การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดลำดับงาน: กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์

ปัญจรัศม์ แพทย์โท[1] และ เสาวนิตย์ เลขวัต[*2]
คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

Received: 8 July 2021; Revised: 20 September 2021; Accepted: 6 October 2021

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดลำดับงานของโรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์แห่งหนึ่ง เพื่อลดระยะเวลาการปฏิบัติงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าต่อการจัดส่งผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า โดยงานวิจัยนี้ใช้ Solver ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ประเภท Add-in ในโปรแกรม Microsoft excel เป็นเครื่องมือสำหรับช่วยผู้ตัดสินใจในการตัดสินใจ และทำการเปรียบเทียบกับวิธีการจัดลำดับการผลิตในปัจจุบันด้วยวิธีฮิวริสติก (Heuristics) ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สามารถลดเวลาในการผลิตทั้งหมดในเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2564 ได้ 73.99 ชั่วโมงหรือประมาณ 3 วันหรือคิดเป็นร้อยละ 11.32 และสามารถลดเวลาในการผลิตทั้งหมดในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 ได้ 21.72 ชั่วโมงหรือประมาณ 1 วันหรือคิดเป็นร้อยละ 2.83

คำสำคัญ: การจัดลำดับการผลิต, ฮิวริสติกส์, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

* Corresponding author. E-mail: saowanit.le@go.buu.ac.th
[1] นิสิตปริญญาโท ภาควิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[2] อาจารย์ ภาควิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Applying Mathematical Modelling for Job Shop Scheduling Problem: A Case Study of Automotive Part Factory

Panjarat Phaettho[1] and Saowanit Lekhavat[*2]

Burapha University, Amphoe Mueang, Chonburi 20131, Thailand

Received: 8 July 2021; Revised: 20 September 2021; Accepted: 6 October 2021

Abstract

The aim of this study is to apply mathematically modelling for job shop scheduling problem to one of the automotive part factories in order to reduce inefficient processing time. This may lead to delay in transporting the products to the customers. This research applies Solver which is an Add-in tool in Microsoft Excel in helping a decision maker in making a decision. Then, the comparison has been made with the heuristic current method. The results show that the mathematically modelling can decrease total working time (makespan) 73.99 hours or about 3 days which can be considered 11.32% in May 2021 and the total working time can be decreased 21.72 hours or approximately 1 day (2.83%) in July 2021.

Keywords: job shop scheduling, heuristics, mathematical model

* Corresponding author. E-mail: saowanit.le@go.buu.ac.th

1 Master student in Faculty of Logistics, Burapha University

2 Lecturer in Faculty of Logistics, Burapha University

1. บทนำ

สถานการณ์การแพร่ระบาดของโควิด 19 ได้ส่งผลกระทบอย่างรวดเร็วและรุนแรงต่อเศรษฐกิจทั่วโลก โดยเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านการนำเข้าวัตถุดิบและส่งออกสินค้าซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่มีผลกระทบต่อการผลิต จึงทำให้บางบริษัทชั้นนำระดับโลกที่มีเครือข่ายบริษัทตามภูมิภาคต่าง ๆ ได้ทำการกระจายความต้องการของลูกค้าไปยังบริษัทลูกเพื่อให้ทำการผลิตสินค้าชนิดเดียวกันเพื่อส่งให้กับลูกค้าให้ได้ตามความต้องการ ความท้าทายในการบริหารจัดการในการรองรับปริมาณการผลิตที่มากขึ้น ทางบริษัทจะต้องเริ่มพิจารณาจากปริมาณการผลิตและความสามารถหรือกำลังในการผลิตสินค้า เพื่อจะได้ทำการจัดเตรียมในด้านของทรัพยากรที่ต้องการ ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำเอากรณีตัวอย่างของโรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์แห่งหนึ่งมาทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการการจัดตารางการผลิต เนื่องจากในปัจจุบันการจัดตารางการผลิตเป็นกระบวนการที่ทำโดยใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเท่านั้น จึงทำให้การจัดตารางการผลิตอาจยังไม่เหมาะสมซึ่งอาจส่งผลกระทบกับค่าใช้จ่ายในการทำงานล่วงเวลาที่มากเกินไป และไม่มีการจัดสมดุลของเครื่องจักรจึงอาจทำให้เครื่องจักรบางเครื่องถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ มีการหยุดรอ เนื่องจากการจัดลำดับงานไม่เหมาะสม งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองเชิงเส้นมาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิต โดยจะใช้เทคนิควิธีคิดแบบการจัดลำดับงาน (Job shop scheduling) มาปรับใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อวิเคราะห์หาคำตอบและผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยเทียบกับวิธีการทำงานแบบฮิวริสติกในปัจจุบัน

2. แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการวางแผนและควบคุมการผลิต

ในการตัดสินใจเกี่ยวกับการวางแผนและควบคุมการผลิต ผู้บริหารจะต้องค้นหาคำตอบจากคำถามที่เป็นต้นเหตุพื้นฐานของความมีประสิทธิภาพหรือไม่มีประสิทธิภาพ 2 ประการ ได้แก่ เราควรทำอะไรต่อไปและเรามีขีดความสามารถที่จะทำมันได้หรือไม่ การวางแผนการผลิตจะต้องมาก่อนการวางแผนกำลังการผลิต ซึ่งก็คือการวางแผนลำดับความสำคัญของการทำงานและตามด้วยการวางแผนกำลังการผลิต หลังจากนั้นเป็นการควบคุมกิจกรรมการผลิตชิ้นส่วน และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เสร็จตามเป้าหมายและเวลาที่วางไว้ตามแผน[13]

2.2 การผลิตแบบตามงาน (Job shop)

การผลิตแบบตามงาน (Job shop) ระบบนี้ประกอบด้วย m เครื่องจักร แต่ละงานจะมีเส้นทางการไหลของงานเฉพาะของตนเองตามที่ผู้วางแผนกระบวนการกำหนดให้เท่านั้น โดยมากเส้นทางการไหลของงานจะไม่ซ้ำแบบกัน และเครื่องจักรเริ่มต้นและเครื่องจักรสุดท้ายที่แต่ละงานต้องใช้ทำงานก็ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน แบบจำลองที่ง่ายที่สุดของระบบผลิตแบบตามงานคือ การที่แต่ละงานสามารถที่จะทำการดำเนินงานบนเครื่องจักรใดๆ ก็ตามที่อยู่บนเส้นทางงานของตนได้เพียงแค่หนึ่งครั้งเท่านั้น สำหรับแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้นก็อาจจะเพิ่มเงื่อนไขว่า งานสามารถที่จะกลับมาทำซ้ำที่เครื่องจักรเดิมได้อีกหลายครั้งบนเส้นทางที่กำหนดให้ และเรียกการทำงานแบบนี้ว่า “การเวียนซ้ำ (Recirculation)” [12]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ และ ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ [1] ได้มีการประยุกต์ใช้การสร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม ซึ่งสามารถลดต้นทุนในส่วนของค่าใช้จ่ายในการดำเนินการได้ร้อยละ 14.81

ธีรวัฒย์ คำพรมมี, สุทธิพงษ์ ครุฑพาหะ, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย, สุกฤษฎิ์ เพชรสวัสดิ์ และ ธัชชัย เทพกรณ์ [2] ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิต โดยสามารถลดการใช้งานเครื่องจักรโดยไม่จำเป็นได้ถึงร้อยละ 29 และสามารถลดเวลาปิดงานรวมจากตารางการผลิตแบบเดิมได้ร้อยละ 36.48

นมิดา ศรีผล [3] ได้พัฒนาเครื่องมือเพื่อช่วย ในการจัดลำดับงานโดยใช้หลักการการจัดตามกำหนดการส่งมอบ (EDD) และใช้หลักการดำเนินการมากเข้าดำเนินการก่อน (LPT) จัดลำดับงานของทั้งเครื่องจักรเดียวและเครื่องจักรแบบขนาน โดยสามารถลดการเกิดความล่าช้าลงได้ร้อยละ 22 และเวลาการผลิตรวมลดลง 8.79 วัน สามารถลด

ระยะเวลาล่าช้าสูงสุดได้ 3 วัน และอรรถประโยชน์ของการใช้เครื่องจักรเพิ่มมากขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 11.5

เพชรายุทธ แซ่หลี และ อภิชัย ฤตวิรุฬห์ [4] ได้สร้างแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการวางแผนแรงงานสำหรับการผลิต ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายรายเดือนลงได้ 273,090 บาท หรือร้อยละ 8.08

สุริยะ เปียอยู่ และ สิรวิชญ์ สว่างนพ [5] ได้ประยุกต์ใช้การจัดตารางแบบถอยหลัง (Backward scheduling) และกฎการจ่ายงานแบบ (EDD) ในการจัดตารางการผลิตและใช้ VBA ซึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งในโปรแกรม Microsoft excel สำหรับการสร้างระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิต ซึ่งผลลัพธ์สามารถลดเวลาได้ถึงร้อยละ 90

