

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด กรณีศึกษาบริษัทผลิตเสื้อผ้า

A Mixed-integer Linear Programming Model for Solving Multi-item Uncapacitated Lot-sizing Problems with Storage Capacities Limitations: A Case Study of an Apparel Manufacturing Company

ดวงรัตน์ หิรัญยาสิริ¹ และ วรุตม์ บุญภักดี^{2,*}

¹ภาควิชาวิทยาการสิ่งทอ, คณะอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

กำแพงแสน กำแพงแสน นครปฐม 73140

Duangrat Hirunyasiri¹ and Warut Boonphakdee^{2,*}

¹Department of Textile Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Lat Yao,

Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

*Corresponding Author E-mail: fengwrb@ku.ac.th

Received: Aug 07, 2023; Revised: Nov 30, 2023; Accepted: Dec 01, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อหลากหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บวัตถุดิบมีจำกัดสำหรับกระบวนการผลิตของบริษัทผลิตเสื้อผ้า ในภาคปฏิบัติงานจริงพบว่า บางช่วงเวลาพื้นที่การจัดเก็บมีวันผ้าไม่เพียงพอ เนื่องจากมีวันผ้าคงเหลือจากช่วงเวลาก่อนหน้านี้รวมกับวันผ้าส่งมอบในช่วงเวลาปัจจุบันจำนวนมาก ทำให้พื้นที่จัดเก็บในคลังมีวันผ้าไม่เพียงพอ นำวันผ้าส่วนเกินจัดเก็บในพื้นที่สายการผลิต ส่งผลให้เกิดปัญหาการเบิกจ่ายล่าช้า วันผ้าสูญหายและตรวจนับจำนวนวันผ้าคงเหลือไม่ถูกต้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จัดทำแผนการจัดซื้อวันผ้าหลายชนิดเพียงพอต่อความต้องการของสายการผลิตและสามารถจัดเก็บวันผ้าคงเหลือและวันผ้าส่งมอบได้ทั้งหมด โดยใช้หลักการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมคำนวณปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบหลายชนิดแต่ละช่วงเวลา ผลรวมต้นทุนวันผ้า ต้นทุนสั่งซื้อ และต้นทุนจัดเก็บรวมทั้งจำนวนเร็กใช้งานไม่เกินจำนวนเร็กที่วางในชั้นวางของคลังวันผ้าได้ จากนั้นเปรียบเทียบผลการคำนวณแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมของนโยบายสั่งซื้อของบริษัทกรณีศึกษา งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์โอเพนโซลเวอร์ และซอฟต์แวร์เกม/ซีพีแอลเอ็กซ์คำนวณคำตอบ ผลลัพธ์จากการคำนวณพบว่าเมื่อใช้นโยบายการสั่งซื้อของบริษัทในปัจจุบันต้องเตรียมเร็กใช้งานมากที่สุดเท่ากับ 368 เร็ก หรือ 2.78 เท่าของจำนวนเร็กที่วางในชั้นวางของคลังวันผ้าได้ ผลการคำนวณแบบจำลองนำเสนอแสดงจำนวนเร็กใช้งานไม่เกินจำนวนเร็กที่วางในชั้นวางของคลังวันผ้า ต้นทุนรวมของนโยบายสั่งซื้อของบริษัทต่ำกว่าแบบจำลองนำเสนอประมาณร้อยละ 0.26 เนื่องจากสั่งซื้อเพียง 25 ครั้ง

คำสำคัญ: ขนาดการสั่งซื้อหลายชนิด, พื้นที่จัดเก็บมีจำกัด, บริษัทผลิตเสื้อผ้า, กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

Abstract

This study aimed to use a mixed-integer linear programming model to solve the multi-item uncapacitated lot size problem with storage capacity limitations for apparel manufacturing. In real-world operations, sometimes the storage capacity of cloth rolls can be insufficient at any given time. This would be because the sum of the remaining cloth rolls from the previous period and the receiving cloth rolls from the existing period would be a vast number. Furthermore, the extra cloth on the rolls would have to be carried and kept in the production line. Consequently, this caused the late issue of the distribution of the material, the loss of the cloth rolls, and the failure to count the cloth rolls. As a result, we conducted a multi-item cloth roll replenishment plan to meet the production line's demand and keep all the inventory and receiving cloth rolls. Using mixed-integer linear programming, the multi-item lot size of each period and the sum of the cloth, ordering, and holding costs was calculated, including the number of occupied cloth racks that did not exceed the number of available cloth racks in the cloth storage. Then, this result was compared with the calculation of a mixed-integer linear programming model based on the procurement policies of a case study company. This study used OpenSolver and GAMS/CPLEX software to calculate the solutions. The results found that in using the procurement policy, we could provide the maximum number of occupied cloth racks, about 368 racks, or 2.78 times the racks on the available shelves of the cloth storage. The result of the proposed model indicated that the number of occupied cloth racks to be installed did not exceed the number of available racks on the shelves. The total cost of the model of the procurement policy was less than the proposed model by about 0.26 percent because ordering occurred only about 25 times.

Keywords: Multi-item lot size, Storage capacity limitations, Apparel manufacturing company, Mixed-integer linear programming

1. บทนำ

การดำเนินงานทางธุรกิจการผลิตในปัจจุบันนั้นมีการแข่งขันสูง จึงมีความจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า เช่น การใช้วัตถุดิบ แรงงาน เงินทุน เครื่องจักร เทคโนโลยีการผลิต และพื้นที่โรงงาน โดยปกติแล้ว การออกแบบผังโรงงานจัดสรรพื้นที่กิจกรรมด้านการผลิตเป็นหลัก และจัดพื้นที่สำหรับกิจกรรมสนับสนุนการผลิต เช่น คลังวัตถุดิบและสินค้าสำเร็จรูป สำนักงาน ส่วนงานซ่อมบำรุงและส่วนงานควบคุมคุณภาพอย่างเพียงพอ ในกรณีพื้นที่สนับสนุนการผลิตไม่เพียงพอ เช่น คลังวัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูป มีความจำเป็นต้องเก็บวัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูป เนื่องจากการสั่งซื้อวัตถุดิบจำนวนมากหรือผลิตสินค้าสำเร็จรูปจำนวนมากรอการส่งมอบให้ลูกค้า วัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูปที่ไม่สามารถจัดเก็บในคลังสินค้าตามปกติได้เนื่องจากมีพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด จึงต้องจัดวางวัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูปในบริเวณพื้นที่สายการผลิต การจัดวางวัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูปในบริเวณนอกพื้นที่คลังสินค้านั้น เกิดปัญหาการบริหารคลังสินค้าได้ เช่น เช่น

วัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูปเกิดความเสียหาย การตรวจนับจำนวนและชนิดสินค้าไม่ถูกต้อง ในบางกรณีการวางชั้นวางวัตถุดิบหรือสินค้าสำเร็จรูปไม่เหมาะสมในพื้นที่การผลิตทำให้ขัดขวางการขนถ่ายสินค้าระหว่างการผลิตได้ ปัญหาเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นกับโรงงานผลิตในพื้นที่ประชากรหนาแน่น ไม่สามารถขยายพื้นที่เพิ่มได้อีก งานวิจัยนี้นำเสนอปัญหาของโรงงานผลิตเสื้อผ้าตั้งอยู่ในเขตปริมณฑลของกรุงเทพมหานครที่มีประชากรหนาแน่น

Wagner และ Whitin [1] เสนอวิธีกำหนดการพลวัตจำนวนปริมาณการสั่งซื้อสินค้าชนิดเดียวที่เหมาะสมเป็นครั้งแรก โดยให้การสั่งซื้อเกิดขึ้นเมื่อจำนวนสินค้าคงคลังช่วงเวลาก่อนหน้านั้นเป็นศูนย์อย่างไรก็ตามบริษัทส่วนใหญ่กำหนดให้มีสินค้าสำรองในกรณีขาดแคลน เนื่องจากเกิดจากเหตุการณ์ไม่คาดคิด เช่น การส่งมอบวัตถุดิบล่าช้า เกิดภัยธรรมชาติ ซึ่งมีความเสี่ยงที่ลูกค้าได้รับสินค้าไม่ตรงตามคำสั่งซื้อ

