การเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

นายณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FORMULATION SELECTION AND SCHEDULING FOR PRECAST CONCRETE PRODUCTION

Mr. Nattapon Suranpitak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป
โดย	นายณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

……คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีรง ปรีชานนท์)

……อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

……กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดาริชา สุธีวงศ์)

……กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นันทชัย กานตานันทะ)

ณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์ : การเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป . (FORMULATION SELECTION AND SCHEDULING FOR PRECAST CONCRETE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, 122 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีแม่แบบหลายอันวางเรียงกันอย่างขนานและอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานจะต้องผลิตขั้นตอนการผลิตต่างๆให้เสร็จทุกขั้นตอนการผลิตภายในแม่แบบเดียวกัน โดยแต่ละ งานจะใช้เวลาในแต่ละขั้นตอนการผลิตเท่ากันยกเว้นขั้นตอนการบ่มที่เปลี่ยนแปลงตามสูตรการผลิตที่งานนั้นเลือกใช้ ซึ่งมีผลต่อต้นทุนวัตถุดิบของงาน นอกจากนี้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะต้องใช้ทรัพยากรเฉพาะอย่างที่ต้องใช้ร่วมกันในทุกแม่แบบและไม่อนุญาตให้มีการใช้ทรัพยากรนี้ซ้อนทับกัน โดยงานวิจัยนี้แบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วน ปัญหาส่วนแรก คือ การผลิตในกรณีที่ไม่มีการผลิตซ้อนทับ โดยการผลิตจะกำหนดจำนวนคอนกรีตสำเร็จรูปและเวลาส่งงานที่ต้องผลิตให้ทัน ซึ่งงานวิจัยนี้สร้างวิธีการฮิวริสติกในการเลือกสูตรและจัดตารางการผลิต ให้กับงาน เพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าน้อยที่สุด โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกนี้กับแบบจำลองทางคณิตศาตร์ ซึ่งฮิวริสติกสามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดในปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาค่าที่ดีที่สุดได้ ส่วนในปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาค่าที่ดีที่สุดไม่ได้ ฮิวริสติกจะถูกเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับค่าขอบเขตล่าง โดยฮิวริสติกให้ค่าผลต่างแย่กว่าไม่เกินร้อยละ 5

ปัญหาในส่วนที่สอง คือ การผลิตในกรณีมีการผลิตซ้อนทับ โดยจะนำผลคำตอบจากปัญหาส่วนแรกซึ่งระบุสูตรการผลิต ตารางการผลิตและลำดับการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง มาสร้าง วิธีการ ฮิวริสติกเพื่อ หาจำนวนงานซ้อนทับ ที่มากที่สุดและ วิธี เลือกสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับให้มีต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าน้อยที่สุด โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกนี้กับแบบจำลองทางคณิตศาตร์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมกับปัญหาขนาดเล็กที่มีจำนวนแม่แบบและจำนวนงานซ้อนทับไม่มาก ในขณะที่ฮิวริสติกจะเหมาะสมกับปัญหาขนาดใหญ่ เนื่องจากใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยกว่ามาก โดยให้ค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมที่แตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เกิน 17%

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554

5270290721: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : FORMULATION SELECTION/ SCHEDULING/ PRECAST CONCRETE PRODUCTION/ HEURISTICS/ DOUBLE LAYER PRODUCTION

NATTAPON SURANPITAK: FORMULA SELECTION AND SCHEDULING FOR PRECAST CONCRETE PRODUCTION. ADVISOR: ASST.PROF. WIPAWEE THARMMAPHORNPHILAS, Ph.D., 122 pp.

This research considers the precast production problem with identical parallel fixed location molds. To produce precast elements, multiple processes must be completed in the same mold for each job. Processing times are constant except the curing time, which depends on a mixing formula and production cost. Furthermore, each process requires an additional resource, which must be shared among the molds. This research is divided into two parts. First part develops precast production schedule in case double layer is not considered by given a demand and due date. A heuristics is proposed to select concrete formulas and schedule jobs to minimize the total production cost. The heuristics results are compared to the ones from the mixed integer programming model. The results demonstrate that the proposed heuristics meets the same optimal solutions as obtained from the MIP. In case that the MIP model cannot find the optimal solutions due to the complexity of the problem, the proposed heuristics solutions are within 5% difference from the lower bound solutions.

In second part, the production with double layer is considered. Based upon the solution from the first part, the second part heuristics is used to assign the maximum number of double layer jobs and select their concrete formulas to minimize the total production cost. The heuristics solutions are also compared to the MIP solutions. However, the results show that MIP is suitable for small problems, while the proposed heuristics is suitable for large problems due to clearly less computation times and the objective function values one within 17% difference from the MIP.

Department: Industrial Engineering Student's Signature:

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature:

Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความเมตตาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ให้อิสระในการทำงาน ตลอดจนให้แนวคิด คติเตือนใจแด่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 ขอบเขตและข้อสมมติของงานวิจัย 4

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 5

1.5 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย 6

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป 8

2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตสำหรับเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน 9

2.2.1 ทรัพยากรไม่มีผลต่อระยะเวลาการผลิต 10

2.2.2 ระยะเวลาการผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณทรัพยากรที่ใช้ 11

2.3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก 12

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีที่ไม่มีการผลิตซ้อนทับ 24

3.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา 24

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 25

3.3 วิธีการทางฮิวริสติก 27

หน้า

3.3.1 การตรวจสอบความเป็นไปได้ คำตอบเริ่มต้น และลำดับแม่แบบเริ่มต้น 29
3.3.2 การพัฒนาเลือกสูตรการผลิต 31
3.3.3 การค้นหาคำตอบท้องถิ่น 36
3.3.4 การเรียงลำดับแม่แบบ 39
3.3.5 กลไกการแปรเปลี่ยน 42
3.3.6 การจัดสรรงานให้กับแม่แบบมีจำนวนงานไม่เท่ากัน 43
3.4 ผลการวิจัย 44

บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีมีการผลิตซ้อนทับ 49
4.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา 49
4.2 การหาจำนวนงานซ้อนทับมากที่สุด 51
4.3 การเลือกสูตรการผลิตของงานซ้อนทับ 57
4.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 57
4.3.2 วิธีการทางฮิวริสติก 60
4.4 ผลการวิจัย 69

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 73
5.1 สรุปผลการวิจัย 73
5.2 ข้อเสนอแนะ 75

รายการอ้างอิง 76

ภาคผนวก 79
ภาคผนวก ก ตัวอย่างผลการคำนวณฮิวริสติกในกรณีไม่มีการผลิตซ้อนทับที่มี 4 แม่แบบ 80
ภาคผนวก ข ตัวอย่างผลการคำนวณฮิวริสติกในกรณีมีการผลิตซ้อนทับที่มี 4 แม่แบบ 101

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 122

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ระยะเวลาในการวิจัย	6
2.1	ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป	16
2.2	ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตของระบบเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน	18
3.1	ระยะเวลาในการผลิตและต้นทุนวัตถุดิบ	29
3.2	ค่าความถ่วง	34
3.3	ผลลัพธ์ของตัวอย่างในการเลือกสูตรการผลิต	35
3.4	ต้นทุนวัตถุดิบและระยะเวลาการผลิตในขั้นตอนการบ่มของงานที่เป็นคู่	38
3.5	ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบ	46
3.6	ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบ	47
3.7	ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบ	48
4.1	ระยะเวลาการผลิตของการผลิตซ้อนทับที่ใช้สูตรการผลิตต่างกัน	62
4.2	ค่าความถ่วงของงานซ้อนทับ	65
4.3	การปรับค่าความถ่วงในกรณีที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และสูตรการผลิตที่ 5 เท่านั้น	65
4.4	ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบของการผลิตซ้อนทับ	70
4.5	ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบของการผลิตซ้อนทับ	71
4.6	ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบของการผลิตซ้อนทับ	72

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ตัวอย่างการเลือกใช้สูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิต	2
2.1	จุดเริ่มต้นของการค้นหาด้วยวิธี Local	14
3.1	ตัวอย่างลำดับขั้นตอนการผลิต	25
3.2	การคำนวณระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบการผลิต	31
3.3	การคำนวณเวลาหย่อน	32
3.4	ตัวอย่างการจัดตารางการผลิต	36
3.5	ตัวอย่างประโยชน์ที่ได้จากการเรียงลำดับแม่แบบ	40
4.1	การผลิตซ้อนทับ	50
4.2	งานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1 ซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตต่างๆ	53
4.3	การจัดสรรงานซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับที่ 1	56
4.4	การผลิตงานซ้อนทับเมื่อพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างทั้งหมด	56
4.5	ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตงานซ้อนทับ	67

บทที่ 1
บทนำ

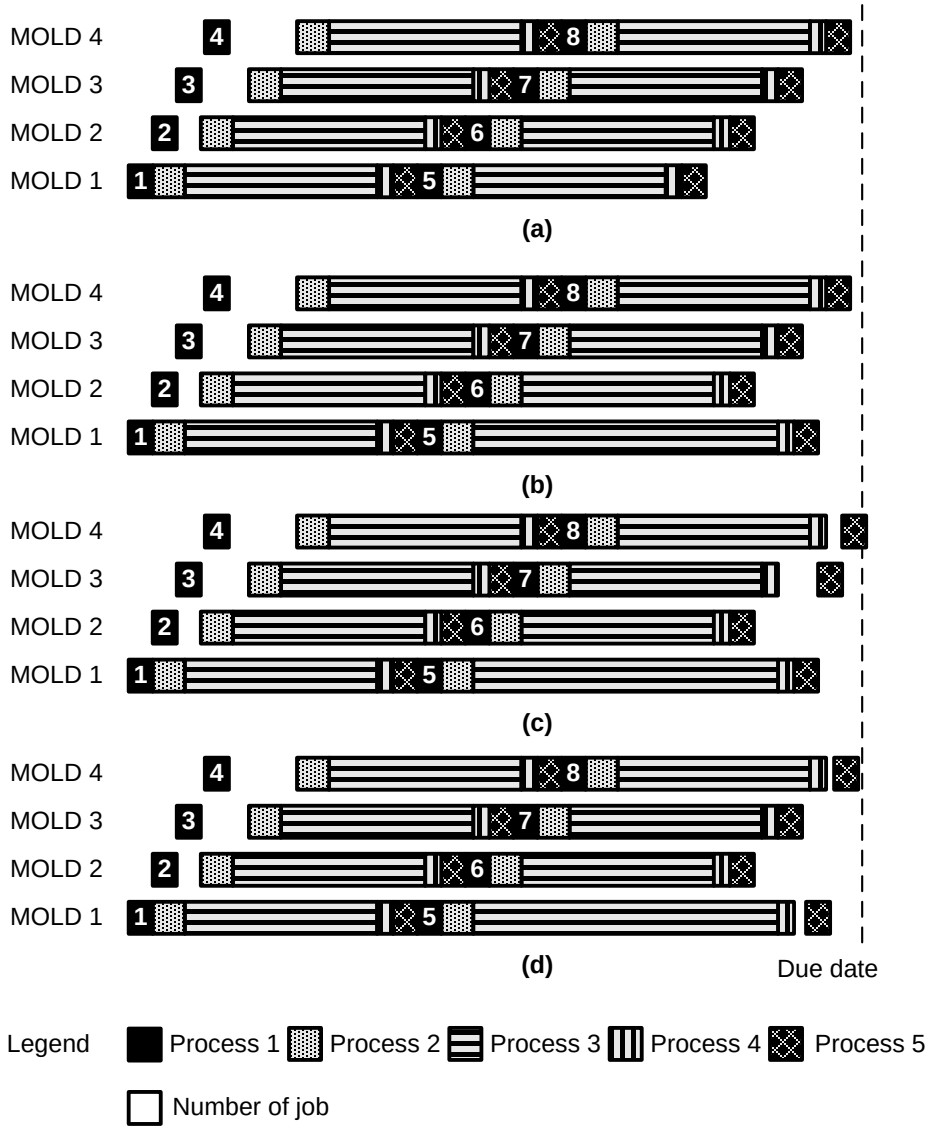
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนการผลิต คือขั้นตอนการเตรียมแม่แบบ (Mold Preparing) การผสมหล่อคอนกรีต (Concrete Mixing and Casting) การบ่ม (Curing) การตัดแยกออกจากแม่แบบ (Stripping) และ การจัดเก็บ (Storing) ซึ่งคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานจะต้องผลิตทุกขั้นตอนการผลิตเหล่านี้โดยใช้แม่แบบเดียวกัน และในแต่ละขั้นตอนการผลิตยังต้องการทรัพยากรเฉพาะที่มีเพียงแค่ 1 หน่วยที่จะต้องใช้ร่วมกันในทุกแม่แบบ ซึ่งยกเว้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 ที่ไม่ได้ใช้ทรัพยากรใดๆเพิ่มเติม โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 นั้นต้องการคนงานที่มีทักษะเฉพาะ ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเครื่องผสมคอนกรีต ขั้นตอนการผลิตที่ 4 ต้องการเครื่องตัดคอนกรีต และขั้นตอนการผลิตที่ 5 ที่ต้องรถยกสำหรับการขนย้ายสินค้า เป็นผลให้การจัดตารางการผลิตต้องคำนึงให้แต่ละขั้นตอนการผลิตจะต้องไม่มีงานใดๆที่ใช้แม่แบบต่างๆในการผลิตมีการใช้ทรัพยากรซ้อนในเวลาเดียวกัน

ลักษณะการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่ศึกษาวิจัยนี้มีลักษณะการผลิตคล้ายกับการผลิตในระบบเครื่องจักรขนาน โดยมีแม่แบบซึ่งมีลักษณะเหมือนกันทุกประการและอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้เป็นเสมือนเครื่องจักร (Identical Parallel Fixed Location Molds) โดยที่คอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานจะต้องผลิตทุกขั้นตอนการผลิตและแต่ละแม่แบบมีการใช้ทรัพยากรร่วมกัน นอกจากนี้คอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานยังสามารถเลือกสูตรการผลิตที่แตกต่างกันซึ่งแต่ละสูตรการผลิตจะมีผลต่อระยะเวลาในการบ่มและต้นทุนวัตถุดิบของคอนกรีตสำเร็จรูปเหล่านี้ โดยสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบสูงจะใช้ระยะเวลาในการบ่มสั้นกว่าสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำ การผลิตจะกำหนดจำนวนงานที่ต้องผลิต กำหนดจำนวนแม่แบบและสูตรการผลิตที่มีให้เลือก โดยจะต้องจัดสรรงานต่างๆให้กับแม่แบบ เรียงลำดับแม่แบบในการผลิต และเลือกสูตรการผลิตให้กับงาน เพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ทุกงานใช้มีค่าน้อยที่สุดโดยที่สามารถผลิตให้งานทุกงานเสร็จก่อนกำหนดเวลาส่งงาน

ในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่พิจารณาให้ทุกงานเลือกใช้สูตรการผลิตเดียวกันทั้งหมดจะทำให้สะดวกและง่ายต่อการจัดตารางการผลิตที่ต้องพิจาณาทั้งลำดับขั้นตอนการผลิตและการใช้ทรัพยากรร่วมกันในแต่ละขั้นตอน แต่การพิจารณาเลือกใช้สูตรการผลิตลักษณะนี้จะพบว่า งานต่างๆเหล่านั้นยังไม่ให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ดีพอ เนื่องจากยังมีเวลาเหลือเพียงพอที่จะให้งานบางงานสามารถเลือกใช้สูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำลง จากภาพที่ 1.1(a) จะพบว่าในแม่แบบที่

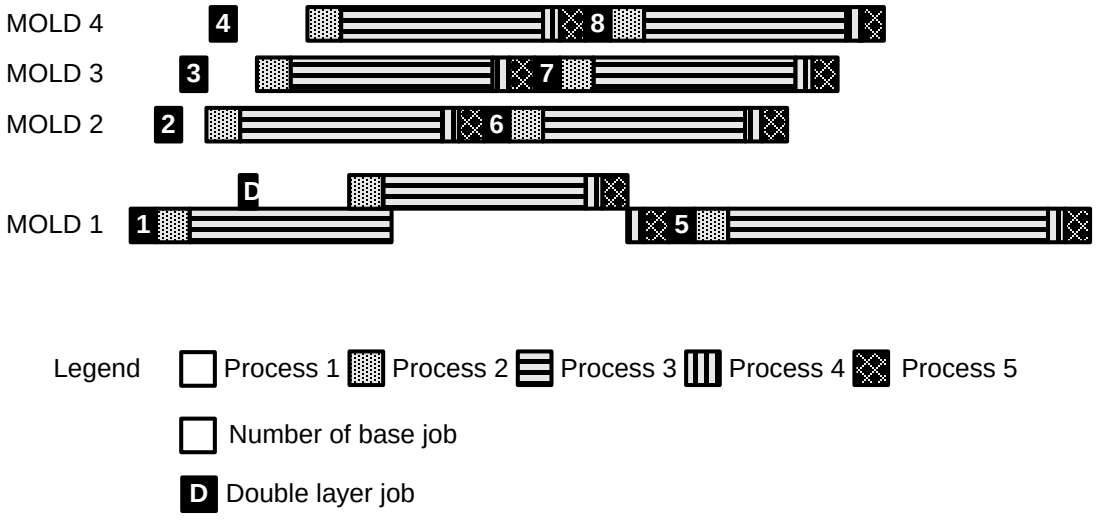
1 มีระยะเวลาเหลือพอที่จะให้งานที่ผลิตในแม่แบบนั้น คือ งานที่ 1 หรือ งานที่ 5 เลือกใช้สูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำลงได้ และจากภาพที่ 1.1(b) จะเห็นว่าเมื่อสมมติให้งานที่ 5 นั้นเปลี่ยนสูตรการผลิตแล้วจะทำให้ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานที่ 5 มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกับงานที่ 7 ซึ่งถ้ามีการจัดตารางการผลิตที่ไม่ดีพอก็จะให้การเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตของงานที่ใช้ทรัพยากรซ้อนทับกันออกไปและเป็นผลให้บางงานเสร็จสิ้นการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงานดังภาพที่ 1.1(c) แต่ถ้ามีการจัดตารางตารางการผลิตที่ดีแล้วงานก็จะสามารถผลิตได้ทันกำหนดเวลาส่งงานดังภาพที่ 1.1(d)



ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างการเลือกใช้สูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิต

อย่างไรก็ตามในการผลิตที่มีจำนวนงานและจำนวนแม่แบบมากขึ้นก็จะไปเพิ่มความซับซ้อนให้กับการเลือกใช้สูตรการผลิตที่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ทรัพยากรร่วมกันในการจัดตารางการผลิตได้ เป็นผลให้งานวิจัยนี้จึงศึกษาค้นหาวิธีการทางฮิวริสติกที่จะช่วยในการเลือกสูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิตด้วยระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมของทุกงานมีค่าน้อยที่สุดและงานทุกงานต้องผลิตเสร็จสิ้นก่อนกำหนดเวลาส่งงาน โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกนี้กับแบบจำลองทางคณิตศาตร์

จากการผลิตดังกล่าวข้างต้นจะพบว่า ทรัพยากรในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะเกิดเวลาว่างที่ไม่สามารถนำมาใช้ในการผลิตได้เนื่องจากแม่แบบที่ใช้ผลิตนั้นไม่ว่างสำหรับการผลิต จากภาพที่ 1.1(d) จะเห็นว่า ทรัพยากรที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 คือ เครื่องจักรที่ใช้ผสมคอนกรีตนั้นมีเวลาว่างเมื่อผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานที่ 4 เสร็จสิ้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่เพิ่มกำลังการผลิตด้วยวิธีการผลิตซ้อนทับ (Double Layer Production) ที่จะช่วยให้มีการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรมากขึ้น โดยการผลิตลักษณะนี้คือ การผลิต ที่นำผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เช่น เสาเข็ม (Column) มาผลิตซ้อนทับบนผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่ง เช่น แผ่นพื้น (Floor Stabs) โดยใช้แม่แบบเดียวกันในการผลิตและในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกันด้วยเช่นกัน และงานวิจัยนี้จะเรียกงานที่ถูกซ้อนทับว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่าง และเรียกงานที่ซ้อนทับว่า งานซ้อนทับ จากภาพที่ 1.2 เมื่อสมมติให้งานพื้นงานที่ 1 ถูกจัดสรรงานซ้อนทับลงไปจะพบว่าทรัพยากรในขั้นตอนการผลิตที่ 2 จากเดิมที่จะว่างเมื่อผลิตงานพื้นงานที่ 4 เสร็จสิ้น ก็จะไม่ว่างเนื่องจากต้องผลิตงานซ้อนทับ



ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างการผลิตซ้อนทับ

กระบวนการผลิตซ้อนทับ มีขั้นตอนการผลิตเหมือนกันกับการผลิตงานแผ่นพื้นชั้นล่าง แต่แตกต่างกันที่ขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับนั้นจะใช้ระยะเวลาในการผลิตน้อยกว่า และจะสามารถเริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตนี้ก็ต่อเมื่อ งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับ ได้เริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ การบ่มไปแล้วอย่างน้อย 6 ชั่วโมง และการผลิตซ้อนทับจะต้องผลิตเสร็จสิ้นภายในขั้นตอนการบ่มของการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง ซึ่งถ้าเสร็จช้ากว่าก็จะทำให้การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างต้องขยายเวลาการบ่มออกไปจนถึงเวลาที่การผลิตซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตโดยไม่มีผลต่อคุณภาพและสูตรการผลิตของแผ่นพื้นชั้นล่าง นอกจากนี้งานซ้อนทับยังสามารถเลือกสูตรการผลิตได้เช่นเดียวกันกับงานแผ่นพื้นชั้นล่างและงานแผ่นพื้นชั้นล่างแต่ละงานจะสามารถผลิตงานซ้อนทับได้เพียงงานเดียวเท่านั้น โดยที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างจะต้องคงสูตรการผลิตและแม่แบบที่ใช้ในการผลิตไว้อย่างเดิม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการทางฮิวริสติกที่จะช่วยจัดสรรงานซ้อนทับให้กับงานแผ่นพื้นชั้นล่างและวิธีการจัดตารางการผลิตเพื่อให้ได้จำนวนงานซ้อนทับมากที่สุดและเลือกสูตรการผลิตให้งานซ้อนทับเหล่านั้นมีต้นทุนวัตถุดิบรวมน้อยที่สุดด้วย โดยต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้นั้นจะถูกเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

พัฒนาวิธีการเลือกสูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิต

1. เพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าน้อยที่สุดสำหรับงานแผ่นพื้นชั้นล่าง
2. เพื่อให้สามารถผลิตงานซ้อนทับได้จำนวนมากที่สุดและงานซ้อนทับเลือกสูตรการผลิตที่ให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตและข้อสมมุติของงานวิจัย

1. ข้อมูลต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นข้อมูลที่ถูกจำลองขึ้นมา และเป็นข้อมูลที่ทราบแน่นอนล่วงหน้า (Deterministic) ได้แก่
   - จำนวนงานคอนกรีต
   - จำนวนแม่แบบ
   - ระยะเวลาการผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิต
   - จำนวนสูตรการผลิตและต้นทุนวัตถุดิบเมื่อใช้สูตรการผลิตนั้นๆ
   - เวลาส่งงาน
2. ข้อสมมติฐานในงานวิจัย
   - กระบวนการผลิตมีขั้นตอนการผลิตที่แน่นอนและไม่เปลี่ยนแปลง

- ไม่มีการหยุดการผลิตและการแทรกงานอื่น
- ไม่พิจารณาของเสียที่เกิดจากการผลิต
- สภาพอากาศ ช่วงเวลาของกะทำงานไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิต

1.4ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม CPLEX, ILOG OPL และ MATLAB
3. ระบุที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย รวมถึงข้อสมมติฐานต่างๆ
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)
5. ประมวลผลโดยซอฟต์แวร์ CPLEX เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution)
6. สร้างวิธีการฮิวริสติก (Heuristics) สำหรับแก้ปัญหา โดยใช้โปรแกรม MATLAB
7. เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของฮิวริสติกกับคำตอบที่ดีที่สุดและค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound)
8. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการวิจัย

กิจกรรม	2554										2555		
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย													
2.1 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม CPLEX, ILOG OPL													
2.2 ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม MATLAB													
3. ระบุที่มาของปัญหา, วัตถุประสงค์, ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน													
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์													
5. ประมวลซอฟแวร์ CPLEX เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด													
6.1 สร้างกระบวนการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาในกรณีที่ไม่มีการผลิตแบบซ้อนทับ													
6.2 สร้างกระบวนการฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหาในกรณีมีการผลิตแบบซ้อนทับ													
7. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกกับคำตอบที่ดีที่สุดและค่าขอบเขตล่าง													
8. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย													
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													

เนื้อหาสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 บท ได้แก่ บทที่ 1 ซึ่งกล่าวถึงภาพรวมและความสำคัญของงานวิจัยของงานวิจัย จากนั้นบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตสำหรับปัญหาเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน และทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก บทที่ 3 และ 4 จะกล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนในการวิจัย แนวคิดในการพัฒนาวิธีการการเลือกสูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิต รวมถึงผลการวิจัย โดยบทที่ 3 ศึกษาปัญหาในกรณีที่ไม่มีการผลิตซ้อนทับ และ บทที่ 4 ศึกษาปัญหาในกรณีที่มีการผลิตซ้อนทับ ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาจำนวนงานซ้อนทับให้ได้มากที่สุดและให้จำนวนงานซ้อนทับเหล่านั้นใช้สูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำที่สุด และบทที่ 5 บทสุดท้ายจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ กระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต สำหรับปัญหา เครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน โดยที่จำนวนทรัพยากรมีผลต่อระยะเวลาการผลิตและไม่มีผลต่อระยะเวลาการผลิต และส่วนสุดท้ายได้แก่ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ แก้ปัญหาด้วยวิธีค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

กระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปส่วนใหญ่ประกอบด้วยลำดับของสถานีการผลิตหรือลำดับของขั้นตอนการผลิตที่แต่ละสถานีการผลิตอาจจะมีเพียงหนึ่งเครื่องจักรหรือมากกว่า ซึ่งงานหรือคอนกรีตแต่ละชิ้นจะถูกผลิตในแม่แบบแล้วถูกส่งไปตามลำดับสถานีการผลิตเหล่านั้น โดยระยะเวลาการผลิตขึ้นอยู่กับชนิดของงานคอนกรีตและขั้นตอนการผลิต ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงกำหนดการแก้ปัญหาในรูปแบบของการหาลำดับงานในการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop Scheduling Problem) ซึ่งเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) ที่มักใช้ฮิวริสติกในการแก้ปัญหา ไม่ว่าจะเป็น Leu และ Hwang (2001) ซึ่งศึกษาการจัดลำดับของงานที่มีลักษณะเป็นชุด (Batch) เข้าสู่กระบวนการผลิตโดยที่งานแต่ละชุดจะใช้ระยะเวลาในการผลิตและทรัพยากรไม่เท่ากันในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่มีทรัพยากรจำกัด เพื่อให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด (Minimize Makespan) ภายใต้ระดับการใช้ประโยชน์ของทรัพยากรที่ยอมรับและในปีถัดมา Leu และ Hwang (2002) ก็แก้ปัญหาในลักษณะเช่นเดียวกันแต่เป็นการผลิตที่ไม่ได้มีลักษณะเป็นชุด โดยงานวิจัยทั้งสองนี้ใช้ จีนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) ในการแก้ปัญหา Grabowski และ Pempera (2000) ที่ศึกษาลำดับงานโดยมีวัตถุประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุดเช่นเดียวกันแต่มีเงื่อนไขทางการผลิตต่างกัน คือบางขั้นตอนการผลิตต้องเริ่มต้นการผลิตทันทีหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตก่อนหน้าสิ้นสุดการผลิตและขั้นตอนการผลิตที่แบ่งออกเป็นขั้นตอนการผลิตที่เป็นจุดคอขวด คือ ขั้นตอนการผลิตที่ ณ เวลาใดสามารถผลิตได้เพียง 1 งานและขั้นตอนการผลิตที่ไม่เป็นจุดคอขวดที่ ณ เวลาใดๆสามารถผลิตได้มากกว่า 1 งาน โดยงานวิจัยนี้จะแก้ปัญหาด้วยการค้นหาคำตอบแบบทาบู (Tabu Search) ที่มีบริเวณใกล้เคียง (Neighbourhood) จากการสลับตำแหน่งของคำตอบ 2 ตำแหน่งและการแทรกตำแหน่งของคำตอบ Benjaoran และคณะ

