โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ วิธีการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่กำหนดเวลา

Heuristic Method for Job Shop Scheduling Problem with Due Date

ชื่อนิสิต นายศุภชัย อินทะ **เลขประจำตัว** 5833545323

ภาควิชา คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา

นายศุภชัย อินทะ

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาคณิตศาสตร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

Heuristic Method for Job Shop Scheduling Problem with Due Date

Mr. Supachai Inta

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Science Program in Mathematics
Department of Mathematics and Computer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2018

หัวข้อโครงงาน	วิธีการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา
โดย	นายศุภชัย อินทะ
สาขาวิชา	คณิตศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันทิพา ทิพย์วิวัฒน์พจนา

ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับโครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาบัณฑิต ในรายวิชา 2301499 โครงงานวิทยาศาสตร์ (Senior Project)

. . . . หัวหน้าภาควิชาคณิตศาสตร์
และวิทยาการคอมพิวเตอร์

(ศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะ เนียมมณี)

คณะกรรมการสอบโครงงาน

. . . . อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พันทิพา ทิพย์วิวัฒน์พจนา)

. . . . กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จิตรจวบ เปาอินทร์)

. . . . กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงเกียรติ สุเมธกิจการ)

ศุภชัย อินทะ: วิธีการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา. (HEURISTIC METHOD FOR JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM WITH DUE DATE) อ.ที่ปรึกษาโครงงานหลัก: รศ. ดร.พันทิพา ทิพย์วิวัฒน์พจนา, 72 หน้า.

ในโครงงานนี้เราศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาโดยใช้ วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming method) และ วิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ (Nondelay scheduling scheme method) เพื่อแก้หาคำตอบตามฟังก์ชันจุดประสงค์ที่กำหนดไว้ ซึ่งได้ใช้ปัญหามาตรฐาน (Benchmark) ขนาด 10 งาน กับ 5 เครื่องจักร จำนวน 5 ปัญหา พร้อมกับพิจารณากำหนดเวลาแยกออกเป็น 3 แบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นค่าคงตัวที่สอดคล้องกับปัญหาดังกล่าว จากนั้นจะแสดงผลการเปรียบเทียบของคำตอบที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการ ผ่านค่าร้อยละความคาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE : Relative Error) และค่าเฉลี่ยของร้อยละความคาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MRE : Mean Relative Error) เพื่อสรุปผลจากผลคำตอบที่ได้มา พร้อมทั้งแสดงถึงปัญหาที่พบเมื่อใชวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์และเสนอแนวทางการปรับปรุงวิธีการฮิวริสติกดังกล่าว

ภาควิชา คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา . คณิตศาสตร์ . ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาโครงงานหลัก ....
ปีการศึกษา ....2561....

5833545323 : MAJOR MATHEMATICS.

SUPACHAI INTA : HEURISTIC METHOD FOR JOB SHOP SCHEDULING PROBLEM WITH DUE DATE.

ADVISOR : ASST PROF.PHANTIPA THIPWIWATPOTJANA , Ph.D., 72 pp.

In this project, we study job shop scheduling problems with due date and use two methods to find solution of a job shop scheduling problems with due date and state an appropriate objective function. First, we use integer linear programming method. Second, we use nondelay scheduling scheme method. Next, we use 10 jobs and 5 machines for benchmark of job shop scheduling problems. In case of due date. we consider three types of due date and assign parameters that correspond to a job shop scheduling problems with due date. After that, we use the relative error (RE) and the mean relative error (MRE) to compare solutions. Finally, we conclude all results and explain the problems we had been encountered while using nondelay. Moreover, we provide an idea how to improve our heuristic method.

Department	Mathematics and Computer Science	Student's Signature	....
Field of Study	.. Mathematics ..	Advisor's Signature	....
Academic Year	..... 2018	Co-advisor's Signature	....

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สามารถประสบความสำเร็จและบรรลุวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร.พันทิพา ทิพย์วิวัฒน์พจนา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ จิตรจวบ เปาอินทร์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ทรงเกียรติ สุเมธกิจการ ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำโครงงาน ตลอดจนถึงบุคคลอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวถึง ซึ่งได้ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน และคอยช่วยเหลือในด้านต่างๆ พร้อมทั้งให้กำลังใจผู้จัดทำเสมอมา

สารบัญ

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

การจัดตารางการผลิตเป็นขั้นตอนการตัดสินใจที่ใช้ทั่วไปในส่วนต่างๆของภาคการผลิตและอุตสาหกรรมการบริการ โดยมีการจัดสรรทรัพยากรให้ทำงานบนระยะเวลาที่กำหนดและมีเป้าหมายในการหาคำตอบที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาที่ตั้งไว้ ในโครงงานนี้เราจะให้ทรัพยากรแทนที่ด้วย เครื่องจักร (Machines) และให้สิ่งที่ต้องทำแทนที่ด้วย งาน (Jobs) โดยที่เราได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีค่าการเก็บรักษาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตระหว่างที่รอทำงานบนเครื่องจักร และมีค่ากำหนดเวลาซึ่งมีผลต่อการทำงานเสร็จก่อนหรือหลังระยะเวลาที่กำหนดไว้มาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งได้ใช้ปัญหามาตรฐาน (Benchmark) ขนาด 10 งาน 5 เครื่องจักร จำนวน 5 ปัญหา พร้อมกับพิจารณากำหนดเวลาแยกออกเป็น 3 แบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เป็นค่าคงตัวที่สอดคล้องกับปัญหาดังกล่าว จากนั้นจะใช้วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming method) และวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ (Nondelay scheduling scheme method) ในการหาคำตอบที่เหมาะสมและคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบเหมาะสมของปัญหาทั้งหมดตามลำดับ เนื่องจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มนั้นสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้แต่มีข้อกำจัดด้านเวลาสำหรับการแก้ปัญหา ขนาดใหญ่ จึงมีการนำวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์มาใช้ช่วยหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมพร้อมทั้ง แสดงเวลาในการแก้ปัญหาจากทั้ง 2 วิธีการ จากนั้นเราจะนำคำตอบจากทั้ง 2 วิธีการ มาเปรียบเทียบผ่านค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE : Relative Error) และ ค่าเฉลี่ยของร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MRE : Mean Relative Error) เพื่อแสดงให้เห็นว่า คำตอบที่เป็นการประมาณที่ได้จากวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ นั้นมีความคลาดเคลื่อนกับคำตอบแท้จริงที่ได้จากวิธีการกำ หนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มเพียงใด ในแต่ละปัญหามาตรฐานพร้อมกับกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาโดยใช้วิธีการในการปัญหา 2 วิธีการ คือ วิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มและวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมกับคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมตามลำดับ มีการใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มาใช้ในการเปรียบเทียบ ให้เห็นถึงข้อดีข้อเสียของทั้ง 2 วิธีการ

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. พิจารณาปัญหาขนาดเล็กของการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา โดยที่ จำนวนงานไม่เกิน 10 งานและจำนวนเครื่องจักรไม่เกิน 10 เครื่องจักร
2. ใช้โปรแกรม CPLEX และ Python ในการแก้ปัญหา 2 รูปแบบ ประกอบด้วย กำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มและวิธีการฮิวริสติก ตามลำดับ

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิต
    - ก. โครงและสัญลักษณ์ของปัญหาการจัดตารางการผลิต
    - ข. ปัญหาการจัดตารางการผลิตเบื้องต้น
    - ค. ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม CPLEX และ Python ในการหาคำตอบของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา
3. เขียนรหัสของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในโปรแกรม CPLEX และ Python จากรูปแบบปัญหาเชิงเส้น
4. หาคำตอบของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาบนโปรแกรม CPLEX และ Python
5. เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์และค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ รวมทั้งหาเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาของทั้ง 2 วีธีการ

6. ตรวจสอบการทำงาน
7. สรุปผลและเขียนรูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประโยชน์ต่อตัวนิสิตที่ทำโครงงาน
    1.1 สามารถประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานทางคณิตศาสตร์และความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา
    1.2 สามารถเรียนรู้การทำงานได้อย่างเป็นระบบ
2. ประโยชน์ที่ได้จากโครงงานที่พัฒนาขึ้น
    2.1 สามารถหาคำตอบของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาโดยใช้วิธีการเชิงเส้นของจำนวนเต็มและวิธีการฮิวริสติก
    2.2 สามารถประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในขนาดที่ใหญ่ขึ้นได้

บทที่ 2
ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา

2.1 ปัญหาการจัดตารางการผลิต

ในโครงงานนี้ เราจะศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิต (Job shop scheduling problem) ที่มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ งาน (Jobs) และ เครื่องจักร (Machines) โดยที่ n แทนจำนวนของงานทั้งหมด และ m แทนจำนวนของเครื่องจักรทั้งหมด
ต่อจากนี้ จะกำหนดให้ $i = 1, 2, ..., m$ และ $j = 1, 2, ..., n$

- O_{ij} แทน โอเปอเรชัน (Operation) ที่ถูกจัดลำดับการทำงาน (ลำดับการผลิต) ของงานที่ j บนเครื่องจักรลำดับที่ i
- J_j แทน เซตของโอเปเรชันที่ทำงานตามลำดับของเครื่องจักรที่กำหนดมาของงานที่ j
- M_i แทน เซตของโอเปอเรชันที่ทำงานบนเครื่องจักรที่ i

นอกจากนี้ปัญหาการจัดตารางการผลิตดังกล่าวต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ในแต่ละงานจะมีกำหนดของลำดับของเครื่องจักรที่ใช้ในการทำงานนั้นมาแล้วไม่สามารถแก้ไขลำดับ การทำงานของเครื่องจักรที่กำหนดมาแล้วได้
2. โอเปอเรชันบนงานเดียวกันไม่สามารถทำงานพร้อมกันได้ ณ ขณะเวลาเดียวกัน
3. เครื่องจักรแต่ละเครื่องจะทำงานได้เพียงหนึ่งโอเปอเรชัน ณ ขณะเวลาเดียวกัน

ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตโดยทั่วไป จะมีวัตถุประสงค์ในการจัดตารางการผลิตที่ใช้ระยะเวลาปิดงาน ของระบบหรือเมคสแปน (Makespan) น้อยที่สุด แต่ในโครงงานนี้เราจะศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อ 2.2

2.2 ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา

ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา (Job shop scheduling problem with due date) คือ มีเวลาที่กำหนดมาให้ว่าแต่ละงานควรจะทำเสร็จตามนี้ (Due date) ซึ่งในโครงงานนี้เราจะศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา จะมีค่าเก็บรักษาวัสดุที่ใช้ในการผลิตในขณะทำการผลิต (Holding Cost) และค่าเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด (Earliness Cost) รวมทั้งค่าเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนด (Tardiness Cost) ตามการศึกษางานวิจัยเรื่อง A linear programming-based method for job shop scheduling [1] ของ Karem Bulbul และ Philip Kaminsky โดยสามารถเขียนแสดงปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในรูปของปัญหากำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming Problem) ที่ประกอบด้วย ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) และ เงื่อนไข (Constraints) ดังต่อไปนี้

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function)

$$Minimize \quad \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m_j} h_{ij}w_{ij} + \sum_{j=1}^{n}(\epsilon_j E_j + \pi_j T_j) + \gamma C_{max} \tag{1}$$

เงื่อนไข (Constraints)

$s.t.$

$$C_{1j} - w_{1j} = r_j + p_{1j} \qquad \forall j \tag{2}$$

$$C_{ij} - C_{(i-1)j} = w_{ij} + p_{ij} \qquad \forall i = 2, ..., m_j \tag{3}$$

$$C_{kl} - C_{gh} \geq p_{kl} \ \text{ หรือ } \ C_{gh} - C_{kl} \geq p_{gh} \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i \tag{4}$$

$$C_{ij}, w_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \ \ \forall j \tag{5}$$

$$C_{m_j j} + E_j = T_j + d_j \qquad \forall j \tag{6}$$

$$C_{max} \geq C_{m_j j} \qquad \forall j \tag{7}$$

$$E_j, T_j \geq 0 \qquad \forall j \tag{8}$$

$$C_{max} \geq 0 \tag{9}$$

หมายเหตุ $\forall j$ แทน $\forall j \in \{1, \ldots, n\}$ และ $\forall i$ แทน $\forall i \in \{1, \ldots, m\}$

ฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขต่างๆ ของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยตัวแปร (Variables) และพารามิเตอร์ (Parameters) ดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์ (Parameters)

- p_{ij} แทนด้วย ช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- h_{ij} แทนด้วย ค่าเก็บรักษาวัสดุที่ใช้ในการผลิตในขณะทำการผลิตต่อหน่วยเวลาของงานที่ j ในขณะที่รอเริ่มทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- r_j แทนด้วย เวลาเริ่มต้นในการทำงานของงานที่ j
- d_j แทนด้วย เวลาที่กำหนดให้ของงานที่ j (กำหนดเวลาของงานที่ j)
- ϵ_j แทนด้วย ค่าเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนดต่อหน่วยเวลาของงานที่ j
- π_j แทนด้วย ค่าเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนดต่อหน่วยเวลาของงานที่ j
- γ แทนด้วย ค่าเสียหายที่ขึ้นกับค่าเมคสแปน (C_{max})

ตัวแปร (Variables)

- w_{ij} แทนด้วย ช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการรอก่อนจะทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- C_{ij} แทนด้วย เวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- E_j แทนด้วย ช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด
- T_j แทนด้วย ช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนด
- C_{mj} แทนด้วย เวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับสุดท้าย
- C_{max} แทนด้วย เวลาปิดงานของระบบ (ค่าเมคสแปน)

ฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขต่างๆ ของปัญหาดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (1)

คือ ต้องการหาค่าต่ำสุดของค่าเก็บรักษาวัสดุที่ใช้ในการผลิตในขณะทำการผลิตบวก กับผลรวมของค่าเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด และค่าเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนด บวกกับค่าเสียหายที่ขึ้นกับค่าเมคสแปน

เงื่อนไข (2)

กำกับให้ โอเปอเรชันลำดับแรกของแต่ละงานนั้นสามารถเริ่มทำงานได้หลังจากเวลาเริ่มต้นในการทำงานที่กำหนดมา

เงื่อนไข (3)