Love และคณะ [2] เสนอวิธีการไหลโครงข่าย (Network Flow) โดยกำหนดขอบเขตจำนวนสินค้าคงคลัง

คงเหลือ แล้วคำนวณปริมาณการสั่งซื้อสินค้าชนิดเดียว เครื่องจักรชนิดเดียว และพิจารณาค่าใช้จ่ายสินค้าค้างส่ง (Backlog Costs) โดยการแบ่งปัญหาเป็นส่วน แล้วคำนวณหาคำตอบในแต่ละช่วงเวลา

Pochet และ Wolsey [3] เสนอวิธีกำหนดการพลัดและโปรแกรมเชิงเส้นคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อและกำหนดขอบเขตจำนวนสินค้าคงคลังคงเหลือ ทั้งอัตราการผลิตคงที่ และขนาดการผลิตไม่คงที่

Toczyłowski [4] นำเสนอการหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้าชนิดเดียวกัน เมื่อกำหนดขอบเขตจำนวนสินค้าคงคลังคงเหลือ โดยมีสินค้าคงคลังเริ่มต้นและสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock) หาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีหาระยะทางสั้นที่สุดด้วยมัลติกราฟ (Multigraph)

Loparic และคณะ [5] นำเสนอแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการปริมาณการสั่งซื้อเมื่อเกิดปัญหาสินค้าขาดแคลน และการกำหนดจำนวนสินค้าคงคลังสำรอง โดยใช้วิธีกำหนดการพลัดและวิธีการหาขอบเขตของเซต (Convex Hull of Solution Algorithms) หาคำตอบที่เหมาะสม

Vyve และ Ortega [6] นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมด้วยเงื่อนไขต้นทุนจัดเก็บสินค้าคงคลังคงที่ แล้วหาคำตอบด้วยวิธีกำหนดการพลัด วิธีการหาขอบเขตของเซต และโปรแกรมเชิงเส้น

Absi และ Kedad-Sidhoum [7] นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้าหลายชนิดอย่างเหมาะสม โดยมีเงื่อนไขเรื่องต้นทุนเกิดจากเวลาสูญเสียในการปรับตั้งเครื่อง ต้นทุนความเสียหายจากกรณีสินค้าไม่เพียงพอต่อการขาย และต้นทุนเพิ่มขึ้นจากปริมาณสินค้าคงคลังสำรอง ใช้วิธีผ่อนปรนปัญหาแบบลากรองจ์ (Lagrangian Relaxation) โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ใช้ในการผลิต พบว่าวิธีนี้ให้ค่าขอบเขตล่างแคบกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีเงื่อนไขเวลาที่ใช้ในการผลิตและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Krarup และ Blide [8] งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ซีพีแอลเอ็กซ์ 9.0 หาขอบเขตบนและล่าง

Hwang และ Heuvel [9] นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาปริมาณการสั่งซื้อสินค้าชนิดเดียวกันเมื่อกำหนดจำนวนสินค้าคงคลังและมีสินค้าค้างส่ง โดยพิจารณาต้นทุนที่มีโครงสร้างแตกต่างกันรูปแบบคือต้นทุนประกอบด้วยค่าใช้จ่ายการผลิตและต้นทุนจัดเก็บสินค้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Concave Production and Inventory Costs) ใช้วิธีกำหนดการพลัดบนพื้นฐานของเทคนิคเมทริกซ์-เสิร์จิง (Matrix-searching) หาคำตอบ ต้นทุนคงที่ (Fixed charge cost) ใช้วิธีกำหนดการพลัดบนพื้นฐานของเทคนิคพอยท์-แอปโพรช และ จีโอเมทริก (Point-approach and Geometric Techniques) และต้นทุนไม่เกี่ยวกับการเก็งกำไร (Nonspeculative costs) เช่น ต้นทุนวัตถุดิบ ค่าประกันภัยใช้เทคนิคจีโอเมทริกบนพื้นฐานแนวคิดไลน์-เซกเมนต์ (Geometric Technique Based on Line-segments Approach) หาคำตอบ

Gutierrez และคณะ [10] นำเสนอวิธีการคำนวณเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อกำหนดปริมาตรของการจัดเก็บมีจำกัด โดยใช้วิธีสติกส์ที่ประยุกต์จากเทคนิคปรับเรียบ (Smoothing Technique) เปรียบเทียบกับแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม พบว่าคำตอบจากการสร้างโจทย์ด้วยวิธีสุ่มตัวเลข (Random Generated Example) มีค่าแตกต่างจากกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (ใช้ซอฟต์แวร์ CPLEX10.1) ไม่เกินร้อยละ 5 แต่ใช้เวลาในการคำนวณเพียง 0.01 วินาที (ใช้ซอฟต์แวร์ CPLEX++ และ LEDA 5.1.1) ในขณะที่ CPLEX ใช้เวลาถึง 10 นาที เมื่อจำนวนชนิดสินค้าไม่เกิน 100 ชนิด

Akbalik และ คณะ [11] ทำการพิสูจน์ว่าปัญหาปริมาณการผลิตหลายชนิดเมื่อมีการกำหนดจำนวนสินค้าคงคลังคือปัญหาที่ใช้เวลาคำนวณนาน (NP-Hard) แม้แต่ต้นทุนจัดเก็บสินค้าและต้นทุนการสั่งซื้อมีค่าเป็นศูนย์

Melo และ Ribeiro [12] นำเสนอวิธีสติกส์ 2 แบบและวิธีผ่อนปรนปัญหาแบบลากรองจ์ หาคำตอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิด เมื่อมีการกำหนดขอบเขตจำนวนสินค้าคงคลัง

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการและแบบจำลองเพื่อการคำนวณปริมาณสั่งซื้อดังนี้

กฤตกนก และคณะ [13] นำเสนอการพยากรณ์ความต้องการข้าวเปลือกหอมมะลิ โดยใช้ซอฟต์แวร์มินิแทป (MINITAB) และแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเพื่อหาปริมาณสั่งซื้อข้าวเปลือกหอมมะลิ เมื่อความต้องการแปรผันตามเวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ลินโก 8.0 (LINGO 8.0) คำนวณต้นทุนรวม ของแบบจำลองพบว่า ผลรวมของต้นทุนข้าวเปลือก ต้นทุนการสั่งซื้อ และต้นทุนการจัดเก็บของแบบจำลองมีค่าลดลงร้อยละ 3.5 จากต้นทุนจริง

นันทวรรณ และคณะ [14] นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเพื่อวางแผนการผลิตรวม โดยดำเนินการผลิตวัคซีนสำเร็จรูป และจัดหาวัคซีนโควิด-19 จากต่างประเทศทดแทน ขององค์การเภสัชกรรม โดยใช้ซอฟต์แวร์โซลเวอร์แอดดอิน (Solver Add-in) บนซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลแอดดอิน (Microsoft Add-in) พบว่าต้นทุนการผลิตจากการคำนวณด้วยแบบจำลองลดลงร้อยละ 37.13

ศุภัททา และวรินทร์ [15] ปรับปรุงการจัดซื้อเหล็กม้วนให้สัมพันธ์กับพื้นที่จัดเก็บ โดยนำเสนอวิธีจุดสั่งซื้อใหม่ (Re-order point) เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนเหล็กม้วนจากเดิมสั่งซื้อจำนวนลงที่ 18,000 ตันต่อปี เหลือเพียง 15,528 ตันต่อปี สั่งซื้อทุก 4 เดือน

จากงานวิจัยข้างต้นพบว่ามีงานนำเสนอทั้งวิธีคำนวณปริมาณการสั่งซื้อชนิดเดียวและหลายชนิด โดย Gutierrez และคณะ [10] เสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมโดยกำหนดการจัดเก็บเป็นปริมาณต่อชิ้นงาน โดยยังไม่มีการวิจัยใดประยุกต์ใช้การจัดเก็บวัตถุดิบเช่น จำนวนคงต่อพาเลท จำนวนม้วนต่อชั้นแร็ค เป็นต้น แบบจำลองนี้สามารถทำการปรับหน่วยการจัดเก็บ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองของ Gutierrez และคณะ [9] เป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตเสื้อผ้าได้

โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณหาปริมาณการสั่งซื้อในแต่ละช่วงเวลานั้น ส่วนมากจะพิจารณาจากผลรวมของต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนจัดเก็บสินค้าคงเหลือ และต้นทุนสั่งซื้อต่ำที่สุด จัดเก็บวัตถุดิบคงเหลือได้ตามที่ต้องการ ไม่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ของคลังวัตถุดิบ แต่ในกรณีพื้นที่การจัดเก็บมีจำกัดนั้น ผลรวมวัตถุดิบคงเหลือจากช่วงเวลาก่อนหน้านี้และส่งมอบ

ใหม่ในแต่ละช่วงเวลาจะต้องมีจำนวนไม่เกินจากพื้นที่จัดเก็บที่มีอยู่

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์นำรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมของ Gutierrez และคณะ [10] ซึ่งกำหนดให้ปริมาตรของพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับรูปแบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมดังกล่าวเปลี่ยนจากปริมาตรของพื้นที่จัดเก็บเป็นจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าและคำนวณจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าทั้งหมดในแต่ละช่วงเวลาไม่เกินต้องไม่เกินกว่าชั้นวางแร็คใส่ม้วนผ้าที่มีอยู่ในคลังม้วนผ้า โดยต้นทุนโดยรวมมีค่าต่ำที่สุด ต้นทุนรวมประกอบด้วย ต้นทุนราคาม้วนผ้า ต้นทุนสั่งซื้อ และต้นทุนจัดเก็บ มีค่าต่ำที่สุดจากการสั่งซื้อม้วนผ้าหลายชนิดในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นเปรียบเทียบกับจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าและต้นทุนรวมเกิดจากนโยบายการสั่งซื้อของบริษัทในปัจจุบัน ซึ่งให้ความสำคัญเรื่องต้นทุนรวมเป็นสำคัญ ผู้วิจัยกำหนดให้จำนวนม้วนผ้าที่จัดเก็บในคลังม้วนผ้าในแต่ละช่วงเวลาคือผลรวมของม้วนผ้าที่ส่งมอบมาใหม่ในช่วงเวลาปัจจุบัน และจำนวนม้วนผ้าคงคลังของช่วงเวลาก่อนหน้านี้ จัดเก็บบนชั้นวางแร็คในคลังม้วนผ้าได้ทั้งหมด ไม่ต้องนำแร็คใส่ม้วนผ้าบางส่วนจัดเก็บในพื้นที่สาขาการผลิตอื่น ๆ

แบบกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมของงานวิจัยนี้คำนวณหาปริมาณสั่งซื้อม้วนผ้าหลายชนิด และจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าไม่เกินจำนวนชั้นวางแร็คใส่ม้วนผ้าที่มีอยู่ในคลังม้วนผ้า ซึ่งนำไปเป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนการสั่งซื้อและบริหารงานคลังสินค้าได้ สามารถประยุกต์สำหรับการสั่งซื้อและจัดเก็บวัตถุดิบเป็นม้วน ถังและถุงวางพาเลท เช่น ม้วนกระดาษ ม้วนฟิล์มพลาสติก ถังและถุงสารเคมี เป็นต้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

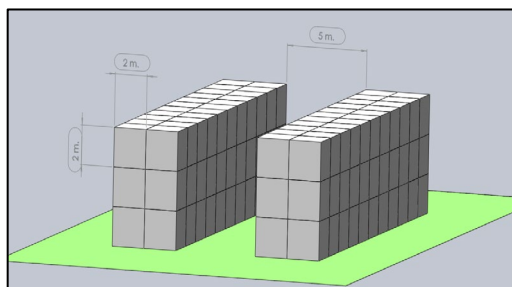
การคำนวณปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบชนิดเดียวกันสามารถใช้วิธีการสั่งซื้อแบบประหยัด (EOQ) ได้ แต่มีข้อจำกัดคือ ความต้องการวัตถุดิบต้องคงที่ในทุกช่วงเวลา Wagner and Within [1] เสนอวิธีกำหนดการพลวัตคำนวณปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบชนิดเดียวที่เหมาะสมได้เมื่อความต้องการวัตถุดิบผันแปรไปตามเวลา โดยไม่พิจารณาต้นทุนวัตถุดิบ และจะสั่งซื้อวัตถุดิบเมื่อวัตถุดิบคงคลังเป็นศูนย์แล้ว

เท่านั้น ซึ่งจุดสั่งซื้อใหม่ต้องไม่น้อยกว่าระยะเวลาการส่งมอบวัตถุดิบ (Lead time) ในขณะทำงานวิจัยของ Boonphakdee และ Chamsethikul [16] นำเสนอวิธีกำหนดการพลวัตบนพื้นฐานของวิธีการไหลเครือข่ายคำนวณปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบชนิดเดียวกันที่เหมาะสมเมื่อต้นทุนวัตถุดิบผันแปรไปตามเวลา ในกรณีการสั่งซื้อวัตถุดิบหลายชนิดที่เหมาะสมในช่วงเวลาเดียวกัน งานวิจัยนี้เสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-integer Linear Programming, MILP) ตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็ม และจำนวนทวิภาคเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมตรงตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ และสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมด

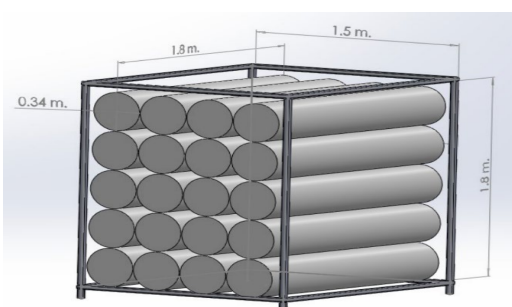
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาสภาพปัจจุบัน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจสภาพพื้นที่คลังม้วนผ้าของบริษัทกรณีศึกษาเป็นอาคารชั้นเดียวมีพื้นที่ขนาด 20×30 เมตร มีจำนวนช่องวางแร่ใสม้วนผ้าทั้งหมด 132 ช่อง ดังรูปที่ 1 และแร่ใสม้วนผ้าวางบนชั้นวางแร่ใสม้วนผ้า ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ชั้นวางแร่ใสม้วนผ้า



รูปที่ 2 แร่ใสม้วนผ้า

ในแต่ละเดือนทางบริษัทจะมีคำสั่งซื้อม้วนผ้าหลายชนิดจากต่างประเทศ โดยพิจารณาจากการสั่งซื้อล๊อคใหญ่ได้ ส่วนลดของราคาม้วนผ้าเป็นสำคัญ ทำให้บางเดือนต้อง

จัดเก็บในพื้นที่สายการผลิต ทำให้เกิดปัญหาการจัดการคลังสินค้า เช่น การนับสต็อกม้วนผ้าไม่ถูกต้อง การเบิก-จ่ายม้วนผ้าล่าช้า และม้วนผ้าสูญหาย ในขณะที่พื้นที่การทำงานในสายการผลิตต้องการพื้นที่วางสินค้าระหว่างการผลิตเช่นกัน ดังนั้นจำนวนม้วนผ้าทั้งหมดที่ต้องจัดเก็บในแต่ละเดือนไม่ควรเกินพื้นที่ช่องว่างม้วนผ้า เพื่อลดปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงแนะนำให้ควบคุมปริมาณการสั่งซื้อ โดยให้พิจารณาพื้นที่จัดเก็บม้วนผ้าที่มีจำนวนจำกัด เปรียบเทียบกับนโยบายสั่งซื้อของบริษัทกรณีศึกษา การสั่งซื้อเมื่อจำนวนสินค้าคงคลังไม่จำกัด โดยมีพื้นที่จัดเก็บสินค้าคงคลังเพียงพอ

3.2 ปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อกำหนดขอบเขตจำนวนสินค้าคงคลัง (Multi-item Uncapacitated Lot-Sizing problem with Inventory Bounds: MI-ULSIB)

