

การจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกันภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร
ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของประเทศไทย

**Scheduling Unrelated Parallel Machines under Machine Eligibility Constraints in Thailand's
Hard Disk Drive Industry**

ชาตินักรบ แสงสว่าง (Chatnugrob Sangsawang)* กาญจนา เสธฐนันท์ (Kanchana Sethanun)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตที่เป็นเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกัน (Unrelated Parallel Machines) ภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร (Machine Eligibility Constraints) ระบบการผลิตที่พิจารณาเป็นขั้นตอนการทดสอบชิ้นงานซึ่งประกอบด้วย ชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ N ชนิด โปรแกรมการทดสอบ MG โปรแกรม และเครื่องทดสอบ MC เครื่อง โดยปัญหาที่พบคือเครื่องจักรที่ถูกตั้งค่าการทดสอบไว้ไม่เพียงพอต่อความต้องการทดสอบของชิ้นงาน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อให้เวลาแล้วเสร็จของงาน (makespan) ต่ำที่สุด โดยใช้การพัฒนาแบบทางคณิตศาสตร์และการพัฒนาอัลกอริทึม (Unrelated Parallel Machine under machine Eligibility Algorithm:UPMEA) ในการแก้ปัญหา จากการทดลองพบว่าอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพค่อนข้างดีโดยมีค่าแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดโดยเฉลี่ย 5.11%

ABSTRACT

This research addresses the scheduling problem in an unrelated parallel machines environment under machine eligibility constraints. The considered in this research is the testing workstation. There are N product type tested on totally MC machines in this station. Normally, the number of testy program is MG. Currently, the case study company comforts with the testing produce in term of unbalance between machines and products to be tested in acceptably time. The objective of this research is to minimize the makespan. A mathematical model was developed for small size problems and a heuristic algorithm (Unrelated Parallel Machine under machine Eligibility Algorithm:UPMEA) was developed to solve larger problems. Computational experiments were performed and the performance of the heuristic algorithm was measured. The experimental results show that the average deviation of the UPMEA from the optimal solution is 5.11%.

คำสำคัญ : การจัดตารางการผลิต เครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกัน อัลกอริทึม

Key Words : Scheduling, Unrelated Parallel Machines, Algorithm

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

การจัดตารางการผลิต (scheduling) เป็นสิ่งสำคัญในระบบการผลิตทุกอุตสาหกรรม ซึ่งการจัดตารางการผลิตจะมีผลสำคัญอย่างมาก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นตัวที่จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบการผลิตทั้งหมด การแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมในปัจจุบันจึงจำเป็นต้องแสวงหาวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาปรับปรุงและพัฒนากระบวนการจัดการการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในตลาดอุตสาหกรรม ปัญหาการจัดตารางการผลิตโดยทั่วไปจะมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกัน มีจุดประสงค์ในหลายด้าน เช่น เพื่อให้มีเวลาแล้วเสร็จต่ำที่สุด เพื่อให้มีปริมาณงานออกมากที่สุดหรือเพื่อให้มีต้นทุนในการผลิตรวมต่ำที่สุด แตกต่างกันไปตามรูปแบบของปัญหา ซึ่งปัจจุบันมีผู้ที่พยายามคิดค้นวิธีการหาคำตอบอยู่มากมาย โดย Dehua et al. (2009) ได้เสนอการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนาน โดยมีเงื่อนไขของคาบเวลาการใช้ประโยชน์จากเครื่องจักรได้ โดยเครื่องจักรหนึ่งเครื่องจะมีเงื่อนไขคาบเวลาที่ไม่แน่นอน มีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อให้มีเวลาแล้วเสร็จของงานต่ำที่สุด โดยประยุกต์ใช้ LPT algorithm และ LS algorithm ในแบบไม่เชื่อมต่อและเชื่อมต่อ Eun et al. (2009) ได้เสนอวิธีการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนาน ที่มีเงื่อนไขของลำดับงานเพื่อให้มีเวลาแล้วเสร็จของงานต่ำที่สุด โดยการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่มีลักษณะเหมือนกันหลายเครื่องโดยมีเงื่อนไขความสัมพันธ์กันของลำดับของงานก่อนและหลังตามแบบของ (s-precedence) โดยใช้วิธีการการโปรแกรมเชิงเส้นตรงบนพื้นฐานของฮิวริสติกการเรียงลำดับ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธี SPT อัลกอริทึม Grzegorz (2009) เสนอการจัดตารางการผลิตงานที่เป็นอิสระต่อกันและไม่สามารถแยกงานได้ให้กับ

เครื่องจักรแบบขนานภายใต้เงื่อนไขการจัดสรรเครื่องจักรอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีเวลาแล้วเสร็จของงานต่ำที่สุด โดยจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักรแบบขนานที่มีลักษณะเหมือนกัน โดยมีเงื่อนไขการใช้งานได้ของเครื่องจักร และอัตราการผลิตขึ้นกับจำนวนของเครื่องจักรที่จัดให้ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การสร้างฮิวริสติก และการประยุกต์วิธีเมตะฮิวริสติกด้วยวิธีทาบูลีซ์ในการหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด Pedro et al. (2008) ได้เสนอการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนาน ที่มีเงื่อนไขของลำดับงาน เวลาในการตั้งค่าเครื่องจักร (setup time) โดยใช้วิธีการขยายและจำกัดเขต (branch-and-bound) เปรียบเทียบคำตอบกับรูปแบบการโปรแกรมเชิงเส้นแบบผสม (MIP) 2 รูปแบบ Logendran and Subur (2004) ได้พัฒนา heuristic เพื่อแก้ปัญหา Unrelated parallel machine ซึ่งงานแต่ละงานสามารถแยกกันทำได้ (Job splitting) มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ต้นทุนรวมของงานล่าช้ามีค่าน้อยที่สุด (Minimize total weighted tardiness) Heuristic ที่สร้างขึ้นประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือการหาคำตอบเบื้องต้น (Initial solution) ซึ่งมีทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ EDD, EDDSP, LFT/LFM, MATC ส่วนที่ 2 คือ วิธีการค้นหาคำตอบ (Search method) โดยใช้เทคนิคทาบูลีซ์ที่สร้างขึ้นมา 6 รูปแบบ แล้วนำผลที่ได้จาก heuristic ที่สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกับรูปแบบทางคณิตศาสตร์ โดยจากการศึกษาพบว่ายังไม่มีการวิจัยใดที่ศึกษาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตที่เป็นเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อให้เวลาแล้วเสร็จของงานต่ำที่สุด โดยลักษณะของปัญหา วิธีในการทำวิจัย และผลของการทำวิจัย ได้แสดงในส่วนต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาขนาดเล็กในการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกันภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร โดยมีเวลาแล้วเสร็จของงานต่ำสุด
2. เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกันภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร โดยมีเวลาแล้วเสร็จของงานต่ำสุด

วิธีการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาปัญหาในการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกัน โดยมีลักษณะของปัญหาและวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

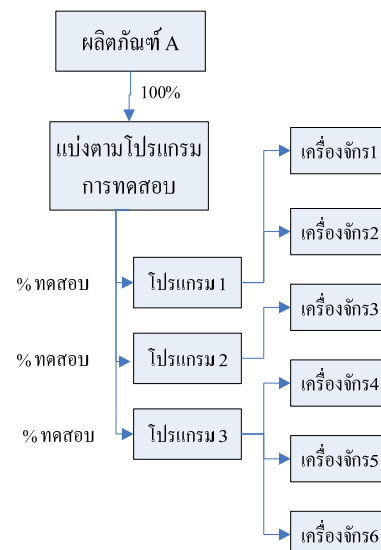
ลักษณะของปัญหา

โดยในครั้งนี้ได้ศึกษาปัญหาตัวอย่างของขั้นตอนการทดสอบชิ้นงานซึ่งมีลักษณะการทำงาน (ดังรูปที่ 1) คือ มีจำนวนผลิตภัณฑ์ N ผลิตภัณฑ์ โดยแต่ละผลิตภัณฑ์จะถูกแบ่งไปทดสอบกับโปรแกรมการทดสอบ G โปรแกรม บนเครื่องจักร M เครื่อง โดยเครื่องจักรแต่ละเครื่องสามารถตั้งค่าได้เพียงผลิตภัณฑ์เดียวและโปรแกรมเดียวเท่านั้น แต่อนุญาตให้ในแต่ละงานสามารถแบ่งออกไปทดสอบบนเครื่องจักรหลายเครื่องได้ และเครื่องจักรมีข้อจำกัดในการเลือกทำงาน โดยเวลาทำงานในแต่ละงานของแต่ละเครื่องจักรไม่เท่ากัน มีเวลาการพร้อมทำงานที่ไม่พร้อมกัน และมีเวลาจำกัดในการทดสอบในแต่ละเครื่องจักร

ข้อสมมติฐานที่ใช้ (Assumption)

1. เครื่องจักรเป็นแบบขนานและไม่เกี่ยวข้องกัน
2. มีจำนวนเครื่องจักรเพียงพอต่อการผลิต และในแต่ละเครื่องจักรมีเวลาการทำงานที่จำกัด

3. งานบางงานไม่สามารถทำบนเครื่องจักรบางเครื่องได้
4. ประสิทธิภาพของแต่ละเครื่องจักรไม่เท่ากัน
5. เครื่องจักรมีเวลาในการพร้อมทำงานไม่เท่ากัน



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของปัญหาที่ศึกษา

6. เครื่องจักรสามารถตั้งค่าให้สำหรับ 1 ผลิตภัณฑ์ และ 1 โปรแกรมการทดสอบเท่านั้น
7. อนุญาตให้แยกงานออกจากกันได้ (Splitting)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา

ในการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อหาลำดับการผลิตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานต่ำที่สุดโดยใช้ Mixed Integer Programming ตัวแปรที่ใช้และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อธิบายได้ดังตารางที่ 1, 2 และ 3

ตารางที่ 1 ความหมายของตัวห้อย (subscripts)

อักษรย่อ	ความหมาย
i	ดัชนี(index)ของผลิตภัณฑ์
g	ดัชนี(index)ของโปรแกรมการทดสอบ
m	ดัชนี(index)ของเครื่องจักร

ตารางที่ 2 ความหมายของพารามิเตอร์ (parameters)

ตัวแปร	ความหมาย
N	จำนวนผลิตภัณฑ์
MC	จำนวนเครื่องจักรทั้งหมด
PG	จำนวนโปรแกรมทดสอบ
MC(i)	เครื่องจักรที่ทำงานได้กับงาน i
PT(i,g,m)	เวลาในการทดสอบผลิตภัณฑ์ i โปรแกรม g บนเครื่องจักร m
DP(i,g)	ความต้องการในการทดสอบผลิตภัณฑ์ i โปรแกรม g
EF(m)	ประสิทธิภาพของเครื่องจักร m
RT(m)	เวลาที่เครื่องจักร m พร้อมทำงาน
MCA(m)	เวลาที่ทำงานได้ของเครื่องจักร m
PTT(i,g,m)	=PT(i,g,m) : เมื่อเครื่องจักร m อยู่ใน MC(i) ; = ∞ : อื่นๆ
G	จำนวนจริงที่มีค่ามากและเป็นบวก

ตารางที่ 3 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

ชนิดของตัวแปร	ตัวแปร	ความหมาย
ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)	C(i,g,m)	เวลาแล้วเสร็จของงาน i โปรแกรม g บนเครื่องจักร m
	E	เวลาที่ใช้ในการทดสอบทุกงานโดยพิจารณาจากเวลาแล้ว

ตัวแปรไบนารี (Binary decision variables)	PS(i,g,m)	เสร็จที่มากที่สุดของทุกงาน ปริมาณการทดสอบผลิตภัณฑ์ i โปรแกรม g บนเครื่องจักร m
--	-----------	---

X(i,g,m)	=1 : เมื่องาน i โปรแกรม g ถูกทดสอบบนเครื่องจักร m =0 : อื่นๆ
----------	---

สมการทางคณิตศาสตร์

สมการเป้าหมาย (objective function) : Minimize

$$Z = E \quad (1)$$

สมการเงื่อนไข (constraints)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^{PG} X_{i,g,m} = 1 \quad \forall m \in MC_i \quad (2)$$

$$(X_{i,g,m} * G) - PS_{i,g,m} \geq 0 \quad \forall i \in N, g \in PG, m \in MC_i \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{MC_i} PS_{i,g,m} = DP_{i,g} \quad \forall i \in N, g \in PG \quad (4)$$

$$C_{i,g,m} \geq PS_{i,g,m} * (PTT_{i,g,m} / EF_m) + RT_m \quad \forall i \in N, g \in PG, m \in MC_i \quad (5)$$

$$C_{i,g,m} \leq MTA_m \quad \forall i \in N, g \in PG, m \in MC_i \quad (6)$$

$$E \geq C_{i,g,m} \quad \forall i \in N, g \in PG, m \in MC_i \quad (7)$$

$$E, C_{i,g,m}, PS_{i,g,m} \geq 0 \quad \forall i \in N, g \in PG, m \in MC \quad (8)$$

$$X_{i,g,m} \in \{0,1\}$$

$$\forall i \in N, g \in PG, m \in MC \quad (9)$$

Objective function(1) ลดเวลารวมที่ใช้ในการทดสอบให้ต่ำที่สุด Constraints(2) เครื่องจักรสามารถตั้งค่าให้กับผลิตภัณฑ์และโปรแกรมเดียวเท่านั้น Constraints(3) ให้ค่า $X(i,g,m)=1$ เมื่องาน i โปรแกรม g ถูกทดสอบบนเครื่องจักร m Constraints(4) ปริมาณการทดสอบรวมต้องเท่ากับความต้องการของผลิตภัณฑ์และโปรแกรมนั้นๆ Constraints(5) เวลาแล้วเสร็จของผลิตภัณฑ์จะเท่ากับเวลาที่ทำงานทั้งหมดบนเครื่องจักรนั้นรวมกับเวลาที่เครื่องจักรพร้อมทำงาน Constraints(6) เวลาแล้วเสร็จของแต่ละงานในแต่ละเครื่องจักรจะต้องไม่เกินเวลาที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้ Constraints(7) เวลาแล้วเสร็จรวมของทุกงานพิจารณาจากเวลาแล้วเสร็จของงานที่มากที่สุด Constraints(8) เงื่อนไขที่ทำให้ Constraints ไม่ติดลบ Constraints(9) เงื่อนไขตัวแปรไบนารี

การพัฒนาอัลกอริทึม

การแก้ปัญหาโดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถ้าหากนำไปใช้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งส่วนใหญ่ปัญหาในการจัดลำดับการผลิตจะเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีขนาดของปัญหาที่ใหญ่อยู่แล้ว ก็จะทำให้สามารถใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์หาคำตอบที่ดีที่สุดได้ยากหรืออาจจะใช้เวลาในการหาคำตอบที่นาน โดยข้อจำกัดที่สำคัญคือข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในการหาคำตอบ ซึ่งอาจจะมีข้อจำกัดด้านจำนวนตัวแปร ซึ่งส่งผลให้หาคำตอบที่ดีที่สุดไม่ได้ ดังนั้นในการทำวิจัยครั้งนี้จึงได้พัฒนาอัลกอริทึม (Unrelated Parallel Machine under machine Eligibility Algorithm: UPMEA) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และได้คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution) มากที่สุด

ลักษณะการทำงานของอัลกอริทึมจะเป็นการหาคำตอบโดยใช้หลักการการตัดสินใจควบคู่ไปกับ

การคำนวณผลลัพธ์เพื่อหาคำตอบ โดยคำตอบที่ได้จะไม่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่จะให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนของ UPMEA ดังต่อไปนี้

รายละเอียดของ UPMEA

ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการสร้าง UPMEA แสดงได้ดังนี้

i = ทรัพยากรของผลิตภัณฑ์

g = ทรัพยากรของโปรแกรมการทดสอบ

m = ทรัพยากรของเครื่องจักร

N = เซตของงานที่ต้องการทดสอบทั้งหมด

$; N = \{DP(i,g)\}$

DM = เซตของงานที่มีความต้องการมากที่สุด ; $DM = \{MAX\{DP(i,g)\}$

MC = เซตของเครื่องจักรที่มีทั้งหมด

$MC(dm)$ = เซตของเครื่องจักรที่สามารถทำงานได้กับงานที่มีความต้องการมากที่สุด

$RT(m)$ = เวลาที่เครื่องจักร m พร้อมทำงาน

$PTE(i,g,m)$ = เวลาในการทดสอบผลิตภัณฑ์

i โปรแกรม g บนเครื่องจักร m ที่ปฏิบัติตามประสิทธิภาพเครื่องจักรแล้ว

$PS(i,g,m)$ = ปริมาณการทดสอบผลิตภัณฑ์ i โปรแกรม g บนเครื่องจักร m

$C(i,g,m)$ = เวลาแล้วเสร็จของงาน i โปรแกรม g บนเครื่องจักร m

E = เวลารวมที่ใช้ในการทดสอบทุกงาน ; $E = \{MAX\{C(i,g,m)\}$

การทำงานของ UPMEA สามารถแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ซึ่งแสดงรายละเอียดของการคำนวณหาคำตอบในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : พิจารณาความต้องการของงานทั้งหมด โดยเลือกงานในเซต N ที่มีความต้องการทดสอบมากที่สุดก่อนโดยกำหนดให้เป็นเซตงาน $DM = \{MAX\{DP(i,g)\}$ และทำต่อขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 : พิจารณาเครื่องจักรที่มีทั้งหมดในเซต MC สร้างเซตของเครื่องจักรที่สามารถ

ทำงานได้กับเซตงาน DM โดยกำหนดให้เป็นเซต MC(dm) และทำต่อขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 : ปรับค่าเวลาในการผลิตสำหรับเครื่องจักรในเซต MC(dm) โดยทำการปรับตามประสิทธิภาพของเครื่องจักรโดยที่ $PTE(i,g,m) = (PT(i,g,m)/EF(m))$; $i,g \in DM, m \in MC(dm)$ และทำต่อขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 : พิจารณาเลือกเครื่องจักรในเซต MC(dm) ให้กับงานในเซต DM โดย

(4.1) พิจารณาเลือกเครื่องจักร m ; $m \in MC(dm)$

4.1.1 เลือกเครื่องจักรที่มีเวลาทดสอบน้อยสุดก่อนคือ m' ; $m' = \min\{PTE(i,g,m)\}$; $\forall m$ และทำต่อข้อ 4.1.2

4.1.2 มีเวลาในการทดสอบน้อยสุดเท่ากันหรือไม่ ถ้ามีให้ทำต่อข้อ 4.1.3 ถ้าไม่มีให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 5

4.1.3 เลือกเครื่องจักรที่มีเวลาทดสอบน้อยสุดและมีเวลาพร้อมทำงานเร็ว m' ; $m' = \min\{PTE(i,g,m)\}$; $\forall m, \min\{RT(m)\}$ และทำต่อขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 5 : พิจารณาปริมาณการผลิตงาน DM ให้กับเครื่องจักร m ที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 โดย

(5.1) ตรวจสอบเวลาที่เครื่องจักรมีอยู่ โดย $MTA(m) > DP(i,g)*PTE(i,g,m) + RT(m)$ หรือไม่ ถ้ามากกว่า ให้ผลิตตามจำนวน $PS(i,g,m); PS(i,g,m) = DP(i,g)$ และข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6 ถ้าไม่ให้ทำต่อข้อ (5.2)

(5.2) ผลิตตามปริมาณที่เครื่องจักร m สามารถทำงานได้คือ $PS(i,g,m)$; $PS(i,g,m) = [MTA(m)-RT(m)]/PTE(i,g,m)$ และทำต่อข้อที่ (5.3)

(5.3) Update ข้อมูล เซต $DM = DM \setminus \{PS\}$, $MC(dm) = MC(dm) \setminus \{m\}$ และกลับไปทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 6 : update ข้อมูล เซต $N \setminus \{DP(i,g) \in DM\}$, $MC \setminus \{m\}$ และทำต่อขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 7 : ตรวจสอบว่าเซต $N = \emptyset$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำต่อขั้นตอนที่ 8 ถ้าไม่ใช่ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 8 : คำนวณค่าเวลาแล้วเสร็จของแต่ละงาน โดยที่ $C(i,g,m) = PS(i,g,m)*PTE(i,g,m) + RT(m)$ และทำต่อขั้นตอนที่ 9

ขั้นตอนที่ 9 : คำนวณค่าเวลาแล้วเสร็จของงานรวม (makespan) โดยที่ $E = \max\{C(i,g,m)\}$

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์และการพัฒนาอัลกอริทึม UPMEA จึงได้นำทั้ง 2 วิธีการไปทดลองทำการแก้ปัญหาเกี่ยวกับตัวอย่างที่สร้างขึ้น และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น โดยมีผลการทดลองและรายละเอียดการเปรียบเทียบประสิทธิภาพดังนี้

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการทำงานของอัลกอริทึมกับคำตอบที่ได้จากรูปแบบทางคณิตศาสตร์ จึงได้สร้างตัวอย่างของปัญหาที่มีขนาดแตกต่างกันจำนวน 6 ขนาด ซึ่งในแต่ละขนาดก็จะมีลักษณะปัญหาที่แตกต่างกันออกไปอีกขนาดละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 30 ตัวอย่าง ในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ใช้ซอฟต์แวร์ CPLEX/MPL ช่วยในการหาคำตอบ ซึ่งผลการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากวิธีอัลกอริทึมกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด แสดงรายละเอียดดังในตารางที่ 4 และสรุปผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้จาก
การใช้วิธีอัลกอริทึมกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

EX1 4 ผลิตภัณฑ์ 2 โปรแกรม 8 เครื่องจักร				
	Optimal	UPMEA	error	%error
1.1	421	452	31	7.36
1.2	380	405	25	6.58
1.3	363	387	24	6.61
1.4	398	409	11	2.76
1.5	342	358	16	4.68
			ค่าเฉลี่ย	5.60
EX2 4 ผลิตภัณฑ์ 2 โปรแกรม 10 เครื่องจักร				
	Optimal	UPMEA	error	%error
2.1	270	270	0	0
2.2	245	258	13	5.31
2.3	233	233	0	0
2.4	261	275	14	5.36
2.5	238	238	0	0
			ค่าเฉลี่ย	2.13
EX3 3 ผลิตภัณฑ์ 2 โปรแกรม 6 เครื่องจักร				
	Optimal	UPMEA	error	%error
3.1	225	243	18	8
3.2	256	262	6	2.34
3.3	264	285	21	7.95
3.4	233	233	0	0
3.5	229	242	13	5.68
			ค่าเฉลี่ย	4.80
EX4 3 ผลิตภัณฑ์ 2 โปรแกรม 8 เครื่องจักร				
	Optimal	UPMEA	error	%error
4.1	176	185	9	5.11
4.2	188	188	0	0
4.3	193	206	13	6.74
4.4	170	170	0	0
4.5	155	167	12	7.74
			ค่าเฉลี่ย	3.9

EX5 2 ผลิตภัณฑ์ 2 โปรแกรม 4 เครื่องจักร				
	Optimal	UPMEA	error	%error
5.1	145	145	0	0
5.2	139	142	3	2.16
5.3	141	158	17	12.06
5.4	120	120	0	0
5.5	117	133	16	13.68
			ค่าเฉลี่ย	5.58
EX6 2 ผลิตภัณฑ์ 2 โปรแกรม 6 เครื่องจักร				
	Optimal	UPMEA	error	%error
6.1	95	95	0	0
6.2	87	98	11	12.64
6.3	90	90	0	0
6.4	74	83	9	12.16
6.5	81	96	15	18.52
			ค่าเฉลี่ย	8.66

ตารางที่ 5 สรุปการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ
อัลกอริทึมกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

ความคาดเคลื่อนสูงสุด	18.52
ความคาดเคลื่อนต่ำสุด	0
ความคาดเคลื่อนเฉลี่ยรวม	5.11
จำนวนตัวอย่างที่ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด	10

จากผลการเปรียบเทียบค่าเวลาแล้วเสร็จระหว่างอัลกอริทึมกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจาก 30 ตัวอย่างโดยใช้โจทย์ตัวอย่างการผลิตที่มีค่าผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ถึง 4 ผลิตภัณฑ์ โปรแกรมการทดสอบ 2 โปรแกรม และเครื่องจักร 4 ถึง 10 เครื่องจักร จากผลการทดลองพบว่า UPMEA จะได้เวลาแล้วเสร็จเท่ากับค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด 10 ตัวอย่าง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 5.11 ซึ่งทำให้เห็นว่า UPMEA มีประสิทธิภาพการทำงานในเกณฑ์ที่ดี

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการจัดตารางการผลิตเครื่องจักรแบบขนานที่ไม่เกี่ยวข้องกันภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร โดยมีเวลาแล้วเสร็จของงานต่ำสุด ซึ่งรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด แต่เนื่องจากในการนำไปใช้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่อาจใช้เวลานาน หรือข้อจำกัดของซอฟต์แวร์ อาจทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้ จึงต้องทำการพัฒนาอัลกอริทึม UPMEA ขึ้นเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ โดยจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพก็จะเห็นได้ว่า อัลกอริทึม UPMEA สามารถให้คำตอบใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และมีความคลาดเคลื่อน 5.11% ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถนำไปใช้ในการจัดตารางการผลิตได้อย่างง่ายและไม่ซับซ้อน ซึ่งจะส่งผลให้ใช้เวลาในการตัดสินใจวางแผนการผลิตน้อยและลดต้นทุนการผลิตลงอีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการที่จะพัฒนารูปแบบของปัญหาเพื่อใช้ในการวางแผนระยะยาวซึ่งอาจเป็นการวางแผนล่วงหน้ารายสัปดาห์หรือรายเดือน
2. ควรมีการเพิ่มปัจจัยในการจัดตารางการผลิตในเรื่องของเวลาในการตั้งค่าเครื่องจักร (setup time) เข้าไปในระบบเพื่อให้มีความเสมือนปัญหาจริงและสมบูรณ์แบบที่สุด
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการปรับปรุงคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม ด้วยวิธี เมตะฮิวริสติกส์ เพื่อให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- Dehua, X., Zhenmin, C., Yunqiang, Y., & Hongxing, L. 2009. Makespan minimization for two parallel machines scheduling with a periodic availability constraint. *Computers and Operations Research*. (36): 1809-1812.
- Eun, S.K., Chang, S.S., & Ik, S.L. 2009. Scheduling of parallel machines to minimize total completion time subject to s-precedence constraints. *Computers and Operations Research*. (36):698-710.
- Grzegorz, W. 2009. Tabu search for discrete continuous scheduling problems with heuristic continuous resource allocation. *European Journal of Operational Research*. (193): 849-856.
- Logendran, R., & Subur, F. 2004. Unrelated parallel machine scheduling with job splitting. *IIE Transactions*, 36, 359-372.
- Pedro L.R., Martin G.R., Geraldo R.M., & Panos M. 2008. Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. *Computers and Operations Research*. (35):1250-1264.