กำกับให้ ทุกงานที่ j แต่ละโอเปอเรชันในเซต J_j ต้องทำงานให้สอดคล้องกับลำดับของเซต $J_j = \{O_{1j}, O_{2j}, ..., O_{m_j j}\}$ ที่กำหนดมา นั่นคือ $O_{(i+1)j}$ จะเริ่มทำงานได้เร็วที่สุดเมื่อ O_{ij} ทำงานเสร็จ

เงื่อนไข (4)

กำกับให้ สำหรับแต่ละโอเปอเรชันของเครื่องจักรที่ i ในเซต M_i เพื่อดูว่า O_{kl} หรือ O_{gh} สอดคล้องกรณีใดดังต่อไปนี้

- กรณี O_{kl} ทำงานก่อน O_{gh} : จะได้ว่า O_{gh} จะเริ่มทำงานได้เร็วที่สุดหลังจาก O_{ij} ทำงานเสร็จ
- กรณี O_{gh} ทำงานก่อน O_{kl} : จะได้ว่า O_{kl} จะเริ่มทำงานได้เร็วที่สุดหลังจาก O_{gh} ทำงานเสร็จ

เพื่อจัดลำดับของโอเปอเรชันที่ทำงานบนเครื่องจักรเดียวกัน

เงื่อนไข (5)

กำกับให้ สำหรับทุก i, j เวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับที่ i และช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการรอก่อนจะทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 เสมอ

เงื่อนไข (6)

กำกับให้ เวลาที่ใช้การทำงานจนกระทั่งเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงาน ต้องสอดคล้องกับช่วงเวลาที่งานนั้นใช้ในการทำงานเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด และช่วงเวลาที่งานนั้นใช้ในการทำงานเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนด

เงื่อนไข (7)

กำกับให้ ค่าเมคสแปนต้องมากกว่าหรือเท่ากับ เวลาที่ใช้การทำงานจนเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงาน

เงื่อนไข (8)

กำกับให้ ช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด และช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 เสมอ

เงื่อนไข (9)

กำกับให้ ค่าเมคสแปนต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 เสมอ

ตัวอย่าง 1) (ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา)

กำหนดปัญหาขนาด 3×3 คือ มีงานจำนวน 3 งาน และ มีเครื่องจักรจำนวนเครื่อง 3 เครื่อง โดยแต่ละงานจะกำหนดลำดับการทำงานของโอเปอเรชันบนเครื่องจักรต่างๆ (μ_{ij}) และมีเวลาที่ใช้ในการทำงาน (p_{ij}) ที่สอดคล้องกับลำดับการทำงานในแต่ละงาน รวมทั้งกำหนดเวลาของแต่ละงาน ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 : ปัญหาการจัดตารางการผลิต ขนาด 3×3

งาน J_j	ลำดับโอเปอเรชัน (μ_{ij}, p_{ij})			กำหนดเวลา d_j
	O_{1j}	O_{2j}	O_{3j}	
1	$(M_1, 3)$	$(M_2, 3)$	$(M_3, 3)$	14
2	$(M_1, 3)$	$(M_3, 3)$	$(M_2, 4)$	13
3	$(M_2, 4)$	$(M_1, 2)$	$(M_3, 1)$	12

ปัญหาดังตารางที่ 2.3 สามารถเขียนแสดง เซต J_j และเซต M_i ได้ดังนี้

$J_1 = \{O_{11}, O_{21}, O_{31}\}$, $J_2 = \{O_{12}, O_{22}, O_{32}\}$ และ $J_3 = \{O_{13}, O_{23}, O_{33}\}$

$M_1 = \{O_{11}, O_{12}, O_{23}\}$, $M_2 = \{O_{13}, O_{21}, O_{32}\}$ และ $M_3 = \{O_{22}, O_{31}, O_{33}\}$

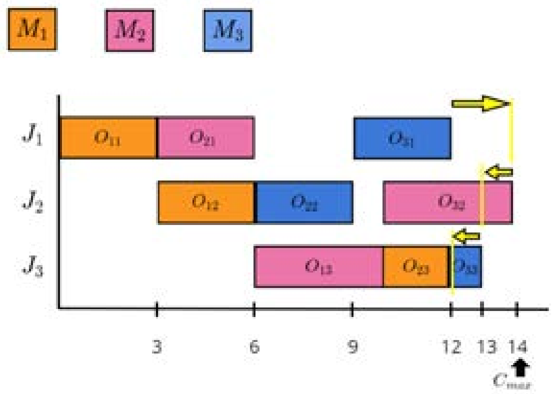
สำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา เราจะต้องจัดลำดับการทำงานของโอเปอเรชันในแต่ละงานตามเซต J_j สำหรับ $j \in \{1, 2, 3\}$ ให้ทำงานตามลำดับของเซต J_j และต้องจัดลำดับการทำงานของโอเปอเรชันในแต่ละเครื่องจักร M_i สำหรับ $i \in \{1, 2, 3\}$ ว่าโอเปอเรชันในแต่ละเซต M_i ถูกทำงานก่อนหรือหลังโอเปอเรชันใด เพื่อให้การจัดลำดับการทำงานของแต่ละโอเปอเรชันสอดคล้องกับเงื่อนไขของปัญหาที่กำหนดไว้ จากตัวอย่างนี้จะเห็นว่ากำหนดเวลาของแต่ละงานที่ได้กำหนดมา คือ $d_1 = 14$, $d_2 = 13$ และ $d_2 = 12$ ซึ่งกำหนดเวลาดังกล่าวจะมีผลต่อเวลาที่แต่ละงานใช้ในการทำงานเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด ซึ่งประกอบด้วย E_1 , E_2 และ E_3 สำหรับตัวอย่างนี้ รวมถึงเวลาที่แต่ละงานใช้ในการทำงานเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนด ซึ่งประกอบด้วย T_1 , T_2 และ T_3 สำหรับตัวอย่างนี้ โดยที่เราจะแสดงตัวอย่างของการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในตัวอย่างนี้ ด้วยวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer linear programming method) ในบทที่ 3 และวิธีการตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ (Nondelay scheduling scheme method) ในบทที่ 4

2.3 แผนภูมิแกนต์

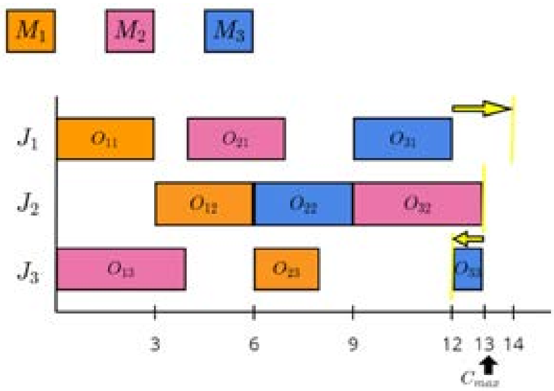
ในโครงงานเล่มนี้ได้ยึดวิธีเขียนแผนภูมิแกนต์ (Gantt chart) ตามงานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์การคำนวณเมคสแปนสำหรับปัญหาการจัดตารางผลิตแบบตามสั่ง [7] ของ นายวันเฉลิม โฮชิน และได้เพิ่มสัญลักษณ์ที่สอดคล้องกับกำหนดเวลาเข้าไปเพื่อให้ทราบค่าของเวลาที่ทำงานเสร็จก่อนหน้ากำหนดเวลาและเวลาที่ทำงานเสร็จหลังจากกำหนดเวลา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- กำหนดให้รูปสี่เหลี่ยม แทนด้วย โอเปอเรชัน
- รูปสี่เหลี่ยมที่อยู่ในแถวเดียวกันคือโอเปอเรชันของงานเดียวกัน
- รูปสี่เหลี่ยมที่มีสีเดียวกันคือโอเปอเรชันที่ทำงานบนเครื่องจักรเดียวกัน
- ความยาวตามด้านแนวนอนของรูปสี่เหลี่ยมแทนเวลาที่เครื่องจักรใช้ในการทำงานของโอเปอเรชัน O_{ij}
- กำหนดให้เส้นตรงตามแนวตั้งในแต่ละงาน แทนด้วย กำหนดเวลาของแต่ละงาน
- กำหนดให้ความยาวของและทิศทางลูกศร แทนด้วย
  - ถ้าหัวลูกศรชี้ออกจากด้านท้ายสุดโอเปอเรชันลำดับสุดท้ายเข้าหากำหนดเวลาไปทางขวา จะให้ค่า E_j สำหรับแต่ละงาน j
  - ถ้าหัวลูกศรชี้ออกจากด้านท้ายสุดโอเปอเรชันลำดับสุดท้ายเข้าหากำหนดเวลาไปทางซ้าย จะให้ค่า T_j สำหรับแต่ละงาน j

ต่อไปนี้จะแสดงรูปตัวอย่างการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาของตัวอย่างที่ 1 ที่ใช้วิธีการเขียนแบบแผนภูมิแกนต์ดังที่กล่าวไปข้างต้น



รูป 2.1: ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลามีค่าเมคสแปนเป็น 14



รูป 2.2: ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลามีค่าเมคสแปนเป็น 13

บทที่ 3
วิธีกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

3.1 วิธีกำหนดการเชิงเส้งจำนวนเต็มเบื้องต้น

วิธีกำหนดการเชิงเส้น (LP : Linear programming) เป็นวิธีการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หา คำตอบที่ดีที่สุด (The best outcome) ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเข้ามาช่วยในการหาคำตอบ โดยการทำให้ได้ค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ของฟังก์ชันจุดประสงค์เชิงเส้น (Linear objective function) และเงื่อนไข (Constraints) ในรูปของสมการเชิงเส้น หรืออสมการเชิงเส้น ในการหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimal solution) โดยทั่วไปจะเป็นการหาค่ามากสุด (Maximum) หรือการหาค่าต่ำสุด (Minimum) ของปัญหากำหนดการเชิงเส้นดังกล่าว

เราสามารถเขียนตัวอย่างของปัญหากำหนดการเชิงเส้นในรูปแบบบัญญัติ (Canonical form) ได้ดังนี้

(Objective function) $Minimize\ \ c^T x$

(Constraints) $subject\ to\ Ax \leq b$

$and\ x \geq 0$

เมื่อ x แทน เวกเตอร์ของตัวแปร (ที่ต้องการทราบค่า) ที่มีขนาด $n \times 1$

c, b แทน เวกเตอร์ของสัมประสิทธฺ (ที่ทราบค่า) ที่มีขนาด $n \times 1$

A แทน เมทริกซ์ (Matrix) ของสัมประสิทธิ์ (ที่ทราบค่า) ที่มีขนาด $m \times n$

ปัญหากำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (ILP: Integer linear programming problem) คือปัญหากำหนดการเชิงเส้นที่พิจารณากรณีที่ตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น ทำให้เราสามารถเขียนตัวอย่างของปัญหากำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มในรูปแบบบัญญัติ (Canonical form) ได้ดังนี้

(Objective function) $Minimize \;\; c^T x$

(Constraints) $subject\ to\ Ax \leq b$

$and\ x \geq 0\ ,\ x \in \mathbb{Z}^n$

จากตัวอย่างของปัญหากำหนดการเชิงเส้นและปัญหากำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มในรูปแบบบัญญัติ เราสามารถใช้ $Maximize$ แทน $Minimize$ ในการกรณีต้องการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่กำหนด รวมทั้งสามารถใช้เครื่องหมาย $=$ หรือ $>$ หรือ $\geq$ หรือ $<$ หรือ $\leq$ ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

3.2 วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มสำหรับการแก้ปัญหา

ในหัวข้อนี้เราจะนำปัญหาการจัดตาราง การผลิตที่มีกำหนดเวลาในหัวข้อที่ 2.2 มาพิจารณาอีกครั้งเพื่อใช้วิธีการกำหนดการเชิงเส้น จำนวนเต็มช่วยในการแก้หาคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขต่างๆของปัญหา ดังกล่าว ในการใช้วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม เราต้องแปลงเงื่อนไขที่ (4) และเงื่อนไขที่ (6) ของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในหัวข้อที่ 2.2 โดยใช้ตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี (Binary variables) มาช่วยในการแปลงให้เงื่อนไขนั้นสอดคล้องกับวิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็ม ดังนี้

$\rightarrow$ พิจารณาเงื่อนไขที่ (4) ที่กำหนดไว้คือ

$$C_{kl} - C_{gh} \geq p_{kl} \ \text{ หรือ } \ C_{gh} - C_{kl} \geq p_{gh} \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i \tag{4}$$

จะเห็นว่าใช้ **หรือ** เป็นตัวเชื่อมระหว่าง 2 อสมการภายในเงื่อนไขที่ (4) ฉะนั้น เราจะกำหนดให้ $y_{(kl)(gh)}$ เป็น ตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี (Binary variables) ของการเลือกลำดับการผลิตระหว่างโอเปอเรชัน O_{ik} และ O_{kj}

- กรณี $y_{(kl)(gh)} = 0$ จะได้ว่า โอเปอเรชัน O_{gh} จะมีลำดับการผลิตก่อน O_{kl}
- กรณี $y_{(kl)(gh)} = 1$ จะได้ว่า โอเปอเรชัน O_{kl} จะมีลำดับการผลิตก่อน O_{gh}

เราจึงสามารถเปลี่ยนเงื่อนไขที่ (4) โดยการใช้ตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี $y_{(kl)(gh)}$ และกำหนดให้ L แทนจำนวนจริงบวกขนาดใหญ่ จะเขียนในรูปวิธีการกำหนดการเชิงเส้น

จำนวนเต็มได้เป็น

$$C_{kl} - C_{gh} \geq p_{kl} - Ly_{(kl)(gh)} \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i \qquad (4')$$

$$C_{gh} - C_{kl} \geq p_{gh} - L(1 - y_{(kl)(gh)}) \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i \qquad (4'')$$

$$y_{(kl)(gh)} \in \{0, 1\} \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i$$

$\rightarrow$ พิจารณาเงื่อนไขที่ (6) ที่กำหนดไว้คือ

$$C_{m_j j} + E_j = T_j + d_j \qquad \forall j \in \{1, \ldots, n\}$$

พิจารณาตัวแปร

$$E_j = \begin{cases} d_j - C_{m_j j} & , d_j - C_{m_j j} > 0 \\ 0 & , d_j - C_{m_j j} \leq 0 \end{cases} \text{ และ } T_j = \begin{cases} C_{m_j j} - d_j & , C_{m_j j} - d_j > 0 \\ 0 & , C_{m_j j} - d_j \leq 0 \end{cases}$$