Bülbül and Kaminsky [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีการทั่วไปเพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางงาน ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นโปรแกรมเชิงเส้น เพื่อแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด

Fattahi, Jolai and Arkat [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการจัดตารางงานด้วยวิธีการเขียนโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (MILP) ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถหาคำตอบที่มีคุณภาพสำหรับปัญหาการจัดตารางงานที่มีความยืดหยุ่นซึ่งมีการทำงานซ้ำซ้อนกันในเวลาอันสั้น

Frihat, Hadj-Alouane and Sadfi [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการจัดตารางการผลิต โดยใช้ แบบจำลองเชิงเส้นแบบผสม(MILP) และการเขียนโปรแกรมข้อจำกัด (CP) การทดลองเชิงตัวเลขจะดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบการจัดหาคำตอบเริ่มต้นที่เป็นไปได้สำหรับโมเดล MILP โดยใช้แบบจำลอง CP ซึ่งผลลัพธ์มีแนวโน้มในการลดเวลาคำนวณ

Meng, Zhang, Ren, Zhang, and Lv [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาการจัดตารางงานแบบยืดหยุ่นด้วยการใช้เวลาเสร็จสิ้นสูงสุดให้น้อยที่สุด ด้วยการเขียนโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (MILP) 4 รูปแบบ เพื่อทำการเปรียบเทียบ จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองการเขียนโปรแกรมข้อจำกัด (CP) มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่มีอยู่ทั้งหมด

Kuo-Ching Yinga, Shih-Wei Lin [10] ได้เสนออัลกอลิธึมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางงาน โดยคำนึงถึง makespan โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ทางคอมพิวเตอร์กับอัลกอริธึม meta-heuristic ที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ผลการทดลองระบุว่ามีประสิทธิภาพเหนือกว่า HABC อย่างมีนัยสำคัญ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดลำดับงาน

การศึกษาการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาช่วยในการจัดลำดับงาน โดยนำแบบบจำลองของ Kuo-Ching Yinga, Shih-Wei Lin [10] มาประยุกต์ใช้ โดยสามารถทำได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 กำหนดตัวแปรรับเข้า (Input data หรือ Parameter) และดัชนี (Index) ได้ดังนี้

p_{jk} คือเวลาปฏิบัติงานของผลิตภัณฑ์ j (ชั่วโมง) บนเครื่องจักร k

$\{O_{j1}, O_{j2}, ..., O_{jnj}\}$ คือแต่ละผลิตภัณฑ์ j มีกระบวนการผลิตเป็นของตนเอง

โดยที่

j คือ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต ($j \in J$)

j' คือ ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตหลังจากผลิตภัณฑ์ j ที่เครื่องจักร k ($j' \in J$)

k คือ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ($k \in K$)

n_j คือ จำนวนกระบวนการผลิตทั้งหมดสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ j ซึ่งในกรณีศึกษานี้ $n_j = 2$ สำหรับทุกผลิตภัณฑ์ j

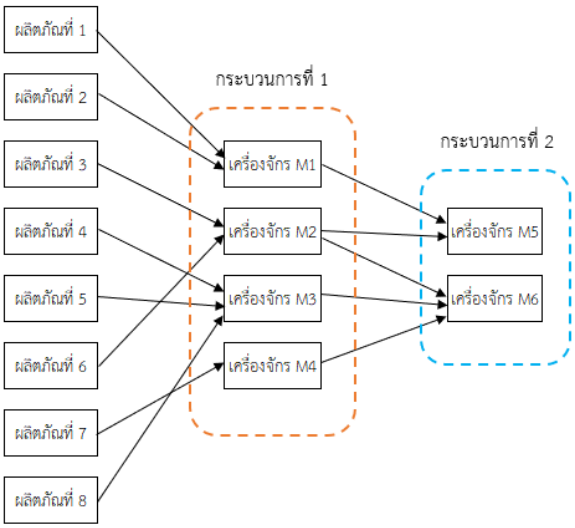
M เป็นค่าคงที่ ที่มีค่ามากและเป็นจำนวนจริงบวกในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดค่า M = 100,000

กำหนดเวลาในการปฏิบัติงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ต่อเครื่องจักร (p_{jk}) และกำหนดลำดับงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยจะมีทั้งหมด 2 กระบวนการ (Process) ต่อ 1 ผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาการทำงานของแต่ละกระบวนการของแต่ละเครื่องจักร

