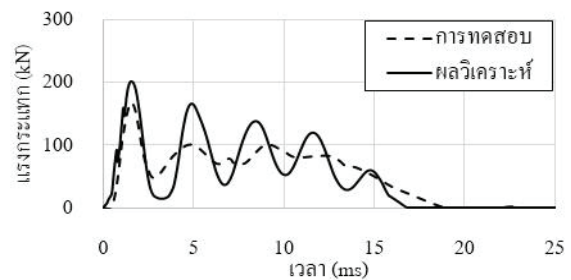


(ข) ระยะตก 0.6 เมตร



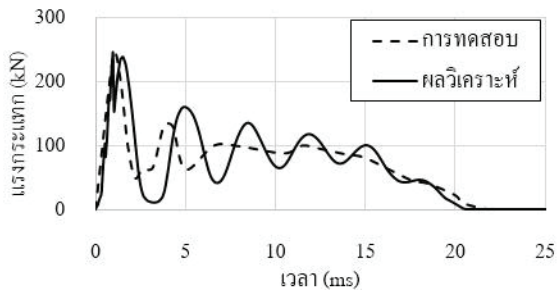
(ค) ระยะตก 1.2 เมตร

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานระหว่างผลวิเคราะห์จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Fujikake [15]

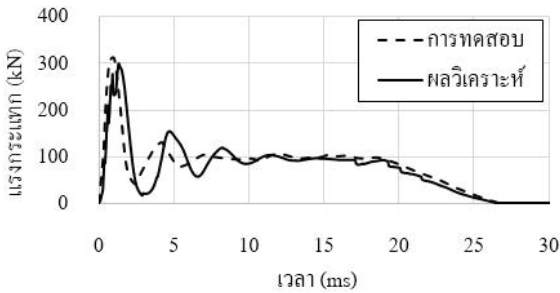


(ก) ระยะตก 0.3 เมตร

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบแรงกระแทกที่วัดจากค้อนเหล็กระหว่างผลวิเคราะห์จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Fujikake [15]

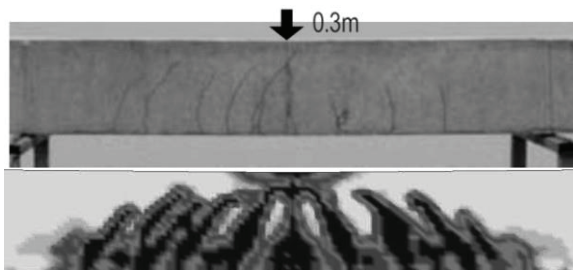


(จ) ระยะตก 0.6 เมตร

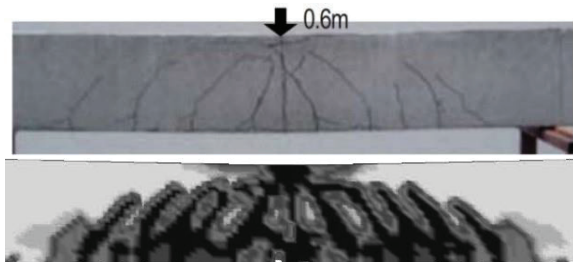


(ข) ระยะตก 1.2 เมตร

รูปที่ 5 (ต่อ) การเปรียบเทียบแรงกระแทกที่เกิดจากค้อนเหล็กตกกระแทกที่กึ่งกลางคานระหว่างผลวิเคราะห์จากแบบจำลองและผลการทดสอบของ Fujikake [15]

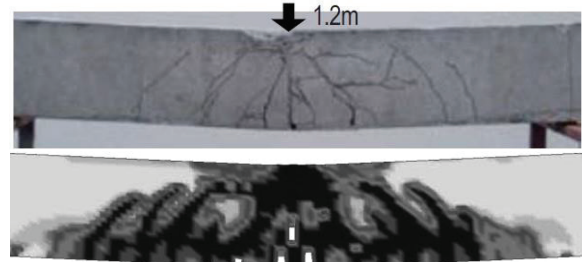


(ก) ระยะตก 0.3 เมตร



(ข) ระยะตก 0.6 เมตร

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความเสียหายภายนอกกระหว่างผลวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Fujikake [15]



(ค) ระยะตก 1.2 เมตร

รูปที่ 6 (ต่อ) เปรียบเทียบความเสียหายภายนอกกระหว่างผลวิเคราะห์กับผลทดสอบของ Fujikake [15]

3. พฤติกรรมการรับแรงกระแทกของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1 ขอบเขตตัวอย่างวิเคราะห์

ตัวอย่างคานวิเคราะห์ประกอบด้วย 3 ตัวอย่างคือ A, B และ C ซึ่งเป็นการแปรผันขนาดความลึกของหน้าตัดประกอบด้วย 250, 300 และ 350 มม. ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 7 โดยคานทั้งหมดมีเหล็กเสริมตามยาวทั้งด้านรับแรงดึงและแรงอัดขนาด 16 มม. (D16) จำนวน 2 เส้น และเหล็กปลอกขนาด 10 มม. (D10) วางที่ระยะห่าง 75 มม. ระยะช่วงพาดยาวเท่ากับ 1,400 มม. และมีส่วนยื่นยาวด้านละ 150 มม. ดังแสดงในรูปที่ 7 สำหรับค่าแรงที่แสดงในตารางที่ 1 ประกอบด้วย ขนาดของแรงกดที่กึ่งกลางคานที่ทำให้แรงคัดในคานเท่ากับกำลังคัตสูงสุด ($F_{U,M}$) และ ขนาดของแรงกดที่กึ่งกลางคานที่ทำให้แรงเฉือนในคานเท่ากับกำลังเฉือนสูงสุด ($F_{U,V}$) โดยกำลังของคานคำนวณจากมาตรฐาน ACI [22] รวมถึงค่าอัตราส่วนของแรง $F_{U,V}$ ต่อ $F_{U,M}$ จากอัตราส่วนดังกล่าวพบว่าทุกตัวอย่างมีค่าอัตราส่วนมากกว่า 1.0 แสดงให้เห็นว่าภายใต้แรงสถิตคานทั้งหมดควรวิบัติจากการคัต สำหรับกำลังวิกฤตของคานแสดงดังตารางที่ 2 และอัตราส่วนของความยาวช่วงพาดต่อความลึกของคานแสดงดังตารางที่ 3 สำหรับการกระแทกใช้ค้อนเหล็กมวล 400 กิโลกรัม ปล่อยจากความสูง 0.15, 0.3, 0.6, 1.2 และ 1.8 เมตรตกกระแทกที่กึ่งกลางคาน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างวิเคราะห์และกำลังออกแบบ

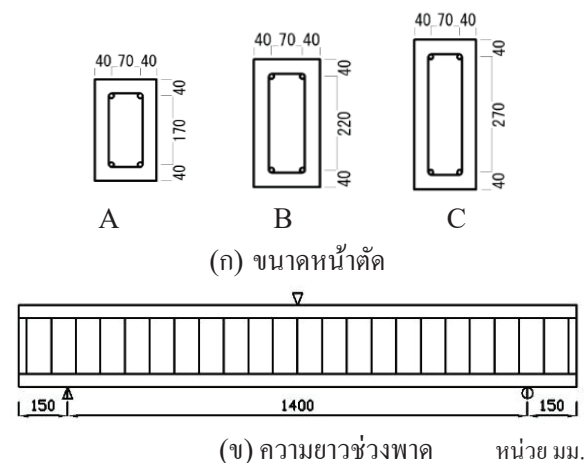
ชื่อ	ขนาดหน้าตัด (กว้าง×ลึก) (มม.)	$F_{U,M}^*$ (kN)	$F_{U,V}^{**}$ (kN)	$F_{U,V}/F_{U,M}$
A	150×250	93	132	1.4
B	150×300	118	148	1.3
C	150×350	142	163	1.1

* แรงกดที่ทำให้ค่าแรงดัดในคานเท่ากับกำลังดัดสูงสุด

** แรงกดที่ทำให้ค่าแรงเฉือนในคานเท่ากับกำลังเฉือนสูงสุด

ตารางที่ 2 กำลังวัสดุ

กำลังอัดคอนกรีต	42 MPa
เหล็กเสริม	กำลังคราก (MPa)
D16	426
D10	295



รูปที่ 7 มิติของตัวอย่างคานตัวอย่างวิเคราะห์

ตารางที่ 3 อัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกคาน

ตัวอย่าง	อัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกคาน
A	5.6
B	4.7
C	4.0

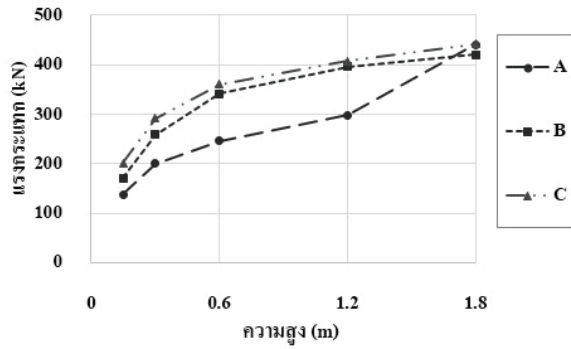
3.2 ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

3.2.1 แรงลัพท์จากการวิเคราะห์

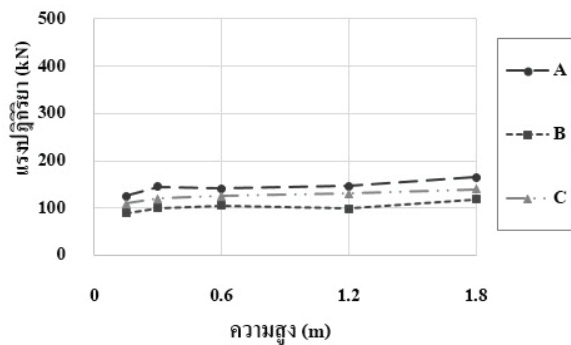
แรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้จากคานเหล็กเมื่อปล่อยจากความสูงที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าเมื่อความสูง

การปล่อยคานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ขนาดแรงกระแทกเพิ่มมากขึ้นตาม นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของความลึกคานซึ่งทำให้อัตราส่วนของความยาวช่วงพาดต่อความลึกคานมีค่าลดลงนั้นทำให้ขนาดของแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากความสูงปล่อยคานที่เท่ากัน ยกเว้นกรณีปล่อยคานจากความสูง 1.8 เมตรซึ่งแรงกระแทกสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกัน แรงปฏิกิริยาสูงสุดจากจตุรรองรับที่วัดได้จากความสูงการปล่อยคานที่ต่างกันแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งพบว่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดที่วัดได้ของแต่ละตัวอย่างค่อนข้างคงที่แม้ความสูงของการปล่อยคานเพิ่มมากขึ้น และหากเปรียบเทียบค่าแรงปฏิกิริยาที่วัดได้จากแต่ละตัวอย่างกลับพบว่าตัวอย่างที่มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงที่สุดคือตัวอย่าง A แม้ว่าขนาดของแรงกระแทกสูงสุดที่วัดได้ในตัวอย่าง A นั้นมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้หากเปรียบเทียบแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในรูปที่ 9 และแรงปฏิกิริยาในรูปที่ 10 จะเห็นว่าขนาดของแรงมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

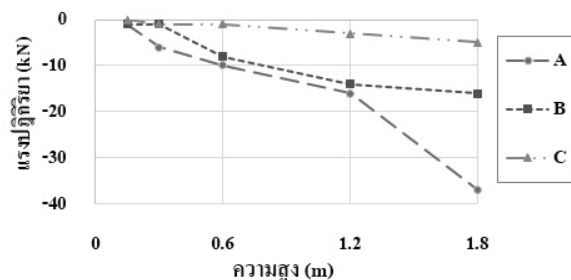
แรงปฏิกิริยาในทิศลบเกิดจากการพยายามเคลื่อนที่ขึ้นของคานซึ่งไม่พบในกรณีแรงกระทำแบบสถิต โดยสาเหตุการเกิดแรงปฏิกิริยาในทิศลบนั้นเนื่องจากขนาดแรงเฉื่อยซึ่งมีทิศขึ้นมีค่ามากกว่าขนาดแรงกระแทกในทิศลง อย่างไรก็ตามการเกิดขึ้นของแรงปฏิกิริยาในทิศลบนั้นจะเกิดขึ้นเพียงช่วงสั้นๆหลังเกิดการกระแทกซึ่งเป็นช่วงที่แรงเฉื่อยทำหน้าที่ในการต้านทานแรงกระแทกที่เกิดขึ้นและเป็นสาเหตุของความแตกต่างระหว่างค่าแรงกระแทกและแรงปฏิกิริยา โดยเหตุการณ์ดังกล่าวพบในงานวิจัยของ Xu และ Zeng [23] ด้วยเช่นกัน โดยแรงปฏิกิริยาสูงสุดทิศลบที่วัดได้จากจตุรรองรับจากการปล่อยคานที่ความสูงต่างกันแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อคานมีอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกลดลงค่าแรงปฏิกิริยาทิศลบจะมีค่าลดลงตาม ดังเช่นในตัวอย่าง C ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกน้อยที่สุดค่าแรงที่วัดได้มีค่าน้อยมาก



รูปที่ 8 ขนาดแรงกระแทกจากคานเหล็ก



รูปที่ 9 แรงปฏิกิริยาสูงสุดที่จตุรรองรับ

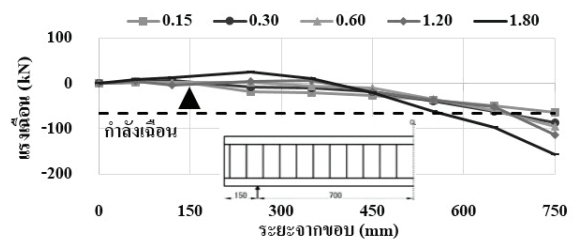


รูปที่ 10 แรงปฏิกิริยาสูงสุดในทึลจากจตุรรองรับ

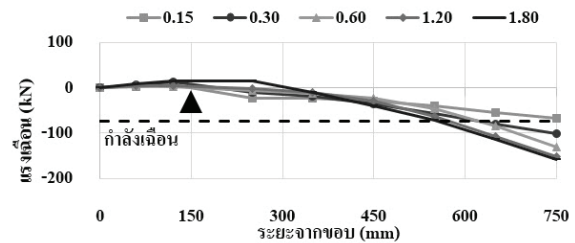
3.2.2 แรงเฉือนในคาน

ค่าแรงเฉือนภายในคานแสดง ณ เวลาที่เกิดแรงกระแทกสูงสุดเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เกิดแรงเฉือนภายในคานสูงสุดเช่นกัน ขนาดของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งเป็นค่าแรงเฉือนที่กระจายตลอดความยาวครึ่งหนึ่งของคาน โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของความสูงการปล่อยคานส่งผลให้ค่าแรงเฉือนที่กึ่งกลางคานมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนถูกจำกัดเฉพาะบริเวณช่วงกลางคาน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการกระแทก การเปรียบเทียบค่าแรงเฉือนที่กึ่งกลางคานจากความสูงการ