Melo และ Riberio [12] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบหลายชนิดที่เหมาะสม เมื่อขอบเขตจำนวนวัตถุดิบคงคลังเท่ากับจำนวนวัตถุดิบคงเหลือ ณ ช่วงเวลาใด ๆ [7] กำหนดให้ระยะเวลามีจุดสิ้นสุด ไม่พิจารณาเงื่อนไขวัตถุดิบค้างส่ง (Backlogging) ดังนั้นข้อมูลตัวแปรตัดสินใจ, พารามิเตอร์ และแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงได้ดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ

x_{it} คือ จำนวนวัตถุดิบที่ต้องการสั่งซื้อชนิด i ที่ช่วงเวลา t หน่วย: ชิ้น

y_{it} ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 คือ ยอมรับการสั่งซื้อวัตถุดิบ i ที่ช่วงเวลา t ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 คือ ไม่มีการสั่งซื้อวัตถุดิบพารามิเตอร์

i คือ ชนิดวัตถุดิบ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ เมื่อ N คือ จำนวนชนิดวัตถุดิบ

t คือ ช่วงเวลา เมื่อ $t = 1, 2, \dots, T$ เมื่อ T คือ ช่วงเวลา

d_{it} คือ จำนวนความต้องการวัตถุดิบชนิด i เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ชิ้น)

p_{it} คือ ราคาวัตถุดิบชนิด i เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ยูโรต่อชิ้น)

h_i คือ ต้นทุนจัดเก็บวัตถุดิบชนิด i ต่อหน่วยวัตถุดิบ (หน่วย: ยูโรต่อชิ้น)

s_i คือ ต้นทุนสั่งซื้อวัตถุดิบชนิด i (หน่วย: ยูโร)

I_{it} คือ จำนวนวัตถุดิบคงคลังชนิดที่ i เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ชิ้น)

U_t คือ ขอบเขตจำนวนวัตถุดิบคงคลังที่ยอมรับได้ เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ชิ้น)

D_{it} คือ ผลรวมความต้องการวัตถุดิบคงคลังสะสมชนิดที่ i จากช่วงเวลา t จนถึง T (หน่วย: ชิ้น)

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (p_{it}x_{it} + s_i y_{it} + h_i I_{it}) \quad (1)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$I_{it-1} + x_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (2)$$

$$x_{it} \leq D_{it} y_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N I_{it} \leq U_t \quad \forall t \quad (4)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall t \quad (5)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (6)$$

$$I_{i0}, I_{iT} = 0 \quad \forall i \quad (7)$$

สมการที่ (1) คือ สมการวัตถุประสงค์แสดงผลรวมของต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนสั่งซื้อ และต้นทุนจัดเก็บ สมการที่ (2) คือสมการแสดงสมดุลของการรับ-จ่ายวัตถุดิบชนิด i เมื่อช่วงเวลา t สมการที่ (3) แสดงถึงการยอมรับให้สั่งซื้อวัตถุดิบแล้ว ทำให้เกิดต้นทุนสั่งซื้อ โดยกำหนดให้ $D_{it} = \sum_{k=t}^T d_{ik}$ สมการที่ (4) แสดงผลรวมของจำนวนวัตถุดิบคงคลังทุกชนิดต้องไม่เกินขอบเขตจำนวนวัตถุดิบคงคลังที่ยอมรับได้ในช่วงเวลาใด ๆ สมการที่ (5) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ y_{it} มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น สมการที่ (6) กำหนดให้ ตัวแปรตัดสินใจ x_{it} และ I_{it} มีค่าไม่เป็นลบ และสมการที่ (7) กำหนดให้จำนวนวัตถุดิบคงคลังช่วงเวลา $t = 0, T$ มีค่าเท่ากับ 0

3.3 ปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด

(Multi-Item Uncapacitated Lot-Sizing problem with Storage Capacities Limitation:MI-ULS-SCL)

Gutierrez และคณะ [10] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณปริมาณการสั่งซื้อวัตถุดิบหลายชนิดที่เหมาะสม กำหนดให้ขอบเขตจำนวนวัตถุดิบคงคลังสะสมเท่ากับวัตถุดิบคงเหลือช่วงเวลาก่อนหน้ารวมกับจำนวนวัตถุดิบที่สั่งซื้อมาใหม่ แล้วเปลี่ยนหน่วยการจัดเก็บ

จากจำนวนวัตถุดิบเป็นปริมาตรของวัตถุดิบต่อหน่วย โดยกำหนดสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้

- 1) จำนวนชนิดวัตถุดิบไม่ขึ้นกับจากความต้องการวัตถุดิบและจำนวนช่วงเวลาแผนการสั่งซื้อ
- 2) การส่งมอบวัตถุดิบได้ครบตามคำสั่งซื้อ (No backlogging)
- 3) ไม่พิจารณาระยะเวลา นำ (Lead time) [15]

ข้อมูลตัวแปรตัดสินใจ, พารามิเตอร์ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังนี้

พารามิเตอร์

I คือ ชนิดวัตถุดิบ i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ เมื่อ N คือ จำนวนชนิดวัตถุดิบ

T คือ ช่วงเวลา เมื่อ $t = 1, 2, \dots, T$ เมื่อ T คือ จำนวนช่วงเวลา

d_{it} คือ จำนวนความต้องการวัตถุดิบชนิด i เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ชิ้น)

p_{it} คือ ราคาวัตถุดิบชนิด i เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ยูโรต่อชิ้น)

h_i คือ ต้นทุนจัดเก็บวัตถุดิบชนิด i ต่อหน่วยวัตถุดิบ (หน่วย: ยูโรต่อชิ้น)

s_i คือ ต้นทุนสั่งซื้อวัตถุดิบชนิด i (หน่วย: ยูโร)

I_{it} คือ จำนวนวัตถุดิบคงคลังชนิดที่ i เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ชิ้น)

D_{it} คือ ผลรวมความต้องการวัตถุดิบคงคลังสะสมชนิดที่ i จากช่วงเวลา t จนถึง T (หน่วย: ชิ้น)

W_i คือ ปริมาตรของวัตถุดิบคงคลังชนิด i ต่อหน่วย (หน่วย: ลบ.เมตร)

U_t คือ ปริมาตรของพื้นที่จัดเก็บที่มีอยู่ เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ลบ.เมตร)

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (p_{it}x_{it} + s_i y_{it} + h_i I_{it}) \quad (8)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$I_{it-1} + x_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (9)$$

$$x_{it} \leq D_{it} y_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i(I_{it-1} + x_{it}) \leq U_t \quad \forall t \quad (11)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall t \quad (12)$$

$$x_{it}, I_{it} \in N_0 = N \cup 0 \quad \forall i, \forall t \quad (13)$$

$$I_{i0}, I_{iT} = 0 \quad \forall i \quad (14)$$

สมการที่ (11) คือ วัตถุดิบคงคลังจากช่วงเวลาก่อนหน้านี้ รวมกับวัตถุดิบส่งมอบในช่วงเวลาปัจจุบัน จะมีปริมาตรไม่เกินปริมาตรของพื้นที่จัดเก็บของคลังวัตถุดิบที่มีอยู่ สมการที่ (13) คือ สมการกำหนดให้ ตัวแปรตัดสินใจ x_{it} และ I_{it} เป็นเลขจำนวนนับและเลขศูนย์ และสมการที่ (7) คือ สมการกำหนดให้จำนวนวัตถุดิบคงคลังช่วงเวลา $t=0$, T มีค่าเท่ากับ 0

แบบจำลองของ Gutierrez และคณะ สามารถนำไปปรับหน่วยการจัดเก็บในสมการที่ (11) ให้สอดคล้องการจัดเก็บวัตถุดิบชนิดต่างๆ เช่น หน่วยจัดเก็บเป็นน้ำหนักของถุงปูนซีเมนต์ หน่วยจัดเก็บถึงหรือถุงบนพาเลทเป็นจำนวนพาเลท และหน่วยจัดเก็บม้วนพลาสติกในแร่ไส้ วัตถุดิบเป็นจำนวนแร่ไส้ เป็นต้น