ผลิตภัณฑ์	กระบวนการ	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เครื่องจักร
1	1	231.48	M1
	2	231.48	M5
2	1	115.74	M1
	2	115.74	M5
3	1	216.05	M2
	2	108.02	M5
4	1	94.04	M3
	2	94.04	M6
5	1	44.37	M3
	2	44.37	M6
6	1	97.92	M2
	2	97.92	M6
7	1	324.07	M4
	2	162.04	M6
8	1	129.24	M3
	2	51.7	M6

กระบวนการไหลของผลิตภัณฑ์จะเริ่มจากการป้อนผลิตภัณฑ์ผ่านไปยังกระบวนการที่ 1 คือกระบวนการชุบผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะใช้เครื่องจักร M1-M4 หลังจากเสร็จจากกระบวนการที่ 1 ผลิตภัณฑ์จะถูกป้อนไปยังกระบวนการที่ 2 คือกระบวนการทำผลิตภัณฑ์ให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงซึ่งจะใช้เครื่องจักร M5-M6 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการไหลของผลิตภัณฑ์

3.1.2 กำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ดังนี้

x_{jk} คือ เวลาเริ่มต้นทำงานผลิตภัณฑ์ j ที่เครื่องจักร k

$y_{jj'k}$ คือการเลือกลำดับงานของผลิตภัณฑ์ j หรือ j' ที่ทำงานที่เครื่องจักร k

โดยที่

$y_{jj'k}$ = 1 ถ้างาน j นำหน้างาน j' บนเครื่องจักร k

= 0 ถ้างาน j' นำหน้างาน j บนเครื่องจักร k

3.1.3 กำหนดสมการเป้าหมาย (Objective Function) โดยต้องการเวลาในการสิ้นสุดการทำงานให้มีค่าน้อยที่สุด จึงเขียนสมการเป้าหมายดังสมการที่ (1) [10]

$$Min \max_{j \in J} \{x_{jn_j} + p_{jn_j}\} \quad (1)$$

3.1.4 ข้อจำกัด (Constraints) ในด้านของเวลาเริ่มงานของแต่ละ Job ในแต่ละเครื่องจักร k ดังสมการที่ (2)

$$x_{jk} + p_{jk} \leq x_{jk+1} \; ; \forall k = 1, 2, \ldots, n_j - 1, j \in J \quad (2)$$

3.1.5 กำหนดข้อจำกัด (Constraints) ในด้านการลำดับงาน โดยกำหนดให้ ดังสมการที่ (3) และ (4) และสมการที่ (5) และ (6) เป็นการทำหนดค่าความเป็นไปได้ของทุกค่าเริ่มต้นทำงานของผลิตภัณฑ์ และค่า y ตามลำดับ

$$x_{jk} + p_{jk} \leq x_{j'k} + M(1 - y_{jj'k}) \; ; \forall j, j' \in J, k \in K \quad (3)$$

$$x_{j'k} + p_{j'k} \leq x_{jk} + My_{jj'k} \; ; \forall j, j' \in J, k \in K \quad (4)$$

$$x_{jk} \geq 0, k = 1, 2, \ldots, n_j, j \in J \quad (5)$$

$$y_{jj'k} \in \{0,1\} \; ; \forall j, j' \in J, k \in K \quad (6)$$

3.2 วิธีการทาง Heuristics สำหรับการจัดลำดับงาน

ผู้วิจัยได้นำเอาข้อมูลการวางแผนการผลิตในเดือน

พฤษภาคม พ.ศ. 2564 มาใช้ในการศึกษานี้ โดยการศึกษานี้จะเป็นการศึกษากระบวนการผลิต 2 กระบวนการคือ การชุบเคลือบผิวผลิตภัณฑ์และการทำผลิตภัณฑ์ให้แห้งด้วยอุณหภูมิสูง โดยเจ้าหน้าที่วางแผนการผลิตจะนำเอาข้อมูลความต้องการของลูกค้า (Demand forecast) มาทำการจัดลำดับงาน ด้วยวิธีฮิวริสติกซึ่งข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการจัดลำดับงานจะมีรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการวางแผนการผลิตในเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2564

		กระบวนการที่ 1			กระบวนการที่ 2		
ผลิตภัณฑ์	แผนการผลิต (จำนวนการชุบ)	เวลาการผลิต/จำนวนการชุบ (วินาที)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เครื่องจักร	เวลาการผลิต/จำนวนการชุบ (วินาที)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เครื่องจักร
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	40,000	15	231.48	M1	15	231.48	M5
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	50,000	6	115.74	M1	6	115.74	M5
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	28,000	20	216.05	M2	10	108.02	M5
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	9,750	25	94.04	M3	25	94.04	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	5,000	23	44.37	M3	23	44.37	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	14,100	18	97.92	M2	18	97.92	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	42,000	20	324.07	M4	10	162.04	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	13,400	25	129.24	M3	10	51.7	M6