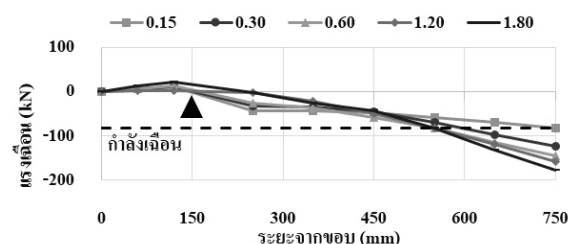
ปล่อยคานที่เท่ากันของตัวอย่างวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 12 โดยค่าแรงเฉือนถูกแสดงด้วยค่าอัตราส่วนของแรงเฉือนที่กึ่งกลางคานของตัวอย่างนั้นๆต่อแรงเฉือนของตัวอย่าง A พบว่าเมื่อคานมีอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกคานลดลงจากการเพิ่มความลึกของหน้าตัดส่งผลให้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังตัวอย่างเช่นที่ความสูงการปล่อยคาน 0.60 เมตรค่าแรงเฉือนในตัวอย่าง B มากกว่าตัวอย่าง A ประมาณ 40% และค่าแรงเฉือนในตัวอย่าง C มากกว่าตัวอย่าง A มากถึง 50%



(ก) ตัวอย่าง A

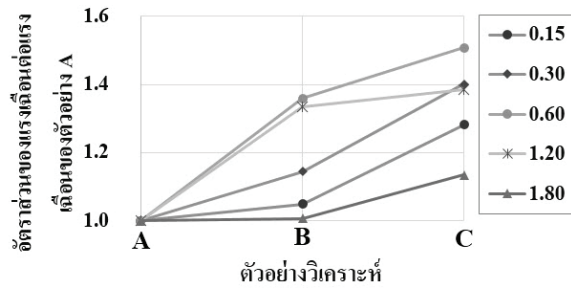


(ข) ตัวอย่าง B



(ค) ตัวอย่าง C

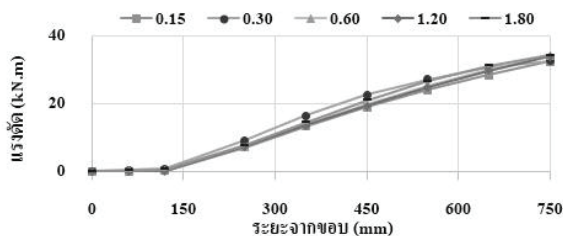
รูปที่ 11 แรงเฉือนในคาน ณ เวลาเกิดแรงกระแทกสูงสุด



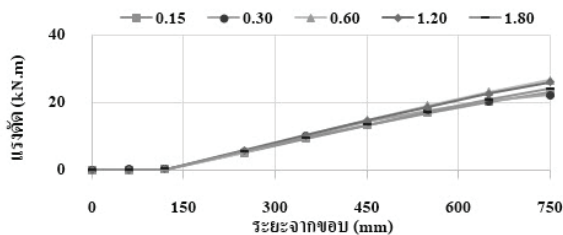
รูปที่ 12 การเปรียบเทียบแรงเค้น ณ เวลาเกิดแรงกระทำสูงสุดของคานจากระยะปล่อยคานที่เท่ากัน

3.2.3 แรงคัตในคาน

ค่าแรงคัตภายในคาน ณ เวลาที่เกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุดแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งแสดงในรูปของค่าแรงคัตที่เกิดขึ้นกระจายตลอดความยาวครึ่งหนึ่งของคาน โดยพบว่าค่าแรงคัตสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางคาน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าแรงคัตที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแม้ว่าจะมีการเพิ่มความสูงของการปล่อยคานให้มากขึ้น สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงคัตที่เกิดขึ้นไม่เกี่ยวข้องกับความสูงในการตกกระแทกของคอนกรีต

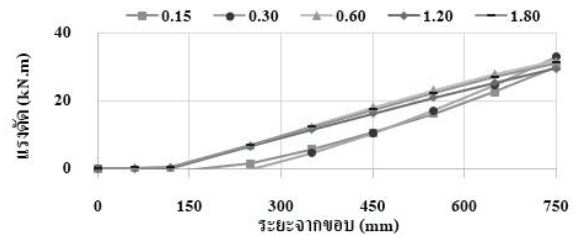


(ก) ตัวอย่าง A



(ข) ตัวอย่าง B

รูปที่ 13 ค่าแรงคัตในคาน ณ เวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุด



(ค) ตัวอย่าง C

รูปที่ 13 (ต่อ) ค่าแรงคัตในคาน ณ เวลาเกิดแรงปฏิกิริยาสูงสุด

3.2.4 ความเสียหายจากการกระแทก

ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวจากแรงกระแทกที่แสดงในหัวข้อนี้เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้น ณ เวลา 50 มิลลิวินาทีหลังจากคอนกรีตสัมผัสคาน โดยความเสียหายของคานถูกแสดงด้วยค่า effective plastic strain รวมถึงเอลิเมนต์บางส่วนที่เสียหายหนักได้ถูกลบออกจากเทคนิคเพื่อรักษาความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ไว้ จากค่าอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกคานดังแสดงในตารางที่ 3 นั้นตัวอย่าง C ซึ่งมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 4.0 หากพิจารณาตามข้อเสนอแนะของ ACI [22] แล้วคานนี้จัดอยู่ในกลุ่มของคานลึก (deep beam) ซึ่งการเลือนจะมีอิทธิพลหลักต่อรูปแบบการเสียหายเมื่อคานรับแรงถึงจุดวิกฤต

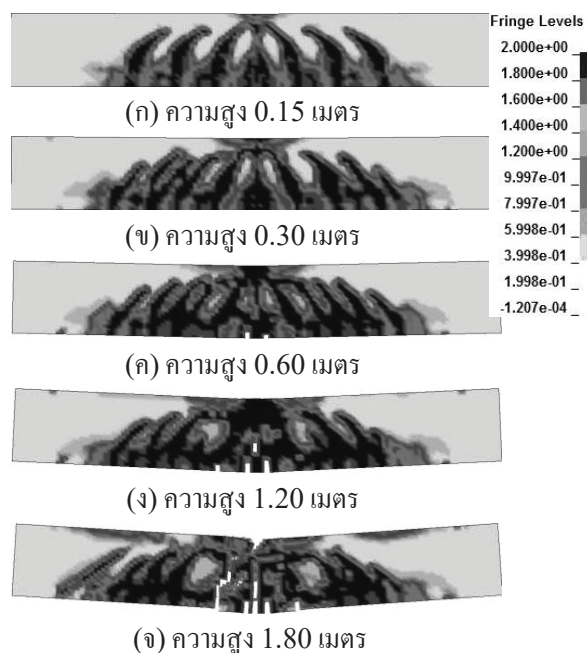
ความเสียหายที่เกิดจากการกระแทกจากคอนกรีตที่ปล่อยจากความสูงต่างๆของคานตัวอย่าง A ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลึกเท่ากับ 5.6 แสดงดังรูปที่ 14 พบว่าลักษณะของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการปล่อยคอนกรีตจากความสูง 0.15 – 1.20 เมตรเป็นลักษณะของรอยร้าวแบบคัต โดยเกิดรอยร้าวกระจายออกจากจุดกระแทกไปยังจุดรองรับทั้งสองด้าน และที่ความสูง 1.80 เมตรความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นการวิบัติแบบเฉือน ณ บริเวณจุดที่เกิดการกระแทก อย่างไรก็ตามลักษณะของรอยร้าวคัตที่กระจายในคานยังสามารถพบเห็นได้ชัดเจนก่อนจะเกิดการวิบัติของคาน แสดงให้เห็นว่าคานเกิดการเสียรูปคัตก่อนที่จะวิบัติในลักษณะของการเฉือนในตัวอย่าง C ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของคานลึกนั้นความเสียหายที่

เกิดจากการกระแทกแสดงดังรูปที่ 15 พบว่าความเสียหายที่เกิดจากปล่อยค้อนที่ความสูงที่น้อยที่สุดคือ 0.15 เมตร นั้นพบลักษณะของรอยร้าวเป็นรูปแบบของการเหินชัดเจนแต่คานยังเสียหายไม่มากและไม่พบการกระจายตัวของรอยร้าวดังที่เกิดในตัวอย่าง A และเมื่อเพิ่มความสูงการปล่อยค้อนลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นยังคงเป็นรูปแบบของการเหินโดยรอยร้าวเหินหลักมีการเปิด้าออกมากขึ้น แต่ไม่พบการเพิ่มจำนวนของรอยร้าวจากความสูงการปล่อยค้อนที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับพฤติกรรมของคานลิกที่การเหินมีอิทธิพลหลักต่อรูปแบบการวิบัติ ดังนั้นรูปแบบการวิบัติของคานลิกไม่ว่าจะภายใต้แรงกระทำสถิตหรือแรงกระแทกยังคงเป็นแบบเหินเสมอ ในส่วนความเสียหายของตัวอย่าง B ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลิกเท่ากับ 4.7 ซึ่งอยู่ระหว่างตัวอย่าง A และ C แสดงดังรูปที่ 16 พบว่ารูปแบบความเสียหายจากการปล่อยค้อนที่ความสูง 0.15 เมตรนั้นลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นเป็นรอยร้าวคด และมีการกระจายออกของรอยร้าวเช่นเดียวกับที่พบในตัวอย่าง A แต่เมื่อเพิ่มความสูงของการปล่อยค้อนเป็น 0.30 เมตร พบว่ารูปแบบความเสียหายเปลี่ยนไป โดยรอยร้าวเหินเริ่มชัดเจนขึ้นและการกระจายออกของรอยร้าวหายไป แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมความเสียหายของคานที่เปลี่ยนจากการคดเป็นการเหินแทน และเมื่อความสูงการปล่อยค้อนเพิ่มมากขึ้น รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นยิ่งปรากฏเป็นรูปแบบของการเหินดังที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง C

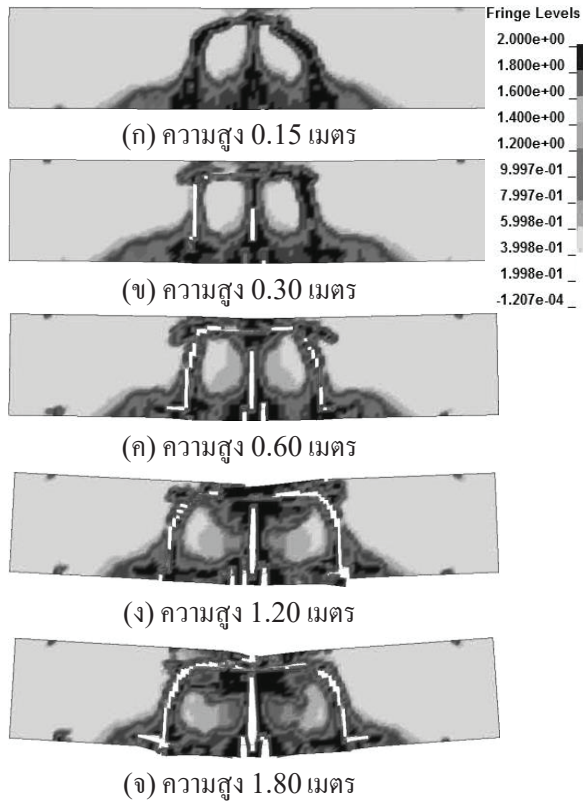
จากลักษณะของความเสียหายที่เกิดจากการกระแทกพบว่าในตัวอย่าง A ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลิกของคานมากที่สุดแสดงพฤติกรรมความเสียหายในรูปแบบของการคด สำหรับตัวอย่าง C ซึ่งมีอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลิกน้อยที่สุดและจัดอยู่ในกลุ่มคานลิกพฤติกรรมความเสียหายเป็นรูปแบบการเหินชัดเจน แม้ปล่อยค้อนที่ความสูงน้อยที่สุด แต่ในตัวอย่าง B ซึ่งมีอัตราส่วนอยู่ระหว่างตัวอย่าง A และ C นั้นกลับพบว่าที่ความสูงการปล่อยค้อนน้อยตัวอย่าง B ยังคงแสดง

พฤติกรรมความเสียหายในรูปแบบของการคด แต่เมื่อความสูงการปล่อยค้อนเพิ่มขึ้นพฤติกรรมความเสียหายในรูปแบบของการเหินเริ่มเข้ามาแทนที่การคดและเมื่อความสูงการปล่อยค้อนสูงสุดรูปแบบการวิบัติเป็นแบบเหินชัดเจน ดังนั้นนอกจากผลของอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลิกคานที่มีผลต่อรูปแบบการเสียหายของคานเมื่อรับแรงกระแทกนั้นยังพบอีกว่าค่าแรงกระแทกที่เกิดขึ้นยังมีผลต่อรูปแบบการเสียหายที่เกิดขึ้นด้วย

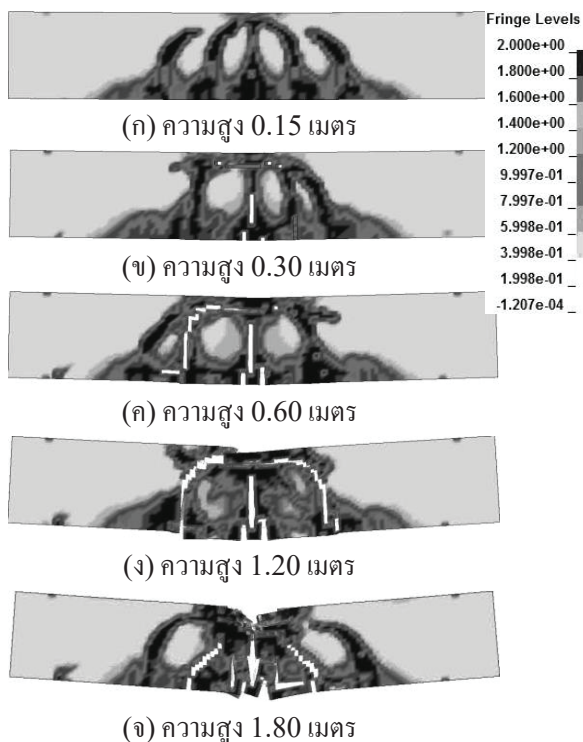
สำหรับความสูงการปล่อยค้อนที่ทำให้เริ่มเกิดความเสียหายรุนแรงและวิบัติในคานตัวอย่างคือการปล่อยที่ความสูง 1.80 เมตรในตัวอย่าง A และปล่อยที่ความสูง 1.20 เมตรในตัวอย่าง B และปล่อยที่ความสูง 0.60 เมตรในตัวอย่าง C แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความยาวช่วงพาดต่อความลิกที่ลดลงทำให้คานเกิดการวิบัติจากกระแทกด้วยค้อนที่ปล่อยจากความสูงที่ลดลงเช่นกัน สิ่งนี้แสดงถึงประสิทธิภาพที่ลดลงของคานในการต้านทานการกระแทก



รูปที่ 14 ความเสียหายจากการกระแทกของตัวอย่าง A



รูปที่ 15 ความเสียหายจากการกระแทกของตัวอย่าง C



รูปที่ 16 ความเสียหายจากการกระแทกของตัวอย่าง B

4. สรุปผล

จากการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนของระยะช่วงเงื่อนไขต่อความลึกของหน้าตัดต่างกันพบว่าการลดลงของค่าอัตราส่วนระยะช่วงเงื่อนไขต่อความลึกส่งผลให้ค่าแรงกระแทกจากการปล่อยก้อนที่ความสูงเท่ากันมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าแรงเฉือนภายในคานมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าแรงเฉือนนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระแทกลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของค่าอัตราส่วนระยะช่วงเงื่อนไขต่อความลึกร่วมกับขนาดแรงกระแทกที่สูงทำให้รูปแบบความเสียหายของคานเปลี่ยนจากการค้ำคดเป็นการเฉือน สำหรับค่าแรงค้ำคดในคานที่เกิดขึ้นจากการปล่อยก้อนที่ความสูงต่างกันพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงแสดงให้เห็นว่าในปัญหาแรงกระแทกนั้นแรงภายในโครงสร้างที่ต้องให้ความสำคัญคือแรงเฉือน จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงจะเห็นว่าการออกแบบโครงสร้างรับแรงกระแทกโดยอาศัยเพียงตัวแปรแรงกระแทกอย่างเดียวสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการต้านทานแรงของโครงสร้างลดลงได้

5. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภายใต้โครงการปริญญาเอก 50 ปี – มช.