แบบจำลอง MI-ULS-LB (หัวข้อ 3.2) กำหนดให้จำนวนวัตถุดิบคงเหลือ ไม่เกินจำนวนวัตถุดิบคงคลังยอมรับได้ ในขณะที่แบบจำลอง MI-ULS-SCL (หัวข้อ 3.3) กำหนดให้ผลรวมปริมาตรวัตถุดิบส่งมอบในช่วงเวลาปัจจุบันและปริมาตรวัตถุดิบคงเหลือในช่วงเวลาก่อนหน้านี้ไม่เกินปริมาตรวัตถุดิบคงคลังยอมรับได้

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม ผสมและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังนี้

4.1 ปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด กรณีศึกษาบริษัทผลิตเสื้อผ้า (Multi-Item Uncapacitated Lot-Sizing problem with Storage Capacities Limitation for the Apparel Manufacturing Company: MI-ULS-SCL-AMC)

งานวิจัยนี้เสนอปรับเปลี่ยนแบบจำลองของ Gutierrez และคณะ (2013) โดยเปลี่ยนสมการที่ (11) เป็นสมการที่ (18), (19) และ (20) ให้พารามิเตอร์ปริมาตรของวัตถุดิบ

เปลี่ยนเป็นจำนวนแร่ไส้ม้วนผ้า (รูปที่ 2) โดยกำหนดสมมติฐานของแบบจำลองดังนี้

- 1) จำนวนชนิดวัตถุดิบไม่ขึ้นกับจากความต้องการวัตถุดิบและจำนวนช่วงเวลาแผนการสั่งซื้อ
- 2) การส่งมอบวัตถุดิบได้ครบตามคำสั่งซื้อ (No backlogging)
- 3) ไม่พิจารณาระยะเวลา นำ (Lead time)

ดังนั้นข้อมูลตัวแปรตัดสินใจ, พารามิเตอร์ และแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงได้ดังนี้

ตัวแปรตัดสินใจ

u_{it} คือ จำนวนม้วนผ้าจัดเก็บในคลังม้วนผ้าชนิด i ที่ยอมรับได้ เมื่อช่วงเวลา t (หน่วย: ม้วน)

พารามิเตอร์

b_i คือ จำนวนม้วนผ้าชนิดที่ i ทั้งหมดต่อแร่ไส้ม้วนผ้า (หน่วย: ม้วนต่อแร่ไส้ม้วนผ้า)

R_{it} คือ จำนวนแร่ไส้ม้วนผ้าชนิดที่ i เมื่อ ช่วงเวลา t คำนวณได้จากจำนวนม้วนผ้าจัดเก็บในคลังม้วนผ้าที่ยอมรับได้ชนิด i เมื่อช่วงเวลา t หารด้วย b_i ($R_{it} = \frac{u_{it}}{b_i}$) (หน่วย: แร่ไส้)

U_T คือจำนวนแร่ไส้ม้วนผ้าทุกชนิดวางบนชั้นวางในคลังม้วนผ้าแต่ละช่วงเวลา (หน่วย: แร่ไส้)

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (p_{it}x_{it} + s_{it}y_{it} + h_{it}I_{it}) \quad (15)$$

เงื่อนไขบังคับ

$$I_{it-1} + x_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (16)$$

$$x_{it} \leq D_{it}Y_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (17)$$

$$I_{it-1} + x_{it} \leq u_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (18)$$

$$R_{it} = \frac{u_{it}}{b_i} \quad \forall i, \forall t \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^N R_{it} \leq U_T \quad \forall t \quad (20)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall t \quad (21)$$

$$x_{it}, I_{it} \in N_0 = N \cup 0 \quad \forall i, \forall t \quad (22)$$

$$u_{it} \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (23)$$

$$I_{i0}, I_{iT} = 0 \quad \forall i \quad (24)$$

อสมการที่ (18) คือ ผลรวมของจำนวนม้วนผ้าคงเหลือ ช่วงเวลาก่อนหน้าและจำนวนม้วนผ้าที่สั่งซื้อใหม่ในช่วงเวลาปัจจุบันไม่เกินจำนวนแร่ใสม้วนผ้าจัดเก็บในคลังม้วนผ้าชนิด i ที่ยอมรับได้ (u_i) สมการที่ (19) คือ จำนวนแร่ใสม้วนผ้าชนิดที่ i (R_{it}) มีค่าเท่ากับ จำนวนแร่ใสม้วนผ้าจัดเก็บในคลังม้วนผ้าชนิด i ที่ยอมรับได้หารด้วยจำนวนม้วนผ้าชนิดที่ i ทั้งหมดต่อแร่ใสม้วนผ้า (b_i) อสมการที่ (20) แสดงผลรวมจำนวนแร่ใสม้วนผ้าคงคลังที่ยอมรับได้ ($\sum_{i=1}^N R_{it}$) ของแต่ละช่วงเวลาไม่เกินจำนวนแร่ใสม้วนผ้าคงคลังทุกชนิดในแต่ละช่วงเวลา (U_T) ดังรูปที่ 1 สมการที่ (22) คือ สมการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ x_{it} และ I_{it} เป็นจำนวนนับและศูนย์ อสมการที่ (23) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ u_{it} มีค่าไม่เป็นลบ

แบบจำลอง MI-ULS-SCL (หัวข้อ 3.3) กำหนดให้ผลรวมปริมาตรวัตถุดิบส่งมอบในช่วงเวลาปัจจุบันและปริมาตรวัตถุดิบคงเหลือในช่วงเวลาก่อนหน้านี้ไม่เกินปริมาตรวัตถุดิบคงคลังยอมรับได้ ในขณะที่แบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC (หัวข้อ 4.1) กำหนดให้ผลรวมจำนวนแร่ใสม้วนผ้าส่งมอบในช่วงเวลาปัจจุบันและจำนวนแร่ใสม้วนผ้าคงเหลือในช่วงเวลาก่อนหน้านี้ไม่เกินจำนวนแร่ใสม้วนผ้าคงคลังยอมรับได้

4.2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อขอบเขตจำนวนสินค้าคงคลัง (MI-ULS-IB) สามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ (1)–(7) ด้วยตัวอย่างวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกของ Lange [17] ดังตารางที่ 1 กำหนดปริมาณการสั่งซื้อและผลต้นทุนการสั่งซื้อเท่านั้น (ไม่พิจารณาต้นทุนการเก็บรักษาและต้นทุนวัตถุดิบ) โดยใช้ซอฟต์แวร์เอกซ์เพรสโซลเวอร์ (Xpress Solver) ด้วยวิธีกำหนดการพลวัต เปรียบเทียบกับการใช้ซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์ (Microsoft Excel OpenSolver) และ ซอฟต์แวร์เกมส์ซีพีแอลเอ็กซ์ (GAMS/CPLX) ด้วยวิธีแตกกิ่งและเพิ่มระนาบตัด (Branch and cut algorithm) เช่นเดียวกัน แสดงค่าต้นทุนต่ำที่สุดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลตัวอย่าง ทดสอบแบบจำลอง MI-ULS-IB

ช่วงเวลา	ความต้องการสินค้า (d_{it}) (หน่วย: ชิ้น)				
	ชนิดที่ 1	2	3	4	5
1	6	4	6	14	1
2	2	1	5	1	3
3	9	0	14	11	1
4	13	2	7	12	5
5	13	3	6	15	7
6	14	0	5	7	8
7	0	4	15	5	6
8	6	5	12	11	15
9	13	8	15	5	1
10	2	5	4	12	3
ต้นทุนสั่งซื้อ (s_{it} : euro)	20	40	50	75	100
จำนวนวัตถุดิบคงคลังสูงสุดที่ยอมรับได้ ในแต่ละช่วงเวลา (U_i) (หน่วย: ชิ้น)					20

ตารางที่ 2 ค่าต้นทุนต่ำที่สุดของตัวอย่าง ทดสอบแบบจำลอง MI-ULS-IB (หน่วย: ยูโร)

โซลเวอร์	คำตอบ ขอบเขตล่าง (Lower bound)	คำตอบ ที่ดีที่สุด (Best solution)	ร้อยละ ผลต่างของ คำตอบ (Gap)
XPRESS	879.7	1,295	32.07
Excel OpenSolver	530.58	1,295	59.03
GAMS/ CPLX	530.58	1,295	59.03

