

การจัดลำดับการผลิตในสายการผลิต ต่อเนื่องแบบผสมภายใต้ข้อจำกัดการผลิต ของเครื่องจักร

ผศ.ดร. กาญจนา เศรษฐนันท์ และ นางสาวกณิกนันท์ กิทยศรี
และ นายณัฐวุฒิ วีระภรณ์พิมล

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

โครงการศึกษานี้เป็นรูปแบบปัญหาการจัดลำดับการผลิตในระบบการผลิตต่อเนื่องแบบผสม (hybrid flowshop) ภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร (machine eligibility constraints) สายการผลิตที่พิจารณาประกอบด้วย S สถานีงาน ซึ่งในแต่ละสถานีงานจะประกอบด้วยเครื่องจักรที่เหมือนกัน (identical machines) อย่างน้อย 1 เครื่องจักร ซึ่งเวลาเตรียมงานได้รวมอยู่กับเวลาผลิตแล้ว วัตถุประสงค์การศึกษานี้เพื่อให้เวลาผลิตรวม (makespan) มีค่าต่ำสุด โดยรูปแบบทางคณิตศาสตร์และอัลกอริทึม (Hybrid Flowshop under Machine Eligibility Constraint Algorithm (HFMECA)) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แก้ปัญหา จากการทดลองพบว่าอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี โดยมีค่าแตกต่างจากคำตอบที่ดีที่สุดโดยเฉลี่ย 5.20%

Scheduling Hybrid Flowshops under Machine Eligibility Constraints

Asst.Prof.Kanchana Sethanun, Kanikanun Tipayasri and Nuthawut Weerakornpimol
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

Abstract

This research addresses the scheduling problem in a hybrid flowshop under machine eligibility constraints. The production line consists of S stages, each of which may have more than one identical machines. Setup times are assumed to be included in the processing time. The objective of this research is to minimize the makespan. A mathematical model was developed for small size problems and a heuristic algorithm (Hybrid Flowshop under Machine Eligibility Constraints Algorithm (HFMECA)) 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 HFMECA from the optimal solutions is 5.20%.

บทนำ

การจัดลำดับการผลิต (scheduling) ในกระบวนการผลิตในทุกวันนี้มีความสำคัญต่อระบบการผลิตในอุตสาหกรรมในปัจจุบันเป็นอย่างยิ่ง องค์กรที่จะสามารถแข่งขันได้ในตลาดจำเป็นต้องมีการบริหารและการจัดการระบบการผลิตให้มีประสิทธิภาพ มีความยืดหยุ่นสูงและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของตลาดที่จะเกิดขึ้นได้ การจัดลำดับการผลิตโดยทั่วไปนั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตมีหลายชนิด โดยในสายการผลิตมีจำนวนสถานีงานมากกว่าหนึ่งสถานี จำนวนเครื่องจักรในแต่ละสถานีงานมีมากกว่าหนึ่งเครื่องและประสิทธิภาพของเครื่องจักรในแต่ละสถานีงานอาจเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ลักษณะของสายการผลิตดังกล่าวเรียกว่า สายการผลิตต่อเนื่องแบบผสม (hybrid flowshop) ซึ่งสายการผลิตนี้สามารถพบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรมปัจจุบันเช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องตี๋ม อุตสาหกรรมผลิตยา และอุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น

ในการจัดลำดับการผลิตในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสมจะมีความยุ่งยากซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตมีหลายชนิด ในสายการผลิตมีจำนวนสถานีงานมากกว่าหนึ่งสถานี จำนวนเครื่องจักรในแต่ละสถานีงานมีมากกว่าหนึ่งเครื่อง และประสิทธิภาพของเครื่องจักรในแต่ละสถานีงานอาจเท่ากันหรือไม่ก็ได้ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการจัดลำดับการผลิตคือ ข้อจำกัดของการใช้งาน เข้าผลิตบนเครื่องจักรเนื่องจากค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นหรือคุณภาพของงานที่ได้อาจไม่เท่ากัน ทำให้เครื่องจักรบางเครื่องมีข้อจำกัด (machine restriction) ที่ไม่สามารถผลิตงานบางงานได้ นั่นคือแต่ละงาน j ถูกผลิตบนเซตของเครื่องจักร M_j ; $M_j \subset M$ โดยที่ M คือ เซตของเครื่องจักรทั้งหมดและ $j = 1, 2, \dots, n$ เมื่อเป็นเช่นนี้การจัดลำดับสายการผลิตจึงเป็นการกำหนดว่าผลิตภัณฑ์ใดควรผลิตบนเครื่องจักรใดและมีลำดับการผลิต (sequence) อย่างไรเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ซึ่งการจัดลำดับการผลิตที่มีประสิทธิภาพทำให้เกิดผลดีต่างๆ เช่น ลดเวลาที่สูญเสียเนื่องจากการรอคอย (idle time) ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตเพราะการใช้ทรัพยากร (resources) ต่างๆ ให้เหมาะสมกับงานและเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบการผลิตมีความยืดหยุ่นสูงง่ายต่อการตัดสินใจในการจัดลำดับสายการผลิตใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมายในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสม ซึ่งโดยปกติแล้วสำหรับเครื่องจักรวางขนานกัน (parallel machines) ประสิทธิภาพของเครื่องจักรจะเท่ากัน (identical machines) Arthanary และ Ramaswamy เป็นบุคคลแรกที่พัฒนาการจัดลำดับการผลิตในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสม [Soewandi, 1998] ซึ่งเขาพัฒนาวิธีการขยายและจำกัดเขต (branch and bound) สำหรับ $FF2(Pm_1, Pm_2 = 1) // C_{\max}$ และสามารถแก้ปัญหาได้ถึง 10 งาน ในปี 1991 Gupta และ Tunc ก็ได้พัฒนาวิธีการจัดลำดับการผลิตของปัญหา $FF2(Pm_1 = 1, Pm_2) // C_{\max}$ โดยใช้วิธีการขยายและจำกัดขอบเขตเช่นกัน Vignier และคณะ (1996) ได้พัฒนาวิธีการขยาย และจำกัดขอบเขตสำหรับปัญหา $FF2(Pm_1, Pm_2, \dots, Pm_s) // C_{\max}$ และสามารถแก้ปัญหาได้ถึง 15 งาน