จะเห็นว่าเราต้องใช้ตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารีมาช่วยในการสร้างเงื่อนไขสำหรับตัวแปร E_j , T_j เราจะกำหนดให้ f_j เป็นตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี (Binary variables) ของ E_j

- กรณี $f_j = 0$ จะได้ว่า $E_j = 0$
- กรณี $f_j = 1$ จะได้ว่า $E_j = d_j - C_{m_j j}$

และกำหนดให้ g_j เป็นตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี (Binary variables) ของ T_j

- กรณี $g_j = 0$ จะได้ว่า $T_j = 0$
- กรณี $g_j = 1$ จะได้ว่า $T_j = C_{m_j j} - d_j$

เราจึงสามารถสร้างเงื่อนไขสำหรับตัวแปร E_j , T_j จากเงื่อนไขที่ (6) โดยใช้ตัวแปรการตัดสินใจแบบไบนารี f , g และกำหนดให้ L แทนจำนวนจริงบวกขนาดใหญ่ จะเขียนในรูปวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มได้เป็น

- สำหรับการหาค่าตัวแปร E_j

$$(d_j - C_{m_j j}) - L(1 - f_j) \leq E_j \leq (d_j - C_{m_j j}) + L(1 - f_j) \qquad \forall j \qquad (6\dot{E})$$

$$-Lf_j \leq E_j \leq Lf_j \qquad \forall j \qquad (6\ddot{E})$$

$$f_j \in \{0, 1\} \qquad \forall j$$

– สำหรับการหาค่าตัวแปร T_j

$$(C_{m_j j} - d_j) - L(1 - g_j) \leq T_j \leq (C_{m_j j} - d_j) + L(1 - g_j) \qquad \forall j \qquad (6\dot{T})$$

$$- Lg_j \leq T_j \leq Lg_j \qquad \forall j \qquad (6\ddot{T})$$

$$g_j \in \{0, 1\} \qquad \forall j$$

จากเงื่อนไขที่ (4’) , (4”) , ($6\dot{E}$) , ($6\ddot{E}$) , ($6\dot{T}$) และ ($6\ddot{T}$) ที่ได้จากกระบวนการแปลงเงื่อนไขข้างต้น ทำให้เราสามารถเขียนปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในหัวข้อที่ 2.2 ในรูปของปัญหากำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มได้ดังนี้

$$Minimize \ \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m_j} h_{ij} w_{ij} + \sum_{j=1}^{n} (\epsilon_j E_j + \pi_j T_j) + \gamma C_{max} \qquad (1)$$

$s.t.$

$$C_{1j} - w_{1j} = r_j + p_{1j} \qquad \forall j \qquad (2)$$

$$C_{ij} - C_{(i-1)j} = w_{ij} + p_{ij} \qquad i = 2, ..., m_j \qquad (3)$$

$$C_{kl} - C_{gh} \geq p_{kl} - Ly_{(kl)(gh)} \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i \qquad (4')$$

$$C_{gh} - C_{kl} \geq p_{gh} - L(1 - y_{(kl)(gh)}) \qquad \forall O_{kl}, O_{gh} \in M_i \qquad (4'')$$

$$C_{ij}, w_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \ \ \forall j \qquad (5)$$

$$(d_j - C_{m_j j}) - L(1 - f_j) \leq E_j \leq (d_j - C_{m_j j}) + L(1 - f_j) \qquad \forall j \ (6\dot{E})$$

$$- Lf_j \leq E_j \leq Lf_j \qquad \forall j \ (6\ddot{E})$$

$$(C_{m_j j} - d_j) - L(1 - g_j) \leq T_j \leq (C_{m_j j} - d_j) + L(1 - g_j) \qquad \forall j \ (6\dot{T})$$

$$- Lg_j \leq T_j \leq Lg_j \qquad \forall j \ (6\ddot{T})$$

$$C_{m_j j} + E_j = T_j + d_j \qquad \forall j \qquad (6)$$

$$C_{max} \geq C_{m_j j} \qquad \forall j \qquad (7)$$

$$E_j, T_j \geq 0 \qquad \forall j \qquad (8)$$

$$C_{max} \geq 0 \qquad (9)$$

$$y_{(ik)(ij)}, f_j, g_j \in \{0, 1\} \qquad (10)$$

หมายเหตุ $\forall j$ แทน $\forall j \in \{1, \ldots, n\}$ และ $\forall i$ แทน $\forall i \in \{1, \ldots, m\}$

ตัวอย่าง 2) จากปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาของตัวอย่างที่ 1 สามารถนำมาเขียนในรูปของปัญหากำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มได้ดังนี้

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{3} h_{ij}w_{ij} + \sum_{j=1}^{3}(\epsilon_j E_j + \pi_j T_j) + \gamma C_{max}$$

$s.t.$

- เงื่อนไขที่ (2)

  $C_{11} - w_{11} = 3$

  $C_{12} - w_{12} = 3$

  $C_{13} - w_{13} = 4$

- เงื่อนไขที่ (3)

  $C_{21} - C_{11} = w_{21} + 3$, $C_{31} - C_{21} = w_{31} + 3$

  $C_{22} - C_{12} = w_{22} + 3$, $C_{32} - C_{22} = w_{32} + 4$

  $C_{23} - C_{13} = w_{23} + 3$, $C_{33} - C_{23} = w_{33} + 4$

- เงื่อนไขที่ (4’) และ (4”)

  เครื่องจักรที่ 1 : $M_1 = \{O_{11}, O_{12}, O_{23}\}$

  $C_{11} - C_{12} \geq 3 - Ly_{(11)(12)}$

  $C_{12} - C_{11} \geq 3 - L(1 - y_{(11)(12)})$

  $C_{11} - C_{23} \geq 3 - Ly_{(11)(23)}$

  $C_{23} - C_{11} \geq 2 - L(1 - y_{(11)(23)})$

  $C_{12} - C_{23} \geq 3 - Ly_{(12)(23)}$

  $C_{23} - C_{12} \geq 2 - L(1 - y_{(12)(23)})$

  เครื่องจักรที่ 2 : $M_2 = \{O_{13}, O_{21}, O_{32}\}$

  $C_{13} - C_{21} \geq 4 - Ly_{(13)(21)}$

  $C_{21} - C_{13} \geq 3 - L(1 - y_{(13)(21)})$

  $C_{13} - C_{32} \geq 4 - Ly_{(13)(32)}$

  $C_{32} - C_{13} \geq 4 - L(1 - y_{(13)(32)})$

  $C_{21} - C_{32} \geq 3 - Ly_{(21)(32)}$

  $C_{32} - C_{21} \geq 4 - L(1 - y_{(21)(32)})$

  เครื่องจักรที่ 3 : $M_3 = \{O_{22}, O_{31}, O_{33}\}$

  $C_{22} - C_{31} \geq 3 - Ly_{(22)(31)}$

$C_{31} - C_{22} \geq 3 - L(1 - y_{(22)(31)})$

$C_{22} - C_{33} \geq 3 - Ly_{(22)(33)}$

$C_{33} - C_{22} \geq 1 - L(1 - y_{(22)(33)})$

$C_{31} - C_{33} \geq 3 - Ly_{(31)(33)}$

$C_{33} - C_{31} \geq 1 - L(1 - y_{(31)(33)})$

- เงื่อนไขที่ (5)

  $C_{ij} \geq 0, w_{ij} \geq 0 \qquad \forall i, j \in \{1, 2, 3\}$

- เงื่อนไขที่ $(6\dot{E})$, $(6\ddot{E})$, $(6\dot{T})$, $(6\ddot{T})$, (6)

  งานที่ 1

  $(14 - C_{31}) - L(1 - f_1) \leq E_1 \leq (14 - C_{31}) + L(1 - f_1)$

  $-Lf_1 \leq E_1 \leq Lf_1$

  $(C_{31} - 14) - L(1 - g_1) \leq T_1 \leq (C_{31} - 14) + L(1 - g_1)$

  $-Lg_1 \leq T_1 \leq Lg_1$

  $C_{31} + E_1 - T_1 = 14$

  งานที่ 2

  $(13 - C_{32}) - L(1 - f_2) \leq E_2 \leq (13 - C_{32}) + L(1 - f_2)$

  $-Lf_2 \leq E_2 \leq Lf_2$

  $(C_{32} - 13) - L(1 - g_2) \leq T_2 \leq (C_{32} - 13) + L(1 - g_2)$

  $-Lg_2 \leq T_2 \leq Lg_2$

  $C_{32} + E_2 - T_2 = 13$

  งานที่ 3

  $(12 - C_{33}) - L(1 - f_3) \leq E_3 \leq (12 - C_{33}) + L(1 - f_3)$

  $-Lf_3 \leq E_3 \leq Lf_3$

  $(C_{33} - 12) - L(1 - g_3) \leq T_3 \leq (C_{33} - 12) + L(1 - g_3)$

  $-Lg_3 \leq T_3 \leq Lg_3$

  $C_{33} + E_3 - T_3 = 12$

- เงื่อนไขที่ (7)

  $C_{max} \geq C_{31}$, $C_{max} \geq C_{32}$, $C_{max} \geq C_{33}$

- เงื่อนไขที่ (8)

  $E_j \geq 0, T_j \geq 0 \qquad \forall j \in \{1,2,3\}$

- เงื่อนไขที่ (9)

  $C_{max} \geq 0$

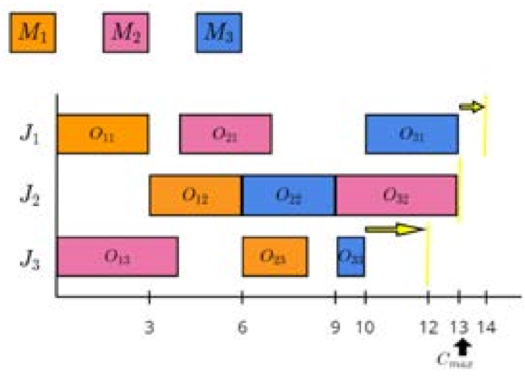
- เงื่อนไขที่ (10)

  $y_{(11)(12)}, y_{(11)(23)}, y_{(12)(23)}, y_{(13)(21)}, y_{(13)(32)}, y_{(21)(32)}, y_{(22)(31)}, y_{(22)(33)}, y_{(31)(33)}$,
  $f_1, f_2, f_3, g_1, g_2, g_3 \in \{0,1\}$

จากการคำนวณผลตัวอย่างที่ 1 ด้วยโปรแกรมIBM ILOG CPLEX Optimization (Version 12.6.3) บนคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 ที่มีระบบประมวลผล Intel Core i7-7500 CPU 3.5 GHz RAM 4 GB เมื่อกำหนดให้ $h_{ij} = 0.2$ สำหรับทุก i, j , $E_j = 0.25$ สำหรับทุก j , $T_j = 0.5$ สำหรับทุก j และ $\gamma = 0.125$ จะได้คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์เป็น 4.375 หน่วย รวมทั้งได้ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขต่างๆ ของปัญหาในตัวอย่างที่ 1 ดังนี้

$(w_{11}, w_{21}, w_{31}) = (0,1,3)$, $(w_{12}, w_{22}, w_{32}) = (3,0,0)$, $(w_{13}, w_{23}, w_{33}) = (0,2,1)$
$(C_{11}, C_{21}, C_{31}) = (3,7,13)$, $(C_{12}, C_{22}, C_{32}) = (6,9,13)$, $(C_{13}, C_{23}, C_{33}) = (4,8,10)$
$(E_1, E_2, E_3) = (1,0,2)$, $(T_1, T_2, T_3) = (0,0,0)$, $C_{max} = 13$

และจะแสดงการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาที่สอดคล้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์ของตัวอย่างที่ 1 โดยใช้วิธีการกำหนดการเชิงเส้น จำนวนเต็มในการแก้ปัญหาดังกล่าว ดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1: การจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาที่สอดคล้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์ของตัวอย่างที่ 1

บทที่ 4
วิธีการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์

ในบทนี้เราจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการฮิวริสติกที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาการจัด ตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา เนื่องจากมีวิธีฮิวริสติกที่ถูกเสนอมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ยกตัวอย่างเช่น วิธีกฎการจ่ายงาน (Dispatching rule) ,วิธีชิพติ้งบอททอลเนค (Shifting bottleneck) ,วิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu search) เป็นต้น แต่ในโครงงานนี้เราที่จะศึกษาวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ (Nondelay scheduling scheme method) ได้ถูกเสนอโดย Baker (1974) [4] ซึ่งเป็นวิธีฮิวริสติกที่ใช้พื้นฐานของวิธีกฎการจ่ายงาน (Dispatching rule) โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดไว้ในหัวข้อ 4.1

4.1 วิธีจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์

ในหัวข้อนี้ได้ยึดวิธีจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ตามงานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์การคำนวณเมคสแปนสำหรับปัญหาการจัดตารางผลิตแบบตามสั่ง [7] ของ นายวันเฉลิม โฮชิน โดยใช้หลักการจัดโอเปอเรชันทีละหนึ่งโอเปอเรชันจนกระทั่งโอเปอเรชันทั้งหมดถูกจัดจนครบ เพื่อให้ได้ค่าเมคสแปน (C_{max}) น้อยที่สุด ซึ่งจะกำหนดเซตโอเปอเรชันคู่แข่ง (Candidates set) เป็นตัวแทนของโอเปอเรชันที่จะใช้เพื่อพิจารณาคัดเลือกแล้วนำไปจัดตารางผลิต เราจะกำหนดให้เซตโอเปอเรชันคู่แข่งเริ่มต้นประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นโอเปอเรชันลำดับแรกของแต่ละงานและใช้เกณฑ์ในการคัดเลือกโอเปอเรชันที่ยึดตามลำดับความสำคัญ คือ เริ่มจากพิจารณาการเลือกโอเปอเรชันในเซตโอเปอเรชันคู่แข่งจากเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นทำงานเร็วที่สุด (EST : Earliest Strating Time) ของโอเปอเรชันเป็นลำดับแรก หากไม่สามารถคัดเลือกโอเปอเรชันได้ นั่นคือ มีโอเปอเรชันมากกว่า 1 โอเปอเรชันที่มีค่า