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง MI-ULS-IB ค่าต้นทุนต่ำที่สุดจากวิธีกำหนดการพลวัต และวิธีแตกกิ่งและเพิ่มระนาบตัด มีค่า 1,295 เท่ากัน ดังนั้น ซอฟต์แวร์โอเพนโซลเวอร์แบบจำลอง MI-ULS-LB มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด (MI-ULS-SCL) สามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ (8)–(14) ด้วยตัวอย่างจากของ Gutierrez และคณะ จำนวนปริมาณการสั่งซื้อและต้นทุนรวม โดยใช้ ซอฟต์แวร์และวิธีการ เช่นเดียวกับการตรวจสอบแบบจำลอง MI-ULS-IB แสดงผลการตรวจสอบคำตอบ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คำตอบของตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง MI-ULS-SCL (หน่วย :ยูโร)

โซลเวอร์	คำตอบขอบเขตล่าง	คำตอบดีที่สุด	ร้อยละผลต่างของคำตอบ
CPLEX		8,521	0
Excel OpenSolver	7,122.53	8,521	16.41
GAMS/ CPLEX	7,299.54	8,521	14.34

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง MI-ULS-SCL คำตอบจากวิธีแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch and Bound Algorithm) ด้วย ซอฟต์แวร์ซีพีแอลเอ็กซ์ (CPLEX) มีค่าต่ำที่สุดคือ 8,521 และจากวิธีแตกกิ่ง

และเพิ่มระนาบตัด ด้วย ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์ (Microsoft Excel OpenSolver) และ ซอฟต์แวร์เกมส์ซีพีแอลเอ็กซ์ (GAMS/CPLX) มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 8,521 เช่นกัน ดังนั้น ซอฟต์แวร์โอเพนโซลเวอร์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

2) แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด กรณีศึกษาบริษัทผลิตเสื้อผ้า (MI-ULS-SCL-AMC) สามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ (15)–(24) เทียบเคียงได้จากผลการตรวจสอบของแบบจำลอง MI-ULS-SCL ที่มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ เนื่องจากมีเพียงการปรับเงื่อนไขพื้นที่จัดเก็บจากหน่วยวัดปริมาตรจากสมการที่ (11) ของแบบจำลอง MI-ULS-SCL เป็นหน่วยวัดจำนวนแร่คัสม้วนผ้าจากสมการที่ (19) และ (20) ของแบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC เท่านั้น และเงื่อนไขอื่นยังคงเดิม

4.3 ข้อมูลการจัดเก็บม้วนผ้า

จากการศึกษาและเก็บข้อมูลจำนวนรับ และจัดเก็บ-จ่ายม้วนผ้า จำนวนม้วนผ้าต่อแร่ของคลังม้วนผ้า บริษัทกรณีศึกษา รวมทั้งข้อมูลความต้องการม้วนผ้า ราคาผ้าต้นทุนการสั่งซื้อ และต้นทุนจัดเก็บม้วนผ้า ในระหว่างเดือนมกราคม-ธันวาคม 2565 ดังแสดงในตารางที่ 4–5 ดังนี้

ตารางที่ 4 ข้อมูลชนิดม้วนผ้า

*ชนิดม้วนผ้า	น้ำหนักสุทธิต่อม้วน (กก.)	น้ำหนักผ้าต่อตารางเมตร (GSM)	ความยาวผ้าต่อม้วน (หลา)	ความกว้างหน้าผ้า (นิ้ว)	พื้นที่ผ้าต่อม้วน (ตารางเมตรต่อม้วน)	ความหนาพื้นผ้า (มม.)	จำนวนม้วนผ้าต่อแร่คัสม้วนผ้า
A	19.13	130	99	64	147.15	1.00	20
B	19.26	135	96	64	142.67	1.00	20
C	15.94	150	71.5	64	106.27	1.00	30
D	41.38	320	87	64	129.31	1.40	12
E	15.88	120	89	64	132.33	1.00	20
F	17.31	168	69.3	64	103.03	1.00	30
G	26.97	224	81	64	120.27	1.20	20
H	20.33	180	76	64	112.97	1.10	20

ตารางที่ 4 ข้อมูลชนิดม้วนผ้า (ต่อ)

*ชนิด ม้วนผ้า	น้ำหนักสุทธิต่อ ม้วน (กก.)	น้ำหนักผ้าต่อ ตารางเมตร (GSM)	ความยาวผ้า ต่อม้วน (หลา)	ความกว้าง หน้าผ้า (นิ้ว)	พื้นที่ผ้าต่อม้วน (ตารางเมตรต่อ ม้วน)	ความหนาพื้น ผ้า(มม.)	จำนวนม้วนผ้า ต่อเร็คใส่ม้วน ผ้า
I	36.92	310	80.12	64	119.09	1.40	16
J	24.35	180	91	64	135.27	1.10	20
K	35.71	306	81.5	64	116.70	1.40	16
L	21.23	280	51	64	75.82	1.30	30

*ผ้าชนิด A (Polyester, Spandex), ผ้าชนิด B (Polyester, Cotton, Rayon), ผ้าชนิด C (Organic Polyester), ผ้าชนิด D (Nylon and Spandex), ผ้าชนิด E (PIMA Cotton and Spandex), ผ้าชนิด F (PIMA Organic Cotton, Polyester and Lycra), ผ้าชนิด G (CD Polyester and Polyester), ผ้าชนิด H (Polyester and Spandex), ผ้าชนิด I (Cotton (BCI), Organic Cotton and Polyester), ผ้าชนิด J (Cotton), ผ้าชนิด K (Polyester and Spandex), ผ้าชนิด L (Cotton and Spandex)

พื้นที่จัดเก็บเร็คใส่ม้วนผ้าในชั้นวางเร็คไม่เกิน $11 \times 6 \times 2 = 132$ เร็ค ดังรูปที่ 1 ต้นทุนการสั่งซื้อประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายเงินเดือนพนักงาน ค่าเอกสาร ค่าไฟฟ้า ค่าอินเทอร์เน็ต ค่าเช่าสำนักงาน และค่าประกันภัยโดยเฉลี่ยแล้ว มีค่าเท่ากับ 4,478.2 บาท ต่อครั้ง และ ต้นทุนจัดเก็บม้วนผ้า

ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายเงินเดือนพนักงาน ค่าเอกสาร ค่าไฟฟ้า ค่าเชื้อเพลิง ค่าเช่าคลังสินค้า และค่าประกันภัยมีค่า 2.27 บาทต่อม้วนผ้า ความต้องการม้วนผ้าและราคาม้วนผ้า ของปี 2565 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลความต้องการและราคาม้วนผ้า

เดือน	ม้วนผ้า ชนิด A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
มค..	120/14.68	220/30.9		250/19.2	250/10.3	280/11.07		350/8.55	390/15.97		280/23.96	
กพ..	70/14.68		140/14.52				380/16			350/7.98		200/18
มีค.		300/30.9		300/19.2	280/10.3	260/11.07		320/8.55	400/15.97		280/23.96	250/18
เมย.	130/14.68		80/14.52				350/16			400/7.98		300/18
พค.		200/30.9		320/19.2	250/10.3	300/11.07		350/8.55	420/15.97		300/23.96	200/18.5
มิย.	50/14.9		150/14.52				280/16			380/7.98		250/18.5
กค.		300/30.9		280/18.9	250/9.8	280/10.5		300/8.7	420/15.5		350/23.5	200/18.5
สค.	140/14.9		100/30.9				350/15.8			400/7.68		250/18.5
กย.		350/30.9		280/18.9	280/9.8	270/10.5		350/8.7	380/15.5		350/23.5	200/18.5
ตค.	200/14.9		150/14.1				300/15.8			450/7.68		250/18.3
พย.		300/30.9		300/18.9	280/10.5	280/10.5		350/8.7	400/15.5		380/23.5	200/18.3
ธค.	140/14.5		200/14.1				350/16			400/7.68		250/18.3

*ความต้องการม้วนผ้า (หน่วยม้วน)/ ราคาม้วนผ้า (หน่วย $\times 10^3$ บาท)

