การแก้ปัญหาการวางแผนและจัดตารางการผลิตขั้นสูง ที่พิจารณาการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบมีกรอบเวลา โดยตัวแบบกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม

ธันยพร อุดม[1] ภูพงษ์ พงษ์เจริญ[2] และ ขวัญนิธิ คำเมือง*[3]
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร 99 หมู่ 9 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและปรับปรุงตัวแบบของปัญหากำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming: MIP) สำหรับปัญหาการวางแผนและการจัดตารางการผลิตขั้นสูง (Advanced Planning and Scheduling: APS) ซึ่งเป็นเทคนิคในการวางแผนและจัดตารางการผลิต ที่สามารถพิจารณาข้อจำกัดต่างๆ ได้แก่ กำลังการผลิตของเครื่องจักร การจัดลำดับงาน และเวลาส่งมอบ กับปัญหาที่มีหลายเครื่องจักร หลายคำสั่งซื้อและแต่ละผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับและหลายชิ้นส่วน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตได้กับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ พร้อมกับขยายตัวแบบให้มีการเพิ่มการพิจารณาข้อจำกัดในเรื่องของกรอบเวลาของการบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกัน โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ ก็คือ เพื่อทำให้ค่าปรับรวมในการผลิต ซึ่งประกอบไปด้วยค่าปรับเนื่องจากเกิดการว่างงานของเครื่องจักร ค่าปรับเนื่องจากทำงานเสร็จก่อนเวลาที่กำหนด และค่าปรับเนื่องจากงานเสร็จล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนด ให้มีค่าต่ำที่สุด และสามารถจัดตารางการผลิตได้อย่างเหมาะสม โดยได้นำเสนอตัวอย่างการหาคำตอบกับตัวแบบในสี่รูปแบบ

คำสำคัญ: การวางแผนและการจัดตารางการผลิตขั้นสูง, การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน, กำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม

* Corresponding author. E-mail: kpopk@yahoo.com
2 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
3 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Solving an Advanced Planning and Scheduling Problem with Preventive Maintenance Time Window Constraints by Mixed Integer Programming Models

Thanyapon Udom [1] Pupong Pongcharoen [2] and Kwanniti Khammuang [*3]
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Naresuan University, 99 Moo 9, Tha Pho, Mueang Phitsanulok, Phitsanulok 65000

Abstract

This research studies and develops a mixed integer programming model for an Advanced Planning and Scheduling (APS) problem which is a technique for planning and scheduling for production systems that incorporates various constraints into planning such as machine capacity constraints, operation sequences and due dates in a multi-machine, multi-order environment in which each order has a multiple step product structure and requires multiple items where each item can be processed on any one of a given set of eligible machines and we extend the model to include preventive maintenance time window constraints. The objective is to find the production and preventive maintenance schedule that minimizes total penalty cost which consists of production idle time, tardiness and earliness penalty costs. A numerical example for four different versions of the model is also presented.

Keywords: Advanced Planning and Scheduling, Preventive maintenance, Mixed integer programming

---

* Corresponding author. E-mail: E-mail: kpopk@yahoo.com
[2] Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University
[3] Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

1. บทนำ

การวางแผนและการจัดตารางการผลิตขั้นสูงหรือ APS เป็นเครื่องมือที่ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยผู้ผลิตในการพัฒนาตารางการผลิตที่เป็นไปได้ และสมดุลกับเงื่อนไขภายใต้ข้อจำกัดด้านทรัพยากร เช่น กำหนดส่งมอบ กำลังการผลิตของเครื่องจักร เครื่องมือ และแรงงาน เป็นต้น เพื่อพัฒนาแผนปฏิบัติการที่เป็นจริงในการขับเคลื่อนใบสั่งซื้อไปยังขั้นตอนต่างๆ ของโรงงาน ซึ่งประโยชน์ที่ผู้ใช้จะได้รับก็คือตารางการผลิตที่สามารถนำไปปฏิบัติงานได้จริง เนื่องจากได้นำข้อจำกัดด้านการผลิตของโรงงานมาพิจารณาและสร้างตัวแบบตารางการผลิต ทำให้กระบวนการกำหนดตารางการผลิตขั้นสูงหรือ APS สามารถปรับปรุงและสร้างตารางการผลิตที่เป็นไปได้จริงได้อย่างเหมาะสมที่สุดและมีต้นทุนต่ำที่สุด [1]

2. การทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาปัญหา APS ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในช่วงแรก ลักษณะของปัญหาจะอยู่บนพื้นฐานของการวางแผนความต้องการวัสดุ (Material Requirement Planning: MRP) ระบบตารางการผลิตหลัก (Master Production Schedule: MPS) หรือการวางแผนความต้องการกำลังการผลิต (Capacity Requirement Planning: CRP) จากนั้นจึงค่อยๆ พัฒนามาเป็น APS สำหรับวิธีการแก้ปัญหาของปัญหา APS นั้น มีงานวิจัยไม่มากนัก ที่นำตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์มาใช้ แต่มักจะนำวิธีหาคำตอบโดยใช้หลักการประมาณค่าคำตอบหรือวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) เข้ามาช่วยหาคำตอบ เนื่องจากสามารถช่วยหาคำตอบของปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนสูงรวดเร็วกว่าวิธีทางคณิตศาสตร์ แต่คำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการหาคำตอบด้วยตัวแบบกำหนดการคณิตศาสตร์ ซึ่งวิธีการประมาณค่าคำตอบที่นักวิจัยวิจัยส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้กับปัญหา APS ก็คือ การพัฒนาวิธีการหาคำตอบโดยทฤษฎีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) หรือ GA [2-7]

อย่างไรก็ตาม การแก้ปัญหาด้วยตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ ก็ยังคงเป็นวิธีที่รับรองได้ว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในการศึกษาวิธีการสร้างตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ สำหรับลักษณะของปัญหาจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นหลัก แต่ในการทบทวนวรรณกรรม จะกล่าวถึงการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) และเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) ด้วย เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมของลักษณะปัญหา APS และการเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาที่แตกต่างกันออกไป จากการทบทวนวรรณกรรมในงานวิจัยนี้ จะแบ่งปัญหา APS ตามจำนวนทรัพยากรที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานหรือชิ้นส่วนต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในที่นี้คือเครื่องจักร ออกเป็น 3 แบบ คือ 1) แต่ละชิ้นส่วนสามารถผลิตได้เพียงเครื่องจักรเดียวเท่านั้น 2) แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ให้ (Alternative machines) และ 3) คล้ายคลึงกับแบบที่ 2 แต่มีการสั่งผลิตจากภายนอกโรงงาน

สำหรับกรณีแรก นั่นคือ แต่ละชิ้นส่วนสามารถผลิตได้เพียงเครื่องจักรเดียวเท่านั้น ได้ถูกนำมาแก้ปัญหา APS ที่พิจารณาข้อจำกัดในการผลิต ของปัญหาที่มีหลายคำสั่งซื้อหลายเครื่องจักร ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับ โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยดังกล่าว เป็นการลดต้นทุนในการผลิต รวมไปถึงเพื่อให้เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Makespan) ต่ำที่สุด ด้วยนำเสนอการสร้างตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Programming: MIP) [8] การใช้วิธี GA [2] และการนำวิธีการกำหนดการข้อจำกัด (Constraint Programming: CP) มาใช้ร่วมกับวิธีขยายและจำกัดเขต (Branch and Bound Algorithm: B&B) [9] จากงานวิจัยที่กล่าวมานี้ อาจจะยังไม่มีความสมจริงเพียงพอ และการผลิตไม่มีความยืดหยุ่น เพื่อให้ปัญหามีความสมจริงมากขึ้น จึงมีการปรับปรุงเงื่อนไขของการผลิตขึ้นใหม่ โดยกำหนดให้แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ให้ (Alternative machines) เช่น ชิ้นส่วน A สามารถเลือกผลิตได้กับเครื่องจักรที่ 1 เครื่องจักรที่ 2 หรือเครื่องจักรที่ 3 ก็ได้ อย่างใดอย่างหนึ่ง เป็นต้น สำหรับกรณีที่ 2 นี้ ถูกนำไปพิจารณาปัญหา APS ที่ต่อยอดจากงานวิจัย [8] ในการสร้างตัวแบบ MIP มาช่วยในการหาคำตอบ โดยมีกำหนดให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นสามารถเลือกทำงานบนเครื่องจักรที่กำหนดไว้ได้ [10] รวมถึงมีการพิจารณาเวลาในการติดตั้งชิ้นส่วน (Setup time) และเวลาในการขนย้ายชิ้นส่วน (Transfer time) ด้วย [11] นอกจากนี้ปัญหา APS ยังมีการนำเสนอวิธีแก้ปัญหาอื่นๆ ได้แก่ การหาคำตอบด้วยวิธี MIP เปรียบเทียบกับ GA ของปัญหา APS ในการพัฒนาระบบสารสนเทศในโรงงาน [5] และศึกษาปัญหา APS แบบพลวัต ซึ่งจะมีคำสั่งซื้อเข้ามาอย่างต่อเนื่อง โดยนำนโยบายช่วงเวลาแช่แข็ง (Frozen interval) มาใช้ [3] การปรับปรุงวิธี GA เพื่อช่วยในการหาคำตอบในสำหรับปัญหา APS ของระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System: FMS) [7] การนำเอาวิธีการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search: LS) มาใช้ร่วมกับ GA ในการพิจารณาการจัดตารางการผลิตและการขนส่ง ของปัญหา

APS ที่มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์ของหลายผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน [6] และการใช้ MIP และHeuristic Factory Planning Algorithm (HFPA) ในการแก้ปัญหาการวางแผนในโรงงาน (Factory Planning problem: FP) [12]

อย่างไรก็ตาม ในบางผลิตภัณฑ์ อาจจะมีบางชิ้นส่วนที่ไม่สามารถผลิตในโรงงานได้ จะต้องสั่งผลิตชิ้นส่วนนั้น จากบริษัทหรือองค์การภายนอก (Outsource) เพื่อให้สามารถนำชิ้นส่วนนั้นมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ส่งมอบให้ลูกค้าได้ทันเวลาส่งมอบ ดังนั้น เพื่อความสมจริงมากขึ้น จึงมีนักวิจัยพิจารณากรณีที่ 3 นั่นคือ แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ให้ พร้อมทั้งมีการสั่งผลิตจากภายนอกโรงงาน โดยมีการนำวิธี MIP การค้นหาคำตอบแบบทาบู (Tabu Search: TS) และ GA ในการพิจารณาการวางแผน การจัดลำดับงานและจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรทั้งจากในโรงงาน และจากแหล่งผลิตภายนอก [4] การนำเอา LS มาใช้ร่วมกับ GA [13] ในการหาคำตอบและเปรียบเทียบเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Makespan) กับงานวิจัย [4] พบว่า เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์จากวิธีที่นำ LS มาใช้ร่วมกับ GA มีค่าน้อยกว่าเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ จากงานวิจัย [4] ซึ่งใช้วิธี MIP TS และ GA

ทั้งนี้ เพื่อให้สามารถดำเนินการผลิตได้อย่างราบรื่น กิจกรรมที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของระบบการผลิต ก็คือ การบำรุงรักษาเครื่องจักร ดังนั้น จึงมีงานวิจัยอยู่หลากหลายที่พิจารณาการวางแผนและจัดตารางการผลิตร่วมกับการพิจารณาการบำรุงรักษาเครื่องจักรไปด้วย ในส่วนของการบำรุงรักษาเครื่องจักร สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance: PM) และการบำรุงรักษาแบบแก้ไข (Corrective Maintenance: CM) ในส่วนนี้ ผู้วิจัยจะมุ่งเน้นในเรื่องของการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน หรือ PM ในลักษณะของการบำรุงรักษาตามคาบเวลา (Time-Based Maintenance หรือ Periodic-based maintenance) ซึ่งช่วงเวลาหรือ Time window ในการทำ PM นั้น จะถูกกำหนดโดยค่าสถิติหรือประสบการณ์ในการซ่อมบำรุงที่ผ่านมา ซึ่งการกำหนดการ PM นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องจักรและสภาพแวดล้อมการผลิตด้วย จุดประสงค์หลักของการทำ PM นั้น ก็คือ เพื่อป้องกันและลดอัตราการเสื่อมสภาพของเครื่องจักร หลีกเลี่ยงการขัดข้องของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์อย่างทันที ในส่วนของงานวิจัยที่ผ่านมา ก็มีทั้งการนำหลักการทางคณิตศาสตร์และวิธีการประมาณค่าคำตอบมาใช้ในการช่วยหาคำตอบ เช่น การนำเสนอตัวแบบกำหนดการจำนวนเต็มทวิภาคแบบผสม (Mixed Binary Integer Programming: BIP) พร้อมกับใช้วิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) กับปัญหาของการจัดตารางการผลิตแบบเครื่องจักรเดียว (Single machine) และการบำรุงรักษาเครื่องจักรตามคาบเวลาที่มีความยืดหยุ่นได้ในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ (Time window) [14] การใช้วิธีกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming: LP) B&B LS และ GA [15] และการใช้ MIP ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตของปัญหาการสั่งซื้อหรือสั่งผลิตแบบประหยัด (Lot-sizing problem) สำหรับการผลิตแบบต่อเนื่อง (Flow shop) ที่มีหลายผลิตภัณฑ์และมีการวางแผนหลายช่วงเวลา พร้อมกับพิจารณาตัวแบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมีความยืดหยุ่นได้ เช่นเดียวกับการ PM ในงานวิจัย [14] แต่มีการเพิ่มการพิจารณากำหนดขอบเขตล่าง (Lower bounds) และวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) ในปัญหานี้ เพื่อช่วยแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากขึ้นได้ [16] เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่ศึกษาการวางแผนและจัดตารางการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน โดยอาศัยหลักการประมาณค่าคำตอบต่างๆ โดยวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) และเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เช่น พิจารณาปัญหาการจัดตารางการผลิตและการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ด้วยวิธีการใช้วิธี GA [17] หรือการใช้วิธีฮาร์โมนี เสิร์ช (Harmony Search Algorithm: HS) [18] ในการช่วยประมาณค่าหาคำตอบ ได้พิจารณาปัญหาการวางแผนและการจัดตารางการผลิตรวมถึงการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องจักรเดียว และการลดอุณหภูมิของวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) และ GA [19] ในการหาประมาณค่าคำตอบของปัญหา การผลิตแบบต่อเนื่อง (Flow shop) เป็นต้น

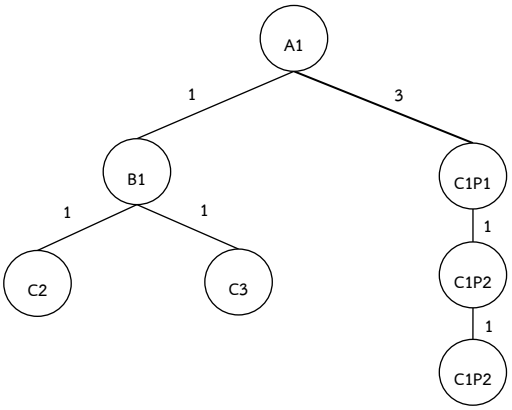
จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมานั้น พบว่า ยังไม่มีการนำปัญหา APS กับการ PM นั้น มาพิจารณาร่วมกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาและปรับปรุงตัวแบบกำหนดการเชิงคณิตศาสตร์ของ Öztürk and Ornek [11] ซึ่งได้นำเสนอตัวแบบ MIP กับปัญหา APS ภายใต้การพิจารณาข้อจำกัดในด้านการผลิต เครื่องจักร การจัดลำดับงาน เวลาการทำงานของเครื่องจักร และเวลาส่งมอบ กับปัญหาที่มีหลายเครื่องจักร หลายคำสั่งซื้อและแต่ละผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับและหลายชิ้นส่วน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกทำงานได้กับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ โดยมีการเพิ่มเติมการพิจารณาข้อจำกัดในเรื่องของการบำรุงเครื่องจักรเชิงป้องกันด้วย มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ค่าปรับรวมในการผลิต ซึ่งประกอบด้วย ค่าปรับเนื่องจากการว่างงานของเครื่องจักร

(Idle time) ค่าปรับเนื่องจากการผลิตเสร็จเร็วกว่า หรือช้ากว่ากำหนดการส่งมอบ (Earliness or tardiness) ของแต่ละคำสั่งซื้อให้ต่ำที่สุด

3. คำอธิบายปัญหาและการพัฒนาตัวแบบ

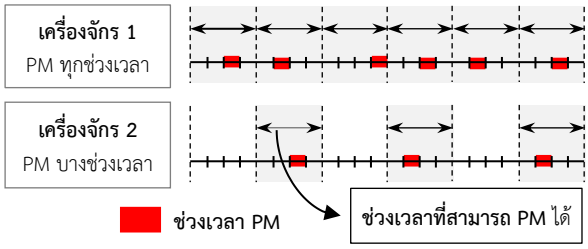
สำหรับปัญหาการจัดตารางการผลิตในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้มุ่งเน้นศึกษาปัญหา APS พร้อมทั้งมีการพิจารณาโครงสร้างผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วนย่อยในโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับด้วย ซึ่งตัวอย่างอย่างง่ายของโครงสร้างผลิตภัณฑ์แสดงได้ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 มี A1 เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่ง A1 มีส่วนประกอบย่อยคือ B1 และ C1 ส่วนประกอบย่อย B1 ถูกสร้างขึ้นมาจากส่วนประกอบ C2 และ C3 ส่วน C1 นั้นจะต้องมีการดำเนินการย่อยอีก 3 รายการนั่นคือ P1-P3 ดังนั้น C1 จึงมีชิ้นส่วนลูก (Child items) อยู่อีก 3 ชิ้นส่วน ได้แก่ C1P1 C1P2 และ C1P3 นอกจากนี้ แต่ละชิ้นส่วนยังมีข้อจำกัด คือ ชิ้นส่วนในระดับที่ต่ำกว่า (Child items) จะต้องผลิตหรือทำจนแล้วเสร็จก่อนที่จะทำหรือผลิตชิ้นส่วนในระดับที่สูงกว่า (Parent items)



รูปที่ 1 ตัวอย่างของโครงสร้างผลิตภัณฑ์อย่างง่าย

สำหรับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ มีการพัฒนาและปรับปรุงตัวแบบมาจากงานวิจัยของ Öztürk and Ornek [11] โดยนำตัวแบบ MIP มาใช้ในการแก้ปัญหา APS มีเป้าหมายคือ เพื่อทำให้ค่าปรับรวม ได้แก่ ค่าปรับเนื่องจากการว่างงานของเครื่องจักร (Idle time) ค่าปรับเนื่องจากการผลิตเสร็จเร็วกว่า หรือช้ากว่ากำหนดการส่งมอบ (Earliness or tardiness) ของแต่ละคำสั่งซื้อให้ต่ำที่สุด โดยพิจารณาข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตของเครื่องจักร การจัดลำดับงาน เวลานำ (Lead time) และวันกำหนดการส่งมอบสินค้า (Due date) ในปัญหาที่มีหลายคำสั่งซื้อ หลายเครื่องจักร ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับ ซึ่งบางชิ้นส่วนของแต่ละผลิตภัณฑ์สามารถใช้ร่วมกันได้ และแต่ละชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์สามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรใดๆ ในกลุ่มของเครื่องจักรกำหนดไว้ พร้อมทั้งมีการนำเรื่องของการบำรุงรักษาเครื่องจักรมาพิจารณา โดยจะมีการเพิ่มข้อจำกัดของช่วงเวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) เข้าไป ซึ่งจะแบ่งให้เครื่องจักรทุกเครื่องทำ PM เป็นช่วงเวลา (Time window) (ช่วงเวลาที่เป็นแถบสีเทา) ที่สามารถยืดหยุ่นเวลาการทำ PM ได้ และแต่ละเครื่องจักรอาจจะมีการทำการ PM แตกต่างกันไป ตัวอย่างการ PM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งกำหนดให้แกน x เป็นเวลาในการผลิต



รูปที่ 2 ตัวอย่างการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ข้อสมมติ สำหรับปัญหา APS ที่มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ณ เวลาใดๆ แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตในกลุ่มของเครื่องจักรที่กำหนดไว้ (Alternative machines) ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกใช้เครื่องจักรในการผลิตได้เพียงเครื่องเดียวเท่านั้น
2) ณ เวลาใดๆ แต่ละเครื่องจักรสามารถผลิตได้เพียงชิ้นส่วนเดียวเท่านั้น
3) เมื่อชิ้นส่วนถูกเลือกผลิตในเครื่องจักรใดๆ แล้วจะต้องผลิตอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถหยุดผลิตหรือนำชิ้นส่วนนั้นลงจากเครื่องจักรได้จนกว่าจะทำจนแล้วเสร็จ
4) กำหนดให้เวลาในการ PM ถูกกำหนดไว้แล้ว ด้วยช่วงเวลาที่แน่นอน (แสดงตัวอย่างการกำหนดการ PM ดังรูปที่ 2)
5) ในขณะที่ทำ PM นั้น เครื่องจักรจะต้องว่างอยู่ ไม่ผลิตชิ้นส่วนใดๆ
6) กำหนดให้เวลาที่แล้วเสร็จของการ PM ในแต่ละช่วงเวลาต้องอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนดเท่านั้น โดยที่เครื่องจักรแต่ละเครื่องถูกกำหนดเวลาทำงานไว้แล้ว
7) กำหนดให้ ใน 1 วัน มีชั่วโมงการทำงาน 8 ชั่วโมง

4. ตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ของปัญหา APS

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ของปัญหา APS โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ตัวแบบพื้นฐานของปัญหา APS ที่แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกดำเนินการได้หลายเครื่องจักร (Alternative machines) และตัวแบบของปัญหา APS ที่กำหนดให้มีการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ตัวแบบพื้นฐานของปัญหา APS ที่แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตได้หลายเครื่องจักร (Alternative machines)

ตัวแบบทางกำหนดการทางคณิตศาสตร์ของปัญหา APS ของงานวิจัยนี้ ถูกพัฒนามาจากงานวิจัยของ Öztürk and Ornek [11] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดัชนี (Indices)

i, j คือ หมายเลขของคำสั่งซื้อ โดยที่ $i, j = 1,\ldots,n$

p, q คือ หมายเลขของชิ้นส่วน โดยที่ $p, q = 1,\ldots,b$

k คือ หมายเลขของเครื่องจักร โดยที่ $k = 1,\ldots,m$

พารามิเตอร์ (Parameters)

n คือ จำนวนคำสั่งซื้อ

b คือ จำนวนชิ้นส่วน

m คือ จำนวนเครื่องจักร

R คือ เซตของคู่ชิ้นส่วนที่ต้องทำก่อนและหลัง ของ (p,q) เช่น ชิ้นส่วน p ต้องถูกดำเนินการก่อนชิ้นส่วน q เป็นต้น

t_{pk} คือ เวลาที่ชิ้นส่วน p ต้องใช้ดำเนินการบนเครื่องจักร k

r_k คือ เวลาที่เครื่องจักร k พร้อมใช้งาน

d_i คือ กำหนดวันส่งมอบสินค้าของคำสั่งซื้อ i

I คือ ค่าปรับจากการว่างงานของเครื่องจักร

TC_i คือ ค่าปรับจากการที่แต่ละคำสั่งซื้อ i เสร็จล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนด

EC_i คือ ค่าปรับจากการที่แต่ละคำสั่งซื้อ i เสร็จก่อนเวลาที่กำหนด

M คือ จำนวนเต็มบวกที่มีค่ามาก

F_p คือ เซตของเครื่องจักรที่ชิ้นส่วน p สามารถใช้งานได้

P_i คือ ชิ้นส่วนสุดท้ายของคำสั่งซื้อที่ i

ตัวแปรตัดสินใจ (Variables)

$C_{\max}$ คือ เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Makespan)

S_p คือ เวลาเริ่มการผลิตของชิ้นส่วน p

C_i คือ เวลาการผลิตที่แล้วเสร็จของคำสั่งซื้อ i

L_i คือ จำนวนวันที่งานล่าช้ากว่ากำหนดวันส่งมอบ (จำนวนจริง) ของคำสั่งซื้อ i

E_i คือ จำนวนวันที่งานเสร็จก่อนกำหนดวันส่งมอบ (จำนวนจริง) ของคำสั่งซื้อ i

$L_i^{'}$ คือ จำนวนวันที่งานล่าช้ากว่ากำหนดวันส่งมอบ (จำนวนเต็ม) ของคำสั่งซื้อ i

$E_i^{'}$ คือ จำนวนวันที่งานเสร็จก่อนกำหนดวันส่งมอบ (จำนวนเต็ม) ของคำสั่งซื้อ i

Y_{pqk} คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าชิ้นส่วน p ทำก่อนชิ้นส่วน q บนเครื่องจักร k และมีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีอื่นๆ

Z_{pk} คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าชิ้นส่วน p ถูกเลือกให้ดำเนินการบนเครื่องจักร k และมีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีอื่นๆ

โดยมีรูปแบบของตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

$$Min\left\{ I\left(m\times C_{\max} - \sum_{p=1}^{b}\sum_{k\in F_p} t_{pk}\times Z_{pk} - \sum_{k=1}^{m} r_k \right) + \sum_{i=1}^{n}\left(TC_i \times L_i^{'} + EC_i \times E_i^{'} \right) \right\} \quad (1)$$

Subject to:

$$C_i \le C_{\max} \qquad \forall i, \quad (2)$$

$$S_p \ge \sum_{k\in F_p} r_k \times Z_{pk} \qquad \forall p, \quad (3)$$

$$S_q \ge S_p + \sum_{k\in F_p} t_{pk}\times Z_{pk} \qquad (p,q)\in R, \quad (4)$$

$$S_{P_i} + \sum_{k\in F_{P_i}} t_{P_i k}\times Z_{P_i k} = C_i \qquad \forall i, \quad (5)$$

$$S_q \ge S_p + t_{pk}\times Z_{pk} - M\times\left(1-Y_{pqk}\right)$$
$$\forall p,q,k \,|\, k\in F_q\cap F_p, p<q, \quad (6)$$

$$S_p \ge S_q + t_{qk}\times Z_{qk} - M\times\left(1-Y_{qpk}\right)$$
$$\forall p,q,k \,|\, k\in F_q\cap F_p, p<q, \quad (7)$$

$$Z_{pk} + Z_{qk} \ge 2\times\left(Y_{pqk}+Y_{qpk}\right)$$
$$\forall p,q,k \,|\, k\in F_q\cap F_p, p<q, \quad (8)$$

$$Z_{pk} + Z_{qk} \le Y_{pqk} + Y_{qpk} + 1$$
$$\forall p, q, k \,|\, k \in F_q \cap F_p,\ p < q, \qquad (9)$$

$$\sum_{k \in F_p} Z_{pk} = 1 \qquad \forall p, \qquad (10)$$

$$\frac{C_i}{8} - d_i \le L_i \qquad \forall i, \qquad (11)$$

$$d_i - \frac{C_i}{8} \le E_i \qquad \forall i, \qquad (12)$$

$$L_i^{'} \ge L_i \qquad \forall i, \qquad (13)$$

$$E_i^{'} \ge E_i - 0.99 \qquad \forall i, \qquad (14)$$

$$\sum_{k \notin F_p} Z_{pk} \le 0 \qquad \forall p, \qquad (15)$$

$$C_{\max} \ge 0 \qquad (16)$$

$$S_p \ge 0 \qquad \forall p, \qquad (17)$$

$$C_i, E_i, L_i \ge 0 \qquad \forall i, \qquad (18)$$

$$E_i^{'}, L_i^{'} \ge 0, \text{ integer} \qquad \forall i, \qquad (19)$$

$$Y_{pqk}, Z_{pk} \in \{0,1\} \qquad \forall p, q, k \qquad (20)$$

สมการที่ (1) แสดงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ การทำให้ค่าปรับเนื่องจากการว่างงานของเครื่องจักร ค่าปรับเนื่องจากงานเสร็จก่อนเวลาที่กำหนด และค่าปรับเนื่องจากงานเสร็จล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนดนั้นต่ำที่สุด อสมการที่ (2) แสดงให้เห็นว่า เวลาในการผลิตของแต่ละคำสั่งซื้อจะต้องไม่เกินเวลาที่งานทุกงานในการผลิตเสร็จสมบูรณ์ อสมการที่ (3) เวลาเริ่มการผลิตชิ้นส่วน p จะต้องไม่น้อยกว่าเวลาพร้อมใช้งานของเครื่องจักรที่ถูกเลือกให้ผลิตชิ้นส่วน p อสมการที่ (4) เวลาเริ่มต้นของชิ้นส่วนที่ต้องทำทีหลัง จะต้องไม่น้อยกว่าเวลาเสร็จสิ้นของชิ้นส่วนที่ต้องทำก่อนเสมอ สมการที่ (5) แสดงเวลาแล้วเสร็จของแต่ละคำสั่งซื้อ i อสมการที่ (6) แสดงให้เห็นว่า ที่เวลาใดๆ หากชิ้นส่วน p ถูกกำหนดให้ทำก่อนชิ้นส่วน q บนเครื่องจักร k เวลาการเริ่มต้นของชิ้นส่วน q จะต้องไม่น้อยกว่าเวลาแล้วเสร็จของชิ้นส่วน p อสมการที่ (7) แสดงให้เห็นว่า ที่เวลาใดๆ หากชิ้นส่วน q ถูกกำหนดให้ทำก่อนชิ้นส่วน p บนเครื่องจักร k เวลาการเริ่มต้นของชิ้นส่วน p จะต้องไม่น้อยกว่าเวลาแล้วเสร็จของชิ้นส่วน q อสมการที่ (8) และ อสมการที่ (9) กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Z_{pk}, Z_{qk}, Y_{pqk} และ Y_{qpk} สมการที่ (10) แต่ละชิ้นส่วนจะต้องถูกกำหนดให้ดำเนินการบนเครื่องจักรใดเครื่องจักรหนึ่งเท่านั้น ในเซตของเครื่องจักรที่กำหนดไว้ อสมการที่ (11) และ (12) แสดงเวลาที่งานเสร็จก่อนเวลาที่กำหนดและเวลาที่เสร็จล่าช้ากว่ากำหนดของแต่ละคำสั่งซื้อ (C_i ซึ่งมีหน่วยเป็นชั่วโมง ถูกหารด้วย 8 ตามเวลาการทำงานใน 1 วัน ซึ่งเท่ากับ 8 ชั่วโมง เพื่อทำให้หน่วยเป็นไปตามหน่วยของค่าปรับซึ่งมีหน่วยเป็นวัน) อสมการที่ (13) และ (14) แสดงเวลาที่เสร็จก่อนเวลาที่กำหนดและเวลาที่เสร็จล่าช้ากว่ากำหนดของแต่ละคำสั่งซื้อที่เป็นจำนวนเต็ม และอสมการที่ (15) ป้องกันการกำหนดชิ้นส่วนใดๆ ไปดำเนินการบนเครื่องจักรที่ไม่ได้กำหนดไว้ และข้อจำกัดที่ (16) - (20) เป็นการกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรตัดสินใจ

4.2 ตัวแบบของปัญหา APS ที่กำหนดให้มีการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM)

สำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันหรือ PM ในตัวแบบนี้ จะแบ่งให้เครื่องจักรทุกเครื่องทำ PM เป็นช่วงเวลา (Time window) และแต่ละช่วงเวลาสามารถยืดหยุ่นได้ในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในส่วนของตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาเป็นข้อจำกัดเพิ่มเติมเรื่องของ PM นั้น ได้ปรับปรุงมาจากงานวิจัย [16] โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

กำหนดดัชนีเพิ่มเติม

l คือ หมายเลขของงาน PM โดยที่ $l = 1, \ldots, s$

กำหนดเซตเพิ่มเติม

PMT_k คือ เซตของงาน PM ของเครื่องจักร k

กำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติม

s คือ จำนวนการ PM ทั้งหมด

TM_{kl} คือ เวลาที่ใช้ในการ PM ครั้งที่ l ของเครื่องจักร k

EM_{kl} คือ เวลาที่ทำ PM ครั้งที่ l เสร็จเร็วที่สุดของเครื่องจักร k

LM_{kl} คือ เวลาที่ทำ PM ครั้งที่ l เสร็จล่าช้าที่สุดของเครื่องจักร k

กำหนดตัวแปรตัดสินใจเพิ่มเติม

FM_{kl} คือ เวลาที่งาน PM ครั้งที่ l แล้วเสร็จของเครื่องจักร k

PM_{pkl} คือ ตัวแปรตัดสินใจ มีค่าเท่ากับ 1 ถ้าชิ้นส่วน p ทำก่อนงาน PM ครั้งที่ l บนเครื่องจักร k และมีค่าเท่ากับ 0 ในกรณีอื่นๆ

และมีรูปแบบของตัวแบบกำหนดการทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์: สมการที่ (1) (จากหัวข้อ 4.1)

Subject to: สมการและอสมการที่ (2) ถึง (20) (จากหัวข้อ 4.1) และ

$$S_p - FM_{kl} + M \times PM_{pkl} \geq 0$$
$$\forall p,k \in F_p, l \in PT_k \quad (21)$$

$$FM_{kl} - TM_{kl} - \left(S_p + t_{pk} \times Z_{pk}\right) + M \times \left(1 - PM_{pkl}\right) \geq 0$$
$$\forall p,k \in F_p, l \in PT_k \quad (22)$$

$$EM_{kl} \leq FM_{kl} \leq LM_{kl} \qquad \forall k \in F_p, l \in PT_k \quad (23)$$

$$PM_{pkl} \in \{0,1\} \quad (24)$$

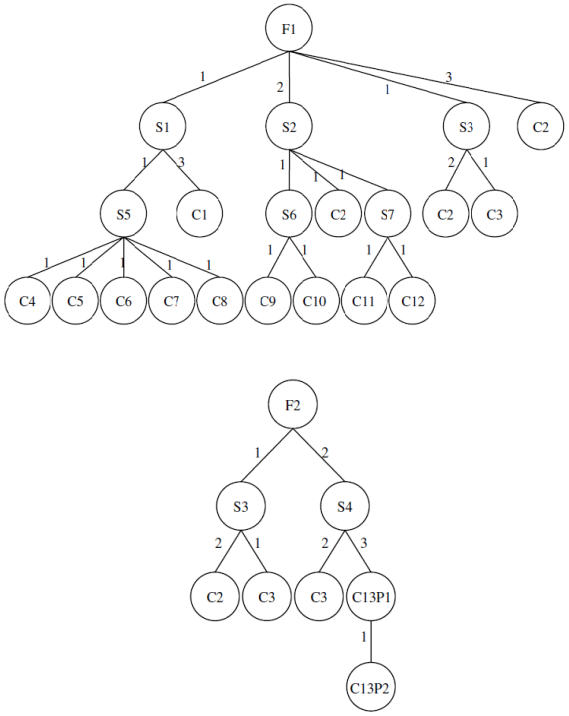
$$FM_{kl} \geq 0 \qquad \forall k,l \in PT_k \quad (25)$$

จากอสมการที่ (21) แสดงให้เห็นว่า ณ เครื่องจักร k ใดๆ ถ้ามีชิ้นส่วน p ถูกดำเนินการหลังจากงาน PM ที่ l บนเครื่องจักร k แล้ว เวลาเริ่มต้นในการผลิตชิ้นส่วน p ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเวลาที่งาน PM ที่ l บนเครื่องจักร k เสร็จสิ้น อสมการที่ (22) แสดงให้เห็นว่า ณ เครื่องจักร k ใดๆ ถ้ามีชิ้นส่วน p ถูกดำเนินการก่อนที่งาน PM ที่ l บนเครื่องจักร k แล้ว เวลาเสร็จสิ้นของการผลิตชิ้นส่วน p ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับเวลาเริ่มต้นของงาน PM ที่ l บนเครื่องจักร k และอสมการที่ (23) แสดงให้เห็นว่า เวลาในการทำงาน PM แล้วเสร็จจะต้องอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนด และข้อจำกัดที่ (24) และ (25) เป็นการกำหนดคุณสมบัติของตัวแปรตัดสินใจ

5. ตัวอย่างการหาคำตอบและอภิปรายผล

ในหัวข้อนี้แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถูกพัฒนาและปรับปรุงในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยข้อมูลตัวอย่างจะใช้ข้อมูลเดียวกับงานวิจัยของ Chen and Ji [8] และ Öztürk and. Ornek [11] ซึ่งพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์ 4 ระดับ ดังรูปที่ 3

โดยจะมีการหาคำตอบและเปรียบเทียบผลการหาคำตอบจากลักษณะของตัวแบบที่แตกต่างกันเป็น 4 แบบ คือ 1) ตัวแบบ APS1 แต่ละชิ้นส่วนสามารถผลิตได้เพียงเครื่องจักรเดียวเท่านั้น (APS without alternative machines) 2) ตัวแบบ APS1PM คล้ายคลึงกับแบบที่ 1 แต่พิจารณาการบำรุงรักษาเชิงป้องกันด้วย (APS without alternative machines and PM) 3) ตัวแบบ APS2 แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ให้ (APS with alternative machines) และ 4) ตัวแบบ APS2PM คล้ายคลึงกับแบบที่ 3 แต่พิจารณาการบำรุงรักษาเชิงป้องกันด้วย (APS with alternative machines and PM) ซึ่งการหาคำตอบจากทั้ง 4 แบบดังที่กล่าวมานั้น ใช้ตัวแบบ APS เดียวกันทั้งหมด (แสดงดังข้อ 4.1) ยกเว้นตัวแบบ APS1PM และตัวแบบ APS2PM ที่มีการนำสมการข้อจำกัดของการ PM มาพิจารณาด้วย (แสดงดังข้อ 4.2) และตัวแบบ APS1 และตัวแบบ APS1PM นั้น จะกำหนดให้ F_p มีเพียงเครื่องจักรเดียว สำหรับทุกๆ p



รูปที่ 3 โครงสร้างผลิตภัณฑ์ 4 ระดับของข้อมูลตัวอย่าง

5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับอธิบายปัญหา

5.1.1 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับทุกตัวแบบ

มีเครื่องจักร 5 เครื่อง โดยเครื่องจักรแต่ละเครื่องทำงานได้ 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งกำหนดเวลาที่เครื่องจักรพร้อมใช้งาน (Ready time) เวลาที่ใช้ในการผลิตแต่ละชิ้นส่วนของแต่ละเครื่องจักร และเซตของเครื่องจักรที่แต่ละชิ้นส่วนสามารถทำงานได้ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เวลาที่เครื่องจักรพร้อมใช้งาน และเวลาในการดำเนินการของแต่ละชิ้นส่วน

ชิ้นส่วน	เครื่องจักร (ชั่วโมง)				
	1	2	3	4	5
F1				0.4	0.7*
F2				0.3	0.6*
S1				0.7*	0.5
S2				0.3	0.5*
S3				0.6*	0.4
S4				0.5*	0.6
S5				0.3	0.4*
S6				0.4*	0.2

ชิ้นส่วน	เครื่องจักร (ชั่วโมง)				
	1	2	3	4	5
S7				0.3*	0.4
C1	0.1	0.2	0.2*		
C2	0.1	0.2	0.3*		
C3				0.4	0.3*
C4	0.1*	0.3			
C5	0.2*	0.4			
C6	0.3*	0.2			
C7	0.1	0.3*			
C8	0.3	0.4*			
C9	0.4*	0.6			
C10	0.5	0.2*			
C11	0.1*		0.3		
C12	0.2*	0.3			
C13P1	0.4	0.2	0.3*		
C13P2	0.2	0.3*			
เวลาที่เครื่องจักรพร้อมใช้งาน (r_i)	1	2	3	2	1

หมายเหตุ * หมายถึง เครื่องจักรที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการผลิตแต่ละชิ้นส่วนของตัวแบบ APS1 และตัวแบบ APS1PM

มีคำสั่งซื้อ 5 คำสั่งซื้อ ได้แก่ 1) F1 จำนวน 10 ชิ้น เวลาส่งมอบ 12 วัน 2) F2 จำนวน 5 ชิ้น เวลาส่งมอบ 14 วัน 3) S1 จำนวน 10 ชิ้น เวลาส่งมอบ 11 วัน 4) C2 จำนวน 30 ชิ้น เวลาส่งมอบ 2 วัน และ 5) C3 จำนวน 15 ชิ้น เวลาส่งมอบ 10 วัน

และค่าปรับต่างๆ ได้แก่ ค่าปรับเนื่องจากเครื่องจักรว่างงาน 50 ดอลลาร์สหรัฐต่อชั่วโมง ค่าปรับจากงานเสร็จก่อนเวลาที่กำหนด 50 ดอลลาร์สหรัฐต่อชั่วโมง และค่าปรับจากงานเสร็จล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนด 250 ดอลลาร์สหรัฐต่อชั่วโมง (กำหนดให้ ค่าปรับต่างๆ เท่ากันในทุกงาน คือ $EC_i = 50 \quad \forall i,\ TC_i = 250 \quad \forall i,$)

5.1.2 พารามิเตอร์สำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบช่วงเวลา

กำหนดให้มีการแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 8 ช่วง ช่วงละ 8 ชั่วโมง (สมมติช่วงเวลา PM โดยพิจารณาจาก makespan ของงานวิจัย [11]) เครื่องจักรแต่ละเครื่องจะต้องใช้เวลาในการ PM (TM_{kl}) แตกต่างกัน โดยเวลาที่ทำ PM แล้วเสร็จ จะต้องอยู่ในช่วงเวลาการ PM แล้วเสร็จเร็วที่สุด (EM_{kl}) และช้าที่สุด (LM_{kl}) และกำหนดให้ผลต่างของระยะเวลาระหว่าง PM แล้วเสร็จช้าที่สุด และเร็วที่สุด ($LM_{kl} - EM_{kl}$) เท่ากับเวลาที่ใช้ในการ PM ของเครื่องจักรนั้นๆ เช่น หากเวลาที่ใช้ในการ PM ของเครื่องจักรที่ 1 เท่ากับ 1 ชั่วโมงต่อครั้ง เวลาในการ PM แล้วเสร็จเร็วที่สุดและช้าที่สุด ในชั่วโมงที่ 13 และชั่วโมงที่ 14 ตามลำดับ เป็นต้น ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวและจำนวนครั้งของการ PM ของแต่ละเครื่องจักร แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแบ่งช่วงเวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของแต่ละเครื่องจักร

เครื่องจักร	เวลาที่ใช้ในการ PM (ชั่วโมง/ครั้ง) (TM_{kl})	จำนวนครั้งในการ PM (ครั้ง)(CP_k)	ครั้งที่	เวลาในการ PM แล้วเสร็จเร็วที่สุด (ชั่วโมงที่) (EM_{kl})	เวลาในการ PM แล้วเสร็จช้าที่สุด (ชั่วโมงที่) (FM_{kl})
1	1	4	1	15	16
			2	30	31
			3	45	46
			4	60	61
2	2	2	1	20	22
			2	40	42
3	3	1	1	50	53
4	3	1	1	50	53
5	2	2	1	20	22
			2	40	42

หมายเหตุ: PM หมายถึง การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการแก้ปัญหาของแต่ละตัวแบบฯ

ปัญหา	จำนวนสมการข้อจำกัด	จำนวนตัวแปรทั้งหมด	จำนวนตัวแปรที่เป็นจำนวนจริง	เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ ($C_{\max}$) (ชั่วโมง)	เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (วินาที)
1. ตัวแบบ APS1	1152	337	10	57	5.277
2. ตัวแบบ APS1PM	1311	425	10	60	12.588
3. ตัวแบบ APS2	6209	1671	10	50.5	7023.98
4. ตัวแบบ APS2PM	6595	1874	10	47	6170.03

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของแต่ละตัวแบบ วัดผลจากเวลาการส่งมอบ (Due date)

ปัญหา	จำนวน			ค่าใช้จ่าย (ดอลลาร์สหรัฐฯ)			ค่าใช้จ่ายรวม
	งานเสร็จก่อน (วัน)	งานเสร็จล่าช้า (วัน)	เครื่องจักรว่างงาน/PM (ชั่วโมง)	งานเสร็จก่อน	งานเสร็จล่าช้า	เครื่องจักรว่างงาน/PM	
1. ตัวแบบ APS1	17	6	84	850	1500	4200	6550
2. ตัวแบบ APS1PM	16	6	99*	800	1500	4950*	7250
3. ตัวแบบ APS2	21	0	38.5	1050	0	1925	2975
4. ตัวแบบ APS2PM	27	0	42.5*	1350	0	2125*	3475

หมายเหตุ: * หมายถึง จำนวนเวลาและค่าใช้จ่าย กรณีเครื่องจักรว่างงานรวมเวลาการ PM ด้วย

5.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบ

การทดสอบตัวแบบฯ นี้ ถูกดำเนินการด้วยคอมพิวเตอร์พกพาที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU@ 2.50 GHz หน่วยความจำหลัก (Ram) 4.00 GB และระบบ ปฏิบัติการ (OS) Microsoft Window 7 Ultimate 64 bit Operating System และใช้ซอฟแวร์ Gurobi Solver 5.6.2 ในการช่วยหาคำตอบของตัวแบบกำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม ซึ่งผลการหาคำตอบของตัวแบบทั้ง 4 แบบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

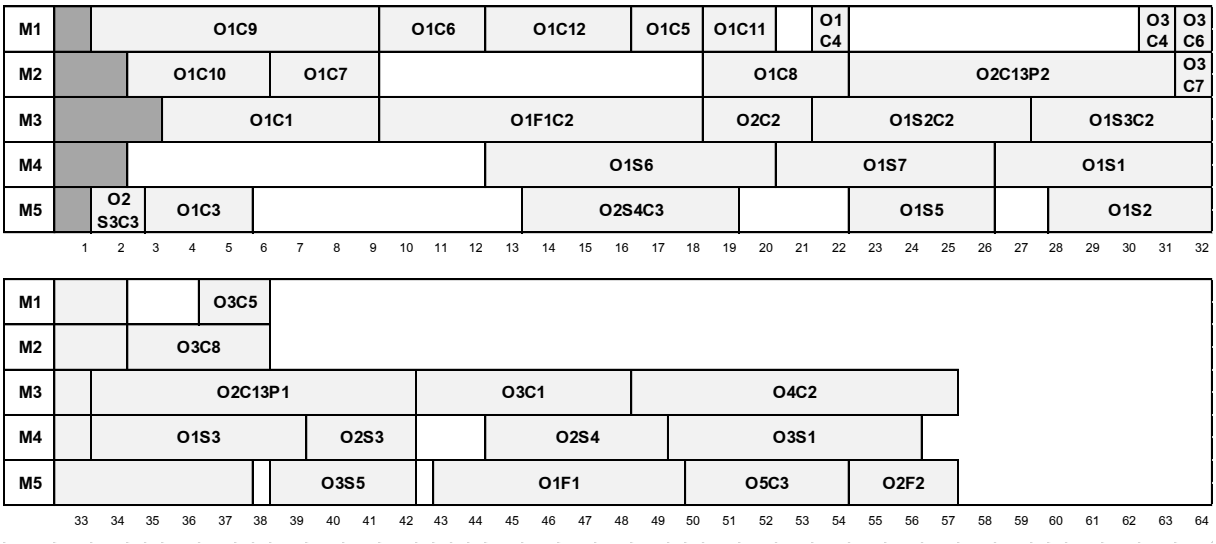
5.2.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบ APS1

จากรูปที่ 3 จะอธิบายความหมายของสัญลักษณ์บนแผนภูมิแกนต์ ซึ่งแกน x แสดงเวลาในการผลิต หน่วยเป็นชั่วโมง และชิ้นส่วนที่ถูกใช้ร่วมกันกับหลายโครงสร้างผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น O1F1C2 คือ ชิ้นส่วน C2 เป็นชิ้นส่วนในระดับที่ต่ำกว่า (Child item) ของ F1 (Parent item) ของคำสั่งซื้อที่ 1 แต่ในกรณีที่เป็น O4C2 นั้น ชิ้นส่วน C2 เป็นคำสั่งซื้อที่ 4 ไม่มีชิ้นส่วนในระดับที่สูงกว่า (No parent item) เป็นต้น แผนภูมิแกนต์นี้แสดงตารางการผลิตที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด และจากตารางที่ 4 พบว่าค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของปัญหานี้ เท่ากับ 6,550 ดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายเนื่องจากเครื่องจักรว่างงาน 84 ชั่วโมง คิดเป็น 4,200 ดอลลาร์สหรัฐฯ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากงานเสร็จก่อนวันส่งมอบ 17 ชั่วโมงคิดเป็น 850 ดอลลาร์สหรัฐฯ และค่าใช้จ่ายเนื่องจากงานเสร็จหลังวันส่งมอบ 6 ชั่วโมงคิดเป็น 1,500 ดอลลาร์สหรัฐฯ และจากตารางที่ 3 พบว่า เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Makespan) เท่ากับ 57 ชั่วโมง

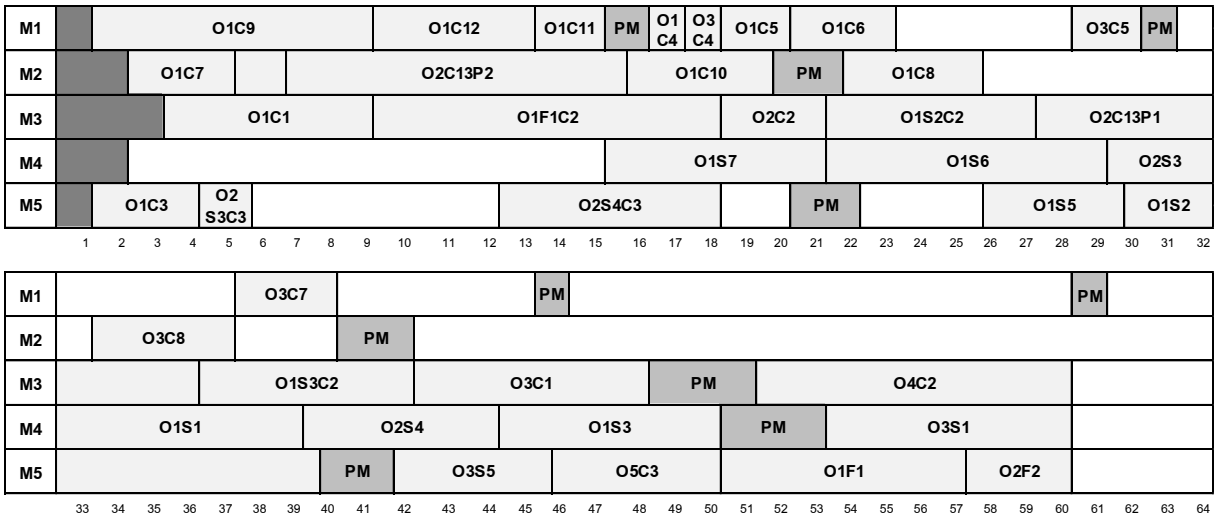
5.2.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบ APS1PM

ผลจากการเพิ่มการพิจารณาข้อจำกัดเรื่องการ PM ในตัวแบบ APS1 นั้น จากตารางที่ 3 พบว่า ทำให้มีจำนวนสมการข้อจำกัด จำนวนตัวแปร เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่ม PM เข้าไปนั้น จะเป็นการไปเพิ่มข้อจำกัดให้การหาคำตอบมีความซับซ้อนขึ้น เพราะจะต้องคำนึงถึงการ PM ซึ่งถูกกำหนดไว้แล้วด้วยช่วงเวลาต่างๆ กัน ดังนั้นนอกจากจะต้องจัดตารางการผลิตชิ้นส่วนใช้เครื่องจักรในเวลาที่เหมาะสมแล้ว ยังจะต้องตัดสินใจทำ PM ภายใต้ช่วงเวลาที่กำหนดให้ ให้ชิ้นส่วนนั้นสามารถผลิตกับเครื่องจักรได้โดยไม่ทำให้ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นต้องเสียเวลารอ

มากเกินไป เนื่องจากข้อสมมติที่ว่า เมื่อชิ้นส่วนถูกเลือกให้ผลิตในเครื่องจักรใดๆ แล้วจะต้องผลิตอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถหยุดผลิตหรือนำชิ้นส่วนนั้นลงจากเครื่องจักรได้จนกว่าจะทำจนแล้วเสร็จ ก็อาจทำให้เกิดช่องว่างของเวลาก่อนที่จะทำ PM ซึ่งส่งผลทำให้เครื่องจักรว่างงานโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ เพราะไม่สามารถป้อนชิ้นส่วนนั้นให้เครื่องจักรได้นั่นเอง ซึ่งผลจากตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายรวมที่เพิ่มขึ้นจากผลของตัวแบบ APS1 ซึ่งไม่พิจารณา PM จะเห็นได้ว่า ค่าใช้จ่ายในส่วนที่งานเสร็จก่อนวันส่งมอบลดลง 1 ชั่วโมง แต่สิ่งที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมสูงขึ้น ก็คือ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากเครื่องจักรว่างงาน ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 99 ชั่วโมง คิดเป็นเงิน 4,950 ดอลลาร์สหรัฐฯ จากเดิม 84 ชั่วโมง ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 15 ชั่วโมง ซึ่งเกิดจากเหตุผลที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้นั่นเอง นอกจากนี้ การทำ PM ยังส่งผลต่อเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ด้วย ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็น 60 ชั่วโมง จากตัวแบบ APS1 ซึ่งเท่ากับ 57 ชั่วโมง (ดังแผนภูมิแกนต์ในรูปที่ 4)



รูปที่ 3 แผนภูมิแกนต์ของตัวแบบ APS1



รูปที่ 4 แผนภูมิแกนต์ของตัวแบบ APS1PM

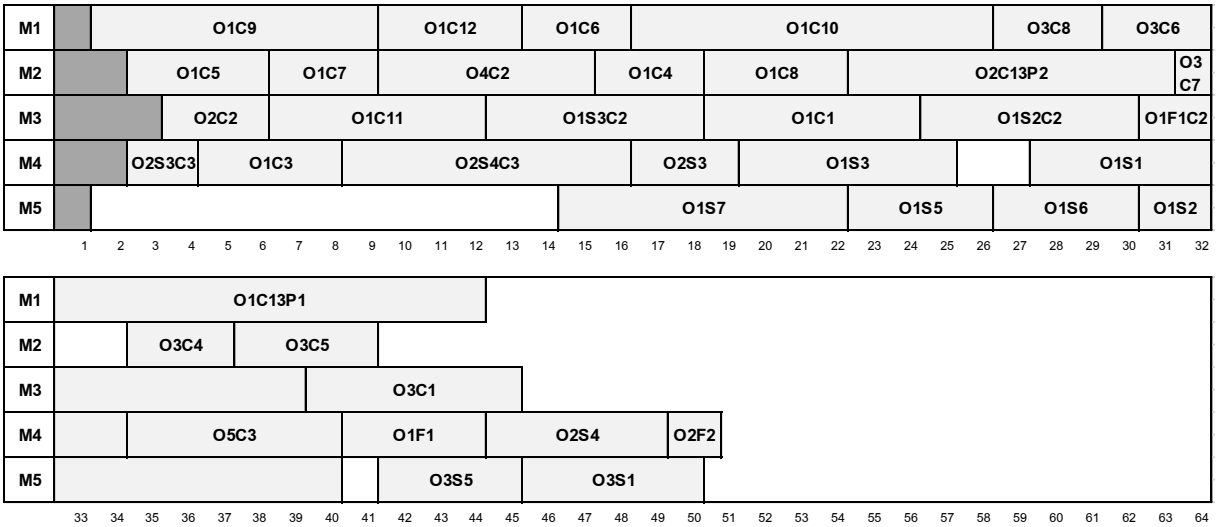
5.2.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบ APS2

ผลจากการกำหนดให้แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ให้ จากตารางที่ 3 พบว่า จำนวนสมการข้อจำกัด จำนวนตัวแปร และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบนั้นเพิ่มขึ้นมากกว่าผลจากตัวแบบ APS1 แต่เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์มีค่าลดลง ซึ่งเท่ากับ 50.5 ชั่วโมง เมื่อเปรียบกับผลของตัวแบบ APS1 (แต่ละชิ้นส่วน

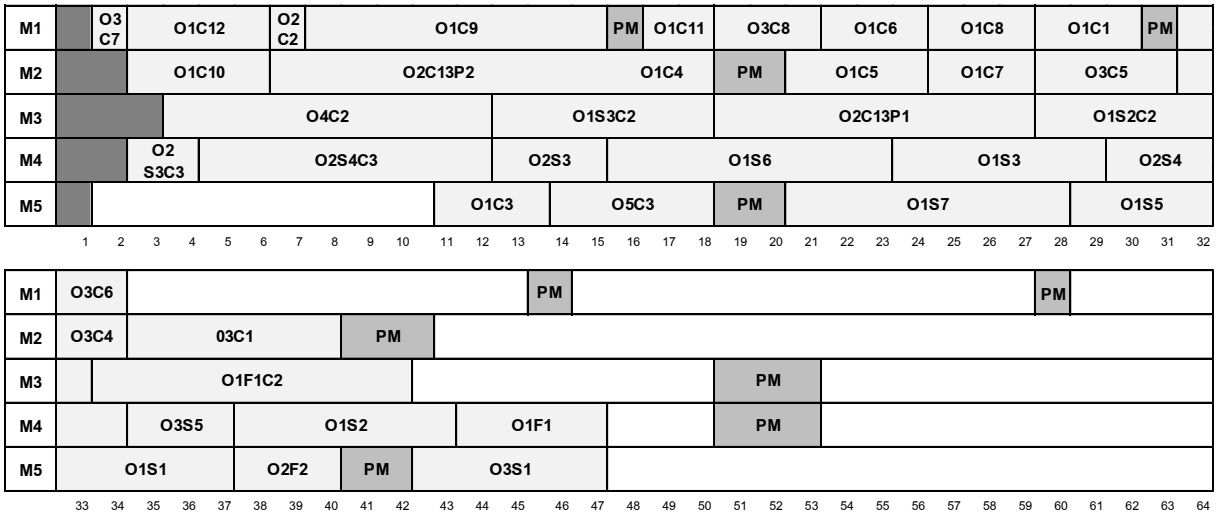
สามารถผลิตได้เพียงเครื่องจักรเดียวเท่านั้น) ซึ่งเท่ากับ 57 ชั่วโมง และผลที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดคือ การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวม (จากตารางที่ 4) ของการผลิตของแบบนี้เท่ากับ 2,970 ดอลลาร์สหรัฐฯ ลดลงไปมากหากเทียบกับผลของตัวแบบ APS1 ซึ่งเท่ากับ 6,550 ดอลลาร์สหรัฐฯ เนื่องจากการเพิ่มตัวเลือกของเครื่องจักรให้แต่ละชิ้นส่วนนั้นเป็นการลดเวลาในการรอการผลิตจากเครื่องจักรแต่ละเครื่อง ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรอื่นในกลุ่มที่กำหนดไว้ได้ หากมีเครื่องจักรว่างและพร้อมทำงานอยู่ ดังนั้นสิ่งที่ลดไปมาก ก็คือ เวลาที่เครื่องจักรว่างงาน ซึ่งลดไปได้ถึง 45.5 ชั่วโมง (เวลาที่เครื่องจักรว่างงาน จากตัวแบบ APS2 เท่ากับ 38.5 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับผลจากตัวแบบ APS1 ซึ่งเท่ากับ 84 ชั่วโมง) และเวลาที่งานแล้วเสร็จล่าช้ากว่าเวลาส่งมอบ โดยผลจากตัวแบบนี้ ไม่มีงานเสร็จล่าช้ากว่าเวลาส่งมอบเลย ซึ่งในส่วนนี้ก็ช่วยลดค่าใช้จ่ายรวมลงไปมาก แต่การวางแผนและจัดตารางการผลิตของตัวแบบ APS2 นี้ กลับทำให้เวลาที่งานเสร็จก่อนกำหนดเพิ่มขึ้น เท่ากับ 21 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับตัวแบบ APS1 เท่ากับ 17 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าเวลาที่งานเสร็จก่อนเวลาส่งมอบจะเพิ่มขึ้น แต่ผลของค่าใช้จ่ายรวมนั้นลดลงไปมาก ดังนั้น การเพิ่มทางเลือกของเครื่องให้กับระบบการผลิตนั้น จึงถือว่ามีผลอย่างมากต่อค่าใช้จ่ายรวมในการผลิต (ดังแผนภูมิแกนต์ในรูปที่ 5)

5.2.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากตัวแบบ APS2PM

ผลจากการเพิ่มการพิจารณาข้อจำกัดเรื่องการ PM ในตัวแบบนั้น จากตารางที่ 3 พบว่า การเพิ่มข้อจำกัดของการ PM เข้าไปในตัวแบบ APS2 ทำให้มีจำนวนสมการข้อจำกัด จำนวนตัวแปร และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่กลับทำให้เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์นั้นมีค่าน้อยลง และจากตารางที่ 4 พบว่า ผลจากตัวแบบนี้มีค่าใช้จ่ายรวม เท่ากับ 3,475 ดอลลาร์สหรัฐฯ มากกว่าผลของตัวแบบ APS2 แต่มีค่าน้อยกว่าผลของตัวแบบ APS1PM เนื่องจากการเพิ่มตัวเลือกของเครื่องจักรให้แต่ละชิ้นส่วนนั้นทำให้แต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรอื่นในกลุ่มที่กำหนดไว้ได้ หากมีเครื่องจักรว่างและพร้อมทำงานอยู่ ซึ่งส่งผลให้เวลาการว่างงานของเครื่องจักรลดลง ทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงไปด้วย นอกจากนี้ ผลของตัวแบบ APS2PM ยังทำให้ไม่มีงานใดเสร็จล่าช้ากว่ากำหนดวันส่งมอบ แต่ทำให้งานเสร็จก่อนกำหนดวันส่งมอบมากขึ้นกว่าผลของตัวแบบ APS1PM และ APS2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผลจากการเพิ่มข้อจำกัดของเครื่องจักรและการ PM ในตัวแบบนี้ จะทำให้มีจำนวนสมการข้อจำกัดและจำนวนตัวแปรมากกว่าผลจากตัวแบบทุกแบบ และทำให้ใช้เวลาในการหาคำตอบนานขึ้น แต่ตัวแบบนี้ก็มีความสมจริงมากกว่าตัวแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ระบบการผลิตทั่วไปต้องพิจารณา (ดังแผนภูมิแกนต์ในรูปที่ 6)



รูปที่ 5 แผนภูมิแกนต์ของตัวแบบ APS2



รูปที่ 6 แผนภูมิแกนต์ของตัวแบบ APS2PM

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและปรับปรุงตัวแบบของปัญหากำหนดการจำนวนเต็มแบบผสม (MIP) โดยใช้เทคนิคของ APS ในการพิจารณาข้อจำกัดในด้านกำลังการผลิตของเครื่องจักร การจัดลำดับงาน และเวลาส่งมอบ กับปัญหาที่มีหลายเครื่องจักร หลายคำสั่งซื้อและแต่ละผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างผลิตภัณฑ์หลายระดับและหลายชิ้นส่วน ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกทำงานได้กับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ โดยมีการเพิ่มการพิจารณาข้อจำกัดในเรื่องของกรอบเวลาของการบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกันที่มีความยืดหยุ่น โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อเป็นการทำให้ค่าปรับรวมในการผลิตให้ต่ำที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วยค่าปรับเนื่องจากเกิดการว่างงานของเครื่องจักร ค่าปรับเนื่องจากทำงานเสร็จก่อนเวลาที่กำหนด และค่าปรับเนื่องจากงานเสร็จล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนด โดยจะมีการแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และเปรียบเทียบผลการหาคำตอบจากลักษณะของตัวแบบที่แตกต่างกันเป็น 4 แบบ ซึ่งพบว่า เมื่อเปรียบเทียบตัวแบบ APS1 กับตัวแบบ APS1PM นั้น การเพิ่มข้อจำกัดการ PM ในตัวแบบ APS1 แต่ละชิ้นส่วนสามารถผลิตได้เพียงเครื่องจักรเดียวเท่านั้น พบว่า ทำให้ตัวแบบ APS1PM มีจำนวนสมการข้อจำกัด จำนวนตัวแปร เวลาในการหาคำตอบ เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ (Makespan) รวมไปถึงค่าใช้จ่ายโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบตัวแบบ APS2 กับตัวแบบ APS2PM พบว่า การเพิ่มข้อจำกัดการ PM ในตัวแบบ APS2 ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนสามารถเลือกผลิตกับเครื่องจักรในกลุ่มที่กำหนดไว้ให้ ทำให้ตัวแบบ APS2PM มีจำนวนสมการข้อจำกัด จำนวนตัวแปร เวลาในการหาคำตอบ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ลดลง นั่นเป็นเพราะว่าการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น มีผลกับเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์โดยตรง นั่นคือ เป้าหมายของงานวิจัยนี้ ต้องการให้มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด ดังนั้น ในการทดสอบตัวแบบนั้น จึงพยายามทำให้เวลาว่างงานของเครื่องจักร เวลาที่งานเสร็จก่อนและล่าช้ากว่ากำหนดมีค่าน้อยที่สุด โดยการคิดเวลาว่างงานของเครื่องจักรนั้น เกิดจาก การนำเวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์ ลบด้วยเวลาที่ใช้ไป ดังนั้น เมื่อชิ้นงานสามารถเลือกเครื่องจักรได้ ก็สามารถทำให้เวลาที่ใช้ในการผลิตเปลี่ยนแปลงไปได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลให้เวลาที่งานทุกงานเสร็จสมบูรณ์เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ ภายใต้การทำให้ค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุดนั่นเอง และในระบบการผลิตจริงนั้นส่วนใหญ่จะมีเครื่องจักรหลายเครื่องและเครื่องจักรแต่ละเครื่องก็จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาเครื่องจักรอยู่เสมอ ดังนั้นผลของตัวแบบ APS2PM จึงเป็นตัวแบบที่เหมาะสมและสมจริงมากที่สุดหากเทียบกับในสถานการณ์จริง

นอกจากนี้ แม้ว่าจะมีการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบการผลิตให้สามารถทำการผลิตได้รวดเร็วขึ้นและสามารถลดความเสี่ยงของการผลิตจากการเกิดการชำรุดเครื่องจักรได้แล้วนั้น ยังอาจจะเป็นไปได้ว่า ในบางผลิตภัณฑ์อาจจะมีบางชิ้นส่วนที่ไม่สามารถผลิตในโรงงานได้เนื่องมาจากเครื่องจักรไม่เพียงพอ หรือไม่มีเครื่องจักรใดสามารถผลิตชิ้นส่วนนั้นได้ จึงจะต้องมีสั่งผลิตชิ้นส่วนนั้นจากบริษัทหรือองค์การภายนอก (Outsource) เพื่อให้สามารถนำชิ้นส่วนนั้นมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ส่งมอบให้ลูกค้าได้ทันเวลาส่งมอบ ซึ่งการพิจารณากรณีนี้ก็เป็นอีกกรณีหนึ่งที่น่าสนใจและน่าศึกษาเพิ่มเติม โดยอาจจะนำวิธีฮิวริสติกส์ (Heuristics) และเมตาฮิวริสติกส์ (Metaheuristics) มาใช้ในการแก้ปัญหานี้ร่วมกับตัวแบบกำหนดการทาง

คณิตศาสตร์ด้วย เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้เมื่อขนาดของปัญหามีความซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ทั้งนี้ เพื่อทำให้ตัวแบบนั้นมีความสมจริงและครอบคลุมกับข้อจำกัดต่างๆ ของระบบการผลิตมากขึ้นนั่นเอง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] พิภพ ลลิตาภรณ์. การกำหนดตารางการผลิตและการควบคุม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553.

[2] K. Chen, P. Ji and Q. Wang, “A case study for advanced planning and scheduling (APS),” *Journal of Systems Science and Systems Engineering.,* Vol. 20, pp. 460-474, 2011.

[3] K. J. Chen and P. Ji, “A genetic algorithm for dynamic advanced planning and scheduling (DAPS) with a frozen interval,” *Expert Systems with Applications*., Vol. 33, pp. 1004-1010, 2007.

[4] Y. H. Lee, C. S. Jeong and C. Moon, “Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain,” *Computers & Industrial Engineering*., Vol. 43, pp. 351-374, 2002.

[5] C. Moon, J. S. Kim and M. Gen, “Advanced planning and scheduling based on precedence and resource constraints for e-plant chains,” *International Journal of Production Research*., Vol. 42, pp. 2941-2955, 2004.

[6] A. Okamoto, M. Gen and M. Sugawara, “Integrated data structure and scheduling approach for manufacturing and transportation using hybrid genetic algorithm,” *Journal of Intelligent Manufacturing.*, Vol. 17, pp. 411-421, 2006.

[7] H. Zhang and M. Gen, “Effective genetic approach for optimizing advanced planning and scheduling in flexible manufacturing system” presented at the Proceedings of the *8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. 8 July. USA: pp. 1841-1848, 2006.

[8] K. Chen and P. Ji, “A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling (APS),” *European Journal of Operational Research*., Vol. 181, pp. 515-522, 2007.

[9] Y. Peng, D. Lu and Y. Chen, “A Constraint Programming Method for Advanced Planning and Scheduling System with Multilevel Structured Products,” Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014.

[10] A. Örnek, S. Özpeynirci and C. Öztürk, “A note on “A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling (APS),” *European Journal of Operational Research*., Vol. 203, pp. 784-785, 2010.

[11] Ö. Cemalettin and O. A. M., “Operational extended model formulations for Advanced Planning and Scheduling systems,” *Applied Mathematical Modelling*., Vol. 38, pp. 181-195, 2014.

[12] L.-C. Kung and C.-C. Chern, “Heuristic factory planning algorithm for advanced planning and scheduling,” *Computers & Operations Research*., Vol. 36, pp. 2513-2530, 2009.

[13] Y. Pu, L. Dayou, Y. Donghui and Y. Ji, “Genetic Algorithm with Local Search for Advanced Planning and Scheduling,” in *Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)*. 24-27 Aug. Haikou: pp. 781-785, 2007.

[14] J.-S. Chen, "Scheduling of nonresumable jobs and flexible maintenance activities on a single machine to minimize makespan," *European Journal of Operational Research*., Vol. 190, pp. 90-102, 2008.

[15] M. Rebai, I. Kacem and K. Adjallah, "Earliness–tardiness minimization on a single machine to schedule preventive maintenance tasks: metaheuristic and exact methods," *Journal of Intelligent Manufacturing*., Vol. 23, pp. 1207-1224, 2012.

[16] R. Ramezanian, M. Saidi-Mehrabad and P. Fattahi, "MIP formulation and heuristics for multi-stage capacitated lot-sizing and scheduling problem with availability

constraints," *Journal of Manufacturing Systems*., vol. 32, pp. 392-401, 4// 2013.

[17] N. Sortrakul, H. L. Nachtmann and C. R. Cassady, "Genetic algorithms for integrated preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine," *Computers in Industry*., Vol. 56, pp. 161-168, 2005.

[18] F. Zammori, M. Braglia and D. Castellano, "Harmony search algorithm for single-machine scheduling problem with planned maintenance," *Computers & Industrial Engineering*., Vol. 76, pp. 333-346, 2014.

[19] A. Khamseh, F. Jolai, and M. Babaei, "Integrating sequence-dependent group scheduling problem and preventive maintenance in flexible flow shops," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*., Vol. 77, pp. 173-185, 2015.