เอกสารอ้างอิง

- [1] BSI, U. National annex to Eurocode 1: Actions on structures -part2: traffic loads on bridges, British Standards Institution, 2008.
- [2] AASHTO, L. Bridge design specifications, American association of state highway and transportation officials. Washington, DC, 2012.
- [3] CEB. Concrete Structures under impact and impulsive loading. Comite Euro-International du Beton, Bulletin D'Information, 87, Lausanne, Switzerland, 1988.
- [4] Micallef, K., Sagaseta, J., Ruiz, M. F. and Muttoni, A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slab subjected to localised impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2014; 71: 17-33.
- [5] Saatci, S. and Vecchio, F. J. Effects of shear mechanisms on impact behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 2009; 106(1): 78-86.
- [6] Pham, T. M. and Hao, H. Behavior of fiber reinforced polymer strengthened reinforced concrete beams under static and impact loads. *International Journal of Protective Structures*, 2016; 8(1): 3-24.
- [7] Kishi, N., Mikami, H., Matsuoka, K.G. and Ando, T. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar. *International Journal of Impact Engineering*, 2002; 22: 955-968.
- [8] Pham, T.M. and Hao, H. Plastic hinges and inertia forces in RC beams under impact loads. *International Journal of Impact Engineering*, 2017; 103: 1-11.
- [9] Wongmatar, P., Hansapinyo, C., Bi, K. and Vimonsatit, V. Effect of shear and ending capacities on impact behavior of RC beams. The 24th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM24), 6-9 DECEMBER, 2016, Perth, Australia.
- [10] Cotsovos, D. M., Stathopoulos, N. and Zeris, C. Behavior of RC beams subjected to high rates of concentrated loading. *Journal of Structural Engineering*, 2008; 134(12): 1839-51.
- [11] Cotsovos, D. M. A simplified approach for assessing the load-carrying capacity of reinforced concrete beams under concentrated load applied at high rates. *International Journal of Impact Engineering*, 2010; 38(8): 907-17.
- [12] Pham, T. M. and Hao, H. Impact behavior of frp-strengthened RC beams without stirrups. *Journal of Composites for Construction*, 2016; 20(4).
- [13] Guo, J., Cai, J. and Chen, W. Inertial effect on RC beam subjected to impact loads. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017; 17(4):
- [14] Ozbolt, J. and Sharma, A. Numerical simulation of reinforced concrete beams with different shear reinforcements under dynamic impact loads. *International Journal of Impact Engineering*, 2011; 38: 940-950.
- [15] Fujikake, K., Li, B. and Soeun, S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation. *Journal of Structural Engineering*, 2009; 135(8): 938-950.
- [16] Flanagan, D. P. and Belytschko, T. A uniform strain hexahedron and quadrilateral and orthogonal hourglass control. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1981; 17: 679-706.
- [17] Bi, K. and Hao, H. Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions. *Engineering Structures*, 2013; 46: 62-76.
- [18] Chen, W., Hao, H. and Chen, S. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading. *Materials and Design*, 2015; 65: 662-674.
- [19] Tang, E. K. C. and Hao, H. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: model development and response calculations. *Engineering Structures*, 2010; 32(10): 3180-3192.
- [20] Malvar, L. J. and Ross, C.A. Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Materials Journal*, 1998; 95(6): 735-739.
- [21] Malvar, L. J. Review of Static and Dynamic Properties of Steel Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal*, 1998; 95(5): 609-616.

- [22] ACI Committee 318. Building code requirements for reinforced concrete and commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2008.
- [23] Xu, B. and Zeng, X. Experimental study on the behaviors of reinforced concrete beams under impact loading. *China Civil Engineering Journal*, 2014; 47(2): 41-51.



แนวทางการวิเคราะห์การสร้างความมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์ของ

สายงานผลิตไฟฟ้า

Economic Value Added Analysis for Electricity Generation Field

พีรวัฒน์ ชัยมณีรัตน์* และ จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์

Peerawat Chaimaneerat and Jeerapat Nagoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

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

*E-mail: pchaimaneerat@gmail.com, jeerapat_n@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้แนวทางการสร้างความมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์ กับสายงานผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดผลการดำเนินงานทางการเงิน และระบบการบริหารจัดการองค์กร โดยมีตัวชี้วัดคือ ค่ากำไรเชิงเศรษฐศาสตร์โดยเปรียบเทียบระหว่างกำไรหลังจากหักภาษี กับต้นทุนเงินทุน โดยมีสมมติฐานการจัดเก็บรายได้จากสัญญาซื้อขายไฟฟ้าภายใน ที่ประกอบด้วยความพร้อมจ่าย และรายได้จากค่าเชื้อเพลิง ใช้วิธีการวิเคราะห์ความไวในการกำหนดเป้าหมายของแผนการเพิ่มมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ซึ่งได้แก่ แผนเพิ่มส่วนต่างค่าเชื้อเพลิง, แผนเพิ่มค่าความพร้อมจ่าย และแผนลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ควบคุมได้ ใช้วิธีการคำนวณอัตราต้นทุนเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ของสายผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 6.43% และกำหนดกำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ 20% และวิเคราะห์กำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ของกลุ่มตัวอย่างของโรงไฟฟ้าในสายงาน 5 โรงไฟฟ้า ซึ่งได้แก่ โรงไฟฟ้า A และ D, ประเภทพลังงานความร้อนร่วม โรงไฟฟ้าถ่านหิน B, โรงไฟฟ้าพลังน้ำ C และโรงไฟฟ้า E พลังงานความร้อน ที่ใช้น้ำมันเตาและน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิง

โดยในปี พ.ศ.2558 ในภาพรวมสายงานปี สูงกว่าค่าประมาณการ 3,617 ล้านบาท ซึ่งเกิดจากแผนกลยุทธ์ ทั้ง 3 แผนจำนวน 753 ล้านบาท และเมื่อเปรียบเทียบค่าจริงกำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ พ.ศ.2558 กับ ปี 2559 พบว่าภาพรวมสายงานผลิตไฟฟ้ามีค่าลดลง 512 ล้านบาท และโรงไฟฟ้า A ลดลง 64 ล้านบาท, โรงไฟฟ้า B เพิ่มขึ้น 1,312 ล้านบาท, โรงไฟฟ้า C ลดลง 57 ล้านบาท, โรงไฟฟ้า D เพิ่มขึ้น 91 ล้านบาท, โรงไฟฟ้า E ลดลง 161 ล้านบาท โดยโรงไฟฟ้า A,B,D ควรเน้นแผนกลยุทธ์เพื่อสร้างความมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์ ด้านเพิ่มส่วนต่างค่าเชื้อเพลิง และเพิ่มค่าความพร้อมจ่าย โรงไฟฟ้า C ควรเน้นเพิ่มส่วนเกินชั่วโมงความพร้อมจ่าย และโรงไฟฟ้า C ควรเน้น ด้านลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้พร้อมทั้งขยายผลการศึกษากำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ ไปสู่โรงไฟฟ้าอื่น ๆ ในสังกัด

คำสำคัญ: การสร้างความมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์, กำไรเชิงเศรษฐศาสตร์, อัตราต้นทุนเงินทุนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก, ส่วนต่างค่าเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า, ส่วนเกินจำนวนชั่วโมงพร้อมจ่ายตามสัญญา

ABSTRACT

This research is an application of the Economic Value Management methodology for Electricity Generation Field. It is a tool to measure financial performance and corporate management systems. The indicators are Economic Profit by comparison between Net Operating Profit after Tax and Cost of Capital. The assumption is the revenue from the internal power purchase agreement which are Availability Payment and Energy Payment. The methodology for determining Economic Value Added plan is Fuel Surcharge plan, Availability Improvement plan and plan to decrease control costs, calculating the weighted average cost of capital for electricity generation field which is 6.43% with the economic tax 20% and analyzing the economic profit of the sample of power plants in the 5 units such as, combined cycle power plant A and D, Coal fired power plant B, hydro power plant C, Thermal Power plant E which using fuel oil and palm oil.

Based on the results, in 2015 the actual Economic Profit is higher than estimated Economic Profit 3,617 million baht resulting from 3 strategic improvement plans of 753 million baht. Meanwhile, comparing the actual Economic Profit in 2015 and 2016, the overall electricity generation field decreased 512 million baht and Power plants A decreased 64 million baht, Power Plant B increased 1,312 million baht, Power Plant C decreased 57 million baht, Power Plant D increased 91 million baht and Power Plant E decreased 161 million baht. In conclusion, Power Plant A, B, D should focus on strategic planning to increase Economic Value, Fuel Surcharge and Availability Improvement while Power Plant C should focus on increasing Availability Payment Outside Contract Availability Hour and decreasing control costs and extend the results of Economic Profit study to other Power Plants in Electricity Generation Field.

Keyword: Economic Value, Economic Profit, Weighted Average Cost of Capital, Fuel Surcharge, Availability Payment Outside Contract Availability Hour

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การดำเนินงานธุรกิจมีการแข่งขันที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อความอยู่รอดขององค์กร ดังนั้น องค์กรต่าง ๆ ทั้งหน่วยงานภาครัฐ การ รัฐบาล เอกชนจึงให้ความสำคัญในการใช้เครื่องมือทางการบริหารจัดการสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้กับองค์กร เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลงหน่วยงานรัฐบาลไทย เป็นหน่วยงานของรัฐที่มีความสำคัญอย่างมากในการนำส่งรายได้ให้กับประเทศไทย เพื่อใช้ในการพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายรัฐบาล (สคธ.) เป็นฐานที่กำกับดูแลรัฐบาลของประเทศไทย ได้กำหนดนโยบายให้รัฐบาลแต่ละแห่ง นำระบบการบริหารจัดการเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Value Management: EVM) มาใช้ในการมุ่งเน้นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้องค์กร มาเชื่อมโยงเข้ากับการบริหารจัดการหลักขององค์กร และใช้เป็นเกณฑ์ประเมินผลการดำเนินงานของรัฐบาลอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูล สคธ. ในปี พ.ศ.2558 พบว่าเงินนำส่งรัฐบาลของการไฟฟ้า

ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) นำเข้าส่งรัฐบาลที่สุด

เป็นอันดับที่ 1 ประมาณ 33,000 ล้านบาท [1]

กฟผ.เป็นรัฐวิสาหกิจด้านกิจการพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงพลังงาน โดยมีภารกิจ เป็นผู้ผลิต จัดให้ได้มา จัดส่งหรือจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ผู้ใช้พลังงานไฟฟ้าตามที่กำหนด รวมทั้งดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับพลังงานไฟฟ้า โดยสายงานผลิตไฟฟ้าเป็นสายงานหลักของ กฟผ. เนื่องจากมีสินทรัพย์โรงไฟฟ้า/เขื่อนกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศ โดยมีกำลังการผลิตติดตั้งรวม 16,385 MW คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 39.42 ของกำลังการผลิตติดตั้งรวมของทั้งประเทศ [2] โดยมีโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ เช่น พลังงานน้ำ, โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน, พลังงานความร้อนร่วม เป็นต้น ซึ่งหากมีการบริหารจัดการที่ดี ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของโรงไฟฟ้า จะช่วยสร้างรายได้ของ กฟผ. และช่วยเพิ่มเงินนำส่งให้กับรัฐบาลเพื่อใช้ในการบริหารประเทศในด้านต่าง ๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์

EVM เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดผลการดำเนินงานทางการเงิน และระบบการบริหารจัดการองค์กรโดยมีตัวชี้วัดคือ ค่ากำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ (Economic Profit: EP) หากผลลัพธ์ค่ากำไรสุทธิจากการดำเนินการหลังจากหักภาษี (Net Operating Profit After Tax: NOPAT) ที่คงเหลือหลังจากหักต้นทุนเงินทุน (Capital Charge) [3] โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

กำไรเชิงเศรษฐศาสตร์

$$EP = NOPAT - (IC \times WACC) \quad (1)$$

กำไรสุทธิจากการดำเนินงานหลังหักภาษี

$$NOPAT = (Revenue - Expense) - Tax \quad (2)$$

ต้นทุนทางการเงินเฉลี่ยของเงินทุน

$$WACC = (1 - Tax) \times K_d \times \frac{D}{(D + E)} + K_e \times \frac{E}{(D + E)} \quad (3)$$

ใช้แนวคิดการศึกษาต้นทุนถ่วงเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของเรื่องต้นทุนขององค์กร (Weighted Average Cost of Capital: WACC) โดยคำนวณต้นทุนของอัตราส่วนเงินทุนของผู้ถือหุ้น (K_e) โดยใช้วิธี (Capital Asset Pricing Model: CAPM) [4] โดยมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$K_e = R_f + (MRP \times \beta) \quad (4)$$