EST น้อยที่สุดเท่ากัน ทำให้ต้องพิจารณาการโอเปอเรชันจากเซตโอเปอเรชันคู่แข่งจากเกณฑ์อื่นๆที่มีความสำคัญรองลงมาคืออาจจะพิจารณาผ่านเวลาที่ใช้ในการทำงานน้อยที่สุดของโอเปอเรชัน (SPT : Shortest Processing Time) ของโอเปอเรชัน หรือพิจารณาผ่านผลรวมของเวลาที่ใช้ในการทำงานของโอเปอเรชันที่ยังไม่ถูกเลือก (MWR : Most Work Remainning) จากผลการศึกษาของงานวิจัยข้างต้นได้ผลสรุปว่า การใช้เกณฑ์ MWR/SPT เป็นเกณฑ์สำรองในการคัดเลือกโอเปอเรชันในเซตโอเปอเรชัน คู่แข่งนั้นจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเทียบกับเกณฑ์ MWR หรือ SPT เพียงอย่างเดียว ในการพิจารณาเลือกโอเปอเรชันในเซตโอเปอเรชันคู่แข่งจะเลือก โอเปอเรชันที่มีค่าสัด-ส่วนของ MWR/SPT มากที่สุด ฉะนั้นในโครงงานนี้เราจึงใช้เกณฑ์ MWR/SPT มาเป็นเกณฑ์สำรองสำหรับการพิจารณาเลือกโอเปอเรชันสำหรับโอเปอเรชันในเซตคู่แข่ง พร้อมกับใช้เกณฑ์หลักเป็น EST มาใช้จัดตารางการผลิตโดยการเลือกทีละหนึ่งโอเปอเรชันที่พิจารณาตามเกณฑ์ดังกล่าว ถ้าหากโอเปอเรชันที่ถูกเลือกในเซตคู่แข่งนั้นไม่ใช่โอเปอเรชันลำดับสุดท้ายของแต่ละงานให้เพิ่มโอเปอเรชันลำดับถัดไปจากโอเปอเรชันที่ถูกเลือกของงานนั้นเข้ามาอยู่ในเซตโอเปอเรชันคู่แข่ง จนกระทั่งเซตโอ-เปอเรชันคู่แข่งเป็นเซตว่าง จากนั้น เราจะได้ผลลัพธ์ของการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ที่มีค่าเมคสแปน (C_{max}) น้อยที่สุด

4.2 ขั้นตอนวิธีการทำงานของวิธีการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์

ในหัวข้อนี้เราจะนำวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ที่กล่าวไปแล้วนั้น มีการพิจารณาการเลือกโอเปอเรชันเพื่อนำไปจัดตารางการผลิตให้ ได้ค่าเมคสแปน (C_{max}) น้อยที่สุด มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาในหัวข้อ 2.2 ที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์ คือ

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m_j} h_{ij}w_{ij} + \sum_{j=1}^{n}(\epsilon_j E_j + \pi_j T_j) + \gamma C_{max}$$

เพราะมีสมมติฐานว่ากำหนดเวลาของแต่ละงานที่ผู้จัดทำตั้งขึ้นนั้นควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าเมคสแปน (C_{max}) เนื่องจากในความเป็นจริงเราพอที่จะประมาณเวลาที่ใช้ในการทำงานมากที่สุดของระบบให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเมคสแปน (C_{max}) ได้เราจึงสามารถตั้งกำหนดเวลาให้สอดคล้องกับพารามิเตอร์ต่างๆในฟังก์ชันจุดประสงค์ นั่นจึงเป็นเหตุผลในการนำวิธีการจัดการผลิตแบบนอนดีเลย์ที่ต้องการทำให้ค่าเมคสแปน (C_{max}) น้อยที่สุด มาใช้เพื่อให้ได้คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ดังกล่าวที่มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริง ซึ่งภายในขั้นตอนวิธีการทำงานของวิธีการจัดตารางการผลิตที่มีกำ-หนดเวลาแบบนอนดีเลย์นี้ได้ยึดตามงานวิจัยที่ได้ศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 ที่ต้องการทำให้ค่าเมคสแปน

C_{max} น้อยที่สุด รวมทั้งใช้เกณฑ์หลักเป็น EST และเกณฑ์สำรองเป็นสัดส่วนของ MWR/SPT นอกจากนี้ยังได้เพิ่มการเก็บค่าตัวแปร w_{ij} , E_j , T_j และ C_{max} เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าของฟังก์ชันจุดประสงค์ข้างต้น รายละเอียดของขั้นตอนมีดังนี้
กำหนดให้

- n แทน จำนวนงานทั้งหมด
- m แทน จำนวนเครื่องจักรทั้งหมด
- m_j แทน จำนวน operation ทั้งหมดของงาน J_j เมื่อ $j \in \{1, 2, ..., n\}$
- Can แทน เซตของ operation คู่แข่ง
- p_{kj} แทน ระยะเวลาในการทำงานของโอเปอเรชัน O_{kj}
- EST_{kj} แทน ระยะเวลาเริ่มต้นทำงานของโอเปอเรชัน O_{kj} ที่เร็วที่สุดที่สามารถเป็นไปได้
- MWR_{kj} แทน ผลรวมของระยะเวลาในการทำงานของโอเปอเรชันในงาน เดียวกันที่ยังไม่ถูกเลือก โดยที่ $MWR_{kj} = \sum_{i=1}^{m_j} p_{ij}$
- SPT_{kj} แทน ระยะเวลาในการทำงานของโอเปอเรชัน O_{kj} โดยที่ $SPT_{kj} = p_{kj}$
- V_{kj} แทน ค่าของ $\dfrac{MWR_{kj}}{SPT_{kj}}$ ของโอเปอเรชัน O_{kj}
- C_{ij} แทน ระยะเวลาของงานที่ j ที่ทำงานเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- w_{ij} แทน ระยะเวลาของงานที่ j ที่ใช้ในการรอทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- d_j แทน กำหนดเวลาของงานที่
- C_{m_jj} แทนด้วย เวลาที่โอเปอเรชันลำดับสุดท้ายของงานที่ j ทำงานเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- E_j แทน เวลาที่โอเปอเรชันลำดับสุดท้ายของงานที่ j ทำงานเสร็จก่อนกำหนดเวลา
- T_j แทน เวลาที่โอเปอเรชันลำดับสุดท้ายของงานที่ j ทำงานเสร็จหลังกำหนดเวลา
- C_{max} แทน ค่าเมคสแปน

ขั้นตอนที่ 1

- ป้อนข้อมูล
- กำหนดให้ $Can = \{O_{1j} : 1, 2, ..., n\}$

ขั้นตอนที่ 2

- คำนวณค่า $EST^* = min\{EST_{kj} : \forall O_{kj} \in Can\}$
- ถ้าเซต $Can = \phi$ แล้วหยุดการทำงาน และ

  เก็บค่า $w_{ij} = \begin{cases} EST_{kj} & \text{เมื่อ } k = 1 \\ EST_{kj} - (EST_{(k-1)j} + SPT_{(k-1)j}) & \text{เมื่อ } k = 2, \ldots, m_j \end{cases}$

  เก็บค่า $C_{m_j j} = \sum_{i=1}^{m_j}(w_{ij} + p_{ij})$ และ เก็บค่า $C_{max} = max\{C_{m_j j} : j = 1, \ldots, n\}$

  เก็บค่า $E_j = max(d_j - C_{m_j j}, 0)$ และ เก็บค่า $T_j = max(C_{m_j j} - d_j, 0)$
- คำนวณ $Obf = \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m_j} h_{ij}w_{ij} + \sum_{j=1}^{n}(\epsilon_j E_j + \pi_j T_j) + \gamma C_{max}$

ขั้นตอนที่ 3

- ถ้ามีโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ $EST_{kj} = EST^*$ เพียง 1 โอเปอเรชัน

  $\rightarrow$ เลือกโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ $EST_{kj} = EST^*$ โดยกำหนดให้ O^*_{kj} แทนโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- ถ้ามีโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ $EST_{kj} = EST^*$ มากกว่า 1 โอเปอเรชัน

  $\rightarrow$ คำนวณค่า MWR_{kj} โดยที่ $MWR_{kj} = \sum_{i=k}^{m_j} p_{ij}$ และให้ $SPT_{kj} = p_{kj}$ แล้วคำนวณค่า $V_{kj} = \dfrac{MWR_{kj}}{SPT_{kj}}$

  – กรณีที่มีโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ให้ค่า V_{kj} มากที่สุดเพียง 1 โอเปอเรชัน เลือกโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ให้ค่า V_{kj} มากที่สุด กำหนดให้ O^*_{kj} แทนโอเปอเรชันที่ถูกเลือก

- กรณีที่มีโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ให้ค่า V_{kj} มากที่สุดเกิน 1 โอเปอเรชัน สุ่มโอเปอเรชัน $O_{kj} \in Can$ ที่ให้ค่า V_{kj} มากที่สุด กำหนดให้ O^{*}_{kj} แทนโอเปอเรชันที่ถูกเลือก

ขั้นตอนที่ 4

- เก็บค่า EST_{kj} สำหรับโอเปอเรชัน O_{kj} ที่ถูกเลือก
- ถ้าโอเปอเรชัน O^{*}_{kj} ไม่ใช่โอเปอเรชันที่มีลำดับการผลิตเป็นลำดับสุดท้ายของงาน แล้วให้เพิ่ม $O_{(k+1)j}$ ในเซต Can
- กลับไปขั้นตอนที่ 2

ตัวอย่าง 3) จากปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา ในตัวอย่างที่ 1 สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ได้ดังนี้

รอบที่ 1

- Candidates set = $\{O_{11}, O_{12}, O_{13}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (0,0,0) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* มากกว่า 1 โอเปอเรชัน ดังนั้น เราไม่สามารถเลือกโอเปอเรชันผ่านเกณฑ์ EST ได้
- คำนวณค่า MWR จะได้ MWR = (9,10,7) และหา SPT จะได้ SPT = (3,3,4) จะได้ว่า V = (3,$\frac{10}{3}$,$\frac{7}{4}$) จะเห็นว่าโอเปอเรชัน O_{12} ให้ค่า V มากที่สุด ดังนั้น O^*_{12} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{12} = 0
- นำโอเปอเรชัน O_{22} เพิ่มเข้าไปใน Candidates set
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

(a) ขั้นตอนเริ่มต้นการเลือกโอเปอเรชัน

(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{12}

รูป 4.1: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 1

รอบที่ 2

- Candidates set = $\{O_{11}, O_{22}, O_{13}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (3,3,0) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* เพียง 1 โอเปอเรชันคือโอเปอเรชัน O_{13} ดังนั้น O^*_{13} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{13} = 0
- นำโอเปอเรชัน O_{23} เพิ่มเข้าไปใน Candidates set
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

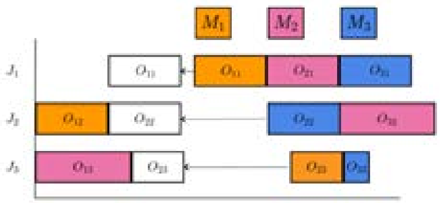
(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 2

(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{13}

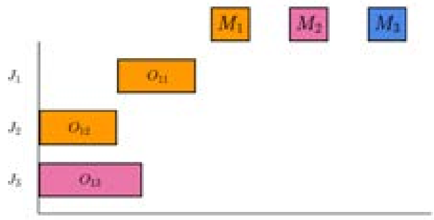
รูป 4.2: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 2

รอบที่ 3

- Candidates set = $\{O_{11}, O_{22}, O_{23}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (3,3,4) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* มากกว่า 1 โอเปอเรชัน ดังนั้น เราไม่สามารถเลือกโอเปอเรชันผ่านเกณฑ์ EST ได้
- คำนวณค่า MWR จะได้ MWR = (9,7,-) และหา SPT จะได้ SPT = (3,3,-) จะได้ว่า V = (3,$\frac{7}{3}$,-) จะเห็นว่าโอเปอเรชัน O_{11} ให้ค่า V มากที่สุด ดังนั้น O^*_{11} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{11} = 3
- นำโอเปอเรชัน O_{21} เพิ่มเข้าไปใน Candidates set
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 3 แสดงได้ดังรูปที่ 4.3



(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 3

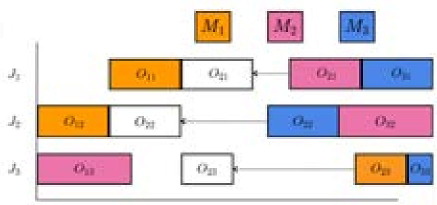


(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{11}

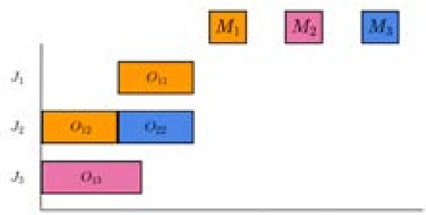
รูป 4.3: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 3

รอบที่ 4

- Candidates set = $\{O_{21}, O_{22}, O_{23}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (6,3,6) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* เพียง 1 โอเปอเรชันคือโอเปอเรชัน O_{22} ดังนั้น O^*_{22} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{22} = 3
- นำโอเปอเรชัน O_{32} เพิ่มเข้าไปใน Candidates set
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 4 แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 4



(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{22}

รูป 4.4: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 4

รอบที่ 5

- Candidates set = $\{O_{21}, O_{32}, O_{23}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (6,6,6) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* มากกว่า 1 โอเปอเรชัน ดังนั้น เราไม่สามารถเลือกโอเปอเรชันผ่านเกณฑ์ EST ได้
- คำนวณค่า MWR จะได้ MWR = (6,4,3) และหา SPT จะได้ SPT = (3,4,2) จะได้ว่า V = (2,1,$\frac{3}{2}$) จะเห็นว่าโอเปอเรชัน O_{21} ให้ค่า V มากที่สุด ดังนั้น O^*_{21} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก

- เก็บค่า EST_{21} = 6
- นำโอเปอเรชัน O_{31} เพิ่มเข้าไปใน Candidates set
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 5 แสดงได้ดังรูปที่ 4.5

(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 5

(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{21}

รูป 4.5: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 5

รอบที่ 6

- Candidates set = $\{O_{31}, O_{32}, O_{23}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (9,9,6) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* เพียง 1 โอเปอเรชันคือโอเปอเรชัน O_{23} ดังนั้น O_{23}^* เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{23} = 6
- นำโอเปอเรชัน O_{33} เพิ่มเข้าไปใน Candidates set
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 6 แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 6