4.4 ผลการคำนวณจากกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุคเอชพีพีวาลีเยนรุ่น x360 Convertible 14 หน่วยประมวลผลกลางอินเทล รุ่น Core i7-8565U @ 1.8 GHz หน่วยความจำหลัก 24 GB ระบบปฏิบัติการ วินโดวส์ 10 นา โซฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์ และเกมส์/ซีพีแอลอีเอ็กซ์ (Version 45.2) คำนวณด้วยวิธีแตกกิ่งและเพิ่มระนาบตัดบนแบบจำลอง MI-ULS-SCL-ACM จากหัวข้อ 4.1 โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4 และ 5 ซึ่งคำตอบของซอฟต์แวร์ทั้งสอง แสดงผลได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลการคำนวณปัญหาตัวอย่างจากบริษัทกรณีศึกษา (แบบจำลอง MI-ULS-SCL-ACM)

	Excel OpenSolver	GAMS/CPLEX
จำนวนเร็กได้สวมผ้าใช้งานมากที่สุด	132	132
คำตอบขอบเขตล่าง (บาท)	341,296,561.78	341,296,226.51
คำตอบดีที่สุด (บาท)	341,483,465.96	341,483,465.96
ร้อยละผลต่างคำตอบที่ดีที่สุด	-	

คำตอบจากการคำนวณด้วย ซอฟต์แวร์ทั้งสองพบว่า จำนวนเร็กได้สวมผ้าทุกชนิดทั้งหมดตั้งแต่เดือนมกราคม

จนถึงธันวาคม มีค่า 127.71, 71, 128.67, 70.73, 131.98, 76.90, 131.98, 69.23, 129.59, 68 และ 132 ตามลำดับ แร็กใช้งานมากที่สุดเท่ากับ 132 แร็ก ซึ่งไม่เกินจำนวนเร็กได้สวมผ้าวางในชั้นวางทั้งหมดของคลังผ้า 132 แร็ก (รูปที่ 1) จากตารางที่ 6 ต้นทุนรวมต่ำที่สุดคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์เท่ากับ 341,483,465.96 บาท ในขณะที่ ซอฟต์แวร์เกมส์/ซีพีแอลอีเอ็กซ์มีค่า 341,483,465.96 บาทเช่นกัน ดังนั้นการคำนวณด้วย ซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์นั้นให้ค่าคำตอบเหมาะสมเช่นเดียวกับ ซอฟต์แวร์เกมส์/ซีพีแอลอีเอ็กซ์

4.5 เปรียบเทียบผลการคำนวณแบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC และนโยบายสั่งซื้อของบริษัทกรณีศึกษา (MI-ULS-AMC)

การคำนวณจำนวนเร็กได้สวมผ้าใช้งาน และผลรวมต้นทุนผ้า ต้นทุนสั่งซื้อ และต้นทุนจัดเก็บผ้า เกิดจากนโยบายการสั่งซื้อของบริษัทกรณีศึกษา นำแบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC เป็นต้นแบบ โดยไม่พิจารณาสมการที่ (20)–(22) ทำให้มีพื้นที่จัดเก็บผ้าไม่จำกัด ปรับเป็นแบบจำลอง MI-ULS-AMC จากนั้นคำนวณด้วย ซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์ และเกมส์/ซีพีแอลอีเอ็กซ์ แล้วนำข้อมูลที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแบบจำลองในหัวข้อ 4.4 ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลการคำนวณแบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC และ MI-ULS-AMC

	แบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC		แบบจำลอง MI-ULS-AMC (นโยบายสั่งซื้อของบริษัทกรณีศึกษา)	
	Excel OpenSolver	GAMS/CPLEX	Excel OpenSolver	GAMS/CPLEX
คำตอบขอบเขตล่าง (บาท)	341,296,561.78	341,296,226.51	340,515,657.26	340,515,657.26
คำตอบดีที่สุด (บาท)	341,483,465.96	341,483,465.96	340,597,340.20	340,594,678.0
ร้อยละความแตกต่างของคำตอบที่ดีที่สุด	-		0.00078	
จำนวนครั้งสั่งซื้อ	70	70	25	24
ต้นทุนสั่งซื้อ (บาท)	313,474	313,474	111,955	107,476.8
ต้นทุนจัดเก็บ (บาท)	6,691.96	6,691.96	110,685.20	111,933.7
จำนวนเร็กได้สวมผ้าสูงสุดที่ยอมรับได้	132	132	367.83	428.33

ต้นทุนรวมจากแบบจำลอง MI-ULS-AMC คือ 340,597,340.20 บาท และ 340,594,678.0 ด้วยซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์ และซอฟต์แวร์เกมส์/ซีพีแอลอีเอ็กซ์ตามลำดับ คำตอบที่ได้จากซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลสูงกว่าเพียงร้อยละ 0.00078 ดังนั้นคำตอบที่ได้จากซอฟต์แวร์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซลโอเพนโซลเวอร์ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสม

การเปรียบเทียบผลการคำนวณแบบจำลอง พบว่าต้นทุนรวมของนโยบายการสั่งซื้อบริษัทกรณีศึกษา (แบบจำลอง MI-ULS-AML) ยังคงมีต้นทุนต่ำกว่าแบบจำลองของผู้วิจัย (MI-ULS-SCL-AML) เท่ากับ 886,125.7 บาท หรือร้อยละ 0.26 เนื่องจากบริษัทสั่งซื้อม้วนผ้าเพียง 25 ครั้ง ต้นทุนสั่งซื้อ 111,955 บาท แต่ต้นทุนจัดเก็บเพิ่มเป็น 110,685.20 บาท ในขณะที่การสั่งซื้อตามแบบจำลอง MI-ULS-SCL-AMC ทำให้เกิดการสั่งซื้อถึง 70 ครั้ง ส่งผลให้ต้นทุนการสั่งซื้อสูงขึ้นเป็น 313,474 บาท ในขณะที่ต้นทุนจัดเก็บม้วนผ้าเพียง 6,691.96 บาท อย่างไรก็ตามการบริหารงานในอุตสาหกรรมนั้นต้องพิจารณาถึงการจัดเก็บม้วนผ้าในพื้นที่จัดเก็บด้วย ถ้าสั่งซื้อและจัดเก็บม้วนผ้าจำนวนมากพื้นที่จัดเก็บสินค้าไม่เพียงพอในช่วงเวลาใด ๆ หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ต้องจัดพื้นที่ในสายการผลิตส่งผลให้พื้นที่วางสินค้าระหว่างการผลิตลดลง ทำให้เกิดความยากลำบากในการเคลื่อนย้ายสินค้าในพื้นที่สายการผลิต รวมทั้งเกิดปัญหาการบริหารงานคลังสินค้า เช่น จำนวนเบิก-จ่ายม้วนผ้าไม่ถูกต้อง การนับจำนวนและชนิดม้วนผ้าผิดพลาด รวมทั้งม้วนผ้าสูญหายได้ เมื่อคลังม้วนผ้ามีพื้นที่จัดเก็บได้เพียง 132 แร็ค นโยบายการสั่งซื้อของบริษัททำให้ต้องจัดเตรียมพื้นที่จัดเก็บแร็คใส่ม้วนผ้าสูงสุดถึง 368.83 แร็ค หรือ เพิ่มขึ้นถึง 236.83 แร็ค ดังนั้นงานวิจัยจึงนำเสนอแบบจำลองเพื่อคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมโดยพิจารณาพื้นที่จัดเก็บมีจำกัด เพื่อจัดเตรียมแร็คใส่ม้วนผ้าแต่ละชนิดผ้าให้จัดเก็บในคลังม้วนผ้าได้ทั้งหมดทุกช่วงเวลา ไม่มีแร็คที่ต้องจัดเก็บในพื้นที่สายการผลิต แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะมีม้วนผ้าเศษเหลือส่งคืนมายังคลังม้วนผ้า ทำให้ต้องมีแร็คใส่ม้วนเศษผ้าดังกล่าวด้วย

5. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมคำนวณจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าใช้งานในแต่ละช่วงเวลาและต้นทุนรวมประกอบด้วยต้นทุนม้วนผ้า ต้นทุนสั่งซื้อ และต้นทุนจัดเก็บ จากการสั่งซื้อม้วนผ้าหลายชนิดเมื่อพื้นที่จัดเก็บม้วนผ้ามีจำกัดสำหรับบริษัทผลิตเสื้อผ้า เปรียบเทียบกับจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าและต้นทุนรวมคำนวณจากแบบจำลองของนโยบายการสั่งซื้อม้วนผ้าของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งให้ความสำคัญเรื่องต้นทุนรวมเป็นสำคัญ ต้องจัดเตรียมพื้นที่จัดเก็บสูงสุดถึง 368 แร็ค หรือ 2.9 เท่าของจำนวนแร็คใส่ม้วนผ้าที่มีอยู่ในชั้นวางแร็ค ทำให้ต้องจัดเก็บแร็คส่วนเกินจำนวน 236 แร็คให้พื้นที่สายการผลิตแทน แม้ต้นทุนรวมของนโยบายการสั่งซื้อน้อยกว่าต้นทุนรวมจากการคำนวณแบบจำลองนำเสนอ (MI-ULS-SCL-AMC) ร้อยละ 0.26 โดยทางปฏิบัติแล้ว ฝ่ายบริหารย่อมคำนึงถึงการใช้ประโยชน์พื้นที่สายการผลิตอย่างเต็มที่เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่องค์กรมากที่สุด หลีกเลี่ยงการเก็บสต็อกม้วนผ้าจากการส่งมอบให้มากที่สุด จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าแบบจำลองของ Gutierrez และคณะ [10] ใช้ปริมาตรเป็นหน่วยในการจัดเก็บ ซึ่งปรับเป็นแบบจำลองนำเสนอ โดยเปลี่ยนจากหน่วยปริมาตรเป็นหน่วยจัดเก็บเป็นแร็คใส่ม้วนผ้า ดังนั้นแบบจำลองนำเสนอจึงมีความถูกต้องเช่นเดียวกับแบบจำลองของ Gutierrez และคณะ [10]

แม้ว่าการกำหนดจำนวนพื้นที่จัดเก็บไม่เกินพื้นที่คลังม้วนผ้าที่มีอยู่ ในภาคปฏิบัติจริงแล้ว ในบางเดือนผู้ผลิตม้วนผ้าในต่างประเทศจะลดราคาม้วนผ้าเพื่อระบายสต็อกสินค้า ทำให้ทางบริษัทจำเป็นต้องสั่งซื้อม้วนผ้าเพื่อลดต้นทุนรวมแม้ว่าจะเกิดปัญหาการบริหารคลังสินค้าแบบจำลองนี้มีข้อจำกัดในการนำข้อมูลความต้องการวัตถุดิบซึ่งเป็นการคาดการณ์ในปัจจุบัน แต่จะนำไปใช้ในอนาคต ทำให้มีโอกาสเกิดความต้องการวัตถุดิบไม่แน่นอนได้ ส่งผลให้การคำนวณการสั่งซื้อด้วยแบบจำลองนี้ไม่ตรงตามความต้องการ

งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้จัดเก็บวัตถุดิบหลายชนิดในภาคอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ

เช่น วัตถุดิบมีอายุจัดเก็บสั้น ได้แก่ นมสด ขนมันปิ้ง สารเคมี เป็นต้น เพื่อวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบ การเก็บรักษา ไม่เกิดปัญหาสินค้าหมดอายุก่อนและระหว่างการผลิตได้ รวมทั้งแบบจำลองเพื่อวางแผนการสั่งซื้อวัตถุดิบและวางแผนการผลิตรวมในกรณีพื้นที่จัดเก็บวัตถุดิบและสินค้าสำเร็จรูปมีจำกัด

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. M. Wagner and T. M. Whitin, "Dynamic Version of the Economic Lot Size Model," *Management Science*, vol. 5, no. 1, pp. 89–96, 1958, doi: 10.1287/mnsc.5.1.89.
- [2] S. F. Love, "Bounded Production and Inventory Models with Piecewise Concave Costs," *Management Science*, vol. 20, no. 3, pp. 313–318, 1973, doi: 10.1287/mnsc.20.3.313.
- [3] Y. Pochet and L.A. Wolsey, "Lot-sizing with Constant Batches: Formulation and Valid Inequalities," *Mathematics of Operations Research*, vol. 18, no. 4, pp. 767–785, 1993, doi: 10.1287/moor.18.4.767.
- [4] E. Toczyłowski, "An $O(T/\sup 2/)$ algorithm for the lot-sizing problem with limited inventory levels," in *Proc. 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'95)*, Paris, France, Oct. 10–13, 1995, pp. 78–85, doi: 10.1109/ETFA.1995.496709.
- [5] M. Loparic, Y. Pochet and L.A. Wolsey, "The Uncapacitated Lot-sizing Problem with Sales and Safety stocks," *Mathematical Programming*, vol. 89, pp. 487–504, 2001, doi: 10.1007/PL00011411.
- [6] M. V. Vyve and F. Ortega, "Lot-sizing with Fixed Charges on Stocks: the Convex Hull," *Discrete Optimization*, vol. 1, no. 2, pp. 189–203, 2004, doi: 10.1016/j.disopt.2004.07.001.
- [7] N. Absi and S. Kedad-Sidhoum, "The Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem With Safety Stocks and Demand Shortage Costs," *Computer & Operations Research*, vol. 36, no. 11, pp. 2926–2936, 2009, doi: 10.1016/j.cor.2009.01.007.
- [8] J. Krarup and O. Bilde, "Plant location, set covering and economic lot sizes: An $O(mn)$ -algorithm for structured problems," in *Numerische Methoden bei Optimierungsaufgaben Band 3*, L. Collatz, G. Meinardus and W. Wetterling eds., Basel, Switzerland: Springer Basel AG, 1997, ch. 10, pp. 155–180, 1977.
- [9] H. -C. Hwang and W. V. D. Heuvel, "Improved Algorithms for a Lot-sizing Problem with Inventory Bounds and Backlogging," *Naval Research Logistics*, vol. 59, no. 3–4, pp. 244–253, 2012, doi: 10.1002/nav.21485.
- [10] J. Gutierrez, M. Colebrook, B. Abdul-Jalbar and J. Sicilia, "Effective Replenishment Policies for the Multi-item Dynamic Lot-sizing Problem with Storage capacities," *Computers & Operational Research*, vol. 40, no. 12, pp. 2844–2851, 2013, doi: 10.1016/j.cor.2013.06.007.
- [11] A. Akbalik, B. Penz and C. Rapine, "Multi-item uncapacitated lot sizing problem with inventory bounds," *Optimization Letters*, vol. 9, pp. 143–154, 2015, doi: 10.1007/s11590-014-0746-6.
- [12] R. A. Melo and C. C. Riberio, "Formulations and heuristics for the multi-item uncapacitated lot-sizing problem with inventory bounds," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 2, pp. 576–592, 2016, doi: 10.1080/00207543.2016.1215567.

-
- [13] K. Phabul, V. Punyangarm and N. Chumrit, "Dynamic lot sizing model: a case study of inventory for paddy in rice mill," in *IE Network Conference 2012*, Phetchaburi, Thailand, Oct. 17–19, 2012, pp. 1899–1904
- [14] N. Chaimongkol, S. Supapa and P. Yanpirat, "Application of integer programming for aggregate production planning in the production and purchase of vaccines," *Thai Journal of Operations Research*, vol. 10, no. 2, pp. 35–43, 2022.
- [15] S. Poolbun and W. Wongmanee, "Imported raw material procurement (tin free steel in coil) relates to storage capacity and production planning: A case study AAA company" in *5th National Conference (Graduate School Conference 2023)*, Bangkok, Thailand, Apr. 3, 2023, pp. 220–226.
- [16] W. Boonphakdee and P. Charnsethikul, "Column Generation Approach for Solving Uncapacitated Dynamic Lot-sizing Problems with Time-varying Cost," *International Journal of Mathematics in Operational Research*, vol. 23, no. 1, pp. 55–75, 2022, doi: 10.1504/IJMOR.2022.126051.
- [17] J. -C. Lange, "Design and Management of Networks with Fixed Transportation Costs for the Reverse Flows of Reusable Package," Ph.D. dissertation, Dept. Sci. Econ., Univ. Catholique de Louvain, Belgium, 2010.