สัญลักษณ์

D = ส่วนของหนี้สิน

E = ส่วนของเจ้าของ

Tax = จัดเก็บภาษีเงินได้นิติบุคคลของประเทศไทย ให้คำนวณภาษีในอัตรา 20% ของกำไรสุทธิ

K_d = อัตราต้นทุนของผู้ให้กู้ (Cost of Debt) (%)

K_e = อัตราส่วนเงินทุนของผู้ถือหุ้น (Cost of Equity) (%)

R_f = ผลตอบแทนที่ปราศจากความเสี่ยง (Risk Free Rate) (%)

MRP = ผลตอบแทนของตลาดที่สูงกว่าอัตราผลตอบแทนปราศจากความเสี่ยง (Market Risk Premium) (%)

$B_{unlevered}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบแทนความเสี่ยงสำหรับองค์กรที่มีเงินทุนมาจากส่วนผู้ถือหุ้นทั้งหมด

$\beta_{levered}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบแทนความเสี่ยงสำหรับองค์กรที่มีเงินทุนประกอบด้วยเงินกู้และเงินทุนผู้ถือหุ้น

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ค่า EP

1. EP = 0 หมายความว่า องค์กร หรือหน่วยงานนั้น มีการบริหารงานได้กำไรสุทธิหลังจากหักภาษีเท่ากับ ต้นทุนของเงินทุน

2. EP < 0 หมายความว่า องค์กร หรือหน่วยงานนั้น มีการบริหารงานได้ไม่ประสบความสำเร็จ เพราะผลกำไรที่ได้ไม่คุ้มกับต้นทุนของเงินทุน

3. EP > 0 องค์กรหรือหน่วยงานนั้นมีบริหารงานที่มีประสิทธิภาพสามารถสร้างผลกำไรได้มากกว่าต้นทุนเงินทุน

แนวทางการสร้างกำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ ได้แก่

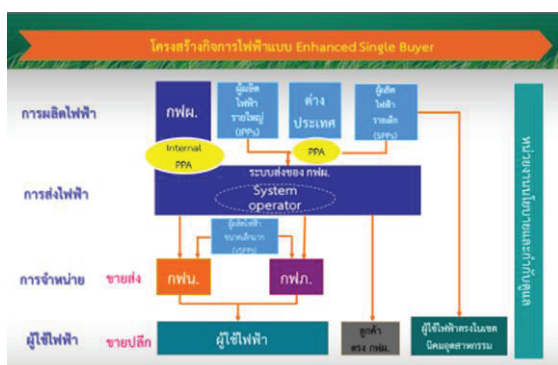
1. เพิ่มรายได้โดยเลือกลงทุนในโครงการต่าง ๆ ที่มี แนวโน้มเติบโต หรือผลกำไรจากการดำเนินงานหลังจากหักภาษีสูงกว่าต้นทุนลงทุน

2. ลดต้นทุนจากการดำเนินงาน เพื่อให้ได้กำไรจากการดำเนินงานหลังจากหักภาษีสูงกว่าต้นทุนลงทุน

3. พิจารณาลดการลงทุนในสินทรัพย์ หรือกิจกรรมที่ไม่สร้างผลตอบแทนเท่ากับหรือมากกว่าต้นทุนเงินทุน เช่น ลดพัสดุสำรองคลัง ลดการใช้งานหรือขายสินทรัพย์ เป็นต้น

รายได้จากสัญญาซื้อขายไฟฟ้า

ข้อตกลงและเงื่อนไขในการซื้อไฟฟ้า หรือ เรียกว่า (Power Purchase Agreement: PPA) เป็นสัญญาขายไฟฟ้าจัดทำเป็นสัญญาซื้อขายไฟฟ้าระยะยาวตลอดอายุโรงไฟฟ้า เป็นแหล่งรายได้ของโรงไฟฟ้า และประกันความเสี่ยง กรณีของโรงไฟฟ้าเอกชน PPA คือคู่สัญญาได้แก่ โรงไฟฟ้าเอกชน กับ กฟผ. ส่วน กรณีของโรงไฟฟ้า กฟผ. เรียก คู่สัญญาได้แก่ สายงานผลิตไฟฟ้าและระบบส่ง เรียกว่า Internal PPA โดยกำหนดเป็นสองส่วน ดังนี้



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างกิจการไฟฟ้าของประเทศไทย

1. ค่าความพร้อมจ่าย (Availability Payment : AP) เงินส่วนนี้จะครอบคลุม เงินลงทุน รายจ่ายคงที่ทั้งหมด รวมถึงผลกำไรที่ผู้ลงทุนวางแผนไว้ว่าจะได้รับ และเป็นเงินที่จ่ายให้ตามความพร้อมในการผลิตไฟฟ้า คุณภาพของการจ่ายไฟฟ้า คิดเป็นรายชั่วโมง

2. ค่าไฟฟ้า (Energy Payment: EP) เป็นเงินที่ครอบคลุมรายจ่ายค่าเชื้อเพลิง (Fuel Payment :FP) และค่าใช้จ่ายการเดินเครื่องและบำรุงรักษาในส่วนผันแปร และโรงไฟฟ้าจะต้องเสนอ Guaranteed Heat Rate เพื่อให้ตลอดอายุสัญญา และใช้กับทุกสภาวะแวดล้อมของการผลิตไฟฟ้าตามที่โรงไฟฟ้า เสนอไว้

จากการศึกษาบทความและงานวิจัยในอดีตพบว่า ศิณิธร จันทะปิตดา [5] ได้ศึกษานำแนวทางการบริหารความเสี่ยงของโครงการเพื่อสร้างมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของโรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยหลังจากการ

ดำเนินงานมูลค่าปัจจุบันของมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เพิ่มขึ้น จาก -927,546 บาทเป็น 1,065,182 ล้านบาท และอยู่ในระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ที่ทางโรงพิมพ์จุฬาฯ กำหนด ภัทร ตั้งพานิชยานนท์ [6] ศึกษาการวิเคราะห์สูตรคำนวณมูลค่าการลงทุนโดยเทียบกับมูลค่าหุ้นของบริษัทมหาชน ในอุตสาหกรรมไทย จากการวิจัยพบว่า EVM มีความเหมาะสมกับ 5 กลุ่มธุรกิจ ได้แก่ กลุ่มสินค้าอุปโภคบริโภค กลุ่มธุรกิจการเงิน กลุ่มวัตถุดิบและสินค้าอุตสาหกรรม กลุ่มอสังหาริมทรัพย์และก่อสร้าง นิชนันท์ ปัญญาโชติกุล [7] ศึกษาการจัดทำกระบวนการ และคู่มือการออกใบอนุญาตประกอบกิจการพลังงานสำหรับหน่วยงานกำกับกิจการพลังงานโดยงานวิจัยนี้เริ่มต้นศึกษาขั้นตอนการทำงาน และทบทวนผังการไหล (Flow Chart) ของกระบวนการขอใบอนุญาต จากนั้นวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนภาพก้างปลา ซึ่งพบว่าสาเหตุสำคัญ คือการจัดส่งเอกสารไม่ครบ และไม่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์ที่หน่วยงานกำหนด จากสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น งานวิจัยครั้งนี้ได้จัดทำคู่มือปฏิบัติงาน และรายการตรวจสอบเอกสาร (Checklist) เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในกระบวนการขอรับใบอนุญาตผลิตไฟฟ้า ซึ่งผลจากการทดลองใช้คู่มือพบว่าสามารถช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินการจัดเตรียมเอกสารลดลงร้อยละ 48.79

3. วิธีการวิจัย

กำหนดกรอบในการวิจัย โดยเลือกข้อมูลจากกลุ่มโรงไฟฟ้าตามประเภทของสายงานผลิตไฟฟ้า และกำหนดสมมติฐานในรายได้ของสายงานผลิตไฟฟ้าจาก Internal PPA ในปี พ.ศ.2558 ซึ่งประกอบไปด้วย ค่า AP และ EP โดยมีวิธีการดำเนินการ 4 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ประมาณการค่ากำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ EP

คำนวณตัวแปรต่างๆ จากสมการที่ (1), (2), (3), (4) เพื่อใช้การประมาณการภาพรวมค่า EP ของสายงานผลิตไฟฟ้า รายละเอียดตามตารางที่ 1 โดยค่า NOPAT เท่ากับ 18,953 ล้านบาท ค่าต้นทุนเงินทุน (Capital Charge)

9,751 ทำให้ค่า EP ปี พ.ศ.2558 ประมาณการสายงานผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 9,202 ล้านบาท

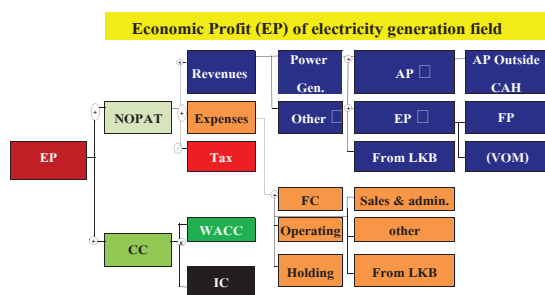
ตารางที่ 1 ตารางประมาณการข้อมูลค่า EP สายงานผลิตไฟฟ้า

รายการ	ประมาณการ (ล้านบาท)
หน่วยผลิต (GWh)	67,558
รายได้ขายไฟฟ้า	
AP	54,729
EP	123,348
รายได้อื่น ๆ	1,546
รวมรายได้	179,623
ต้นทุนค่าใช้จ่าย	
ค่าเชื้อเพลิง	119,644
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	36,288
รวมต้นทุนค่าใช้จ่าย	155,932
NOPBT	23,691
Tax (20%)	4,738
NOPAT	18,953
สินทรัพย์การลงทุน	151,648
WACC (%)	6.43%
Capital Charge	9,751
EP	9,202

3.2 กำหนดแผนกลยุทธ์เพื่อเพิ่มปรับปรุงประสิทธิภาพ (Strategic Improvement Plan: SIP)

3.2.1 จัดทำแผนผังปัจจัยผลักดัน EP

เพื่อใช้วิเคราะห์พิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า EP ระดับสายงาน โดยแบ่งออกเป็นสองด้าน คือ ด้าน NOPAT และ Capital Charge กำหนดมาจากโครงสร้างทางบัญชีของสายงาน และกิจกรรมดำเนินงาน



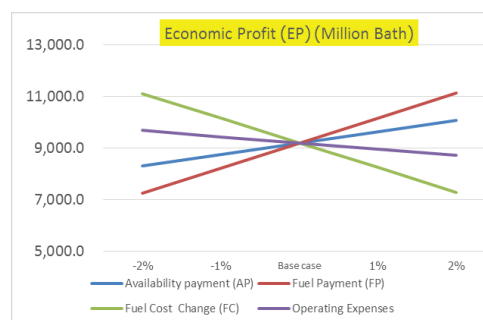
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างปัจจัยผลักดันการเพิ่มค่ากำไรเชิงเศรษฐกิจของสายงานผลิตไฟฟ้า

โดยผลจากการวิเคราะห์ Sensitivity ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า EP มาก 4 อันดับแรก ได้แก่ ค่าเชื้อเพลิง (FC), รายได้ค่าเชื้อเพลิง (FP) , ค่าความพร้อมจ่าย (AP) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

3.2.2 วิเคราะห์หาปัจจัยวิธีการหาค่า EP โดยวิธีการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

หาปัจจัยที่สำคัญเพื่อกำหนดแผนกลยุทธ์เพื่อเพิ่มค่า EP (Strategic Improvement Plan: SIP) โดยกำหนดให้ปัจจัยผลักดัน (Driver) ตามรูปที่ 2 นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น และลดลงร้อยละ 1 และร้อยละ 2 ดังนี้

- กรณีที่ 1 ค่า (AP) เปลี่ยนแปลง
- กรณีที่ 2 รายได้ค่าเชื้อเพลิง (FP) เปลี่ยนแปลง
- กรณีที่ 3 ค่าใช้จ่ายค่าเชื้อเพลิง (FC) เปลี่ยนแปลง
- กรณีที่ 4 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ Sensitivity

ตารางที่ 2 แผน SIP เพื่อเพิ่มค่า EP ในแต่ละไตรมาสของปี พ.ศ.2558

SIP	เป้าหมาย เพิ่ม EP (ล้านบาท)
1.เพิ่มส่วนต่างค่าเชื้อเพลิง (FP-FC) (เพิ่ม 10%) จากประมาณการ	123
2.เพิ่มความพร้อมจ่ายหลังจากโรงไฟฟ้าเดินเครื่องชั่วโมงการผลิต (AP Outside CAH)	96
3.ลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ (3%)	51

ตามที่วิเคราะห์ความไวในรูปที่ 3 กำหนดแผน SIP เพื่อเพิ่มค่า EP ออกเป็น 3 แผน

1. แผนการเพิ่มส่วนต่างค่าเชื้อเพลิง (Fuel Gain: FP-FC) ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม และโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน เช่น การปรับปรุงกระบวนการอุปกรณ์เพื่อลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า (Heat Rate)

2. เพิ่มความพร้อมจ่ายหลังจากโรงไฟฟ้าเดินเครื่อง ชั่วโมงการผลิตตามสัญญาในแต่ละปี ของโรงไฟฟ้าพลังน้ำโดยการประมาณการ รายได้ค่า AP ที่เกินจากค่าสัญญา (AP Outside CAH) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ควบคุมได้

3. แผนลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ โดยลดต้นทุน ค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ที่ส่งผลกระทบต่อตรงกับค่า EP เช่น ค่าจ้างเหมา, ค่าทำงานล่าช้า, ค่าอุปกรณ์บำรุงรักษา, ค่าจ้างเหมาสำนักงาน, ค่าสารเคมี

3.3 วิเคราะห์ผลลัพธ์จากการดำเนินงาน

ค่า EP จริงที่เกิดขึ้นในปี พ.ศ.2558 สูงกว่าค่าประมาณการ 3,617 ล้านบาท ซึ่งเกิดจากแผน SIP ทั้ง 753 ล้านบาท และปัจจัยอื่น 2,864 ล้านบาท โดยปัจจัยจากแผน SIP ทั้ง 3 แผน ได้แก่ โรงไฟฟ้ากลุ่มพลังงานความร้อนร่วม และพลังงานความร้อนมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่ำกว่าค่าเป้าหมาย (Guarantee Heat Rate) ที่ให้ไว้ใน PPA

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดข้อมูลค่า EP จริงเทียบกับค่าประมาณการในปี พ.ศ.2558

รายการ	ประมาณการ (ล้านบาท)	ค่าจริง (ล้านบาท)
หน่วยผลิต (GWh)	67,558	68,723
รายได้ขายไฟฟ้า		
AP	54,729	58,381
EP	123,348	123,084
รายได้อื่น ๆ	1,546	1,421
รวมรายได้	179,623	182,886

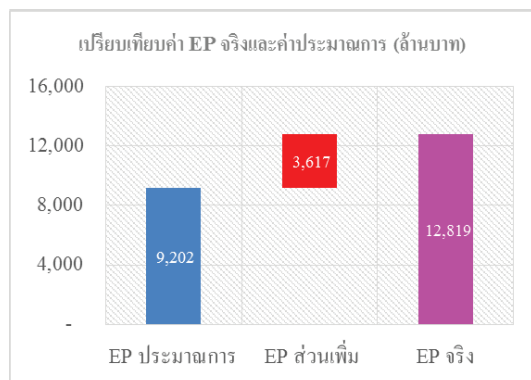
ตารางที่ 3 (ต่อ) แสดงรายละเอียดข้อมูลค่า EP จริงเทียบกับค่าประมาณการในปี พ.ศ.2558

รายการ	ประมาณการ (ล้านบาท)	ค่าจริง (ล้านบาท)
ต้นทุนค่าใช้จ่าย		
ค่าเชื้อเพลิง	119,644	119,215
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	36,288	35,113
รวม ต้นทุน ค่าใช้จ่าย	155,932	154,328
NOPBT	23,691	28,558
Tax (20%)	4,738	5,712
NOPAT	18,953	22,847
สินทรัพย์การ ลงทุน	151,648	155,957
WACC (%)	6.43%	6.43%
Capital Charge	9,751	10,028
EP	9,202	12,819

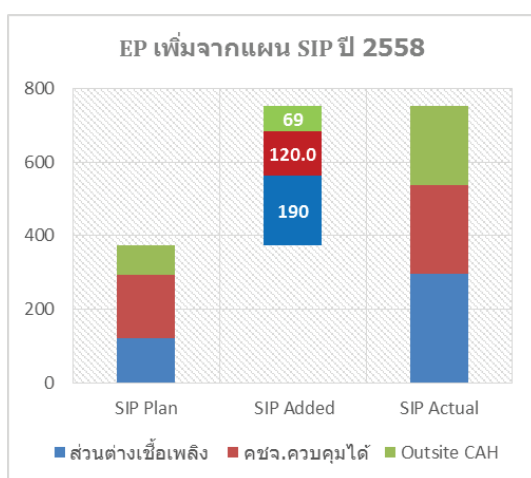
1. แผนเพิ่มส่วนต่างค่าเชื้อเพลิงทำให้ค่า EP เพิ่มขึ้นจากเป้าหมาย 190 ล้านบาท เนื่องจากโรงไฟฟ้ากลุ่มพลังงานความร้อนร่วม และพลังงานความร้อนมีการปรับปรุงโรงไฟฟ้าให้มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่ำกว่าค่าเป้าหมาย (Guarantee Heat Rate) ที่ให้ไว้ใน PPA

2. แผนเพิ่มความพร้อมจ่ายส่วนเกินจำนวนชั่วโมง พร้อมจ่ายตามสัญญาทำให้ค่า EP เพิ่มขึ้นจากเป้าหมาย 69 ล้านบาท เนื่องจากภาพรวมกลุ่มโรงไฟฟ้าน้ำมีการบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า ให้มีความพร้อมในการเดินเครื่องผลิตไฟฟ้า

3. แผนลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ ทำให้ค่า EP เพิ่มขึ้นจากเป้าหมาย 120 ล้านบาทเนื่องจากมีมาตรการควบคุมค่าใช้จ่ายตามปัจจัยที่ได้ตั้งเป้าหมาย



รูปที่ 4 แสดงเปรียบเทียบค่า EP จริง และประมาณการ ปี พ.ศ.2558



รูปที่ 5 แสดงเปรียบเทียบค่า EP เพิ่มเนื่องจากแผน SIP

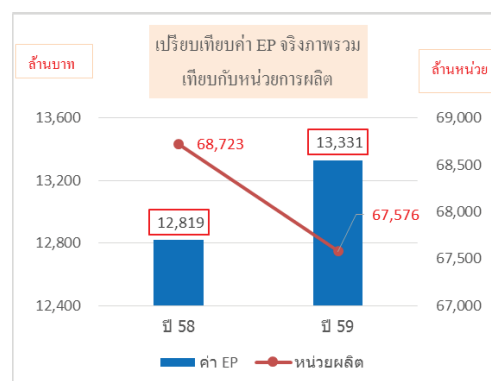
3.4 เลือกตัวอย่างการวิเคราะห์ EP ของโรงไฟฟ้าในสังกัดสายงานผลิต

พิจารณาเลือกโรงไฟฟ้าในแต่ละกลุ่มประเภทของสายงานผลิตไฟฟ้า 5 โรงไฟฟ้า เพื่อใช้วัดผลการดำเนินงาน EP ตามแนวทางการวิเคราะห์ของภาพรวมของสายงานผลิตไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลในปี พ.ศ.2558 เทียบกับปี พ.ศ.2559

ตารางที่ 4 กลุ่มประเภทของโรงไฟฟ้าที่ใช้วัดผลการดำเนินงาน EP

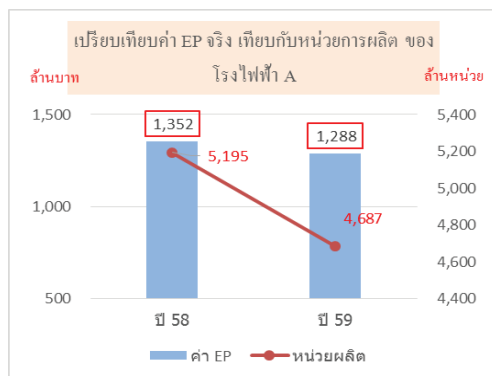
โรงไฟฟ้า	ประเภท	เชื้อเพลิง	เหตุผล
A	พลังความร้อนร่วม	ก๊าซธรรมชาติ	- ใกล้เมือง Load center - เป็น EGATIF - โรงไฟฟ้าต้นแบบ
B	พลังความร้อน	ถ่านหิน (ลิกไนต์)	- ใช้ถ่านลิกไนต์แห่งเดียวของประเทศไทย - มีการผลิตไฟฟ้าที่สูง/ปี ด้วยต้นทุนที่ต่ำ
C	พลังน้ำ	น้ำ	- โรงไฟฟ้าต้นแบบให้กับโรงไฟฟ้าประเภทพลังน้ำ
D	พลังความร้อนร่วม	ก๊าซธรรมชาติ	- โรงไฟฟ้าต้นแบบให้กับโรงไฟฟ้าประเภทพลังก๊าซธรรมชาติ
E	พลังงานความร้อน	น้ำมันเตา/น้ำมันปาล์ม	เป็น โรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงน้ำมันเตาในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากเป็นโรงไฟฟ้าที่สำคัญมีการใช้น้ำมันปาล์มสลับในการผลิตไฟฟ้า เพื่อช่วยเหลือเกษตรกรในพื้นที่

4. ผลการวิจัย



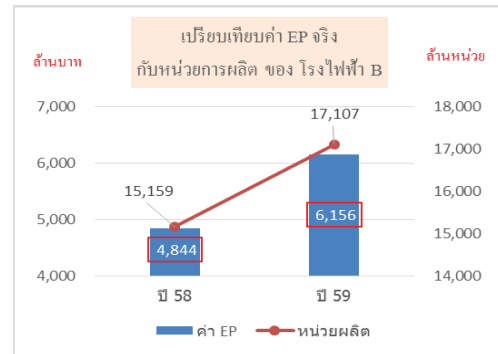
รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบ EP ภาพรวมสายงานผลิตไฟฟ้าจริงปี พ.ศ.2558 และปี 2559 เทียบกับหน่วยการผลิต

จากรูปที่ 6 เปรียบเทียบค่า EP จริงภาพรวมของสายงานผลิตไฟฟ้า ปี พ.ศ.2559 มีค่า EP เท่ากับ 13,331 ล้านบาท สูงกว่า ค่า EP ปี พ.ศ. 2558 ที่มีค่า EP จริงเท่ากับ 12,819 ล้านบาท ในขณะที่หน่วยผลิตไฟฟ้าของปี พ.ศ.2559 เท่ากับ 67,576 ล้านหน่วย ต่ำกว่าปี พ.ศ.2558 ที่ผลิตไฟฟ้า 68,723 ล้านหน่วย ซึ่งแสดงว่าในภาพรวมสายงานผลิตควรเน้นมีการบริหารจัดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยบริหารส่วนต่างของค่าเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า (Fuel Gain) และลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้เพื่อให้ค่า EP สูงขึ้น



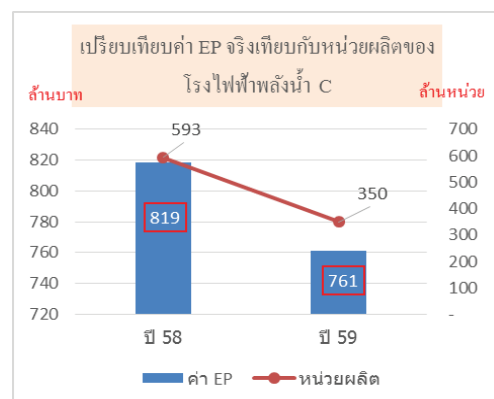
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบ EP จริงของโรงไฟฟ้า A ปี พ.ศ.2558 และปี 2559 เทียบกับหน่วยการผลิต

จากรูปที่ 7 โรงไฟฟ้า A ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าประเภทพลังงานความร้อนร่วมใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยพบว่า ปี พ.ศ.2559 มีค่า EP เท่ากับ 1,288 ล้านบาท ซึ่งต่ำกว่า ค่า EP ปี พ.ศ. 2558 ที่มีค่า EP จริงเท่ากับ 1,352 ล้านบาท ในขณะที่หน่วยผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า A ในปี พ.ศ.2559 เท่ากับ 67,576 ล้านหน่วย ต่ำกว่าปี พ.ศ.2558 ที่ผลิตไฟฟ้า 68,723 ล้านหน่วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าควรมีการลดระยะเวลาบำรุงรักษาตามวาระ และนอกวาระ เพื่อช่วยเพิ่มความพร้อมในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าให้มีโอกาสผลิตไฟฟ้าได้สูงรวมทั้งบริหารส่วนต่างค่าเชื้อเพลิงและลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้



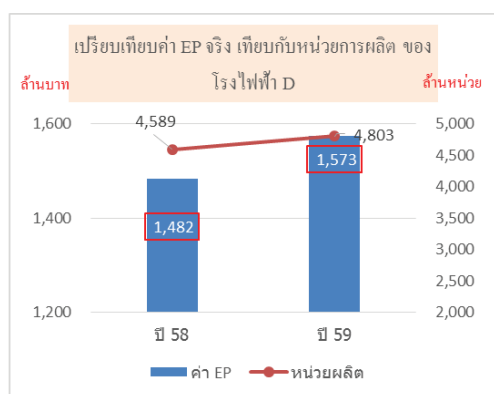
รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบ EP จริงของภาพรวมสายงานผลิตโรงไฟฟ้า B ปี พ.ศ.2558 และปี 2559 เทียบกับหน่วยการผลิต

จากรูปที่ 8 โรงไฟฟ้า B ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าประเภทพลังงานความร้อน ที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง โดยพบว่า ปี พ.ศ.2559 มีค่า EP จริงเท่ากับ 6,156 ล้านบาท ซึ่งสูงกว่า ค่า EP ปี พ.ศ. 2558 ที่มี EP จริงเท่ากับ 4,844 ล้านบาท ในขณะที่หน่วยผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า B ของปี พ.ศ.2559 เท่ากับ 17,107 ล้านหน่วย สูงกว่าปี พ.ศ. 2558 ที่ผลิตไฟฟ้า 15,159 ล้านหน่วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโรงไฟฟ้า B เป็นโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้น ควรเน้นด้านการบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าให้มีค่าความพร้อมจ่ายที่สูงเพื่อโอกาสในการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้น



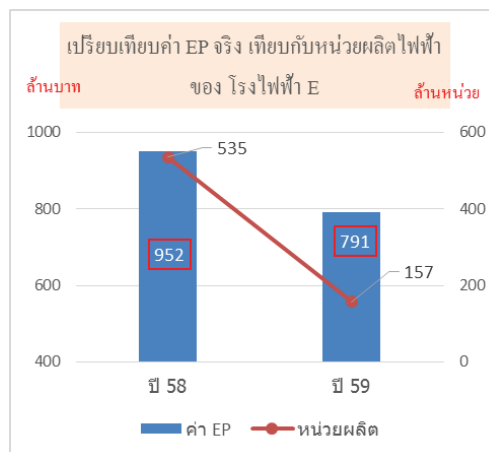
รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบ EP จริงของโรงไฟฟ้า C ปี พ.ศ.2558 และปี 2559 เทียบกับหน่วยการผลิต

จากรูปที่ 9 โรงไฟฟ้า C ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าประเภทพลังงานน้ำ โดยพบว่า ปี พ.ศ.2559 มีค่า EP เท่ากับ 761 ล้านบาท ซึ่งต่ำกว่า ค่า EP ปี พ.ศ. 2558 ที่มีค่า EP จริง เท่ากับ 819 ล้านบาท ในขณะที่หน่วยผลิตไฟฟ้าของปี พ.ศ.2559 เท่ากับ 350 ล้านหน่วย ต่ำกว่าปี พ.ศ.2558 ที่ผลิตไฟฟ้า 593 ล้านหน่วย ซึ่งแสดงว่าปริมาณหน่วยผลิตไฟฟ้า ซึ่งอยู่ระดับปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำของเขื่อน ในการผลิตไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ดังนั้น ควรเน้นที่ลดต้นทุนที่ควบคุมได้ และบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าให้มีความพร้อมในการผลิตไฟฟ้า เพื่อทำให้ค่า EP สูงขึ้น



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบ EP จริงของโรงไฟฟ้า D ปี พ.ศ.2558 และปี 2559 เทียบกับหน่วยการผลิต

จากรูปที่ 10 โรงไฟฟ้า D ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าประเภทพลังงานความร้อนร่วม โดยพบว่า ปี พ.ศ.2559 มีค่า EP เท่ากับ 1,573 ล้านบาท ซึ่งสูงกว่า ค่า EP ปี พ.ศ. 2558 ที่มีค่า EP จริงเท่ากับ 1,482 ล้านบาท ในขณะที่หน่วยผลิตไฟฟ้าของปี พ.ศ.2559 เท่ากับ 4,803 ล้านหน่วย สูงกว่าปี พ.ศ.2558 ที่ผลิตไฟฟ้า 4,589 ล้านหน่วย ซึ่งแสดงว่าในภาพรวมสายงานผลิตมีการบริหารจัดการเดินเครื่องโรงไฟฟ้าโดยบริหารส่วนต่างของค่าเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า (Fuel Gain) และลดระยะเวลาการบำรุงรักษาเพื่อให้โรงไฟฟ้ามีโอกาสในการเดินเครื่องเพื่อผลิตไฟฟ้ามากขึ้น



รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบ EP จริงของโรงไฟฟ้า E ปี พ.ศ.2558 และปี 2559 เทียบกับหน่วยการผลิต

จากรูปที่ 11 โรงไฟฟ้า E ซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าประเภทพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านหินเตา และน้ำมันปาล์มในการผลิตไฟฟ้า โดยพบว่า ปี พ.ศ.2559 มีค่า EP เท่ากับ 791 ล้านบาท ซึ่งต่ำกว่า ค่า EP ปี พ.ศ. 2558 ที่มีค่า EP จริง เท่ากับ 952 ล้านบาท ในขณะที่หน่วยผลิตไฟฟ้าของปี พ.ศ.2559 เท่ากับ 157 ล้านหน่วย ต่ำกว่าปี พ.ศ.2558 ที่ผลิตไฟฟ้า 535 ล้านหน่วย ซึ่งแสดงว่าโรงไฟฟ้า E มีหน่วยผลิตไฟฟ้าน้อย เพราะต้นทุนสูงดังนั้น จึงต้องเน้นการเพิ่มค่า EP โดยการลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ เป็นหลัก

5. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวทางสร้างมูลค่าเพิ่มเชิงเศรษฐศาสตร์ มาวิเคราะห์ผลการดำเนินงานการสร้างกำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ ของสายงานผลิตไฟฟ้า และกลุ่มตัวอย่างอย่างโรงไฟฟ้าทั้ง 5 ประเภท โดยมีการใช้วิธีการวิเคราะห์ความไว เพื่อกำหนดแผนกลยุทธ์เพื่อเพิ่มค่ากำไรเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยมีผลการสรุปดังนี้

ตารางที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ค่า EP และแนวทางการปรับปรุงของโรงไฟฟ้าการศึกษา

โรงไฟฟ้า	ผลสรุป	แนวทางการปรับปรุง
ภาพรวม	- ค่า EP จริง ปี พ.ศ. 2558 จริงสูงกว่าประมาณการ 3,617 ล้านบาท - ค่า EP จริงปี พ.ศ.2559 สูงกว่าค่า EP ปี พ.ศ.2558 512 ล้านบาท	- เพิ่ม Fuel Gain - ลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ - ลดการบำรุงรักษาตามวาระและนอกวาระ
A	ค่า EP จริงปี พ.ศ.2559 ต่ำกว่าค่า EP ปี พ.ศ.2558 64 ล้านบาท	- เพิ่ม Fuel Gain - ลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ - ลดการบำรุงรักษาตามวาระและนอกวาระ
B	ค่า EP จริงปี พ.ศ.2559 สูงกว่าค่า EP ปี พ.ศ.2558 1,312 ล้านบาท	- ลดการบำรุงรักษาตามวาระและนอกวาระ
C	ค่า EP จริงปี พ.ศ.2559 สูงกว่าค่า EP ปี พ.ศ.2558 57 ล้านบาท	- ลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ - ลดการบำรุงรักษาตามวาระและนอกวาระ
D	ค่า EP จริงปี พ.ศ.2559 สูงกว่าค่า EP ปี พ.ศ.2558 91 ล้านบาท	- เพิ่ม Fuel Gain - ลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้ - ลดการบำรุงรักษาตามวาระและนอกวาระ

ตารางที่ 5 (ต่อ) สรุปผลการวิเคราะห์ค่า EP และแนวทางการปรับปรุงของโรงไฟฟ้าการศึกษา

โรงไฟฟ้า	ผลสรุป	แนวทางการปรับปรุง
E	ค่า EP จริงปี พ.ศ.2559 สูงกว่าค่า EP ปี พ.ศ.2558 161 ล้านบาท	- ลดค่าใช้จ่ายที่ควบคุมได้

6. ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการเพิ่มยอดขายหน่วยผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพด้านค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (Heat Rate) เมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าอื่น ๆ และมีความพร้อมจ่ายในการผลิตไฟฟ้าที่สูง โดยการลดระยะเวลาการบำรุงรักษาทั้งในวาระและนอกวาระ เนื่องจากศูนย์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแห่งชาติ จะสั่งเดินเครื่องโรงไฟฟ้า (Dispatching) ในแต่ละโรงไฟฟ้าตามลำดับต้นทุน (Merit order)

2. ปัจจัยราคาค่าเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า EP เนื่องจากโรงไฟฟ้าในสายงานผลิต จะได้รับรายรับจากการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าตาม Guarantee Heat Rate ที่ให้ไว้ในสัญญา PPA ซึ่งถือเป็นค่าที่กำหนดคงที่จึงไม่มีผลต่อค่า EP สำหรับส่วนต่างราคาค่าเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นจากสัญญา PPA จะส่งผ่านไปยังค่า FT (Float time) ที่จะเรียกเก็บจากค่าไฟฟ้าของประชาชน

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ฝ่ายวางแผนและพัฒนาคุณภาพ และฝ่ายเศรษฐกิจพลังงานงาน ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับการวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการนโยบายรัฐวิสาหกิจ (2558). ข้อมูลสำคัญของรัฐวิสาหกิจไทย (State Enterprise Key Indicators : SEKI) ฉบับที่ 4. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: http://www.sepo.go.th/assets/document/file/1458542593_seki%20v1.pdf.
- [2] ฝ่ายสัญญาซื้อขายไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (2560). เอกสารบรรยายหลักสูตรสัญญาซื้อขายไฟฟ้า ศูนย์ฝึกเจ้าหน้าที่ จ.กาญจนบุรี, 25-26 พฤษภาคม 2560.
- [3] Salaga, J., Bartosova, V., Kicova, E. Economic Value Added as a measurement tool of financial performance. *Procedia Economics and Financial*, 2015; 26: 484 – 489.
- [4] Murray, Z. F. and Shen, T. Investment and the weighted average cost of capital. *Financial Economics*, 2016; 119: 300-315.
- [5] ศิณีวรรณ จันทะปิตดา. การบริหารความเสี่ยงของโครงการเพื่อเพิ่มมูลค่าเชิงเศรษฐศาสตร์: กรณีศึกษาโรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [6] ภัทร ตั้งพานิชยานนท์. การวิเคราะห์สูตรการคำนวณมูลค่าการลงทุนโดยเทียบกับมูลค่าหุ้นของบริษัทมหาชนในอุตสาหกรรมไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [7] นิชนันท์ ปัญญาโชติกุล. การจัดทำกระบวนการ และคู่มือการออกไปอนุญาตประกอบกิจการพลังงานสำหรับหน่วยงานกำกับกิจการพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.



การลดพลังงานในระบบอัดอากาศตามแผนการผลิต Compressed Air System Energy Reduction Based on Production Plan

จิตินันท์ สังข์ทอง* และ จิรพัฒน์ เจาประเสริฐวงศ์

Titinan Sungthong and Jeerapat Nagoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

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

*E-mail: yoon_aunzo@hotmail.com, jeerapat_n@chula.ac.th

บทคัดย่อ

หน่วยงานยูทิลิตี้ของโรงงานผลิตผงซักฟอกทำหน้าที่จ่ายระบบสาธารณูปโภคให้กับฝ่ายผลิตประกอบไปด้วย ไฟฟ้า น้ำประปา ไอน้ำ แก๊สธรรมชาติ ซึ่งพบว่าโรงงานกรณีศึกษามีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศอัดไม่สอดคล้องกับการผลิต เช่น ในวันที่ไม่มีการผลิต แต่มีการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศ นั้นหมายความว่าหน่วยงานที่ดูแลไม่มีการบริหารจัดการการผลิตอัดให้เหมาะสมสอดคล้องกับแผนการผลิตทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน โดยพบว่า การใช้พลังงานในระบบอัดอากาศเฉลี่ยหนึ่งปีย้อนหลังปี 2016 เท่ากับ 124,862 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน มีค่าใช้จ่าย 434,519 บาทต่อเดือน คิดเป็นค่าสัดส่วนการใช้พลังงาน 17% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดในโรงงาน ดังนั้นจึงต้องการลดพลังงานลงโดยการจ่ายอากาศอัดให้สอดคล้องกับแผนการผลิต

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลการจ่ายอากาศอัดให้กับวาล์วควบคุม ระบบจัดเรียงสินค้าด้วยหุ่นยนต์ และเครื่องจักรที่ใช้ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอัตราการไหลของอากาศอัดที่ใช้งานหน่วยลิตรต่อวินาทีที่ระดับแรงดัน 6.5 บาร์ เกจ ปริมาณผลผลิตผงซักฟอกและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการบรรจุผงซักฟอก ทำให้พบว่าได้ผลการในการทำนายอัตราการไหลของอากาศอัด ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ $R^2 = 74.79\%$ จากนั้นนำค่าอัตราการไหลที่ได้จากสมการไปวางแผนปิดเครื่องอัดอากาศล่วงหน้าตามแผนการผลิต พบว่าสามารถประเมินผลการลดพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศลงได้ 186,125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี มีผลประหยัด 651,439 บาทต่อปี

ABSTRACT

The Utilities Department of a detergent production factory is responsible for supplying electricity, water, steam, and natural gas to the Production Department. It is found that the proportion of electricity consumption in the compressed air system is inconsistent with the production. This means that the supervising unit does not manage the production of compressed air in accordance with the production plan causing the energy waste. The energy consumption was averagely 124,862 kilowatt hours per month costing 434,519 baht per month which is 17% of the total energy consumption in the factory. Therefore, it is desirable to reduce energy use by supplying the compressed air in accordance with the production plan.

This research analyzes the compressed air data for the controlling valves by studying the relationships between the flow rate of compressed air used in liters per second at the pressure of 6.5 bar.

From the amount of detergent yield and the number of machines used in the detergent filling process, it is found that the flow rate (liters per second) with statistical relations at the confidence level of 95% and $R^2 = 74.79\%$. Then, the flow rate obtained from the equation will be planned to turn off the air compressor in advance following the production plan. It is found that the reduction of electricity in the compressed air system can be assessed for 186,125 kWh per year saving 651,439 baht per year.

1. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนภาคอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี ทำให้อุตสาหกรรมในยุคปัจจุบันคำนึงถึงการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้คุณภาพตามมาตรฐานควบคู่ไปกับการแข่งขันทางด้านราคาสินค้าเพื่อให้ได้ผลกำไรที่สูงกว่าบริษัทคู่แข่งและเพิ่มประสิทธิภาพในการแข่งขัน ดังนั้นหลายบริษัทจึงมีนโยบายในการลดต้นทุนในการผลิต ด้วยการลดต้นทุนด้านพลังงานลง เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สำคัญและเป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนสินค้า ได้แก่ ต้นทุนพลังงาน

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตสินค้าอุปโภค พบว่ามีค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเดือนสูงถึง 13 ล้านบาท ทางโรงงานได้มีนโยบายในการลดปริมาณการใช้พลังงานลงโดยตั้งเป้าในรูปของการลด CO₂ Emission เท่ากับ 0.1031 kgCO₂/Ton Product ซึ่งในปี 2017 มีปริมาณ CO₂ Emission เท่ากับ 0.1225 kgCO₂/Ton จากตัวเลขดังกล่าวพบว่าไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ผู้วิจัยซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบพลังงานของโรงงานได้สังเกตเห็นปัญหาในการจัดการการจ่ายระบบอัดอากาศที่มากเกินไปจนทำให้เกิดการปล่อยพลังงานฟุ้งกระจาย เช่น ในวันที่ไม่มีการผลิตสินค้าแต่มีค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศ หรือการเปิดเครื่องอัดอากาศในวันที่การผลิตน้อย ซึ่งการผลิตมีการวางแผนการผลิตล่วงหน้าอยู่แล้ว แต่ขาดการประสานข้อมูลดังกล่าวกับฝ่ายสนับสนุน ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศ โดยที่สัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานประกอบไปด้วย ระบบแสงสว่าง 8% ระบบปรับอากาศสำนักงาน 20% ระบบทำความเย็น 9% กระบวนการผลิต 39% ระบบอัดอากาศ 17% และส่วนอื่นๆ 7% ดังนั้นถ้าฝ่ายสนับสนุนใช้แผนการผลิตในการประเมินหาความต้องการปริมาณการใช้ก๊าซอัด คาดว่าสามารถลดการผลิตอากาศอัดที่เกินความจำเป็นลงได้

โดยหน่วยงานที่เลือกทำการวิจัยเพื่อเป็นหน่วยงานต้นแบบ ได้แก่ หน่วยงานบรรจุผงซักฟอกที่มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอัดอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 124,862 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน คิดเป็นค่าใช้จ่าย 434,519 บาทต่อเดือน เนื่องจากหน่วยงานบรรจุผงซักฟอกมีปริมาณการใช้ก๊าซอัดเป็นสัดส่วน 65% ของปริมาณก๊าซอัดที่ใช้ในการผลิตภายในโรงงาน ซึ่งก๊าซอัดที่ใช้ส่วนมากใช้ในเครื่องบรรจุและวาล์วควบคุม

จากการศึกษาข้อมูลและเข้าร่วมอบรมกับหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนเกี่ยวกับวิธีการลดการใช้พลังงานของระบบอัดอากาศ พบว่ามีหลายวิธีการ เช่น การปรับลดแรงดันที่ใช้ งาน การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศตามแรงดันการใช้งานเป็นต้น ซึ่งผู้วิจัยยังไม่พบการศึกษาการจ่ายก๊าซอัดโดยการใช้แผนผลิตของฝ่ายผลิตเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อใช้ในการทำนายปริมาณการใช้ก๊าซอัดและวางแผนการจ่ายก๊าซอัดล่วงหน้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาตามวิธีการดังกล่าว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) [3]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว กับตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนอง แนวทางปฏิบัติอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดได้หลายกรณี ประกอบด้วยค่าผิดพลาดที่เกิดจากการวัด เช่น ความผิดพลาดส่วนบุคคลหรือขาดการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนวัด ค่าผิดพลาดที่เกิดการใส่ตัวแปรในสมการถดถอยประมาณน้อยหรือมากเกินไปจนความสัมพันธ์ที่แท้จริง รวมทั้งเกิดจากการเลือกรูปแบบสมการหรือวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ผิด

การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุสามารถพิจารณาได้ 3 วิธีคือ

2.1.1 วิธี Backward Elimination เริ่มจากสร้างสมการเต็มรูปแบบแล้วลดรูปโดยพิจารณาจาก P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก

2.1.2 วิธี Forward Elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่าที่สำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้อีก

2.1.3 วิธี Stepwise Selection เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปเนื่องจากหลักการของวิธี Backward Elimination และ Forward Elimination คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าสมการจะพิจารณาว่าตัวแปรอิสระควรอยู่ในสมการหรือตัดออก

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Stepwise selection เนื่องจากต้องการสมการที่สามารถทำนายได้แม่นยำที่สุดเพียง 1 สมการและทดสอบว่าตัวแปรอิสระทุกตัว จะไม่มีความสัมพันธ์กันเองสูง เพื่อป้องกันปัญหาความสัมพันธ์ภายในของตัวแปรพยากรณ์

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Dionysios[4] ศึกษาเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจ่ายของคอมเพรสเซอร์ในแบบคู่ขนานด้วย Real Time Optimization (RTO) ของคอมเพลสเซอร์ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเคมี ที่ BASF, SE ประเทศเยอรมัน โดยนำเสนอการบูรณาการของข่ายงานที่เหมาะสมที่สุดของ Compressor แบบขนาน เพื่อเชื่อมต่อกับลักษณะงานที่หลากหลายช่วยในการตัดสินใจได้แก่ การจัดตารางดำเนินงานที่เหมาะสมและกำหนดเวลาในการซ่อมบำรุง มุ่งเน้นการตัดสินใจในการเปิด-ปิด Compressor และการเดินเครื่องให้เหมาะสมตาม Load โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ ของการใช้งานในแต่ละวัน จากสมการ Regression model เพื่อหาสถานะในการเดินเครื่องที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการเก็บข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูล และตรวจสอบวิเคราะห์หาความผิดปกติของระบบ พบว่าจากการทดลองใช้งานระบบ RTO พบว่าสถานะที่เครื่องเดินด้วยสถานะที่เหมาะสมกับ Load การใช้งาน สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เมื่อเทียบกับสถานะการเดินเครื่องแบบเดิม วิรัชศักดิ์ สมัครการ [5] ศึกษาเรื่องปรับปรุงเครื่องอัดอากาศใช้งานอัตโนมัติเพื่อลดต้นทุนในระบบ โดยการติดตั้งชุดควบคุมเครื่องอัดอากาศอัตโนมัติ (Group Control Panel) เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องอัดอากาศจำนวน 5 เครื่องให้ทำงานเหมาะสมกับความต้องการแรงดันลมที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่งผลให้ชั่วโมงการทำงานของเครื่องลดลงได้โดยเฉลี่ย 918.82 ชั่วโมงต่อเครื่อง คิดเป็น 45% และลดการสูญเสียในระบบ ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง 129,709.95 บาทต่อเดือน Huibin [6] ศึกษาการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ Air compressor ด้วยการบูรณาการออกแบบควบคุมจอแสดงผล โดยศึกษา Air Compressor จำนวน 5 เครื่องภายในโรงงานผลิตถ่านหิน มณฑลซานตง ประเทศจีน ซึ่งประกอบด้วย Air compressor ชนิด Screw จำนวน 2 เครื่องและ Air compressor ชนิด Piston จำนวน 3 เครื่อง โดยติดตั้งระบบ Soft Start สำหรับ Air Compressor ชนิด Screw และติดตั้ง Inverter สำหรับ Air compressor ชนิด Piston พร้อม Sensor ตั้งเปิด-ปิด บั๊มน้ำระบายความร้อนตามสถานะการทำงานของเครื่อง ซึ่งระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วย PLC Controller จากงานวิจัยพบว่าโรงงานสามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ Air compressor ลงได้ เนื่องจากจำนวนชั่วโมงการทำงานที่ลดลง เพราะเครื่อง Air compressor ทำงานตามโหลดความต้องการจริงของการผลิต และในส่วนของ Air compressor ชนิด Screw สามารถเดินเครื่องสลับกันได้พร้อมตั้งเวลาในการเปิด-ปิดเครื่องเพื่อให้เครื่องได้ทำงานที่ชั่วโมงการทำงานใกล้เคียงกันง่ายต่อการบำรุงรักษา อัจฉราภรณ์ พักแสง [7] ศึกษาการจัดการพลังงานของระบบอัดอากาศในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแก้ว โดยการตรวจวัดประสิทธิภาพเครื่องอัดอากาศจำนวน 18 เครื่องพบว่าเครื่องอัดอากาศ

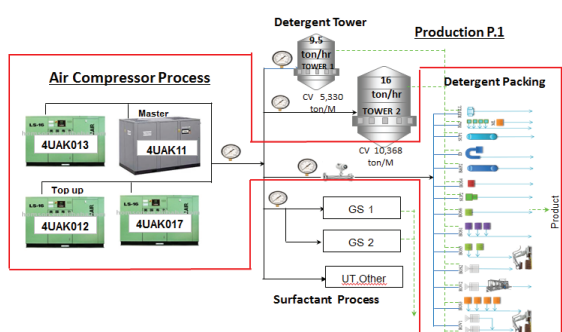
No.5 มีค่าการใช้พลังงานสูงสุดคือ 0.446 kW/L/Sec และเครื่องอัดอากาศ No.1 มีค่าการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตต่ำที่สุด คือ 0.304 kW/L/Sec จึงจัดการทำงานของเครื่องอัดอากาศที่มีสมรรถนะให้ได้สูงที่สุด และเลือกใช้เครื่องที่มีสมรรถนะต่ำไว้เป็นตัวสำรอง

3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมี 6 ขั้นตอนประกอบด้วย การกำหนดขอบเขตการศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ศึกษาเฉพาะ ส่วนงานบรรจุผงซักฟอกเท่านั้น และกำหนดข้อมูลที่ต้องการเก็บเพื่อนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์พร้อมกับการออกแบบตารางผลการทดลองสำหรับเก็บข้อมูลในงานจริง เพื่อใช้สร้าง Regression Model ในการทำนายปริมาณการใช้ก๊าซอัดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตตามแผนการผลิตในแต่ละวัน จากนั้นทำการทดลองและเก็บข้อมูลอีกครั้งตามข้อมูลที่ได้อ้างอิงไว้ภายใต้สมการ Regression ที่ได้ เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนหลังการวิจัย พร้อมทั้งสรุปผลการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนผังและขอบเขตของการศึกษา

ทำการศึกษาการจ่ายอากาศอัดให้เหมาะสมกับการผลิตในหน่วยงานบรรจุผงซักฟอก ซึ่งมีการใช้พลังงานของเครื่องอัดอากาศจำนวน 4 เครื่อง ประกอบด้วยเครื่องอัดอากาศขนาด 110 kW ที่อัตราการใช้จากเครื่องตรวจวัด 253 L/S จำนวน 1 เครื่อง และเครื่องอัดอากาศขนาด 75 kW ที่อัตราการใช้ 213,214,220 L/S จำนวน 3 เครื่องตามลำดับ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบอัดอากาศ

3.2 การเก็บข้อมูลในการวิเคราะห์

ข้อมูลที่ต้องการเก็บเพื่อนำมาวิเคราะห์ในการสร้างสมการถดถอยประกอบไปด้วย

3.2.1 ปริมาณการใช้ก๊าซอัดในหน่วยงานผลิตผงซักฟอก สามารถอ่านได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล

3.2.2 ปริมาณผลผลิต ซึ่งได้ข้อมูลจากแผนการผลิตของฝ่ายผลิต

3.2.3 แรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต ซึ่งสามารถอ่านได้จาก Pressure Gauge

3.2.4 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตจริง ซึ่งข้อมูลได้จากการจดบันทึกจากการทำงานรายวันของเครื่องจักร

3.2.5 แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต ซึ่งสามารถอ่านได้จาก Pressure Gauge

3.2.6 ปริมาณการใช้พลังงานในระบบอัดอากาศ สามารถอ่านได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าและโปรแกรมวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องมือวัดในการเก็บข้อมูล

3.3 ผลการเก็บข้อมูลก่อนการปรับปรุง

ทำการเก็บข้อมูลด้วยตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการสร้างสมการถดถอยพหุ โดยเก็บข้อมูลทุกวัน จำนวน 31 วัน ซึ่งมีจำนวน 31 ข้อมูลต่อ 1 ตัวแปร โดยทำการศึกษาทั้งหมด 5 ตัวแปร แบ่งเป็นตัวแปรตาม 1 ตัวแปรและตัวแปรอิสระ 4 ตัวแปรดังนั้นข้อมูลทั้งหมดที่ศึกษาจำนวน 155 ข้อมูลในการสร้างสมการถดถอย

3.4 สมการถดถอยเชิงพหุ Multiple Regression

กำหนดตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย

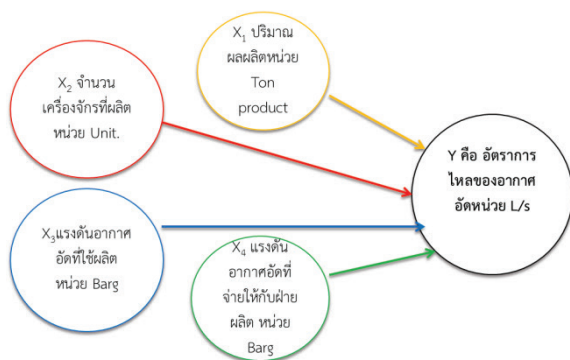
3.4.1 ตัวแปรตาม (Y) คืออัตราการไหลของอากาศอัดหน่วย L/s

3.4.2 ตัวแปรอิสระ (X_1) คือปริมาณผลผลิตหน่วย Ton product

3.4.3 ตัวแปรอิสระ (X_2) คือจำนวนเครื่องจักรที่ผลิต หน่วย Unit

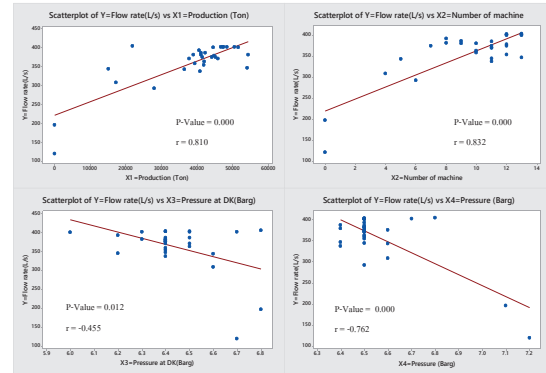
3.4.4 ตัวแปรอิสระ (X_3) แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต หน่วย Barg.

3.4.5 ตัวแปรอิสระ (X_4) แรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต Barg.



รูปที่ 3 แผนผังวิเคราะห์ Multiple Regression

จากนั้นทำการทดสอบ Scatter Plot ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระ พบว่าความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลของอากาศอัดกับตัวแปรอิสระประกอบด้วยปริมาณผลผลิต จำนวนเครื่องจักรที่ผลิตและแรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งมีค่า $r = 0.810$, 0.832 และ -0.762 ตามลำดับ แต่ตัวแปรอิสระแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิตมีความสัมพันธ์เส้นตรงต่ำ ซึ่งมีค่า $r = -0.455$ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Scatter Plot ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระ

จากนั้นทำการทดสอบ Correlation ระหว่างตัวแปรอิสระพบว่า ตัวแปรปริมาณผลผลิตกับตัวแปรเครื่องจักรที่ผลิต และตัวแปรปริมาณผลผลิตกับตัวแปรแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกันสูงเนื่องจากค่า $r > 0.75$ ส่วนตัวแปรอิสระอื่นๆ มีความสัมพันธ์กันปานกลางและต่ำเนื่องจากค่า $r < 0.75$ ดังรูปที่ 5

รายการ	ปริมาณผลผลิต	จำนวนเครื่องจักรที่ผลิต	แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต
จำนวนเครื่องจักรที่ผลิต	$r = 0.765$ P-Value = 0.000	-	-
แรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิต	$r = -0.482$ P-Value = 0.000	$r = -0.416$ P-Value = 0.000	-
แรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต	$r = -0.777$ P-Value = 0.000	$r = -0.673$ P-Value = 0.000	$r = 0.669$ P-Value = 0.000

รูปที่ 5 Correlation test ระหว่างตัวแปรอิสระ

ทำการทดสอบสมการถดถอยพหุ โดยกำหนดค่า Y คือปริมาณการใช้อากาศอัดหน่วย (ลิตรต่อวินาที) ซึ่งได้สมการในการทำนายดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ Multiple linear regression

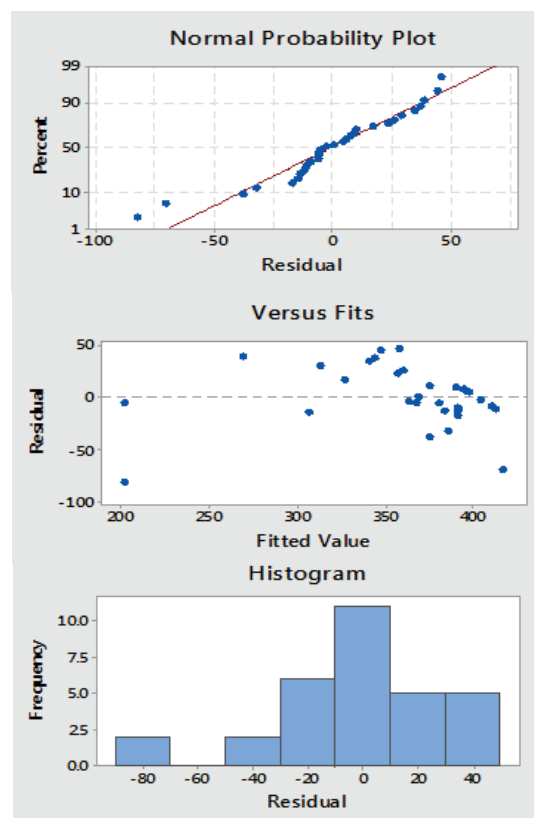
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	F	p-value	t-value	S	R ² (adj)	R ² (pred)
X				55.35	0.000	11.35	36.42	64.43	51.53
	X			65.10	0.000	11.89	34.48	68.12	57.78
		X		40.11	0.000	3.63	40.24	56.59	41.27
			X	7.31	0.012	7.66	55.12	17.87	0.00
X	X			45.49	0.000	11.63	30.66	74.79	63.79
X		X		25.72	0.173	1.40	36.98	63.03	42.85
X			X	32.71	0.015	2.59	34.61	67.89	51.43
	X	X		30.84	0.062	1.95	34.78	67.30	55.01
	X		X	45.92	0.001	3.74	30.55	74.97	63.37
		X	X	23.58	0.000	6.92	38.03	60.89	39.52
X	X	X		27.29	0.218	1.26	31.53	73.12	56.66
X	X		X	33.22	0.032	2.26	29.72	76.32	60.54
	X	X	X	29.75	0.011	2.74	30.50	74.84	59.86
X		X	X	21.87	0.029	2.31	34.21	68.35	45.67
X	X	X	X	23.51	0.000	11.63	30.02	75.64	54.90

พบว่าผลการวิเคราะห์สมการจากตารางที่ 1 ได้สมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการใช้ของอากาศอัดได้ดีที่สุด ได้แก่

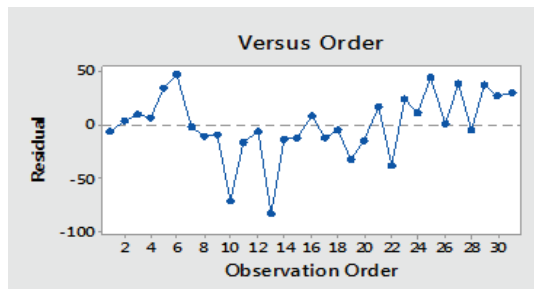
$$\text{อัตราการใช้ของอากาศอัด (ลิตรต่อวินาที)} = 202.1 + 0.001847 \text{ ปริมาณผลผลิต (ตัน)} + 8.86 \text{ จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิต (เครื่อง)} \quad (1)$$

โดยสมการมีค่า $R^2(\text{adj}) = 74.79\%$ หมายความว่าปริมาณการผลิตและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตสามารถทำนายปริมาณการใช้ของอากาศอัดได้ 74.79% ที่เหลืออีก 25.21% เป็นอิทธิพลจากปัจจัยอื่น ที่ค่า P-Value เท่ากับ 0.00

จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่ารูปแบบของกราฟ Normal Probability Plot of Residual มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือเป็นเส้นตรงสรุปได้ว่าการแจกแจงแบบปกติ โดยที่รูปแบบกราฟ Residual Versus Order ไม่มีรูปแบบของแนวโน้ม มีการกระจายตัวตามปกติ และรูปแบบกราฟ Residual Versus Fits มีรูปแบบเป็นแบบ Random แสดงว่า Residual มีความอิสระต่อกัน



รูปที่ 6 ผลการทดสอบ Multiple linear regression



รูปที่ 6 (ต่อ) ผลการทดสอบ Multiple linear regression

ตารางที่ 2 แผนการดำเนินการปิดเครื่องตามแผนผลิต

วันที่	ปริมาณ ผลผลิต (ตัน)	จำนวนเครื่องจักร	อัตราการไหลอากาศ อัด (L/s)	ปริมาณอากาศ อัดคงที่	Balance (L/s)	ปิดเครื่อง
10 Oct.	53,036	12	406	805	109	
11 Oct.	54,191	12	409	807	107	
12 Oct.	50,122	14	419	818	96.4	
13 Oct.	0	0	202	601	313	4UAK11
14 Oct.	49,986	13	410	808	106	
15 Oct.	27,345	6	306	705	209	4UAK13
16 Oct.	43,229	10	371	769	145	
17 Oct.	46,160	11	385	784	130	
18 Oct.	50,884	13	411	810	104	
19 Oct.	49,399	12	399	786	115	
20 Oct.	49,937	12	401	800	114	
21 Oct.	47,312	11	387	786	128	
22 Oct.	4,914	2	229	628	286	4UAK11
23 Oct.	38,502	10	362	761	153	
24 Oct.	43,338	10	371	770	144	
25 Oct.	43,591	10	371	770	144	
26 Oct.	23,805	5	290	689	225	4UAK12
27 Oct.	46,850	10	377	776	138	
28 Oct.	47,269	9	369	768	146	
29 Oct.	3,780	1	218	617	297	4UAK11
30 Oct.	46,889	10	377	776	138	
31 Oct.	36,073	11	366	765	149	
1 Nov.	49,307	9	373	772	142	
2 Nov.	50,556	10	348	783	131	
3 Nov.	49,736	9	374	773	141	
4 Nov.	35,702	12	374	773	141	
5 Nov.	0	0	202	601	313	4UAK11
6 Nov.	45,762	10	375	774	140	
7 Nov.	41,542	12	385	784	139	
8 Nov.	47,184	12	396	794	120	
9 Nov.	49,680	12	400	799	115	
10 Nov.	40,178	12	383	782	132	

3.5 ดำเนินการทดลอง

นำสมการ (1) มาใช้ในการทำนายปริมาณอากาศอัดที่ฝ่ายผลิตต้องใช้และจัดทำตารางแผนการดำเนินการทดลองปิดเครื่องอัดอากาศในแต่ละวันตามแผนการผลิตดังตารางที่ 2 โดยใช้ปริมาณการผลิตและจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตที่ได้จากแผนการผลิตของฝ่ายผลิต

3.6 ผลการทดลอง

จากการดำเนินการเปิด-ปิด เครื่องอัดอากาศตามแผนการผลิต ภายใต้การทำนายด้วยสมการ (1) เพื่อวางแผนการบริหารการจ่ายอากาศอัดให้เหมาะสมกับแผนการผลิตพบว่า พบว่าการปรับปรุงมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อตันผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.20 หลังการทดลองมีค่า

เท่ากับ 0.18 ซึ่งลดลง 0.02 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 3 ดังนั้นถ้ามีปริมาณผลผลิตเท่ากับ 9,306,279 ตันต่อปี พบว่าเกิดผลประหยัดที่ได้เท่ากับ 186,125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี เป็นเงิน 651,439 บาทต่อปี ที่ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.50 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง และลดปริมาณ CO₂ Emission ได้ 108.34 ตัน CO₂ ต่อปี

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง

วันที่	ก่อนปรับปรุงเดือนสิงหาคม		หลังปรับปรุงเดือนตุลาคม	
	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	44,105	7,499	40,047	7,447
2	48,439	7,454	38,413	7,433
3	44,538	7,441	35,936	7,214
4	47,167	5,128	-	4,465
5	41,472	7,702	39,315	7,577
6	21,953	4,064	-	5,065
7	47,401	7,536	33,173	7,367
8	54,327	7,069	39,878	6,864
9	50,482	6,918	42,891	7,389
10	54,061	7,536	44,382	7,701
11	45,212	7,387	41,311	7,323
12	-	4,784	47,713	7,134
13	-	4,647	1,134	4,237
14	45,895	7,477	41,843	7,646
15	51,516	7,521	37,426	7,479
16	46,598	7,539	34,718	5,991
17	44,857	7,530	-	3,088
18	41,958	7,536	39,538	7,271
19	41,929	7,527	35,702	6,555
20	27,999	6,357	-	3,434
21	15,078	7,562	45,762	7,830
22	40,805	7,447	41,542	6,884
23	41,057	7,490	47,184	8,009
24	41,118	7,539	49,680	8,752
25	40,628	7,816	40,178	6,245
26	37,849	7,117	47,330	8,714
27	17,204	4,336	26,703	5,137
28	39,328	7,501	44,465	7,555
29	38,935	7,470	46,845	7,664
30	42,317	7,454	50,955	7,322
31	36,407	7,405	47,586	7,646
Total	790,751	154,977	811,997	149,616
Index (kWh/Ton)		0.20		0.18

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สมการถดถอยพหุในการทำนายอัตราการไหลของอากาศอัดสำหรับสร้างแผนการจ่ายอากาศอัดให้สอดคล้องกับแผนผลิตเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยศึกษาตัวแปรอิสระจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณผลผลิตหน่วย จำนวนเครื่องจักรที่ผลิตแรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิตและแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิต เพื่อทำนายตัวแปรตามได้แก่ อัตราการไหลของอากาศอัด จากผลการทดสอบ Scatter Plot ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระพบว่าปริมาณผลผลิตกับจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิตมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเชิงบวกเนื่องจากเมื่อมีการผลิตมากขึ้นจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตได้ตามเป้า ซึ่งเครื่องจักรใช้อากาศอัดในการผลิต ส่งผลให้ต้องใช้อัตราการไหลของอากาศอัดที่สูงขึ้นเช่นกัน ส่วนความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของอากาศอัดกับแรงดันอากาศอัดที่จ่ายให้กับฝ่ายผลิตมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในเชิงลบ เนื่องจากเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นอัตราการไหลลดลงตามทฤษฎี และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศอัดกับแรงดันอากาศอัดที่ใช้ผลิตมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่ำ เนื่องจากปัจจัยหลายอย่างเช่นขนาดของท่อ ถึงเก็บอากาศอัด หรือระยะทางของท่อจากจุดจ่ายไปยังจุดใช้งาน เป็นต้น

จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ได้นำตัวแปรดังกล่าวมาสร้างสมการพหุคูณ เพื่อทำนายปริมาณอากาศอัดที่ต้องใช้ในการผลิต พบว่าได้สมการดังนี้ อัตราการไหลของอากาศอัด (ลิตรต่อวินาที) = $202.1 + 0.001847$ ปริมาณผลผลิต (ตัน) + 8.86 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ผลิต เครื่อง ที่ค่า $R^2(\text{adj}) = 74.79\%$ เมื่อนำสมการดังกล่าวมาคำนวณอัตราการไหลของอากาศอัดโดยใช้ข้อมูลจากแผนผลิตที่ได้จากฝ่ายผลิต เพื่อมาวางแผนการเปิด-ปิดเครื่องอัดอากาศล่วงหน้า เมื่อทำการทดลองตามแผนพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานลง 186,125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ประหยัดค่าไฟฟ้า 651,439 บาทต่อปี ลดปริมาณ CO₂ Emission ได้ 108.34 ตัน CO₂ ต่อปี (CO₂ Emission Factor = 0.5821 kgCO₂/kWh) [8]

จากการวิจัยพบว่ามีข้อจำกัดในการวิจัยได้แก่ ผู้วิจัยได้นำสมการที่ (1) มาทำนายการปิดเครื่องอัดอากาศรายกะ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากแผนการผลิตพบว่าในช่วงกะดึกมีการผลิตต่ำแต่เมื่อทำการทดลองพบว่าไม่เกิดผลประหยัดเนื่องจากเมื่อทำการปิดเครื่องขนาด 75 kW จำนวน 1 เครื่องในและดึกส่งผลให้เครื่องขนาด 110 kW ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำทำงานนานขึ้น ควรทำการเปลี่ยนเครื่องอัดอากาศประสิทธิภาพสูงและทำการบริหารจัดการโดยใช้สมการที่ (1) จะทำให้เกิดผลประหยัดสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] การประหยัดพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), กระทรวงพลังงาน, 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=344%3A2010-07-22-10-13-47&catid=67%3A2010-04-06-09-28-47&Itemid=103&lang=th.
- [2] คู่มือการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), กระทรวงพลังงาน, 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/243>
- [3] ทองพรรณราย มัชโชติ. การทำนายความจุระยะของผิวชิ้นงานในกระบวนการกลึงโดยประยุกต์ใช้การเวฟเลทของแรงตัดพลวัต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [4] Dionysios, P. Applied Energy: Optimization of a network of compressors in parallel: Real Time Optimization (RTO) of compressors in chemical plants – An industrial case study. *Journal of Applied Energy*, 2015; 144: 51-63.

- [5] Huibin, L. and Xuehua, L. Advance in control engineering information science: Integrated Monitoring System Design of Hybrid Aircompressors. *Procedia Engineering*, 2011; 15: 938 – 943.
- [6] วีระศักดิ์ สมักรการ, เอรวัต ลำเต๊ะ และ วันเฉลิม นูราณเดช. ปรับปรุงเครื่องอัดอากาศใช้งานระบบอัตโนมัติ เพื่อลดต้นทุนในระบบ. วิทยานิพนธ์เทคโนโลยีบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, 2554.
- [7] อัจฉราภรณ์ พักแสง. การจัดการพลังงานของระบบอัดอากาศในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตขวดแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [8] ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor). ฉลากคาร์บอนและคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (อบก.), องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2560. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_11335ee08a.pdf

ผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 25 (2018)

1. ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. ศาสตราจารย์ ดร.นวล เหล่าศิริพจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. ศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรธรรม เสราภิน	สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
4. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. รองศาสตราจารย์ ดร.วิสนัย วรธนัจฉริยา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
7. รองศาสตราจารย์ ดร.ชงชัย ฟองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
8. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
9. รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์ สัมภักตะกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
10. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลน เหล่าศิริถาวร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11. รองศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ เอื้อตรงจิตต์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
12. รองศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ สิงห์ใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
13. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
14. รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วงศ์วัฒนาเสถียร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
15. รองศาสตราจารย์ วินัย ศรีอำพร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
16. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชุดา เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
17. รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล สัจจวานิชย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
18. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ รุ่งทองใบสุริย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
19. รองศาสตราจารย์ เอนก ศิริพานิชกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
20. รองศาสตราจารย์ ดร.ชนศ รัตนวิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
21. รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
22. รองศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ ทรัพย์บุญญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
23. รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล สมทุพดี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤษ อักกะรังสี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรินทร์ ไชยกลางเมือง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร อาสนคำ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกศรินทร์ พิมรักษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรินทร์ ไชยกลางเมือง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
33. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วงกต วงศ์อภัย	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ชารัตน์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิญญู ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ

37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวรรณ เตียรธสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัมย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัช ชัยทัศน์ย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสันต์ หงษ์สมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรศิษฐ์ ทรุทศวินท์	มหาวิทยาลัยมหิดล
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สนิท พิพิธสมบัติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
47. อาจารย์ ดร.ณัฐนี วรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
48. อาจารย์ ดร.อนิรุท ไชยจารุณิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
49. อาจารย์ณรงค์ เพชรชารี	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
50. อาจารย์ ดร.นพดล กรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
51. อาจารย์ ดร.ทรงยศ กิจธรรมเกษตร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
52. อาจารย์ ดร.ธณิศวรรค์ ดีทยาบท	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
53. อาจารย์ ดร.สาธิต สันติศิริกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
54. อาจารย์ ดร.ปารเมศ วีระสันติ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
55. อาจารย์ ดร.เกรียงไกร อรุโณทยานันท์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
56. อาจารย์ ดร.วัชริน ศรีรัตนวิชัยกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
57. อาจารย์ ดร.ธีรรา สุวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
58. อาจารย์ ดร.วรวงษ์ เทียมสอน	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
59. อาจารย์ ดร.อนิรุท ไชยจารุณิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
60. อาจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
61. อาจารย์ ดร.พิไลวรรณ พรประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
62. อาจารย์ ดร.ย้งรักษ์ อรรถเวชกุล	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63. อาจารย์ ดร.ปริญญา กองกระพันธ์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
64. อาจารย์ ดร.แมน ด้อยแพร่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
65. อาจารย์ ดร.จิราวิทย์ นาคภักดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ
66. อาจารย์ ดร.กันยาพร ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน
67. อาจารย์ ดร.บุษนา ตาละลักษณ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
68. ดร.เหมือนจิต แจ่มศิลป์	องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)
69. ดร.อดิพงษ์ นันทพันธ์	ศูนย์ฝึกอบรมแม่มาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย