

การจัดตารางการผลิตเครื่องจักรขนานในกระบวนการทดสอบวงจรรวม

ธนวัฒน์ วงศ์เครือ¹ และ วรวุฒิ หวังวัชรกุล^{*2}

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Received: 26 April 2021; Revised: 10 May 2021; Accepted: 18 May 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดตารางการผลิตสำหรับกระบวนการผลิตของเครื่องจักรแบบขนาน เพื่อปรับลดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ทำงานให้เหมาะสม และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการใช้เครื่องจักร (Machine Utilization) ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยการใช้โปรแกรม Solver ใน Microsoft Excel เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม และวิธีการจัดตารางการผลิตแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน (Hybrid Heuristic) ด้วยหลักการ Earliest Due Date (EDD) และ Longest Processing Time (LPT) เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดตารางการผลิตแบบปัจจุบัน ซึ่งวัตถุประสงค์คือ การลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานล่าช้าทั้งหมด (Total Tardiness) ลดเวลาเสร็จรวมของงานที่เสร็จก่อนกำหนด (Total Earliness) และการลดต้นทุนรวมของระบบ (Total System Cost) ผลการวิจัยจากการเปรียบเทียบกับจำนวนงานทั้งหมด 575 งาน ในการจัดตารางการผลิต 4 สัปดาห์ คำตอบที่ได้จากวิธีการจัดตารางการผลิตจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้คำตอบได้ดีที่สุด และมีดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการลดต้นทุนโดยรวมของระบบเฉลี่ยลดลง 13.43 เปอร์เซ็นต์ เวลารวมที่งานเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดลดลง 24.63 เปอร์เซ็นต์ และเวลารวมที่งานเสร็จก่อนกำหนดลดลง 10.35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน

คำสำคัญ: การจัดตารางการผลิต, เครื่องจักรขนาน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ฮิวริสติกส์

* Corresponding author. E-mail: thanawat.wongkr@ku.th

¹ โครงการปริญญาโท ภาคพิเศษ สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

Parallel Machine Scheduling in the Integrated Circuits Testing Process

Thanawat Wongkrue¹ and Worawut Wangwatcharakul ^{*2}

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,
Bangkok 10900, Thailand

Received: 26 April 2021; Revised: 10 May 2021; Accepted: 18 May 2021

Abstract

This research studied the Parallel Machine Scheduling in the Integrated Circuits Testing Process to minimize the number of machines in process and improved machine utilization. Two research methods were applied in this research. The first method was to create the production scheduling by Mathematical Model and using Solver program in Microsoft Excel to find out the optimal solution. The second one was created by Hybrid Heuristic, EDD+LPT rules. The solutions obtained from the Mathematical Model and Hybrid Heuristic were compared with the efficiency index of the current scheduling in order to reduce total tardiness, total Earliness and Total system cost. From the result of 575 jobs, 4 weeks. The efficiency index of total system cost was reduced around 13.43 percent and total tardiness/earliness were reduced by 24.63 percent and 10.35 percent respectively.

Keywords: scheduling, parallel machine, mathematical model, heuristic

* Corresponding author. E-mail: thanawat.wongkr@ku.th

1 Graduate Program in Engineering Management, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

2 Assistant Professor in Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยมีส่วนสำคัญในด้านการผลักดันการเติบโตทางด้านเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ทางด้านวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมทางด้านวงจรรวมในไทยยังไม่มีการผลิตเวเฟอร์วงจรรวม (Wafer) ในเชิงพาณิชย์แต่อย่างใด โดยจะเป็นการนำเข้าของแผ่นเวเฟอร์ ผ่านกระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรวมแต่ละตัวบนแผ่นเวเฟอร์ (Wafer Test) เพื่อแยกงานดีและงานเสีย ก่อนนำแผ่นเวเฟอร์เข้ากระบวนการประกอบ (Assembly Process) เพื่อประกอบจากวงจรรวมแต่ละตัวในแผ่นเวเฟอร์เป็นตัวผลิตภัณฑ์วงจรรวม หลังจากนั้นตัวผลิตภัณฑ์จะถูกทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าอีกครั้งในขั้นตอนสุดท้าย (Final Test) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการทำงานของผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้ และทำการบรรจุภัณฑ์ (Packing Process) ส่งให้ลูกค้า

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการแข่งขันในด้านอุตสาหกรรมในปัจจุบัน จำเป็นต้องมีวิธีการปรับปรุงระบบหรือกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดข้อได้เปรียบทางการแข่งขัน การจัดการการผลิต (Scheduling) จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับระบบการผลิต ซึ่งอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในระบบการผลิตทั้งหมด

จากปัญหาความซับซ้อนของการจัดการการผลิตดังกล่าว กระบวนการทดสอบ Final test จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับการผลิตเป็นอย่างมากเนื่องจากมีความหลากหลายในเรื่องของปัจจัยจากจำนวนงานในแต่ละ Lot เวลาในกระบวนการของงาน (Processing time: P_i) และเวลาครบกำหนดส่งมอบที่จำกัด (Due date: D_i) ที่แตกต่างกัน รวมถึงข้อจำกัดของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้การวางแผนการจัดการการผลิตแบบปัจจุบันหลีกเลี่ยงปัญหาซับซ้อนดังกล่าว ด้วยการเปิดเครื่องจักรทั้งหมดในกระบวนการ และมีวิธีการจัดลำดับงานจากงานที่แล้วเสร็จจากกระบวนการประกอบ (Assembly) มาถึงกระบวนการที่รอการทดสอบ (Work in Process: WIP) เป็นลำดับแรก ให้เป็นงานลำดับแรกในกระบวนการทดสอบ และงานที่มาถึง WIP หลังจากนั้น เป็นลำดับงานที่รอการทดสอบลำดับถัดไป โดยพิจารณาสถานะของเครื่องจักร ณ เวลานั้น ที่มีเวลาในกระบวนการน้อยที่สุด หรือเครื่องจักรที่ว่างอยู่ ให้ผลิตงานลำดับแรกสุดก่อน ส่งผลให้เกิดปัญหา

จากการเปิดเครื่องจักรทิ้งไว้โดยไม่ได้ใช้งาน (No Load) เป็น 25.89 เปอร์เซ็นต์ และอรรถประโยชน์ของเครื่องจักร (Machine Utilization) 74.11 เปอร์เซ็นต์ ต่อหนึ่งไตรมาส

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการจัดการตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรแบบขนานในกระบวนการทดสอบ Final Test ของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์แบบวงจรรวมวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการให้เหมาะสม ลดเวลางานที่แล้วเสร็จล่าช้ากว่าวันครบกำหนด และลดเวลางานที่แล้วเสร็จก่อนวันครบกำหนดส่ง โดยศึกษาการจัดการตารางการผลิตจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และวิธีการจัดการตารางการผลิตวิธีการฮิวริสติกส์ผสมผสาน (Hybrid Heuristic) แบบ Earliest Due Date (EDD) + Longest Processing Time (LPT)

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีการแก้ปัญหาขนาดใหญ่และปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้โปรแกรม Solver ใน Microsoft Excel เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณประเภทโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ซึ่งจะช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือดีที่สุด (Optimization) จากข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่มีอยู่ เพื่อดำเนินการสำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับการจัดการตารางการผลิต โดยฟังก์ชันสำหรับการหาลำดับที่ดีที่สุดของโปรแกรม Solver มี 3 วิธี คือ

1. Simplex LP ใช้ในการแก้ปัญหาแบบจำลองที่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นแบบจำลองเชิงเส้น เมื่อค่าในตัวแปรวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรตัดสินใจ เงื่อนไขบังคับของทุกข้อเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรตัดสินใจ
2. Generalized Reduced Gradient (GRG Nonlinear) ใช้ในการแก้ปัญหาแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อตัวแปรวัตถุประสงค์ และเมื่อเงื่อนไขเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องกันแต่ไม่เป็นเส้นตรง
3. Evolutionary ใช้แก้ปัญหาที่ยาก ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รวมทั้งปัญหาที่ตัวแปรวัตถุประสงค์หรือเงื่อนไขบังคับเป็นฟังก์ชันที่มีค่าอย่างน้อยตัวใดตัวหนึ่งไม่ได้มีความต่อเนื่องกัน กล่าวคือมีฟังก์ชันจากสูตร Excel เช่น IF VLOOKUP และ INDEX ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงได้อย่างฉับพลันและไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ผ่านมา

ณัฐพัชร [1] ได้ศึกษาวิธีการเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm) เป็นวิธีการที่คำนวณเพื่อหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีการแบบ เมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristic Optimization) ซึ่งประยุกต์มาจากวิธีการเชิงวิวัฒนาการทางชีววิทยาได้แก่ การสืบพันธุ์ (Reproduction) การกลาย

พันธุ (Mutation) การแลกเปลี่ยนยีน (Recombination) และการคัดเลือก (Selection) ซึ่งให้ผลเฉลยที่ได้อย่างรวดเร็ว โดยขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการมีรูปแบบขั้นตอนเหมือน ๆ กัน ซึ่งเกิดจากการทำซ้ำสำหรับกระบวนการนี้ จนกว่าจะได้ถึงจุดที่เหมาะสมแล้วจึงทำการหยุด

นภาพพร [2] ได้นำวิธีการจัดตารางการผลิต โดยใช้การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกับวิธีฮิวริสติกส์แบบ LPT เพื่อปรับลดจำนวนการใช้เครื่องจักรและลดเวลาแล้วเสร็จของงานสุดท้าย

พงษ์ธาดา [4] ศึกษาการเปรียบเทียบการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กันโดยใช้โปรแกรมการ Legin (Academic Version) และการใช้แบบจำลองมอบหมายงาน โดยใช้เกณฑ์ Dispatching Rule 5 วิธี คือ Earliest Due Date (EDD) Minimum Slack Time (MST) Longest Processing Time (LPT) Shortest Processing Time (SPT) และ First Come First Served (FCFS) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Assignment Problem เพื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการทำงาน ได้แก่ ความล่าช้า จำนวนงานที่ล่าช้ากว่ากำหนด เวลาแล้วเสร็จของงานและเวลาในกระบวนการของงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก ยอดคงใจ [5] ได้ศึกษาการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีการทางฮิวริสติกแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน (Hybrid Heuristic) แบบ EDD+LPT กล่าวคือ EDD เป็นกฎที่เลือกลำดับของงานจากวันที่ถึงกำหนดส่งงานเร็วที่สุดก่อน และ LPT เป็นการเลือกลำดับงานที่มีเวลาปฏิบัติงานหรือเวลาในกระบวนการมากที่สุดนำมาทำก่อน

อนจ [6] ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนที่เหมาะสมที่สุด โดยมีกำหนดส่งงานในระบบทันเวลาพอดี ด้วยวิธีการเมเมติกเพื่อหาตารางการผลิตที่ทำให้ค่าใช้จ่ายโดยรวมซึ่งประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการปรับตั้งเครื่องจักร ค่าใช้จ่ายจากงานเสร็จก่อนกำหนด และค่าใช้จ่ายจากงานเสร็จล่าช้าให้มีค่าน้อยที่สุด

Sufen [9] เสนอวิธีเพื่อแก้ปัญหา การสำหรับการจัดตารางงาน ภายใต้ความไม่แน่นอน โดยการพัฒนาวิธีการ Genetic Algorithm และ Heuristic Algorithm วัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายงานที่เสร็จก่อนกำหนดและงานที่ล่าช้ากว่ากำหนด โดยการกำหนดค่าใช้จ่ายของงานที่เสร็จก่อนกำหนด (α) และค่าใช้จ่ายจากงานที่เสร็จล่าช้า (β)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาและเก็บข้อมูล

จากการศึกษาเพื่อหาพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการจัดตารางการผลิต เริ่มต้นจากงานที่มาจากกระบวนการประกอบ (Assembly) เพื่อรอทำการผลิตที่กระบวนการทดสอบ (Work in Process: WIP) ของแต่ละสัปดาห์ เพื่อนำมาเป็นพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบ ของงานแต่ละ Lot ดังนี้ ชื่อของงาน (Job Name) วันกำหนดส่ง (Due date: Di) เวลาในกระบวนการ (Processing time: Pi) และข้อจำกัดของเครื่องจักรในกระบวนการทั้งหมด 14 เครื่อง

3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการปรับลดจำนวนเครื่องจักรและลดจำนวนงานที่ล่าช้า

กำหนดพารามิเตอร์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสม

3.2.1 พารามิเตอร์

n คือ ชื่องาน

l คือ จำนวนงานบนเครื่องจักร

i คือ ดัชนีแสดงถึงชื่องาน ; $i = 1, 2, \dots, n$

j คือ ดัชนีแสดงถึงเครื่องจักร ; $j = 1, 2, \dots, 14$

k คือ ดัชนีแสดงถึงลำดับงานเครื่องจักร ; $k = 1, 2, \dots, l$

TC คือ ต้นทุนรวม (Total Cost)

E_i คือ ช่วงเวลาที่งาน i ถูกทำเสร็จก่อนกำหนด

T_i คือ ช่วงเวลาที่งาน i ถูกทำเสร็จช้ากว่ากำหนด

P_i คือ เวลาในกระบวนการผลิตของงาน i

C_i คือ เวลาแล้วเสร็จของงาน i

D_i คือ วันครบกำหนดส่งของงาน i

$X_{i,j,k} = \begin{cases} 1 & \text{ถ้างาน } i \text{ ผลิตบนเครื่องจักร } j \text{ ลำดับที่ } k \\ 0 & \text{ถ้างาน } i \text{ ไม่ผลิตบนเครื่องจักร } j \text{ ลำดับที่ } k \end{cases}$

α คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของค่าใช้จ่ายของงานที่เวลาแล้วเสร็จก่อนกำหนด กำหนดให้ $\alpha = 0.3$

β คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของค่าใช้จ่ายของงานที่เวลาแล้วเสร็จช้ากว่ากำหนด กำหนดให้ $\beta = 0.7$

3.2.2 สมการวัตถุประสงค์

$$\text{Minimize } TC = \alpha \sum_{i=1}^n (E_i) + \beta \sum_{i=1}^n (T_i) \quad (1)$$

3.2.3 สมการข้อจำกัด

$$\sum_{j=1}^{14} \sum_{k=1}^l X_{i,j,k} = 1 \quad ; \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l P_i X_{i,j,k} \leq 7 \quad ; \forall j \quad (3)$$

$$C_i = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r P_i X_{i,q,k} ; \forall i \text{ where } X_{i,q,r} = 1 \quad (4)$$

$$T_i = (C_i - D_i)^+ \quad ; \forall i \quad (5)$$

$$E_i = (D_i - C_i)^+ \quad ; \forall i \quad (6)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad (7)$$

สมการวัตถุประสงค์ที่ (1) แสดงถึงการลดค่าใช้จ่ายโดยรวมของระบบซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายที่เสร็จก่อนกำหนด และค่าใช้จ่ายจากงานที่เสร็จล่าช้า โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างค่าใช้จ่ายที่เสร็จก่อนกำหนด ($\alpha = 0.3$) และค่าใช้จ่ายจากงานที่เสร็จล่าช้า ($\beta = 0.7$) เป็นค่าเริ่มต้นของสมการ ข้อจำกัดที่ (2) สำหรับแต่ละการดำเนินงาน งานแต่ละงานต้องถูกดำเนินการผลิตบนเครื่องจักรเพียงเครื่องเดียว ข้อจำกัดที่ (3) สำหรับการดำเนินงานบนเครื่องจักรเวลาในการดำเนินงานของแต่ละเครื่องจักรต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 วัน ข้อจำกัดที่ (4) สำหรับการดำเนินงานใด ๆ เวลาแล้วเสร็จของงานแต่ละงาน เกิดจากผลรวมของเวลาในกระบวนการของงานนั้น ๆ กับเวลาในกระบวนการของลำดับงานที่ถูกดำเนินการในลำดับก่อนหน้าของงานนั้น ๆ โดยที่ $X_{i,q,r} = 1$ ก็ต่อเมื่องานลำดับก่อนหน้าถูกดำเนินการบนเครื่องจักรนั้น ๆ ข้อจำกัดที่ (5) ใช้ในการคำนวณเวลาที่งานเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดของงานแต่ละงาน ข้อจำกัดที่ (6) ใช้ในการคำนวณเวลาที่งานเสร็จก่อนกำหนดของงานแต่ละงาน ข้อจำกัดที่ (7) แสดงถึงงานใด ๆ บนเครื่องจักรใด ๆ ที่ถูกดำเนินการมีค่าเท่ากับ 1 และงานไม่ถูกดำเนินการบนเครื่องจักรใด ๆ มีค่าเท่ากับ 0

3.2.4 สร้างรูปแบบจัดตารางการผลิต ใน Microsoft Excel ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ วิธี Evolutionary จากโปรแกรม Solver เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดสูตร Excel คือ IF MAX และ VLOOKUP/ XLOOKUP เพื่อหา

คำตอบที่เหมาะสมสำหรับการจัดตารางการผลิต โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 บันทึกข้อมูลของงานที่รอทำการจัดตารางการผลิตลงใน Worksheet โดยกำหนดตัวเลข เช่น 1 ถึง 15 จากกลุ่มงานตัวอย่างจำนวน 15 งาน เพื่อเป็นตัวแทนของงานแต่ละ Lot เพื่อใช้สำหรับทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1

	B	C	D	E
9	Number of Job	Job Name	Processing Time: P _i (Day)	Due Date: D _i (Day)
10	1	2014	0.85	12
11	2	TA18	1.71	2
12	3	FC01	3.78	11
13	4	EA04	1.65	1
14	5	BB28	2.49	1
15	6	FC01	0.63	5
16	7	BB28	2.48	2
17	8	TA18	3.57	7
18	9	BB09	1.00	7
19	10	JA01	2.10	15
20	11	JA01	1.19	10
21	12	OA16	3.02	11
22	13	OA16	1.03	9
23	14	OA16	2.04	9
24	15	FC01	1.13	11

รูปที่ 1 ตัวเลขและงานกลุ่มตัวอย่างที่รอการผลิต

ขั้นตอนที่ 2 สร้างตารางสำหรับสมการวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัดลงใน Worksheet เพื่อใช้สำหรับทดสอบ แสดงดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3 ตามลำดับ

	L	M	N	O
2	Total Testers	Total T _i	Total E _i	Total Cost
3	0	0	0	0
4				
5			Alpha	0.3
6			Beta	0.7

รูปที่ 2 เซลล์ตามสมการวัตถุประสงค์

	G	H	I	J	K	L	M	N	O
9	Schedule	Job Name	Tester number	Number of job	Processing Time: P _i	Completion: C _i	Due Date: D _i	Tardiness: T _i	Earliness: E _i
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
			Maximum testers	<=			Total	0	0

รูปที่ 3 เซลล์ตามสมการข้อจำกัด

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดสูตร Excel เพื่อใช้ในการคำนวณและหาความสัมพันธ์ตามแต่ละหัวข้อของคอลัมน์ (Column) ใน Worksheet ที่สร้างจากขั้นตอนที่ 2 ของงานลำดับแรกสุดในการจัดตารางการผลิต และคอลัมน์ J คือ คอลัมน์อ้างอิง (Reference Cell) ที่ได้จากคำตอบของโปรแกรม Solver แสดงดังตารางที่ 1

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดสูตร Excel เพื่อใช้คำนวณของงานลำดับที่สองจนถึงลำดับสุดท้ายในการจัดตารางการผลิต เช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์และสูตร Excel

Cell	Formula
G10	=I10
H10	=XLOOKUP(J10,\$B\$10:\$B\$24,\$C\$10:\$C\$24)
I10	=ROUNDUP(L10/7,0)
K10	=XLOOKUP(J10,\$B\$10:\$B\$24,\$D\$10:\$D\$24)
L10	=K10
M10	=XLOOKUP(J10,\$B\$10:\$B\$24,\$E\$10:\$E\$24)
N10	=MAX(0,L10-M10)
O10	=MAX(0,M10-L10)

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์และสูตร Excel

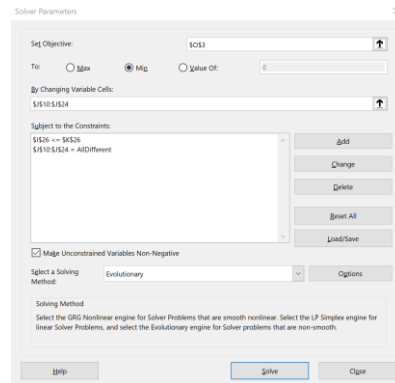
Cell	Formula
G11	=IF(I11=I10,G10+1,1)
H11	=XLOOKUP(J11,\$B\$10:\$B\$24,\$C\$10:\$C\$24)
I11	=IF(K11+L10>7,I10+1,I10)
K11	=XLOOKUP(J11,\$B\$10:\$B\$24,\$D\$10:\$D\$24)
L11	=IF(K11+L10>7,K11,K11+L10)
M11	=XLOOKUP(J11,\$B\$10:\$B\$24,\$E\$10:\$E\$24)
N11	=MAX(0,L11-M11)
O11	=MAX(0,M11-L11)

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดสูตร Excel เพื่อใช้คำนวณตามสมการวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัดเพื่อใช้สำหรับทดสอบด้วยโปรแกรม Solver แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์และสูตร Excel

Cell	Formula
I26	=MAX(I10:I24)
N25	=SUM(N10:N24)
O25	=SUM(O10:O24)
M3	=(N25*O6)
N3	=(O25*O5)
O3	=N3+M3

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดสมการวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัดลงในโปรแกรม Solver แสดงดังรูปที่ 4 หลังจากนั้น กด Solve เพื่อทดสอบและหาคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 หน้าต่างโปรแกรม Solver ใน Microsoft Excel

เนื่องจากผู้วิจัยได้มีการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ใน Option ของ Solver Method วิธี Evolutionary คือ Mutation Rate ตั้งแต่ค่า 0.075 ถึง 0.100 และ Population Size ตั้งแต่ค่า 50 ถึง 100 ซึ่งผลของการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์และทดสอบด้วยโปรแกรม Minitab นั้นไม่ส่งผลต่อคำตอบที่ได้จากโปรแกรม Solver แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโปรแกรม Solver คือ Mutation Rate = 0.075 และ Population Size = 100 ในการทดสอบเพื่อแก้ไขปัญหาแสดงดังรูปที่ 7

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Mutation Rate	Fixed	3	0.075, 0.085, 0.095
Population Size	Fixed	3	50, 75, 100

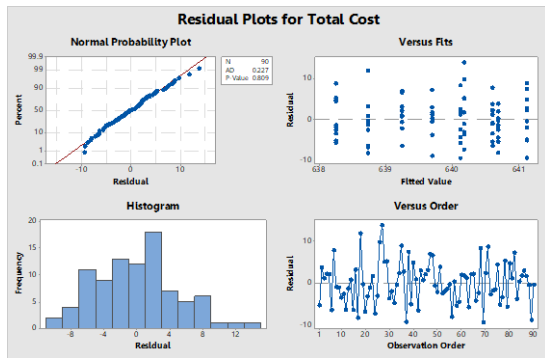
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Mutation Rate	2	14.72	7.360	0.28	0.753
Population Size	2	57.61	28.806	1.11	0.333
Error	85	2196.32	25.839		
Lack-of-Fit	4	112.71	28.178	1.10	0.365
Pure Error	81	2083.61	25.724		
Total	89	2268.65			

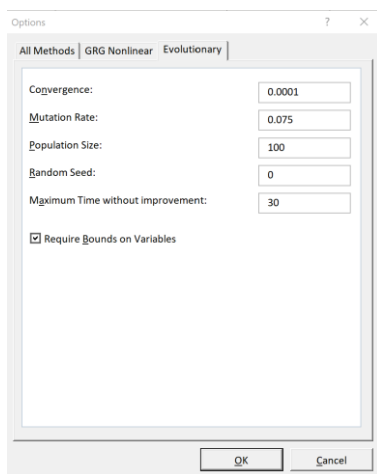
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.08321	3.19%	0.00%	0.00%

รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab จากข้อมูลของคำตอบของโปรแกรม Solver



รูปที่ 6 แผนภาพความคลาดเคลื่อน จากข้อมูลของคำตอบของโปรแกรม Solver



รูปที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน Evolutionary

3.3 กระบวนการฮิวริสติกส์เพื่อใช้ในการปรับลดจำนวนเครื่องจักรและลดจำนวนงานที่ล่าช้า

ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน (Hybrid Heuristic) แบบ EDD+LPT ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางงานใส่เครื่องโดยจะพิจารณาเริ่มจากเครื่องที่มีเวลารวมในการกระบวนการน้อยที่สุดก่อน หลังจากนั้นจะพิจารณาเครื่องที่มีเวลารวมในการกระบวนการน้อยที่สุดในลำดับถัดไป โดยวิธีการจัดตารางการผลิตมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 บันทึกรายละเอียดของงานที่รอทำการจัดตารางการผลิตลงใน Worksheet เช่นเดียวกับวิธีการจัดตารางการผลิตจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นเรียงลำดับงาน โดยเรียงจากงานที่วันครบกำหนดส่ง (D_i) น้อยที่สุดไปหางานที่วันครบกำหนดส่งมากเป็นลำดับแรก

ก่อน หากวันที่กำหนดส่งของงานนั้น ๆ เท่ากัน ให้เลือกงานที่มีเวลาการผลิต (P_i) มากที่สุดเป็นอันดับแรกไปหางานที่มีเวลาการผลิตน้อยสุดตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 8

	A	B	C	D
9	Number of Job	Job Name	Processing Time: P _i (Day)	Due Date: D _i (Day)
10	5	BB09	2.49	1
11	4	BA04	1.65	1
12	7	BB08	2.68	2
13	2	TA09	1.71	2
14	6	PC01	0.63	5
15	8	TA08	3.57	7
16	9	BB09	1.00	7
17	14	CA016	2.04	9
18	13	CA016	1.03	9
19	11	JA01	1.19	10
20	3	PC01	3.78	11
21	12	CA016	3.02	11
22	15	PC01	1.13	11
23	1	JB014	0.85	12
24	10	JA01	2.10	15

รูปที่ 8 ตัวอย่างงานที่เรียงลำดับงานด้วยวิธี EDD + LPT

ขั้นตอนที่ 2 สร้างตารางใน Worksheet เพื่อจัดงานใส่ในแต่ละเครื่องตามลำดับตามเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 9

	F	G	H	I	J
17	Total Testers	O			
18					
19	Schedule	Schedule of tester number 1 - 4			
20		1	2	3	4
21	1				
22	2				
23	3				
24	4				
25	5				
26	6				

รูปที่ 9 Worksheet สำหรับการจัดตารางงานของเครื่องจักร 4 เครื่องสำหรับกลุ่มงานตัวอย่างตัวจำนวน 15 งาน

ขั้นตอนที่ 3 สร้างตารางเพื่อใช้สำหรับการคำนวณตามสมการจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการโดยใช้เซลล์อ้างอิงจากการจัดลำดับงานจากตารางในขั้นตอนที่ 2 และสร้างตารางที่มีเงื่อนไขจากเวลาในกระบวนการผลิตรวมของงานทั้งหมดแต่ละเครื่องจักรต้องไม่เกิน 7 วัน แสดงดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

	F	G	H	I	J	K	L	M
9	Job Name	Tester number	Number of Job	Processing Time: P _i	Completion: C _i	Due Date: D _i	Tardiness: T _i	Earliness: E _i
10		1	0					
11		1	0					
12		1	0					
13		1	0					
14		1	0					
15	Total			0.00			0.0	0.0

รูปที่ 10 Worksheet สำหรับใช้ในการคำนวณของเครื่องจักรตัวอย่างหมายเลข 1

	F	G	H	I	J	K	L
29	Capacity						
30	Tester	1	2	3	4	<=	7
31	Total Processing Time						

รูปที่ 11 เวลาในกระบวนการแต่ละเครื่องจักร

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดสูตร Excel เพื่อใช้คำนวณจากตารางที่สร้างจากขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 แสดงดังตารางที่ 4

ขั้นตอนที่ 5 สร้างตารางและกำหนดสูตร Excel สำหรับใช้คำนวณตามสมการวัตถุประสงค์จากวิธีการจัดตารางการผลิตแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านต้นทุนรวมของระบบ เวลาของงานแล้วเสร็จที่ล่าช้าและเวลาของงานแล้วเสร็จก่อนกำหนด แสดงดังรูปที่ 12 และตารางที่ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์และสูตร Excel

Cell	Formula
H10	=G21
F10	=XLOOKUP(H10,\$A\$10:\$A\$24,\$B\$10:\$B\$24)
I10	=XLOOKUP(H10,\$A\$10:\$A\$24,\$C\$10:\$C\$24)
J10	=IF(H10=0,0,I10)
K10	=XLOOKUP(H10,\$A\$10:\$A\$24,\$D\$10:\$D\$24)
L10	=MAX(0,J10-K10)
L15	=SUM(L10:L14)
M15	=SUM(M10:M14)
M10	=MAX(0,K10-J10)
G17	=ROUND(SUM(C10:C24)/7,0)

	L	M	N	O	P	Q
5	Total Ti	Total Ei	Total Cost		Alpa	0.3
6	0.00	0.00	0		Bate	0.7

รูปที่ 12 Worksheet สำหรับใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์และสูตร Excel

Cell	Formula
L6	=(L15+U15+AD15+AM15)
M6	=(M15+V15+AE15+AN15)
N6	=(M6*Q5)+(L6*Q6)

ขั้นตอนที่ 6 จัดงานที่ละงานใส่ในตารางที่สร้างจากขั้นตอนที่ 2 ให้กับเครื่องจักรที่มีเวลาในกระบวนการของงานสุดท้ายน้อยที่สุดก่อน โดยพิจารณาหางานลำดับสุดท้าย

ที่ใส่ทำให้เวลาในกระบวนการของเครื่องจักรนั้น เกิน 7 วัน ให้ทำการแบ่งงานส่วนที่เหลือของงานนั้นไปใส่ยังเครื่องจักรลำดับถัดไปที่มีเวลาในกระบวนการของงานสุดท้ายน้อยที่สุด

4 ผลการวิจัย

เปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกระบวนการฮิวริสติกส์ผสมผสาน แบบ EDD+LPT เพื่อใช้ในการปรับลดจำนวนเครื่องจักรและลดจำนวนงานที่ล่าช้า กับวิธีการจัดตารางแบบปัจจุบัน และทำการวิเคราะห์ผล ดังนี้

4.1 พิจารณาจำนวนงานทั้งหมด

จากผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวมของระบบ เปอร์เซ็นต์การลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานล่าช้าทั้งหมด เปอร์เซ็นต์การลดลดเวลาเสร็จรวมของงานที่เสร็จก่อนกำหนด และจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการจัดตารางในแต่ละสัปดาห์ ของวิธีการจัดตารางการผลิตจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการจัดตารางการผลิตแบบฮิวริสติกส์ ซึ่งเปรียบเทียบผลความแตกต่างกับวิธีการจัดตารางแบบปัจจุบัน ด้วยจำนวนงานทั้งหมด 575 งาน ในการจัดตารางการผลิตในระยะเวลา 1 เดือน โดยแบ่งเป็นการจัดตารางครั้งละ 1 สัปดาห์ กำหนดพารามิเตอร์ตั้งต้นของสมการวัตถุประสงค์คือ $\alpha = 0.3$ และ $\beta = 0.7$ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบผลของวิธีการทั้งสองในแต่ละสัปดาห์

Week	Method	Total Cost	Total Tardiness	Total Earliness	Total Testers
1	Math Model	9.86%	22.68%	6.19%	13
	Heuristic	0.85%	18.07%	0.00%	13
2	Math Model	11.09%	26.53%	9.86%	13
	Heuristic	0.00%	0.00%	0.00%	12
3	Math Model	22.62%	49.30%	17.07%	13
	Heuristic	7.09%	16.56%	5.13%	12
4	Math Model	11.50%	14.87%	9.67%	11
	Heuristic	3.62%	10.95%	0.00%	11

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการจัดการตารางการผลิตจากคำตอบที่ได้ด้วยวิธีการจัดการตารางการผลิตแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าความแตกต่างของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพต้นทุนรวมของระบบเฉลี่ยลดลง 13.43 เปอร์เซ็นต์ เวลารวมทั้งงานเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดลดลง 24.63 เปอร์เซ็นต์ และเวลารวมทั้งงานเสร็จก่อนกำหนดลดลง 10.35 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนวิธีการจัดการตารางการผลิตแบบฮิวริสติกส์ ค่าความแตกต่างของดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพต้นทุนรวมของระบบเฉลี่ยลดลง 1.31 เปอร์เซ็นต์ เวลารวมทั้งงานเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดลดลง 7.71 เปอร์เซ็นต์ และเวลารวมทั้งงานแล้วเสร็จก่อนกำหนดไม่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน ในทางกลับกันวิธีการจัดการตารางการผลิตแบบฮิวริสติกส์ ให้ผลในด้านการลดจำนวนเครื่องจักรลดลง 14.20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งดีกว่าวิธีการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 10.79 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน

4.2 วิเคราะห์ Sensitivity Analysis ของการปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนัก

จากการทดสอบด้วยวิธีการจัดการตารางการผลิตแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบฮิวริสติกส์ โดยจำนวนงานตัวอย่างทั้งหมด 146 งาน ในการจัดการตารางการผลิต 1 สัปดาห์ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่า α และ β ด้วยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การลดต้นทุนรวมของระบบ เปอร์เซ็นต์การลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานล่าช้าทั้งหมด และเปอร์เซ็นต์การลดเวลาแล้วเสร็จรวมของงานที่เสร็จก่อนกำหนด ของวิธีการทั้งสอง ซึ่งเปรียบเทียบผลความแตกต่างกับวิธีการจัดการแบบปัจจุบัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 กำหนดให้ $\alpha = 0.3$ และ $\beta = 0.7$ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของผลจากวิธีการทั้งสองด้วยการทดสอบตามเงื่อนไขกรณีที่ 1

Method	Total Cost	Total Tardiness	Total Earliness
Math Model	9.86%	22.68%	6.19%
Heuristic	0.85 %	18.07%	0.00%

กรณีที่ 2 กำหนดให้ $\alpha = 0.5$ และ $\beta = 0.5$ แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของผลจากวิธีการทั้งสองด้วยการทดสอบตามเงื่อนไขกรณีที่ 2

Method	Total Cost	Total Tardiness	Total Earliness
Math Model	0.00%	15.02%	6.70%
Heuristic	0.00%	18.07%	0.00%

กรณีที่ 3 กำหนดให้ $\alpha = 0.0$ และ $\beta = 1.0$ แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของผลจากวิธีการทั้งสองด้วยการทดสอบตามเงื่อนไขกรณีที่ 3

Method	Total Cost	Total Tardiness	Total Earliness
Math Model	76.11%	24.85%	0.00%
Heuristic	73.96%	18.07%	0.00%

จากผลเปรียบเทียบของทั้ง 3 กรณีในตารางที่ 7 8 และ 9 แสดงให้เห็นว่า การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างเวลาแล้วเสร็จก่อนกำหนด (α) และงานที่แล้วเสร็จล่าช้า (β) มีผลต่อคำตอบที่ได้จากโปรแกรม Solver ของวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่า β ที่มากขึ้นส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดเวลาแล้วเสร็จรวมที่ล่าช้าเพิ่มขึ้น และค่า α ที่น้อยลงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลดเวลาแล้วเสร็จรวมก่อนกำหนดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การจัดการตารางการผลิตด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่ดีกว่าวิธีการแบบฮิวริสติกส์ผสมผสานแบบ EDD+LPT เมื่อเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพด้านการลดต้นทุนรวมของระบบ การลดเวลารวมของงานที่แล้วเสร็จล่าช้ากว่ากำหนด และการลดเวลารวมของงานที่แล้วเสร็จก่อนกำหนด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการจัดการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่มีประสิทธิภาพได้ดีกว่าวิธีการจัดการแบบปัจจุบัน อย่างไรก็ตามในบางกรณี วิธีการจัดการตารางการผลิตแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน แบบ EDD+LPT

สามารถลดจำนวนเครื่องจักรในระบบการผลิตได้ดีกว่าการจัดตารางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน เนื่องจากวิธีการจัดตารางการผลิตแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน แบบ EDD+LPT อนุญาตให้แบ่งงานในช่วงท้ายของการจัดลำดับงานบนเครื่องจักรใด ๆ แล้วทำให้เครื่องจักรนั้นมีเวลาในระบบการผลิตเกิน 7 วัน โดยทำการแบ่งงานในส่วนที่เกิน 7 วันออกไปใส่ไว้ยังเครื่องอื่น ที่เวลาสะสมรวมของเวลาในระบบการผลิตน้อยกว่า ดังนั้นคำตอบที่ได้จากการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีการแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน แบบ EDD+LPT ของเวลาในการดำเนินการของแต่ละเครื่องจักรในระบบการจะใช้เต็มตามความจุที่สามารถรับได้คือ 7 วัน

จากการศึกษาพบว่าการจัดตารางการผลิตด้วยวิธีการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หากสามารถเพิ่มอัลกอริทึมในการแยกงานขนาดใหญ่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เหมือนวิธีการแบบฮิวริสติกส์ผสมผสาน แบบ EDD+LPT ที่มีการอนุญาตให้แบ่งงานในช่วงท้ายของการจัดตารางงานบนเครื่องจักรใด ๆ และทำให้เวลาดำเนินการในระบบการของแต่ละเครื่องจักรใช้ได้เต็มตามความจุที่สามารถรับได้เท่ากับ 7 วัน จะทำให้การเปรียบเทียบผลของทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] นภาพร นิตวรางกูร, “การจัดตารางการผลิตที่มีหลายขั้นตอนการดำเนินงานบนชุดเครื่องจักรขนานที่เหมือนกัน กรณีศึกษา: โรงงานผลิตแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์,” สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2559.
- [2] พงษ์ธาดา คุรุกิจกำจร, “การเปรียบเทียบการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่สัมพันธ์กันโดยใช้โปรแกรมการจัดการผลิต และการใช้แบบจำลองมอเบมางาน,” สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมมหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, 2556.
- [3] ยอดดวงใจ นาคปฐม, “การจัดตารางการผลิตแบบตามสั่ง สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรม

ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมมหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, 2555.

- [4] อดจ ชัยมณี, “การจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อนโดยมีกำหนดส่งงานเป็นช่วงเวลาภายใต้นโยบายการผลิตแบบทันเวลาพอดี,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2560.
- [5] J. F. Chen, “Scheduling on unrelated parallel machines with sequence- and machine-dependent setup times and due- date constraints,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, pp. 1204–1212, 2009.
- [6] Kim et al., “Unrelated parallel machine scheduling with setup times and a total weighted tardiness objective,” *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 19, pp. 173–181, 2003.
- [7] L. Sufen, Z. Yunlong and L. Xiaoying, “Earliness/ Tardiness Flow- shop scheduling under uncertainty,” in *17th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, China, 2005.