อย่างไรก็ตามในบางอุตสาหกรรมเครื่องจักรที่สถานีงานใดๆ อาจจะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถผลิตงานบางงานได้ Pinedo (1995) ได้ศึกษาการจัดลำดับงานสำหรับเครื่องจักรวางขนานกันโดยเครื่องจักรบางเครื่องจะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถผลิตงานบางงานได้และเวลาที่ใช้ในการผลิตของงานแต่ละงานมีค่า 1 หน่วย ($P | p_j = 1, M_j / C_{\max}$)

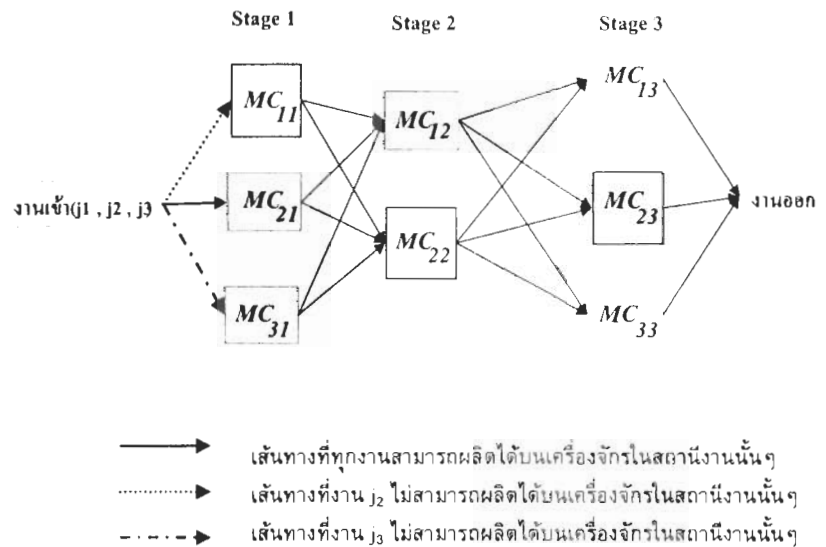
โดยเขาได้พัฒนาอัลกอริทึม "ลีซท์เฟลคซิเบิลจ๊อบเฟิร์สท์" (Least Flexible Job First: LFJ) จากนั้น Centeno และ Armacost (1997) ได้พัฒนาฮิวริสติกสำหรับการจัดงาน n งานให้กับเครื่องจักร m เครื่อง โดยเครื่องจักรวางขนานกันสำหรับกรณีพิเศษที่เวลากำหนดส่งงาน (due date) มีค่าเท่ากับเวลาเริ่มลงมือทำงานรวมกับค่าคงที่ ($d_j = r_j + c_j$) และการศึกษานี้ได้มีการพิจารณาข้อจำกัดของเครื่องจักร (machine restriction) โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อให้เวลาแล้วเสร็จงานมีค่าต่ำที่สุด ($Pm/r_j, m_j / L_{\max}$) ซึ่งเขาได้พัฒนาฮิวริสติกโดยใช้ข้อมูลจริงของอุตสาหกรรมที่ได้ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับตารางการผลิตจริง (actual schedule) ผลการทดลองพบว่า ฮิวริสติกที่พัฒนาขึ้นมาทำให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้นเนื่องจากอุตสาหกรรมมีลำดับการผลิตที่เหมาะสม นั่นคือเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อล็อต เวลารอ และเวลาเสร็จงานของแต่ละล็อตมีค่าลดลงมาก ในปี 2003 Alagoz และ Azizoglu ได้สร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์และฮิวริสติกจำนวน 3 ฮิวริสติกสำหรับการจัดลำดับการผลิตซ้ำใหม่ (rescheduling) ในสายการผลิตที่เครื่องจักรวางขนานกันและมีการพิจารณาข้อจำกัดของเครื่องจักรเพื่อให้เวลาที่อยู่ในระบบทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด ผลการศึกษาพบว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี ในปีเดียวกันนี้ Lin และ Li ได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับปัญหาที่เซต M_j เป็นคอนเว็กซ์เซต

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยใดๆ ที่ศึกษาการจัดลำดับงานให้กับเครื่องจักร ในสายการผลิตแบบผสมโดยมีการพิจารณาข้อจำกัดของเครื่องจักร ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อจัดลำดับการผลิตในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสม โดยมีการพิจารณาข้อจำกัดของเครื่องจักรเพื่อให้ได้เวลาผลิตรวม (makespan) มีค่าต่ำที่สุด โดยลักษณะของปัญหาของการศึกษาได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3 โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาได้พัฒนาขึ้นดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4 ส่วนในหัวข้อที่ 5 อัลกอริทึมได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมกับผลเฉลยที่ดีที่สุดได้แสดงดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 6

ลักษณะของปัญหา

ปัญหาที่นำมาพิจารณาในการทำวิจัยนี้เป็นปัญหาการจัดลำดับการผลิตในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสม ที่มีงาน n งาน ถูกทำการผลิตเรียงตามลำดับจากสถานงานแรกไปจนถึงสถานงานสุดท้าย แต่ละสถานงานมีเครื่องจักรตั้งแต่ 1 เครื่องขึ้นไป โดย

วัตถุประสงค์เพื่อให้เวลาการผลิตรวมต่ำสุด โดยมีข้อจำกัดของเครื่องจักรบางเครื่องที่สถานีนงานใดๆที่ไม่สามารถผลิตงานบางงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 : ลักษณะสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสมที่มีข้อจำกัดในการผลิตของเครื่องจักร

กำหนดให้ $Mach(j, s)$ คือ เซตของเครื่องจักรในสถานีนงานที่ S ที่สามารถผลิตงาน j ได้ จากรูปที่ 1 $Mach(j_1, 1) = \{MC_{11}, MC_{21}, MC_{31}\}$, $Mach(j_2, 1) = \{MC_{21}, MC_{31}\}$ และ $Mach(j_3, 1) = \{MC_{11}, MC_{21}\}$ ซึ่งอธิบายได้ว่างาน j_1 สามารถผลิตได้บนทุกเครื่องจักรในสถานีนงานที่ 1 งาน j_2 ไม่สามารถผลิตได้บนเครื่องจักร เครื่องที่ 1 ในสถานีนงานที่ 1 ส่วนงาน j_3 ไม่สามารถผลิตได้บนเครื่องจักรเครื่องที่ 3 ในสถานีนงานที่ 1

ข้อสมมติที่ใช้ (Assumption)

1. เครื่องจักรมีความเร็วในการผลิตเท่ากันทุกเครื่อง (identical machines)
2. งานถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ไม่มีเงื่อนไข (กลุ่มงานนี้สามารถผลิตได้ในทุกเครื่องจักรของแต่ละสถานีนงาน) และกลุ่มที่มีเงื่อนไข (กลุ่มงานนี้ไม่สามารถผลิตได้ในบางเครื่องจักรอย่างมาก 1 เครื่องจักรของแต่ละสถานีนงาน)
3. งานทุกงานพร้อมที่จะถูกผลิตที่เวลาเท่ากับศูนย์
4. เวลาเตรียมงาน (setup time) รวมอยู่กับเวลาผลิตของงานนั้นแล้ว

5. การผลิตนี้ไม่คิดเวลาขัดข้องของเครื่องจักรระหว่างทำงาน (no machine break down)
6. การศึกษานี้จะไม่คิดเวลาย้ายงานจากเครื่องหนึ่งไปยังอีกเครื่องหนึ่ง (no transportation time)
7. การศึกษานี้จะไม่พิจารณาการแข่งงานของเครื่องจักร (no preemption)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหา

ในการจัดสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อหาลำดับการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสม โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้เวลาในการผลิตรวมของระบบมีค่าต่ำที่สุดโดยใช้ Mixed Integer Programming ตัวแปรที่ใช้และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อธิบายไว้ในตารางที่ 1, 2 และ 3

ตารางที่ 1 ความหมายของตัวห้อย (subscripts)

อักษรย่อ	ความหมาย
i, j, h	ดรรชนี (index) ของผลิตภัณฑ์
m	ดรรชนี (index) ของเครื่องจักร
s	ดรรชนี (index) ของสถานีนงาน
P	เซตของผลิตภัณฑ์ = $\{1, 2, 3...n\}$
$MC(s)$	เซตของเครื่องจักรที่สถานี $s = \{1, 2, 3,...M(s)\}$
ST	เซตของสถานีนงาน $\{1, 2, 3...S\}$

ตารางที่ 2 ความหมายของพารามิเตอร์ (parameters)

ตัวแปร	ความหมาย
n	จำนวนผลิตภัณฑ์
$M(s)$	จำนวนเครื่องจักรในสถานีนงานที่ s
m	จำนวนเครื่องจักรทั้งหมดของทุกสถานีนงาน
S	จำนวนของสถานีนงาน
$t(j, m, s)$	เวลาที่ใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์ j บนเครื่องจักรที่ m ในสถานีนงานที่ s
$B(m, s)$	เซตของผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้บนเครื่องจักร m ในสถานีนงานที่ s

ตารางที่ 3 ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables)

ชนิดของตัวแปร	ตัวแปร	ความหมาย
ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)	$C(j, m, s)$	เวลาแล้วเสร็จของงาน j บนเครื่องจักร m ในสถานงานที่ s
	E	เวลารวมที่ใช้ในการผลิตงานทุกงาน โดยพิจารณาจากงานสุดท้ายที่ออกจากระบบ
ตัวแปรไบนารี (Binary decision variables)	$X(i, j, m, s) = 1$	เมื่องาน i ถูกผลิตก่อนงาน j ทันที บนเครื่องจักร m สถานงาน s
		$= 0$: อื่นๆ
	$X(0, j, m, s) = 1$	เมื่องาน j ถูกผลิตเป็นงานแรก บนเครื่องจักร m สถานงาน s
		$= 0$: อื่นๆ
	$X(i, 0, m, s) = 1$	เมื่องาน i ถูกผลิตเป็นงานสุดท้าย บนเครื่องจักร m สถานงาน s
		$= 0$: อื่นๆ

สมการทางคณิตศาสตร์

สมการเป้าหมาย (objective function) : Minimize

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

สมการเงื่อนไข (constraints)

$$E \geq C(j, m, S) \quad (2)$$

$$j \in B(m, s) \text{ และ } m \in MC$$

$$\sum_{j=1}^n X(i, j, m, s) \leq 1 \quad (3)$$

$$j \in B(m, s), m \in MC, i \neq j \text{ และ } s \in St$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{m=1}^{m(s)} X(i, j, m, s) = 1 \quad (4)$$

$$j \in B(m, s), i \neq j \text{ และ } s \in St$$

$$\sum_{i=0}^n X(i, h, m, s) - \sum_{j=0}^n X(h, j, m, s) = 0 \quad (5)$$

$$h \in B(m, s), i \neq j, m \in MC' \text{ และ } s \in St$$

$$C(j, m, s) \geq C(i, m, s) + X(i, j, m, s)P(j, m, s) - M[1 - X(i, j, m, s)] \quad (6)$$

$i, j \in B(m, s), m \in MC, i \neq j, s \in St$ และ M คือ จำนวนจริงที่มีค่ามากและมีค่าเป็นบวก

$$C(j, m, s) \geq C(j, m', s-1) + t(j, m, s)X(i, j, m, s) \quad (7)$$

$i, j \in B(m, s), m, m' \in MC, i \neq j, s \in St-1, m'$ คือ เครื่องจักรที่สถานีงานที่ $s-1$

$$C(j, m, 1) \geq t(j, m, 1)X(i, j, m, 1) \quad (8)$$

$$i, j \in B(m, s), m \in MC, i \neq j$$

Objective Function(1) ลดเวลารวมที่ใช้ในการผลิตให้ต่ำที่สุด **Constraints(2)**

เวลาแล้วเสร็จรวมของงานทุกงานต้องมีค่าไม่น้อยกว่าเวลาแล้วเสร็จของงานใดๆ ในสถานีสถานีงานสุดท้าย **Constraints(3)** ในขณะเวลาหนึ่งๆ งานจะต้องถูกผลิตอยู่บนเครื่องจักรเครื่องที่สถานีงานใดๆ เพียงงานเดียวเท่านั้น **Constraint(4)** ในแต่ละสถานีสถานีงานหนึ่งๆ จะต้องถูกผลิตและผลิตบนเครื่องจักรเพียงเครื่องเดียวเท่านั้น **Constraints(5)** ยกเว้นงานแรกและงานสุดท้ายงานทุกงานต้องมีงานนำหน้า (ทันที) และตามหลัง (ทันที) **Constraints(6)** เวลาแล้วเสร็จของงานใดๆ จะมีค่าไม่น้อยกว่าเวลาแล้วเสร็จของงานก่อนหน้า (ทันที) ที่ผลิตบนเครื่องจักรเครื่องเดียวกันในสถานีสถานีงานนั้นๆ รวมกับเวลาที่ใช้ในการผลิตงานนั้น **Constraints(7)** เวลาแล้วเสร็จของงานใดๆ ที่สถานีสถานีงานหนึ่งๆ (ยกเว้นสถานีสถานีงานแรก) ต้องไม่น้อยกว่าเวลาแล้วเสร็จของงานนั้นที่สถานีสถานีงานก่อนหน้ารวมกับเวลาที่ใช้ในการผลิตงานนั้นในสถานีสถานีงานปัจจุบัน **Constraints (8)** เวลาแล้วเสร็จของงานใดๆ ในสถานีสถานีงานแรกจะมีค่าไม่น้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการผลิตงานนั้นบนเครื่องจักรใดๆ

การพัฒนาอัลกอริทึม

การแก้ปัญหาโดยใช้รูปแบบทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีขนาดใหญ่ที่จำนวนเครื่องจักร จำนวนผลิตภัณฑ์ หรือจำนวนสถานีสถานีงานเป็นจำนวนมาก การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจะทำได้ยากและใช้เวลานานเนื่องจากจำนวนตัวแปรในระบบมีมากขึ้น การพยายามที่จะทำให้ทุกตัวแปรและทุกเงื่อนไขเป็นจริงนั้นมีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ยังไม่มีโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาที่มี

ขนาดใหญ่ได้โดยตรง ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ได้มีการพัฒนาอัลกอริทึม (Hybrid Flowshop under Machine Eligibility Constraint Algorithm: HFMECA) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) มากที่สุด ซึ่งอัลกอริทึมนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยธรรมชาติของสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสมและกฎการจัดลำดับงานพื้นฐานคือ Shortest Processing Time Rule (SPT rule) นั่นคือ HFMECA เป็นการจัดลำดับงานโดยแบ่งงานออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มงานที่มีเงื่อนไขและกลุ่มงานที่ไม่มีเงื่อนไข ซึ่งรายละเอียดและตัวอย่างประกอบการทำงานของ HFMECA ได้แสดงในหัวข้อต่อไปนี้

รายละเอียดของ HFMECA

ตัวแปรและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการสร้าง HFMECA แสดงได้ดังนี้

i, j = ดรรชนีของผลิตภัณฑ์

$M'(j, s)$ = เซตของเครื่องจักรในสถานีนงานที่ s ที่มีข้อยกเว้นในการผลิตสำหรับงาน j

U = เซตของงานที่ไม่มีเงื่อนไขในการผลิต (unrestricted jobs) นั่นคืองานเหล่านี้สามารถผลิตบนเครื่องจักรใดก็ได้ในที่สถานีนงานใดๆ

R = เซตของงานที่มีเงื่อนไขในการผลิต (restricted jobs) นั่นคืองานเหล่านี้จะไม่สามารถผลิตได้สำหรับในบางเครื่องจักรที่สถานีนงานใดๆ

R_1 = เซตของงานในเซต R ที่มีเวลารวมของการผลิตจากสถานีนงานที่ 1 ถึงสถานีนงานก่อนสุดท้ายที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าน้อยที่สุดของงานในเซต U ที่มีเวลารวมของการผลิตสถานีนงานที่ 1 ถึงสถานีนงานก่อนสุดท้าย

$$= \left\{ i \mid \sum_{s=1, j \in R}^{S-1} t_{(j, m, s)} \leq \text{Min} \left(\sum_{s=1, j \in U}^{S-1} t_{(j, m, s)} \right) \right\}$$

R_2 = เซตของงานในเซต R ที่มีเวลารวมของการผลิตจากสถานีนงานที่ 1 ถึงสถานีนงานก่อนสุดท้ายที่มีค่ามากกว่าค่าน้อยที่สุดของงานในเซต U ที่มีเวลารวมของการผลิตสถานีนงานที่ 1 ถึงสถานีนงานก่อนสุดท้าย

$$= \left\{ i \mid \sum_{s=1, j \in R}^{S-1} t_{(j, m, s)} > \text{Min} \left(\sum_{s=1, j \in U}^{S-1} t_{(j, m, s)} \right) \right\}$$

- A = เซตของงานในเซต R_1 ที่มีเวลารวมของการผลิตจากสถานีงานที่ 1 ถึงสถานีงานก่อนสุดท้ายที่มีค่าน้อยที่สุด
- $$= \left\{ i \mid i = \text{Min} \left(\sum_{s=1; j \in R}^{S-1} t_{(j,m,s)} \right) \right\}$$
- B = เซตของงานในเซต U ที่มีเวลารวมของการผลิตจากสถานีงานที่ 1 ถึงสถานีงานก่อนสุดท้ายที่มีค่าน้อยที่สุด
- $$= \left\{ i \mid i = \text{Min} \left(\sum_{s=1; j \in U}^{S-1} t_{(j,m,s)} \right) \right\}$$
- C = เซตของงานในเซต R_2 ที่เป็นงานที่เป็นเงื่อนไขของสถานีงานสุดท้าย (สถานีงาน s) หากไม่มีงานที่เป็นเงื่อนไขของสถานีงานสุดท้ายให้เลือกงานที่เป็นเงื่อนไขของสถานีงานก่อนสุดท้าย (สถานีงาน $s-1$) แต่ถ้าไม่มีงานที่เป็นเงื่อนไขของสถานีงานก่อนสุดท้ายก็ให้เลือกงานที่เป็นเงื่อนไขของสถานีงานที่ $s-2$ ดังนี้ไปเรื่อยๆ)

การทำงานของ HFMECA สามารถแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : แบ่งงานออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มงานในเซต R และเซต U จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 : ตรวจสอบว่า $R = \emptyset$ หรือไม่ ถ้าใช่ ให้นำงานในเซต U มาจัด โดยข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6 ถ้าไม่ใช่ ให้จัดงานในเซต R ก่อน โดยทำต่อในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 : แบ่งงานในเซต R ออกเป็น 2 เซตคือ เซต R_1 และเซต R_2 จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 : ตรวจสอบว่า $R_1 = \emptyset$ หรือไม่ ถ้าใช่ ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6 ถ้าไม่ใช่ ให้จัดงานในเซต R_1 ก่อนโดยทำต่อในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 5 : นำงานในเซต R_1 มาจัดลำดับการผลิต โดยมีขั้นตอนย่อยดังนี้

(5.1) เลือกงานเพื่อประกอบเป็นเซต A จากนั้นไปทำต่อที่ขั้นตอนที่ (5.2)

(5.2) ตรวจสอบดูว่ามีจำนวนงานในเซต A มากกว่า 1 งานที่แตกต่างกันหรือไม่ ถ้ามีงานในเซต A มากกว่า 1 งานให้ทำต่อในขั้นตอนที่ (5.3) แต่ถ้าไม่มีให้ข้ามไปทำที่ขั้นตอนที่ (5.4)

ต่อเนื่องแบบผสมภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักร

- (5.3) ตรวจสอบว่าสถานีนงานสุดท้าย (สถานีนงาน S) มีงานในเซต A หรือไม่ ถ้ามีให้ไปขั้นตอนที่ (5.4) ถ้าไม่มีให้ตรวจสอบว่าสถานีนงาน (สถานีนงาน $S-1$) มีงานในเซต A หรือไม่ ถ้าไม่ให้ตรวจสอบว่าสถานีนงาน $S-2$ มีงานในเซต A หรือไม่ โดยทำกระบวนการนี้ไปเรื่อยๆ จนพบงานในเซต A จากนั้นให้ไปขั้นตอนที่ (5.4)
- (5.4) ให้เลือกงาน $a; a = \text{Min}_{j \in A}(t_{j,m,s=1})$ เข้าผลิตก่อน ถ้ายังมีงานมากกว่า 1 งานที่ให้ค่า $\text{Min}_{j \in A}(t_{j,m,s=1})$ เท่ากัน ให้เลือกงานไหนเข้าผลิตก่อนก็ได้ จากนั้นไปทำขั้นตอนที่ (5.5)
- (5.5) จัดงาน a เข้าผลิตบนเครื่องจักร $m; m \in M'(j,s)$ ที่ทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานที่ต่ำที่สุด ถ้า $M'(j,s) = \emptyset$ ให้จัดงาน a เข้าผลิตบนเครื่องจักรใดก็ได้ที่ทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานที่ต่ำที่สุด จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (5.6)
- (5.6) Update เซต R_j โดย $R_j = R_j \setminus \{a\}$ จากนั้นย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 6 : ตรวจสอบว่า $U = \emptyset$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8 ถ้าไม่ใช่ให้ทำต่อในขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 7 : นำงานใน เซต U มาจัดลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนย่อยดังนี้

- (7.1) เลือกงานเพื่อประกอบเป็นเซต B
- (7.2) ตรวจสอบว่ามีจำนวนงานในเซต B มากกว่า 1 งานที่แตกต่างกันหรือไม่ ถ้ามีจำนวนงานในเซต B ที่แตกต่างกันมากกว่า 1 งาน ให้ทำต่อในขั้นตอนที่ (7.3) แต่ถ้าไม่มีให้ข้ามไปที่ขั้นตอนที่ (7.4)
- (7.3) ให้เลือกงาน $b; b = \text{Min}_{j \in B}(t_{j,m,s=1})$ เข้าผลิตก่อน ถ้ายังมีงานมากกว่า 1 งานที่ให้ค่า $\text{Min}_{j \in B}(t_{j,m,s=1})$ เท่ากัน ให้เลือกงานไหนเข้าผลิตก่อนก็ได้ จากนั้นไปทำขั้นตอนที่ (7.4)
- (7.4) จัดงาน b เข้าผลิตบนเครื่องจักร $m; m \in M'(j,s)$ ที่ทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานที่ต่ำที่สุด ถ้า $M'(j,s) = \emptyset$ ให้จัดงาน a เข้าผลิตบนเครื่องจักรใดก็ได้ที่ทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานที่ต่ำที่สุด จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (7.5)
- (7.5) Update เซต U โดย $U = U \setminus \{b\}$ จากนั้นย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 8 : ตรวจสอบว่า $R_2 = \emptyset$ หรือไม่ ถ้าใช่จบการจัดลำดับงาน ถ้าไม่ใช่ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 9

ขั้นตอนที่ 9 : นำงานในเซต R_2 มาจัดลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนย่อย ดังนี้

(9.1) เลือกงานเพื่อประกอบเป็นเซต C จากนั้นไปทำต่อที่ขั้นตอนที่ (9.2)

(9.2) ตรวจสอบว่ามีจำนวนงานในเซต C มากกว่า 1 งานที่แตกต่างกันหรือไม่ ถ้ามีงานในเซต C มากกว่า 1 งานให้ทำต่อในขั้นตอนที่ (9.3) แต่ถ้าไม่มีให้ข้ามไปทำที่ขั้นตอนที่ (9.4)

(9.3) ให้เลือกงาน $c; c = \text{Min} \left(\sum_{s=1}^{S-1} t_{(j,m,s)} \right)$ เข้าผลิตก่อน ถ้ายังมีงานมากกว่า 1 งานที่ให้ค่า $\text{Min} \left(\sum_{s=1}^{S-1} t_{(j,m,s)} \right)$ เท่ากัน ให้เลือกงาน

$c; c = \text{Min}_{j \in C} (t_{(j,m,s=1)})$ เข้าผลิตก่อน ถ้ายังมีงานมากกว่า 1 งานที่ให้

ค่า $\text{Min}_{j \in C} (t_{(j,m,s=1)})$ เท่ากัน ให้เลือกงานไหนเข้าผลิตก่อนก็ได้ จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (9.4)

(9.4) จัดงาน c เข้าผลิตบนเครื่องจักร $m; m \in M'(j,s)$ ที่ทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานที่ต่ำที่สุดถ้า $M'(j,s) = \emptyset$ ให้จัดงาน c เข้าผลิตบนเครื่องจักรใดก็ได้ที่ทำให้เวลาแล้วเสร็จของงานที่ต่ำที่สุดจากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (9.5)

(9.5) Update เซต R_2 โดย $R_2 = R_2 \setminus \{c\}$ จากนั้นย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 8

ตัวอย่างประกอบการทำงานของ HFMECA

ตัวอย่างต่อไปนี้ เป็นการอธิบายการทำงานของ HFMECA โดยใช้ปัญหาการจัดลำดับงานที่มีข้อจำกัดทางการผลิตของเครื่องจักรบางเครื่องที่ไม่สามารถผลิตงานบางงานได้

ตัวอย่าง เป็นการจัดลำดับการผลิตของงาน 5 งาน บนสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสมที่มีจำนวน 3 สถานีงานประกอบด้วยเครื่องจักรทั้งหมด 4 เครื่องจักร โดยสถานีงานที่ 1, 2 และ 3 ประกอบด้วยจำนวนเครื่องจักร 1, 2 และ 1 เครื่องจักรตามลำดับ ซึ่งข้อมูลการผลิตของแต่ละงานแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลการผลิตของแต่ละงาน

สถานีงานที่	1	2		3
งาน/เครื่องจักร	1	1	2	1
1	6	2	XXX	5
2	6	3	XXX	7
3	6	3	8	2
4	6	9	9	4
5	6	4	4	3

หมายเหตุ : XXX หมายถึง งานนั้นไม่สามารถถูกผลิตบนเครื่องจักรนั้นได้

วิธีทำ

ขั้นตอนที่ 1 : $R = \{j | j = 1, 2\}$ และ $U = \{j | j = 3, 4, 5\}$

ขั้นตอนที่ 2 : $R \neq \emptyset$ ดังนั้น ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 3 : แบ่งงานในกลุ่ม R ออกเป็น 2 กลุ่ม จะได้ $R_1 = \{j_1, j_2\}$

และ $R_2 \neq \emptyset$

ขั้นตอนที่ 4 : $R_1 \neq \emptyset$ จัดงานใน เซต R_1 ก่อน ดังนั้น ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 5 : นำงานใน เซต R_1 มาจัดลำดับ

(5.1) $A = \{j_1\}$ จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (5.2)

(5.2) $n(A) = 1$ ข้ามไปทำที่ขั้นตอนที่ (5.4)

(5.4) จัดงาน j_1 ให้ทำงานบนเครื่องจักร $m(1,1).m(1,2).m(1,3)$ จากนั้นไปทำขั้นตอนที่ (5.5)

(5.5) Update เซต R_1 โดย $R_1 = \{j_1, j_2\} \setminus \{j_1\}$ จากนั้นย้อนกลับ去做ขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 : $R_1 \neq \emptyset$ จัดงานใน เซต R_1 ก่อน ดังนั้น ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 5

ขั้นตอนที่ 5 : นำงานใน เซต R_1 มาจัดลำดับ

(5.1) $A = \{j_2\}$ จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (5.2)

(5.2) $n(A) = 1$ ข้ามไปทำที่ขั้นตอนที่ (5.4)

(5.4) จัดงาน j_2 ให้ทำงานบนเครื่องจักร $m(1,1).m(1,2).m(1,3)$ จากนั้นไปทำขั้นตอนที่ (5.5)

(5.5) Update เซต R_1 โดย $R_1 = \{j_2\} \setminus \{j_2\}$ จากนั้นย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4

ขั้นตอนที่ 4 : $R_1 \neq \emptyset$ จึงข้ามไปทำขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 : $U \neq \emptyset$ จึงไปทำต่อในขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 7 : นำงานใน เซต U มาจัดลำดับ

(7.1) $B = \{j_5\}$ จากนั้นไปทำต่อที่ขั้นตอนที่ (7.2)

(7.2) $n(B) = 1$ จึงให้ข้ามไปทำที่ขั้นตอนที่ (7.4)

(7.4) จัดงาน j_5 ผลิตบนเครื่องจักร $m(1,1), m(1,2), m(1,3)$ จากนั้นไปทำต่อในขั้นตอนที่ (7.5)

(7.5) Update เซต U โดย $U = \{j_3, j_4, j_5\} \setminus \{j_5\}$ จากนั้นย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 6 และ 7 จนกระทั่ง $U \neq \emptyset$ จะได้ลำดับงานดังนี้คือ j_3 จัดให้ทำงานบนเครื่องจักร $m(1,1), m(1,2), m(1,3)$ ส่วน j_4 จัดให้ทำงานบนเครื่องจักร $m(1,1), m(1,2), m(1,3)$ จากนั้นย้อนกลับไปทำที่ขั้นตอนที่ 6

ขั้นตอนที่ 6 : $U \neq \emptyset$ จึงข้ามไปทำขั้นตอนที่ 8

ขั้นตอนที่ 8 : $R_2 \neq \emptyset$ จึงจบการจัดลำดับงาน

จากขั้นตอนการจัดลำดับงานด้วย HFMECA ให้ผลเป็นลำดับงานดังนี้ คือ

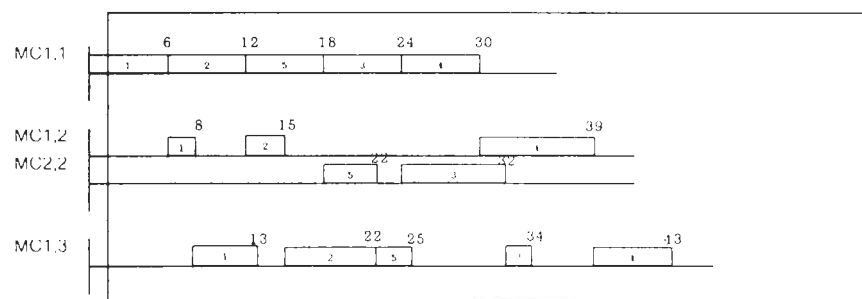
สถานีนงาน 1 บนเครื่องจักร 1 : $j_1 - j_2 - j_5 - j_3 - j_4$

สถานีนงาน 2 บนเครื่องจักร 1 : $j_1 - j_2 - j_4$

สถานีนงาน 2 บนเครื่องจักร 2 : $j_5 - j_3$

สถานีนงาน 3 บนเครื่องจักร 1 : $j_1 - j_2 - j_5 - j_3 - j_4$

ซึ่งส่งผลให้เวลาผลิตรวมมีค่า 43 หน่วย ดังแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 Gantt Chart แสดงลำดับและเวลาแล้วเสร็จของงานในแต่ละสถานีนงานของการจัดลำดับงานด้วยวิธีการของ HFMECA

3	งาน	5 เครื่องจักร	Optimal solution	HFMECA	error	%error	
E	X	1	2,1,2	26	28	2	7.69
E	X	2	1,2,2	27	27	0	0
E	X	3	2,1,1,1	34	34	0	0
E	X	4	2,2,1	19	20	1	5.26
E	X	5	2,1,2	30	34	4	13.33
					ค่าเฉลี่ย	5.26	
3	งาน	6 เครื่องจักร					
E	X	1	2,2,2	20	24	4	20
E	X	2	2,3,1	27	27	0	0
E	X	3	3,2,1	24	24	0	0
E	X	4	2,1,1,2	30	33	3	10
E	X	5	2,2,1,1	33	34	1	3.03
					ค่าเฉลี่ย	6.61	
3	งาน	7 เครื่องจักร					
E	X	1	2,2,1,2	22	26	4	18.18
E	X	2	2,2,2,1	35	35	0	0
E	X	3	2,3,1,1	28	32	4	14.29
E	X	4	3,2,2	21	21	0	0
E	X	5	2,3,2	16	18	2	12.5
					ค่าเฉลี่ย	8.99	

ตารางที่ 5 (ต่อเนื่อง)

3	งาน 8	เครื่องจักร	Optimal solution	HFMECA	error	%error
E X 1		2,1,3,2	32	32	0	0
E X 2		3,2,1,2	36	38	2	5.56
E X 3		3,3,2	26	29	3	11.54
E X 4		2,1,2,1,2	38	39	1	2.63
E X 5		2,2,1,2,1	43	44	1	2.33
					ค่าเฉลี่ย	4.41
3	งาน 9	เครื่องจักร				
E X 1		3,2,2,2	25	28	3	12
E X 2		2,2,2,3	27	27	0	0
E X 3		2,3,2,2	28	28	0	0
E X 4		2,2,1,2,2	30	30	0	0
E X 5		2,1,2,1,2,1	44	48	4	9.09
					ค่าเฉลี่ย	4.22
4	งาน 4	เครื่องจักร				
E X 1		2,1,1	25	25	0	0
E X 2		1,2,1	23	23	0	0
E X 3		1,1,2	33	39	6	18.18
E X 4		2,2	20	0	0	0
E X 5		1,1,1,1	38	40	2	5.26
					ค่าเฉลี่ย	4.69
4	งาน 3	เครื่องจักร				
E X 1		2,1	27	27	0	0
E X 2		1,2	26	26	0	0
E X 3		1,2	27	27	0	0
E X 4		2,1	27	27	0	0
E X 5		1,1,1	28	35	7	25
					ค่าเฉลี่ย	5
4	งาน 5	เครื่องจักร				
E X 1		2,2,1	35	35	0	0
E X 2		2,1,2	25	28	3	12
E X 3		1,2,2	25	25	0	0
E X 4		1,2,1,1	41	43	2	4.88
E X 5		3,2	14	14	0	0
					ค่าเฉลี่ย	3.38

ตารางที่ 5 (ต่อหน้า)

5	งาน	3 เครื่องจักร	Optimal solution	HFMECA	error	%error
E	X	1	2,1	31	0	0
E	X	2	2,1	37	0	0
E	X	3	1,1,1	49	2	4.26
E	X	4	1,2	30	1	3.45
E	X	5	1,2	39	0	0
					ค่าเฉลี่ย	1.54
5	งาน	4 เครื่องจักร				
E	X	1	2,1,1	32	0	0
E	X	2	1,2,1	37	4	12.12
E	X	3	1,1,2	29	1	3.57
E	X	4	2,2	26	4	18.18
E	X	5	2,1,1	38	2	5.56
					ค่าเฉลี่ย	7.89
					ค่าเฉลี่ยรวม 50 ตัวอย่าง	5.20

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

ความคลาดเคลื่อนสูงสุด	18.18%
ความคลาดเคลื่อนต่ำสุด	0%
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	5.20%
จำนวนตัวอย่างที่ให้คำตอบเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด	24 ตัวอย่าง

จากผลการเปรียบเทียบค่าเวลาแล้วเสร็จรวมระหว่างอัลกอริทึมกับค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจาก 50 ตัวอย่างโดยใช้ข้อมูลการผลิตที่แตกต่างกันไปโดยที่จำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะทำการผลิตมีค่าตั้งแต่ 3 งานถึง 5 งานและจำนวนเครื่องจักรมีค่าตั้งแต่ 5 ถึง 9 เครื่องจักร จากผลการทดลองจะพบว่า HFMECA จะได้คำตอบของเวลาแล้วเสร็จรวมเท่ากับค่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 24 ตัวอย่าง ค่าร้อยละความผิดพลาดมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 5.20 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า HFMECA มีประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างดี

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการจัดลำดับการผลิตในสายการผลิตต่อเนื่องแบบผสมภายใต้ข้อจำกัดการผลิตของเครื่องจักรซึ่งรูปแบบทางคณิตศาสตร์ (mixed integer programming) ที่ให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ถูกพัฒนาขึ้นและหาคำตอบโดยใช้ซอฟต์แวร์

CPLEX/MPL อย่างไรก็ตาม รูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถให้คำตอบได้สำหรับปัญหาที่มีขนาดเล็กเท่านั้นซึ่งในการศึกษานี้รูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ 5 งาน 9 เครื่องจักร ดังนั้น อัลกอริทึม (HFMECA) ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อที่จะสามารถให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดมากที่สุดขึ้น จากการศึกษาพบว่า HFMECA สามารถแก้ปัญหาการจัดลำดับ การผลิต โดยให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและมีความผิดพลาดเฉลี่ย 5.20% ซึ่งอัลกอริทึมนี้สามารถนำไปใช้ในการจัดลำดับการผลิตในอุตสาหกรรมจริงและมีกระบวนการใช้งานที่ง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถแก้ปัญหาได้รวดเร็วกว่าการสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะส่งผลให้ผู้ประกอบการสามารถตัดสินใจได้รวดเร็วและสามารถลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ ซึ่งการจัดลำดับการผลิตที่ดีนั้นจะส่งผลให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพดี มีการใช้งานเครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการประเมินประสิทธิภาพของ อัลกอริทึมเมื่อปัญหาที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจำเป็นต้องเปรียบเทียบกับขอบเขตที่ต่ำ (lower bound) ซึ่งควรจะมีการพัฒนาและศึกษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Alagoz O. & Azizoglu, M., 2002. Rescheduling of Identical Parallel Machines under Machine Eligibility Constraints. In Press.
- Centeno, G. & Armacost, R.L., 1997. Parallel Machine Scheduling with Release Time and Machine Eligibility Restrictions. **Computers and Industrial Engineering**, 33: 273-276.
- Gupta, J.N.D., & Tunc, E.A., 1991. Schedules for a Two-Stage Hybrid Flowshop with Parallel Machines at the Second Stage. **International Journal of Production Research**, 77: 415-428.
- Lin Y. and Li, W., 2003. Parallel Machine Scheduling of Machine-Dependent Jobs with Unit-Length. In Press.
- Pinedo, M., 1982. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. **Prentice-Hall**, Englewood Cliffs: NJ.
- Soewandi, H., 1998. Sequencing Jobs on Two-and Three-Stage Hybrid Flowshop to Minimize Makespan. **Doctoral Dissertation**. North Carolina State University. North Carolina.
- Vignier A., Dardilhac, D., Dezalay, D., & Proust, C., 1996. A Branch and Bound Approach to Minimize the Total Completion Time in a k-Stage Hybrid Flowshop. **IEEE Conference on Engineering Technologies and Factory Automation**. (November): 18-21.