(2005) ศึกษาการจัดเรียงลำดับของงานในสถานการณ์ที่คล้ายกับการทำงานจริงมากขึ้น คือ ชั่วโมงการทำงานที่ถูกแบ่งออกเป็นชั่วโมงการทำงานปกติและชั่วโมงการทำงานพิเศษ โดยมีหลายวัตถุประสงค์ คือ ระยะเวลารวมที่งานอยู่ในการผลิตน้อยที่สุด (Minimize Total Flow Time) และการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรสูงที่สุด (Maximize Resource Utilization) โดยใช้วิธี จีนเนติกอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาและงานวิจัยนี้ยังวิเคราะห์ถึงผลกระทบเมื่อการผลิตมีจำนวนทรัพยากร คือ แม่แบบที่มีเพิ่มขึ้นอีกด้วย และ Ko และ Wang (2010) ที่ศึกษาการจัดลำดับงานที่คำนึงถึงพื้นที่ระหว่างสถานีการผลิตที่มีอย่างจำกัดสำหรับงานระหว่างกระบวนการ (Work in Process) โดยมีวัตถุประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบและค่าปรับเนื่องจากการล่าช้าน้อยที่สุด (Minimize Total Tardiness Penalty) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกลักษณะหนึ่งที่วางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับแผนของโครงการก่อสร้าง เช่น งานวิจัยของ Chan และ Hu (2002) ที่พยามจัดสรรงานให้กับแม่แบบและวันที่ผลิตให้เหมาะสมเพื่อให้ผลรวมของต้นทุนในสินค้าคงคลัง ต้นทุนในการส่งสินค้าล่าช้าและต้นทุนจากการใช้ทรัพยากรให้มีค่าน้อยที่สุด โดยใช้ Constraint Programming ในการแก้ปัญหา ซึ่งต่อมา Chan และ Hu (2009) ได้พัฒนาวิธีในการแก้ปัญหาด้วยการนำ จีนเนติกอัลกอริทึม มาร่วมใช้กับ Constraint Programming ในการค้นหาคำตอบ , Li และคณะ (2010) ที่ศึกษาระบบการจัดการห่วงโซ่อุปทานและพัฒนาการวางแผนการผลิตของการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของการก่อสร้างและต้นทุนการผลิตมีค่าน้อยที่สุด และ Ko (2010) ที่สร้างลำดับขั้นตอนในการตัดสินใจวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับแผนของโครงการก่อสร้างเพื่อลดระดับของสินค้าคงคลัง

2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิต สำหรับปัญหาเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน

การผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีแม่แบบหลายแม่แบบซึ่งมีลักษณะเหมือนกันทุกประการวางเรียงขนานกันและอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ และแต่ละขั้นตอนการผลิตมีการใช้ทรัพยากรร่วมกันระหว่างแม่แบบมีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน โดยมีแม่แบบเปรียบเสมือนกับเครื่องจักรผลิต

เครื่องจักรขนาน หมายถึง เครื่องจักรประเภทเดียวกันที่สามารถทำงานทดแทนกันได้ (ปารเมศ ชุติมา , 2546) โดยงานสามารถเลือกทำบนเครื่องจักรใดก็ได้และเครื่องจักรอาจจะมีลักษณะเมือนกันทุกประการ (identical) และไม่เหมือนกันหรือคล้ายกันก็ได้ (Non-Identical or Unrelated) (Pinedo, 1995) ซึ่งแต่เดิมปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบเครื่องจักรขนานจะพิจารณาเฉพาะเครื่องจักรเท่านั้นที่เป็นทรัพยากรโดยที่งานจะเลือกทรัพยากรที่ต้องใช้ คือ เลือก

เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตและจัดเรียงลำดับงานในแต่ละเครื่องจักรเพื่อให้ตอบสนองกับวัตถุประสงค์ที่กำหนด อย่างไรก็ตามในสภาวะการผลิตที่เกิดขึ้นจริงที่การผลิตมีการใช้ทรัพยากรที่ไม่ใช่เฉพาะเครื่องจักรในการผลิต เช่น พนักงานที่ใช้ในการควบคุมเครื่องจักร หรือ เครื่องมือในการปรับตั้งเครื่องจักร หรือ พาหนะในการขนย้ายสินค้า เป็นต้น จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการจัดตารางการผลิตด้วยเช่นกันเพื่อให้ตารางการผลิตมีความเป็นไปได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกันนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามผลกระทบของทรัพยากรที่มีต่อระยะเวลาในการผลิตคือ งานวิจัยที่ทรัพยากรไม่มีผลต่อระยะเวลาการผลิตและงานวิจัยที่ระยะเวลาการผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณของทรัพยากรที่ใช้

2.2.1 งานวิจัยที่ทรัพยากรไม่มีผลต่อระยะเวลาการผลิต

งานวิจัยประเภทนี้จะศึกษาในสถานการณ์ที่งานแต่ละงานต้องใช้ทรัพยากรที่นอกเหนือจากเครื่องจักรในการผลิต (Parallel Machine Scheduling with Additional Resource Constraints) โดยทรัพยากรเหล่านี้จะมีอยู่จำกัดและต้องใช้ร่วมกันระหว่างเครื่องจักรผลิต ซึ่งสามารถเริ่มต้นการผลิตได้ก็ต่อเมื่อมีทรัพยากรเพียงพอให้กับความต้องการของงานที่เวลาใด ๆ Ventura และ Kim (2003) ศึกษาปัญหาในลักษณะนี้โดยที่แต่ละงานมีระยะเวลาในการผลิตเท่ากันแต่มีกำหนดเวลาส่งงานไม่เท่ากัน งานจะต้องถูกจัดสรรให้กับจุดเวลาที่ใช้การผลิตและตรวจสอบไม่ให้งานหลายๆงานที่ใช้ทรัพยากรชนิดเดียวกันในการผลิตที่จุดเวลานั้นใช้ทรัพยากรเกินกว่าที่มีอยู่ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลรวมของค่าปรับที่เกิดจากการเสร็จงานก่อนกำหนดและการเสร็จงานช้ากว่ากำหนดมีค่าน้อยที่สุด (Minimize Earliness and Tardiness Penalty) ซึ่งงานวิจัยนี้แก้ปัญหาด้วยวิธีฮิวริสติกที่นำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับโปรแกรมเชิงจำนวนเต็ม (Integer Programming) และค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound) ที่หาจากวิธี Lagrangian Relaxation และ Kellerer และ Strusevich (2004) ศึกษาเครื่องจักรขนานที่ไม่สามารถผลิตได้ทุกงาน (Parallel Dedicated Machine) โดยที่แต่ละงานจะถูกระบุเซตของเครื่องจักรที่สามารถใช้ผลิตไว้ล่วงหน้า ซึ่งงานจะถูกตัดสินใจเลือกเครื่องจักรที่ใช้ผลิตและทรัพยากรที่ต้องใช้และซึ่งแน่นอนว่าทรัพยากรชนิดเดียวกันที่แต่ละงานใช้นั้นจะต้องไม่มากไปกว่าทรัพยากรที่อยู่ ณ เวลาใดๆ และงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด (Minimize Makespan) โดยพัฒนาวิธีฮิวริสติกในการแก้ปัญหา และงานวิจัยของ Edis และคณะ (2008) ที่ศึกษาเครื่องจักรขนานที่งานจะไม่ถูกจัดสรรให้กับเครื่องจักรที่ว่างแต่จะถูกจัดสรรให้เครื่องจักรที่มีความเหมาะสมในการผลิตเนื่องจากเงื่อนไขของทรัพยากรบางอย่าง เช่น น้ำหนัก ,

ความดัน เป็นต้น ที่ไม่สามารถใช้เครื่องจักรนั้นในการผลิตได้ (Parallel Machine Scheduling Problem with Machine Eligibility Restrictions) โดยงานวิจัยนี้ยกตัวอย่างสถานีงานการฉีดขึ้นรูปพลาสติกในลักษณะต่างๆที่บางเครื่องจักรเท่านั้นสามารถนำแม่พิมพ์ (Die) ที่ต้องการไปใช้ในการผลิตได้ ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ ให้ผลรวมของเวลาในการผลิตงานทุกงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimize Total Flowtime) โดยใช้วิธี Lagrangian-Based Solution ในการแก้ปัญหา ซึ่งต่อมา Edis และ Ozkarahan (2011) ก็ศึกษาปัญหาในลักษณะเดียวกันนี้แต่มีวัตถุประสงค์ที่ต่างไปคือ ต้องการให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรมเชิงจำนวนเต็ม และ Constraint Programming และ โปรแกรมเชิงจำนวนเต็มร่วมกับ Constraint Programming ในการแก้ปัญหา

2.2.2 งานวิจัยที่ระยะเวลาการผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณของทรัพยากรที่ใช้

งานวิจัยลักษณะนี้แต่ละงานจะมีระยะเวลาในการผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณทรัพยากรที่ถูกจัดสรรลงไปให้ (Parallel Machine Flexible Resources Scheduling or Parallel Machine Scheduling with Resource Dependent Processing Time) โดยยังคงต้องตรวจสอบไม่ให้จำนวนทรัพยากรที่ถูกใช้นั้นเกินจำนวนทรัพยากรที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามงานวิจัยลักษณะนี้ยังถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การจัดสรรทรัพยากรที่เมื่อถูกกำหนดแล้วจะไม่เปลี่ยนแปลงอีกตลอดช่วงเวลาของการวางแผนการผลิต (Static Problem) และ การจัดสรรทรัพยากรที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนทรัพยากรและงานที่จะถูกจัดสรรได้ทุกเวลา (Dynamic Problem) โดยงานวิจัยของ Daniels และคณะ (1996) ศึกษาปัญหาทั้งสองลักษณะนี้โดยที่งานจะถูกระบุเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมาก่อน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สร้างฮิวริสติกที่ถูกเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด

สำหรับงานวิจัยเฉพาะในส่วน Static Problem นั้น Daniels และคณะ (1999) ได้ศึกษาโดยที่แต่ละงานจะยังไม่ถูกระบุเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการค้นหาคำตอบแบบทาบู (Tabu Search) มาใช้ในการแก้ปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด Jansen และ Mastrolilli (2004) ที่ศึกษาปัญหาในกรณีที่อนุญาตให้งานสามารถหยุดงานที่กำลังทำอยู่ได้และกลับมาทำงานในส่วนที่เหลือภายหลัง ซึ่งงานอาจจะใช้เครื่องจักรเดิมผลิตหรือใช้เครื่องจักรอื่นผลิตก็ได้ (Preemptive Case) โดยระยะเวลาการผลิตจะน้อยลงเมื่อมีการใช้ทรัพยากรเพิ่มขึ้นแต่ก็จะใช้ต้นทุนมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอฮิวริสติกที่จะช่วยแก้ปัญหาโดยมีวัตถุประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุดและต้นทุนที่เกิดจาก

การใช้ทรัพยากรเพิ่มน้อยที่สุดด้วย และ Chen (2004) ศึกษาปัญหาในลักษณะนี้โดยมีวัตถุประสงค์ด้านการจัดตารางร่วมกับต้นทุนของทรัพยากรที่ใช้เพิ่มขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการผลิตลง โดยวัตถุประสงค์ด้านการจัดตารางจะพิจารณาเวลาปิดงานของระบบและจำนวนงานที่ล่าช้าให้น้อยที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ Column Generation ในการแก้ปัญหาที่ต้องตัดสินใจการจัดสรรจำนวนทรัพยากรให้กับแต่ละงานและการจัดตารางที่คำนึงถึงลำดับของงานในเครื่องจักร และRuiz-Torres และ Centeno (2007) ศึกษาปัญหาที่ต้องตัดสินใจทั้งการจัดสรรของงานให้กับเครื่องจักรและการจัดสรรจำนวนทรัพยากรให้กับงาน โดยระยะเวลาการผลิตนั้นขึ้นอยู่กับการจัดสรรจำนวนทรัพยากรให้กับงาน และมีวัตถุประสงค์คือ ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด โดยนำเสนอฮิวริสติกในการแก้ปัญหา และRuiz-Torres และคณะ (2007) ศึกษาปัญหาที่ความเร็วของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตขึ้นอยู่กับจำนวนทรัพยากรที่ใช้ โดยศึกษาปัญหา 2 แบบ คือ ปัญหาที่งานถูกระบุเครื่องจักรที่ต้องใช้ในการผลิตล่วงหน้าแล้วพิจารณาเฉพาะการจัดสรรทรัพยากรให้กับงานซึ่งใช้โปรแกรมเชิงจำนวนเต็มในการแก้ปัญหา และปัญหาที่ต้องพิจารณาทั้งการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักรและการจัดสรรทรัพยากรให้กับงานซึ่งใช้ฮิวริสติกในการแก้ปัญหา โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ จำนวนงานล่าช้าที่น้อยที่สุด และ Su และ Lien (2009) ศึกษาทั้งการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักรและจัดสรรทรัพยากรให้กับงาน ซึ่งนำเสนอวิธีฮิวริสติกในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด

สำหรับงานวิจัยเฉพาะในส่วน Dynamic Problem นั้น Grigoriev และ Sviridenko (2007) ศึกษาปัญหาเครื่องจักรขนานที่แต่ละเครื่องจักรมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน (Unrelated Parallel Machines) โดยนำเสนอวิธีทางฮิวริสติกร่วมกับโปรแกรมเชิงเส้นในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์ให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด และ Kellerer (2008) ศึกษาปัญหาในลักษณะเดียวกันที่มีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกันแต่งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาเครื่องจักรขนานที่แต่ละเครื่องจักรมีคุณสมบัติเหมือนกัน (Identical Parallel Machine)

2.3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

การค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristic Search) เป็นการค้นหาคำตอบที่มีตัวชี้แนะหรือมีแนวทางหรือมีการคาดเดาอย่างมีเหตุผลว่า กระบวนการค้นหาควรจะเลือกเส้นทางใดหรือสถานะใดเพื่อทำการค้นหาต่อไปให้ได้คำตอบอย่างมีประสิทธิภาพ แต่คำตอบที่ได้จากฮิวริสติกนั้นไม่สามารถยืนยันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีการฮิวริสติกแบ่งออกได้ 7 วิธีหลักๆ (Silver, 2004) แต่จะขอยกตัวอย่างบางวิธีที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเท่านั้น

2.3.1 Randomly Generated Solutions

วิธีการนี้เป็นการสุ่มเลือกคำตอบที่เป็นไปได้หลายๆคำตอบแล้วพิจารณาเลือกคำตอบที่ดีที่สุดจากการสุ่มเลือกคำตอบเหล่านั้น ซึ่งวิธีการนี้จะไม่สามารถพัฒนาคำตอบให้ดีขึ้นได้จากคำตอบเดิม และคำตอบที่ได้โดยการใช้ฮิวริสติกวิธีนี้เพียงอย่างเดียวจะไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากขึ้นอยู่กับการสุ่มว่าพบเจอคำตอบที่ดีหรือไม่ แต่ฮิวริสติกวิธีนี้สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการอื่นๆได้ในการช่วยให้คำตอบสามารถหลบหนีการติด Local ได้

2.3.2 Problem Decomposition or Partitioning

เป็นวิธีการที่ใช้แบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยๆและค้นหาคำตอบของปัญหาย่อยๆเหล่านั้น โดยปัญหาย่อยๆอาจเป็นอิสระต่อ (Subproblems Independently) หรือนำคำตอบที่ได้จากปัญหาย่อยหนึ่งไปตั้งต้นให้กับอีกปัญหาหนึ่ง (Subproblems Sequentially) หรือหาคำตอบสำหรับปัญหาย่อยโดยคงค่าของตัวแปรอื่นๆและปรับปรุงค่าของตัวแปรตัดสินสำหรับชุดคำตอบย่อยๆนั้น (Subproblems Iteratively)

2.3.3 Methods That Reduce The Solution Space

แนวคิดของวิธีการนี้ คือ การตัดพื้นที่ในการค้นหาคำตอบบางส่วนออกที่ไม่มีผลกระทบหรือมีผลกระทบน้อยมากกับผลของคำตอบที่ได้จากฮิวริสติก ตัวอย่างเช่น การตัดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ออก แต่บางครั้งการที่คำตอบเริ่มต้นเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ เมื่อนำไปพัฒนาต่ออาจนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดก็ได้ (Global Solution) เป็นต้น

2.3.4 Constructive Methods

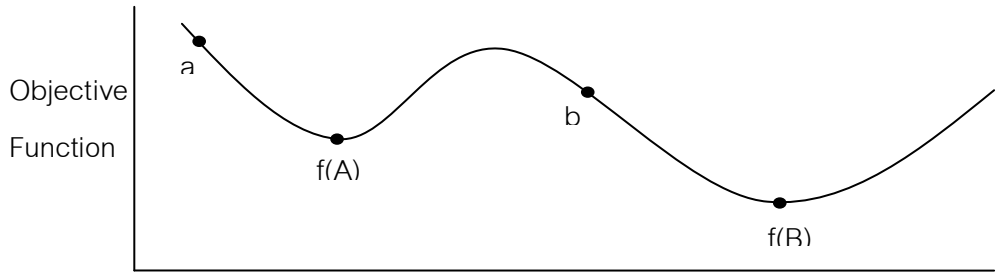
ฮิสริสติกวิธีนี้จะสร้างคำตอบทีละขั้นตอนซึ่งจะคำนึงถึงผลประโยชน์เฉพาะหน้าในการตัดสินใจแต่ละครั้งและคำตอบที่ได้จะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อเสร็จขั้นตอนสุดท้ายแล้วเท่านั้น ตัวอย่างของวิธีการนี้คือ วิธีการละโมบ (Greedy Method) ที่เราตัดสินใจโดยใช้เกณฑ์ที่ให้ผลเหมาะที่สุดจากสภาพของปัญหา ณ ขณะนั้น ได้เป็นคำตอบบางส่วนแล้วค่อยลดขนาดของปัญหาลงเพื่อ

ตัดสินใจต่อไปเพื่อให้ได้คำตอบบางส่วนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยวิธีเดียวกันและจะทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้คำตอบที่สมบูรณ์ (สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล, 2549)

ตัวอย่างของปัญหาที่ใช้วิธีการละโมบ เช่น ปัญหาถุงเป้ (Knapsack Problem) ที่มีของให้เลือกอยู่จำนวน n ชิ้น โดยที่ละชิ้นจะมีหมายเลขกำกับ 1, 2, …, n และของแต่ละชิ้นก็จะมีน้ำหนักและมูลค่าต่างกัน ซึ่งจุดประสงค์ของปัญหานี้คือ ต้องการหยิบของต่างๆเหล่านี้ใส่เป้โดยที่ให้มูลค่ารวมที่ได้มีค่ามากที่สุด โดยฮิวริสติกการละโมบจะเลือกของที่มีมูลค่าต่อน้ำหนักสูงสุดก่อนแล้วเลือกของที่มีมูลค่าต่อน้ำหนักสูงชิ้นต่อๆไปจนกระทั่งไม่มีของใดที่สามารถบรรจุลงเป้ได้อีก เป็นต้น

2.3.5 Local Improvement Methods

ฮิวริสติกวิธีการนี้จะเริ่มต้นจากคำตอบคำตอบหนึ่งที่อาจจะได้จากวิธี Constructive จากนั้นจะกำหนดบริเวณใกล้เคียง (Neighbourhood) แล้วค้นหาคำตอบในบริเวณดังกล่าวซึ่งถ้าพบคำตอบที่ดีกว่าเดิมก็จะนำไปแทนคำตอบเดิมและจะหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อค้นหาทั่วพื้นที่ในบริเวณนั้นแล้วไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้น ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดในบริเวณนั้นเรียกว่า Local Optimum การกำหนดบริเวณใกล้เคียงอาจจะกำหนดขึ้นมาอย่างง่ายๆให้มีจำนวนกว้างๆหรือแคบๆก็ได้ ตัวอย่างของการกำหนดบริเวณใกล้เคียงในปัญหาการจัดเรียงลำดับงานของเครื่องจักร ที่บริเวณใกล้เคียงเกิดจากการสลับตำแหน่งของลำดับงาน 2 งานที่อยู่ติดกันทุกคู่ เป็นต้น อย่างไรก็ตามบริเวณใกล้เคียงถ้าถูกกำหนดไว้กว้างมากก็มีโอกาสที่จะได้คำตอบที่ดีแต่จะต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน และถ้าถูกกำหนดไว้แคบเกินไปก็อาจจะทำให้คำตอบนั้นติดอยู่ที่ Local ได้ง่ายไม่สามารถนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้ (Global Optimum)



ภาพที่ 2.1 จุดเริ่มต้นของการค้นหาคำตอบด้วยวิธี Local

อย่างไรก็ตามคุณภาพคำตอบของฮิวริสติกวิธีการนี้นั้นขึ้นอยู่กับจุดเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบ จากภาพที่ 2.1 ในปัญหาที่ต้องการคำตอบให้น้อยที่สุด (Minimization Problem) ถ้าเริ่มต้นค้นหาคำตอบจากจุด a จะมีโอกาสน้อยกว่าจุด b ที่จะค้นหาคำตอบได้เท่ากับ f(B) ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และคำตอบที่เริ่มต้นจากจุด a ก็จะมีโอกาสติด Local คือ ค่า f(A) มากกว่าอีกด้วย ดังนั้นในการแก้ข้อบกพร่องของวิธีการนี้อาจจะเพิ่มวิธีการฮิวริสติกอย่างอื่นที่จะช่วยเพิ่มจุดเริ่มต้นในการค้นหาให้หลากหลายมากขึ้น เช่น Randomly Generated Solutions เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Grabowski และ Pempera	2000	การจัดเรียงลำดับงาน	Minimize Makespan	Tabu Search	กระบวนการผลิตที่บางขั้นตอนการผลิตต้องเริ่มต้นการผลิตโดยทันทีหลังจากที่การผลิตก่อนหน้าผลิตเสร็จสิ้น
Leu และ Hwang	2002 และ 2009	การจัดเรียงลำดับงาน	Minimize Makespan	Genetic Algorithm	งานที่จะถูกจัดลำดับนั้นมีลักษณะเป็นและไม่เป็นชุดของงาน
Chan และ Hu	2002	การวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับแผนการก่อสร้าง	Minimize Total Cost	Constraint Programming	การวางแผนที่คำนึงถึงแผนการก่อสร้าง
Benjaoran และ คณะ	2005	การจัดเรียงลำดับงาน	Minimize Total Flow Time Maximize Resource Utilization	Genetic Algorithm	การผลิตที่พิจารณาถึงการทำงานจริงมากขึ้นที่แบ่งประเภทของชั่วโมงการทำงานและวิเคราะผลกระทบจากการเพิ่มจำนวนแม่แบบ

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Chan และ Hu	2009	การวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับแผนการก่อสร้าง	Minimize Total Cost	Combine Constraint Programming and Genetic Algorithm	การวางแผนที่คำนึงถึงแผนการก่อสร้างและการใช้ Constraint Programming ในการแก้ปัญหา
Ko และ Wang	2010	การจัดเรียงลำดับงาน	Minimize Makespan Minimize Total Tardiness Penalty	Genetic Algorithm	การผลิตที่คำนึงถึงพื้นที่ระหว่างสถานีการผลิตที่ใช้จัดเก็บงานระหว่างกระบวนการ
Ko	2010	การวางแผนการผลิตให้สอดคล้องกับแผนการก่อสร้าง	Minimize Inventory	Framework	วิธีการที่ช่วยให้ระดับสินค้าคงคลังลดลง
Li และคณะ	2010	การวางแผนการผลิตให้สามารถตอบสนองความต้องการของแผนการก่อสร้าง	Total Cost	Genetic Algorithm	การวางแผนการผลิตที่มองทั้งระบบห่วงโซ่อุปทาน

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตของระบบเครื่องจักรขนานที่มีเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกัน

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Ventura และ Kim	2003	Identical Parallel Machine	Minimize Total Tardiness Penalty	Heuristics	วิธีการทางฮิวริสติกที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะสร้างคำตอบเริ่มต้นด้วยการจัดสรรแต่ละงานลงในเวลาส่งงาน (Due Date) ของแต่ละงาน และส่วนที่สองที่พยายามทำให้คำตอบเริ่มต้นเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) และพัฒนาคำตอบ โดยใช้การปรับเปลี่ยนตำแหน่งการจัดสรรงาน
Kellerer และ Strusevich	2004	Parallel Dedicated Machine	Minimize Makespan	Heuristics	ลักษณะปัญหาที่เป็นแบบ Dedicated Machine
Edis และ Ozkarahan	2011	Machine Eligibility Restrictions	Minimize Makespan	Integer Programming Constraint Programming Combine Integer Programming and Constraint Programming	วิธีการในการแก้ปัญหาที่นำแบบจำลองจำนวนเต็ม (Integer Programming) มาใช้ร่วมกับ Constraint Programming

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Edis และ คณะ	2008	Machine Eligibility Restrictions	Minimize Total Flow Time	Integer Programming Heuristics	วิธีการฮิวริสติกที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ใช้สร้างคำตอบเริ่มต้น ส่วนที่ 2 ที่ทำให้คำตอบเริ่มต้นเป็นไปได้ (Feasible Solution) โดยใช้วิธี Lagrangian Heuristic และส่วนสุดท้ายที่ใช้ Sub Gradient Optimization Procedure ในการพัฒนาคำตอบขอบเขตบน (Upper Bound) ให้ได้ใกล้เคียงกับคำตอบขอบเขตล่าง (Lower Bound)
Daniels และ คณะ	1996	Resource Dependent Processing Time โดยที่งานถูกระบุเครื่องจักรล่วงหน้า	Minimize Makespan	Heuristics	ศึกษาทั้ง Static และ Dynamic Problem
Jansen และ Mastrolilli	2004	Resource Dependent Processing Time : Static Problem ในกรณีที่อนุญาตให้มีการแทรกงาน	Minimize Makespan Minimize Cost	Heuristics	การผลิตที่อนุญาตให้มีการแทรกงาน (Preemptive Case)

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Daniels และคณะ	1999	Resource Dependent Processing Time : Static Problem โดยที่งานยังไม่ถูกระบุเครื่องจักรล่วงหน้า	Minimize Makespan	Tabu Search	วิธีการทางฮิวริสติกซึ่งใช้ Tabu Search ในการแก้ปัญหา โดยคำตอบเริ่มต้นสร้างด้วยการใช้เรียงลำดับงานที่มีระยะเวลาการผลิตมากก่อน (Longest Processing Time : LPT) และสร้างบริเวณใกล้เคียง (Neighbourhood) ด้วยการสลับทุกคู่ของงานที่อยู่คนละเครื่องจักร ซึ่งเมื่อได้คำตอบที่ดีขึ้นก็จะแทนที่คำตอบเดิม
Ruiz-Torres	2007	Resource Dependent Processing Time : Static Problem	Minimize Tardy Job	Integer Programming Heuristics	ศึกษาทั้งในกรณีที่งานยังไม่ถูกระบุเครื่องจักรล่วงหน้าและงานถูกระบุเครื่องจักรล่วงหน้า

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Chen	2004	Resource Dependent Processing Time : Static Problem	Minimize Makespan Minimize Tardy Job Minimize Cost	Column Generation	วิธีการแก้ปัญหาด้วย Column Generation Based Branch and Bound โดยเริ่มต้นด้วยการสร้างชุดคำตอบที่จัดสรรงานให้กับเครื่องจักร จากนั้นจะใช้วิธี Branch and Bound หาคำตอบแต่ละชุดที่ได้
Ruiz-Torres และ Centeno	2007	Resource Dependent Processing Time : Static Problem โดยที่งานยังไม่ถูกระบุเครื่องจักรล่วงหน้า	Minimize Makespan	Heuristics	วิธีการทางฮิวริสติกซึ่งจะเริ่มจากการแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 จะจัดสรรทรัพยากรให้กับงาน และส่วนที่ 2 จะจัดสรรงานและทรัพยากรนั้นให้กับเครื่องจักร จากนั้นจะพยายามปรับให้ภาระงาน (Work Load) ในแต่ละเครื่องจักรมีค่าใกล้เคียงกับกำลังการผลิตให้ได้มากที่สุด

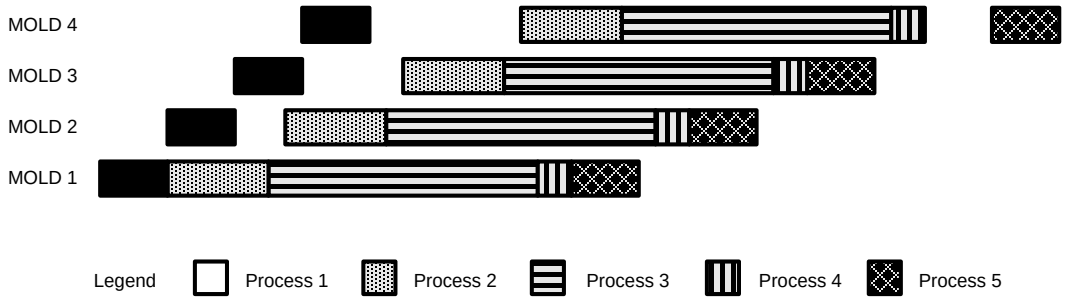
ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Su และ Lien	2009	Resource Dependent Processing Time : Static Problem	Minimize Makespan	Heuristics	วิธีการทางฮิวริสติกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การจัดสรรงานให้กับเครื่องจักร และจัดสรรทรัพยากรให้กับงานซึ่งแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ จัดสรรทรัพยากรให้กับงานหลังจากจัดสรรให้กับเครื่องจักรแล้ว และจัดสรรทรัพยากรให้กับงานก่อนที่งานจะจัดสรรให้กับเครื่องจักร
Grigoriev และ Sviridenko	2007	Resource Dependent Processing Time : Dynamic Problem โดยที่เครื่องจักรมีลักษณะเป็น Unrelated Parallel Machine	Minimize Makespan	Combine Heuristic and Linear Programming	วิธีการทางฮิวริสติกเริ่มต้นด้วยการใช้ LP Rounding Techniques ในการจัดสรรทรัพยากรให้กับงานและการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักร จากนั้นจะใช้ Graham's List Scheduling เพื่อให้ได้ 4-Approximation Algorithm คือ LP-Greedy ในการจัดตารางการผลิต

ผู้แต่ง	ปี	ลักษณะของปัญหา	วัตถุประสงค์	ระเบียบวิธีการ	ข้อแตกต่างจากงานวิจัยอื่น
Kellerer	2008	Resource Dependent Processing Time : Dynamic Problem โดยที่เครื่องจักรมีลักษณะเป็น Identical Parallel Machine	Minimize Makespan	Heuristics	วิธีการทางฮิวริสติกที่ใช้ (3.5+ε)-Approximation Algorithm ในการแก้ปัญหา

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีที่ไม่มีการผลิตซ้อนทับ

3.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา

กระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปกรณีศึกษาประกอบด้วยหลายแม่แบบที่ถูกวางอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ (Fix Location Mold) โดยมีลักษณะคล้ายกับเครื่องจักรในปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบเครื่องจักรขนาน (Parallel Machine Scheduling Problem) ซึ่งในการผลิตนั้นต้องผลิตให้ครบทุกงานโดยที่แต่ละงานจะต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนการผลิตภายในแม่แบบเดียวกันและแม่แบบจะไม่สามารถผลิตงานอื่นได้จนกว่างานที่ผลิตอยู่นั้นเสร็จสิ้น นอกจากนี้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตยังต้องการทรัพยากรเฉพาะ (Additional Resources) สำหรับการผลิตอีกด้วย จากภาพที่ 3.1 ที่การผลิตประกอบไปด้วย 4 แม่แบบและ 5 ขั้นตอนการผลิต โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 คือ ขั้นตอนการเตรียมแม่แบบ (Mold Preparation) ที่สามารถเริ่มต้นการผลิต ณ เวลาใดก็ได้เมื่อมีแม่แบบว่างพร้อมสำหรับการผลิต โดยจะต้องใช้พนักงานที่มีทักษะเฉพาะ (Special Workforce) หลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 1 เสร็จสิ้น ขั้นตอนการผลิตที่ 2 คือ การผสมและหล่อคอนกรีต (Concrete Mixing and Casting) จึงจะสามารถเริ่มต้นการผลิตได้ โดยขั้นตอนการผลิตนี้จะต้องใช้เครื่องผสมคอนกรีต (Mixing Machine) ที่จะต้องทำความสะอาดก่อนจึงสามารถใช้ผลิตงานถัดไปได้ ซึ่งจากภาพที่ 3.1 จะเห็นว่า ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ในแม่แบบที่ 2 นั้นจะไม่สามารถเริ่มต้นการผลิตได้ทันทีเมื่อขั้นตอนการผลิตที่ 2 ในแม่แบบที่ 1 สิ้นสุดการผลิต ต่อจากนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ การบ่ม (Curing) จะต้องเริ่มต้นการผลิตทันที ซึ่งขั้นตอนการผลิตนี้แต่ละงานจะมีระยะเวลาในการบ่มไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตที่งานนั้นเลือกใช้ โดยสูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการผลิตสั้นก็จะมีต้นทุนวัตถุดิบสูง และขั้นตอนการผลิตนี้ไม่ต้องทรัพยากรเฉพาะใดๆ ฉะนั้นจึงสามารถทำการบ่มหลายงานในเวลาเดียวกันได้ จากนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 4 คือ การตัดแยกออกจากแม่แบบ (Stripping) จะสามารถเริ่มผลิตได้เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 โดยในขั้นตอนการผลิตนี้จะต้องใช้เครื่องตัดคอนกรีต (Stripping Machine) และขั้นตอนสุดท้าย คือ ขั้นตอนการผลิตที่ 5 คือ การจัดเก็บ (Storing) ที่สามารถเริ่มต้นการผลิตได้หลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 เสร็จสิ้น โดยจะต้องใช้รถยก (Crane) สำหรับการขนย้าย ซึ่งในแต่ละขั้นตอนการผลิตนั้นจะมีทรัพยากรเฉพาะเพียง 1 หน่วยเท่านั้นที่จะต้องใช้ร่วมกันในทุกแม่แบบ



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างลำดับขั้นตอนการผลิต

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เซต (Sets)

$\mathcal{I}$ = {1,2,…, I} คือ เซตของงานคอนกรีต

$\mathcal{J}$ = {1,2,…, J} คือ เซตของขั้นตอนการผลิต

$\mathcal{K}$ = {1,2,…, K} คือ เซตของแม่แบบ

$\mathcal{F}$ = {1,2,…, F} คือ เซตของสูตรการผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

Z_{ifk} = $\begin{cases} 1 & \text{ถ้างาน } i \in \mathcal{I} \text{ เลือกสูตรการผลิต } f \in \mathcal{F} \text{ และใช้แม่แบบ } k \in \mathcal{K} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

S_{ij} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงาน $i \in \mathcal{I}$ ในขั้นตอนการผลิต $j \in \mathcal{J}$

B_{ik} = เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงาน $i \in \mathcal{I}$ ในแม่แบบ $k \in \mathcal{K}$

Y_{ik} ϵ {0,1}, $i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}$

W_{ij} ϵ {0,1}, $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$

ค่าพารามิเตอร์ (Parameters)

P_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต $j \in \mathcal{J}$

P_{3f} = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 3 ที่ขึ้นอยู่กับสูตรการผลิต $f \in \mathcal{F}$

C_f = ต้นทุนวัตถุดิบที่มีมูลค่าตามสูตรการผลิต $f \in \mathcal{F}$

D = เวลาส่งงาน

M = เลขจำนวนมากๆที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับเวลาส่งงาน

แบบจำลอง (Model)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\min \quad \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} C_f \, Z_{ifk} \tag{1}$$

สมการข้อจำกัด (Constraint Function)

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} Z_{ifk} = 1 \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{2}$$

$$S_{i2} \geq S_{i1} + P_1 \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{3}$$

$$S_{i3} = S_{i2} + P_2 \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{4}$$

$$S_{i4} \geq S_{i3} + \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{k \in \mathcal{K}} Z_{ifk} P_{3f} \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{5}$$

$$S_{i5} \geq S_{i4} + P_4 \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{6}$$

$$(1 - \sum_{f \in \mathcal{F}} Z_{ifk}) \cdot M \geq S_{i5} + P_5 - B_{ik} \qquad ,\forall i \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K} \tag{7}$$

$$B_{ik} \leq M \cdot Y_{ik} \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \, ,\forall k \in \mathcal{K} \tag{8}$$

$$B_{ik'} \leq M \cdot (1 - Y_{ik}) \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \, ,\forall k, k' \in \mathcal{K} \, , k \neq k' \tag{9}$$

$$B_{ik} - S_{i'1} \leq (2 - \sum_{f \in \mathcal{F}} Z_{ifk} - \sum_{f \in \mathcal{F}} Z_{i'fk}) \cdot M \qquad ,\forall i, i' \in \mathcal{I}, i' > i, \forall k \in \mathcal{K} \tag{10}$$

$$S_{ij} + P_j - S_{i'j} \leq M \cdot W_{ij} \qquad ,\forall i, i' \in \mathcal{I} \, , i \neq i' \, ,\forall j \in \mathcal{J} \, , j \neq 2,3 \tag{11}$$

$$-S_{ij} + P_j + S_{i'j} \leq M \cdot (1 - W_{ij}) \qquad ,\forall i, i' \in \mathcal{I} \, , i \neq i' \, ,\forall j \in \mathcal{J} \, , j \neq 2,3 \tag{12}$$

$$1 + S_{i2} + P_2 - S_{i'2} \leq M \cdot W_{i2} \qquad ,\forall i, i' \in \mathcal{I} \, , i \neq i \tag{13}$$

$$1 - S_{i2} + P_2 + S_{i'2} \leq M \cdot (1 - W_{i2}) \qquad ,\forall i, i' \in \mathcal{I} \, , i \neq i \tag{14}$$

$$B_{ik} \leq D \qquad ,\forall i \in \mathcal{I} \, ,\forall k \in \mathcal{K} \tag{15}$$

$$Z_{ijk} \in \{0,1\} \qquad ,\forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J}, \forall k \in \mathcal{K} \tag{16}$$

$$Y_{ik} \in \{0,1\} \qquad ,\forall i \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K} \tag{17}$$

$$W_{ij} \in \{0,1\} \qquad ,\forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \tag{18}$$

$$S_{ij} \geq 0 \qquad ,\forall i \in \mathcal{I}, \forall j \in \mathcal{J} \qquad (19)$$

$$B_{ik} \geq 0 \qquad ,\forall i \in \mathcal{I}, \forall k \in \mathcal{K} \qquad (20)$$

สมการวัตถุประสงค์ (1) เพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าน้อยที่สุดซึ่งขึ้นอยู่กับการเลือกสูตรการผลิตให้กับงาน โดยที่งานแต่ละงานสามารถเลือกสูตรการผลิตได้เพียง 1 สูตรการผลิตเท่านั้น และสามารถใช้เพียงแม่แบบเดียวเช่นกันในการผลิต (2) ส่วนสมการข้อจำกัด (3) – (6) นั้นยืนยันว่า การผลิตต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนการผลิตโดยที่ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และขั้นตอนการผลิตที่ 5 สามารถเริ่มต้นการผลิต ณ เวลาใดๆก็ได้หลังจากที่ขั้นตอนการผลิตก่อนหน้าเสร็จสิ้น ในขณะที่ขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ การบ่ม จะต้องเริ่มต้นการผลิตทันทีเมื่อขั้นตอนการผลิตที่ 2 สิ้นสุดการผลิต โดยสมการข้อจำกัด (7) นั้นแสดงเวลาสิ้นสุดการผลิตของแต่ละงานในแต่ละขั้นตอนการผลิต และสมการข้อจำกัด (8) – (9) จะให้ค่าเท่ากับเวลาสิ้นสุดการผลิตในแม่แบบที่งานนั้นเลือกใช้ในการผลิตและให้ค่าเท่ากับ 0 กับแม่อื่นๆที่งานนั้นไม่ได้เลือก ส่วนสมการข้อจำกัด (10) เมื่อมีหลายงานใช้แม่แบบเดียวกันในการผลิต งานถัดไปจะสามารถเริ่ม ต้นการผลิตได้ ก็ต่อเมื่อแม่แบบนั้นว่างหรืองานก่อนหน้าผลิตเสร็จแล้วเท่านั้น นอกจากนี้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่ต้องการทรัพยากรเฉพาะซึ่งมีอยู่เพียง 1 หน่วย ที่ต้องใช้ร่วมกันในทุกแม่แบบโดยไม่ให้การใช้ทรัพยากรนั้นเกิดการซ้อนทับกัน ดังนั้น สมการข้อจำกัด (11) – (14) จึงยืนยันว่า จะไม่ มีขั้นตอนการผลิตใดที่ใช้ทรัพยากรซ้อนทับกัน โดยสมการข้อจำกัด (11) – (12) นั้นสำหรับขั้นตอนการผลิตที่ 1 ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และขั้นตอนการผลิตที่ 5 ในขณะที่ สมการข้อจำกัด (13) – (14) นั้นสำหรับขั้นตอนการผลิตที่ 2 ที่เครื่องผสมคอนกรีตต้องล้างทำความสะอาดก่อนเป็นเวลา 1 หน่วย (Slot) จึงจะสามารถใช้ผลิตงานถัดไปได้ และใน สมการข้อจำกัด (15) ที่ให้งานทุกงานต้องผลิตเสร็จสิ้นก่อนกำหนดเวลาส่งงาน สมการข้อจำกัด (16) – (18) ระบุให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่า 2 ค่า คือ 0 กับ 1 (Binary) และสมการข้อจำกัด (19) – (20) ที่ตัวแปรตัดสินใจต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 (Non-Negative)

3.3 วิธีการทางฮิวริสติก

ฮิวริสติกที่นำเสนอนี้เริ่มต้นด้วยการให้งานทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นที่สุดเพื่อยืนยันว่า จำนวนงานที่ต้องผลิตนั้นไม่เกินกำลังการผลิตสามารถผลิตให้งานทุกงานเสร็จสิ้นก่อนกำหนดเวลาส่งงานได้ จากนั้นให้เริ่มต้นพัฒนาคำตอบด้วยการให้งานเลือกสูตรการผลิต (Formula Selection) ที่ทำให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าต่ำลง โดยสูตรการผลิตที่เลือกนั้น

ต้องตรวจสอบความเป็นไปได้ของคำตอบด้วยการจัดตารางการผลิต (Job Scheduling) ที่พิจารณาถึงลำดับขั้นตอนการผลิต การใช้ทรัพยากรร่วมกันนั้น และไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จสิ้นเกินกำหนดเวลาส่งงาน ซึ่งถ้าเกินกำหนดเวลาส่งงานก็ต้องทำการเลือกสูตรการผลิตใหม่ โดยพิจารณาที่แม่แบบที่มีงานผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงาน จากนั้นจะทำการค้นหาคำตอบท้องถิ่น (Local Search) ด้วยการเปลี่ยนสูตรการผลิตโดยพิจารณางานเป็นคู่ๆที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่อยู่ในแม่แบบเดียวกัน และทุกครั้งที่งานคู่นั้นเปลี่ยนสูตรการผลิตก็จะต้องตรวจสอบความเป็นไปได้ของคำตอบด้วยการจัดตารางการผลิต โดยสูตรการผลิตใหม่ที่ได้ถ้ามีต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลงก็จะให้แทนที่สูตรการผลิตเดิม ซึ่งจะทำวิธีการนี้ในทุกๆแม่แบบเพื่อให้คำตอบที่ได้นั้นมีต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลงมากที่สุด นอกจากนี้จะพบว่า การจัดลำดับของแม่แบบในการผลิต (Mold Sequencing) ก่อนที่จะค้นหาคำตอบท้องถิ่นก็มีผลที่ทำให้คำตอบสามารถพัฒนาไปสู่ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลงได้ และท้ายที่สุดนั้นจะพยายามเพิ่มพื้นที่ในการค้นหา (Search Space) ด้วยเทคนิคกลไลการแปรเปลี่ยน (Diversification) โดยการเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานเป็นคู่ที่ไม่ได้ใช้แม่แบบเดียวกันในการผลิตและจะต้องพัฒนาคำตอบต่อด้วยการค้นหาคำตอบท้องถิ่น ซึ่งการค้นหาคำตอบจะหยุดก็ต่อเมื่อคำตอบที่ได้นั้นไม่ถูกพัฒนา คือ ไม่ได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลง

Algorithm 1 Heuristics

1: **Notations**
2: s_b: Current best feasible solution
3: S: A set of feasible solutions
4:
5: Generate an initial feasible solution s_0
6: $s_b \longleftarrow$ **FormulaSelection** (s_0)
7: $S \longleftarrow$ **MoldSequencing** (s_b) U $\{s_b\}$
8: **for** each $s \epsilon S$ **do**
9: $s' \longleftarrow$ **LocalIntensification** (s)
10: **if** s' is better than s_b **then**
11: $s_b \longleftarrow s'$
12: $S \longleftarrow$ **Diversification** (s_b)
13: **for** each $s \epsilon S$ **do**

14: $s' \longleftarrow$ LocalIntensification (s)

15: **if** s' is better than s_b **then**

16: $s_b \longleftarrow s'$

เพื่ออธิบายกระบวนการฮิวริสติกต่อจากนี้จะขอยกตัวอย่างการผลิตที่ประกอบด้วยจำนวนงาน 10 งาน และใช้ 4 แม่แบบในการผลิต โดยที่แต่ละงานต้องผ่านขั้นตอนการผลิตทั้งหมด 5 ขั้นตอนและมีสูตรการผลิตให้เลือก 5 สูตร ซึ่งมีระยะเวลาในการผลิตและต้นทุนวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาในการผลิตและต้นทุนวัตถุดิบ

Formula	Processing time (Slots)						Cost
	Preparation	Mixing	Curing	Stripping	Storing	Total	
1	3	4	24	1	3	35	20
2	3	4	36	1	3	47	15
3	3	4	48	1	3	59	13
4	3	4	72	1	3	83	8
5	3	4	96	1	3	107	5

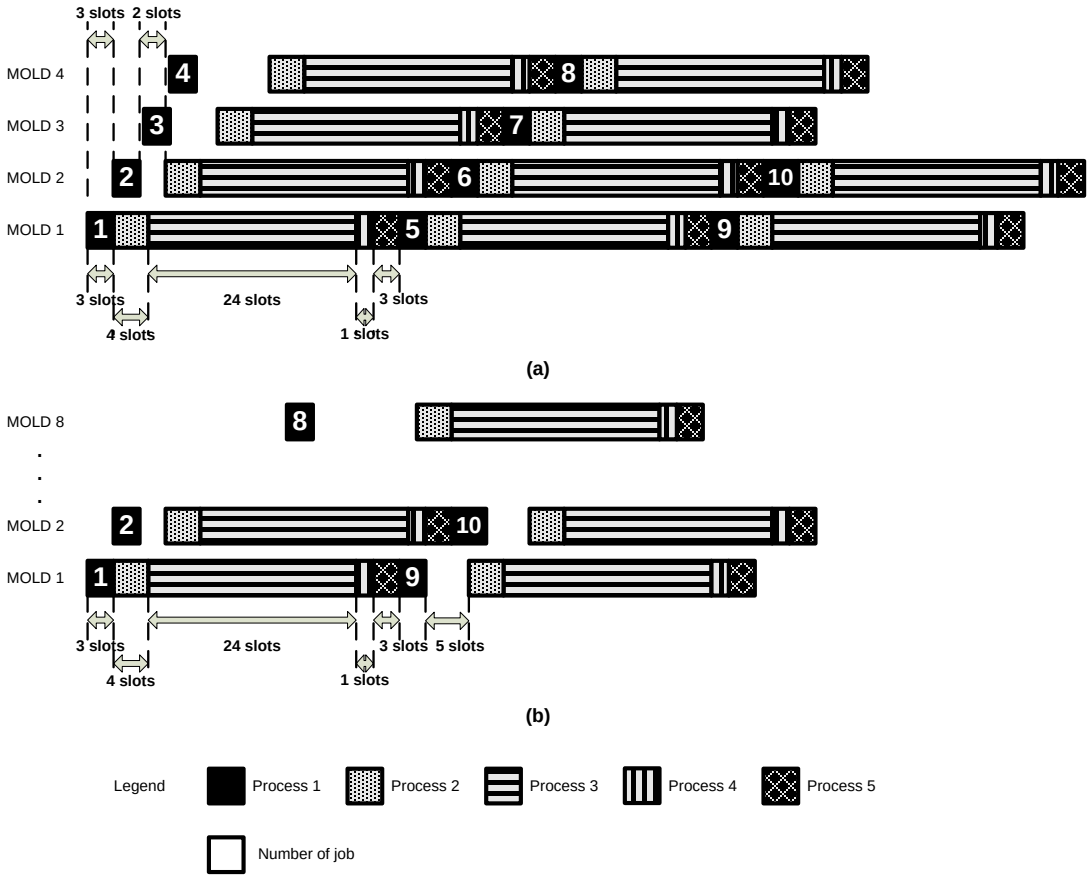
3.3.1 **การตรวจสอบความเป็นไปได้** (Feasibility Verification), **คำตอบเริ่มต้น** (Initial Solution) **และลำดับแม่แบบเริ่มต้น** (Initial Mold Sequencing)

ก่อนที่คำตอบจะถูกพัฒนาด้วยฮิวริสติกนั้นจะต้องแน่ใจก่อนว่า จำนวนงานทั้งหมดที่เมื่อใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาการผลิตสั้นที่สุดแล้วสามารถที่จะผลิตได้ครบทุกงานโดยที่ไม่มีงานใดผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงาน ดังนั้นคำตอบตั้งต้นของฮิวริสติก (Initial Solution) จึงถูกกำหนดให้ทุกงานใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาการผลิตที่สั้นที่สุดคือ สูตรการผลิตที่ 1 โดยจัดสรรงานให้แม่แบบโดยเรียงตามลำดับ ซึ่งแม่แบบมีลำดับการผลิตเป็น 1-2-3-4 ยกตัวอย่างเช่น การผลิตที่ประกอบไปด้วยจำนวน 10 งาน โดยใช้ 4 แม่แบบในการผลิต จะได้ว่าสูตรการผลิตเริ่มต้นของงาน คือ 1-1-1-1-1-1-1-1-1-1 ซึ่งผลิตโดยใช้แม่แบบที่ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2 โดยมีความหมายว่า งานที่ 1 งานที่ 5 และงานที่ 9 ใช้แม่แบบที่ 1 ในการผลิต และงานที่ 2 งานที่ 6 และงานที่ 10 ใช้แม่แบบที่ 2 ในการผลิต และงานที่ 3 และ งานที่ 7 ใช้แม่แบบที่ 3 ในการผลิต และ

งานที่ 4 และงานที่ 8 ใช้แม่แบบที่ 4 ในการผลิต ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้เป็นวิธีการที่จะทำให้จำนวนงานในแต่ละแม่แบบมีจำนวนเท่ากัน (Balanced Initial Solution) โดยวิธีการตรวจสอบความเป็นไปได้ (Feasibility Checking) ทำได้โดยคำนวณหาเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน (Time Remaining Before Due Date) ในแต่ละแม่แบบ ซึ่งถ้าเวลาดังกล่าวในแม่แบบใดไม่มีค่าติดลบก็จะสามารถทำฮิวริสติกขั้นตอนต่อไปได้ แต่ถ้ามีแม่แบบใดที่มีค่าติดลบก็จะทำการหยุดฮิวริสติก โดยปกติแล้วเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน นี้จะคำนวณจากเวลาส่งงาน (Due Date) หักออกด้วยเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานสุดท้ายในแต่ละแม่แบบที่ได้จากตารางการผลิตที่พิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันแล้ว แต่ถ้างานทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ 1 แล้วจะสามารถคำนวณได้จากสมการ (21) ซึ่งกำหนดให้ T_k คือ เวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแม่แบบ k และ D คือ เวลาส่งงาน และ N_k คือ จำนวนงานที่ใช้แม่แบบ k ในการผลิต โดยมีลำดับของแม่แบบเป็น 1-2-…- K ซึ่ง K คือจำนวนแม่แบบและ k = 1, 2, …, K

$$\begin{aligned} T_k &= D - 35N_k - 5(k-1) && K < 8 \\ &= D - 40N_k + 5 - 5(k-1) && K \geq 8 \end{aligned} \qquad (21)$$

จากภาพที่ 3.2 แสดงที่มาของสมการ (21) โดยเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน ในแต่ละแม่แบบมีค่าเท่ากับเวลาส่งงานหักออกด้วยผลรวมระยะเวลาในการผลิตของงานทุกงานที่ผลิตในแม่แบบนั้น แต่เนื่องจากการใช้ทรัพยากรร่วมกันของแม่แบบ ทำให้ขั้นตอนการผลิตที่ 1 เกิดเวลารอคอย 3 หน่วยและขั้นตอนการผลิตที่ 2 ที่เกิดเวลารอคอย 2 หน่วย เนื่องจากการใช้ทรัพยากรร่วมกันและเวลาในการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร ดังนั้นในแม่แบบลำดับถัดไปจึงเกิดเวลาการรอคอยทั้งหมด 5 หน่วย ดังภาพที่ 3.2(a) นอกจากนี้ในกรณีที่การผลิตมีมากกว่าหรือเท่ากับ 8 แม่แบบ จะเกิดเวลารอคอยเพิ่มขึ้นอีก 5 หน่วย ในการผลิตงานถัดไปในแม่แบบเดียวกัน ดังนั้นระยะเวลาในการผลิตจึงเป็น 40 หน่วย ยกเว้นงานแรกที่ผลิตในแม่แบบนั้น ดังภาพที่ 3.2(b) ซึ่งจากตัวอย่างข้างต้นที่งานทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ 1 จะมีเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานของแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 63 เท่ากับ 58 เท่ากับ 88 และเท่ากับ 83 ตามลำดับ โดยมีต้นทุนวัตถุดิบรวมเท่ากับ 200 หน่วย



ภาพที่ 3.2 การคำนวณระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบการผลิต

3.3.2 **การพัฒนาเลือกสูตรการผลิต** (Formula Selection Improvement)

ฮิวริสติกขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ การเลือกสูตรการผลิต (Formula Selection) ที่พยายามให้งานทุกงานเปลี่ยนสูตรการผลิตจากสูตรการผลิตเริ่มต้นให้เป็นสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำลง และ การจัดตารางการผลิต (Job Scheduling) เพื่อยืนยันความเป็นไปได้ของสูตรการผลิตที่ถูกเลือก

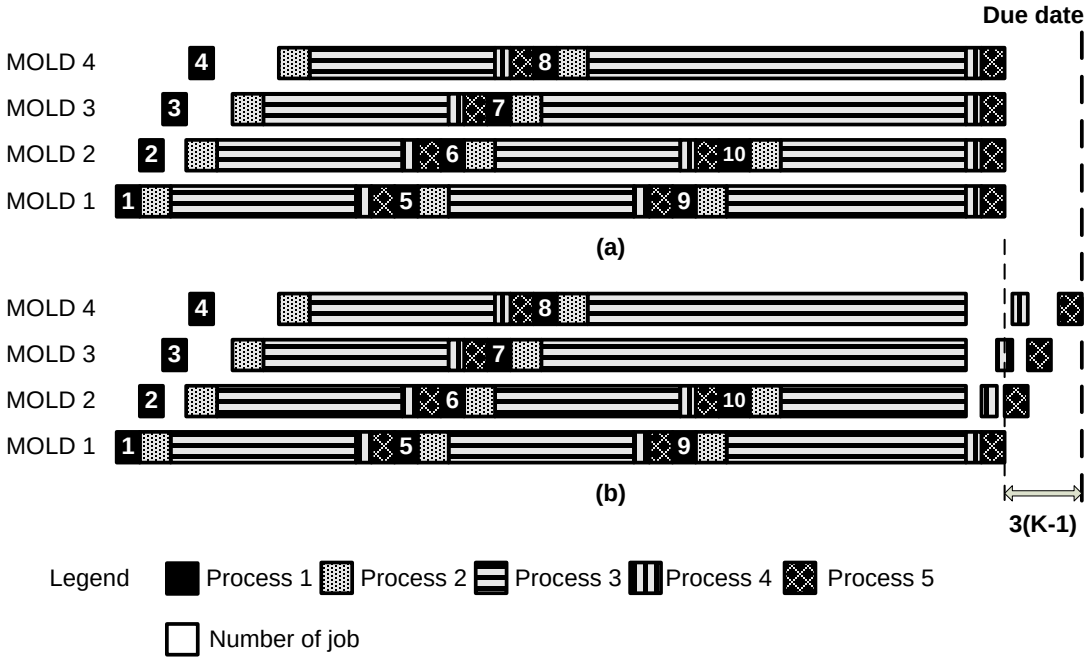
3.3.2.1 การเลือกสูตรการผลิต

จากคำตอบเริ่มต้นที่ให้งานทุกงานนั้นใช้สูตรการผลิตที่สั้นที่สุด คือ สูตรการผลิตที่ 1 นั้นจะมีต้นทุนวัตถุดิบรวมที่สูงมาก ซึ่งวิธีการต่อจากนี้จะเป็นการทำให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมมีค่าลดลงด้วยการเลือกสูตรการผลิตที่มีต้นทุนต่ำให้กับงานแต่ต้องใช้ระยะเวลาการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งในขั้นตอนฮิวริสติกนี้จะยังไม่มีการจัดตารางการผลิตเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการผลิต คือ

ผลิตไปตามลำดับขั้นตอนการผลิต ไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกัน และไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จสิ้นเกินกำหนดเวลาส่งงาน แต่จะกำหนดค่าเวลาหย่อน (Slack Time) ที่นำ 3(K-1) มาหักออกจากระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบแทน ดังสมการ (22) เพื่อให้การเปลี่ยนสูตรการผลิตได้คำตอบที่เป็นไปได้ โดยระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนสูตรการผลิตจะต้องมีค่าน้อยกว่าเวลาหย่อนที่มี

$$S_k = T_k - 3(K-1) \qquad (22)$$

$3(K-1)$ คือเวลาเผื่อที่ถูกกำหนดขึ้น โดยมีแนวคิดมาจากกรณีเมื่อแต่ละงานเปลี่ยนสูตรการผลิตแล้วมีโอกาสให้งานสุดท้ายในแต่ละแม่แบบสิ้นสุดการผลิตพร้อมกัน ดังภาพที่ 3.3(a) ซึ่งในการผลิตต้องพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกัน จะทำให้ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานสุดท้ายเหล่านั้นต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตออกไป โดยการเลื่อนดังกล่าวต้องใช้ระยะเวลาเท่ากับ $3(K-1)$ ดังภาพที่ 3.3(b)



ภาพที่ 3.3 การคำนวณเวลาหย่อน

เนื่องด้วยในการเปลี่ยนสูตรการผลิต ระยะเวลาการผลิตที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 12 หน่วย ดังนั้นในการเปลี่ยนสูตรการผลิตจึงพิจารณาเฉพาะแม่แบบที่มีเวลาหย่อนไม่น้อยกว่า 12 หน่วยเท่านั้น โดยสูตรการผลิตจะถูกเปลี่ยนตามค่าความถ่วงที่จะเปลี่ยนจากสูตรการผลิตหนึ่งไปเป็นสูตรการผลิตอื่น (Transferring Weight) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงกับระยะเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ค่าความถ่วงของการเปลี่ยนสูตรการผลิตที่ 1 ไปเป็นสูตรการผลิตที่ 2 คือ (20-15) / (47-35) = 0.417 เป็นต้น ซึ่งค่าความถ่วงทั้งหมดนั้นจะแสดงในตารางที่ 3.2 โดยงานที่จะเปลี่ยนสูตรการผลิตจะเลือกสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากที่สุดก่อน จากนั้นจะตรวจสอบว่า ระยะเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นนั้นมากกว่าเวลาหย่อนที่มีอยู่หรือไม่ ซึ่งถ้ามากกว่าก็ไม่สามารถเลือกสูตรการผลิตนั้นได้ให้พิจารณาสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากรองลงมา แต่ถ้าไม่มากกว่าเวลาหย่อนก็จะทำการเปลี่ยนสูตรการผลิตแล้วคำนวณเวลาหย่อนที่เหลือใหม่ด้วยการหักออกจากระยะเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้จะหยุดก็ต่อเมื่อค่าเวลาหย่อนมีค่าน้อยกว่า 12 หน่วย โดยขั้นตอนทั้งหมดของวิธีการเลือกสูตรการผลิตแสดงได้ดังนี้

1: **procedure** FormulationSelection (s) ► s: current formula assignment
2: **Notations**
3: K: Number of molds
4: P_i: Processing time of formula i
5: S_k: Slack time of mold k
6: W_{ij}: Transferring weights for moving formula i to formula j
7:
8: Computation slack time S_k of each mold by using (17)
9: **for** each mold k **do**
10: **repeat**
11: **for** each job in the mold **do**
12: **if** $S_k < 12$ slots **then**
13: **break**
14: $i \leftarrow$ current job formula
15: Find formula $j > i$ with largest W_{ij} that keep $S_k > 0$

16: **if** no such formula j exists **then**

17: **break**

18: **else**

19: $i \leftarrow j$

21: $S_k \leftarrow S_k - (P_j - P_i)$

22: **until** $S_k \leq$ 12 slots

23: **Return** new formula assignment s'

ตารางที่ 3.2 ค่าความถ่วง

Formula	1	2	3	4	5
1	-	0.417	0.292	0.250	0.208
2	-	-	0.167	0.194	0.167
3	-	-	-	0.208	0.167
4	-	-	-	-	0.125
5	-	-	-	-	-

จากตัวอย่างข้างต้นสามารถคำนวณเวลาหย่อนของแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 54 เท่ากับ 49 เท่ากับ 79 และเท่ากับ 74 หน่วยตามลำดับ จากนั้นจะให้งานในแต่ละแม่แบบที่เรียงตามลำดับแม่แบบ 1-2-3-4 เลือกสูตรการผลิต โดยเริ่มจากแม่แบบที่ 1 มีงานที่ 1 งานที่ 5 และงานที่ 9 ที่ทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ 1 และเมื่อพิจารณางานที่ 1 ซึ่งจากตารางที่ 2 จะเห็นว่าจากสูตรการผลิตที่ 1 ไปสูตรการผลิตที่ 2 จะมีค่าความถ่วงมากที่สุดและต้องการระยะเวลาในการผลิตเพิ่มอีก 12 หน่วย ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเวลาหย่อน ดังนั้นงานที่ 1 จึงเปลี่ยนสูตรการผลิตเป็นสูตรการผลิตที่ 2 และเวลาหย่อนจะเหลือ 42 หน่วย จากนั้นจะพิจารณางานถัดไปคืองานที่ 5 และงานที่ 9 ซึ่งก็จะเปลี่ยนไปใช้สูตรการผลิตที่ 2 เช่นกันโดยมีเวลาหย่อนเหลือเท่ากับ 18 หน่วย ซึ่งจะพบว่า มีค่ามากกว่า 12 ดังนั้นจึงย้อนกลับมาพิจารณางานที่ 1 อีกครั้ง โดยค่าความถ่วงมากที่สุดเมื่อเปลี่ยนสูตรการผลิตจากสูตรการผลิตที่ 2 เป็นสูตรการผลิตที่ 4 แต่จะพบว่า ระยะเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นนั้นคือ 36 หน่วย ซึ่งมีค่ามากกว่าเวลาหย่อนที่เหลืออยู่ ดังนั้นจึงไม่สามารถเปลี่ยนเป็นสูตรการผลิตที่ 4 ได้ ให้พิจารณาสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากรองลงมา คือ สูตรการผลิตที่ 3 โดยจะใช้ระยะเวลาการผลิตเพิ่มขึ้น 12 หน่วย ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเวลาหย่อนที่

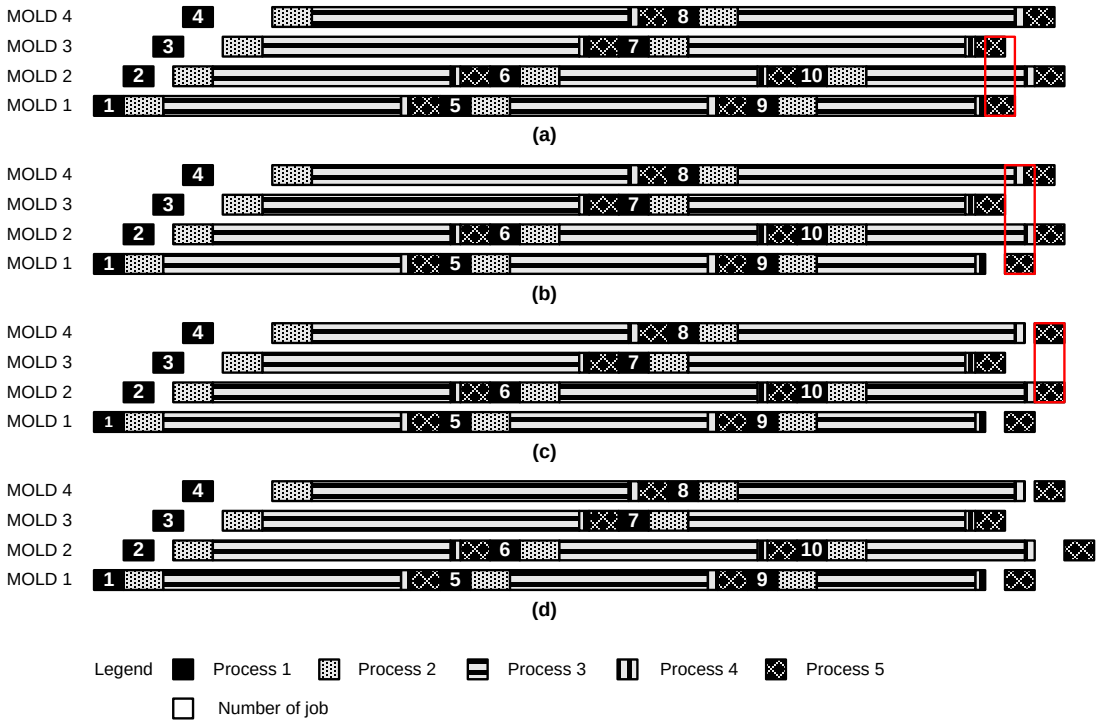
เหลืออยู่ ดังนั้นงานที่ 1 จึงเปลี่ยนเป็นสูตรการผลิตที่ 3 และมีเวลาหย่อนเหลือ 6 หน่วย ซึ่งน้อยกว่า 12 ดังนั้นจึงหยุดพิจารณางานในแม่แบบที่ 1 ให้พิจารณาในแม่แบบถัดไป ซึ่งจะพิจารณาในลักษณะเช่นเดียวกันนี้และได้ผลดังในตารางที่ 3.3 ที่มีต้นทุนวัตถุดิบรวมลดลงเหลือ 128 หน่วย โดยจะต้องนำไปจัดตารางการผลิตเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์ของตัวอย่างในการเลือกสูตรการผลิต

Mold	1				2				3			4			
job	1	5	9	ST	2	6	10	ST	3	7	ST	4	8	ST	
Formula	1	1	1	54	1	1	1	49	1	1	79	1	1	74	
	2			42	2			37	2		67	2		62	
		2		30		2		25		2	55		2	50	
			2	18			2	13	4		19	4		14	
	3			6	3			1		3	7		3	2	
				STOP				STOP			STOP			STOP	
Update formula	3	2	2		3	2	2		4	3		4	3		Cost 128

3.3.2.2 การจัดตารางการผลิต

การจัดตารางการผลิตจะพิจารณาถึงลำดับขั้นตอนการผลิตและการใช้ทรัพยากรร่วมกันในแต่ละขั้นตอนการผลิต โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาเฉพาะลำดับขั้นตอนการผลิตและลำดับของแม่แบบที่แม่แบบถัดไปจะต้องเกิดเวลารอคอย 5 หน่วยก่อน ดังภาพที่ 3.4(a) จากนั้นจะพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันระหว่างแม่แบบในแต่ละขั้นตอนการผลิตโดยยกเว้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 ซึ่งไม่มีการใช้ทรัพยากรร่วมกัน โดยการเปรียบเทียบงานเป็นคู่ๆในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่เมื่อมีงานใช้ทรัพยากรซ้อนทับกันแล้ว จะให้งานที่เริ่มต้นการผลิตช้ากว่าเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตออกไป ดังในภาพที่ 3.4(a) ซึ่งขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานที่ 7 และงานที่ 9 ที่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกัน โดยงานที่ 9 เริ่มต้นการผลิตช้ากว่า ดังนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานที่ 9 จึงถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตออกไปให้เริ่มต้นการผลิตหลังจากที่งานที่ 5 ผลิตเสร็จ ดังภาพที่ 3.4(b) และจะพิจารณาเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งในแต่ละขั้นตอนไม่มีงานใดที่ใช้ทรัพยากรซ้อนทับกันดังภาพที่ 3.4(d)



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างการจัดตารางการผลิต

การจัดตารางการผลิตจะเป็นวิธีการที่ใช้ยืนยันคำตอบจากการเลือกสูตรการผลิตว่า เป็นคำตอบที่เป็นไปได้หรือไม่ ซึ่งถ้าพบว่ามีงานใดที่ผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานก็จะทำการเปลี่ยนสูตรการผลิตให้ใช้ระยะเวลาการผลิตลดลงแล้วจัดตารางการผลิต และจะทำเช่นนี้จนกระทั่งไม่มีงานที่ผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงาน แต่ถึงอย่างไรก็ตามในปัญหาที่งานวิจัยนี้ศึกษานั้น การหาเวลาหย่อนที่เกิดจากการนำเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบมาหักออกด้วย $3(K-1)$ มาพิจารณาในการเลือกสูตรการผลิตจะช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นที่ทำให้คำตอบที่ทุกงานถูกเปลี่ยนสูตรการผลิตนั้นสามารถจัดตารางการผลิตแล้วเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ทุกปัญหา โดยคำตอบที่ถูกเปลี่ยนสูตรการผลิตและผ่านการตรวจสอบความเป็นไปได้ก็จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบปัจจุบันที่จะนำไปพัฒนาด้วยวิธีการอื่นๆต่อไป

3.3.3 **การค้นหาคำตอบท้องถิ่น** (Local Intensification)

จากขั้นตอนการพัฒนาเลือกสูตรการผลิตที่พยายามนำสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำแต่ใช้ระยะเวลาการผลิตนานแทนที่สูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบสูงที่มีระยะเวลาการผลิตสั้นและจะพิจารณาเปลี่ยนสูตรการผลิตทีละงานจนกระทั่งเวลาหย่อนมีค่าน้อยกว่า 12 หน่วย โดย

หลังจากที่ผ่านการจัดตารางการผลิตจะสามารถคำนวณหาเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบได้ด้วยการนำเวลาส่งงานหักออกด้วยเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานสุดท้ายในแม่แบบนั้น ซึ่งจากตัวอย่างเมื่อพัฒนาเลือกสูตรการผลิตแล้วจะได้สูตรการผลิตเป็น 3-3-4-4-2-2-3-3-2-2 โดยมีเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานของแม่แบบที่ 1 ถึงแม่แบบที่ 4 เท่ากับ 4 เท่ากับ 13 เท่ากับ 7 และเท่ากับ 16 หน่วยตามลำดับ ที่มีแนวโน้มไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตด้วยวิธีการเลือกสูตรการผลิตได้ ซึ่งวิธีการค้นหาแบบท้องถิ่นนี้จะช่วยให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นได้ด้วยการพิจารณาการเปลี่ยนสูตรที่มากกว่า 1 งานที่ใช้แม่แบบเดียวในแต่ละแม่แบบตามสมมติฐานที่ว่า ถ้าเพิ่มสูตรการผลิตให้กับงานงานหนึ่งและลดสูตรการผลิตของงานอื่นลงอาจจะทำให้ได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลงได้ โดยตารางที่ 3.4 แสดงต้นทุนวัตถุดิบและระยะเวลาการผลิตในขั้นตอนการบ่มของงานที่เป็นคู่ ยกตัวอย่างเช่น สมมติให้คู่งานคู่หนึ่งที่ผลิตในแม่แบบเดียวกันใช้สูตรการผลิตที่ 3 และ 3 ตามลำดับโดยมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานเท่ากับ 12 หน่วยและต้นทุนวัตถุดิบรวมเท่ากับ 26 (13+13) หน่วย ซึ่งจากวิธีการเลือกสูตรการผลิตพบว่า งานคู่นี้ไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตได้อีก แต่จากตารางที่ 3.4 พบว่างานคู่นี้สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตเป็นสูตรการผลิตที่ 2 กับสูตรการผลิตที่ 4 โดยที่ระยะเวลาการบ่มของคู่สูตรการผลิตที่จะเปลี่ยนแปลงต้องไม่มากไปกว่าผลรวมของระยะเวลาการบ่มของคู่สูตรการผลิตเดิมกับระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงาน (108 ≤ 96+12) ที่ทำให้มีต้นทุนวัตถุดิบรวมลดลงเหลือ 23 (15+8) หน่วยได้ เป็นต้น

ขั้นตอนการค้นหาคำตอบท้องถิ่นจะพิจารณาทุกคู่งานที่เป็นไปได้ทั้งหมดในแต่ละแม่แบบ โดยต้นทุนวัตถุดิบของสูตรการผลิตในคู่งานที่จะนำมาแทนที่นั้นต้องมีค่าน้อยกว่าและมีระยะเวลาการผลิตไม่มากไปกว่าผลรวมของระยะเวลาการผลิตเดิมกับระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงาน ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดของวิธีการค้นหาคำตอบท้องถิ่นแสดงได้ดังนี้

1: **procedure** LocalIntensification (s) ► s: current solution
2: **Notations**
3: f_i: Formula of job i
4: $C(f)$: The production cost of formula f
5: $T(f)$: The curing time of formula f
6:
7: **for** each mold **do**
8: **for** each job pair (i, j) in the mold **do**

9: $C \leftarrow C(f_i) + C(f_i)$

10: $T \leftarrow T(f_i) + T(f_i)$

11: Find best job formula pair (f_1, f_2) with $C(f_1) + C(f_2) < C$

12: and $T(f_1) + T(f_2) < T$

13: Assign (f_1, f_2) or (f_2, f_1) to job pair (i, j) depending on which

14: replacement yields a feasible solution

15: **Return** new formula assignment s'

ตารางที่ 3.4 ต้นทุนวัตถุดิบและระยะเวลาการผลิตในขั้นตอนการบ่มของงานที่เป็นคู่

No.	Formula				Cost	Slots
1	5	5	-	-	10	192
2	4	5	5	4	13	168
3	4	4	-	-	16	144
4	3	5	5	3	18	144
5	2	5	5	2	20	132
6	3	4	4	3	21	120
7	2	4	4	2	23	108
8	1	5	5	1	25	120
9	3	3	-	-	26	96
10	3	2	2	3	28	84
11	1	4	4	1	28	96
12	2	2	-	-	30	72
13	1	3	3	1	33	72
14	1	2	2	1	35	60
15	1	1	-	-	40	48

จากตัวอย่างข้างต้นที่แม่แบบที่ 1 มีคู่งานที่เป็นไปได้ 3 คู่ คือ งานที่ 1 กับ 5 และ งานที่ 1 กับ 9 และ งานที่ 5 กับ 9 โดยมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานเท่ากับ 13 หน่วย ในการพิจารณาคู่งานที่ 1 กับ 5 ซึ่งมีสูตรการผลิตเดิมคือ สูตรการผลิตที่ 3 และสูตรการผลิตที่ 2

ตามลำดับ โดยงานทั้ง 2 มีต้นทุนรวมกันเท่ากับ 28 หน่วย และระยะเวลาในการบ่มรวมเท่ากับ 84 หน่วย จากตารางที่ 3.4 สูตรการผลิตที่ดีที่สุดที่มีต้นทุนวัตถุดิบน้อยกว่า 28 หน่วยและมีระยะเวลาในการบ่มน้อยกว่า 97 (84+13) หน่วยคือ สูตรการผลิตที่ 3 กับ 3 และเมื่อนำมาจัดตารางการผลิตตามหัวข้อ 3.3.2.2 ก็พบว่า เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ ดังนั้นคู่งานที่ 1 กับงานที่ 5 จะถูกแทนด้วยสูตรการผลิตที่ 3 กับ 3 และมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 3 เท่ากับ 8 เท่ากับ 16 และ เท่ากับ 11 หน่วยตามลำดับ โดยจะทำด้วยวิธีดังกล่าวนี้ในทุกคู่งานที่เป็นไปได้และในทุกๆแม่แบบด้วย ซึ่งสุดท้ายแล้วจะได้สูตรการผลิตคือ 3-3-2-4-3-2-5-3-2-2 ที่มีต้นทุนวัตถุดิบรวมเท่ากับ 125 ซึ่งน้อยกว่าต้นทุนวัตถุดิบรวมเดิมที่ได้จากการเลือกสูตรการผลิต ดังนั้นสูตรการผลิตปัจจุบันจึงถูกเปลี่ยนเป็นสูตรการผลิตนี้

3.3.4 การเรียงลำดับแม่แบบ (Mold Sequencing)

ลำดับแม่แบบมีผลต่อคำตอบที่ดีของปัญหา ลำดับแม่แบบที่ดีจะมีผลให้งานสามารถเลือกใช้สูตรการผลิตที่ต่ำลงได้ ยกตัวอย่างเช่น ในการผลิตที่มีจำนวน 6 งาน และ 4 แม่แบบโดยมีลำดับแม่แบบคือ 1-2-3-4 ซึ่งงานแต่ละใช้สูตรการผลิต 3-3-5-4-2-2 ดังภาพที่ 3.5(a) ซึ่งพบว่างานที่ 4 ในแม่แบบที่ 4 ที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนเวลาส่งงานเท่ากับ 23 หน่วย ไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตจากสูตรการผลิตที่ 4 เป็นสูตรการผลิตที่ 5 ได้ เนื่องจากมีระยะเวลาที่เหลือก่อนเวลาส่งงานไม่เพียงพอสำหรับระยะเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้น คือ 24 หน่วย ซึ่งถ้าสลับลำดับแม่แบบที่ 3 กับแม่แบบที่ 4 ได้ลำดับการผลิตคือ 1-2-4-3 จะพบว่า งานที่ 4 สามารถเปลี่ยนเป็นสูตรการผลิตที่ 5 ได้ ดังภาพที่ 3.5(b) เป็นต้น ดังนั้นวิธีการนี้จึงพยายามหาลำดับแม่แบบหลายๆลำดับ ซึ่งพิจารณาต่อจากขั้นตอนการพัฒนาเลือกสูตรการผลิต โดยมีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1: **procedure** MoldSequencing (s) ► s: current solution
2: **Notations**
3: S: A set of feasible solutions
4: K: Number of molds
5: T_k: Time remaining of mold k before due date
6:
7: $S \leftarrow \{\}$
8: Compute all time remaining T_k' s before due date of mold k for solution s

9: for each mold $k \epsilon \{1,2,3,\dots,K\}$ do

10: $s' \leftarrow s$

11: $M_k \leftarrow \{1,2,3,\dots,K\}$

12: Modify s' by assigning a formula with one step shorter curing time to the last job

13: in mold k

14: for each mold m in $1,2,3,\dots,K$ do

15: Compute T_m

16: $M' \leftarrow$ Sort (M_k) in an ascending order of T_m's

17: for each mold m in M' do

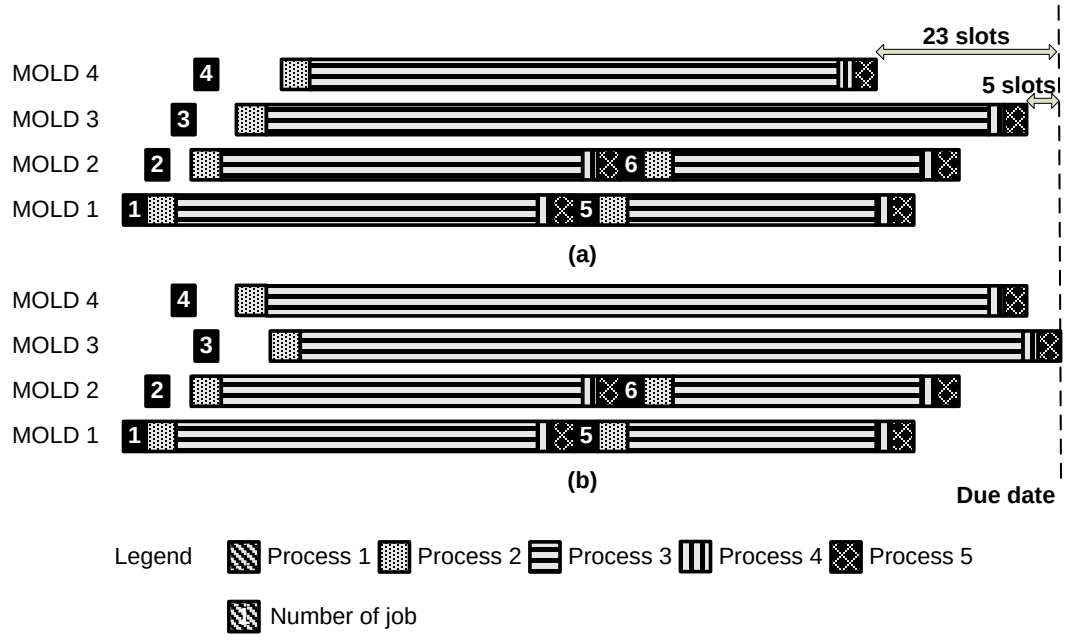
18: if $T_m > 5$ and $m < K$ then

19: Swap m^{th} mold with $(m+1)^{th}$ mold in M_k for s'

20: if s' is feasible then

21: $S \leftarrow S\ U\ \{s'\}$

22: Return S



ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างประโยชน์ที่ได้จากการเรียงลำดับแม่แบบ

ลำดับขั้นตอนของวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการลดสูตรการผลิตของงานสุดท้ายในแม่แบบที่ 1 ลง 1 สูตร และคำนวณหาระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบนั้นด้วยการนำค่าที่มีอยู่เดิมบวกเพิ่มกับระยะเวลาการบ่มที่ได้จากการลดสูตรการผลิต จากตัวอย่างหลังจากขั้นตอนการพัฒนาเลือกสูตรการผลิตทำให้งานมีสูตรการผลิตเป็น 3-3-4-4-2-2-3-3-2-2 โดยมีการจัดสรรลงแม่แบบที่ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2 และมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบในแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 13 เทากับ 7 เท่ากับ 16 และเท่ากับ 10 หน่วยตามลำดับ และถ้าพิจาณาลดสูตรการผลิตของงานสุดท้ายในแม่แบบที่ 1 คือจากสูตรการผลิตที่ 2 เป็นสูตรการผลิตที่ 1 ที่มีระยะเวลาในการบ่มลดลง 12 หน่วย ดังนั้นจะทำให้ระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบที่ 1 มีค่า 13+12 = 25 หน่วย และแม่แบบอื่นๆก็จะมีค่าเท่าเดิมคือ เท่ากับ 7 เท่ากับ 16 และเท่ากับ 10 หน่วยตามลำดับ

จากนั้นให้พิจารณาการเปลี่ยนลำดับแม่แบบโดยพิจารณาแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานจากน้อยไปมาก ซึ่งการเปลี่ยนลำดับมากขึ้น 1 ลำดับจะต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้น 5 หน่วย ดังนั้นแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานน้อยกว่า 5 จะต้องอยู่ในลำดับเดิม จากตัวอย่างที่แม่แบบที่ 2 มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบน้อยที่สุดคือ 7 หน่วย ซึ่งมีค่ามากกว่า 5 ดังนั้นแม่แบบที่ 2 จึงสามารถเลื่อนลำดับแม่แบบได้ 1 ลำดับ คือ จากลำดับที่ 2 ไปเป็นลำดับที่ 3 จากนั้นให้พิจารณาแม่แบบที่ 4 ที่มีลำดับเดิมอยู่ลำดับสุดท้ายอยู่แล้ว ดังนั้นแม่แบบที่ 4 จึงไม่สามารถเลื่อนลำดับได้อีกให้อยู่ที่ลำดับเดิม คือ ลำดับที่ 4 และพิจารณาแม่แบบที่ 3 ที่สามารถเลื่อนไปสู่ลำดับที่ 4 ได้แต่จะพบว่า ลำดับที่ 4 นั้นมีแม่แบบที่ถูกวางลำดับไปแล้วจึงพิจารณาลำดับที่ 3 ซึ่งก็ถูกแม่แบบที่ 2 วางลำดับไว้แล้วเช่นกัน ดังนั้นแม่แบบที่ 3 จึงถูกวางลำดับในตำแหน่งลำดับที่ 2 และท้ายที่สุดแม่แบบที่ 1 ก็ถูกวางในลำดับเดิมซึ่งเหลืออยู่เพียงลำดับเดียวให้เลือก ดังนั้น ลำดับแม่แบบในการผลิตที่ได้ใหม่คือ 1-3-2-4 โดยมีสูตรการผลิตเป็น 3-3-4-4-2-2-3-3-1-2

ในการพิจารณาที่แม่แบบอื่น คือ แม่แบบที่ 2 แม่แบบที่ 3 และ แม่แบบที่ 4 ก็จะใช้วิธีการเดียวกันนี้ซึ่งจะทำให้ได้ลำดับแม่แบบเพิ่มขึ้นอีก 3 ลำดับ คือ เมื่อพิจารณาแม่แบบที่ 2 สูตรการผลิตที่ได้จะเป็น 3-3-4-4-2-2-3-3-2-1 โดยมีลำดับแม่แบบ 2-3-1-4 และเมื่อพิจารณาแม่แบบที่ 3 ก็จะสูตรการผลิตเป็น 3-3-4-4-2-2-2-3-2-2 โดยมีลำดับแม่แบบ 3-1-2-4 และเมื่อพิจารณาแม่แบบลำดับที่ 4 ก็จะสูตรการผลิตเป็น 3-3-4-4-2-2-3-2-2-2 โดยมีลำดับแม่แบบ 4-1-2-3

ลำดับแม่แบบทั้ง 4 ลำดับนี้จะต้องถูกตรวจสอบความเป็นได้ด้วยการจัดตารางการผลิตโดยจะเลือกเฉพาะลำดับแม่แบบที่มีคำตอบเป็นไปได้เท่านั้นที่จะนำไปพัฒนาด้วยวิธีการค้นหา

คำตอบท้องถิ่น ซึ่งถ้าได้คำตอบที่ดีขึ้น คือ ได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำลง ลำดับแม่แบบก็จะถูกแทนที่ด้วยลำดับแม่แบบนั้น โดยจากตัวอย่างจะพบว่า ลำดับแม่แบบ 3-1-2-4 เมื่อค้นหาคำตอบท้องถิ่นแล้วจะได้สูตรการผลิต 3-3-4-4-2-2-2-4-3-2-2 ที่มีต้นทุนวัตถุดิบรวมเท่ากับ 123 หน่วย

3.3.5 **กลไกการแปรเปลี่ยน** (Diversification)

ในการค้นหาคำตอบท้องถิ่นอาจทำให้คำตอบติดอยู่กับค่าที่ดีที่สุดในท้องถิ่นนั้น (Local Optimum) ไม่สามารถลู่เข้าหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Global Optimum) ซึ่งเทคนิคกลไกการแปรเปลี่ยน จะช่วยให้คำตอบนั้นสามารถหนีออกจากคำตอบท้องถิ่นได้ด้วยการเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานเป็นคู่ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแม่แบบ 2 แม่แบบที่แม่แบบหนึ่งที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนเวลาส่งงานน้อยที่สุด และอีกแม่แบบหนึ่งที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนเวลาส่งงานมากที่สุด โดยจะเลือก 1 งาน จากแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานน้อยที่สุดแล้วลดสูตรการผลิตให้กับงานนั้นลง 1 สูตร และเลือกงานอีกหนึ่งงานจากแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานมากที่สุดและมีค่าไม่ต่ำกว่า 12 และเพิ่มสูตรการผลิตของงานนั้นขึ้น 1 สูตร จากนั้นจะตรวจสอบความเป็นไปได้ของคำตอบด้วยการจัดตารางการผลิต ซึ่งถ้าคำตอบเป็นไปได้ก็จะนำไปค้นหาคำตอบท้องถิ่นต่อไป โดยคำตอบที่ได้จากการค้นหาคำตอบท้องถิ่น ถ้าเป็นคำตอบที่ดีขึ้นก็จะทำการแทนที่คำตอบเดิม โดยลำดับขั้นตอนสามารถแสดงได้ดังนี้

1: **procedure** Diversification (s) ► s: current solution
2: **Notations**
3: S: A set of feasible solutions
4: K: Number of molds
5: T_k: Time remaining of mold k before due date
6:
7: $S \leftarrow \{\}$
8: Compute all time remaining T_k 's before due date of mold k for solution s
9: $m_s \leftarrow \arg min_k \, T_k$
10: $m_l \leftarrow \arg max_k \, \{T_k \mid T_k \geq 12\}$
11: **for** each job j_s in mold m_s **do**
12: **for** each job j_l in mold m_l **do**

13: $s' \leftarrow s$

14: Modify s' by assigning a formula with one step shorter curing time to j_s

15: Modify s' by assigning a formula with one step longer curing time to j_l

16: **if** s' is feasible **then**

17: $S \leftarrow S \; U \; \{s'\}$

18: **Return** S

จากตัวอย่างข้างต้นจะพบว่า สูตรการผลิตที่ดีที่สุดในตอนนี้คือ 3-3-4-4-2-2-2-4-3-2-2 โดยมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 10 เท่ากับ 5 เท่ากับ 2 และเท่ากับ 11 หน่วย ซึ่งจะพบว่า มีค่าน้อยกว่า 12 ดังนั้นกลไกการแปรเปลี่ยนจึงไม่สามารถทำได้ ฉะนั้นขอยกตัวอย่างใหม่ที่มี 15 งาน ใช้สูตรการผลิต 2-2-2-2-2-1-1-2-1-1-1-2-1-1-1 และมี 4 แม่แบบสำหรับการผลิตโดยมีลำดับแม่แบบคือ 1-2-3-4 และมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 1 เท่ากับ 9 เท่ากับ 6 และเท่ากับ 12 หน่วยตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนกลไกการแปรเปลี่ยนจะเลือกงานที่ 5 ในแม่แบบที่ 1 มาลดสูตรการผลิตลง 1 สูตร จากสูตรการผลิตที่ 2 เป็นสูตรการผลิตที่ 1 และเลือกงานที่ 12 ในแม่แบบที่ 4 มาเพิ่มสูตรการผลิตขึ้น 1 สูตรจากสูตรการผลิตที่ 2 เป็นสูตรการผลิตที่ 3 ดังนั้นสูตรการผลิตใหม่ที่ได้คือ 2-2-2-2-1-1-1-2-1-1-1-3-1-1-1 ซึ่งเมื่อตรวจสอบความเป็นได้ด้วยการจัดตารางการผลิตแล้วพบว่าคำตอบนี้เป็นไปได้ ดังนั้นจึงถูกนำไปค้นหาคำตอบท้องถิ่นต่อไป โดยต้นทุนวัตถุดิบรวมจะลดลงจาก 265 หน่วยเหลือ 263 หน่วย

3.3.6 **การจัดสรรงานให้กับแม่แบบมีจำนวนงานไม่เท่ากัน** (Unbalance Solutions)

วิธีการนี้เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการค้นหาคำตอบ (Search Space) ที่จากเดิมจะจัดสรรงานให้กับแต่ละแม่แบบมีจำนวนเท่าๆกัน เปลี่ยนเป็นให้แม่แบบหนึ่งมีจำนวนงานที่มากกว่าแม่แบบอื่นๆ เพื่อให้แม่แบบอื่นๆนั้นมีเวลามากขึ้นที่จะสามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตให้มีต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำลงได้

สำหรับวิธีการนั่นจะเริ่มจากให้งานจัดสรรลงแม่แบบด้วยวิธีการแบบเดิมก่อน คือ วิธีการที่ให้จำนวนงานเท่าๆกันในแต่ละแม่แบบ จากนั้นให้คำนวณหาระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบโดยใช้สมการ (21) ซึ่งถ้าพบว่า ระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานที่มากที่สุดมีค่าไม่น้อยกว่าระยะเวลาในการผลิตของสูตรการผลิตที่สั้นที่สุด คือ 35 หน่วย ก็จะเลือกงาน 1 งาน

จากแม่แบบอื่นมาผลิตในแม่แบบดังกล่าวนี้ โดยจำนวนงานที่เพิ่มให้กับแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานที่มากที่สุดนั้นต้องไม่เท่ากับจำนวนงานในแม่แบบที่กำลังจะย้ายงานมา ยกตัวอย่างเช่น ถ้าในแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานที่มากที่สุดมีจำนวน 4 งาน จะไม่เลือกย้ายงานจากแม่แบบที่มีจำนวน 5 งาน เป็นต้น

ในกรณีที่การผลิตมี 2 แม่แบบและไม่สามารถย้ายงานมาที่แม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานที่มากที่สุดได้ก็จะให้ย้ายงานจากแม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานที่มากที่สุดไปอีกแม่แบบหนึ่งแทนแต่แม่แบบนั้นต้องมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานมากกว่า 35 ด้วย ยกตัวอย่างเช่น การผลิตที่มี 11 งานและ 2 แม่แบบ ที่มีการจัดสรรแม่แบบเป็น 1-2-1-2-1-2-1-2-1-2-1 โดยแม่แบบที่ 1 มีจำนวน 6 งานที่ใช้ผลิต และแม่แบบที่ 2 จะมีจำนวน 5 งานที่ใช้ผลิต เมื่อใช้สมการ (21) ในการคำนวณหาระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงเวลาส่งงานจะได้เท่ากับ 126 และ 156 ซึ่งจะต้องย้ายงานจากแม่แบบที่ 1 ให้กับแม่แบบที่ 2 แต่จะพบว่าจำนวนงานในแม่แบบที่ 2 ที่จำนวนงานจะเพิ่มนั่นมีค่าเท่ากับจำนวนงานในแม่แบบที่ 1 ที่มีอยู่เดิม จึงไม่สามารถย้ายงานได้ ดังนั้นจะให้งานจำนวน 1 งานในแม่แบบที่ 2 ย้ายไปแม่แบบที่ 1 แทน ได้การจัดสรรแม่แบบ คือ 1-2-1-2-1-2-1-2-1-1-1 เป็นต้น ซึ่งหลังจากผ่านขั้นตอนนี้แล้วก็จะเป็นคำตอบเริ่มต้นที่จะนำไปพัฒนาคำตอบด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นทั้งหมด

3.4 ผลการวิจัย

จากรูปแบบปัญหาที่ศึกษาพบว่า ความซับซ้อนของปัญหาขึ้นอยู่กับจำนวนแม่แบบ , จำนวนงาน และจำนวนสูตรการผลิตที่ให้เลือก โดยจำนวนแม่แบบและจำนวนสูตรการผลิตที่ให้เลือกนั่นเมื่อมีมากขึ้นก็จะทำให้ปัญหามีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งแตกต่างกับจำนวนงานที่ถ้าเพิ่มขึ้นมากจนถึงระดับหนึ่งจะทำให้ปัญหานั่นไม่มีความซับซ้อนเนื่องจากงานทุกงานมีโอกาสเลือกสูตรการผลิตได้เพียงสูตรการผลิตเดียว นั่นก็คือ สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการผลิตสั้นที่สุด และในทางเดียวกันการลดจำนวนงานจนกระทั่งงานสามารถเลือกสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาการผลิตนานที่สุดได้เพียงงานเดียวก็ทำให้ปัญหานั่นไม่มีความซับซ้อนเช่นเดียวกัน ปัญหาได้แบ่งออกเป็น 3 ขนาดตามจำนวนแม่แบบที่ใช้ในการผลิต คือ 2 แม่แบบ และ 4 แม่แบบ และ 8 แม่แบบ ซึ่งมีจำนวนปัญหารวมทั้งหมด 50 ปัญหาและมีสูตรการผลิตให้เลือก 5 สูตร ส่วนจำนวนงานนั้นจะอยู่ในช่วงที่ทำให้งานในปัญหานั่นมีการเลือกสูตรการผลิตที่หลากหลาย โดยเริ่มต้นด้วยการหาจำนวนงานที่น้อยและมากที่สุดในแต่ละแม่แบบด้วยสมการ

(23) และ (24) ของปัญหา หลังจากนั้นจึงคำนวณจำนวนงานที่น้อยที่สุดและมากที่สุดของปัญหานั้นจากสมการ (25) และ (26)

$$N_{k;min} = \frac{D-5(k-1)}{107} \quad (23)$$

$$N_{k;max} = \frac{D-5(k-1)}{35} \quad ,K < 8$$

$$= \frac{D-5(k-1)}{40} \quad ,K \geq 8 \quad (24)$$

$$L_{min} = \sum_k N_{k;\min} \quad (25)$$

$$L_{max} = \sum_k N_{k;\max} \quad (26)$$

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกจะเปรียบเทียบค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตามในบางปัญหาที่มีความซับซ้อนมากแบบจำลองทางคณิตศาตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือแม้กระทั่งคำตอบที่เป็นไปได้พบ โดยในกรณีที่ปัญหาสามารถหาคำตอบที่เป็นไปได้แต่ไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดนั้นจะกำหนดให้เป็นค่าที่เป็นขอบเขตบน (Upper Bound Solution) และในกรณีที่ปัญหาไม่สามารถหาคำตอบที่เป็นไปได้จะทำการหาค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound Solution) ซึ่งหาจากการนำแบบจำลองทางคณิตศาตร์มาลดเงื่อนไขโดยที่ไม่พิจารณาเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกันของแม่แบบในทุกขั้นตอนการผลิต แต่คำตอบที่เป็นค่าขอบเขตล่างนั้นอาจจะเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Solution) และประสิทธิภาพของฮิวริสติกก็จะเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างนั่น

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการวิจัยในปัญหาที่มี 2 แม่แบบ ที่มีจำนวนงานระหว่าง 3 งาน ถึง 17 งาน ที่มีการใช้สูตรการผลิตที่หลากหลาย ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาตร์สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ทุกปัญหา โดยมีระยะเวลาในการค้นหาคำตอบมากขึ้นตามจำนวนงานที่เพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดประมาณ 6 ชั่วโมง ในปัญหาที่มีจำนวน 17 งาน อย่างไรก็ตามฮิวริสที่นำเสนอนี้ก็สามารถค้นหาคำตอบที่ได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดแต่ใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบน้อยมาก โดยเวลาที่มากที่สุดนั้นไม่เกิน 1 วินาที

ตารางที่ 3.5 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบ

Prob.	# Jobs	Math Model		Heuristic	
		Optimal	Runtime (sec)	Objective	Runtime (sec)
1	3	21	0.05	21	0.27
2	4	36	0.16	36	0.47
3	5	59	0.64	59	0.41
4	6	84	1.19	84	0.33
5	7	113	2.62	113	0.07
6	8	68	32.42	68	0.19
7	9	89	28.70	89	0.48
8	10	113	107.66	113	0.34
9	11	137	215.22	137	0.56
10	12	162	1761.89	162	0.50
11	14	210	3727.18	210	0.53
12	15	245	17122.48*	245	0.54
13	16	280	16957.62*	280	0.49
14	17	315	20917.38*	315	0.26

* = หยุดการค้นหาคำตอบเนื่องจากค่าขอบเขตบนเท่ากับค่าขอบเขตล่าง

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการวิจัยในปัญหาที่มี 4 แม่แบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดถึง 14 ปัญหาจากทั้งหมด 18 ปัญหา โดยในปัญหาที่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้นั่นฮิวริสติกสามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดใน 3 ปัญหาจาก 4 ปัญหา ส่วนปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาตร์ไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้นั้นพบว่า ฮิวริสติกที่นำเสนอนั้นสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าหรือเท่ากัน และมีผลต่างกับค่าขอบเขตล่างมากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1 และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยมาก คือ ไม่เกิน 1 วินาที ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากที่สุดถึง 9.6 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.6 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบ

Prob.	# jobs	Math Model		LB	Heuristic	
		Optimal	Runtime (sec)		Objective	Runtime (sec)
15	6	46	12.54	-	46	0.40
16	7	61	5540.84	-	61	0.54
17	8	77	5052.26*	-	77	0.53
18	9	(100)	8401.28	99	100	0.55
19	10	(123)	8054.00	122	123	0.56
20	12	(172)	11545.73	170	172	0.42
21	13	(201)	16629.71	199	201	0.56
22	14	231	14524.16*	-	233	0.63
23	15	(268)	14726.40	263	263	0.41
24	14	(119)	16833.12	98	101	0.49
25	17	(163)	16092.99	161	163	0.59
26	19	(243)	10176.54	207	209	0.62
27	22	(323)	13208.65	279	282	0.53
28	24	(375)	9454.22	328	330	0.70
29	26	(460)	17281.81	376	380	0.64
30	29	(546)	34672.47	465	470	0.52
31	31	(583)	16903.58	535	535	0.78
32	34	(655)	32132.49	640	645	0.94

* = หยุดการค้นหาคำตอบเนื่องจากค่าขอบเขตบนเท่ากับค่าขอบเขตล่าง

(·) = ค่าขอบเขตบน

ตารางที่ 3.7 แสดงผลการวิจัยในปัญหาที่มี 8 แม่แบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เพียง 2 ปัญหาจากทั้งหมด 18 ปัญหาเท่านั้น และบางปัญหาไม่สามารถหาค่าที่เป็นไปได้เลย อย่างไรก็ตามฮิวริสติกที่นำเสนอนั้นสามารถหาคำตอบที่มีผลแตกต่างจากขอบเขตล่างระหว่างร้อยละ 2.15 กับ ร้อยละ 7.22 โดยฮิวริสติกใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากที่สุดเพียง 17 วินาที ซึ่งน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 3.7 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบ

Prob.	# jobs	Math Model		LB	Heuristic	
		Optimal	Runtime (sec)		Objective	Runtime (sec)
33	10	66	5689.36*	-	66	0.50
34	12	97	5342.89*	-	97	0.49
35	14	(133)	5018.62	129	132	0.70
36	16	(207)	7902.59	165	174	0.80
37	18	(249)	9118.07	210	224	0.67
38	20	(335)	6933.96	257	275	0.78
39	22	-	10702.32	306	323	0.84
40	24	-	12196.30	360	386	1.22
41	26	-	14103.41	421	461	1.00
42	25	(240)	8366.51	149	156	0.86
43	28	(386)	17118.04	208	221	1.07
44	32	(522)	20090.48	292	300	1.70
45	36	(657)	25462.12	383	401	3.21
46	41	-	36547.01	502	523	4.72
47	45	-	55035.45	599	620	4.21
48	49	-	42866.30	697	712	11.16
49	53	-	72097.20	805	850	15.82
50	57	-	65181.43	925	991	16.49

* = หยุดการค้นหาคำตอบเนื่องจากค่าขอบเขตบนเท่ากับค่าขอบเขตล่าง

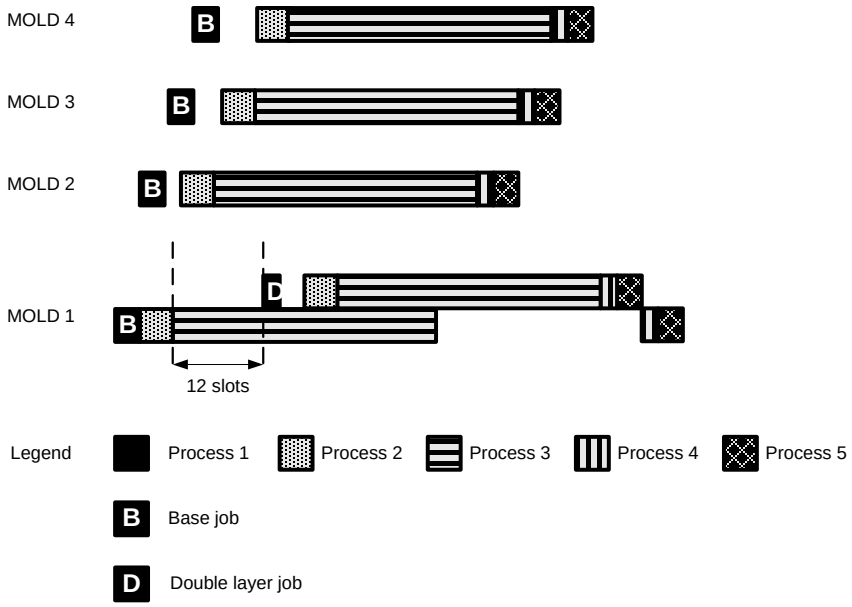
(·) = ค่าขอบเขตบน

บทที่ 4
วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัยกรณีที่มีการผลิตซ้อนทับ

4.1 ลักษณะของปัญหาที่ทำการศึกษา

การผลิตซ้อนทับ (Double Layer Production) คือ วิธีการที่นำผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เช่น เสาเข็ม (Column) มาผลิตซ้อนทับบนผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่ง เช่น แผ่นพื้น (Floor Stabs) โดยใช้แม่แบบเดียวกันในการผลิต ซึ่งกระบวนการผลิตซ้อนทับมีขั้นตอนการผลิตเหมือนกับการผลิต แผ่นพื้นชั้นล่าง คือ ขั้นตอนการเตรียมแม่แบบ (Mold Preparing) การผสมหล่อคอนกรีต (Concrete Mixing and Casting) การบ่ม (Curing) การตัดแยกออกจากแม่แบบ (Stripping) และ การจัดเก็บ (Product Finishing and Storing) อย่างไรก็ตามการผลิตซ้อนทับจะมีข้อจำกัดบางประการที่แตกต่างจากการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 ในการผลิตซ้อนทับจะใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นกว่า และจะสามารถเริ่มขั้นตอนการผลิตนี้ก็ต่อเมื่อการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างได้เริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 คือ การบ่ม ไปแล้วอย่างน้อย 6 ชั่วโมง นอกจากนี้การผลิตซ้อนทับจะต้องผลิตเสร็จสิ้นภายในขั้นตอนการบ่มของการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง ซึ่งถ้าเสร็จช้ากว่าก็จะทำให้การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างต้องขยายเวลาการบ่มออกไปจนถึงเวลาที่การผลิตซ้อนทับสิ้นสุดการผลิต โดยไม่มีผลต่อคุณภาพและสูตรการผลิตของแผ่นพื้นชั้นล่าง และงานแผ่นพื้นชั้นล่าง (Base Job) สามารถให้งานซ้อนทับ (Double Layer Job) ผลิตซ้อนทับได้เพียงงานเดียวเท่านั้น และการผลิตแบบซ้อนทับแต่ละขั้นตอนการผลิตก็จะใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เพียง 1 หน่วย ร่วมกันกับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง ยกตัวอย่างในภาพที่ 4.1 ที่พิจารณาให้งานซ้อนทับผลิตซ้อนทับงานแผ่นพื้นชั้นล่างในแม่แบบที่ 1 โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับเริ่มต้นการผลิตเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างบ่มไปแล้ว 6 ชั่วโมงหรือ 12 หน่วย จากนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับจึงเริ่มต้นการผลิตหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 1 เสร็จสิ้น แต่จะพบว่างานซ้อนทับมีการใช้ทรัพยากรซ้อนกับงานแผ่นพื้นชั้นล่างในแม่แบบที่ 4 จึงเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับ และขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานซ้อนทับก็จะเริ่มต้นการผลิตทันทีเมื่อขั้นตอนการผลิตที่ 2 เสร็จสิ้น และขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานซ้อนทับก็จะเริ่มต้นการผลิตเมื่อขั้นตอนการผลิตที่ 3 เสร็จสิ้นการผลิต จนกระทั่งถึงขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับที่เริ่มต้นการผลิตหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 เสร็จสิ้น แต่จะพบว่าขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตเกินเวลาเสร็จสิ้นการผลิตในขั้นตอนการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังนั้นงานแผ่นพื้นชั้นล่างจึงต้องใช้เวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเพื่อให้งานซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตภายในระยะเวลาการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างและจะ

ส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.1 การผลิตซ้อนทับ

จากสภาพปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยในหัวข้อนี้จึงนำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตที่ต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนและไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนกันของการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตซ้อนทับ เพื่อให้ได้จำนวนงานซ้อนทับมากที่สุดภายใต้จำนวนงานแผ่นพื้นชั้นล่าง สูตรการผลิต และลำดับการผลิตของแผ่นพื้นชั้นล่างที่กำหนด โดยงานซ้อนทับจะต้องเลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างเพื่อจะใช้ในการซ้อนทับและจะต้องเลือกสูตรการผลิตที่ทำให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมของงานซ้อนทับมีค่าน้อยที่สุดโดยที่ตารางการผลิตจะต้องไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงาน ซึ่งปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยที่ส่วนแรก คือ การหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดที่สามารถซ้อนทับแล้วไม่มีงานใดเกินกำหนดเวลาส่งงาน (Due Date) และส่วนที่สองเป็นการเลือกสูตรการผลิตที่ทำให้มีต้นทุนวัตถุดิบรวม (Total Product Cost) มีค่าน้อยที่สุดและจัดตารางการผลิตที่เหมาะสม

ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของการหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด และการเลือกสูตรการผลิตของงานซ้อนทับซึ่งจะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีการทางฮิวริสติก และผลการวิจัย โดยจะยกตัวอย่างการผลิตที่ประกอบไปด้วยงาน แผ่นพื้นชั้น

ล่างจำนวนงาน 7 งาน และจำนวน 4 แม่แบบ โดยงานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4-2-2-5-4-5-5 และใช้แม่แบบ 1-2-3-4-1-2-3 ในการผลิต และมีลำดับของแม่แบบเป็น 1-2-3-4

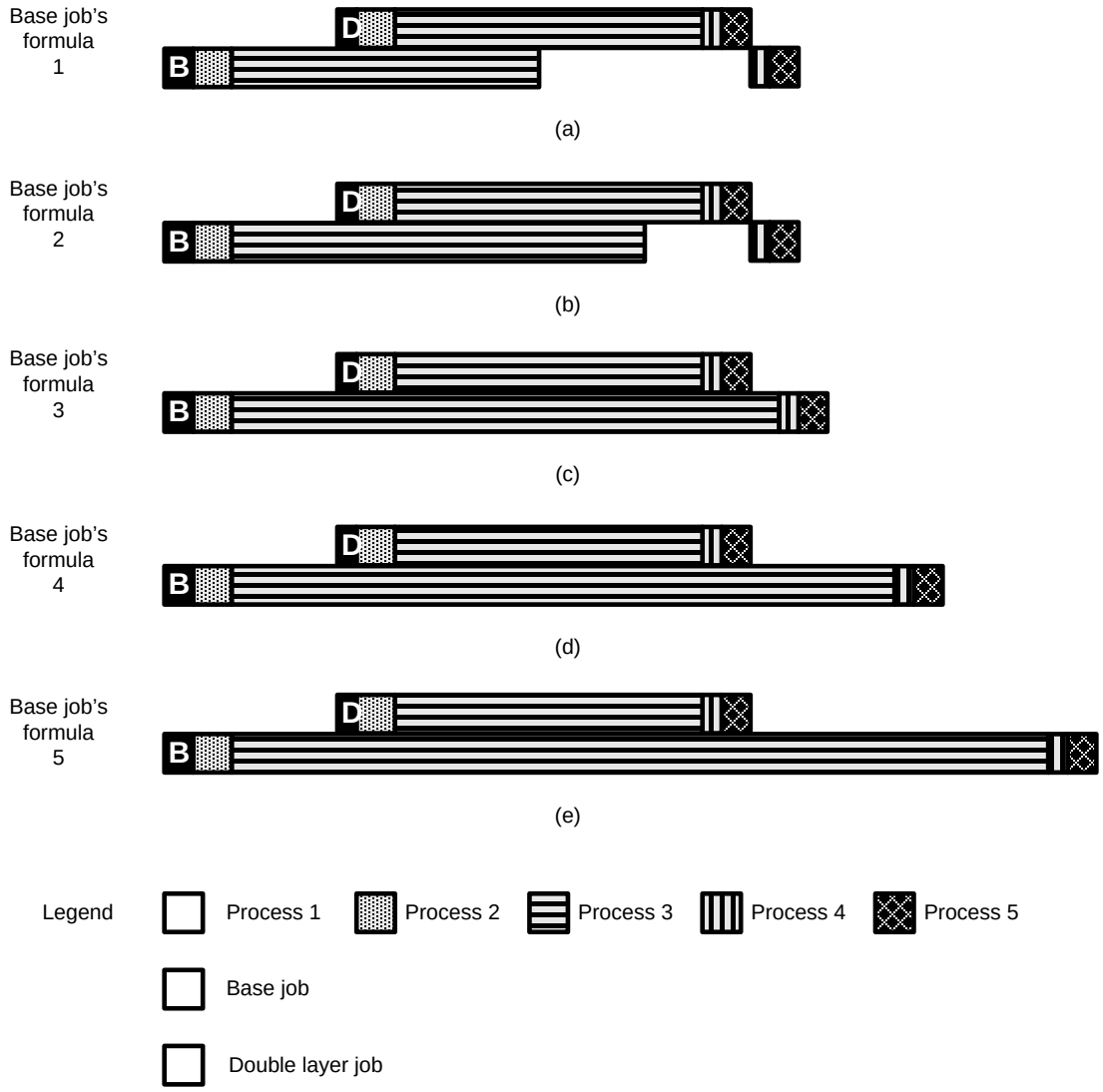
4.2 การหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด

ในหัวข้องานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะงานซ้อนทับ ภายใต้งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่กำหนดโดยไม่อนุญาตให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างเปลี่ยนสูตรการผลิตและสลับลำดับการผลิตแต่สามารถเลื่อนเวลาเริ่มต้นในตารางการผลิตได้ โดยการหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดจะกำหนดให้งานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นที่สุด คือ สูตรการผลิตที่ 1 และกำหนดตารางการผลิตเพื่อยืนยันว่า จำนวนงานซ้อนทับที่ได้นั่นมีความเป็นไปได้ (Feasible Solution) ที่สามารถให้งานทุกงานทั้งงานแผ่นพื้นชั้นล่างและงานซ้อนทับผลิตเสร็จทันกำหนดเวลาส่งงาน โดยงานซ้อนทับที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 เมื่อผลิตซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างแล้วอาจส่งผลกระทบให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องใช้ระยะเวลาการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง จากภาพที่ 4.2(a) เมื่อซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 จะพบว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นถึง 22 หน่วย และถ้างานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 งานแผ่นพื้นชั้นล่างจะใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นเพียง 10 หน่วย ดังภาพที่ 4.2(b) แต่ถ้างานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 3 ถึง สูตรการผลิตที่ 5 จะพบว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นเลย ดังภาพที่ 4.2(c-e) ดังนั้นในการพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างที่จะใช้ซ้อนทับ เมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 1 ต้องมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน (Time Remaining Before Due Date) ในแม่แบบอย่างน้อย 22 หน่วย ซึ่งไม่มีโอกาสเป็นไปได้ เนื่องจากระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานมากเช่นนี้จะทำให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างในแม่แบบนั้นเลือกใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานกว่า หรือมีต้นทุนวัตถุดิบถูกกว่าสูตรการผลิตที่ 1 ดังนั้นในการผลิตแบบซ้อนทับจะไม่เลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 และถ้า งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 ก็ต้องมีระยะ เวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานอย่างน้อย 10 หน่วย

ลำดับก่อนและหลังของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง (Base Job Sequence) ที่จะนำมาพิจารณาให้มีงานซ้อนทับมีผลต่อจำนวนงานซ้อนทับที่ได้ โดยการเลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานมาพิจารณาก่อน ตารางการผลิตจะมีโอกาสเลื่อนน้อยเพราะงานซ้อนทับสามารถเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตโดยไม่ส่งผลกระทบให้ตารางการผลิตของแผ่นพื้นชั้นล่างเลื่อน เป็นผลให้มีโอกาสที่จะจัดสรรงานซ้อนทับให้กับงานแผ่นพื้นที่ใช้สูตรการผลิตที่มี

ระยะเวลาในการบ่มสั้นกว่าได้ด้วย แต่ในบางกรณีพบว่า การพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานในการซ้อนทับก่อน จะทำให้ตารางการผลิตถูกเลื่อนออกไป อาจส่งผลให้ไม่สามารถจัดสรรงานซ้อนทับลงบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นๆได้ ซึ่งในกรณีเช่นนี้การเปลี่ยนมาพิจารณาสูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นๆก่อน อาจจะจัดสรรงานซ้อนทับให้กับงานแผ่นพื้นชั้นล่างทั้งงานที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นและงานที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานได้ ดังนั้นลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างจึงพิจารณาจาก 2 วิธี โดยวิธีที่ 1 คือการเรียงลำดับตามสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานไปสั้น โดยพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานและมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน ในแม่แบบนั้นมากที่สุดก่อน และวิธีที่ 2 คือการเรียงลำดับตามลำดับงานที่ผลิต โดยพิจารณา ลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างจากงานที่ 1 งานที่ 2 จนกระทั่งงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานสุดท้าย ซึ่งมีการใช้ สูตรการผลิต ที่มีระยะเวลาในการบ่มนานและสั้นสลับๆกันไป

จากตัวอย่างในการผลิตที่มีงานแผ่นพื้นชั้นล่างทั้งหมด 7 งาน และ 4 แม่แบบสำหรับใช้ผลิต โดยที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างแต่ละงานใช้สูตรการผลิตคือ 4-2-2-5-4-5-5 และแม่แบบในการผลิตคือ 1-2-3-4-1-2-3 ซึ่งในแต่ละแม่แบบจะมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน เท่ากับ 1 หน่วย เท่ากับ 9 หน่วย เท่ากับ 4 หน่วย และเท่ากับ 46 หน่วยตามลำดับ โดยการหาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างด้วยวิธีที่ 1 จะเริ่มพิจารณาจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานที่สุด คือสูตรการผลิตที่ 5 ซึ่งได้แก่ งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 งานที่ 6 และ งานที่ 7 โดยงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 ใช้แม่แบบที่มีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงาน มากสุดในการผลิตคือ แม่แบบที่ 4 ดังนั้นงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 จึงเป็นลำดับแรกของลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่าง และพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้แม่แบบที่มีระยะ เวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในการผลิตมากรองลงมาคือ แม่แบบที่ 2 และ แม่แบบที่ 3 ตามลำดับ ดังนั้นลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับที่ 2 และ ลำดับที่ 3 จึงเป็นงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 6 และงานที่ 7 ตามลำดับ จากนั้นจะพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 4 และทำวิธีการซ้ำเดิมดังกล่าวนี้ โดยเมื่อพิจารณาจนครบทุกสูตรการผลิตแล้วจะได้ลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างคือ 4-6-7-1-5-2-3 ในขณะที่การหาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างด้วยวิธีที่ 2 จะได้ลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่าง คือ 1-2-3-4-5-6-7



ภาพที่ 4.2 งานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1 ซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตต่างๆ

จากลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ได้ ขั้นตอนต่อไปจะหาจำนวนงานซ้อนทับด้วยการจัดสรรงานซ้อนทับให้กับงานแผ่นพื้นชั้นล่างแล้วตรวจสอบความเป็นไปได้ของการซ้อนทับนั้นด้วยการจัดตารางการผลิต ซึ่งในการ จัดสรรงานซ้อนทับ จะพิจารณาทีละขั้นตอนการผลิตร่วมกับตารางการผลิตของการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง โดยเริ่มต้นจากขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับที่เริ่มต้นการผลิตได้หลังจากที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับผลิตขั้นตอนที่ 3 คือ การบ่มไปแล้ว 12 หน่วย จากนั้นให้ตรวจสอบการใช้ทรัพยากรร่วมกันระหว่างงานแผ่นพื้นชั้นล่างกับงานซ้อนทับ ซึ่งถ้าพบว่า ทรัพยากรมีการซ้อนทับกันให้พิจารณาต่อไปว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างหรืองานซ้อนทับที่มีเวลาเริ่มต้นการผลิตช้ากว่าก็จะให้เลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตของงานนั้นออกไป ซึ่งถ้าเป็นงานแผ่นพื้น

ชั้นล่างถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตจะต้องพิจารณาก่อนว่า เมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตแล้วส่งผลกระทบให้มีงานใดๆผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานหรือ ไม่ ซึ่งถ้ามีงานใดๆผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานก็จะย้อนกลับมาให้งานซ้อนทับถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตแทน แต่ถ้าไม่มี งานแผ่นพื้นชั้นล่างก็จะถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิต แล้วพิจารณาขั้นตอนการผลิตของงานซ้อนทับขั้นตอนถัดไปและจะพิจารณาในลักษณะเดียวกันนี้จนกระทั่งขั้นตอนการผลิตที่ 5 ที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมว่า เวลาเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับเกินเวลาเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างหรือไม่ ซึ่งถ้าหากมีค่ามากกว่าก็จะทำให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องใช้ ระยะ เวลา ในการบ่มเพิ่มขึ้นเพื่อให้งานซ้อนทับสิ้นสุดการผลิตภายในระยะเวลาการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง โดยจะส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิต และยังส่งผลให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้แม่แบบเดียวกันนี้ในการผลิตต้องเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตออกไปด้วยเช่นกัน จากนั้นจะจัดตารางการผลิตโดยพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันของงานทั้งหมด ซึ่งถ้าไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จเกินกำหนดเวลาส่งงานก็จะสรุปได้ว่า การผลิตสามารถผลิตงานซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างนั้นได้ โดยวิธีการทั้งหมดสามารถแสดงขั้นตอนต่างๆดังนี้

1: **procedure** Double Layer Job Finding

2: **Notations**

3: T_k : Time remaining of mold k before due date

4:

5: $BaseJobSequence_i$ ⟵ Base Job Sequence

6: double layer job l⟵ 0

7: **for** each i **do**

8: **if** $BaseJobSequence_i$'s formula =1 **then**

9: **break**

10: **elseif** $BaseJobSequence_i$'s formula = 2 and T_k < 10 **then**

11: **break**

12: **else**

13: assign starting time of double layer job l

14: **Job Scheduling**

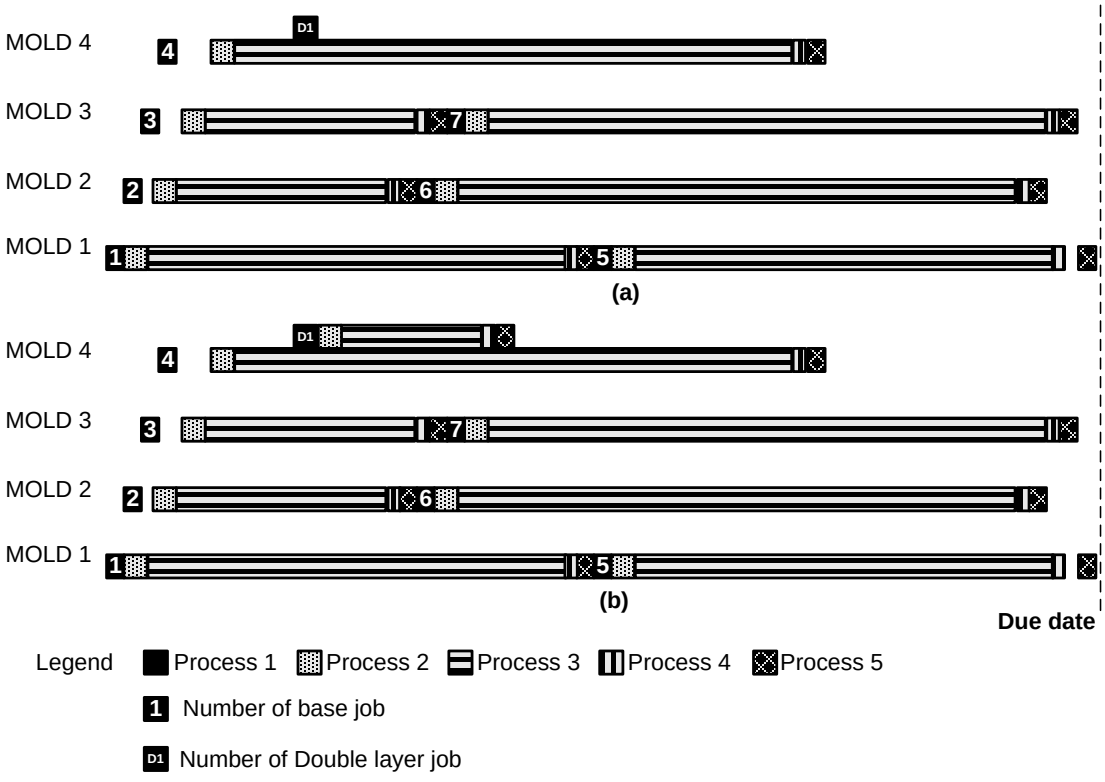
15: **if** feasible **then**

16: $l \leftarrow l+1$

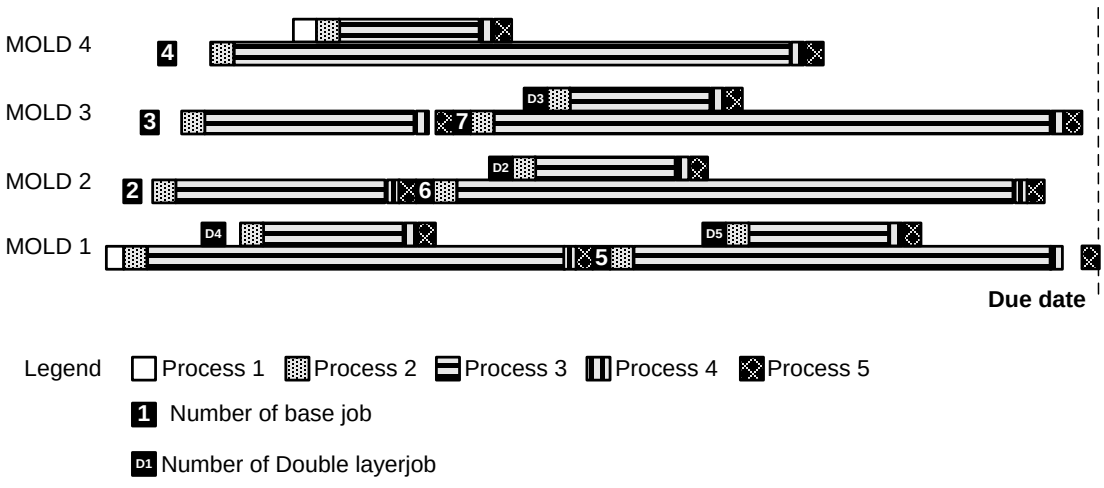
17: **Return** l

ตัวอย่างการหาจำนวนงานซ้อนทับให้มากที่สุด โดยกำหนดให้การการผลิตที่ประกอบไปด้วยงานแผ่นพื้นชั้นล่างจำนวน 7 งาน และจำนวน 4 แม่แบบ โดยงานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4-2-2-5-4-5-5 และใช้แม่แบบ 1-2-3-4-1-2-3 ในการผลิต และมีลำดับของแม่แบบเป็น 1-2-3-4 โดยมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานของแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 1 หน่วย เท่ากับ 9 หน่วย เท่ากับ 4 หน่วย และเท่ากับ 46 หน่วยตามลำดับ จากการหาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างด้วยวิธีที่ 1 ซึ่งได้ลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างคือ 4-6-7-1-5-2-3 และการหาจำนวนงานซ้อนทับจะเริ่มต้นจากลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับที่ 1 คือ งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 ซึ่งใช้สูตรการผลิตที่ 5 โดยขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับเริ่มต้นการผลิตเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 ทำการบ่มไปแล้ว 12 หน่วย ดังภาพที่ 4.3(a) จากนั้นให้ตรวจสอบว่า งานซ้อนทับมีการใช้ทรัพยากรร่วมงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานใดหรือไม่ ซึ่งก็พบว่าไม่มี จึงพิจารณาขั้นตอนการผลิตถัดไปและทำวิธี การเดียวกันนี้ ยกเว้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 ไม่ต้องตรวจสอบการใช้ทรัพยากรร่วมกันจนกระทั่งขั้นตอนการผลิตที่ 5 ซึ่งพบว่า งานซ้อนทับเสร็จสิ้นภายในระยะเวลาการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างจึงไม่กระทบต่อเวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง และสุดท้ายจะตรวจสอบการใช้ทรัพยากรร่วมกันทั้งหมดของงานแผ่นพื้นชั้นล่างด้วยกันเอง ระหว่างงานซ้อนทับกับงานแผ่นพื้นชั้นล่าง และงานซ้อนทับด้วยกันเอง ได้ผลดังภาพที่ 4.3(b) ซึ่งจะพบว่าไม่มีงานใดที่ผลิตเสร็จสิ้นเกินกำหนดเวลาส่งงาน ดังนั้นงานซ้อนทับงานที่ 1 จะใช้งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 ในการผลิตซ้อนทับ จากนั้นจะพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับถัดไปด้วยวิธีเดียวกันอย่างที่กล่าวข้างต้นจนกระทั่งถึงลำดับที่ 5 จะพบว่า งานแผ่นพื้นชั้นล่างทุกลำดับสามารถผลิตงานซ้อนทับได้ จากนั้นเมื่อพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับที่ 6 คือ งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 2 ซึ่งใช้สูตรการผลิตที่ 2 จะพบว่า ไม่สามารถผลิตงานซ้อนทับได้ เนื่องจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 2 ซึ่งใช้แม่แบบที่ 2 ในการผลิตมีระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแม่แบบนั้นน้อยกว่า 10 หน่วย และ ลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับที่ 7 ก็ไม่สามารถผลิตงานซ้อนทับได้ด้วยเหตุผลลักษณะเดียวกันนี้ ดังนั้นในการผลิตนี้จะสามารถผลิตงานซ้อนทับได้จำนวน 5 งาน โดยงาน

ซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานที่ 5 จะใช้งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4-6-7-1-5 ตามลำดับ ในการซ้อนทับดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.3 การจัดสรรงานซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่างลำดับที่ 1



ภาพที่ 4.4 การผลิตงานซ้อนทับเมื่อพิจารณางานแผ่นพื้นชั้นล่างทั้งหมด

4.3 การเลือกสูตรการผลิตของงานซ้อนทับ

จากวิธีการหาจำนวนงานซ้อนทับ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างสองวิธี จะเลือกวิธีที่ได้จำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด ซึ่งในหัวข้อนี้จะทำให้งานซ้อนทับ ทั้งหมด มีต้นทุนวัตถุดิบรวมน้อยที่สุดด้วยการเลือกสูตรการผลิตที่เหมาะสม โดยจะแก้ปัญหาด้วย 2 วิธีการ คือ วิธีการแรกจะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีการที่สองจะสร้างวิธีการทางฮิวริสติก

4.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เซต (Sets)

$\mathcal{I}$ = {1,2,…,I} เซตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง

$\mathcal{L}$ = {1,2,…,L} เซตของงานซ้อนทับ

$\mathcal{J}$ = {1,2,…, 5} เซตของขั้นตอนการผลิต

$\mathcal{F}$ = {1,2,…,F} เซตของสูตรการผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

X_{lfi} = 1 ถ้างานซ้อนงาน $l \in \mathcal{L}$ เลือกสูตรการผลิต $f \in \mathcal{F}$ และผลิตซ้อนทับบนงานแผ่นพื้นชั้นล่าง $i \in \mathcal{I}$

0 otherwise

S_{ij} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง $i \in \mathcal{I}$ ในขั้นตอนการผลิต $j \in \mathcal{J}$

S'_{lj} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ $l \in \mathcal{L}$ ในขั้นตอนการผลิต $j \in \mathcal{J}$

B_i = เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง $i \in \mathcal{I}$

W_{ij} ϵ {0,1}, $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$

V_{lji} ϵ {0,1}, $l \in \mathcal{L}, j \in \mathcal{J}, i \in \mathcal{I}$

U_{lj} ϵ {0,1}, $l \in \mathcal{L}, j \in \mathcal{J}$

ค่าพารามิเตอร์ (Parameters)

P_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต $j \in \mathcal{J}$สำหรับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง

P'_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต $j \in \mathcal{J}$ สำหรับการผลิตซ้อนทับ

P_{3f} = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการบ่มที่ขึ้นอยู่กับสูตรการผลิต $f \in \mathcal{F}$

C_f = ต้นทุนวัตถุดิบที่มีมูลค่าขึ้นอยู่กับสูตรการผลิต $f \in \mathcal{F}$

$form_i$ = ระยะเวลาในการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง $i \in \mathcal{I}$

$mold_i$ = แม่แบบที่งานแผ่นพื้นชั้นล่าง $i \in \mathcal{I}$ ใช้ในการผลิต

D = เวลาส่งงาน

M = เลขจำนวนมากๆที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับเวลาส่งงาน

แบบจำลอง (Model)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

$$\min \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{i \in \mathcal{I}} X_{lfi}\, C_f \tag{1}$$

สมการข้อจำกัด (Constraint Function)

$$S_{i2} \geq S_{i1} + P_1 \quad ,\forall i \in \mathcal{I}\ ,\forall j \in \mathcal{J} \tag{2}$$

$$S_{i3} = S_{i2} + P_2 \quad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{3}$$

$$S_{i4} \geq S_{i3} + form_i \quad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{4}$$

$$S_{i5} \geq S_{i4} + P_4 \quad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{5}$$

$$B_i = S_{i5} + P_5 \quad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{6}$$

$$B_i - S_{i'1} \leq M \cdot (mold_i - mold_{i'}) \quad ,\forall i, i' \in \mathcal{I}\ , i' > i\ , mold_i = mold_{i'} \tag{7}$$

$$S_{ij} + P_j - S_{i'j} \leq M \cdot W_{ij} \quad ,\forall i, i' \in \mathcal{I}\ ,\forall j \in \mathcal{J}\ , j \neq 2{,}3\ , i \neq i' \tag{8}$$

$$-S_{ij} + P_j + S_{i'j} \leq M \cdot (1 - W_{ij}) \quad ,\forall i, i' \in \mathcal{I}\ ,\forall j \in \mathcal{J}\ , j \neq 2{,}3\ , i \neq i' \tag{9}$$

$$1 + S_{i2} + P_2 - S_{i'2} \leq M \cdot W_{i2} \quad ,\forall i, i' \in \mathcal{I}\ , i \neq i' \tag{10}$$

$$1 - S_{i2} + P_2 + S_{i'2} \leq M \cdot (1 - W_{i2}) \quad ,\forall i, i' \in \mathcal{I}\ , i \neq i' \tag{11}$$

$$B_i \leq D \quad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{12}$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{i \in \mathcal{I}} X_{lfi} = 1 \quad ,\forall l \in \mathcal{L} \tag{13}$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{f \in \mathcal{F}} X_{lfi} \leq 1 \quad ,\forall i \in \mathcal{I} \tag{14}$$

$$S'_{l2} \geq S'_{l1} + P'_1 \quad ,\forall l \in \mathcal{L} \tag{15}$$

$$S'_{l3} = S'_{l2} + P'_2 \quad ,\forall l \in \mathcal{L} \tag{16}$$

$$S'_{l4} \geq S'_{l3} + \sum_{f\epsilon\mathcal{F}} \sum_{i\epsilon\mathcal{I}} X_{lfi} P_{3f} \qquad ,\forall l \epsilon \mathcal{L} \qquad (17)$$

$$S'_{l5} \geq S'_{l4} + P'_4 \qquad ,\forall l \epsilon \mathcal{L} \qquad (18)$$

$$(1 - \sum_{f\epsilon\mathcal{F}} X_{lfi}) \cdot M \geq S_{i3} + 12 - S'_{l1} \qquad ,\forall l \epsilon \mathcal{L} ,\forall i \epsilon \mathcal{I} \qquad (19)$$

$$(1 - \sum_{f\epsilon\mathcal{F}} X_{lfi}) \cdot M \geq S'_{l5} + P'_5 - S_{i4} \qquad ,\forall l \epsilon \mathcal{L} ,\forall i \epsilon \mathcal{I} \qquad (20)$$

$$S_{ij} + P_j - S'_{lj} \leq M \cdot V_{lji} \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I} ,\forall l \epsilon \mathcal{L} ,\forall j \epsilon \mathcal{J} , j \neq 2,3 \qquad (21)$$

$$-S_{ij} + P'_j + S'_{lj} \leq M \cdot (1 - V_{lji}) \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I} ,\forall l \epsilon \mathcal{L} ,\forall j \epsilon \mathcal{J} , j \neq 2,3 \qquad (22)$$

$$1 + S_{i2} + P_2 - S'_{l2} \leq M \cdot V_{l2i} \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I} ,\forall l \epsilon \mathcal{L} \qquad (23)$$

$$1 - S_{i2} + P'_2 + S'_{l2} \leq M \cdot (1 - V_{l2i}) \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I} ,\forall l \epsilon \mathcal{L} \qquad (24)$$

$$S'_{lj} + P'_j - S'_{l'j} \leq M \cdot U_{lj} \qquad ,\forall l, l' \epsilon \mathcal{L} ,\forall j \epsilon \mathcal{J} , j \neq 2,3, l' \neq l \qquad (25)$$

$$-S'_{lj} + P'_j + S'_{l'j} \leq M \cdot (1 - U_{lj}) \qquad ,\forall l, l' \epsilon \mathcal{L} ,\forall j \epsilon \mathcal{J} , j \neq 2,3, l' \neq l \qquad (26)$$

$$1 + S'_{l2} + P'_2 - S'_{l'2} \leq M \cdot U_{l2} \qquad ,\forall l, l' \epsilon \mathcal{L}, l' \neq l \qquad (27)$$

$$1 - S'_{l2} + P'_2 + S'_{l'2} \leq M \cdot (1 - U_{l2}) \qquad ,\forall l, l' \epsilon \mathcal{L} , l' \neq l \qquad (28)$$

$$X_{lfi} \epsilon \{0,1\} \qquad ,\forall l \epsilon L ,\forall f \epsilon \mathcal{F}, \forall i \epsilon \mathcal{I} \qquad (29)$$

$$W_{ij} \epsilon \{0,1\} \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I}, \forall j \epsilon \mathcal{J} \qquad (30)$$

$$V_{lji} \epsilon \{0,1\} \qquad ,\forall l \epsilon L, \forall j \epsilon \mathcal{J}, \forall i \epsilon \mathcal{I} \qquad (31)$$

$$U_{lj} \epsilon \{0,1\} \qquad ,\forall l \epsilon L, \forall j \epsilon \mathcal{J} \qquad (32)$$

$$S_{ij} \geq 0 \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I} ,\forall j \epsilon \mathcal{J} \qquad (33)$$

$$S'_{lj} \geq 0 \qquad ,\forall l \epsilon \mathcal{L} ,\forall j \epsilon \mathcal{J} \qquad (34)$$

$$B_i \geq 0 \qquad ,\forall i \epsilon \mathcal{I} \qquad (35)$$

สมการทางคณิตศาสตร์นี้มีวัตถุประสงค์ (1) ให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมทั้งหมดของ งานซ้อนทับมีค่าน้อยที่สุดภายใต้สมการข้อจำกัด ต่างๆ คือในการผลิต แผ่นพื้นชั้นล่าง การผลิตจะต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนที่ขั้นตอนการผลิตถัดไปสามารถเริ่ม ต้นการผลิต ได้ก็ต่อเมื่อ เสร็จสิ้นการผลิต ในขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า (2)-(5) ยกเว้นในขั้นตอน การผลิต ที่ 3 คือ ขั้นตอนการบ่ม ที่ต้องเริ่มต้น

การผลิตทันทีเมื่อขั้นตอน การผลิต ก่อนหน้า คือ ขั้นตอนการหล่อเสร็จสิ้น (3) และในขั้นตอน การผลิต นี้จะใช้ระยะเวลา ในการผลิต ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตที่ใช้ (4) และ สามารถกำหนดเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของแต่ละงานที่ใช้แม่แบบใดแม่แบบหนึ่งในการผลิตได้ (6) โดยที่งานถัดไปในแม่แบบนั้นจะเริ่มต้นการผลิตได้ก็ต่อเมื่องานก่อนหน้าในแม่แบบนั้นสิ้นสุดการผลิตแล้วเท่านั้น (7) นอกจากนี้ขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอน (ยกเว้นขั้นตอนที่ 3) จะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกันทำให้เวลาในการผลิตของแต่ละขั้นตอนจะต้องไม่ซ้อนทับกัน (8)-(11) และในขั้นตอนที่ 2 ที่ทรัพยากรต้องพักอย่างน้อย 1 หน่วยสำหรับการล้างทำความสะอาด ก่อนที่จะเริ่ม การผลิต งานถัดไปได้ (10)-(11) โดยในการผลิตนั้นงานทุกงานจะต้องผลิตเสร็จก่อนเวลาส่งงาน (12)

สำหรับการผลิตที่มีการผลิตซ้อนทับนั้นจะพบว่า งานที่ซ้อนทับสามารถเลือกสูตรการผลิตและงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่จะผลิตซ้อนทับได้เพียงหนึ่งเดียวเท่านั้น (13) ในขณะเดียวกัน เมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่างถูกเลือกให้มีการผลิตซ้อนทับก็สามารถเลือกงานที่จะผลิตซ้อนทับได้เพียงงานเดียวเช่นกัน (14) และการผลิตซ้อนทับยังคงต้องผลิตไปตามลำดับขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกันกับการผลิตแผ่นพื้นชั้นล่าง (15)-(18) แต่จะมีเงื่อนไขบางอย่างเพิ่มเติม คือ งานซ้อนทับจะเริ่มต้นการ ผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 1 ได้ก็ต่อเมื่องานแผ่นพื้นชั้นล่าง ที่ถูกซ้อนทับ ผลิตขั้นตอน การบ่มไปแล้วอย่างน้อย 12 หน่วย (19) และในการผลิตซ้อนทับเมื่องานซ้อนทับมีเวลาสิ้นสุดการผลิตมากกว่าเวลาเสร็จสิ้นการบ่มของงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับจะทำให้งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานนั้นต้องขยายระยะเวลาในการบ่มออกไป ซึ่งจะส่งผลกระทบให้ขั้นตอนการผลิต ที่ 4 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างนั้นจะสามารถเริ่มต้นการผลิตได้หลังจากที่งานซ้อนทับผลิตเสร็จสิ้น (20) นอกจากนี้งานซ้อนทับยังคงต้องคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรร่วมกันในแต่ละขั้นตอน การผลิต โดยจะต้องพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันกับงาน แผ่นพื้นชั้นล่าง (21)-(24) และกับงานซ้อนทับด้วยกัน (25)-(28) ซึ่งสมการข้อจำกัด (29)-(32) ที่ระบุให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่า 2 ค่า คือ 0 กับ 1 (Binary) และสมการข้อจำกัด (33)–(35) ที่ตัวแปรตัดสินใจต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 (Non-Negative)

4.3.2 **วิธีการทางฮิวริสติก**

จากวิธีการหาจำนวนงานซ้อนทับ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งพิจารณาลำดับงานแผ่นพื้นชั้นล่างสองวิธี จะเลือกคำตอบจากวิธีที่ ได้จำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด มาเป็นคำตอบตั้งต้น (Initial Solution) แต่ถ้าทั้งสองวิธีให้จำนวนงานซ้อนทับเท่ากันก็จะเลือกคำตอบจากวิธีที่ 1 เนื่องจากวิธีนี้เลือกงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะเวลาในการบ่มนานก่อน โดย จากหลักการที่ว่าถ้างานซ้อนทับถูกจัดสรรให้กับงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่มีระยะ เวลาในการ บ่มนาน ก็มีโอกาสที่งานซ้อนทับนั้น จะสามารถใช้สูตรการผลิตที่ มีระยะ เวลาในการ บ่มนาน คือ มี ต้นทุน

วัตถุดิบต่ำได้ด้วยเช่นกัน โดยคำตอบตั้งต้นจะระบุสูตรการผลิตของงานซ้อนทับซึ่งใช้สูตรการผลิตที่ 1 ทั้งหมด ระบุงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่งานซ้อนทับแต่ละงานใช้ในการผลิต และระบุตารางการผลิต ที่จะพัฒนาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกเพื่อให้ได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำที่สุด ซึ่งฮิวริสติกที่นำเสนอนี้ เริ่มต้นจากการให้งานซ้อนทับเลือกสูตรการผลิตใหม่ (Formula Selection) ที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำลง โดยจะพิจารณางานซ้อนทับทุกงานตามลำดับ และในแต่ละครั้งที่งานซ้อนทับนั้นเปลี่ยนสูตรการผลิตจะต้องตรวจสอบการจัดตารางการผลิต (Job Scheduling) เพื่อให้ ไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกัน และไม่มีงานใดที่เสร็จสิ้นการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงาน จากนั้นจะนำคำตอบที่ได้ไปพัฒนาสูตรการผลิต (Improvement) ด้วยการลดสูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานหนึ่งลง 1 สูตร แล้วเพิ่มสูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานอื่นๆขึ้น 1 สูตรทีละงาน ซึ่งหลังจากปรับสูตรการผลิตทุกครั้งก็จะต้องตรวจสอบการจัดตารางผลิต และถ้าได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ต่ำลงก็จะนำคำตอบใหม่ที่ได้แทนคำตอบเดิม โดยแสดงลำดับขั้นตอนของวิธีการฮิวริสติกดังนี้

Algorithm 1 Heuristics

1: **Notations**

2: s_b : Current best feasible solution

3:

4: Generate an initial feasible solution s_0

5: $s_b \longleftarrow$ **FormulaSelection** (s_0)

6: **for** each double layer job l **do**

7: $s' \longleftarrow$ **Improvement** (s)

8: **if** s' is better than s_b **then**

9: $s_b \longleftarrow s'$

10: **else**

11: **Return** s_b

จากลักษณะการผลิตซ้อนทับจะพบว่า ระยะเวลาการผลิต รวมจะขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ ถูกซ้อนทับ จาก ภาพที่ 4.2 แม้ว่างานซ้อนทับจะใช้สูตรการผลิตที่ 1 เหมือนกัน แต่ถ้าสูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่างต่างกันก็จะทำให้ระยะเวลา การผลิตรวมต่างกันด้วย นอกจากนี้เวลาการผลิตรวมยังขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ 4.1

โดยอ้างอิงข้อมูลระยะเวลาการผลิตและต้นทุนการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิตและสูตรการผลิตต่างๆจากตารางที่ 3.1 และในขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับจะใช้ระยะเวลาการผลิตน้อยกว่างานแผ่นพื้นชั้นล่าง 1 หน่วย ดังนั้นขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับจะใช้ระยะเวลาการผลิต 2 หน่วย

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาการผลิตของการผลิตงานซ้อนทับที่ใช้สูตรการผลิตต่างกัน

สูตรการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง	สูตรการผลิตของงานซ้อนทับ	ระยะเวลาการผลิต (หน่วย)
2	1	57
	2	69
	3	81
	4	105
	5	129
3	1	59
	2	69
	3	81
	4	105
	5	129
4	1	83
	2	83
	3	83
	4	105
	5	129
5	1	107
	2	107
	3	107
	4	107
	5	129

หมายเหตุ : จะไม่แสดงงานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 เนื่องจากไม่มีโอกาสผลิตงานซ้อนทับได้

4.3.2.1 **การพัฒนาการเลือกสูตรการผลิต** (Formula Selection Improvement)

4.3.2.1.1 **การเลือกสูตรการผลิต** (Formula Selection)

จากคำตอบเริ่มต้นที่งานซ้อนทับทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ 1 ที่มีระยะเวลาในการบ่มสั้นที่สุดแต่ก็มีต้นทุนวัตถุดิบสูงที่สุด ซึ่งวิธีการต่อจากนี้จะช่วยให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมของงานซ้อนทับมีค่าน้อยลงด้วยการให้งานซ้อนทับเลือกสูตรการผลิตที่มีต้นทุนวัตถุดิบต่ำลง โดยการเลือกสูตรการผลิตจะพิจารณาตามค่าความถ่วง (Transferring Weight) ซึ่งการเลือกสูตรการผลิตจะพิจารณางานซ้อนทับทีละงาน โดยเปลี่ยนไปใช้สูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมาก จากนั้นให้ตรวจสอบว่า มีระยะเวลาที่เหลือก่อนกำหนดเวลาส่งงานเพียงพอที่จะให้เปลี่ยนสูตรการผลิตหรือไม่ ซึ่งถ้ามีไม่มากพอก็จะพิจารณาสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากถัดไป แต่ถ้ามีมากพอก็จะนำไปจัดตารางการผลิตที่พิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกันของงานทุกงาน ซึ่งถ้าทุกงานไม่สามารถผลิตเสร็จทันกำหนดส่งงานก็ให้พิจารณาสูตรการผลิตที่มีค่าความถ่วงมากถัดไป แต่ถ้าผลิตเสร็จทันกำหนดส่งงานครบทุกงาน งานซ้อนทับนั้นก็ถูกเปลี่ยนสูตรการผลิต และคำนวณระยะ เวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบใหม่โดยคำนวณจากเวลาส่งงานหักออกด้วยเวลาเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตสุดท้ายของงานสุดท้ายในแม่แบบนั้น จากนั้นจะพิจารณางานซ้อนทับงานถัดไปในลักษณะเดียวกันนี้จนกระทั่งงานซ้อนทับงานสุดท้าย โดยลำดับขั้นตอนต่างๆของวิธีการนี้เป็นดังนี้

1: **procedure** FormulaSelection (s) ▶ s: current solution
2: **Notations**
3: T_k: Time remaining of mold k before due date
4: W_{ij} : Transferring weights for moving from formula i to formula j
5: $P(i)$: Processing time that select formula i
6:
7: **for** each double layer job l **do**
8: $i \leftarrow$ current job formula
9: Find formula $j'>i$ with largest $W_{ij'}$
10: **if** no such formula j' exists **then**
11: **break**
12: **else**

13: if $P(i)+T_k < P(j')$ then

14: $W'_{ij'} \leftarrow 0$

15: break

16: else

17: $i \longleftarrow j'$

18: Job Scheduling

19: if feasible then

20: $s \longleftarrow s'$

21: Compute all time remaining T_k

22: else

23 $W'_{ij'} \leftarrow 0$

24: $W'_{ij'} \leftarrow W_{ij'}$

25: Return new formula assignment s'

ค่าความถ่วงคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงกับระยะเวลาการผลิตรวมที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในการเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานซ้อนทับจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 2 โดยมีงานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 จะได้ค่าความถ่วงเท่ากับ (20-15) / (69-57) = 0.417 หรือถ้าเปลี่ยน จากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 3 จะได้ค่าความถ่วงเท่ากับ (20-13) / (81-57) = 0.292 เป็นต้น โดยแสดงค่าความถ่วงทั้งหมดดังตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตามจะมีบางกรณีที่ต้นทุนวัตถุดิบสามารถลดลงได้โดยที่ระยะเวลาในการผลิตไม่ได้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่าความถ่วงมีค่าประมาณไม่ได้ (Infinity) ซึ่งในตารางที่ 4.2 จะแสดงค่า ∞ โดยจะพบในกรณีที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และสูตรการผลิตที่ 5 เท่านั้น ยกตัวอย่าง เช่น ในกรณีที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และงานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 1 จะพบว่า งานซ้อนทับไม่สามารถเลือกสูตรการผลิตที่จะเปลี่ยนได้เนื่องจากค่าความถ่วงบางค่าไม่สามารถประเมินค่าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับค่าความถ่วงที่มีค่าประมาณไม่ได้ โดยให้สูตรการผลิต ที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานมีค่าความถ่วงสูงและสูตรการผลิตที่ ใช้ระยะเวลาในการบ่มสั้นกว่า มีค่าความถ่วงรองลงมา ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าความถ่วงของงานซ้อนทับ

สูตรการผลิตของงานพื้น	สูตรการผลิตของงานซ้อนทับ	2	3	4	5
2	1	0.417	0.292	0.250	0.108
3	1	0.5	0.318	0.261	0.214
4	1	∞	∞	0.545	0.326
5	1	∞	∞	∞	0.682

ตารางที่ 4.3 การปรับค่าความถ่วงในกรณีที่งานแผ่นพื้นชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และสูตรการผลิตที่ 5 เท่านั้น

สูตรการผลิตของงานพื้น	สูตรการผลิตของงานซ้อนทับ	2	3	4	5
4	1	0.900	1.000	0.545	0.326
5	1	0.800	0.900	1.000	0.682

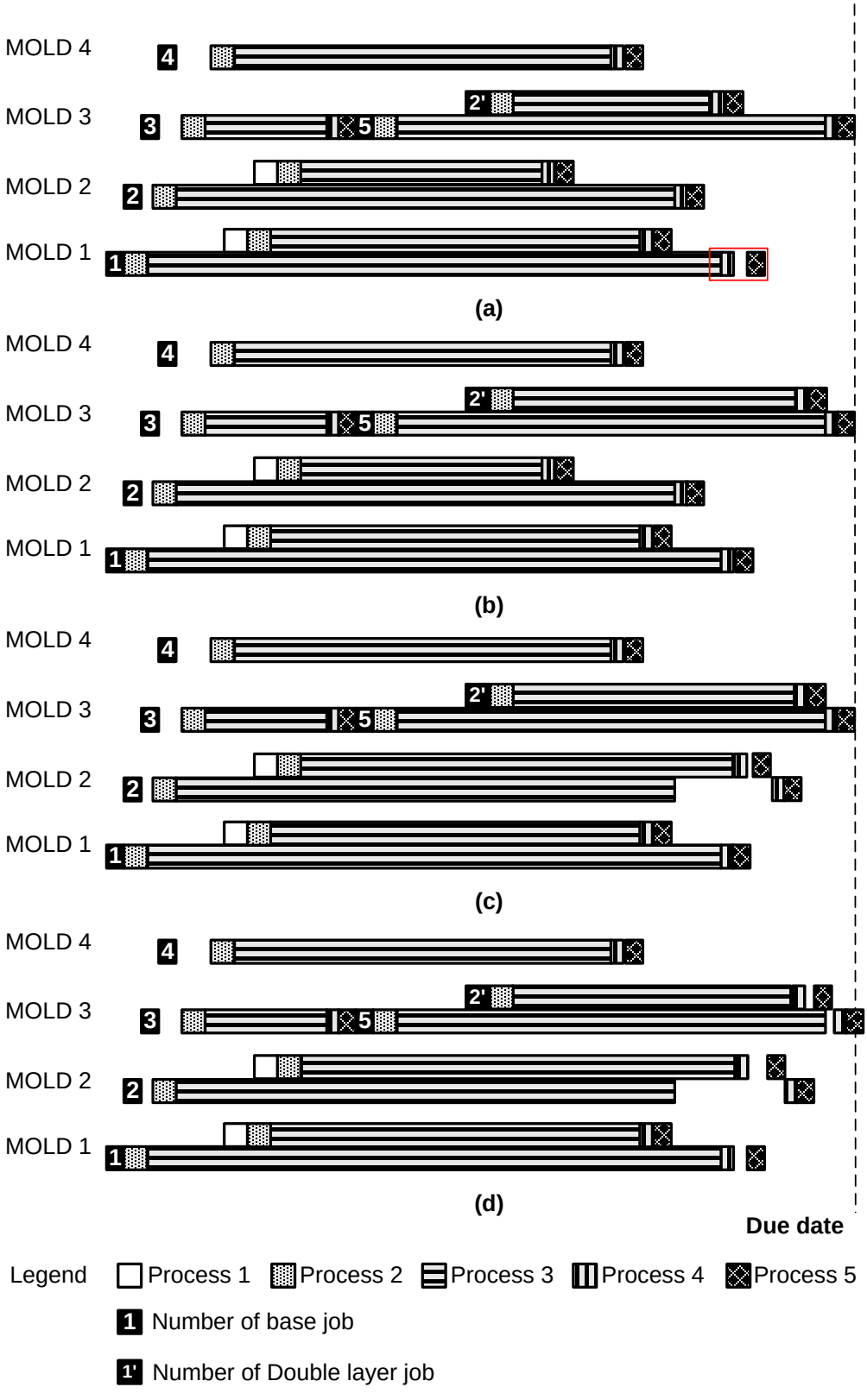
จากตัวอย่างดังกล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาขั้นตอนการหาจำนวนงานซ้อนทับแล้วจะได้งานซ้อนทับจำนวน 5 งาน ที่มีสูตรการผลิตคือ 1-1-1-1-1 โดยงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานที่ 5 ใช้งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4-6-7-1-5 ในการซ้อนทับตามลำดับและมีระยะ เวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานของแม่แบบที่ 1 ถึง แม่แบบที่ 4 เท่ากับ 0 หน่วย เท่ากับ 9 หน่วย เท่ากับ 4 หน่วย และเท่ากับ 46 หน่วยตามลำดับ โดยฮิวริสติกขั้นตอนนี้จะเริ่มพิจารณาจากงานซ้อนทับงานที่ 1 ซึ่งใช้งานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 4 ที่ใช้สูตรการผลิตที่ 5 และจากตารางที่ 4.3 จะพบว่า ค่าความถ่วงที่มีค่ามากที่สุดคือ การเปลี่ยนสูตรการผลิตจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 4 โดยใช้ระยะเวลาการผลิตเท่ากับ 107 หน่วย ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลรวมของระยะเวลาการผลิตเดิมกับระยะ เวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแม่แบบที่ คือ 153 (107+46) และจึงนำไปตรวจสอบความเป็นไปได้ของคำตอบด้วยการจัดตารางการผลิต ซึ่งก็พบว่า ไม่มีงานใดที่สิ้นสุดการผลิตเกินเวลาส่งงาน ดังนั้นงานซ้อนทับงานที่ 1 จึงเปลี่ยนสูตรการผลิตจากสูตรการผลิตที่ 1 เป็นสูตรการผลิตที่ 4 โดยจะได้สูตรการผลิตของงานซ้อนทับ คือ 4-1-1-1-1 จากนั้นจะคำนวณระยะเวลาที่เหลือก่อนถึงกำหนดเวลาส่งงานในแต่ละแม่แบบใหม่ คือ แม่แบบที่ 1 เท่ากับ 0 หน่วย แม่แบบที่ 2 เท่ากับ 9 หน่วย แม่แบบที่ 3 เท่ากับ 3 หน่วย และแม่แบบที่ 4 เท่ากับ 24 หน่วย และจะพิจารณางานซ้อนทับงานถัดไป คือ งานซ้อนทับงานที่ 2 โดยจะทำขั้นตอนต่างๆในลักษณะ

เดียวกันนี้ และเมื่อพิจารณาจนครบงานซ้อนทับทั้งหมดจะได้สูตรการผลิตคือ 4-4-3-3-3 ซึ่งมีต้นทุนวัตถุดิบรวมเท่ากับ 55 หน่วย

4.3.2.1.2 **การจัดตารางการผลิต** (Job Scheduling)

การจัดตารางการผลิตจะเป็นลักษณะการจัดตารางการผลิตเพียงบางส่วนเท่านั้น พิจารณาโดยเลื่อนขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างกลับเข้ามาเริ่มต้นการผลิตเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยไม่คำนึงถึงการใช้ทรัพยากรร่วมกัน จากนั้นทำการเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานซ้อนทับและจัดตารางการผลิตอีกครั้งหนึ่งโดยพิจารณาการใช้ทรัพยากรร่วมกัน วิธีการนี้กำหนดให้พิจารณาเฉพาะขั้นตอนการผลิตที่ 4 และขั้นตอนการผลิตที่ 5 เท่านั้น เนื่องจากการเลื่อนเวลาเริ่มต้นของขั้นตอนการผลิตอื่นๆมีโอกาสทำให้งานซ้อนทับเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้สูง

จากรูปที่ 4.5 ยกตัวอย่างการจัดตารางการผลิตเมื่องานซ้อนทับงานที่ 2 เปลี่ยนสูตรการผลิต โดยเริ่มต้นให้งานซ้อนทับงานที่ 2 เพิ่มระยะเวลาในการบ่มซึ่งส่งผลให้เวลาเริ่มต้นการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 4 และ 5 เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.5(b) แต่จากรูปที่ 4.5(a) จะพบว่า ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 1 ถูกเลื่อนเวลาเริ่มต้นการผลิตเนื่องจากการใช้ทรัพยากรซ้อนกันกับงานซ้อนทับงานที่ 2 ก่อนที่จะเปลี่ยนสูตรการผลิต ดังนั้นเมื่องานซ้อนทับงานที่ 2 เปลี่ยนสูตรการผลิตก็จะทำให้ไม่มีการใช้ทรัพยากรซ้อนกันกับงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 1 จึงให้ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 1 เริ่มต้นการผลิตหลังจากที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 เสร็จสิ้นดังรูปที่ 4.5(b) โดยการเลื่อนดังกล่าวจะทำให้งานซ้อนทับงานที่ 3 สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานขึ้นได้ดังรูปที่ 4.5(c) แต่ถ้าการเลื่อนดังกล่าวไม่ถูกเลื่อนกลับมา งานซ้อนทับงานที่ 3 ก็ไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตได้เนื่องจากงานแผ่นพื้นชั้นล่างงานที่ 5 เสร็จสิ้นการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงานดังรูปที่ 4.5(d)



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตงานซ้อนทับ

4.3.2.2 **การพัฒนาสูตรการผลิต** (Improvement)

จากวิธีการเปลี่ยนสูตรการผลิตดังกล่าวจะเห็นได้ว่า พิจารณาการเปลี่ยนสูตรการผลิตเพียงครั้งละ 1 งานเท่านั้น ซึ่งในบางกรณีการที่งานงานหนึ่งเปลี่ยนสูตรการผลิตอาจไปขัดขวางไม่ให้งานอื่นๆเปลี่ยนสูตรการผลิต ดังนั้นวิธีการนี้จึงพิจารณาให้ลดสูตรการผลิตงานซ้อนทับ งานหนึ่งลง 1 สูตรการผลิต และเพิ่มสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับงานอื่น ๆทีละงาน ขึ้น 1 สูตรการผลิต ซึ่งหลังจากปรับสูตรการผลิตทุกครั้งก็จะต้องจัดตารางการผลิต เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของสูตรการผลิตที่เปลี่ยน และเมื่อพิจารณาเพิ่มสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับจนครบทุกงานแล้ว ให้เปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบรวมใหม่ที่ได้ โดยถ้ามีค่าน้อยกว่าต้นทุนวัตถุดิบรวมเดิม ก็จะแทนสูตรการผลิตเดิม และจะ พิจารณาลดสูตรการผลิตงานถัด ไป โดยจะพิจารณาลักษณะเดียวกันนี้จนกระทั่งลดสูตรการผลิตงานซ้อนทับงานสุดท้ายจึงจะหยุดฮิวริสติกวิธีการนี้ ซึ่งลำดับขั้นตอนต่างๆของวิธีการนี้ เป็นดังนี้

1: **procedure** Improvement ▶ s: current solution
2: **Notations**
3: s_b: Current best feasible solution
4: TC: Total cost
5:
6: **for** each double layer job l **do**
7: Modify s' by assigning a formula with one step shorter curing time to l
8: **for** each double layer job l' **do**
9: Modify s' by assigning a formula with one step longer curing time to l'
10: **if** feasible **then**
11: $s \longleftarrow s'$
12: **if** $TC' < TC$ **then**
13: $s_b \longleftarrow s$
14: **Return** s_b

จากตัวอย่าง ดังกล่าว ข้างต้นเมื่อพิจารณางานซ้อนทับ งานที่ 1 ให้ลดสูตรการผลิตลง 1 สูตร จะได้สูตรการผลิตของงานซ้อนทับคือ 3-4-3-3-3 จากนั้นให้เพิ่มสูตรการผลิตงานซ้อนทับงาน

ที่ 2 ก่อน (ไม่ใช่งานซ้อนทับงานที่ 1 เนื่องจากงานซ้อนทับงานที่ 1 เป็นงานที่ถูกลดสูตรการผลิต) โดยงานซ้อนทับงานที่ 2 จะถูกเปลี่ยนสูตรการผลิตเป็นสูตรการผลิตที่ 5 ซึ่งเมื่อ นำมาจัดตาราง การผลิตแล้วพบว่า จะมีงานเสร็จสิ้นการผลิตเกินกำหนดเวลาส่งงาน ดังนั้นจึงไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับงานที่ 2 ซึ่งจะต้องพิจารณาเพิ่มสูตรการผลิต ของงานซ้อนทับงาน ถัดไป แล้วนำมาจัดตารางการผลิต โดยจะพิจารณาเช่นนี้ จนกระทั่งงาน ซ้อนทับงาน สุดท้าย คือ งาน ซ้อนทับงานที่ 1 ซึ่งก็คืองาน ซ้อนทับ ที่ถูกลดสูตรการผลิต ในตอนแรก ซึ่งผลคำตอบสุดท้ายจะได้ต้นทุน วัตถุดิบรวมเท่าเดิม ดังนั้น จึงไม่นำสูตรการผลิตที่ได้นี้แทนสูตรการผลิตเดิ ม จากนั้นให้พิจารณาลดสูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 2 ต่อไปแล้วพิจารณาเช่นนี้จนกระทั่งพิจารณาลดสูตรการผลิตงานซ้อนทับงานสุดท้าย ซึ่งจะได้สูตรการผลิตใหม่คือ 5-4-4-3-2 โดยมีต้นทุน วัตถุดิบรวมเท่ากับ 49 หน่วย ซึ่งลดลงจากเดิม 6 หน่วย

4.4 ผลการวิจัย

ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผล ได้กำหนด ขนาดปัญหาออกเป็น 3 ขนาด ตามจำนวนแม่แบบที่ใช้คือ 2 แม่แบบ 4 แม่แบบ และ 8 แม่แบบ ซึ่งมีทั้งหมด 38 ปัญหา โดยแต่ละปัญหาจะมีจำนวนงานแผ่นพื้นชั้นล่างแตกต่างกันและเมื่อใช้วิธีการหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุด จะทำให้แต่ละปัญหาทราบถึงจำนวนงานซ้อนทับที่จะต้องผลิต โดยจะนำค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้จากฮิวริสติกในแต่ละปัญหามาเปรียบเทียบกับค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตารางที่ 3 แสดงผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ได้ทุกปัญหาและฮิวริสติกที่นำเสนอก็สามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดทุกปัญหาด้วยเช่นกัน

สำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบ แสดงในตารางที่ 4 พบว่า มีจำนวน 3 ปัญหาจากทั้งหมด 14 ปัญหาที่ไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ แต่ 3 ปัญหาดังกล่าวก็สามารถพบค่าที่ดี (Best Found Solution) โดยฮิวริสติกที่นำเสนอนั้นไม่สามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดหรือค่าที่ดีจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 4 ปัญหา โดยมีผลต่างไม่เกิน ร้อยละ 7.30 แต่อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบนั้นน้อยกว่ามาก

ตารางที่ 4.4 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบของการผลิตซ้อนทับ

Prob.	# base jobs	# double layer jobs	Math model		Heuristics	
			Optimal	Runtime (sec)	Objective	Runtime (sec)
1	3	3	31	0.02	31	0.63
2	4	3	34	0.01	34	0.66
3	5	3	46	0.02	46	0.68
4	6	3	60	0.03	60	0.03
5	7	2	40	0.03	40	0.02
6	8	8	115	71.40	115	2.57
7	9	8	118	0.28	118	2.47
8	10	6	87	0.27	87	2.00
9	11	4	52	0.09	52	1.33
10	12	4	68	0.31	68	0.95

สำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบ แสดงในตารางที่ 5 พบว่า มีเพียง 2 ปัญหาจากทั้งหมด 14 ปัญหาที่ได้ค่าที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า มี 3 ปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งกำหนดเวลาในการค้นหาคำตอบไว้ 8 ชั่วโมง ไม่สามารถหาคำตอบได้เลย (No Feasible Solutions) โดยฮิวริสติกที่นำเสนอมี 2 ปัญหาที่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาตร์ โดยดีกว่ามากที่สุดถึงร้อยละ 17.54 อย่างไรก็ตามในบางปัญหาฮิวริสติกก็หาคำตอบได้แย่กว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีผลต่างมากที่สุดไม่เกินร้อยละ 17

นอกจากนี้จากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการแก้ปัญหากับการผลิตมีจำนวนแม่แบบและจำนวนงานซ้อนทับไม่มาก คือ ในปัญหาที่มีเพียง 2 แม่แบบ และในปัญหาที่มี 4 แม่แบบโดยที่มีจำนวนงานซ้อนทับน้อยกว่า 10 งาน ส่วนในปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่มีจำนวนงานอย่างน้อย 10 งาน และปัญหา ที่มี 8 แม่แบบนั้น ฮิวริสติกจะมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานมากและผลลัพธ์ก็เป็นที่น่าพอใจคือ ได้ต้นทุนวัตถุดิบรวมแย่กว่าแบบจำลองทางคณิตศาตร์ มากที่สุด ไม่เกินร้อยละ 17

ตารางที่ 4.5 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบของการผลิตซ้อนทับ

Prob.	# base jobs	# double layer jobs	Math model		Heuristics	
			Optimal	Runtime (sec)	Objective	Runtime (sec)
11	6	5	44	0.05	44	0.92
12	7	5	49	0.34	49	1.42
13	8	6	82	1.25	82	2.46
14	9	5	74	1.00	74	1.79
15	10	5	81	0.09	81	1.58
16	12	1	20	0.02	20	0.02
17	13	2	40	0.09	40	0.02
18	14	1	20	0.02	20	0.02
19	14	13	(141)*	8hr	151	27.09
20	17	13	(177)*	8hr	177	27.96
21	19	12	(178)*	7533.21	191	39.43
22	22	9	144	523.40	153	15.45
23	24	5	72	1.34	74	4.04
24	26	3	60	0.42	60	0.69

( )* หมายถึง ค่าที่ได้นั่นไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดแต่เป็นค่าที่ดีที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบ

ตารางที่ 4.6 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบของการผลิตซ้อนทับ

Prob.	# base jobs	# double layer jobs	Math model		Heuristics	
			Optimal	Runtime (sec)	Objective	Runtime (sec)
25	10	9	(144)*	12559.05	94	10.00
26	12	8	(93)*	8808.10	93	14.38
27	14	7	(97)*	8271.91	99	10.45
28	16	3	43	1763.87	46	2.03
29	18	4	(61)*	8hr	58	4.90
30	20	2	(30)*	8hr	35	3.45
31	26	1	(20)*	8hr	20	0.02
32	25	19	-	8hr	309	414.56
33	28	17	(214)*	8hr	241	230.23
34	32	11	(187)*	8hr	192	77.87
35	36	12	-	8hr	228	113.02
36	41	9	-	8hr	163	64.35
37	45	4	(54)*	8hr	54	21.65
38	49	1	13	55.04	13	1.41

( )* หมายถึง ค่าที่ได้นั่นไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดแต่เป็นค่าที่ดีที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบ

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปเกี่ยวกับสภาพปัญหาของงานวิจัย วิธีการแก้ปัญหา ผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่การผลิตประกอบไปด้วยแม่แบบหลายอันซึ่งวางเรียงกันอย่างขนานและอยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานจะต้องผลิตขั้นตอนการผลิตต่างๆให้เสร็จสิ้นภายในแม่แบบเดียวกัน โดยระยะเวลาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตที่ใช้ ซึ่งสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานจะมีต้นทุนวัตถุดิบน้อยกว่าสูตรการผลิตที่ใช้ระยะเวลาการบ่มสั้น นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตต่างๆยังต้องการทรัพยากรเฉพาะที่ต้องใช้ร่วมกันระหว่างแม่แบบ และต้องผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปทุกงานให้ทันกำหนดเวลาส่งงาน เพราะฉะนั้นในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปจะต้องเลือกสูตรการผลิตให้กับคอนกรีตสำเร็จรูปแต่ละงานและจัดตารางการผลิตที่พิจารณาลำดับขั้นตอนการผลิตและการใช้ทรัพยากรร่วมกัน เพื่อให้การผลิตมีต้นทุนวัตถุดิบรวมน้อยที่สุดและทุกงานเสร็จทันกำหนดเวลาส่งงาน โดยในการผลิตที่ให้งานทุกงานเลือกใช้สูตรการผลิตเดียวกันทั้งหมดแม้ว่าจะง่ายต่อการจัดตารางการผลิตแต่ต้นทุนวัตถุดิบรวมที่ได้ยังไม่ดีพอ หรือการให้งานแต่ละงานมีการเลือกใช้สูตรการผลิตที่หลากหลายเพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำ แต่ถ้าไม่มีวิธีการจัดตารางการผลิตที่ดีพอก็ไม่สามารถผลิตงานทุกงานให้เสร็จทันกำหนดเวลาส่งงานได้ อย่างไรก็ตามการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปยังเพิ่มกำลังการผลิตให้เกิดการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรมากขึ้น ด้วยวิธีการผลิตซ้อนทับ ซึ่งเป็นการผลิตที่นำผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง เช่น เสาเข็ม (Column) มาผลิตซ้อนทับบนผลิตภัณฑ์อีกชนิดหนึ่ง เช่น แผ่นพื้น (Floor Stabs) โดยใช้แม่แบบเดียวกันในการผลิตและในแต่ละขั้นตอนการผลิตจะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกันด้วยเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ส่วน โดยปัญหาส่วนแรกศึกษาวิธีการในการเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตเพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำที่สุดซึ่งยังไม่มีการผลิตซ้อนทับ และปัญหาส่วนที่สองซึ่งนำผลคำตอบจากปัญหาส่วนแรกไม่ว่าจะเป็นสูตรการผลิต ตารางการผลิต และลำดับการผลิตมาศึกษาวิธีการเพิ่มกำลังการผลิตโดยการหาจำนวน

งานซ้อนทับมากที่สุดและวิธีการเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตให้กับงานซ้อนทับเพื่อให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมต่ำที่สุด

ปัญหาในส่วนแรกการผลิตจะกำหนดจำนวนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ต้องผลิตและเวลาส่งงานที่คอนกรีตสำเร็จรูปทุกงานต้องผลิตให้ทัน โดยจะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดแต่จะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดในกรณีที่การผลิตมี 2 แม่แบบและ 4 แม่แบบในบางปัญหาเท่านั้น ซึ่งในกรณีที่การผลิตมีแม่แบบมากกว่านั้นจะมีความซับซ้อนของปัญหามากทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้และใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบนาน โดยนานที่สุดเป็นระยะเวลามากถึง 20 ชั่วโมง ฉะนั้นจึงนำวิธีการฮิวริสติกเข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบที่ใช้เวลาค้นหาน้อยลงและยังคงให้ผลคำตอบใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวิธีการฮิวริสติกที่นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบจะนำเทคนิคต่างๆ เช่น การสร้างคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีละโมบ การหาคำตอบท้องถิ่น กลไกการแปรเปลี่ยน เป็นต้น มาประยุกต์ใช้โดยพิจารณาร่วมกันกับลักษณะของปัญหาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปไม่ว่าจะเป็นการสลับลำดับการผลิตของแม่แบบ วิธีการจัดตารางการผลิตโดยไม่ให้มีการซ้อนทับกันของทรัพยากร วิธีการเลือกสูตรการผลิตให้กับงาน เพื่อให้คอนกรีตสำเร็จรูปทุกงานสามารถเลือกสูตรการผลิตที่ให้ต้นทุนวัตถุดิบรวมน้อยที่สุด โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติกกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ฮิวริสติกสามารถหาค่าได้เท่ากับค่าที่ดีที่สุดในปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้ โดยใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบมากที่สุดไม่เกิน 1 วินาที ส่วนปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ก็จะทำการเปรียบเทียบกับค่าขอบเขตล่าง (Lower Bound) ซึ่งหาจากการนำแบบจำลองทางคณิตศาตร์โดยไม่พิจารณาเงื่อนไขการใช้ทรัพยากรร่วมกันของแม่แบบในทุกขั้นตอนการผลิต(อาจเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้) โดยพบว่า ในปัญหาที่การผลิตมี 4 แม่แบบ ฮิวริสติกจะให้ผลต่างแย่กว่าค่าขอบเขตล่างไม่เกินร้อยละ 1 และสำหรับปัญหาที่การผลิตมี 8 แม่แบบ ฮิวริสติกจะให้ผลต่างแย่กว่าค่าขอบเขตล่างไม่เกินร้อยละ 5.3 ซึ่งฮิวริสติกจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากที่สุดเพียง 17 วินาที

สำหรับปัญหาในส่วนที่สองนั้นจะนำผลคำตอบที่ได้จากปัญหาส่วนแรก คือ สูตรการผลิต ตารางการผลิต และลำดับการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง โดยไม่สามารถเปลี่ยนแปลงการจัดสรรงานแผ่นพื้นชั้นล่างให้กับแม่แบบ สูตรการผลิต และลำดับการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่างได้ แต่จะสามารถเปลี่ยนแปลงตารางการผลิตได้ มาพิจารณาสร้างฮิวริสติกสำหรับการหาจำนวนงานซ้อนทับให้มากที่สุด จากนั้นจะเลือกสูตรการผลิตให้กับงานซ้อนทับ โดยนำแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติกมาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งจะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่การผลิตที่มีจำนวน 2 แม่แบบ และ 4 แม่แบบที่มีจำนวนงานซ้อนทับน้อยกว่า 10 งาน เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานซึ่งมากที่สุดเพียง 9 นาที และสามารถให้คำตอบที่ดีที่สุดได้ ส่วนปัญหาที่การผลิตมีจำนวน 4 แม่แบบซึ่งมีจำนวนงานซ้อนทับอย่างน้อย 10 งาน และการผลิตที่มีจำนวน 8 แม่แบบ พบว่า ปัญหามีความซับซ้อนมากเป็นผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เมื่อจำกัดเวลาการค้นหาคำตอบไว้ที่ 8 ชั่วโมง ดังนั้นวิธีการฮิวริสติกจึงมีความเหมาะสมมากกว่าซึ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานที่สุดเพียง 7 นาที โดยให้ผลคำตอบต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 17

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การผลิตในกรณีที่มีการผลิตซ้อนทับจะพบว่า บางปัญหาไม่สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาคำตอบที่เป็นไปได้ (No Feasible Solution) เป็นผลให้ไม่มีประโยชน์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฮิวริสติก ซึ่งการสร้างวิธีการหาค่าขอบเขตล่างเพื่อใช้เปรียบเทียบผลกับฮิวริสติกจึงมีความสำคัญ นอกจากนี้จากผลของฮิวริสติกที่ได้ค่าต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร้อยละ 17 พบว่า เกิดจากวิธีการจัดตารางการผลิต และการเรียงลำดับของแม่แบบในการผลิต ซึ่งจะต้องพัฒนาวิธีการทั้งสองอย่างนี้เพื่อให้คำตอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากขึ้น
2. การพัฒนาวิธีในการค้นหาคำตอบที่พิจารณาสถานการณ์ในการผลิตจริงมากขึ้น เช่น การพิจารณากรณีที่มีการเปลี่ยนจำนวนคอนกรีตสำเร็จรูปในการผลิต การพิจารณาในการซ่อมบำรุงแม่แบบและทรัพยากร การพิจารณาระยะเวลาที่เหลือจากแผนการผลิตครั้งก่อนในการวางแผนการผลิตครั้งต่อไป เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปารเมศ ชุติมา. เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2546.

สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล. การออกแบบและวิเคราะห์อัลกอริทึม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ศานสุทธาการพิมพ์, 2549.

ภาษาอังกฤษ

Benjaoran, V., Dawood, N. and Hobbs, B. Flowshop scheduling model for bespoke precast concrete production planning. Construction Management and Economics 23 (2005): 93-105.

Chan, W.T. and Hu, H. Constraint programming approach to precast production scheduling. Journal of Construction Engineering and Management 128(6) (2002): 513-520.

Chen, Z.L. Simultaneous job scheduling and resource allocation on parallel machines. Annals of Operations Research 129 (2004): 135-153.

Daniels, R.L., Hoopes, B.J. and Mazzola, J.B. Scheduling parallel manufacturing cells with resource flexibility. Management Science 42 (1996): 1260-1276.

Daniels, R.L., Hua, S.Y. and Webster, S. Heuristics for parallel-machine flexible-resource scheduling problems with unspecified job assignment. Computer and Operations research 26 (1999): 143-155.

Edis, E.B., Araz, C. and Ozkarahan, I. Lagrangian-based solution approaches for a resource-constrained parallel machine scheduling problem with machine eligibility restrictions. IEA/AIE (2008): 337-346.

Edis, E.B. and Ozkarahan, I. A combined integer/constraint programming approach to a resource-constrained parallel machine scheduling problem with machine eligibility restrictions. Engineering Optimization 43(2) (2011): 135-157.

Grabowski, J. and Pempera, J. Sequencing of jobs in some production system. European Journal of Operational Research 125 (2000): 535-550.

Grigoriev, A., Sviridenko, M. and Uetz, M. Machine scheduling with resource dependent processing times. Mathematical Programming B 110 (2007): 209-228.

Hu, H. and Chan, W.T. A hybrid GA-CP approach for production scheduling. Journal of Construction Engineering and Management 128(6) (2009): 513-520.

Jansen, K. and Mastrolilli, M. Approximation schemes for parallel machine scheduling problems with controllable processing times. Computer and Operations research 31 (2004): 1565-1581.

Kellerer, H. An approximation algorithm for identical parallel machines scheduling with resource dependent processing times. Operations Research Letters 36 (2008): 157-159.

Kellerer, H. and Strusevich, V.A. Scheduling problems for parallel dedicated machines under multiple resource constraints. Discrete Applied Mathematics 133 (2004): 45-68.

Ko, C. An integrated framework for reducing precast fabrication inventory. Journal of Civil Engineering and Management 16(3) (2010): 418-427.

Ko, C. and Wang, S. GA-based decision support systems for precast production planning. Automation in Construction 19 (2010): 907-916.

Leu, S.S. and Hwang, S.T. Optimal repetitive scheduling model with shareable resource constraint. Journal of Construction Engineering and Management 127 (2001): 270-280.

Leu, S.S. and Hwang, S.T. GA-based resource-constrained flow-shop scheduling moldel for mixed precast production. Automation in Construction 11 (2002): 439-452.

Li, S. H.A., Tserng, H.P., Yin, S.Y.L. and Hsu, C. A production modeling with genetic algorithms for a stationary pre-cast supply chain. Expert Systems with Application 37 (2010): 8406-8416.

Pinedo, M. Scheduling theory: algorithms and systems. New Jersey: Prentice hall, 1995.

Ruiz-Torres, A.J. and Centeno, G. Scheduling with flexible resources in parallel workcenters to minimize maximum completion time. Computers & Operations research 34 (2007): 48-69.

Ruiz-Torres, A.J., Lopez, F.J. and Ho, J.C. Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs. European Journal of Operational Research 179 (2007): 302-315.

Silver, E.A. An overview of heuristic solution methods. Journal of the Operational Research Society 55 (2004): 936-956.

Su, L. and Lien, C. Scheduling parallel machines with resource-dependent processing times. International Journal Production Economics 117 (2009): 256-266.

Ventura, J.A. and Kim, D. Parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and additional resource constraints. Computer & Operations Research 30 (2003): 1945-1958.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างผลการคำนวณฮิวริสติกในกรณีไม่มีการผลิตซ้อนทับที่มี 4 แม่แบบ

ก.1 ขนาดปัญหาที่มี 4 แม่แบบ

ก.1.1 ปัญหาที่ 15

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 6 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-2-5-5-4-5
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 46
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.1

ตารางที่ ก.1.1 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 15

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	113	114
4	9	18	22	118	119
5	83	86	90	162	163
6	52	55	59	155	156

ก.1.2 ปัญหาที่ 16

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 7 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-2-2-5-4-5-5
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 61
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.2

ตารางที่ ก.1.2 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 16

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	118	119
5	83	86	90	162	164
6	52	55	59	155	156
7	57	60	64	160	161

ก.1.3 ปัญหาที่ 17

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 8 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-2-2-4-4-5-5-3
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 77
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.3

ตารางที่ ก.1.3 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 17

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	94	95
5	83	86	90	162	164
6	52	55	59	155	157

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
7	57	60	64	160	161
8	98	101	105	153	154

ก.1.4 ปัญหาที่ 18

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 9 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 3-4-2-4-2-4-5-3-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 2-3-1-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 100
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.4

ตารางที่ ก.1.4 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 18

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	6	13	17	65	66
2	0	3	7	79	80
3	3	8	12	48	49
4	9	18	22	94	95
5	69	72	76	112	113
6	83	86	90	162	163
7	52	55	59	155	157
8	98	101	105	153	154
9	116	119	123	159	160

ก.1.5 ปัญหาที่ 19

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 10 งาน

- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 3-3-4-4-2-2-4-3-2-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 3-1-2-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 123
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.5

ตารางที่ ก.1.5 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 19

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	3	8	12	60	61
2	6	13	17	65	66
3	0	3	7	79	80
4	9	18	22	94	95
5	64	67	71	107	108
6	69	72	76	112	113
7	83	86	90	162	163
8	98	101	105	153	154
9	111	114	118	154	157
10	116	119	123	159	160

ก.1.6 ปัญหาที่ 20

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 12 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-3-2-2-3-2-2-2-3-2-3-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-3-2-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 172
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.6

ตารางที่ ก.1.6 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 20

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	6	13	17	65	66
3	3	8	12	48	49
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	102	103
6	69	72	76	112	113
7	52	55	59	95	96
8	62	65	69	105	106
9	106	109	113	161	165
10	116	119	123	159	162
11	99	102	106	154	156
12	109	114	118	155	159

ก.1.7 ปัญหาที่ 21

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 13 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-3-3-2-2-2-2-2-1-2-2-2-1
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 201
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.7

ตารางที่ ก.1.7 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 21

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	60	62
3	6	13	17	65	66
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	90	91
6	65	70	74	110	111
7	69	75	79	115	116
8	62	65	69	105	106
9	94	97	101	125	126
10	114	117	121	157	158
11	119	122	126	162	164
12	109	112	116	152	153
13	129	132	136	160	161

ก.1.8 ปัญหาที่ 22

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 14 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-2-3-2-2-1-2-2-1-1-2-2-1-1
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 233
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.8

ตารางที่ ก.1.8 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 22

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	65	66
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	90	91
6	52	55	59	83	84
7	69	72	76	112	113
8	62	65	69	105	106
9	94	97	101	125	126
10	87	90	94	118	119
11	116	119	123	159	160
12	109	112	116	152	153
13	129	132	136	160	163
14	122	125	129	153	156

ก.1.9 ปัญหาที่ 23

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 15 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 168 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-2-2-2-1-1-1-2-1-1-1-3-2-1-1
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 263
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.9

ตารางที่ ก.1.9 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 23

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	78	79
6	52	55	59	83	84
7	57	60	64	88	89
8	62	65	69	105	106
9	82	85	89	113	114
10	87	90	94	118	119
11	92	95	99	123	124
12	109	112	116	164	165
13	117	120	124	160	162
14	122	125	129	153	154
15	127	130	134	158	159

ก.1.10 ปัญหาที่ 24

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 14 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-2-5-5-4-4-5-5-4-4-5-4-4-5
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 101
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.10

ตารางที่ ก.1.10 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 24

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	113	114
4	9	18	22	118	119
5	83	86	90	162	163
6	52	55	59	131	132
7	117	120	124	220	221
8	122	125	129	225	226
9	166	169	173	245	246
10	135	138	142	214	215
11	224	227	231	327	328
12	229	232	236	308	309
13	249	252	256	328	331
14	218	221	225	321	322

ก.1.11 ปัญหาที่ 25

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 17 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-4-2-2-4-4-4-4-3-4-4-4-2-4-5-5-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 2-3-1-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 163
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.11

ตารางที่ ก.1.11 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 25

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	6	13	17	89	90
2	0	3	7	79	80
3	3	8	12	48	49
4	9	18	22	58	59
5	93	96	100	172	173
6	83	86	90	162	163
7	52	55	59	131	132
8	62	65	69	141	142
9	176	179	183	231	232
10	166	169	173	245	246
11	135	138	142	214	215
12	145	148	152	224	225
13	235	238	242	278	279
14	249	252	256	328	329
15	218	221	225	321	322
16	228	231	235	331	332
17	282	285	289	325	326

ก.1.12 ปัญหาที่ 26

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 19 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-4-3-4-4-4-4-4-4-3-3-4-4-2-2-2-4-2-2-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3

- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 4-1-2-3
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 209

- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.12

ตารางที่ ก.1.12 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 26

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	3	8	12	84	85
2	6	13	17	89	90
3	9	18	22	70	71
4	0	3	7	79	80
5	88	91	95	167	168
6	93	96	100	172	173
7	74	77	81	153	154
8	83	86	90	162	163
9	171	174	178	226	227
10	176	179	183	231	232
11	157	160	164	236	237
12	166	169	173	245	246
13	230	233	237	273	274
14	235	238	242	278	279
15	240	243	247	283	284
16	249	252	256	328	329
17	277	280	284	320	321
18	282	285	289	325	326
19	287	290	294	330	332

ก.1.13 ปัญหาที่ 27

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 22 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ3-4-3-3-4-2-4-4-2-2-2-4-2-2-2-2-2-2-4-2-2-2

- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2

- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4

- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 282

- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.13

ตารางที่ ก.1.13 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 27

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	55	56
2	3	8	12	84	85
3	6	13	17	65	66
4	9	18	22	70	71
5	59	62	66	138	139
6	88	91	95	131	132
7	69	72	76	148	149
8	74	77	81	153	154
9	142	145	149	185	186
10	135	138	142	178	179
11	152	155	159	195	196
12	157	160	164	236	237
13	189	192	196	232	233
14	182	185	189	225	226
15	199	202	206	242	243
16	240	244	248	284	285
17	236	239	243	279	280
18	229	232	236	272	273
19	246	249	253	325	326
20	288	291	295	331	332

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
21	283	286	290	326	329
22	276	279	283	319	320

ก.1.14 ปัญหาที่ 28

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 24 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-4-2-2-2-2-3-4-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-4-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 3-1-2-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 330
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.14

ตารางที่ ก.1.14 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 28

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	3	8	12	84	85
2	6	13	17	89	90
3	0	3	7	43	44
4	9	18	22	58	59
5	88	91	95	131	132
6	93	96	100	136	137
7	47	50	54	102	103
8	62	65	69	141	142
9	135	138	142	178	179
10	140	143	147	183	184

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
11	106	109	113	149	150
12	145	148	152	188	189
13	182	185	189	225	226
14	187	190	194	230	231
15	153	156	160	196	197
16	192	195	199	235	236
17	229	232	236	272	273
18	234	237	241	277	278
19	200	203	207	243	244
20	239	242	246	282	283
21	276	279	283	319	320
22	281	284	288	324	325
23	247	250	254	326	328
24	286	289	293	329	331

ก.1.15 ปัญหาที่ 29

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 26 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-2-3-3-2-2-3-3-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-3-2-2-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 380
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.15

ตารางที่ ก.1.15 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 29

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	65	66
4	9	18	22	70	71
5	47	50	54	90	91
6	52	55	59	95	96
7	69	72	76	124	125
8	74	77	81	129	130
9	94	97	101	137	138
10	99	102	106	142	143
11	128	131	135	171	172
12	133	136	140	176	177
13	141	144	148	184	185
14	146	149	153	189	190
15	175	178	182	218	219
16	180	183	187	223	224
17	188	191	195	231	232
18	193	196	200	236	237
19	222	225	229	265	266
20	227	230	234	270	271
21	235	238	242	278	279
22	240	243	247	283	284
23	269	272	276	324	325
24	274	277	281	317	318
25	282	285	289	325	328
26	287	290	294	330	331

ก.1.16 ปัญหาที่ 30

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 29 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-1-2-2-2-1-2-2-1-1-1-1-2-1
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 470
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.16

ตารางที่ ก.1.16 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 30

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	90	91
6	52	55	59	95	96
7	57	60	64	100	101
8	62	65	69	105	106
9	94	97	101	137	138
10	99	102	106	142	143
11	104	107	111	147	148
12	109	112	116	152	153
13	141	144	148	184	185
14	146	149	153	189	190
15	151	154	158	194	195

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
16	156	159	163	199	200
17	188	191	195	219	220
18	193	196	200	236	237
19	198	201	205	241	242
20	203	206	210	246	247
21	223	226	230	254	255
22	240	243	247	283	285
23	245	248	252	288	289
24	250	253	257	281	282
25	258	261	265	289	292
26	288	293	297	321	322
27	292	298	302	326	327
28	285	288	292	328	330
29	295	303	307	331	333

ก.1.17 ปัญหาที่ 31

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 31 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-1-1-2-1-1-1-2-1-1-1-1-1-1-1-1-2-1-1-2
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-3-4-2
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 535
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก .1.17

ตารางที่ ก.1.17 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 31

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	9	18	22	58	59
3	3	8	12	48	49
4	6	13	17	53	54
5	47	50	54	90	91
6	62	65	69	105	106
7	52	55	59	95	96
8	57	60	64	100	101
9	94	97	101	137	138
10	109	112	116	152	153
11	99	102	106	142	143
12	104	107	111	147	148
13	141	144	148	184	185
14	156	159	163	187	188
15	146	149	153	177	178
16	151	154	158	194	195
17	188	191	195	219	220
18	191	196	200	224	225
19	181	184	188	212	213
20	198	201	205	241	242
21	223	226	230	254	255
22	228	231	235	259	260
23	216	219	223	247	248
24	245	248	252	276	277
25	258	261	265	289	290
26	263	266	270	294	295

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
27	251	254	258	282	283
28	280	283	287	323	324
29	293	296	300	324	327
30	298	301	305	329	330
31	286	289	293	330	333

ก.1.18 ปัญหาที่ 32

- จำนวนคอนกรีตสำเร็จรูป เท่ากับ 34 งาน
- เวลาส่งงาน เท่ากับ 336 หน่วย
- สูตรการผลิตงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-1-2-2-1-1-2-2-1-1-2-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-2-1-1
- แม่แบบที่งานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายใช้ในการผลิต คือ 1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2-3-4-1-2
- ลำดับแม่แบบในการผลิต คือ 1-2-3-4
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 645
- เวลาเริ่มต้นการผลิต ดังตารางที่ ก.1.18

ตารางที่ ก.1.18 เวลาเริ่มต้นการผลิตของปัญหาที่ 32

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	36	37
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	78	79
6	40	43	47	71	72
7	57	60	64	100	101

งาน	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
8	62	65	69	105	106
9	82	85	89	113	114
10	75	78	82	106	109
11	104	107	111	147	149
12	109	112	116	140	141
13	117	122	126	150	152
14	112	117	121	145	146
15	152	157	161	185	186
16	144	147	151	175	176
17	155	162	166	190	191
18	149	152	156	180	181
19	189	192	196	220	221
20	179	182	186	210	211
21	194	197	201	225	226
22	184	187	191	215	216
23	224	227	231	255	256
24	214	217	221	245	246
25	229	232	236	260	261
26	219	222	226	250	251
27	259	262	266	290	291
28	249	252	256	280	281
29	264	267	271	295	296
30	254	257	261	285	286
31	294	297	301	325	326
32	284	287	291	327	329
33	299	302	306	330	332
34	289	292	296	320	321

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างผลการคำนวณฮิวริสติกในกรณีมีการผลิตซ้อนทับที่มี 4 แม่แบบ

ข.2 ขนาดปัญหาที่มี 4 แม่แบบ

ข.1.1 ปัญหาที่ 11

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 15
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 5
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 3-4-6-1-5
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 5-5-4-3-3
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 44
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.1
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.2

ตารางที่ ข.1.1 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 11

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	135	141
4	9	18	22	141	144
5	83	86	90	162	163
6	52	55	59	155	156

ตารางที่ ข.1.2 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 11

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	29	31	35	131	132
2	34	36	40	136	137
3	71	73	77	149	150
4	19	23	27	75	76
5	102	104	108	156	159

ข.1.2 ปัญหาที่ 12

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 16
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 5
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 4-6-7-1-5
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 5-4-4-3-2
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 49
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.3
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.4

ตารางที่ ข.1.3 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 12

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	141	142
5	83	86	90	162	164
6	52	55	59	155	158
7	57	60	64	160	161

ตารางที่ ข.1.4 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 12

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	34	36	40	136	137
2	71	73	77	149	150
3	76	78	82	154	155
4	19	23	27	75	76
5	102	104	108	144	145

ข.1.3 ปัญหาที่ 13

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 17
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 6
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 6-7-4-1-5-8
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-3-3-3-2-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 82
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.5
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.6

ตารางที่ ข.1.5 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 13

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	80
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	53	54
4	9	18	22	94	95
5	83	86	90	162	165
6	52	55	59	156	159
7	57	60	64	160	162
8	98	101	105	153	156

ตารางที่ ข.1.6 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 13

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	71	73	77	149	153
2	76	78	82	130	131
3	34	36	40	88	89
4	19	23	27	75	76

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
5	102	106	110	146	147
6	117	119	123	147	150

ข.1.4 ปัญหาที่ 14

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 18
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 5
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 7-4-2-6-1
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 3-3-3-2-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 74
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.7
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.8

ตารางที่ ข.1.7 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 14

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	6	13	17	65	66
2	0	3	7	79	80
3	3	8	12	48	49
4	9	18	22	94	95
5	69	72	76	112	113
6	83	86	90	162	165
7	52	55	59	155	157
8	98	101	105	153	154
9	116	119	123	159	160

ตารางที่ ข.1.8 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 14

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	74	79	83	131	132
2	34	36	40	88	89
3	19	23	27	75	76
4	102	106	110	146	147
5	29	31	35	59	60

ข.1.5 ปัญหาที่ 15

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 19
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 5
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 4-3-7-1-2
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 3-3-2-1-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 81
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.9
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.10

ตารางที่ ข.1.9 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 15

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	3	8	12	60	61
2	6	13	17	67	68
3	0	3	7	79	80
4	9	18	22	94	95
5	64	67	71	107	108
6	71	74	78	114	115
7	83	86	90	162	165
8	98	101	105	153	154

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
9	111	114	118	154	157
10	118	121	125	161	162

ตารางที่ ข.1.10 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 15

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	34	38	42	90	91
2	19	23	27	75	76
3	102	106	110	146	147
4	24	28	32	56	57
5	29	33	37	61	64

ข.1.6 ปัญหาที่ 16

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 20
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 1
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ คือ 2
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 20
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.11
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.12

ตารางที่ ข.1.11 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 16

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	6	13	17	65	66
3	3	8	12	48	49

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	102	103
6	69	72	76	112	113
7	52	55	59	95	96
8	62	65	69	105	106
9	106	109	113	161	165
10	116	119	123	159	162
11	99	102	106	154	156
12	109	114	118	155	159

ตารางที่ ข.1.12 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 16

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	29	31	35	59	62

ข.1.7 ปัญหาที่ 17

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 21
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 2
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ คือ 2-3
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 1-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 40
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.13
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.14

ตารางที่ ข.1.13 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 17

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	60	65
3	6	13	17	65	68
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	90	91
6	68	71	75	111	112
7	71	76	80	116	117
8	62	65	69	105	106
9	94	97	101	125	126
10	115	118	122	158	159
11	120	123	127	163	165
12	109	112	116	152	153
13	129	132	136	160	162

ตารางที่ ข.1.14 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 17

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	24	26	30	54	55
2	29	31	35	59	62

ข.1.8 ปัญหาที่ 18

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 22
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 1
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ คือ 3
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 20

- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.15
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.16

ตารางที่ ข.1.15 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 18

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	65	66
4	9	18	22	58	59
5	47	50	54	90	91
6	52	55	59	83	84
7	69	72	76	112	113
8	62	65	69	105	106
9	94	97	101	125	126
10	87	90	94	118	119
11	116	119	123	159	160
12	109	112	116	152	153
13	129	132	136	160	163
14	122	125	129	153	156

ตารางที่ ข.1.16 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 18

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	29	31	35	59	62

ข.1.9 ปัญหาที่ 19

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 24
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 13

- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 4-8-14-3-7-11-12-6-10-1-5-9-13

- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 3-4-4-4-3-4-3-3-3-3-3-3-2

- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 151

- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.17

- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.18

ตารางที่ ข.1.17 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 19

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	79	82
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	113	114
4	9	18	22	118	119
5	85	88	92	164	165
6	52	55	59	131	132
7	117	120	124	220	221
8	122	125	129	228	229
9	168	171	175	247	248
10	135	138	142	214	215
11	224	227	231	327	330
12	232	235	239	315	318
13	251	254	258	330	333
14	218	221	225	324	327

ตารางที่ ข.1.18 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 19

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	34	36	40	88	89
2	141	148	152	224	225
3	237	240	244	316	321
4	29	31	35	107	108
5	138	143	147	195	196
6	243	245	249	321	324
7	254	259	263	311	312
8	71	73	77	125	126
9	154	156	160	208	209
10	19	23	27	75	76
11	104	106	110	158	159
12	187	189	193	241	242
13	270	272	276	312	315

ข.1.10 ปัญหาที่ 20

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 25
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 13
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 15-16-7-11-1-5-2-6-10-14-8-12-9
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 4-3-3-3-3-3-3-3-3-2-2-2-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 177
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.19
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.20

ตารางที่ ข.1.19 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 20

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	6	13	17	89	90
2	0	3	7	79	80
3	3	8	12	48	49
4	9	18	22	58	59
5	93	96	100	172	173
6	83	86	90	162	163
7	52	55	59	131	132
8	62	65	69	141	142
9	176	179	183	231	232
10	166	169	173	245	246
11	135	138	142	214	215
12	145	148	152	224	225
13	235	238	242	278	279
14	249	252	256	328	330
15	218	221	225	323	324
16	228	231	235	331	333
17	282	285	289	325	327

ตารางที่ ข.1.20 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 20

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	238	243	247	319	320
2	247	259	263	311	312
3	71	73	77	125	126
4	154	156	160	208	209
5	29	31	35	83	84

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
6	112	114	118	166	167
7	19	23	27	75	76
8	104	106	110	158	159
9	187	189	193	241	242
10	270	272	276	312	315
11	81	91	95	132	135
12	164	174	178	215	218
13	195	197	201	225	228

ข.1.11 ปัญหาที่ 21

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 26
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 12
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 1-5-2-6-4-8-12-16-7-11-9-3
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 2-2-2-2-2-2-3-3-2-1-1-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 191
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.21
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.22

ตารางที่ ข.1.21 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 21

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	3	8	12	84	85
2	6	13	17	89	90
3	9	18	22	70	73
4	0	3	7	79	80

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
5	88	91	95	167	168
6	93	96	100	172	173
7	76	79	83	155	156
8	83	86	90	162	163
9	171	174	178	226	227
10	176	179	183	231	232
11	159	162	166	238	239
12	166	169	173	245	246
13	230	233	237	273	274
14	235	238	242	278	279
15	242	245	249	285	286
16	249	252	256	328	330
17	277	280	284	320	321
18	282	285	289	325	327
19	289	292	296	332	333

ตารางที่ ข.1.22 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 21

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	24	28	32	68	70
2	107	111	115	151	152
3	29	33	37	73	76
4	112	116	120	156	159
5	19	23	27	63	64
6	102	106	110	146	147
7	185	189	193	241	242
8	268	270	274	322	324

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
9	96	101	105	141	142
10	179	184	188	212	213
11	190	194	198	222	223
12	34	38	42	66	67

ข.1.12 ปัญหาที่ 22

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 27
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 9
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 2-7-19-5-8-12-3-1-4
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 1-2-3-2-2-2-1-1-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 153
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.23
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.24

ตารางที่ ข.1.23 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 22

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	55	56
2	3	8	12	84	85
3	6	13	17	65	66
4	9	18	22	72	73
5	59	62	66	138	140
6	88	91	95	131	132
7	69	72	76	148	149
8	76	79	83	155	156

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
9	143	146	150	186	187
10	135	138	142	178	179
11	152	155	159	195	196
12	159	162	166	238	239
13	190	193	197	233	234
14	182	185	189	225	226
15	199	202	206	242	243
16	242	245	249	285	286
17	237	240	244	280	281
18	229	232	236	272	273
19	246	250	254	326	327
20	289	292	296	332	333
21	284	287	291	327	330
22	276	279	283	319	320

ตารางที่ ข.1.24 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 22

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	24	28	32	56	59
2	92	96	100	136	137
3	266	268	272	320	323
4	79	84	88	124	125
5	95	101	105	141	143
6	178	180	184	220	221
7	29	33	37	61	62
8	19	23	27	51	52
9	34	38	42	66	69

ข.1.13 ปัญหาที่ 23

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 28
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 5
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 1-2-23-8-7
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 3-3-3-2-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 74
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.25
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.26

ตารางที่ ข.1.25 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 23

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	3	8	12	84	87
2	6	13	17	89	90
3	0	3	7	43	44
4	9	18	22	58	59
5	90	93	97	133	134
6	93	98	102	138	139
7	47	50	54	102	103
8	62	65	69	141	142
9	137	140	144	180	181
10	142	145	149	185	186
11	106	109	113	149	150
12	145	150	154	190	191
13	184	187	191	227	228
14	189	192	196	232	233
15	153	156	160	196	197
16	194	197	201	237	238

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
17	231	234	238	274	275
18	236	239	243	279	280
19	200	203	207	243	244
20	241	244	248	284	285
21	278	281	285	321	324
22	283	286	290	326	327
23	247	250	254	327	330
24	288	291	295	331	333

ตารางที่ ข.1.26 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 23

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	24	26	30	78	79
2	29	31	35	83	84
3	266	268	272	320	321
4	81	83	87	123	124
5	66	70	74	98	99

ข.1.14 ปัญหาที่ 24

- การผลิตแผ่นพื้นชั้นล่างปัญหาที่ 29
- จำนวนงานซ้อนทับที่ได้ เท่ากับ 3
- งานแผ่นพื้นชั้นล่างที่ให้งานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้ายผลิตซ้อนทับ คือ 4-3-7
- สูตรการผลิตของงานซ้อนทับงานที่ 1 ถึง งานสุดท้าย คือ 1-1-1
- ต้นทุนวัตถุดิบรวม เท่ากับ 60
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นชั้นล่าง ดังตารางที่ ข .1.27
- เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ ดังตารางที่ ข .1.28

ตารางที่ ข.1.27 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานแผ่นพื้นปัญหาที่ 24

งานแผ่นพื้น	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	0	3	7	43	44
2	3	8	12	48	49
3	6	13	17	65	68
4	9	18	22	70	71
5	47	50	54	90	91
6	52	55	59	95	96
7	71	74	78	126	127
8	74	79	83	131	132
9	94	97	101	137	138
10	99	102	106	142	143
11	130	133	137	173	174
12	135	138	142	178	179
13	141	144	148	184	185
14	146	149	153	189	190
15	177	180	184	220	221
16	182	185	189	225	226
17	188	191	195	231	232
18	193	196	200	236	237
19	224	227	231	267	268
20	229	232	236	272	273
21	235	238	242	278	279
22	240	243	247	283	284
23	271	274	278	326	327
24	276	279	283	319	320
25	282	285	289	325	330
26	287	290	294	330	333

ตารางที่ ข.1.28 เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับปัญหาที่ 24

งานซ้อนทับ	ขั้นตอนการผลิต				
	1	2	3	4	5
1	34	36	40	64	65
2	29	31	35	59	60
3	90	92	96	120	121

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย จากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัด กรุงเทพ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี อุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรม อาหาร จาก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2552