จากตารางที่ 2 เราจะได้ข้อมูลปริมาณที่ต้องการในการผลิต, เวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์และเวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละเครื่องจักร ซึ่งในการคำนวณเวลาในการผลิตของเครื่องจักรแต่ละเครื่องจะต้องคิดจากเวลาในการผลิต (Cycle time) ต่อการชุบ 1 ครั้ง หน่วยเป็นวินาที และคิดจากประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness : OEE) ที่ร้อยละ 72 โดย process time จะสามารถคิดได้จาก (cycle time x production plan)/ OEE ผู้วางแผนการผลิตจะนำเอาข้อมูลต่างๆ มาจัดตารางการผลิต สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีฮิวริสติก (heuristics) 4 รูปแบบดังนี้

3.2.1 จัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4 โดยเริ่มพิจารณาจากเครื่องจักร M1 ที่ถูกกำหนดให้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ 1 และผลิตภัณฑ์ที่ 2 โดยผลิตภัณฑ์ที่ 2 จะใช้เวลาในการดำเนินงาน 115.74 ชั่วโมงซึ่งน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ 1 ที่ใช้เวลาในการดำเนินงาน 231.48 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นผลิตภัณฑ์ที่ 2 จะถูกเลือกให้ทำการผลิตก่อนที่เครื่องจักร M1 ทำการจัดลำดับงานในลักษณะนี้กับเครื่องจักร M2-M4 หลังจากนั้นให้พิจารณาเครื่องจักร M5 ซึ่งจะถูกกำหนดให้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่1, 2, 3 ซึ่งการจัดลำดับงานจะพิจารณาจากผลิตภัณฑ์ที่เสร็จจากกระบวนการที่ 1 ก่อน จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ 2 เสร็จจากกระบวนการที่ 1 เร็วที่สุดคือชั่วโมงที่ 115.74 และตามด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 3 ซึ่งเสร็จจากกระบวนการที่ 1 ในชั่วโมงที่ 313.97 และสุดท้ายคือผลิตภัณฑ์ที่ 1 ซึ่งเสร็จจากกระบวนการที่ 1 ในชั่วโมงที่ 347.22 ดังนี้การจัดลำดับงานของเครื่องจักร M5 จะเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่ 2, 3, 1 ตามลำดับ และทำการจัดลำดับงานแบบนี้ที่เครื่องจักร M6 จะได้ผลการจัดลำดับงานของเครื่องจักร M1-M6 ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M1	0.00	115.74	115.74
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M1	115.74	231.48	347.22
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M2	0.00	97.92	97.92
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M2	97.92	216.05	313.97
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M3	0.00	44.37	44.37
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M3	44.37	94.04	138.41
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M3	138.41	129.24	267.65
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M4	0.00	324.07	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M5	115.74	115.74	231.48
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M5	313.97	108.02	421.99
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M5	421.99	231.48	653.47
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M6	44.37	44.37	88.73
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M6	97.92	97.92	195.83
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M6	195.83	94.04	289.87
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M6	289.87	51.70	341.57
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M6	341.57	162.04	503.61

3.2.2 จัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4 โดยเริ่มจากกำหนดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตในแต่ละเครื่องจักรของ M1 – M4 โดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการดำเนินงานที่มากที่สุดก่อน จากนั้นทำการจัดลำดับงานของ

เครื่องจักร M5 และ M6 โดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จก่อนในกระบวนการที่ 1 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M1	0.00	231.48	231.48
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M1	231.48	115.74	347.22
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M2	0.00	216.05	216.05
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M2	216.05	97.92	313.97
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M3	0.00	129.24	129.24
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M3	129.24	94.04	223.28
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M3	223.28	44.37	267.65
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M4	0.00	324.07	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M5	216.05	108.02	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M5	324.07	231.48	555.56
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M5	555.56	115.74	671.30
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M6	129.24	51.70	180.94
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M6	223.28	94.04	317.32
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M6	317.32	44.37	361.69
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M6	361.69	97.92	459.61
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M6	459.61	162.04	621.64

3.2.3 จัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6 โดยเริ่มจากกำหนดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตที่เครื่องจักร M5 และ M6 โดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการดำเนินงานที่น้อยที่สุดก่อน จากนั้นทำการจัดลำดับงานของเครื่องจักร M1 – M4 ตามลำดับที่ได้กำหนดไว้ที่เครื่องจักร M5 และ M6 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5-M6

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M1	0.00	115.74	115.74
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M1	115.74	231.48	347.22
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M2	0.00	216.05	216.05
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M2	216.05	97.92	313.97
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M3	0.00	44.37	44.37

ตารางที่ 5 การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5-M6 (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M3	44.37	129.24	173.61
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M3	173.61	94.04	267.65
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M4	0.00	324.07	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M5	216.05	108.02	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M5	324.07	115.74	439.81
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M5	439.81	231.48	671.30
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M6	44.37	44.37	88.73
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M6	173.61	51.70	225.31
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M6	267.65	94.04	361.69
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M6	361.69	97.92	459.61
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M6	459.61	162.04	621.64

3.2.4 จัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6 โดยเริ่มจากกำหนดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตที่เครื่องจักร M5 และ M6 โดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการดำเนินงานที่มากที่สุดก่อน จากนั้นทำการจัดลำดับงานของเครื่องจักร M1 – M4 ตามลำดับที่ได้กำหนดไว้ที่เครื่องจักร M5 และ M6 ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M1	0.00	231.48	231.48
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M1	231.48	115.74	347.22
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M2	0.00	216.05	216.05
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M2	216.05	97.92	313.97
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M3	0.00	94.04	94.04
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M3	94.04	129.24	223.28

ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M3	223.28	44.37	267.65
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M4	0.00	324.07	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M5	231.48	231.48	462.96
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M5	462.96	115.74	578.70

ตารางที่ 6 การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มี เวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5-M6 (ต่อ)

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M5	578.70	108.02	686.73
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M6	324.07	162.04	486.11
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M6	486.11	97.92	584.03
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M6	584.03	94.04	678.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M6	678.07	51.70	729.76
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M6	729.76	44.37	774.13

4. ผลการวิจัย

ผลการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของกระบวนการจัดลำดับงานแบบฮิวริสติก เทียบกับผลลัพธ์จากการจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานในเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2564

เครื่องจักร	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
M1	347.22	347.22	347.22	347.22	347.48
M2	313.97	313.97	313.97	313.97	313.92
M3	267.65	267.65	267.65	267.65	267.24
M4	324.07	324.07	324.07	324.07	324.07
M5	653.47	671.30	671.30	686.73	579.48
M6	503.61	621.64	621.64	774.13	579.04
เวลาในการดำเนินงานที่มากที่สุด (ชั่วโมง)	653.47	671.30	671.30	774.13	579.48

จากตารางที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานของเดือน พฤษภาคม พ.ศ2564 โดยการนำผลลัพธ์ในการจัดลำดับงานโดยการใช้วิธีฮิวริสติก 4 รูปแบบ และการจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

รูปแบบที่ 1 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 653.47 ชั่วโมงหรือประมาณ 28 วัน

รูปแบบที่ 2 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4 ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 671.30 ชั่วโมงหรือประมาณ 28 วัน

รูปแบบที่ 3 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6 ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 671.30 ชั่วโมงหรือประมาณ 28 วัน

รูปแบบที่ 4 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6 ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 774.13 ชั่วโมงหรือประมาณ 33 วัน

รูปแบบที่ 5 : การจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 579.48 ชั่วโมงหรือประมาณ 25 วัน ซึ่งเป็นการจัดลำดับงานที่ใช้เวลาในการดำเนินงานน้อยที่สุดหลังจากที่ได้ผลลัพธ์ในการจัดตารางการผลิตในเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2564 แล้ว ทางผู้วิจัยจึงนำข้อมูลแผนการผลิตในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2564 ดังตารางที่ 8 มาจัดลำดับการผลิตโดยใช้วิธีฮิวริสติก 4 รูปแบบและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการวางแผนการผลิตในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2564

		กระบวนการที่ 1			กระบวนการที่ 2		
ผลิตภัณฑ์	แผนการผลิต (จำนวนการชุบ)	เวลาการผลิต/จำนวนการชุบ (วินาที)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เครื่องจักร	เวลาการผลิต/จำนวนการชุบ (วินาที)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เครื่องจักร
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	30,000	15	173.61	M1	15	173.61	M5
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	25,390	6	58.77	M1	6	58.77	M5
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	18,000	20	138.89	M2	10	69.44	M5
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	27,444	25	264.7	M3	25	264.7	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	5,923	23	52.55	M3	23	52.55	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	16,467	18	114.35	M2	18	114.35	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	35,100	20	270.83	M4	10	135.42	M6
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	19,140	25	184.61	M3	10	73.84	M6

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564

เครื่องจักร	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3	รูปแบบที่ 4	รูปแบบที่ 5
M1	232.38	232.38	232.38	232.38	263.77
M2	253.24	253.24	253.24	253.24	343.89
M3	501.86	501.86	501.86	501.86	501.61
M4	270.83	270.83	270.83	270.83	270.83
M5	475.44	440.72	496.30	475.44	711.44
M6	766.56	894.11	825.47	905.56	744.84
เวลาในการดำเนินงานที่มากที่สุด (ชั่วโมง)	766.56	894.11	825.47	905.56	**744.84**

จากตารางที่ 10 เป็นการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานของเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 โดยการนำผลลัพธ์ในการจัดลำดับงานโดยการใช้วิธีฮิวริสติก 4 รูปแบบ และการจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

รูปแบบที่ 1 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4 ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในปัจจุบันใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 766.56 ชั่วโมงหรือประมาณ 32 วัน

รูปแบบที่ 2 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M1 – M4 ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 894.11 ชั่วโมงหรือประมาณ 38 วัน

รูปแบบที่ 3 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานน้อยที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6 ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 825.47 ชั่วโมงหรือประมาณ 35 วัน

รูปแบบที่ 4 : การจัดลำดับงานโดยเริ่มจากผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานมากที่สุดสำหรับเครื่องจักร M5 และ M6 ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 905.56 ชั่วโมงหรือประมาณ 38 วัน

รูปแบบที่ 5 : การจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ใช้เวลาในการผลิตสูงสุด 744.84 ชั่วโมงหรือประมาณ 31 วัน ซึ่งเป็นการจัดลำดับงานที่ใช้เวลาน้อยที่สุด

เนื่องจากผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธีฮิวริสติกทั้ง 4 วิธี และวิธีจากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดลำดับงาน พบว่าแบบจำลองการทางคณิตศาสตร์ใช้ผลดีที่สุด เพราะฉะนั้น ตารางการจัดลำดับงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ในแต่ละเครื่องจักรได้ถูกนำเสนอเพื่อนำไปใช้งานสำหรับกรณีศึกษานี้ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ.2564

ผลิตภัณฑ์	เครื่องจักร	เวลาเริ่มงาน (ชั่วโมงที่)	เวลาในการดำเนินงาน (ชั่วโมง)	เวลาที่เสร็จงาน (ชั่วโมงที่)
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M1	0.00	115.74	115.74
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M1	116.00	231.48	347.48
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M2	0.00	216.05	216.05
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M2	216.00	97.92	313.92
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M3	0.00	94.04	94.04
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M3	94.00	44.37	138.37
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M3	138.00	129.24	267.24
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M4	0.00	324.07	324.07
ผลิตภัณฑ์ที่ 2	M5	124.00	115.74	239.74
ผลิตภัณฑ์ที่ 3	M5	239.00	108.02	347.02
ผลิตภัณฑ์ที่ 1	M5	348.00	231.48	579.48
ผลิตภัณฑ์ที่ 4	M6	123.00	94.04	217.04
ผลิตภัณฑ์ที่ 5	M6	223.00	44.37	267.37
ผลิตภัณฑ์ที่ 8	M6	268.00	51.70	319.70
ผลิตภัณฑ์ที่ 6	M6	320.00	97.92	417.92
ผลิตภัณฑ์ที่ 7	M6	417.00	162.04	579.04

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิธีการจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถลดเวลาในการดำเนินงานเมื่อเทียบกับวิธีการจัดลำดับงานในปัจจุบันได้ 73.99 ชั่วโมงหรือประมาณ 3 วัน หรือคิดเป็นร้อยละ 11.32 ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2564 และวิธีการจัดลำดับงานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถลดเวลาในการดำเนินงานเมื่อเทียบกับวิธีการจัดลำดับงานในปัจจุบันได้ 21.72 ชั่วโมงหรือประมาณ 1 วันหรือคิดเป็นร้อยละ 2.83 ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2564 นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลแผนการผลิตไปวาง

แผนการดำเนินงานในอนาคตได้อีกด้วยเพราะจะเห็นได้ว่าปริมาณการผลิตในเดือนกรกฎาคม พ.ศ.2564 มีมากกว่ากำลังการผลิต ดังนั้นทางบริษัทกรณีศึกษาจึงสามารถนำข้อมูลนี้ไปจัดเตรียมทรัพยากร เช่น การเพิ่มพนักงาน การเพิ่มเครื่องจักร เพื่อมาทำการรองรับปริมาณการผลิตที่มากขึ้น เป็นต้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการนำแบบจำลองการจัดลำดับงานที่มีอยู่แล้วไปใช้งาน ซึ่งมีข้อสมมติต่างๆ ในแบบจำลอง ในอนาคตถ้างานมีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น อาจพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น มีการกำหนด due date ในการจัดส่งสินค้าที่แน่นอน และมีการนำเอาเวลา setup time เข้ามาเกี่ยวข้องในกรณีที่เครื่องจักรต้องผลิตสินค้าที่มีความหลากหลาย เงื่อนไขในการทำงานล่วงเวลาและเงื่อนไขการหยุดของเครื่องจักร ควรนำเอาปัจจัยในเรื่องของค่าใช้จ่ายมาพิจารณาเพื่อแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนปัญหาของบริษัท อีกทั้งเพื่อเพิ่มความสมจริงของโมเดล ในกรณีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีตัวแปรตัดสินใจหลายตัว และถ้ามีการนำข้อมูลจำนวนมากมาใช้ อาจพัฒนาวิธีฮิวริสติก ที่มีความสามารถในการหาคำตอบได้ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด ภายในระยะเวลาที่มีอยู่อย่างจำกัด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ และ ประเทือง อุษาบริสุทธิ์, “การวางแผนการผลิตที่เหมาะสมของโรงงานเครื่องจักรกลการเกษตรเพื่อการผลิตอ้อยโดยใช้แบบจำลองเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ., ปีที่ 26, ฉบับที่ 2, น. 209-221, 2559

[2] ธีรวัฒย์ คำพรมมี, สุทธิพงษ์ ครุฑพาหะ, ณัฐพร ตั้งเจริญชัย, สุกฤษฎิ์ เพชรสวัสดิ์ และ ธัชชัย เทพกรณ์, “การแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีแบบจำลองกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ กรณีศึกษาสถานประกอบการผลิตชิ้นส่วนรถบรรทุกในจังหวัดพิษณุโลก,” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม., ปีที่ 1, ฉบับที่ 3, น. 47-66, 2562

[3] นมิดา ศรีผล, “การจัดตารางการผลิตเพื่อปรับปรุงปริมาณงานล่าช้า: กรณีศึกษา,” นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมศาสตร์), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2560

[4] เพชรายุทธ แซ่หลี และ อภิชัย ฤตวิรุฬห์, “แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสมสำหรับการวางแผนแรงงานในการผลิตขิงดอง,” วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร., ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, 2557

[5] สุริยะ เปียอยู่ และ สิรวิชญ์ สว่างนพ, “การออกแบบระบบสนับสนุนการวางแผนการผลิตโยเกิร์ต,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่., ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, น. 1-11, 2561

[6] Bülbül, K. and Kaminsky, “A linear programming-based method for job shop scheduling,” Journal of Scheduling., vol. 16, no. 2, pp. 161-183, 2012

[7] Fattahi, Jolai and Arkat, “Flexible job shop scheduling with overlapping in operations,” Applied Mathematical Modelling., vol. 33, no. 7, pp. 3076-3087, 2009

[8] Frihat, Hadj-Alouane and Sadfi, “Optimization of the Integrated Problem of Employee Timetabling and Job Shop Scheduling,” Computers & Operations Research., pp. 105332-105364, 2021

[9] Meng, Zhang, Ren, Zhang, and Lv, “Mixed-integer linear programming and constraint programming formulations for solving distributed flexible job shop scheduling problem,” Computers & Industrial Engineering., vol.142, pp.106347-106360, 2020

[10] Kuo-Ching Yinga and Shih-Wei Lin, “Solving no-wait job-shop scheduling problems using a multi-start simulated annealing with bi-directional shift timetabling algorithm,” Computers & Industrial Engineering., vol.146, 2020

[11] ณกร อินทร์พยุง, การแก้ปัญหาการตัดสินใจในอุตสาหกรรมการขนส่งและโลจิสติกส์, กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2548.

[12] ปารเมศ ชุติมา, เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

[13] พิภพ ลลิตาภรณ์, การวางแผนและควบคุมการผลิต, กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2556.
[14] พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์, กำหนดการเชิงเส้น Linear Programming, กรุงเทพมหานคร: แดเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น, 2560.
[15] ระพีพันธ์ ปิตาคะโส, วิธีการเมตาฮิวริสติก เพื่อแก้ไขปัญหาการวางแผนการผลิตและการจัดการโลจิสติกส์, กรุงเทพมหานคร: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2554.