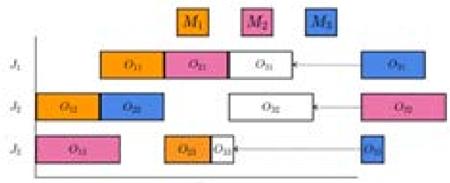
(b) การเลือกโอเปอเรชัน O_{23}

รูป 4.6: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 6

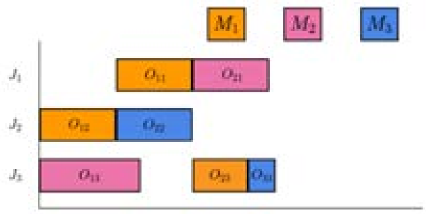
รอบที่ 7

- Candidates set = $\{O_{31}, O_{32}, O_{33}\}$

- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (9,9,8) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* เพียง 1 โอเปอเรชันคือโอเปอเรชัน O_{33} ดังนั้น O^*_{33} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{33} = 8
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 7 แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 7

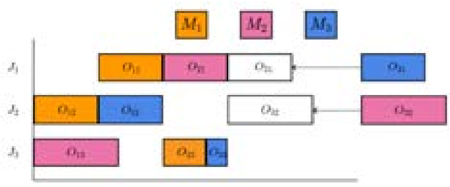


(b) การเลือกโอเปอเรชัน O_{33}

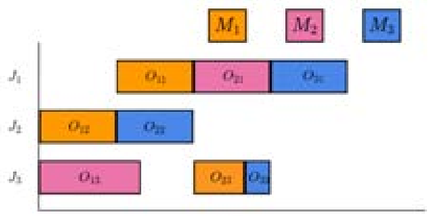
รูป 4.7: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 7

รอบที่ 8

- Candidates set = $\{O_{31}, O_{32}\}$
- คำนวณค่า EST จะได้ EST = (9,9) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชันที่ให้ค่า EST^* มากกว่า 1 โอเปอเรชัน ดังนั้น เราไม่สามารถเลือกโอเปอเรชันผ่านเกณฑ์ EST ได้
- คำนวณค่า MWR จะได้ MWR = (3,4) และหา SPT จะได้ SPT = (3,4) จะได้ว่า V = (1,1) จะเห็นว่ามีโอเปอเรชัน ให้ค่า V มากที่สุด เกิน 1 โอเปอเรชัน ดังนั้นสุ่มเลือก O^*_{21} เป็นโอเปอเรชันที่ถูกเลือก
- เก็บค่า EST_{21} = 9
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 8 แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 8



(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{31}

รูป 4.8: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 8

รอบที่ 9

- Candidates set = $\{O_{32}\}$
- นำโอเปอเรชันสุดท้าย คือ โอเปอเรชัน O_{32} ไปจัดตารางการผลิต
- Candidates set = ϕ จึงหยุดการทำงาน
- ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 9 แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

(a) ขั้นตอนการเลือกโอเปอเรชันในรอบที่ 9

(b) เลือกโอเปอเรชัน O_{31}

รูป 4.9: แสดงขั้นตอนการจัดตารางการผลิตในรอบที่ 9

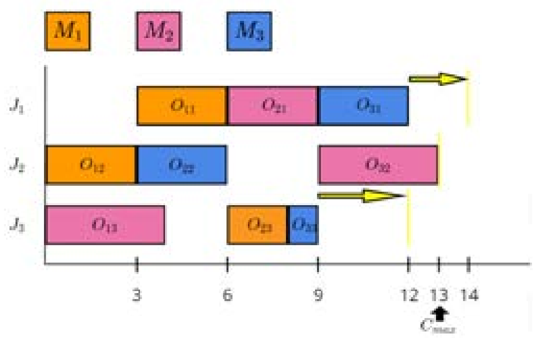
จากขั้นตอนการคัดเลือกโอเปอเรชันในตัวอย่างที่ 3 หากกำหนดให้ $h_{ij} = 0.2$ สำหรับทุก i, j , $E_j = 0.25$ สำหรับทุก j , $T_j = 0.5$ สำหรับทุก j และ $\gamma = 0.125$ จะได้ผลคำตอบที่สอดคล้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์ออกมาดังนี้

$(w_{11}, w_{21}, w_{31}) = (3, 0, 0)$, $(w_{12}, w_{22}, w_{32}) = (0, 0, 3)$, $(w_{13}, w_{23}, w_{33}) = (0, 2, 0)$

$(C_{11}, C_{21}, C_{31}) = (6, 9, 12)$, $(C_{12}, C_{22}, C_{32}) = (3, 6, 13)$, $(C_{13}, C_{23}, C_{33}) = (4, 8, 9)$

$(E_1, E_2, E_3) = (2, 0, 3)$, $(T_1, T_2, T_3) = (0, 0, 0)$, $C_{max} = 13$

ดังนั้น จะได้ค่าคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 4.475 หน่วย ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์เดียวกันจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มที่เท่ากับ 4.375 หน่วย และจะแสดงการจัดตารางการผลิตของตัวอย่างที่ 1 โดยใช้วิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ดังรูปที่ 4.10



รูป 4.10: แสดงการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเดย์ของตัวอย่างที่ 1

ในบทต่อไปเราจะพิจารณาดูว่าเมื่อกำหนดปัญหาที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิม คำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ได้จาก วิธีการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบแท้จริงของฟังก์ชันจุดประสงค์ ที่ได้จากวิธีกำหนดการเชิงเส้นมากน้อยเพียงใด

บทที่ 5
ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้เราจะแสดงคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาดังหัวข้อ 2.2 ผ่านปัญหามาตรฐาน (Benchmark) ของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีขนาด 10×5 (คือมีงาน 5 งาน และมีเครื่องจักร 5 เครื่อง) ทั้งสิ้นจำนวน 5 ปัญหา ได้แก่ LA01 ถึง LA05 [6] ซึ่งกำหนดให้ (p_{ij}) แทน เวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i ของทุกโอเปอเรชันและ (μ_{ij}) แทน เซตลำดับของเครื่องจักรของแต่ละงานมาให้ พร้อมกับได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของปัญหา นอกจากนี้เราจะแบ่งพิจาณากำหนดเวลาออกเป็น 3 แบบ โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

1. h_{ij} คือ ค่าเก็บรักษาวัสดุที่ใช้ในการผลิตในขณะทำการผลิตต่อหน่วยเวลา ของงานที่ j ที่ใช้เพื่อรอทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i มีค่าเป็น 0.2 หน่วย สำหรับทุกโอเปอเรชัน
2. ϵ_j คือ ค่าเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนดของงานที่ j มีค่าเป็น 0.25 หน่วย สำหรับทุกงาน
3. π_j คือ ค่าเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนดงานที่ j มีค่าเป็น 0.5 หน่วย สำหรับทุกงาน
4. γ คือ ค่าเสียหายที่ขึ้นกับค่าเมคสแปน มีค่าเป็น 0.125 หน่วย
5. d_j คือ กำหนดเวลาของงานที่ j จะพิจารณา 3 แบบคือ
    - กำหนดเวลาแบบที่ 1
กำหนดเวลาของทุกงานมีค่าเท่ากับ C_{max}
โดยที่ C_{max} แทน ค่าเมคสแปนที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มของแต่ละปัญหา

- กำหนดเวลาแบบที่ 2
  กำหนดเวลาของทุกงานมีค่าเท่ากับ $\lfloor \alpha \rfloor$
  โดยที่ α แทน ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำงานบนเครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงานที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มของแต่ละปัญหา
- กำหนดเวลาแบบที่ 3
  กำหนดเวลาของแต่ละงานจะได้จากการสุ่มจากค่าในช่วง $[C_{m_j j} - \lfloor \beta \rfloor, C_{m_j j} + \lfloor \beta \rfloor]$ โดยที่
  $C_{m_j j}$ แทน เวลาที่ใช้การทำงานจนเสร็จสิ้นบน เครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงาน
  β แทน ค่าเฉลี่ยของ p_{ij} ในแต่ละงานของแต่ละปัญหา

นั่นคือ สำหรับทุกปัญหา LA01 ถึง LA05 จะแบ่งย่อยได้อีกเป็น 3 ปัญหา ที่ขึ้นกับค่าของกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ

5.1 ผลคำตอบของปัญหา

ในบทย่อยนี้เราจะแสดงผลคำตอบที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มและ วิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ของแต่ละปัญหา LA01 ถึง LA05 ซึ่งแต่ละปัญหาแบ่งย่อยเป็น 3 แบบ ตามค่าของกำหนดเวลาที่กำหนดไว้ทั้ง 3 แบบ
กำหนดให้

- $d = (d_1, d_2, \ldots, d_n)$
  แทนด้วย ชุดข้อมูลของกำหนดเวลาของแต่ละงานที่กำหนดให้
- $w = ((w_{11}, w_{21}, \ldots, w_{m_j 1}), (w_{12}, w_{22}, \ldots, w_{m_j 2}), \ldots, (w_{1n}, w_{2n}, \ldots, w_{m_j n}))$
  แทนด้วย ชุดคำตอบของช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการรอก่อนจะทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i
- $C = (C_{m_j 1}, C_{m_j 2}, \ldots, C_{m_j n})$
  แทนด้วย ชุดคำตอบของเวลาที่ใช้การทำงานจนเสร็จสิ้นบน เครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงาน
- $E = (E_1, E_2, \ldots, E_n)$
  แทนด้วย ชุดคำตอบของช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จก่อนหน้าเวลาที่กำหนด

- $T = (T_1, T_2, \ldots, T_n)$
  แทนด้วย ชุดคำตอบของช่วงเวลาที่งานที่ j ใช้ในการทำงานเสร็จหลังจากเวลาที่กำหนด

- C_{max}
  แทนด้วย ค่าคำตอบของเมคสแปน

- Obf
  แทนด้วย ค่าคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์

- t
  แทนด้วย เวลาที่ใช้ในการประมวลผลของคำตอบทั้งหมดของปัญหา

ผลคำตอบต่างๆที่ได้ในโครงงานนี้ได้ใช้คอมพิวพิวเตอร์ในระบบปฏิบัติการ Windows 10 ที่มีระบบประมวลผล Intel Core i7-7500 CPU 3.5 GHz RAM 4 GB โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization (Version 12.6.3) ในการประมวลผลคำตอบของวิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็ม และใช้โปรแกรม Spyder 3.3.2 (Python Version 3.7.1) ในการประมวลคำตอบของวิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ ดังที่จะแสดงผลคำตอบต่างๆในหัวข้อ 5.1

5.1.1 ผลคำตอบจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็ม

กำหนดเวลาแบบที่ 1

1. LA01 กำหนดให้ d =(666,666,666,666,666,666,666,666,666,666)

   - w =((75,29,175,0,129),(0,264,0,58,158),(406,3,7,6,22),(96,5,0,125,24), (42,48,0,263,76), (0,57,0,60,219),(8,0,83,0,150),(0,195,169,0,19), (156,0,90,48,74),(0,0,0,125,66))
   - C =(666, 666, 666, 604, 666, 666, 654, 629, 601, 561)
   - C_{max} =666
   - E =(0,0,0,62,0,0,12,37,65,105)
   - T =(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
   - Obf =859.500000000001
   - t =2.17

2. LA02 กำหนดให้ d =(655,655,655,655,655,655,655,655,655,655)

- w =((5,0,239,66,114),(130,0,0,46,10),(185,0,0,0,0),(38,151,0,0,22), (0,0,43,27,405), (0,2,43,0,241),(102,0,18,314,15),(67,81,0,62,60), (155,204,0,0,66),(30,22,0,0,336))
- C =(655,366,465,605,655,588,638,655,660,655)
- C_{max} =660
- E =(0,289,190,50,0,67,17,0,0,0)
- T =(0,0,0,0,0,0,0,0,5,0)
- Obj =898.05
- t =3.31

3. LA03 กำหนดให้ d =(597,597,597,597,597,597,597,597,597,597)

- w =((0,30,273,0,0),(0,11,30,162,175),(116,0,124,137,8),(0,0,63,0,93), (214,19,8,0,59), (77,46,7,29,78),(0,0,56,112,108),(37,0,308,16,30), (158,69,0,0,98),(61,44,309,0,30))
- C =(575,537,597,440,597,586,506,594,545,601)
- C_{max} =601
- E =(22,60,0,157,0,11,91,3,52,0)
- T =(0,0,0,0,0,0,0,0,0,4)
- Obf =815.125
- t =41.57

4. LA04 กำหนดให้ d =(590,590,590,590,590,590,590,590,590,590)

- w =((0,292,0,0,2),(59,50,10,183,87),(45,0,19,49,339),(209,16,25,72,9), (0,0,0,0,381), (51,7,0,0,76),(0,135,0,22,183),(78,0,0,89,0),(74,5,200,37,0), (155,6,15,86,23))
- C =(590,593,590,583,570,448,590,536,590,506)
- C_{max} =593

- E =(0,0,0,7,20,142,0,54,0,84)
- T =(0,3,0,0,0,0,0,0,0,0)
- Obf =770.175000000003
- t =4.68

5. LA05 กำหนดให้ d =(593,593,593,593,593,593,593,593,593,593)
    - w =((0,40,50,51,72),(35,123,46,64,121),(78,0,118,9,142),(53,32,0,273,28), (12,248,77,0,83), (0,171,0,0,134),(0,0,0,314,77),(0,102,169,0,69), (65,130,0,112,59),(0,133,174,25,39))
    - C =(593,570,586,581,593,544,593,565,593,593)
    - C_{max} =593
    - E =(0,23,7,12,0,49,0,28,0,0)
    - T =(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
    - Obf =809.475
    - t =0.62

กำหนดเวลาแบบที่ 2

1. LA01 กำหนดให้ d =(580,580,580,580,580,580,580,580,580,580)
    - w =((54,144,81,0,43),(83,177,4,0,96),(242,167,0,0,0),(75,12,14,67,58), (0,0,0,227,119), (0,0,57,39,22),(0,8,0,0,176),(0,66,128,0,226), (225,0,21,27,40),(0,40,0,94,0))
    - C =(580,546,631,580,583,448,597,666,546,504)
    - C_{max} =666
    - E =(0,34,0,0,0,132,0,0,34,76)
    - T =(0,0,51,0,3,0,17,86,0,0)
    - Obf =797.15
    - t =27.12

2. LA02 กำหนดให้ d =(538,538,538,538,538,538,538,538,538,538)

- w =((0,0,73,19,113),(106,0,0,110,0),(211,0,0,26,5),(0,289,11,0,0), (0,0,50,94,214), (63,57,49,14,13),(140,0,66,153,0),(0,6,0,4,67), (216,55,0,41,30),(27,0,13,0,252))
- C =(436,396,522,694,538,498,548,462,577,559)
- C_{max} =694
- E =(102,142,16,0,0,40,0,76,0,0)
- T =(0,0,0,156,0,0,10,0,39,21)
- Obf = 811.150000000001
- t =92.86

3. LA03 กำหนดให้ d =(521,521,521,521,521,521,521,521,521,521)

- w =((0,142,107,0,0),(0,2,39,122,74),(21,0,270,125,0),(0,0,0,0,83), (174,5,0,18,19), (37,0,30,2,57),(0,258,88,0,0),(37,0,59,0,184), (118,23,0,149,0),(338,0,33,0,0))
- C =(521,396,628,367,513,475,576,483,510,528)
- C_{max} =628
- E =(0,125,0,154,8,46,0,38,11,0)
- T =(0,0,107,0,0,0,55,0,0,7)
- Obf = 781.3
- t =174.06

4. LA04 กำหนดให้ d =(497,497,497,497,497,497,497,497,497,497)

- w=((0,292,0,0,0),(0,0,0,302,0),(19,0,5,83,237),(135,0,28,60,39), (33,29,7,37,167), (30,8,35,50,0),(230,0,114,0,0),(97,0,8,60,0,0),(0,35,3,15,64), (61,0,6,52,79))
- C =(588,506,482,514,462,437,594,534,391,419)
- C_{max} =594

- E =(0,0,15,0,35,60,0,0,106,78)
- T =(91,9,0,17,0,0,97,37,0,0)
- Obf = 757.25
- t =224.64

5. LA05 กำหนดให้ d =(536,536,536,536,536,536,536,536,536,536)

   - w =((0,80,0,4,72),(0,0,19,171,142),(72,51,128,44,2),(0,9,0,268,52), (17,165,85,47,58), (40,39,0,67,102),(239,0,0,9,86),(5,32,0,0,255), (0,143,27,203,0),(136,74,0,0,104))
   - C =(536,513,536,524,545,487,536,517,600,536)
   - C_{max} =600
   - E =(0,23,0,12,0,49,0,19,0,0)
   - T =(0,0,0,0,9,0,0,0,64,0)
   - Obf = 746.649999999999
   - t =44.38

กำหนดเวลาแบบที่ 3

1. LA01 กำหนดให้ d =(543,485,694,664,707,488,665,604,658,405)

   - w =((56,48,71,27,83),(0,48,112,104,31),(332,77,63,0,0),(77,24,111,20,78), (42,75,145,79), (0,57,0,0,101),(0,8,0,2,242),(0,383,0,0,0),(315,0,42,61,0), (0,44,0,0,7))
   - C =(543,481,694,664,694,488,665,629,651,421)
   - $Cmax$ =694
   - E =(0,4,0,0,13,0,0,0,7,0)
   - T =(0,0,0,0,0,0,0,25,0,16)
   - Obf =729.450000000006
   - t =2.78

2. LA02 กำหนดให้ d =(458,220,471,694,535,711,558,623,524,679)

    - w =((30,0,45,9,143),(0,0,0,0,40),(99,0,0,0,68),(85,109,0,110,0), (95,53,3,204,0), (213,155,0,0,28),(35,0,204,57,73),(0,18,25,0,105), (63,203,0,1,0),(122,229,24,0,37))
    - C =(458,220,447,698,535,698,558,533,502,679)
    - C_{max} =698
    - E =(0,0,24,0,0,13,0,90,22,0)
    - T =(0,0,0,4,0,0,0,0,0,0)
    - Obf =663.5
    - t =1.70

3. LA03 กำหนดให้ d =(450,383,593,446,631,593,569,598,442,581)

    - w =((0,56,0,122,0),(2,0,0,217,5),(23,0,99,267,2),(24,9,0,33,4),(230,6,50,0,23), (133,0,0,0,94),(0,244,77,0,0),(0,28,329,0,38),(101,49,30,0,24),(61,35,330,0,0))
    - C =(450,383,603,354,606,576,551,598,424,583)
    - C_{max} =606
    - E =(0,0,0,92,25,17,18,0,18,0)
    - T =(0,0,10,0,0,0,0,0,0,2)
    - Obf =673.25
    - t =7.07

4. LA04 กำหนดให้ d =(557,623,425,563,482,484,567,484,332,470)

    - w =((0,218,60,0,0),(0,0,8,314,100),(19,0,45,105,111),(61,46,96,105,4), (33,29,0,85,137), (30,49,35,0,56),(324,1,0,1,0),(78,0,67,11,0),(0,43,0,0,8), (176,38,52,0,0))
    - C =(574,626,418,564,473,484,576,525,325,487)
    - C_{max} =626
    - E =(0,0,7,0,9,0,0,0,7,0)

- T =(17,3,0,1,0,0,9,41,0,17)
- Obf =637.000000000002
- t =5.98

5. LA05 กำหนดให้ d =(585,525,582,426,554,629,430,562,532,636)

    - w =((0,40,21,0,144),(23,276,2,43,0),(97,0,58,2,186),(53,12,0,0,158), (0,219,29,0,82), (0,171,71,73,75),(0,0,28,0,200),(53,0,28,61,108), (172,0,25,20,83),(0,98,323,0,0))
    - C =(585,525,582,418,503,629,430,475,527,643)
    - C_{max} =643
    - E =(0,0,0,8,51,0,0,87,5,0)
    - T =(0,0,0,0,0,0,0,0,0,7)
    - Obf =728.425000000001
    - t =775.24

5.1.2 ผลคำตอบจากวิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์

กำหนดเวลาแบบที่ 1

1. LA01 กำหนดให้ d =(666,666,666,666,666,666,666,666,666,666)

    - w =((0,0,3,142,11),(0,183,18,0,112),(86,323,0,77,0),(75,65,97,53,5), (134,39,26,29,118),(21,0,172,49,0),(17,86,73,5,9),(0,36,67,48, 269), (0,135,48,0,249),(0,48,0,0,0))
    - C =(414,499,708,649,583,572,603,666,665,418)
    - C_{max} =708
    - E =(252,167,0,17,83,94,63,0,1,248)
    - T =(0,0,42,0,0,0,0,0,0,0)
    - Obf =926.3499999999999
    - t =0.0019953250885009766

2. LA02 กำหนดให้ d =(655,655,655,655,655,655,655,655,655,655)

- w =((0,0,166,11,8),(14,47,19,57,0),(304,0,40,11,27),(0,56,0,38,75),(67,1,0,1,214),(63,125,38,7,0),(39,63,43,194,57),(0,98,0,43,21),(0,6,23,208,245),(94,2,50,44,140))
- C =(416,317,662,563,463,535,585,547,717,597)
- C_{max} =717
- E =(239,338,0,92,192,120,70,108,0,58)
- T =(0,0,7,0,0,0,0,0,62,0)
- Obf =980.175
- t =0.001994609832763672

3. LA03 กำหนดให้ d =(597,597,597,597,597,597,597,597,597,597)

- w = ((0,56,199,0,8),(0,2,0,241,95),(21,0,5,271,36),(24,9,0,0,0),(61,6,55,58,85),(134,22,5,33,3),(0,26,378,0,16),(0,28,69,0,25),(215,45,2,0,102),(271,99,55,0,0))
- C =(535,497,545,317,562,546,650,325,584,582)
- C_{max} =650
- E =(62,100,52,280,35,51,0,272,13,15)
- T =(0,0,0,0,0,0,53,0,0,0)
- Obf =879.75
- t =0.004988193511962891

4. LA04 กำหนดให้ d =(590,590,590,590,590,590,590,590,590,590)

- w =((0,218,53,90,0),(0,58,0,55,16),(19,0,0,38,244),(324,74,0,0,0),(33,10,81,131,29),(0,38,35,18,0),(135,28,85,7,154),(78,52,46,0,0),(0,0,38,0,65),(61,39,0,4,225))
- C =(657,333,439,650,473,405,659,545,377,550)
- C_{max} =659

- E =(0,257,151,0,117,185,0,45,213,40)
- T =(67,0,0,60,0,0,69,0,0,0)
- Obf =948.575
- t =0.0019941329956054688

5. LA05 กำหนดให้ d =(593,593,593,593,593,593,593,593,593,593)

   - w =((0,26,0,54,0),(0,23,181,3,85),(72,28,35,70,0),(185,10,7,59,64),(17,182,11,30,14),(0,25,0,15,204),(0,130,0,35,165),(5,97,72,0,194),(0,14,50,243,0),(49,52,206,0,0))
   - C =(460,473,444,520,555,483,532,593,534,529)
   - C_{max} =593
   - E =(133,120,149,73,38,110,61,0,59,64)
   - T =(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
   - Obf =843.8749999999998
   - t =0.0019953250885009766

กำหนดเวลาแบบที่ 2

1. LA01 กำหนดให้ d =(580,580,580,580,580,580,580,580,580,580)

   - w =((0,0,3,142,11),(0,183,18,0,112),(86,323,0,77,0),(75,65,97,53,5),(134,39,26,29,118),(21,0,172,49,0),(17,86,73,5,9),(0,36,67,48, 269),(0,135,48,0,249),(0,48,0,0,0))
   - C =(414,499,708,649,583,572,603,666,665,418)
   - C_{max} =708
   - E =(166,81,0,0,0,8,0,0,0,162)
   - T =(0,0,128,69,3,0,23,86,85,0)
   - Obf =975.35
   - t =0.001993179321289062 5

2. LA02 กำหนดให้ d =(538,538,538,538,538,538,538,538,538,538)

   - w =((0,0,166,11,8),(14,47,19,57,0),(304,0,40,11,27),(0,56,0,38,75),(67,1,0,1,214),(63,125,38,7,0),(39,63,43,194,57),(0,98,0,43,21),(0,6,23,208,245),(94,2,50,44,140))
   - C =(416,317,662,563,463,535,585,547,717,597)
   - C_{max} =717
   - E =(122,221,0,0,75,3,0,0,0,0)
   - T =(0,0,124,25,0,0,47,9,179,59)
   - Obf =968.1750000000001
   - t =0.0019943714141845703

3. LA03 กำหนดให้ d =(521,521,521,521,521,521,521,521,521,521)

   - w =((0,56,199,0,8),(0,2,0,241,95),(21,0,5,271,36),(24,9,0,0,0), (61,6,55,58,85),(134,22,5,33,3),(0,26,378,0,16),(0,28,69,0,25), (215,45,2,0,102),(271,99,55,0,0))
   - C =(535,497,545,317,562,546,650,325,584,582)
   - C_{max} =650
   - E =(0,24,0,204,0,0,0,196,0,0)
   - T =(14,0,24,0,41,25,129,0,63,61)
   - Obf =917.75
   - t =0.001993894577026367

4. LA04 กำหนดให้ d =(590,590,590,590,590,590,590,590,590,590)

   - w =((0,218,53,90,0),(0,58,0,55,16),(19,0,0,38,244),(324,74,0,0,0),(33,10,81,131,29),(0,38,35,18,0),(135,28,85,7,154),(78,52,46,0,0),(0,0,38,0,65),(61,39,0,4,225))
   - C =(657,333,439,650,473,405,659,545,377,550)
   - C_{max} =659

- E =(0,164,58,0,24,92,0,0,120,0)
- T =(160,0,0,153,0,0,162,48,0,53)
- Obf =1001.075
- t =0.0019948482513427734

5. LA05 กำหนดให้ d =(593,593,593,593,593,593,593,593,593,593)

   - w =((0,26,0,54,0),(0,23,181,3,85),(72,28,35,70,0),(185,10,7,59,64),(17,182,11,30,14),(0,25,0,15,204),(0,130,0,35,165),(5,97,72,0,194),(0,14,50,243,0),(49,52,206,0,0))
   - C =(460,473,444,520,555,483,532,593,534,529)
   - C_{max} =593
   - E =(76,63,92,16,0,53,4,0,2,7)
   - T =(0,0,0,0,19,0,0,57,0,0)
   - Obf =758.3749999999999
   - t =0.005980968475341797

กำหนดเวลาแบบที่ 3

1. LA01 กำหนดให้ d =(543,485,694,664,707,488,665,604,658,405)

   - w =((0,0,3,142,11),(0,183,18,0,112),(86,323,0,77,0),(75,65,97,53,5),(134,39,26,29,118),(21,0,172,49,0),(17,86,73,5,9),(0,36,67,48, 269),(0,135,48,0,249),(0,48,0,0,0))
   - C =(414,499,708,649,583,572,603,666,665,418)
   - C_{max} =708
   - E =(129,0,0,15,124,0,62,0,0,0)
   - T =(0,14,14,0,0,84,0,62,7,13)
   - Obf =853.6
   - t =0.027732133865356445

2. LA02 กำหนดให้ d = (458,220,471,694,535,711,558,623,524,679)

    - w =((0,0,166,11,8),(14,47,19,57,0),(304,0,40,11,27),(0,56,0,38,75), (67,1,0,1,214),(63,125,38,7,0),(39,63,43,194,57),(0,98,0,43,21),(0,6, 23,208,245),(94,2,50,44,140))
    - C =(416,317,662,563,463,535,585,547,717,597)
    - C_{max} =717
    - E =(42,0,0,131,72,176,0,76,0,82)
    - T =(0,97,191,0,0,0,27,0,193,0)
    - Obf =1040.175
    - t =0.01745748519897461

3. LA03 กำหนดให้ d =(450,383,593,446,631,593,569,598,442,581)

    - w =((0,56,199,0,8),(0,2,0,241,95),(21,0,5,271,36),(24,9,0,0,0), (61,6,55,58,85), (134,22,5,33,3),(0,26,378,0,16),(0,28,69,0,25), (215,45,2,0,102), (271,99,55,0,0))
    - C =(535,497,545,317,562,546,650,325,584,582)
    - C_{max} =650
    - E =(0,0,48,129,69,47,0,273,0,0)
    - T =(85,114,0,0,0,0,81,0,142,1)
    - Obf =986.25
    - t =0.08964943885803223

4. LA04 กำหนดให้ d =(557,623,425,563,482,484,567,484,332,470)

    - w =((0,218,53,90,0),(0,58,0,55,16),(19,0,0,38,244),(324,74,0,0,0), (33,10,81,131,29),(0,38,35,18,0),(135,28,85,7,154),(78,52,46,0,0), (0,0,38,0,65),(61,39,0,4,225))
    - C =(657,333,439,650,473,405,659,545,377,550)
    - C_{max} =659

- E =(0,290,0,0,9,79,0,0,0,0)
- T =(100,0,14,87,0,0,92,61,45,80)
- Obf =932.575
- t =0.003954887390136719

5. LA05 กำหนดให้ d =(585,525,582,426,554,629,430,562,532,636)

- w =((0,26,0,54,0),(0,23,181,3,85),(72,28,35,70,0),(185,10,7,59,64),(17,182,11,30,14),(0,25,0,15,204),(0,130,0,35,165),(5,97,72,0,194),(0,14,50,243,0),(49,52,206,0,0))
- C =(460,473,444,520,555,483,532,593,534,529)
- C_{max} =593
- E =(125,52,138,0,0,146,0,0,0,107)
- T =(0,0,0,94,1,0,102,31,2,0)
- Obf =899.1249999999998
- t =0.010007143020629883

จากนี้จะแสดงตารางการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จาก 2 วิธีการคือ วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม และวิธีการจัดผังตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ของ ปัญหาLA01 ถึง LA05 ที่แบ่งย่อยเป็น 3 แบบ ตามกำหนดเวลาที่พิจารณาทั้ง 3 แบบผ่านการใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE : Relative Error) ซึ่งคำนวณได้จาก RE =$\dfrac{Obf_2 - Obf_1}{Obf_1} \times 100\%$ โดยที่

- Obf_1 แทนด้วย ค่าคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่คำนวณจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม
- Obf_2 แทนด้วย ค่าคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ที่คำนวณจากวิธีการจัดผังตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์

พร้อมกับหาค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MRE : Mean Relative Error) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบในการแสดงให้เห็นว่าคำตอบจากวิธีการจัดผังตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ซึ่งคำตอบที่ได้เป็นการประมาณค่าคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริงจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มมากน้อยเพียงใด

ตาราง 5.1 แสดงผลคำตอบObf_1 และ Obf_2 พร้อมกับเวลาที่ใช้ในการประมวณผลจากทั้ง 2 วิธีการ ของปัญหา LA01 ถึง LA05 ที่มีกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ

ปัญหา	ขนาด	กำหนดเวลาแบบที่ 1				กำหนดเวลาแบบที่ 2				กำหนดเวลาแบบที่ 3			
		Obf_1	t(วินาที)	Obf_2	t(วินาที)	Obf_1	t(วินาที)	Obf_2	t(วินาที)	Obf_1	t(วินาที)	Obf_2	t(วินาที)
LA01	10×5	859.500	2.17	926.350	0.00199533	797.150	27.12	975.350	0.00199318	729.450	2.78	853.600	0.02773213
LA02	10×5	898.050	3.31	980.175	0.00199461	811.150	92.86	968.175	0.00199437	663.500	1.7	1040.175	0.01745749
LA03	10×5	815.125	41.57	879.750	0.00498819	781.300	174.06	917.750	0.00199389	673.250	7.07	986.250	0.08964944
LA04	10×5	770.175	4.68	948.575	0.00199413	757.250	224.64	1001.075	0.00199485	637.000	5.98	932.575	0.00395489
LA05	10×5	809.475	0.62	843.875	0.00199533	746.650	44.38	758.375	0.00598097	728.425	775.24	899.125	0.01000714

ตาราง 5.2 แสดงผลคำตอบ Obf_1 , Obf_2 และ RE ของปัญหา LA01 ถึง LA05 ที่มีกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ

ปัญหา	ขนาด	กำหนดเวลาแบบที่ 1			กำหนดเวลาแบบที่ 2			กำหนดเวลาแบบที่ 3		
		Obf_1	Obf_2	RE	Obf_1	Obf_2	RE	Obf_1	Obf_2	RE
LA01	10×5	859.500	926.350	7.778	797.150	975.350	22.355	729.450	853.600	17.020
LA02	10×5	898.050	980.175	9.145	811.150	968.175	19.358	663.500	1040.175	56.771
LA03	10×5	815.125	879.750	7.928	781.300	917.750	17.464	673.250	986.250	46.491
LA04	10×5	770.175	948.575	23.164	757.250	1001.075	32.199	637.000	932.575	46.401
LA05	10×5	809.475	843.875	4.250	746.650	758.375	1.570	728.425	899.125	23.434
MRE				10.453			18.589			38.023

บทที่ 6
สรุปผล

จากการศึกษาปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาที่มีฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขต่างๆในหัวข้อ 2.2 รวมทั้งศึกษาวิธีทีการแก้ปัญหาดังกล่าวที่แบ่งออกเป็น 2 วิธีการ คือ วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (บทที่ 3) และวิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ (บทที่ 4) จากนั้นได้แก้หาคำตอบต่างๆที่สอดคล้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา LA01 ถึง LA05 ที่มีกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ (บทที่ 5) โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization (Version 12.6.3) ในการประมวลผลคำตอบของวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม และใช้โปรแกรม Spyder 3.3.2 (Python version 3.7.1) ในการประมวลคำตอบของวิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ จึงได้ผลคำตอบดังที่แสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ซึ่งตารางที่ 5.1 แสดงผลคำตอบ Obf_1 และ Obf_2 พร้อมกับเวลาที่ใช้ในการประมวณผลจากทั้ง 2 วิธีการสำหรับแต่ละปัญหา LA01 ถึง LA05 ที่มีกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ และตารางที่ 5.2 แสดงผลคำตอบ Obf_1, Obf_2 และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE) พร้อมกับค่าเฉลี่ยของร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MRE) ของแต่ละปัญหา LA01 ถึง LA05 ที่มีกำหนดเวลาทั้ง 3 แบบ คือ

- กำหนดเวลาแบบที่ 1
  กำหนดเวลาของทุกงานมีค่าเท่ากับ C_{max}
  โดยที่ C_{max} แทน ค่าเมคสแปนที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มของแต่ละปัญหา

- กำหนดเวลาแบบที่ 2
  กำหนดเวลาของทุกงานมีค่าเท่ากับ $\lfloor \alpha \rfloor$
  โดยที่ α แทน ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการทำงานบนเครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงานที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มของแต่ละปัญหา

- กำหนดเวลาแบบที่ 3
  กำหนดเวลาของแต่ละงานจะได้จากการสุ่มจากค่าในช่วง $[C_{m_jj} - \lfloor\beta\rfloor, C_{m_jj} + \lfloor\beta\rfloor]$
  โดยที่
  C_{m_jj} แทน เวลาที่ใช้การทำงานจนเสร็จสิ้นบน เครื่องจักรลำดับสุดท้ายของแต่ละงาน
  β แทน ค่าเฉลี่ยของ p_{ij} ในแต่ละงานของแต่ละปัญหา

6.1 สรุปผลจากการทดลอง

เราสามารถสรุปได้ว่าในการหาคำตอบที่แท้จริงจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มใช้เวลาในการประมวลผลหาคำตอบนานกว่าการหาคำตอบโดยประมาณจากวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์ (ในหน่วยวินาที) แต่เมื่อหากพิจารณาจากค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE) และค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (MRE) ที่คำนวณดังที่แสดงในตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า ค่า MRE ของกำหนดเวลาแบบที่ 1 มีค่าน้อยที่สุด ตามด้วยค่า MRE ของกำหนดเวลาแบบที่ 2 และค่า MRE ของกำหนดเวลาแบบที่ 3 ตามลำดับ นั่นคือ หากใช้กำหนดเวลาแบบที่ 1 คือ กำหนดเวลาของแต่ละงานมีค่าเท่ากับ ค่าเมคสแปนที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นของจำนวนเต็มของแต่ละปัญหา จะให้ผลคำตอบ Obf_2 ที่ประมวลผลมาจากวิธีการจัดตารางที่มีกำหนดเวลาแบบนอนดีเลย์ มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบแท้จริง Obf_1 ที่ประมวลผลจากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มได้ดีกว่าการใช้กำหนดเวลาแบบที่ 2 และ กำหนดเวลาแบบที่ 3 ตามลำดับ

6.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไขปัญหา

ปัญหาที่พบในโครงงานนี้คือ บางผลการทดลองได้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE) ที่มีค่ามาก ซึ่งแสดงว่าคำตอบจากการประมาณค่า Obf_2 มีค่าต่างจาก คำตอบที่แท้จริง Obf_1 มากตามไปด้วย เนื่องจากขั้นตอนต่างๆของวิธีการ ฮิสริสติกแบบนอนดีเลย์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นนั้นใช้เพื่อทำให้ค่าเมคสแปน C_{max} มีค่าน้อยที่สุด แต่เนื่องจาก ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เราพิจารณาคือ

$$\text{Minimize} \quad \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m_j} h_{ij}w_{ij} + \sum_{j=1}^{n}(\epsilon_j E_j + \pi_j T_j) + \gamma C_{max}$$

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นดังนี้ คือ

- $h_{ij} = 0.2$ สำหรับทุก $i \in \{1, 2, \ldots, m\}$ และ $j \in \{1, 2, \ldots, n\}$
- $\epsilon_j = 0.25$ สำหรับทุก $j \in \{1, 2, \ldots, n\}$

- $\pi_j = 0.5$ สำหรับทุก $j \in \{1, 2, \ldots, n\}$
- $\gamma = 0.125$

จะเห็นว่าตัวแปร w_{ij} ,E_j และ T_j ก็ต่างเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์ดังกล่าว นั่นคือ หากใช้วิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มเมื่อเราต้องการทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าน้อยที่สุด วิธีการนี้จะจัดตารางการผลิตเพื่อทำให้ค่า T_j , E_j , w_{ij} และ C_{max} แต่ละตัวมีค่าน้อยสุดตามลำดับ เพื่อให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ซึ่งต่างจากวิธีการฮิวริสติกแบบนอนดีเลย์ที่มุ่งเน้นไปที่การจัดตารางการผลิตให้ C_{max} มีค่าน้อยที่สุด ส่งผลให้ค่าของตัวแปร w_{ij} หรือ E_j หรือ T_j มีค่าเพิ่มขึ้น จากผลที่แสดงไว้ในหัวข้อ 5.1 จะเห็นว่าในบางปัญหาที่ได้ค่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE) มีค่ามากผิดปรกติ เนื่องจากมีค่าผลรวมของตัวแปร T_j และผลรวมของตัวแปร E_j ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่า ค่าผลรวมของตัวแปร T_j และผลรวมของตัวแปร E_j ที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

เราจะเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่พบสำหรับทางเลือกแรกคือ ปรับปรุงวิธีการจัดตารางการผลิตแบบนอนดีเลย์โดยการพิจารณาทำให้ค่าของตัวแปร T_j และ E_j มีค่าน้อยลงตามลำดับเพื่อให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ ในการปรับปรุงเราจะพิจาณาโอเปอเรชันลำดับสุดท้ายของแต่งานซึ่งจะใช้เกณฑ์ใหม่คือทำให้ค่าผลต่าง ระหว่างเวลาที่แต่ละงานทำเสร็จสิ้นบนเครื่องจักรลำดับสุดท้ายกับกำหนดเวลามีค่าน้อยที่สุด เข้ามาแทนการใช้เกณฑ์หลัก EST และเกณฑ์สำรอง $V = \dfrac{MWR}{SPT}$

ทางเลือกที่สองคือ การเลือกวิธีการฮิวริสติกแบบอื่นมาช่วยในการ แก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาดังกล่าว เพื่อปรับปรุงให้ผลคำตอบที่ได้มีค่าใกล้ เคียงกับคำตอบที่แท้จริงที่ได้จากวิธีการกำหนดการเชิงเส้น ซึ่งทางเลือกที่สองจำเป็นต้องอาศัยความรู้ ในระดับที่สูงกว่าระดับปริญญาบัณฑิตและระยะเวลาในการดำเนินการที่มากขึ้นเพื่อศึกษาหาวิธีการฮิวริสติกนั้น

รายการอ้างอิง

[1] B. Kerem, K. Philip, *A Linear Programming-base Method for Job Shop Scheduling*, Journal of Scheduling, Springer, Vol. 16,161-183.

[2] H. Magnus, *Beginning Python: From Novice to Professional*, 5th ed. Springer, 2017.

[3] J. Blazewicz, K. Ecker, E.Pesch, G. Schmidt, J. Weglarz, *Scheduling Computer and Manufacturing Processes*, 2-nd ed. Springer Verlag, Berlin, 2001

[4] K.R. Baker, *Sequencing rules and due date assignments in job shop*. Management Science,Vol. 30 (1984),1093-1104.

[5] P.Michael,*Scheduling;Theory,Algorithms,and Systems*, 5th ed. Springer, New York, 2015.

[6] S. Lawrence,*Resource constrianed project scheduling: an experimental investigation of heuristic scheduling techniques (Suppplement)*, Graduate School of Industrial Administration, Univ. Carnegie-Mellon, Pennylvania,USA, (1984)

[7] V. Hochin, *Makespan Calculation Analysis For Job Scheduling Problem*, Master’s Thesis, Department of Mathematics and Computer Science, Faculty of Science, Chulalonkorn University,2017.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลของปัญหามาตรฐาน

ภาคผนวก ก แสดงข้อมูลของปัญหามาตรฐาน (Benchmark) ของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่ได้นำใช้ในการหาคำตอบของฟังก์ชันจุดประสงค์ในโครงงานนี้ ประกอบด้วย ปัญหา LA01-LA05 [6] กำหนดให้ $n \times m$ แทนขนาดของปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีจำนวนงาน n งาน คือ $J_1, J_2, \ldots, J_n$ และมีจำนวนเครื่องจักร m เครื่องจักร คือ $M_0, M_2, \ldots, M_{m-1}$ โดยในแต่ละปัญหามาตรฐานจะแสดง ข้อมูลในรูปเมทริกซ์ $p = [p_{ji}]_{n\times m}$ คือเมทริกซ์ มีสมาชิกเป็น p_{ji} แทนด้วย ช่วงเวลาของงานที่ j ใช้ในการทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i และ $\mu = [\mu_{ji}]_{n\times m}$ คือเมทริกซ์มีสมาชิกเป็น μ_{ji} แทนด้วย เครื่องจักรของงานที่ j ใช้ทำงานบนเครื่องจักรลำดับที่ i ต่อไปจะแสดงเมทริกซ์ข้อมูลของปัญหามาตรฐาน ดังนี้

- LA01

$$p = \begin{bmatrix} 21 & 53 & 95 & 55 & 34 \\ 21 & 52 & 16 & 26 & 71 \\ 39 & 98 & 42 & 31 & 12 \\ 77 & 55 & 79 & 66 & 77 \\ 83 & 34 & 64 & 19 & 37 \\ 54 & 43 & 79 & 92 & 62 \\ 69 & 77 & 87 & 87 & 93 \\ 38 & 60 & 41 & 24 & 83 \\ 17 & 49 & 25 & 44 & 98 \\ 77 & 79 & 43 & 75 & 96 \end{bmatrix} \quad , \quad \mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 4 & 3 & 2 \\ 0 & 3 & 4 & 2 & 1 \\ 3 & 4 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 4 & 2 & 3 \\ 0 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 1 & 2 & 4 & 0 & 3 \\ 3 & 4 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 3 & 4 \\ 3 & 1 & 4 & 0 & 2 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- LA02

$$p = \begin{bmatrix} 20 & 87 & 31 & 76 & 17 \\ 25 & 32 & 24 & 18 & 81 \\ 72 & 23 & 28 & 58 & 99 \\ 86 & 76 & 97 & 45 & 90 \\ 27 & 42 & 48 & 17 & 46 \\ 67 & 98 & 48 & 27 & 62 \\ 28 & 12 & 19 & 80 & 50 \\ 63 & 94 & 98 & 50 & 80 \\ 14 & 75 & 50 & 41 & 55 \\ 72 & 12 & 37 & 79 & 61 \end{bmatrix} , \quad \mu = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 1 & 4 & 2 \\ 4 & 2 & 0 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 4 & 0 & 3 \\ 2 & 1 & 4 & 0 & 3 \\ 4 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 3 & 2 \\ 4 & 1 & 3 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 0 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 2 & 1 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

- LA03

$$p = \begin{bmatrix} 23 & 45 & 82 & 84 & 38 \\ 21 & 29 & 18 & 41 & 50 \\ 38 & 54 & 16 & 52 & 52 \\ 37 & 54 & 74 & 62 & 57 \\ 57 & 81 & 61 & 68 & 30 \\ 81 & 79 & 89 & 89 & 11 \\ 33 & 20 & 91 & 20 & 66 \\ 24 & 84 & 32 & 55 & 8 \\ 56 & 7 & 54 & 64 & 39 \\ 40 & 83 & 19 & 8 & 7 \end{bmatrix} , \quad \mu = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 4 & 3 \\ 2 & 1 & 0 & 4 & 3 \\ 2 & 3 & 4 & 0 & 1 \\ 4 & 0 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 0 & 1 & 3 & 2 \\ 4 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 0 & 4 & 1 \\ 4 & 1 & 0 & 2 & 3 \\ 4 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 4 & 1 & 0 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

- LA04

$$p = \begin{bmatrix} 12 & 94 & 92 & 91 & 7 \\ 19 & 11 & 66 & 21 & 87 \\ 14 & 75 & 13 & 16 & 20 \\ 95 & 66 & 7 & 7 & 77 \\ 45 & 6 & 89 & 15 & 34 \\ 77 & 20 & 76 & 88 & 53 \\ 74 & 88 & 52 & 27 & 9 \\ 88 & 69 & 62 & 98 & 52 \\ 61 & 9 & 62 & 52 & 90 \\ 54 & 5 & 59 & 15 & 88 \end{bmatrix}, \quad \mu = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 3 & 4 & 1 \\ 1 & 3 & 4 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 4 & 2 \\ 2 & 4 & 0 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 4 & 0 & 2 \\ 3 & 2 & 0 & 4 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 4 \\ 1 & 3 & 0 & 4 & 2 \\ 2 & 4 & 0 & 1 & 3 \\ 2 & 4 & 3 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- LA05

$$p = \begin{bmatrix} 72 & 87 & 95 & 66 & 60 \\ 5 & 35 & 48 & 39 & 54 \\ 46 & 20 & 21 & 97 & 55 \\ 59 & 19 & 46 & 34 & 37 \\ 23 & 73 & 25 & 24 & 28 \\ 28 & 45 & 5 & 78 & 83 \\ 53 & 71 & 37 & 29 & 12 \\ 12 & 87 & 33 & 55 & 38 \\ 49 & 83 & 40 & 48 & 7 \\ 65 & 17 & 90 & 27 & 23 \end{bmatrix}, \quad \mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 4 & 2 & 3 \\ 4 & 3 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 2 & 0 & 4 \\ 0 & 3 & 4 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 4 & 1 & 2 \\ 0 & 3 & 1 & 4 & 2 \\ 4 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & 3 & 1 & 0 & 4 \\ 2 & 3 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

ภาคผนวก ข
รหัสต้นฉบับ

ในส่วนนี้จะแสดงรหัสต้นฉบับ (Source code) ของการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลาสำหรับโปรแกรม Spyder 3.3.2 (Python Version 3.7.1) โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

```
#ตัวอย่างปัญหา LA01 ที่ใช้กำหนดเวลาแบบที่ 1
N=10 #N คือจำนวนของงาน
M=5  #M คือจำนวนของเครื่องจักร

#ให้เมทริกซ์ p แทนเวลาที่ใช้ทำงานของโอเปอเรชัน
p = [[21, 53, 95, 55, 34],
[21, 52, 16, 26, 71],
[39, 98, 42, 31, 12],
[77, 55, 79, 66, 77],
[83, 34, 64, 19, 37],
[54, 43, 79, 92, 62],
[69, 77, 87, 87, 93],
[38, 60, 41, 24, 83],
[17, 49, 25, 44, 98],
[77, 79, 43, 75, 96]]

# ให้เมทริกซ์ m แทนเครื่องจักรที่ใช้ทำงานของโอเปอเรชัน
m = [[1, 0, 4, 3, 2],
[0, 3, 4, 2, 1 ],
[3, 4, 1, 2, 0 ],
[1, 0, 4, 2, 3 ],
[0, 3, 2, 1, 4 ],
[1, 2, 4, 0, 3 ],
[3, 4, 1, 2, 0 ],
[2, 0, 1, 3, 4 ],
[3, 1, 4, 0, 2 ],
[4, 3, 2, 1, 0 ]]

import time
t0=time.time()

#พารามิเตอร์ (parameters)
```

```
#Due date
d=[666, 666, 666, 666, 666, 666, 666, 666, 666,
    666]
#Holdind Cost
H=[[0.2 ,0.2 ,0.2 ,0.2 ,0.2]]*N
#Earliness Cost
e=[0.25]*N
#Tardiness Cost
pi =[0.5]*N
#penalty related to Cmax
gamma=0.125

#ตัวแปร (Variables)
W=[]            #Waiting time
Com=[]          #Complete time
EST=[]          #EST
for i in range(N):
W.append([])
Com.append([])
EST.append([])
for j in range(M):
W[i].append(0)
Com[i].append(0)
EST[i].append(0)

Max_Com=[0]*N     #Max of Complete time
E=[0]*N           #Earliness time
T=[0]*N           #Tardiness time

#ให้ Sigma แทนลำดับของงานในแต่ละเครื่องจักร
Sigma =[]
for i in range(M):
Sigma.append([])

#คำนวณ MWR ตอนเริ่มต้น
SUM = [0]*N
for a in range(N):
```

```
SUM[a]=sum(p[a])

S  =[0]*N
Cj =[0]*N
Cm =[0]*M

#ขั้นตอนการคัดเลือกโอเปอเรชัน
for a in range (M*N):
SUMnon = [9999]*N
SUMspt= [0]*N
V=[-9999]*N
min_EST =9000
max_V = -9000

for j in range(N):
if S[j] <M:
#คำนวณค่า EST
SUMnon[j] = max(Cj[j],Cm[m[j][S[j]]])
#คำนวณค่า SPT
SUMspt[j] = p[j][S[j]]

# คำนวณค่า V ให้: V แทนอัตราส่วนของ MRT/SPT
for j in range(N):
if S[j] <M:
e1 =SUM[j]
e2 =SUMspt[j]
V[j]=e1/e2

for j in range(N):
if S[j] <M:
if SUMnon[j] < min_EST:
min_EST = SUMnon[j]

for j in range(N):
if S[j] <M:
if SUMnon[j] == min_EST:
if V[j] > max_V:
```

```
max_V= V[j]
job = j

EST[job][S[job]]=SUMnon[job]

P1 = p[job][S[job]]
M1= m[job][S[job]]
Cj[job]=Cj[job]+P1
Cm[M1]=Cm[M1]+P1

Sigma[M1].append(job)

if Cj[job] < Cm[M1]:
Cj[job] = Cm[M1]
else:
Cm[M1] = Cj[job]

S[job] = S[job]+1

SUM[job] =SUM[job]−P1
print("EST=",EST)
print("p=",p)

#เก็บค่า Waiting time
for i in range(N):
for j in range(M):
if j==0:
W[i][0]=EST[i][0]
else:
W[i][j]=EST[i][j]−EST[i][j−1]−p[i][j−1]
print("W=",W)

#เก็บค่า Complete time , Max of Complete time และ Cmax
for i in range(N):
for j in range(M):
if j==0:
Com[i][j]=p[i][j]+W[i][j]
```

```
else:
Com[i][j]=Com[i][j-1]+p[i][j]+W[i][j]
print("Com=",Com)

for i in range(N):
Max_Com[i]=max(Com[i])
print("Max_Com=",Max_Com)
Cmax = max(Max_Com)

#เก็บค่า Earliness และ Tardiness
for i in range(N):
if Max_Com[i] < d[i]:
E[i]=d[i]-Max_Com[i]
else:
E[i]=0
for i in range(N):
if Max_Com[i] > d[i]:
T[i]=Max_Com[i]-d[i]
else:
T[i]=0
print("E=",E,"□","T=",T)

#คำนวณ Objective function
Obf=0
for i in range(N):
Obf=Obf+(e[i]*E[i])+(pi[i]*T[i])
for j in range(M):
Obf=Obf+(H[i][j]*W[i][j])
Obf = Obf +(gamma*Cmax)

print("Cmax=",Cmax)
print("Sigma=",Sigma)
print("Obf=",Obf)
t1= time.time()
print(t1-t0)
```

ภาคผนวก ค

The Project Proposal of Course 2301399 Project Proposal
Academic Year 2018

Project Tittle (Thai)	วิธีการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตที่มีกำหนดเวลา
Project Tittle (English)	Heuristic Method for Job Shop Scheduling Problem with Due Date
Project Advisor	Associate Professor Phantipa Thipwiwatpotjana, Ph.D.
By	Mr. Supachai Inta ID 583545323
	Mathematics, Department of Mathematics and Computer Science
	Faculty of Science, Chulalongkorn University

Background and Rationale

Scheduling is a decision-making process using on a regular basis in many manufacturing and services industries. It allocates a resources to tasks over given a duration and its goal is to optimize solution of the objective, which is minimizing manufacturing time. In this paper the resources and tasks are machine and job, respectively. We study a job shop scheduling problem with due date. The due date can imply the earliness and tardiness of each activity in the job shop scheduling system. After that, we use an integer linear programming and a heuristic method to find an optimal solution or a near optimal solution and the corresponding makespan of the problem, respectively. Our purpose is to compare a relative error and a mean relative error between the results got from integer linear programming and heuristic method.

Objectives

Compare the solution of a job shop scheduling problem with due date using an integer linear programming method and a heuristic method.

Scope

1. We consider only small sizes (the number of job is less than or equal to 10 and the number of machine is less than or equal to 10) for a job shop scheduling problem with earliness and tardiness.
2. We use CPLEX-program and Python program for solving integer linear programming and heuristic method of job shop scheduling problem with due date.

Project Activities

1. Study a job shop scheduling problem .
   - Framework and notation of a job shop scheduling problem [1],[2]
   - Basic job shop scheduling problem [1],[2]
   - Job shop scheduling problem with due date [3],[4]
2. Study how use CPLEX program and the Python program [5] to find the makespan of a job shop scheduling problem.
3. Transform a job shop scheduling with due date to code on CPLEX-program and python program.
4. Find solution of a job shop scheduling with due date using an integer linear programming and a heuristic methods.
5. Compare a relative error (RE) and a mean relative error (MRE) between two methods.
6. Recheck the process.
7. Conclude all results and write a report.

Duration

Procedure	Month								
	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.
1. Study a job shop scheduling problem.									
2. Study how use CPLEX-program and the Python program to find the makespan of a job shop scheduling problem.									
3. Transform a job shop scheduling with due date to code on CPLEX-program and Python program.									
4. Find solution of a job shop scheduling with due date using an integer linear programming and a heuristic methods.									
5. Compare a relative error (RE) and a mean relative error (MRE) between two methods.									
6. Recheck the process.									
7. Conclude all results and write a report.									

Benefits

1. The benefits to the student who implements this project.
    (a) Apply the basic knowledge in mathematics and the knowledge gained from our learning to the related problem.
    (b) Know how to work systematically.
2. The benefits for users of the project.
    (a) Find solution of a job shop scheduling problem with due date using an integer linear programming and heuristic methods.
    (b) Apply the heuristic idea got from this project to a bigger size problem.

Equipment

1. Hardware
    (a) Notebook computer
    (b) Printer
    (c) Thumb drive
2. Software
    (a) Overleaf ver. 2
    (b) CPLEX ver. 12.6.3
    (c) Spyder (Python ver. 3.7.1)

Budget

Material cost	Price
Textbook	2000 baht.
Photo copies	1000 baht.
Project poster	1000 baht.

Reference

1 P.Michael, **Scheduling;Theory,Algorithms,and Systems**, 5th ed. Springer, New York, 2015.

2 J. Blazewicz, K. Ecker, E.Pesch, G. Schmidt, J. Weglarz, **Scheduling Computer and Manufacturing Processes**, 2-nd ed. Springer Verlag, Berlin, 2001

3 V. Hochin, **Makespan Calculation Analysis For Job Scheduling Problem**, Master's Thesis, Department of Mathematics and Computer Science, Faculty of Science, Chulalonkorn University,2017.

4 B. Kerem, K. Philip, **A Linear Programming-base Method for Job Shop Scheduling**, Journal of Scheduling, Springer, Vol. 16,161-183.

5 H. Magnus, **Beginning Python: From Novice to Professional**, 5th ed. Springer, 2017.

ประวัติผู้เขียน

นายศุภชัย อินทะ รหัสนิสิต 5833545323
ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์
สาขาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย