ฮิวริสติกสำหรับการเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ

น.ส.นันทิยา เอี่ยมสำอางค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
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.

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

HEURISTICS FOR FORMULA SELECTION AND SCHEDULING OF DOUBLE LAYER PRECAST CONCRETE PRODUCTION

Miss Nuntiya Iamsumang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ฮิวริสติกสำหรับการเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ
โดย	น.ส.นันทิยา เอี่ยมสำอางค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานตานันทะ)

นันทิยา เอี่ยมสำอางค์ : ฮิวริสติกสำหรับการเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ. (HEURISTICS FOR FORMULA SELECTION AND SCHEDULING OF DOUBLE LAYER PRECAST CONCRETE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

งานวิจัยนี้ ศึกษาปัญหาการเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่สามารถผลิตงานซ้อนทับกันได้ วัตถุประสงค์คือเพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดโดยจะต้องผลิตให้ทันกำหนดส่งงาน โดยมีสูตรการผลิตให้เลือก 5 สูตร สูตรการผลิตที่แพงจะใช้เวลาในการผลิตสั้น ส่วนสูตรการผลิตที่ถูกจะใช้เวลาในการผลิตนาน โดยแต่ละขั้นตอนการผลิตนั้น ต้องใช้ทรัพยากรเฉพาะในการผลิตซึ่งมีเพียง 1 หน่วยเท่านั้น จึงไม่สามารถผลิตขั้นตอนการผลิตเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันได้ จากงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งเสนอวิธีการแบ่งปัญหาย่อยออกเป็น 2 ส่วนเพื่อหาคำตอบ งานวิจัยนี้จึงเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพิจารณาปัญหาทั้งหมดเป็นปัญหาเดียวกันเพื่อปรับปรุงคำตอบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมนี้สามารถหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพในปัญหาขนาดเล็กเท่านั้น เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้เวลาในการหาคำตอบค่อนข้างนาน ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดออกมาได้และอาจได้คำตอบที่แย่กว่าการแบ่งปัญหาย่อย จึงเสนอวิธีฮิวริสติกซึ่งพิจารณาทั้งงานชั้นล่างและงานซ้อนทับพร้อม ๆ กัน วิธีฮิวริสติกนี้สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 24 ปัญหา จาก 29 ปัญหา โดยได้คำตอบที่ดีกว่าไม่เกิน 43% และได้คำตอบที่แย่กว่าไม่เกิน 16% วิธีนี้ใช้เวลาน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก โดยสามารถลดเวลาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเฉลี่ย 86.45%

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

5870347421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORD: Precast concrete, Heuristics, Formula selection, Scheduling

This research studies the formula selection and scheduling of double layer precast concrete production. The aim is to minimize the total cost by scheduling all jobs by the due date. Five different formulas are considered; the more expensive formula requires the shorter processing time. Each process needs a specific resource that must be shared among molds. As the previous research, separating this problem into 2 subproblems was proposed, so an overall model, which is a mathematical model considering the whole problem, is proposed to improve the solutions. This method is effective for small problems. When the problems get bigger, the computational times are much higher, so an overall model cannot find the better solutions than the previous research solutions. Heuristic considered both based jobs and top-layer jobs is proposed for solving this problem. This heuristic can find better or as good as solutions in 24 problems from 29 problems within 43% difference. For the rest 5 problems, the proposed heuristic gives worse solutions within 16% difference. Heuristics spent much less computational time. An average decreasing time of heuristic is 86.45%.

Field of Study: Industrial Engineering Student's Signature .....
Academic Year: 2018 Advisor's Signature .....

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่สละเวลาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พีรพล ศิริพงศ์วุฒิกร สำหรับคำแนะนำในการเขียนโปรแกรม ขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดาริชา สุธีวงศ์ ผู้เป็นประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โอฬาร กิตติธีรพรชัยและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทชัย กานตานันทะ ผู้เป็นกรรมการสำหรับคำแนะนำสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบคุณพี่อ๊อฟสำหรับการให้คำปรึกษา ขอบคุณเนตรที่คอยช่วยเหลือและรับฟังทุกอย่าง ขอบคุณไมน์และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและรับฟังปัญหาเสมอมา ขอบคุณทุก ๆ คนและทุก ๆ สิ่งที่ทำให้มีแรงบันดาลใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง สุดท้ายนี้ ขอบคุณคนในครอบครัวทุก ๆ คน โดยเฉพาะพ่อ แม่ และพี่ป่าน ที่คอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้มาตลอด

นันทิยา เอี่ยมสำอางค์

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ซ

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 4

1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน 5

1.6 ผลที่ได้รับ 7

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ 7

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป 8

2.2 งานวิจัยการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนาน 9

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 10

2.4 การหาผลเฉลยกำหนดการเชิงเส้นโดยโปรแกรม ILOG OPL 15

2.5 การเขียนโปรแกรม PYTHON 18

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการวิจัย 23

3.1 ลักษณะปัญหา 23

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของณัฐพล (2554) 24
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม (Overall model) 34
3.4 ผลการวิจัยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 40
บทที่ 4 วิธีฮิวริสติกและผลการวิจัย 49
4.1 วิธีฮิวริติก 49
4.2 ผลวิจัยจากวิธีฮิวริสติกเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 70
4.3 ผลวิจัยจากปัญหาเพิ่มเติม 71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 76
5.1 สรุปผลการวิจัย 76
5.2 ข้อเสนอแนะ 78
บรรณานุกรม 80
ประวัติผู้เขียน 83

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 เวลาการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิต ตามสูตรต่าง ๆ และต้นทุนการผลิต..... 2
ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาในการทำงานวิจัย..... 5
ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การให้เกรด..... 19
ตารางที่ 3.1 เวลาการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิต ตามสูตรต่าง ๆ..... 23
ตารางที่ 3.2 คำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบ..... 40
ตารางที่ 3.3 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย..... 45
ตารางที่ 3.4 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย..... 45
ตารางที่ 3.5 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย..... 46
ตารางที่ 3.6 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย..... 46
ตารางที่ 3.7 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย..... 47
ตารางที่ 3.8 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย..... 47
ตารางที่ 4.1 เวลาการผลิตรวม ต้นทุนการผลิตของสูตรการผลิต..... 53
ตารางที่ 4.2 คู่สูตรการผลิตที่นำมาพิจารณาในตอนแรก..... 54
ตารางที่ 4.3 เวลาการผลิตรวม ต้นทุนการผลิตของคู่สูตรการผลิต..... 55
ตารางที่ 4.4 ค่าถ่วงน้ำหนักของสูตรการผลิตสำหรับงานเดี่ยว..... 59
ตารางที่ 4.5 ค่าถ่วงน้ำหนักของคู่สูตรการผลิตสำหรับงานคู่..... 60
ตารางที่ 4.6 เวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนสูตรการผลิต..... 67
ตารางที่ 4.7 เวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนคู่สูตรการผลิต..... 68
ตารางที่ 4.8 คำตอบจากวิธีฮิวริสติกสำหรับปัญหา 13 งาน 4 แม่แบบ..... 70
ตารางที่ 4.9 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย..... 72
ตารางที่ 4.10 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย..... 72
ตารางที่ 4.11 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย..... 73
ตารางที่ 4.12 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย..... 73

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ตารางที่ 4.13 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย..... 74
ตารางที่ 4.14 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย..... 74
ตารางที่ 4.15 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่สร้างขึ้นมาศึกษาใหม่ที่กำหนดส่งงาน 504 หน่วย..... 75

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตและการเลือกสูตรการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแบบซ้อนทับ ... 4
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการหาคำตอบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมด้วยวิธีแตกกิ่ง ... 12
รูปที่ 2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลเฉลยที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่นและผลเฉลยที่ดีที่สุด ... 15
รูปที่ 2.3 การสร้างโอพีแอลโปรเจกต์ ... 16
รูปที่ 2.4 การเขียนโปรแกรม ILOG OPL ... 17
รูปที่ 2.5 คำตอบจากโปรแกรม ILOG OPL ... 17
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งถ้าแล้วและหน้าจอแสดงผล ... 20
รูปที่ 2.7 การเขียนคำสั่ง while และหน้าจอแสดงผล ... 21
รูปที่ 2.8 การเขียนคำสั่ง for และหน้าจอแสดงผล ... 21
รูปที่ 2.9 การเขียนฟังก์ชันและหน้าจอแสดงผล ... 22
รูปที่ 3.1 แผนภูมิการไหลของการแบ่งปัญหาย่อย ... 24
รูปที่ 3.2 งานซ้อนทับสูตรการผลิตที่ 1 บนงานชั้นล่างสูตรการผลิตต่าง ๆ ... 28
รูปที่ 3.3 การหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดสำหรับปัญหาที่มีงานชั้นล่าง 4 งาน ... 29
รูปที่ 3.4 การเขียนโปรแกรม ILOG OPL ... 38
รูปที่ 3.5 แสดงข้อมูลนำเข้าจากโปรแกรม ILOG OPL ... 40
รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ... 41
รูปที่ 3.7 คำตอบของปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบจากการแบ่งปัญหาย่อย ... 44
รูปที่ 3.8 คำตอบของปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม ... 44
รูปที่ 4.1 แผนภูมิการไหลของวิธีฮิวริสติก ... 50
รูปที่ 4.2 รหัสเทียมสำหรับการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก ... 51
รูปที่ 4.3 การจัดงาน 2 งานแบบงานเดี่ยวและงานคู่ ... 52
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างคู่สูตรการผลิต D1 ... 53
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างคู่สูตรการผลิตที่ในตอนแรกไม่นำมาพิจารณา ... 54

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างคู่สูตรการผลิตที่ไม่นำมาพิจารณา 55
รูปที่ 4.7 ที่มาของการเลื่อนเวลาการผลิต 57
รูปที่ 4.8 การจัดตารางการผลิตในตอนแรก 64
รูปที่ 4.9 การจัดตารางการผลิต 65
รูปที่ 4.10 รหัสเทียมของการปรับสูตรของงานให้ใช้สูตรที่ถูกลง 67
รูปที่ 4.11 ตารางการผลิตหลังปรับสูตรการผลิตให้ใช้สูตรที่ถูกลง 69
รูปที่ 4.12 ตารางการผลิตสำหรับปัญหา 12 งาน 4 แม่แบบ 69
รูปที่ 5.1 กราฟต้นทุนการผลิตที่ปรับปรุงและเวลาในการหาคำตอบที่ลดลงด้วยวิธีฮิวริสติก 78

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป จะต้องพิจารณาการเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งในงานวิจัยนี้ เป็นการผลิตแบบที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายแม่แบบได้ และแต่ละแม่แบบเหมือนกันทุกประการ (Identical parallel fixed location molds) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ซึ่งต้องทำเรียงลำดับกัน (Precedence constraints) โดยในแต่ละขั้นตอนจะมีทรัพยากรที่ต้องใช้เพียง 1 หน่วยเท่านั้น ซึ่งจะต้องจัดตารางการผลิตเพื่อไม่ให้ผลิตแต่ละขั้นตอนการผลิตในช่วงเวลาเดียวกัน (Resource constraint) คือ

1) การเตรียมแม่แบบ (Mold preparing) ต้องการคนงานที่มีทักษะเฉพาะในการผลิต

2) การผสมและการหล่อคอนกรีต (Concrete mixing and casting) ต้องการเครื่องผสมคอนกรีต ซึ่งแตกต่างจากขั้นตอนอื่น ๆ คือ เมื่อเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 แล้วต้องใช้เวลาอีกครึ่งชั่วโมง ในการล้างและเตรียมอุปกรณ์ก่อน จึงจะสามารถผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 สำหรับงานต่อไปได้

3) การบ่ม (Curing) ขั้นตอนการผลิตนี้ไม่ต้องการทรัพยากรใด ๆ ในการผลิต จึงสามารถจัดตารางการผลิตให้ทุกงานสามารถผลิตขั้นตอนนี้พร้อม ๆ กันหลายงานได้

4) การตัดออกจากแม่แบบ (Stripping) ต้องการเครื่องตัดคอนกรีต

5) การขนย้ายออกจากแม่แบบ (Product finishing and storing) ต้องการรถยกสำหรับขนย้ายคอนกรีตสำเร็จรูป

โดยในแต่ละขั้นตอนการผลิตนั้น ไม่สามารถหยุดทำขั้นตอนการผลิตใด ๆ กลางคันเพื่อไปผลิตงานอื่น ต้องทำขั้นตอนการผลิตนั้นให้เสร็จสิ้นเสียก่อน

ในกระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป สามารถเลือกสูตรการผลิตได้ 5 สูตรที่มีต้นทุนการผลิตและระยะเวลาในการบ่มแตกต่างกันดังตารางที่ 1.1 สูตรการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ จะใช้ระยะเวลาในการบ่มที่นาน และในทางกลับกัน สูตรการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตที่สูง จะใช้ระยะเวลาในการบ่มที่สั้น โดยที่สูตรการผลิตที่แตกต่างกันนั้น ไม่ส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตสำเร็จรูป และสามารถผลิตงานซ้อนทับบนงานชั้นล่างได้ เปรียบเสมือนงานชั้นล่างเป็นแม่แบบให้แก่งานซ้อนทับนั่นเอง ทำให้สามารถประหยัดเวลาในการผลิตได้ จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับได้เมื่อเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนการบ่ม หรือขั้นตอนการผลิตที่ 3 ไปแล้ว 6 ชั่วโมง โดยที่กำหนดให้แต่ละงาน

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ชั้นล่างสามารถผลิตงานซ้อนทับได้สูงสุด 1 งานเท่านั้น และจะสามารถเริ่มขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานชั้นล่างได้ หลังจากที่ผลิตงานซ้อนทับเสร็จสิ้นทุกขั้นตอนการผลิตแล้ว คุณภาพของงานซ้อนทับเหมือนกับงานชั้นล่างทุกประการ มีขั้นตอนการผลิตที่เหมือนกับงานชั้นล่าง สามารถเลือกสูตรการผลิตได้เหมือนงานชั้นล่าง รวมไปถึงใช้ทรัพยากรเหมือนกับงานชั้นล่าง ดังนั้นจึงต้องจัดสรรทรัพยากรเพื่อไม่ให้ใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกัน

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ตารางที่ 1.1 เวลาการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิต ตามสูตรต่าง ๆ และต้นทุนการผลิต

สูตร	เวลาการผลิต (ชั่วโมง)						ต้นทุนการผลิต (หน่วย)
	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	ขั้นตอนที่ 5	รวม	
1	1.5	2	12	0.5	1.5	17.5	20
2	1.5	2	18	0.5	1.5	23.5	15
3	1.5	2	24	0.5	1.5	29.5	13
4	1.5	2	36	0.5	1.5	41.5	8
5	1.5	2	48	0.5	1.5	53.5	5

ณัฐพล (2554) ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถให้มีการผลิตแบบซ้อนทับ เพื่อให้ประหยัดเวลาในการผลิต โดยวิธีการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบ่งการหาคำตอบออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปของงานชั้นล่าง และการเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปของงานซ้อนทับ โดยนำคำตอบจากแบบจำลองส่วนแรก มาเป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองส่วนที่สอง คือสูตรการผลิตของงานชั้นล่างและแม่แบบที่ใช้ ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้คำตอบที่ได้ ไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แบบจำลองทั้ง 2 แบบ สามารถหาคำตอบได้ดีในปัญหาขนาดเล็ก ซึ่งปัญหาที่มีขนาดใหญ่ จะใช้เวลาในการหาคำตอบที่นาน และอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด จึงเสนอวิธีการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก ซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบที่สั้น ที่อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด [1]

งานวิจัยนี้ ศึกษาการจัดตารางการผลิตและการเลือกสูตรการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป โดยจะพิจารณาร่วมกันระหว่างงานชั้นล่างและงานซ้อนทับ เพื่อให้ต้นทุนรวมในการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปต่ำที่สุด โดยต้องผลิตเสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงาน ซึ่งการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถให้คำตอบที่ดีที่สุด วิธีนี้จะทำให้ขนาดปัญหาใหญ่กว่าการแบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน ดังนั้น

เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีนี้จึงใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าการแบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน และอาจจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ทำให้อาจจะได้คำตอบที่แย่กว่าคำตอบจากการแบ่งปัญหาออกเป็นสองส่วน งานวิจัยนี้จึงศึกษาวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการฮิวริสติกในการแก้ปัญหาควบคู่กับการแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบคำตอบที่ได้และเวลาในการหาคำตอบทั้งสองวิธีกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัย [1]

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นว่า ในการจัดตารางการผลิต จะไม่สามารถผลิตขั้นตอนใด ๆ ในเวลาเดียวกันได้ ยกเว้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนการบ่ม และในขั้นตอนที่ 2 หลังจากผลิตเสร็จสิ้นแล้ว จะต้องใช้เวลาอีกครึ่งชั่วโมงถึงจะสามารถผลิตขั้นตอนที่ 2 ในงานถัดไปได้ นอกจากนี้ จะเห็นว่าในแม่แบบที่ 1 งานซ้อนทับที่ 4 จะสามารถเริ่มการผลิตได้ ก็ต่อเมื่อ งานชั้นล่างที่ 1 เริ่มการผลิตในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ไปแล้ว 6 ชั่วโมง และจะสามารถเริ่มการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานชั้นล่างที่ 1 ได้ เมื่องานซ้อนทับเสร็จสิ้นแล้ว

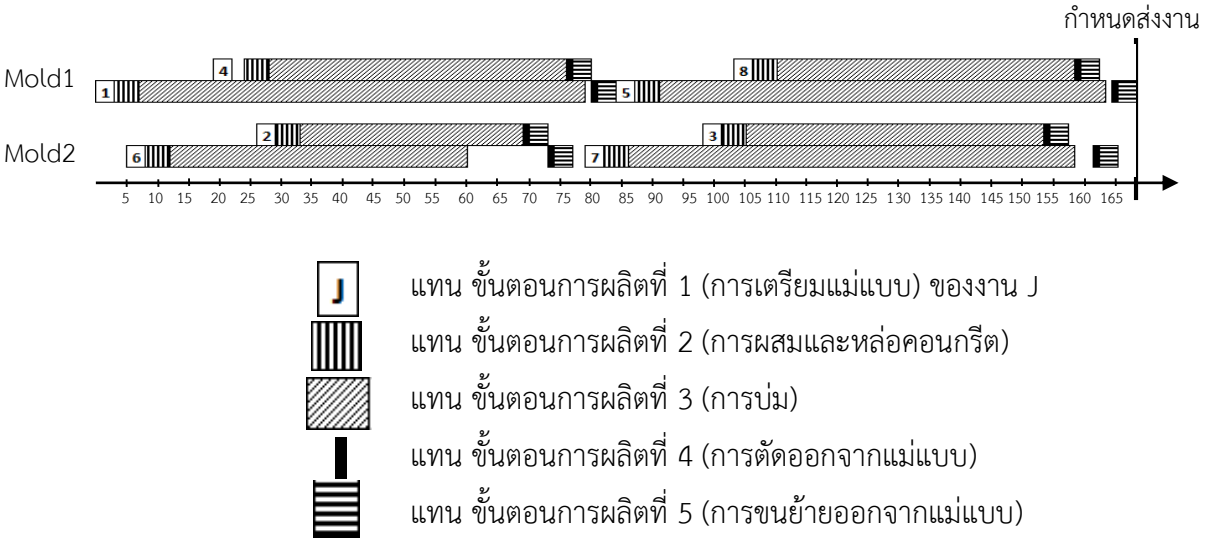
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการจัดตารางการผลิตและการเลือกสูตรการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป สำหรับการผลิตแบบซ้อนทับ เพื่อให้ผลิตเสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงานและมีต้นทุนรวมต่ำที่สุด

1.3 ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย

- ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นข้อมูลจากการจำลอง และเป็นข้อมูลที่ทราบแน่นอน คือ จำนวนงานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป จำนวนแม่แบบ ระยะเวลาการผลิตในแต่ละขั้นตอนการผลิต จำนวนสูตรการผลิต ต้นทุนการผลิตของแต่ละสูตรการผลิต ระยะเวลาในการบ่มของแต่ละสูตรการผลิตและกำหนดเวลาส่งงาน
- งานผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปทุกงานไม่ว่าจะเป็นงานชั้นล่างหรืองานซ้อนทับ จะเหมือนกันทุกประการ
- ในการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิต จะไม่สามารถหยุดการผลิตเพื่อแทรกงานอื่นได้ จะต้องผลิตขั้นตอนนั้น ๆ ให้เสร็จสิ้นก่อน จึงจะสามารถผลิตขั้นตอนการผลิตนั้น ๆ ในงานอื่นได้
- สำหรับงานชั้นล่าง 1 งาน สามารถรองรับการผลิตงานซ้อนทับได้สูงสุด 1 งานเท่านั้น
- ไม่พิจารณาของเสียจากการผลิต
- สภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและคุณภาพของคอนกรีตสำเร็จรูป

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างการจัดตารางการผลิตและการเลือกสูตรการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแบบซ้อนทับ

1.4 **ขั้นตอนการดำเนินงาน**

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม ILOG OPL

1.4.3 กำหนดปัญหา ที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย

1.4.4 สร้างปัญหาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model)

1.4.5 หาคำตอบที่ดีที่สุดจากโปรแกรม ILOG OPL

1.4.6 ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม PYTHON และสร้างวิธีการฮิวริสติกในการแก้ปัญหา โดยใช้โปรแกรม PYTHON

1.4.7 เปรียบเทียบคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และคำตอบจากวิธีการฮิวริสติก

1.4.8 วิเคราะห์และสรุปผล

1.4.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

1.5 ระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาในการทำงานวิจัย

กิจกรรม	พ.ศ.2559							พ.ศ.2560											
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง																			
2. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม ILOG OPL																			
3. กำหนดปัญหา ที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย																			
4. สร้างปัญหาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model)																			
5. หาคำตอบที่ดีที่สุดจากโปรแกรม ILOG OPL																			
6. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม PYTHON และสร้างวิธีการฮิวริสติกในการแก้ปัญหา โดยใช้โปรแกรม PYTHON																			
7. เปรียบเทียบคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และคำตอบจากวิธีการฮิวริสติก																			
8. วิเคราะห์และสรุปผล																			
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																			

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาในการทำงานวิจัย (ต่อ)

กิจกรรม	พ.ศ.2561												พ.ศ.2562					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง																		
2. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม ILOG OPL																		
3. กำหนดปัญหา ที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย																		
4. สร้างปัญหาและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model)																		
5. หาคำตอบที่ดีที่สุดจากโปรแกรม ILOG OPL																		
6. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม PYTHON และสร้างวิธีการฮิวริสติกในการแก้ปัญหา โดยใช้โปรแกรม PYTHON																		
7. เปรียบเทียบคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และคำตอบจากวิธีการฮิวริสติก																		
8. วิเคราะห์และสรุปผล																		
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																		

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

1.6 ผลที่ได้รับ

แนวคิดและวิธีการในการหาคำตอบการเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ เพื่อลดต้นทุนการผลิต

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- สามารถเลือกสูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตแบบซ้อนทับได้
- สามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดตารางการผลิตแบบต่าง ๆ ได้
- สามารถใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตได้

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป

การผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การผลิตแบบที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายแม่แบบได้ (Fixed location) และการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flowshop) ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตที่เหมือนกัน แต่การผลิตแบบไหลเลื่อนจะสามารถผลิตได้รวดเร็วกว่าและมีอรรถประโยชน์ของทรัพยากร (Resource utilization) ที่สูงกว่าด้วย การจัดตารางการผลิตงานคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นเป็นปัญหาแบบยาก ดังนั้น งานวิจัยส่วนใหญ่จึงใช้วิธีเมตาฮิวริสติกในการหาคำตอบ เพื่อให้สามารถหาคำตอบได้ในเวลาอันสั้น แม้ว่าอาจจะไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม

งานวิจัยส่วนใหญ่ ศึกษาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแบบไหลเลื่อน โดย Chan และ Hu (2002) ศึกษาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป โดยคำนึงถึงวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น ค่าปรับจากการส่งงานล่าช้า (Tardiness penalty) อรรถประโยชน์ของทรัพยากร (Resource utilization) ต้นทุนการจัดเก็บสินค้า เป็นต้น โดยใช้วิธี Constraint programming ร่วมกับวิธีเมตาฮิวริสติกของเทคนิคการจัดตารางการผลิตต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบผลของคำตอบ [2] ในขณะที่ Benjaoran, Dawood และ Hobbs (2005) คำนึงถึงวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย คือ เวลาการผลิตรวม (Total flow time) เวลารวมที่เครื่องจักรว่างงาน (Total machines idle time) และค่าปรับส่งงานก่อนกำหนดส่งและหลังกำหนดส่ง (Earliness and tardiness penalties) โดยจะถ่วงน้ำหนักวัตถุประสงค์ต่าง ๆ เพื่อให้มีวัตถุประสงค์เดียว (Single objective) โดยคำนึงถึงกระบวนการผลิตจริง ที่มีเวลาทำงาน (Working hour) และเวลานอก (Overtime hour) โดยใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึมในการแก้ปัญหา (Genetic algorithm) [3] เช่นเดียวกับ Ko และ Wang (2011) ที่ศึกษาลักษณะปัญหาเดียวกัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตารางการผลิตที่มีเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้าย (Makespan) และค่าปรับส่งงานก่อนกำหนดส่งและหลังกำหนดส่งที่น้อยที่สุด [4] Yang, Ma, และ Wu (2016) ที่ศึกษาการจัดตารางการผลิต โดยคำนึงถึงวัตถุประสงค์ที่จะทำให้เวลาว่างระหว่างสถานีงาน (Workstation idle time) ค่าปรับส่งงานก่อนกำหนดส่งและหลังกำหนดส่ง และเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้ายให้มีค่าน้อยที่สุด [5] และ Kong และคณะ (2017) ศึกษาการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปทุกกระบวนการ รวมไปถึงการขนส่งและการประกอบที่สถานที่ก่อสร้างด้วย โดยปรับปรุงจากงานวิจัยก่อนหน้าโดยการใช้กลยุทธ์ทันเวลาพอดี (JIT strategy) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีต้นทุนรวมน้อยที่สุด ประกอบไปด้วย ต้นทุนการขนส่งและค่าปรับจากการส่งงานล่าช้า งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการเขียนโปรแกรมแบบพลวัต (Dynamic programming algorithm) [6]

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ส่วนงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแบบที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายแม่แบบได้ (Fixed location) Tharmmaphornphilas และ Sureinpithak (2013) ศึกษาการเลือกสูตรการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปควบคู่ไปด้วย โดยสูตรที่มีต้นทุนสูง จะมีเวลาการผลิตที่สั้นกว่า เพื่อจัดตารางการผลิตให้มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด โดยที่ไม่ส่งงานล่าช้า [7] และณัฐพล และ วิภาวี (2012) ศึกษาการเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตเช่นเดียวกัน แต่พิจารณาการผลิตงานซ้อนทับพร้อมกัน เพื่อให้ประหยัดเวลาในการผลิต [8] โดยทั้งสองงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีฮิวริสติกในการแก้ปัญหา เพื่อเปรียบเทียบเวลาในการหาคำตอบ และคำตอบที่ได้

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

2.2 งานวิจัยการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนาน

งานวิจัยนี้ ศึกษาการเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตงานคอนกรีตสำเร็จรูป ที่มีแม่แบบหลายแม่แบบซึ่งมีลักษณะเหมือนกัน เปรียบได้กับเครื่องจักรขนาน โดยจะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกัน นอกจากนี้ สูตรต่าง ๆ ที่เลือกใช้นั้น จะส่งผลให้เวลาการผลิตในขั้นตอนการบ่มเปลี่ยนไป โดยที่ สูตรการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตสูง จะใช้เวลาในขั้นตอนการบ่มที่สั้นกว่าสูตรการผลิตที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ดังนั้น จึงต้องศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนานที่มีการใช้ทรัพยากรร่วมกัน และงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนานที่มีระยะเวลาการผลิตขึ้นอยู่กับการจัดสรรปริมาณทรัพยากรที่ใช้ในการผลิต ซึ่งงานวิจัยทั้ง 2 แบบนี้ จัดเป็นปัญหาแบบยากเช่นเดียวกัน จึงมีการเสนอวิธีเมตาฮิวริสติกในการหาคำตอบ

งานวิจัยการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนานที่มีการใช้ทรัพยากรร่วมกัน ซึ่งในระบบมีทรัพยากรปริมาณจำกัด ทำให้ต้องจัดสรรทรัพยากรให้แก่งาน และจัดสรรงานให้แก่เครื่องจักรขนาน Grabowski และ Pempera (2000) ได้จัดลำดับการผลิตงานในระบบ โดยคำนึงถึงเงื่อนไขว่าในแต่ละขั้นตอนการผลิตสามารถหยุดรอได้หรือไม่ และเครื่องจักรนั้น เป็นคอขวดหรือไม่ (Bottleneck) เพื่อให้มีเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้ายน้อยที่สุด (Minimize maximum completion time) โดยจะใช้วิธีทาบู (Tabu search) ในการหาคำตอบ [9] ในขณะที่ Edis และ Qzkarahan (2011) ที่มีข้อจำกัดในด้านทรัพยากรเช่นเดียวกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดตารางการผลิตให้มีเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้ายน้อยที่สุด (Minimize makespan) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบจำนวนเต็ม (Integer programming) ร่วมกับเทคนิคคอนสเตรนท์โปรแกรมมิ่ง (Constraint programming) [10] Ozpeynirci, Gokgur และ Hnich (2016) ศึกษาการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนาน โดยในแต่ละขั้นตอนจะต้องการเครื่องมือที่แตกต่างกัน และมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีทาบู เพื่อให้สามารถหาคำตอบในเวลาที่สั้นลง โดยมีวัตถุประสงค์ให้มีเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้ายน้อยที่สุด [11] เช่นเดียวกับ Beezao, Cordeau และ Laporte (2017) ศึกษาปัญหาแบบเดียวกัน

แต่เสนอวิธีหาคำตอบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีฮิวริสติกเพื่อค้นหาคำตอบข้างเคียง (A neighborhood search heuristics) [12] และ Fanjul-Peyro, Perea และ Ruiz ที่เสนอวิธีการหาคำตอบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอีกวิธีหนึ่งคือวิธีผสมระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และฮิวริสติก (Matheuristics) [13]

ส่วนงานวิจัยการจัดตารางผลิตบนเครื่องจักรขนานที่มีระยะเวลาการผลิตขึ้นอยู่กับการจัดสรรปริมาณของทรัพยากรที่ใช้ในการผลิต โดยในแต่ละช่วงเวลา จะต้องไม่ใช้ทรัพยากรเกินปริมาณที่มี Ventuta และ Kim (2003) ศึกษาการจัดตารางการผลิตบนเครื่องจักรขนานที่มีกำหนดส่งงานของแต่ละงานแตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์ให้มีค่าปรับส่งงานก่อนกำหนดส่งและหลังกำหนดส่งต่ำที่สุด (Minimize earliness and tardiness penalties) ซึ่งเป็นปัญหาแบบยาก จึงใช้วิธี Lagrangian relaxation (LRP) วิธี Lagrangian dual problem (LDP) และวิธีฮิวริสติกในการหาคำตอบ [14] ในเวลาต่อมา มีนักวิจัยหลายท่าน ที่ได้ศึกษารูปแบบนี้ โดย Ruiz-Torres, Alex และ Centeno (2007) ศึกษาการจัดตารางการผลิตและการจัดสรรคน ซึ่งถือเป็นทรัพยากรอย่างหนึ่ง เพื่อให้มีเวลาในการผลิตที่สั้นลงและมีเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้ายน้อยที่สุด [15] เช่นเดียวกับ Grigoriev, Sviridenko และ Uetz (2007) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เส้นตรง (Linear Programming) เพื่อหาขอบเขตล่าง (Lower bound) [16] นอกจากนี้ Ruiz-Torres และคณะ (2007) และ Su และ Lien (2009) ศึกษาลักษณะปัญหาในรูปแบบเดียวกัน แต่นำเสนอวิธีฮิวริสติกที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น [17, 18] ส่วน Zhang และ Du (2016) ศึกษาการจัดตารางการผลิต มีวัตถุประสงค์ให้มีเวลาเสร็จสิ้นงานสุดท้ายน้อยที่สุด โดยแบ่งปัญหาออกเป็น 2 แบบ คือ ปัญหาที่มีเวลาการผลิตคงที่ และปัญหาที่เวลาการผลิตจะลดลงแบบเส้นตรงเมื่อต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น โดยมีเงื่อนไขห้ามมิให้ต้นทุนรวมเกินงบประมาณ [19]

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ทฤษฎีกำหนดการเชิงเส้น (Linear programming)

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตคอนกรีตแบบซ้อนทับ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นกำหนดการเชิงเส้นในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยที่แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้น ประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variable) ที่เป็นจำนวนจริง ฟังก์ชันจุดประสงค์เชิงเส้น (Linear objective function) ที่เป็นฟังก์ชันเส้นตรง และเงื่อนไขเชิงเส้น (Linear constraint) ซึ่งเป็นสมการหรืออสมการเส้นตรง โดยค่าของตัวแปรตัดสินใจจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขเชิงเส้น หรือที่เรียกว่าผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible solution) และทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์เชิงเส้นมากที่สุดหรือน้อยที่สุดตามที่ต้องการ [20]

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ในกรณีที่ต้องการให้ตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็ม จะใช้แบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม (Integer programming: IP) ในการหาคำตอบ เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ที่ต้องการตัวแปรตัดสินใจบางตัวให้มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น โดยแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม แบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน

1) กำหนดการเชิงจำนวนเต็มบริสุทธิ์ (Pure integer programming) คือ กำหนดการเชิงจำนวนเต็มที่มีตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนเต็มทั้งหมด

2) กำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสม (Mixed integer programming: MIP) คือ กำหนดการเชิงจำนวนเต็มที่มีตัวแปรตัดสินใจบางตัวเป็นจำนวนเต็ม

3) กำหนดการเชิงจำนวนเต็มศูนย์หนึ่ง (0-1 integer programming) คือ กำหนดการเชิงจำนวนเต็มที่มีตัวแปรตัดสินใจมีค่า 0 หรือ 1 ทั้งหมด

การหาคำตอบจากกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม มักใช้วิธีการแตกกิ่งและจำกัดขอบเขต (Branch-and-Bound method)

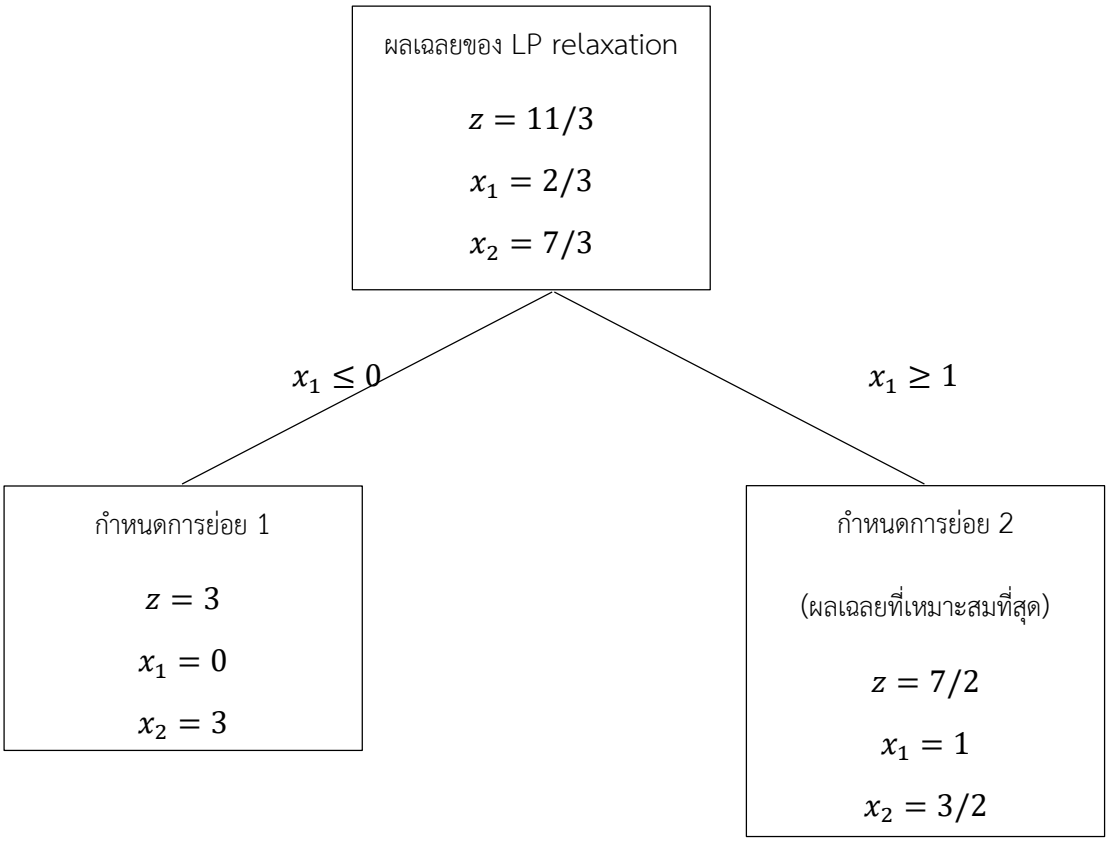
ตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \min\ & z = 2x_1 + x_2 \\ s.t.\quad & 5x_1 + 2x_2 \leq 8 \\ & x_1 + x_2 \leq 3 \\ & x_1,\ x_2 \geq 0;\ x_1\ interger \end{aligned}$$

ขั้นที่ 1 แก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้นหย่อน (Linear programming relaxation) คือการตัดเงื่อนไขที่จะให้ตัวแปรเป็นจำนวนเต็มออกเพื่อหาผลเฉลย ในกรณีที่ต้องการให้วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด ผลเฉลยของกำหนดการเชิงเส้นหย่อนจะได้ค่าที่ต่ำกว่าหรือเท่ากับผลเฉลยของกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม ซึ่งถือเป็นขอบเขตล่าง (Lower bound) และในกรณีที่ต้องการให้วัตถุประสงค์มีค่ามากที่สุด ผลเฉลยของกำหนดการเชิงเส้นหย่อนจะได้ค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับผลเฉลยของกำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบผสม ซึ่งเป็นเป็นขอบเขตบนนั่นเอง (Upper bound)

ขั้นที่ 2 แตกกิ่งเฉพาะตัวแปรที่มีเงื่อนไขเป็นจำนวนเต็มทีละตัว โดยแบ่งพื้นที่จากคำตอบจากขั้นที่ 1 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 จึงแตกกิ่งให้ $x_1 \leq 0$ และ $x_1 \geq 1$ เพื่อหาคำตอบ โดยจะแตกกิ่งจนกว่าตัวแปรที่มีเงื่อนไขเป็นจำนวนเต็มทุกตัวเป็นจำนวนเต็ม ดังรูปที่ 2.1

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการหาคำตอบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมด้วยวิธีแตกกิ่ง

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้จะมีการสร้างเงื่อนไขในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีวิธีการเขียนดังนี้

- การสร้างเงื่อนไขถ้า – แล้ว (If-then constraint)

มีลักษณะเงื่อนไขคือ ถ้าเงื่อนไข $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ เป็นจริง จะทำให้เงื่อนไข $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ เป็นจริงด้วย แต่ถ้าเงื่อนไข $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ ไม่เป็นจริง เงื่อนไขอาจจะเป็นจริงหรือไม่ก็ได้ $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ ซึ่งมีวิธีเขียนดังนี้

$$-g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq My$$
$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq M(1 - y)$$
$$y \in \{0,1\}$$

โดยที่กำหนดให้ M เป็นจำนวนที่มีค่ามาก ๆ

จากอสมการที่กล่าวมา จะเห็นว่าถ้า $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ จะทำให้ $y = 0$ และจะทำให้ $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ ด้วย แต่ถ้าหาก $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ จะทำให้ y จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 ก็ได้ ถ้า $y = 1$ จะทำให้ $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ มีค่าเท่าไรก็ได้

ตัวอย่าง หากเราต้องการกำหนดเงื่อนไขว่าถ้าให้ผู้เล่นหมายเลข 1 ลงเตะบอล ผู้เล่นหมายเลข 4 และ 5 ลงเตะบอลด้วย จะสามารถสร้างเป็นเงื่อนไขถ้า - แล้ว ได้ดังนี้

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

กำหนดตัวแปรตัดสินใจ $x_i = 1$ ถ้าเลือกผู้เล่นหมายเลข i ลงเตะ; 0 ถ้าไม่เลือกผู้เล่นหมายเลข i ลงเตะ

ถ้าผู้เล่นหมายเลข 1 ลงเตะ กำหนดฟังก์ชันได้เป็น $x_1 > 0$

ผู้เล่นหมายเลข 4 และ 5 ลงเตะด้วย กำหนดฟังก์ชันได้เป็น $x_4 + x_5 - 2 \geq 0$

จะสร้างเงื่อนไขได้ถ้า – แล้ว ดังนี้

$$-(x_4 + x_5 - 2) \leq My$$
$$x_1 \leq M(1-y)$$
$$y \in \{0,1\}$$

- การสร้างเงื่อนไข และ/หรือ (Either-or constraint)

มีลักษณะเงื่อนไขคือ $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ เป็นจริง หรือ $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ เป็นจริง หรือเป็นเป็นจริงทั้งคู่ ซึ่งมีวิธีเขียนดังนี้

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq My$$
$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq M(1-y)$$
$$y \in \{0,1\}$$

โดยที่กำหนดให้ M เป็นจำนวนที่มีค่ามาก ๆ

จากอสมการที่กล่าวมา จะเห็นว่าถ้า $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ จะทำให้ $y = 1$ และจะทำให้ $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ ด้วย แต่ถ้าหาก $g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ จะทำให้ y จะมีค่าเท่ากับ 0 และ $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ รูปแบบเงื่อนไขนี้จะยอมให้ $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ และ $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ พร้อมกัน

ตัวอย่าง หากต้องการกำหนดเงื่อนไขว่าให้ผู้เล่นหมายเลข 1 หรือ 3 ลงเตะบอล หรือทั้งสองหมายเลขลงเตะพร้อมกัน จะสามารถสร้างเงื่อนไขดังนี้

กำหนดตัวแปรตัดสินใจ $x_i = 1$ ถ้าเลือกผู้เล่นหมายเลข i ลงเตะ; 0 ถ้าไม่เลือกผู้เล่นหมายเลข i ลงเตะ

ผู้เล่นหมายเลข 1 ลงเตะ กำหนดฟังก์ชันได้เป็น $x_1 \geq 1$ หรือ $1 - x_1 \leq 0$

ผู้เล่นหมายเลข 3 ลงเตะ กำหนดฟังก์ชันได้เป็น $x_3 \geq 1$ หรือ $1 - x_3 \leq 0$

จะสร้างเงื่อนไข และ/หรือ ดังนี้

$$1 - x_1 \leq My$$
$$1 - x_3 \leq M(1-y)$$
$$y \in \{0,1\}$$

2.3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีฮิวริสติก (Heuristic algorithm)

วิธีฮิวริสติก คือ วิธีการหาคำตอบที่อาศัยการศึกษาลักษณะของปัญหาและพัฒนากระบวนการเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด นิยมใช้กับปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก โดยวิธีฮิวริสติกจะใช้เวลาในการหาคำตอบที่เร็วกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่คำตอบที่ได้นั้น อาจจะไม่ใช่คำตอบ

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ที่เหมาะสมที่สุด โดยศึกษาวิธีฮิวริสติกหลากหลายรูปแบบ รวมไปถึงวิธีเมตาฮิวริสติกด้วย โดยในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงวิธีฮิวริสติกที่มีประโยชน์ต่องานวิจัย [21]

1) Randomly generated solutions มีหลักการคือ สุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ แล้วพิจารณาเลือกคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อเป็นผลเฉลย โดยวิธีนี้ จะไม่สามารถพัฒนาคำตอบได้ ทำให้คำตอบที่ได้ ไม่ใช่คำตอบที่ดีนัก แต่มักนำวิธีนี้ ไปปรับใช้กับเทคนิคอื่น ๆ

2) Problem decomposition/partitioning คือ วิธีการที่ทำให้ปัญหาที่มีความซับซ้อนนั้นง่ายแก่การหาคำตอบมากขึ้น โดยแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย (Subproblem) สามารถแบ่งวิธีการหาคำตอบด้วยวิธีนี้ ออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

- การแบ่งปัญหาย่อย เพื่อหาคำตอบปัญหาย่อยแต่ละปัญหา จากนั้น นำคำตอบที่ได้มารวมกัน จะได้ผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหาใหญ่

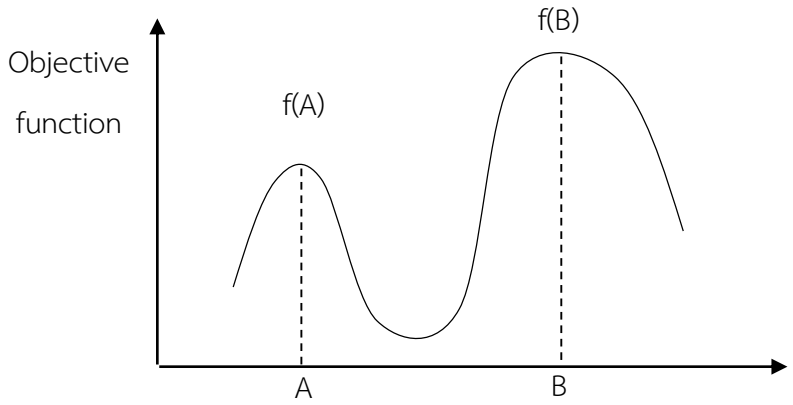
- การแบ่งปัญหาย่อยแบบเป็นลำดับ เช่น ปัญหาย่อยที่ 2 เป็นปัญหาที่ต่อเนื่องจากปัญหาย่อยที่ 1 โดยจะหาคำตอบด้วยการนำผลจากปัญหาย่อยที่ 1 นำมาเป็นข้อมูลนำเข้าของปัญหาย่อยที่ 2

- การแบ่งปัญหาย่อย เพื่อหาคำตอบโดยการคงค่าของตัวแปรตัวอื่น ๆ และปรับปรุงค่าของตัวแปรตัดสินใจ สำหรับปัญหาย่อยนั้น

3) Constructive method (Greedy method) เป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลในการสร้างคำตอบทีละขั้น โดยจะค่อย ๆ พิจารณาตัวแปรตัดสินใจทีละตัว เมื่อลองปรับค่าตัวแปรตัดสินใจนั้น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะดีขึ้นหรือไม่ ถ้าดีขึ้น จะคงค่าของตัวแปรตัดสินใจนั้นไว้ แต่ถ้าไม่ดีขึ้น จะคงค่าของตัวแปรตัดสินใจก่อนหน้าการปรับค่า โดยวิธีนี้ เป็นวิธีที่ง่าย แต่ให้คำตอบที่ไม่ดีนัก จึงมักนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีอื่น ๆ

4) Local improvement (neighborhood search) method เริ่มจากหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ เพื่อเป็นผลเฉลยปัจจุบัน (Current solution) มักได้คำตอบจากวิธี Constructive method จากนั้น หาผลเฉลยเพื่อนบ้านที่เป็นไปได้ (Neighborhood feasible solution) แล้วพิจารณาว่ามีผลเฉลยเพื่อนบ้านใดที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือไม่ ถ้ามี จะใช้ผลเฉลยเพื่อนบ้านนั้นเป็นผลเฉลยปัจจุบัน และหาผลเฉลยเพื่อนบ้านที่เป็นไปได้ ทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะไม่มีการพัฒนาคำตอบ ผลเฉลยปัจจุบันจะเรียกว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะถิ่น (Local optimal solution) ซึ่งเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตเล็ก ๆ

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



รูปที่ 2.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ผลเฉลยที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่นและผลเฉลยที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 2.2 ถ้าในกรณีนี้ ต้องการให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด อาจจะเรียกวิธีนี้ว่าวิธีไต่เขา (Hill climbing) จะได้ว่า A และ B คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น โดยที่ B คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุด นอกจากนี้จะเห็นว่า การเลือกคำตอบตั้งต้น มีผลต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นั่นคือ ถ้าเลือกผลเฉลยตั้งต้นใกล้จุด A ก็จะทำให้ได้ผลเฉลยที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่นเท่านั้น ในกรณีที่ผลเฉลยเพื่อนบ้านมีขนาดเล็ก จึงมีการพัฒนาวิธีการหาคำตอบ ด้วยการหาคำตอบจากผลเฉลยเริ่มต้นที่หลากหลาย (Restart with different initial solutions) เพื่อเปรียบเทียบผลเฉลยที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่น การหาคำตอบโดยการขยายขนาดผลเฉลยเพื่อนบ้าน (Enlarge neighborhood) และการยอมรับผลเฉลยที่แย่กว่าเดิม (Allow downhill moves) เพื่อหลีกหนีการหยุดการค้นหาเมื่อพบผลเฉลยที่ดีที่สุดเฉพาะถิ่นและนำการค้นหาไปสู่ที่อื่น

2.4 การหาผลเฉลยกำหนดการเชิงเส้นโดยโปรแกรม ILOG OPL

เมื่อเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จะสามารถหาคำตอบของกำหนดการเชิงเส้นได้ด้วยการเขียนให้โปรแกรม ILOG OPL หาคำตอบ โดยมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้ [22]

2.4.1 การสร้างโอพีแอลโปรเจกต์ (OPL Project)

เริ่มต้นด้วย File -> New -> OPL Project จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 2.3 จากนั้นตั้งชื่อโปรเจกต์ในช่อง Project name ทำเครื่องหมายถูกดังรูปเพื่อสร้าง configuration ไว้สำหรับหาคำตอบ Model สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ Data สำหรับข้อมูลนำเข้า

โดยจะหาคำตอบจากตัวอย่างปัญหาการวางแผนการผลิตแก๊สแอมโมเนีย (Ammonia gas) และแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride) โดยมีไนโตรเจน (Nitrogen) 50 หน่วย ไฮโดรเจน (Hydrogen) 180 หน่วย และคลอรีน (Chlorine) 40 หน่วย บริษัทจะได้กำไร 40 ยูโรจาก

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

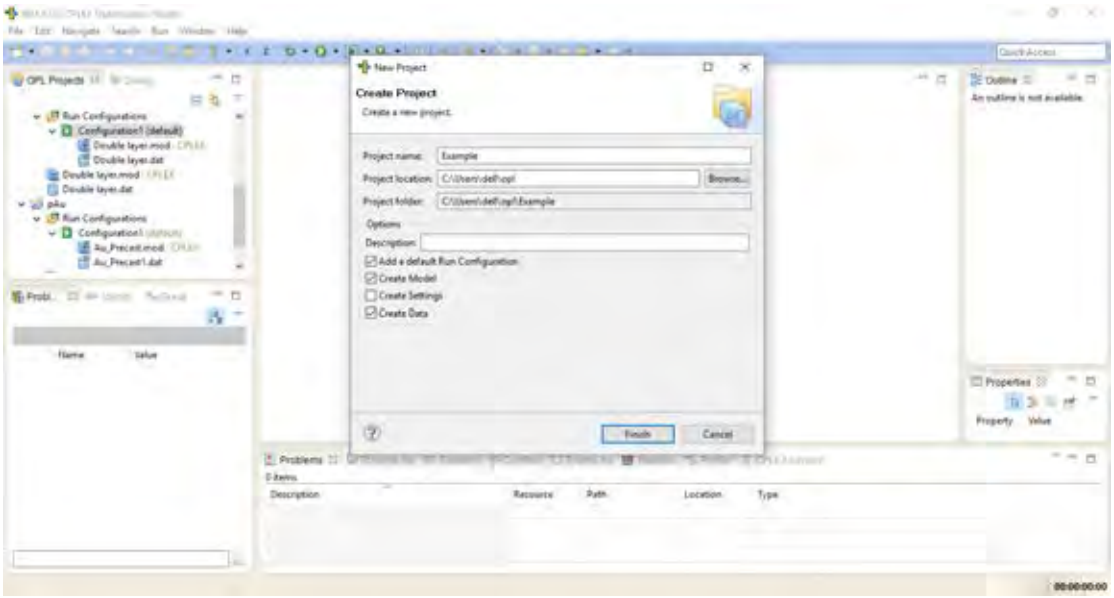
การขายแก๊สแอมโมเนีย 1 หน่วย และ 50 ยูโรจากการขายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 หน่วย บริษัทจะวางแผนการผลิตอย่างไรเพื่อให้ได้กำไรสูงที่สุด

2.4.2 การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม ILOG OPL

สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 2.4(a) และข้อมูลนำเข้าดังรูปที่ 2.4(b)

- บรรทัดที่ 6-9 มีเพื่อกำหนดเซ็ตของข้อมูล Numpro แทนด้วยจำนวนสินค้า และ Numre แทนด้วยจำนวนทรัพยากร
- บรรทัดที่ 10-12 มีเพื่อกำหนดข้อมูลนำเข้า a แทนด้วยอัตราการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ เพื่อผลิตสินค้า Avail แทนด้วยจำนวนทรัพยากรที่มี และ Profit คือกำไรที่ได้จากการขายสินค้า -
- บรรทัดที่ 14 เพื่อกำหนดตัวแปรตัดสินใจ โดยในที่นี้ คือจำนวนสินค้าที่ต้องการผลิต กำหนดให้เป็นจำนวนจริงบวก (float+) ในขั้นนี้สามารถกำหนดประเภทของตัวแปรได้หลากหลาย เช่น ถ้าต้องการให้ตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก จะใช้คำสั่ง int+ หรือถ้าต้องการให้ตัวแปรมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น จะใช้คำสั่ง Boolean
- บรรทัดที่ 16 คือสมการวัตถุประสงค์เพื่อกำไรที่มากที่สุด
- บรรทัดที่ 17-19 แทนเงื่อนไขการมีอยู่อย่างจำกัดของทรัพยากร

โดยเมื่อให้โปรแกรมหาคำตอบแล้ว จะได้คำตอบดังรูปที่ 2.5 แสดงว่าจะผลิตแก๊สแอมโนเนีย 20 หน่วยและแอมโมเนียมคลอไรด์ 30 หน่วย เพื่อให้ได้กำไรที่สุดที่สุดเท่ากับ 2,300 ยูโร



รูปที่ 2.3 การสร้างโอพีแอลโปรเจกต์

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

Example.mod | Example.dat

```
/*********************************************
 * OPL 12.6.0.0 Model
 * Author: dell
 * Creation Date: Jul 3, 2019 at 1:47:35 AM
 *********************************************/
int numpro = ...;
int numre = ...;
range p = 1..numpro;
range r = 1..numre;
float a[p][r] = ...;
float Avail[r] = ...;
float Profit[p] = ...;

dvar float+ x[p];

maximize sum(p in p)Profit[p]*x[p];
subject to {
forall(r in r) sum(p in p)a[p][r]*x[p] <= Avail[r];
}
```

(a)

Example.mod | Example.dat

```
/*********************************************
 * OPL 12.6.0.0 Data
 * Author: dell
 * Creation Date: Jul 3, 2019 at 1:47:35 AM
 *********************************************/
numpro = 2; //type of products
numre = 3; //type of resources
a = [[1,3,0],[1,4,1]];
Avail = [50,180,40];
Profit = [40,50];
```

(b)

รูปที่ 2.4 การเขียนโปรแกรม ILOG OPL

Probl... | Variab... | Break...

Solution with objective 2,300

Name	Value
Data (7)	
a	[[1 3 0] [1 4 1]]
Avail	[50 180 40]
numpro	2
numre	3
p	1..2
Profit	[40 50]
r	1..3
Decision variables (	
x	[20 30]

รูปที่ 2.5 คำตอบจากโปรแกรม ILOG OPL

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

2.5 การเขียนโปรแกรม PYTHON

งานวิจัยนี้ เสนอวิธีฮิวริสติกเพื่อหาคำตอบโดยใช้โปรแกรม PYTHON จึงศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมขั้นพื้นฐานสำหรับงานวิจัย ในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงคำสั่งขั้นพื้นฐานที่จะใช้ในงานวิจัยนี้

2.5.1 ประเภทข้อมูล ตัวแปรและนิพจน์ (Data type, variable, and expression)

1) ตัวแปรที่เป็นตัวเก็บข้อมูลจะต้องมีชื่อกำกับ โดยไม่ควรตั้งชื่อตัวแปรซ้ำกับฟังก์ชันใน PYTHON เช่น int, max, sum

2) ประเภทของข้อมูล เช่น int จะหมายถึงจำนวนเต็ม และ float จะหมายถึงจำนวนจริง

3) การให้ค่ากับตัวแปร จะใช้เครื่องหมาย = ในการกำหนดค่า เช่น กำหนด a = b = 0.0 จะให้ตัวแปร a และ b เก็บค่าจำนวนจริง 0.0

4) ตัวดำเนินการ และการแปลงประเภทข้อมูล

- ตัวดำเนินการ บวก (+), ลบ (-), คูณ (*), ยกกำลัง (**), หาร (/), หารปัดเศษ (//), เศษจากการหาร (%)

- การแปลงประเภทข้อมูล สามารถเปลี่ยนข้อความให้กลายเป็นตัวเลขได้ หรือสามารถเปลี่ยนจำนวนจริงให้เป็นจำนวนเต็มได้ เช่น a = int(13/4) จะให้ค่า a = 3

- การแสดงข้อมูลทางจอภาพ ใช้คำสั่ง print() เช่น เขียนคำสั่งว่า

a = int(13/4)

b = 13/4

print(a,b) แสดงข้อมูลทางจอภาพคือ 3 3.25

- การอ่านข้อมูลจากแป้นพิมพ์ ใช้คำสั่ง input() เช่น a = int(input()) a จะเก็บค่าจำนวนเต็มที่รับมาจากแป้นพิมพ์เอาไว้

2.5.2 การใช้คำสั่งถ้าแล้ว (If-elif-else)

การเปรียบเทียบที่มักใช้กับคำสั่งถ้าแล้ว

1) == แทนเครื่องหมายเท่ากับ ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ ถ้าเป็นคำสั่งเท่ากับที่ใช้รับค่าตัวแปร หรือใช้คำนวณ จะใช้ =

2) != แทนเครื่องหมายไม่เท่ากับ

3) >=, <= แทนเครื่องหมายมากกว่าเท่ากับและน้อยกว่าเท่ากับ ตามลำดับ

4) >, < แทนเครื่องหมายมากกว่าและน้อยกว่า ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังสามารถเขียนเงื่อนไขเหล่านี้แทนกันได้ เช่น

- x ไม่เท่ากับ 0 สามารถเขียน x != 0 หรือ not(x == 0)

- x ไม่เท่ากับ 2 และไม่เท่ากับ 4 สามารถเขียน x != 2 and x != 4 หรือ not(x == 2 or x == 4)

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

- x มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3 แต่น้อยกว่า 9 สามารถเขียน 3 <= x < 9 หรือ 3 <= x and x < 9

ยกตัวอย่างเช่นการให้เกรดจากคะแนนเต็มร้อยคะแนนโดยมีเกณฑ์ดังตารางที่ 2.1 สามารถเขียนโปรแกรมได้ดังรูปที่ 2.6(a)

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การให้เกรด

เกรด	ช่วงคะแนน
A	คะแนน ≥ 80
B	70 ≤ คะแนน < 80
C	60 ≤ คะแนน < 70
D	50 ≤ คะแนน < 60
F	คะแนน < 50

จากรูปที่ 2.6 (b) หน้าจอแสดงผลจะแสดงคำว่า Enter point = เพื่อให้ point เก็บค่าจำนวนจริงเอาไว้ แล้วมาพิจารณาว่าจะให้เกรดอะไร เมื่อใส่ตัวเลข 49.9 ลงไป จะให้เกรด F ซึ่งจะแสดงผลดังรูป

2.5.3 การทำซ้ำ (Repetition)

สามารถใช้คำสั่ง while หรือ for ได้ โดยจะมีวิธีการเขียนคล้าย ๆ กัน สามารถทำได้ทั้ง 2 แบบ ดังตัวอย่างการหาค่าเฉลี่ยจาก 5 จำนวนที่รับค่ามาจากแป้นพิมพ์

1) การใช้คำสั่ง while

จะวนทำคำสั่งในลูป while ตราบใดที่การเปรียบเทียบเป็นจริง โดยจะต้องเขียนการเปลี่ยนแปลงด้วย สามารถเขียนโปรแกรมสำหรับตัวอย่างดังรูปที่ 2.7(a) เริ่มต้นกำหนด a = 0 ซึ่งเป็นตัวนับว่าครบ 5 จำนวนหรือยัง จะออกจากลูป while ก็ต่อเมื่อ a มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 5 โดยในลูปจะเขียนการเปลี่ยนแปลงสำหรับค่า a คือเมื่อทำลูปนี้ 1 ครั้ง a จะมีค่ามากขึ้น 1 หน่วย โดยที่ summation คือการบวกเลขที่รับค่าเข้ามา และสุดท้ายคือคำสั่งให้แสดงผลค่าเฉลี่ย โดยหน้าจอแสดงผลจะเป็นดังรูปที่ 2.7(b)

2) การใช้คำสั่ง for

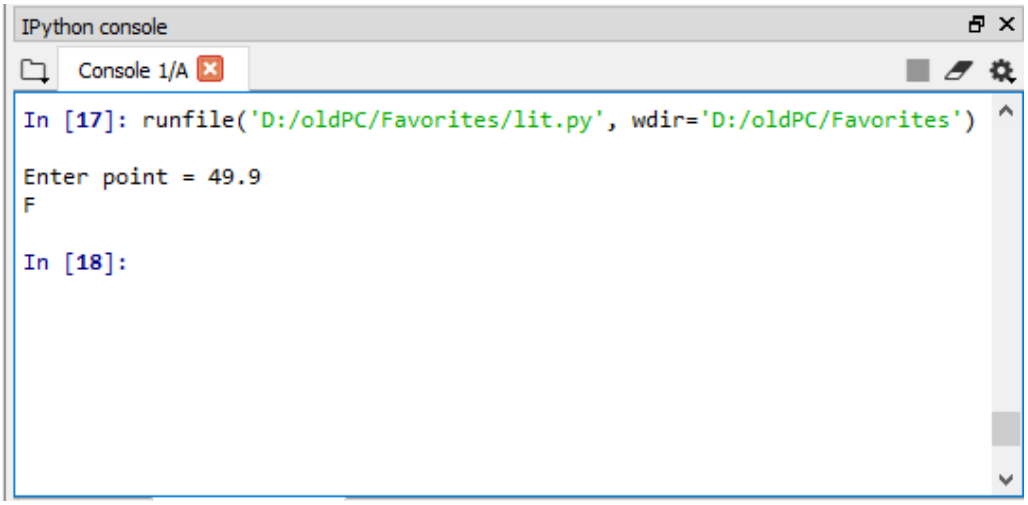
สามารถเขียนโปรแกรมสำหรับตัวอย่างเดียวกันได้ โดยใช้คำสั่ง for ดังรูปที่ 2.8(a) จะแตกต่างกับคำสั่ง while ตรงที่ไม่จะเป็นต้องกำหนดค่าตั้งต้นสำหรับ a สามารถเขียน for a in range(5): ได้เลย โดยที่ a จะมีค่า 0, 1, 2, 3, 4 ซึ่งจะวนลูป 5 ครั้ง และไม่ต้องเขียนคำสั่งให้ a

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เปลี่ยนแปลงค่าด้วย ที่เหลือจะเขียนเหมือนกับคำสั่ง while และจะเห็นว่าหน้าจอแสดงผลจากรูปที่ 2.8(b) จะแสดงออกมาเหมือนกับรูปที่ 2.7(b)

```
 8 point = float(input('Enter point = '))
 9 if(point >= 80):
10     print('A')
11 elif(point >= 70):
12     print('B')
13 elif(point >= 60):
14     print('C')
15 elif(point >= 50):
16     print('D')
17 else:
18     print('F')
```

(a)



(b)

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรมคำสั่งถ้าแล้วและหน้าจอแสดงผล

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

```
 7 a = 0
 8 summation = 0
 9 while a < 5:
10     b = float(input('Enter number = '))
11     summation += b
12     a += 1
13 print('average = ', summation/5)
```

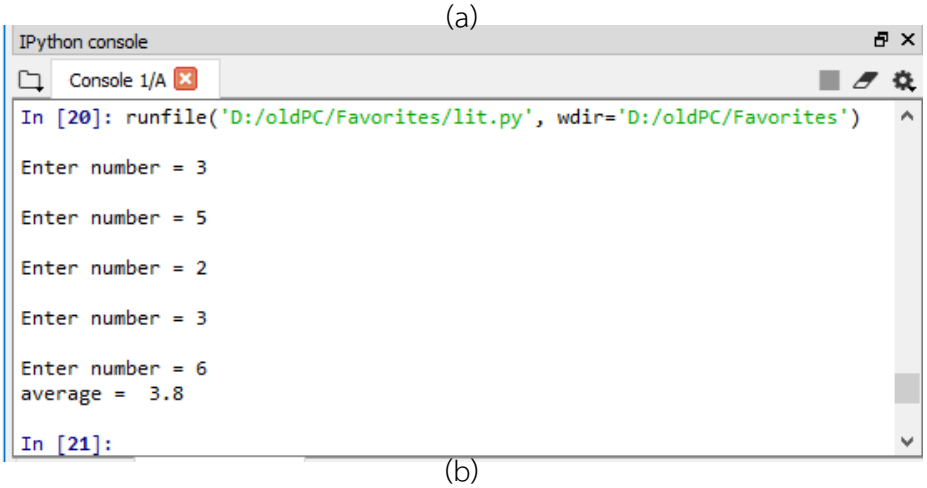
(a)

(b)

รูปที่ 2.7 การเขียนคำสั่ง while และหน้าจอแสดงผล

```
 8 summation = 0
 9 for a in range(5):
10     b = float(input('Enter number = '))
11     summation += b
12 print('average = ', summation/5)
```

(a)



(b)

รูปที่ 2.8 การเขียนคำสั่ง for และหน้าจอแสดงผล

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

2.5.4 ฟังก์ชัน (Function)

สามารถเขียนคำสั่งที่ซับซ้อนเป็นฟังก์ชันและสามารถเรียกใช้งานได้ซ้ำ ๆ โดยที่ไม่ต้องเขียนคำสั่งหลายรอบ เช่น จากตัวอย่างการหาค่าเฉลี่ยจาก 5 จำนวนที่รับค่ามาจากแป้นพิมพ์ที่ได้กล่าวไปแล้ว สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันได้ และสามารถเรียกใช้งานโดยการพิมพ์ชื่อฟังก์ชัน โดยสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.9(a)

```
avg = 0
def average(avg):
    summation = 0
    for a in range(5):
        b = float(input('Enter number = '))
        summation += b
    avg = summation/5
    return avg
avg = average(avg)
print('average = ', avg)
```

(a)

(b)

รูปที่ 2.9 การเขียนฟังก์ชันและหน้าจอแสดงผล

จากรูปที่ 2.9(a) เป็นการเขียนฟังก์ชันชื่อ average(avg) โดยเวลาเรียกใช้งานฟังก์ชันนี้ ให้พิมพ์ว่า avg = average(avg) นั่นคือให้ avg เป็นตัวรับค่าเฉลี่ยนั่นเอง โดยที่ summation จะเป็นตัวแปรในฟังก์ชัน (Local variable) ใช้สำหรับหาผลรวมของค่าทั้ง 5 ค่าในฟังก์ชันนี้เท่านั้น โดยเขียนคำสั่งให้คืนค่า avg ด้วยการพิมพ์ return avg หน้าจอจะแสดงผลดังรูปที่ 2.9(b) [23]

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการวิจัย

3.1 ลักษณะปัญหา

งานวิจัยนี้ ศึกษาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีแม่แบบที่เหมือนกันหลายแม่แบบ ซึ่งการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปนี้ มีขั้นตอนการผลิต 5 ขั้นตอน ซึ่งงานแต่ละงาน จะต้องผ่านขั้นตอนการผลิตตามลำดับ ในแต่ละขั้นตอนการผลิตนั้น จะมีทรัพยากรสำหรับแต่ละขั้นตอนเพียง 1 หน่วย ดังนั้น การผลิตงานขั้นตอนการผลิตเดียวกัน ในช่วงเวลาเดียวนั้น จึงไม่สามารถทำได้ สำหรับขั้นตอนการผลิตที่ 2 นั้น มีข้อแตกต่าง นั่นคือ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการผลิตที่ 2 แล้ว จะต้องใช้เวลา 1 หน่วยในการทำความสะอาดอุปกรณ์ก่อน จึงจะสามารถผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ในงานต่อไปได้ ส่วนขั้นตอนการผลิตที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนการบ่ม ไม่ต้องใช้ทรัพยากรใด ๆ ในการผลิต จึงสามารถผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 พร้อมกันได้หลายงาน ในการผลิตจะสามารถเลือกสูตรการผลิต 5 สูตรด้วยกัน สูตรการผลิตที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้เวลาการผลิตของขั้นตอนที่ 3 เปลี่ยนแปลงได้ แต่จะไม่ส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีต โดยสูตรที่มีราคาการผลิตถูก จะใช้เวลาในการผลิตนาน และสูตรที่มีราคาการผลิตสูง ก็ใช้เวลาในการผลิตสั้น ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เวลาการผลิตของแต่ละขั้นตอนการผลิต ตามสูตรต่าง ๆ

สูตร	เวลาการผลิต (หน่วย)						ต้นทุนการผลิต (หน่วย)
	ขั้นตอนที่ 1	ขั้นตอนที่ 2	ขั้นตอนที่ 3	ขั้นตอนที่ 4	ขั้นตอนที่ 5	รวม	
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

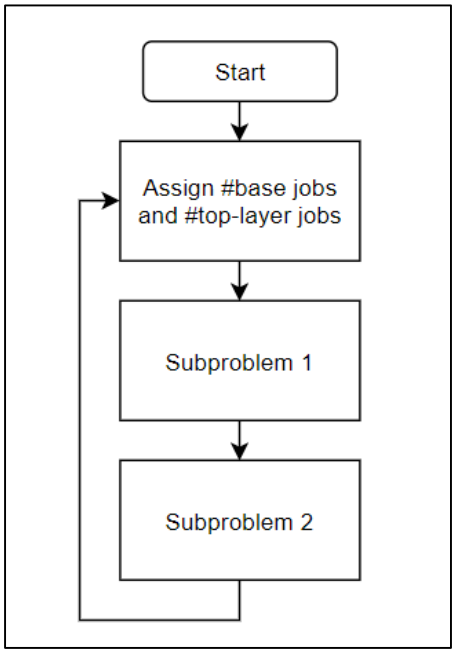
*หมายเหตุ กำหนดเวลาการผลิต 1 หน่วย เท่ากับครึ่งชั่วโมง

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อให้งานเสร็จสิ้นภายในกำหนดเวลาส่งงาน และมีต้นทุนรวมในการผลิตต่ำที่สุด โดยที่สามารถผลิตงานซ้อนทับบนงานชั้นล่าง

ได้ โดยมีข้อจำกัดคือ สามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับได้เมื่อเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนที่ 3 ไปแล้ว 12 หน่วย (6 ชั่วโมง) และจะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนที่ 4 ได้หลังจากงานซ้อนทับเสร็จสิ้นการผลิตแล้วเท่านั้น สำหรับงานชั้นล่าง 1 งาน สามารถรองรับการผลิตงานซ้อนทับได้สูงสูง 1 งานเท่านั้น โดยที่งานซ้อนทับ จะต้องใช้ทรัพยากรร่วมกับงานชั้นล่างเช่นเดียวกัน

3.2 **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของณัฐพล (2554)**

ณัฐพล (2554) ศึกษาปัญหาเดียวกันนี้ โดยการแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาย่อย เพื่อลดเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Separated models) และเสนอวิธีฮิวริสติกสำหรับหาคำตอบสำหรับแต่ละปัญหาย่อย โดยปัญหาย่อยแรกนั้น จะศึกษาเฉพาะการเลือกสูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิตสำหรับงานชั้นล่างเท่านั้น โดยจะนำคำตอบบางส่วนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานชั้นล่างไปเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับปัญหาย่อยที่ 2 เมื่อได้คำตอบแล้วจะเปลี่ยนจำนวนงานชั้นล่างและงานซ้อนทับเพื่อนำคำตอบที่ได้มาเปรียบเทียบกันว่าการแบ่งงานชั้นล่างและงานซ้อนทับจำนวนเท่าไรถึงจะให้คำตอบที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 3.1 [1]



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการไหลของการแบ่งปัญหาย่อย

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานชั้นล่าง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนนี้ ใช้เลือกสูตรการผลิต เลือกแม่แบบและจัดตารางการผลิตสำหรับงานชั้นล่างเพื่อให้ทุกงานเสร็จภายในกำหนดส่งงาน โดยมีต้นทุนต่ำที่สุด ดังนี้

เซต (Sets)

$I = \{1, 2, \dots, m\}$ คือ เซตของงานผลิตคอนกรีต

$J = \{1, 2, \dots, n\}$ คือ เซตของขั้นตอนการผลิต

$K = \{1, 2, \dots, o\}$ คือ เซตของแม่แบบ

$F = \{1, 2, \dots, p\}$ คือ เซตของสูตรการผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$X_{ifk} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้างาน } i \text{ เลือกการผลิตแบบงานชั้นล่าง สูตรการผลิต } f \text{ ในแม่แบบ } k \\ 0 \; Otherwise \end{cases}$

$W_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงาน } i' \text{ ผลิตหลังงาน } i \\ 0 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงาน } i \text{ ผลิตหลังงาน } i' \end{cases}$

$Y_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้างาน } i \text{ ผลิตในแม่แบบ } k \\ 0 \text{ ถ้างาน } i \text{ ไม่ได้ผลิตในแม่แบบ } k \end{cases}$

S_{ij} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงาน i ขั้นตอนการผลิต j

B_{ik} = เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่าง i ของแม่แบบ k

พารามิเตอร์ (Parameters)

P_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต j โดยที่ j = 1, 2, 4, 5

$P3_f$ = ระยะเวลาการบ่มของสูตรการผลิต f

$Cost_f$ = ต้นทุนการผลิตของสูตรการผลิต f

D = กำหนดเวลาส่งงาน

M = ตัวเลขที่มีค่ามาก ๆ กำหนดให้มีค่าเท่ากับกำหนดเวลาส่งงาน

แบบจำลอง (Model)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective function)

สมการ (1) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผลิตงานชั้นล่างให้มีต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด

$$minimize \quad \sum_{i \in I} \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} Cost_f \, X_{ifk} \qquad (1)$$

เงื่อนไข (Constraints)

เงื่อนไข (2) กำหนดว่างานชั้นล่างแต่ละงาน จะสามารถเลือกสูตรการผลิตได้เพียงสูตรเดียว และเลือกแม่แบบการผลิตได้เพียงแม่แบบเดียวเท่านั้น

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in K} X_{ifk} = 1 \qquad , \forall i \in I \qquad (2)$$

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เงื่อนไข (3) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 2 จะเริ่มการผลิตได้หลังจาก เสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

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

เงื่อนไข (4) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 3 จะเริ่มการผลิตได้ทันทีที่ขั้นตอนการผลิตก่อนหน้าเสร็จสิ้น

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

เงื่อนไข (5) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 4 จะเริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 โดยระยะเวลาการผลิตจะแตกต่างไปตามสูตรการผลิต

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

เงื่อนไข (6) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 5 จะเริ่มการผลิตได้หลังจาก เสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

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

เงื่อนไข (7) กำหนดเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่างในแต่ละแม่แบบ จะเสร็จสิ้นหลังจากผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 เสร็จสิ้น

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

เงื่อนไข (8) และ (9) หมายความว่า ถ้างานชั้นล่าง i ไม่ได้ผลิตในงานในแม่แบบ k เวลาเสร็จสิ้นของงาน i ในแม่แบบ k จะมีค่าเท่ากับ 0

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

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

เงื่อนไข (10) หมายความว่า ในแม่แบบเดียวกัน ถ้ามีการผลิตงานชั้นล่าง (งาน i') ต่อจากงานชั้นล่างก่อนหน้า (งาน i) จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่างได้หลังจากเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่างก่อนหน้า

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

เงื่อนไข (11) และ (12) กำหนดให้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่ 1 4 และ 5 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต นั่นคือถ้า W_{ij} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงาน i' ผลิตหลังจากงาน i จะสามารถเริ่มการผลิตงาน i' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า และถ้า W_{ij} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงาน i ผลิตหลังจากงาน i' จะสามารถเริ่มการผลิตงาน i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า

$$S_{ij} + P_j - S_{i'j} \leq \left(1 - W_{ij}\right) \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J, i' \neq i, j \neq 2,3 \qquad (11)$$

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

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

เงื่อนไข (13) และ (14) กำหนดให้ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต โดยมีความแตกต่างจากขั้นตอนการผลิตอื่น เนื่องจาก ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเวลา 1 หน่วยในการทำความสะอาดก่อน จึงจะสามารถผลิตงานถัดไปได้ นั่นคือ นั่นคือถ้า W_{i2} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 มีงาน i' ผลิตหลังจากงาน i ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงาน i' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย และถ้า W_{i2} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงาน i ผลิตหลังจากงาน i' ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงาน i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย

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

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

เงื่อนไข (15) กำหนดให้เวลาเสร็จสิ้นการผลิตเสร็จภายในกำหนดเวลาส่งงาน

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

เงื่อนไข (16) (17) และ (18) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าได้เพียง 2 ค่า คือ 0 และ 1

$$X_{ifk} \in \{0,1\} \qquad ,\forall i \in I, \forall f \in F, \forall k \in K \qquad (16)$$

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

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

เงื่อนไข (19) และ (20) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0

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

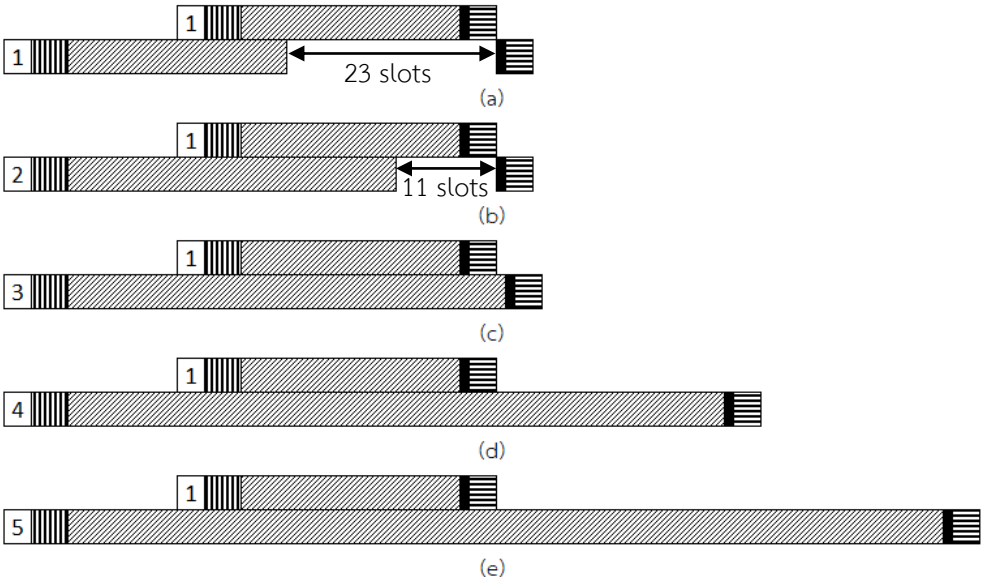
$$B_{ik} \geq 0 \qquad ,\forall i \in I, \forall k \in K \qquad (20)$$

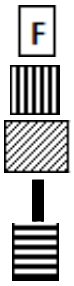
สำหรับปัญหาย่อยที่ 1 จะได้คำตอบคือ สูตรการผลิต แม่แบบที่ใช้และตารางการผลิตสำหรับงานชั้นล่าง โดยสูตรการผลิตและแม่แบบสำหรับงานชั้นล่างนี้ จะนำไปเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานซ้อนทับ ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ก่อนจะเข้าสู่ปัญหาย่อยที่ 2 จะพิจารณาความเป็นไปได้ว่าสามารถหาคำตอบด้วยการเพิ่มจำนวนงานซ้อนทับตามที่กำหนดหรือไม่ โดยให้งานซ้อนทับเป็นงานที่สั้นที่สุดเพื่อดูว่าเวลาที่เพิ่มขึ้นเมื่อใส่สูตรการผลิตที่ 1 ลงไปนั้นสามารถจัดตารางการผลิตได้หรือไม่ รูปที่ 3.2(a) ในกรณีที่งานชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 1 จะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นอีก 23 หน่วยสำหรับการผลิต ซึ่งไม่สามารถเป็นไปได้ เนื่องจากงานชั้นล่างสามารถเลือกสูตรการผลิตที่ 2 โดยจะเพิ่มเวลาการผลิตเพียง 12 หน่วยเท่านั้น ดังนั้น เมื่อมีงานชั้นล่างที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 จะไม่มีงานซ้อนทับผลิตบนงานชั้นล่างนี้ ในกรณีที่งานชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 รูปที่ 3.2(b) จะเห็นว่าจะต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นอีก 11 หน่วยสำหรับการผลิต โดยจำต้องตรวจสอบว่าคำตอบจากปัญหาย่อยแรกนี้มีเวลาเหลือก่อนกำหนดส่งงาน (Time remaining before due date) มากกว่า 11

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

หน่วยหรือไม่ ถ้าใช่ก็จะสามารถจัดให้มีการผลิตงานซ้อนทับบนงานนี้ได้ ส่วนกรณีที่งานชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 3, 4 และ 5 นั้น รูปที่ 3.2(c), (d) และ (e) จะเห็นว่าเมื่อมีงานซ้อนทับที่ใช้สูตรการผลิตที่ 1 ไม่จำเป็นต้องใช้เวลาการผลิตเพิ่มแต่อย่างใด แสดงว่าสามารถมีงานซ้อนทับผลิตบนงานนั้น ๆ ได้

ขอยกตัวปัญหาที่มีจำนวนงานชั้นล่าง 4 งาน 2 แม่แบบ ซึ่งได้คำตอบจากปัญหาย่อยที่ 1 ดังนี้ สูตรการผลิตสำหรับงานชั้นล่าง คือ 4-4-5-2 แม่แบบที่ใช้ คือ 1-1-2-2 และตารางการผลิต เมื่อหาจำนวนงานชั้นล่างมากที่สุดพบว่างานชั้นล่างที่ 1, 2 และ 3 นั้น สามารถมีงานซ้อนทับได้เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเพิ่มเวลาการผลิตถ้ามีงานซ้อนทับสูตรการผลิตที่ 1 มาผลิต ส่วนงานชั้นล่างที่ 4 นั้น ใช้สูตรการผลิตที่ 2 ซึ่งต้องมีเวลาเหลือก่อนกำหนดส่งงาน 11 หน่วย เมื่อดูตารางการผลิตจากรูปที่ 3.3(a) พบว่ามีเวลาเหลือก่อนกำหนดส่งงานเพียง 9 หน่วย ทำให้ไม่สามารถมีงานซ้อนทับบนงานชั้นล่างที่ 4 ได้ และเมื่อลองจัดตารางการผลิตโดยให้ทุกงานชั้นล่างมีงานซ้อนทับสูตรการผลิตที่ 1 ดังรูปที่ 3.3(b) พบว่าไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดเวลาส่งงานจริง ๆ ดังนั้น จำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดสำหรับปัญหาที่มีงานชั้นล่าง 4 งานจะเท่ากับ 3 งาน





แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

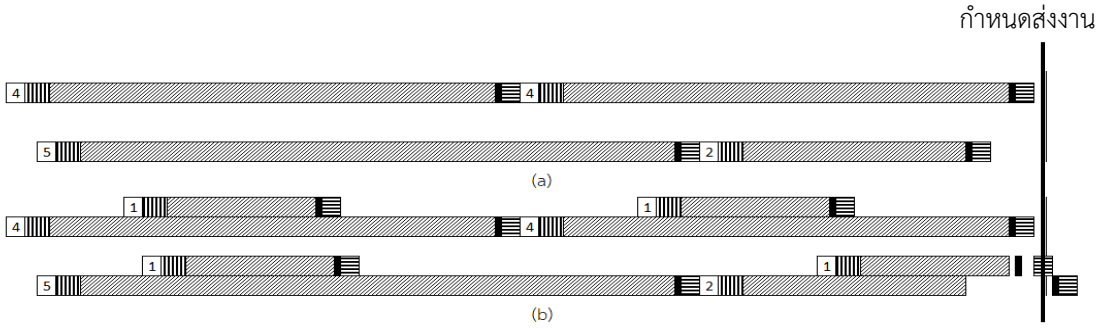
แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

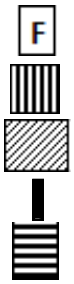
แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 3.2 งานซ้อนทับสูตรการผลิตที่ 1 บนงานชั้นล่างสูตรการผลิตต่าง ๆ

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23





แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 3.3 การหาจำนวนงานซ้อนทับที่มากที่สุดสำหรับปัญหาที่มีงานชั้นล่าง 4 งาน

3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนนี้ ใช้ในการเลือกสูตรการผลิตและงานชั้นล่างสำหรับงานซ้อนทับ และการจัดตารางการผลิตงานชั้นล่างและงานซ้อนทับ เพื่อให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงาน และมีต้นทุนการผลิตงานซ้อนทับต่ำที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

เซต (Sets)

$I = \{1, 2, \dots, m\}$ คือ เซตของงานชั้นล่าง

$L = \{1, 2, \dots, m\}$ คือ เซตของงานซ้อนทับ

$J = \{1, 2, \dots, n\}$ คือ เซตของขั้นตอนการผลิต

$F = \{1, 2, \dots, p\}$ คือ เซตของสูตรการผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$$X_{lfi} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้างาน } l \text{ เลือกการผลิตแบบงานชั้นล่าง สูตรการผลิต } f \text{ ผลิตบนงานชั้นล่าง } i \\ 0 \; Otherwise \end{cases}$$

S_{ij} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานชั้นล่าง i ขั้นตอนการผลิต j

S'_{lj} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงานซ้อนทับ l ขั้นตอนการผลิต j

B_i = เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่าง i

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงานชั้นล่าง } i \text{ ผลิตหลังงานชั้นล่าง } i' \\ 0 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงานชั้นล่าง } i' \text{ ผลิตหลังงานชั้นล่าง } i \end{cases}$$

$$V_{lji} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงานชั้นล่าง } i \text{ ผลิตหลังงานซ้อนทับ } l \\ 0 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงานซ้อนทับ } l \text{ ผลิตหลังงานชั้นล่าง } i \end{cases}$$

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

$$U_{lj} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงานซ้อนทับ } l \text{ ผลิตหลังงานซ้อนทับ } l' \\ 0 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงานซ้อนทับ } l' \text{ ผลิตหลังงานซ้อนทับ } l \end{cases}$$

พารามิเตอร์ (Parameters)

P_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต j ของงานชั้นล่าง โดยที่ j = 1, 2, 4, 5

P'_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต j ของงานซ้อนทับ โดยที่ j = 1, 2, 4, 5

$P3_f$ = ระยะเวลาการบ่มของสูตรการผลิต f

$Cost_f$ = ต้นทุนการผลิตของสูตรการผลิต f

$Form_i$ = ระยะเวลาในการบ่มของงานชั้นล่าง i

$Mold_i$ = แม่แบบที่ชั้นล่าง i ใช้ในการผลิต

D = กำหนดเวลาส่งงาน

M = ตัวเลขที่มีค่ามาก ๆ กำหนดให้มีค่าเท่ากับกำหนดเวลาส่งงาน

แบบจำลอง (Model)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective function)

สมการ (21) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้งานซ้อนทับทุกงานมีต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด

$$minimize \quad \sum_{l\in L}\sum_{f\in F}\sum_{i\in I} Cost_f \, X_{lfi} \tag{21}$$

เงื่อนไข (Constraints)

เงื่อนไข (22) กำหนดว่าแต่ละงานซ้อนทับ จะสามารถเลือกผลิตได้เพียงสูตรการผลิตเดียว และสามารถเลือกผลิตซ้อนทับงานชั้นล่างได้เพียงงานเดียวเท่านั้น

$$\sum_{f\in F}\sum_{i\in I} X_{lfi} = 1 \qquad ,\forall l \in L \tag{22}$$

เงื่อนไข (23) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานชั้นล่างให้เริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

$$S_{i2} \geq S_{i1} + P_1 \qquad ,\forall i \in I \tag{23}$$

เงื่อนไข (24) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานชั้นล่างให้เริ่มการผลิตได้ทันทีที่ขั้นตอนการผลิตก่อนหน้าเสร็จสิ้น

$$S_{i3} = S_{i2} + P_2 \qquad ,\forall i \in I \tag{24}$$

เงื่อนไข (25) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานชั้นล่างให้เริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 โดยระยะเวลาการผลิตจะแตกต่างไปตามสูตรการผลิต ซึ่งเป็นคำตอบจากปัญหาย่อยที่ 1

$$S_{i4} \geq S_{i3} + Form_i \qquad ,\forall i \in I \tag{25}$$

เงื่อนไข (26) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานชั้นล่างให้เริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

$$S_{i5} \geq S_{i4} + P_4 \qquad ,\forall i \in I \qquad (26)$$

เงื่อนไข (27) กำหนดเวลาเสร็จสิ้นของงานชั้นล่างให้เท่ากับหลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5

$$B_i \geq S_{i5} + P_5 \qquad ,\forall i \in I \qquad (27)$$

เงื่อนไข (28) กำหนดเวลาเริ่มต้นการผลิตงานชั้นล่าง i' ในกรณีที่งานชั้นล่าง i และงานชั้นล่าง i' ใช้แม่แบบเดียวกัน จะสามารถเริ่มการผลิตได้ก็ต่อเมื่อเสร็จสิ้นการผลิตงานชั้นล่าง i แล้ว

$$B_i - S_{i'1} \leq (Mold_i - Mold_{i'}) \cdot M \quad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, i' > i, Mold_i = Mold_{i'} \qquad (28)$$

เงื่อนไข (29) และ (30) กำหนดให้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่ 1 4 และ 5 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต นั่นคือถ้า W_{ij} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานชั้นล่าง i' ผลิตหลังจากงานชั้นล่าง i จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่าง i' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า และถ้า W_{ij} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานชั้นล่าง i ผลิตหลังจากงานชั้นล่าง i' จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่าง i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า

$$S_{ij} + P_j - S_{i'j} \leq (1 - W_{ij}) \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J, i' \neq i, j \neq 2,3 \qquad (29)$$

$$-S_{ij} + P_j + S_{i'j} \leq W_{ij} \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J, i' \neq i, j \neq 2,3 \qquad (30)$$

เงื่อนไข (31) และ (32) กำหนดให้ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต โดยมีความแตกต่างจากขั้นตอนการผลิตอื่น เนื่องจาก ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเวลา 1 หน่วยในการทำความสะอาดก่อน จึงจะสามารถผลิตงานถัดไปได้ นั่นคือ นั่นคือถ้า W_{i2} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 มีงานชั้นล่าง i' ผลิตหลังจากงานชั้นล่าง i ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่าง i' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย และถ้า W_{i2} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานชั้นล่าง i ผลิตหลังจากงานชั้นล่าง i' ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่าง i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย

$$1 + S_{i2} + P_2 - S_{i'2} \leq (1 - W_{i2}) \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, i' \neq i \qquad (31)$$

$$1 - S_{i2} + P_2 + S_{i'2} \leq W_{i2} \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, i' \neq i \qquad (32)$$

เงื่อนไข (33) กำหนดให้เวลาเสร็จสิ้นการผลิตงานชั้นล่างเสร็จภายในกำหนดเวลาส่งงาน

$$B_i \leq D \qquad ,\forall i \in I \qquad (33)$$

เงื่อนไข (34) กำหนดว่าแต่ละงานชั้นล่างจะสามารถเลือกผลิตซ้อนทับงานได้สูงสุด 1 งานเท่านั้น ซึ่งอาจจะมีหรือไม่มีงานซ้อนทับผลิตก็ได้

$$\sum_{l \in L} \sum_{f \in F} X_{lfi} \leq 1 \qquad ,\forall l \in L \qquad (34)$$

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เงื่อนไข (35) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับให้เริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

$$S'_{l2} \geq S'_{l1} + P'_1 \qquad ,\forall l \in L \qquad (35)$$

เงื่อนไข (36) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานชั้นล่างให้เริ่มการผลิตได้ทันทีที่ขั้นตอนการผลิตก่อนหน้าเสร็จสิ้น

$$S'_{l3} = S'_{l2} + P'_2 \qquad ,\forall l \in L \qquad (36)$$

เงื่อนไข (37) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานซ้อนทับให้เริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 โดยระยะเวลาการผลิตจะแตกต่างไปตามสูตรการผลิต

$$S'_{l4} \geq S'_{l3} + \sum_{f\in F}\sum_{i\in I} X_{lfi}P_{3f} \qquad ,\forall l \in L \qquad (37)$$

เงื่อนไข (38) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับให้เริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

$$S'_{l5} \geq S'_{l4} + P'_4 \qquad ,\forall l \in L \qquad (38)$$

เงื่อนไข (39) หมายความว่า ถ้ามีงานซ้อนทับที่ผลิตบนงานชั้นล่าง จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับได้ ก็ต่อเมื่อเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ไปแล้ว 12 หน่วย

$$\left(1 - \sum_{f\in F} X_{lfi}\right)\cdot M \geq S_{i3} + 12 - S'_{l1} \qquad ,\forall l \in L, \forall i \in I \qquad (39)$$

เงื่อนไข (40) หมายความว่า ถ้ามีงานซ้อนทับที่ผลิตบนงานชั้นล่าง จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนการผลิตที่ 4 ได้ หลังจากการผลิตงานซ้อนทับเสร็จสิ้น นั่นคือ เริ่มการผลิตงานชั้นล่างต่อได้ก็ต่อเมื่อ งานซ้อนทับเสร็จสิ้นการผลิตในขั้นตอนการผลิตที่ 5

$$\left(1 - \sum_{f\in F} X_{lfi}\right)\cdot M \geq S'_{l5} + P'_5 - S_{i4} \qquad ,\forall l \in L, \forall i \in I \qquad (40)$$

เงื่อนไข (41) และ (42) กำหนดให้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่ 1 4 และ 5 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต นั่นคือถ้า V_{lji} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานซ้อนทับ l ผลิตหลังจากงานชั้นล่าง i จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับ l ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า และถ้า V_{lji} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานชั้นล่าง i ผลิตหลังจากงานซ้อนทับ l จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่าง i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า

$$S_{ij} + P_j - S'_{lj} \leq \left(1 - V_{lji}\right)\cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L, \forall j \in J, j \neq 2,3 \qquad (41)$$

$$-S_{ij} + P'_j + S'_{lj} \leq V_{lji}\cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L, \forall j \in J, j \neq 2,3 \qquad (42)$$

เงื่อนไข (43) และ (44) กำหนดให้ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต โดยมีความแตกต่างจากขั้นตอนการผลิตอื่น เนื่องจาก ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเวลา 1 หน่วยในการทำความสะอาดก่อน นั่นคือถ้า V_{lji} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานซ้อนทับ l ผลิตหลังจากงานชั้นล่าง i จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับ l ได้ หลังจาก

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย และถ้า V_{lji} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานชั้นล่าง i ผลิตหลังจากงานซ้อนทับ l จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่าง i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย

$$1 + S_{i2} + P_2 - S'_{l2} \leq (1 - V_{l2i}) \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L \qquad (43)$$

$$1 - S_{i2} + P'_2 + S'_{l2} \leq V_{l2i} \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L \qquad (44)$$

เงื่อนไข (45) และ (46) กำหนดให้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่ 1 4 และ 5 ของงานซ้อนทับไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต นั่นคือถ้า U_{lj} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานซ้อนทับ l' ผลิตหลังจากงานซ้อนทับ l จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับ l' ได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า และถ้า U_{lj} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานซ้อนทับ l ผลิตหลังจากงานซ้อนทับ l' จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับ l ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า

$$S'_{lj} + P'_j - S'_{l'j} \leq (1 - U_{lj}) \cdot M \qquad ,\forall l \in L, \forall l' \in L, \forall j \in J, l' \neq l, j \neq 2,3 \qquad (45)$$

$$-S'_{lj} + P'_j + S'_{l'j} \leq U_{lj} \cdot M \qquad ,\forall l \in L, \forall l' \in L, \forall j \in J, l' \neq l, j \neq 2,3 \qquad (46)$$

เงื่อนไข (47) และ (48) กำหนดให้ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต โดยมีความแตกต่างจากขั้นตอนการผลิตอื่น เนื่องจาก ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเวลา 1 หน่วยในการทำความสะอาดก่อน จึงจะสามารถผลิตงานถัดไปได้ นั่นคือ นั่นคือถ้า U_{lj} มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 มีงานซ้อนทับ l' ผลิตหลังจากงานซ้อนทับ l ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับ l' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย และถ้า U_{lj} มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงานซ้อนทับ l ผลิตหลังจากงานซ้อนทับ l' ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับ l ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย

$$1 + S'_{l2} + P'_2 - S'_{l'2} \leq (1 - U_{lj}) \cdot M \qquad ,\forall l \in L, \forall l' \in L, l' \neq l \qquad (47)$$

$$1 - S'_{l2} + P'_2 + S'_{l'2} \leq U_{lj} \cdot M \qquad ,\forall l \in L, \forall l' \in L, l' \neq l \qquad (48)$$

เงื่อนไข (49) - (52) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าได้เพียง 2 ค่า คือ 0 และ 1

$$X_{lfi} \in \{0,1\} \qquad ,\forall l \in L, \forall f \in F, \forall i \in I \qquad (49)$$

$$W_{ij} \in \{0,1\} \qquad ,\forall i \in I, \forall j \in J \qquad (50)$$

$$V_{lji} \in \{0,1\} \qquad ,\forall l \in L, \forall j \in J, \forall i \in I \qquad (51)$$

$$U_{lj} \in \{0,1\} \qquad ,\forall l \in L, \forall j \in J \qquad (52)$$

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เงื่อนไข(53), (54) และ (55) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0

$$S_{ij} \geq 0 \qquad ,\forall i \in I, \forall j \in J \qquad (53)$$

$$S'_{lj} \geq 0 \qquad ,\forall l \in L, \forall j \in J \qquad (54)$$

$$B_i \geq 0 \qquad ,\forall i \in I \qquad (55)$$

จะเห็นได้ว่าการแบ่งปัญหาย่อยนั้น นำคำตอบบางส่วนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานชั้นล่างมาเป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ ได้แก่ สูตรการผลิตและแม่แบบสำหรับงานชั้นล่าง หมายความว่าสูตรการผลิตสำหรับงานชั้นล่างไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้พื้นที่ในการค้นหาคำตอบ (Search space) มีจำกัด เพราะต้องเลือกสูตรการผลิตสำหรับงานซ้อนทับที่ไม่ทำให้งานบางงานต้องเลื่อนการผลิตมากจนทำให้เสร็จสิ้นการผลิตเลยกำหนดส่งงาน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมสามารถพิจารณาเลือกสูตรการผลิตสำหรับงานชั้นล่างและงานซ้อนทับไปพร้อม ๆ กัน ทำให้มีพื้นที่ในการหาคำตอบที่กว้างกว่า จึงมีโอกาสที่จะเจอคำตอบที่ดีกว่านั่นเอง

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม (Overall model)

ในส่วนนี้คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งรวมปัญหาย่อยที่ได้กล่าวไปแล้วเข้าด้วยกัน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถเลือกสูตรการผลิตสำหรับงานแต่ละงาน เลือกได้ว่างานใดจะถูกผลิตเป็นงานชั้นล่าง และงานใดบ้างที่จะถูกผลิตเป็นงานซ้อนทับ โดยจะต้องเลือกแม่แบบสำหรับงานชั้นล่างและเลือกงานชั้นล่างสำหรับงานซ้อนทับเพื่อใช้ในการผลิต และจัดตารางการผลิตสำหรับทั้งงานชั้นล่างและงานซ้อนทับ ซึ่งแบบจำลองคณิตศาสตร์รวมมีดังนี้

เซต (Sets)

$I = \{1, 2, \dots, m\}$ คือ เซตของงานผลิตคอนกรีต

$L = \{1, 2, \dots, m\}$ คือ เซตของงานผลิตคอนกรีตชั้นล่างที่ถูกซ้อนทับ

$J = \{1, 2, \dots, n\}$ คือ เซตของขั้นตอนการผลิต

$K = \{1, 2, \dots, o\}$ คือ เซตของแม่แบบ

$F = \{1, 2, \dots, p\}$ คือ เซตของสูตรการผลิต

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

$$X_{ifk} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้างาน } i \text{ เลือกการผลิตแบบงานชั้นล่าง สูตรการผลิต } f \text{ ในแม่แบบ } k \\ 0 \ Otherwise \end{cases}$$

$$Z_{ifl} = \begin{cases} 1 \text{ ถ้างาน } i \text{ เลือกการผลิตแบบงานซ้อนทับ สูตรการผลิต } f \text{ และผลิตบนงานชั้นล่าง } l \\ 0 \ Otherwise \end{cases}$$

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

$W_{ii'j}$ = $\begin{cases} 1 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงาน } i' \text{ ผลิตหลังงาน } i \\ 0 \text{ ถ้าในขั้นตอนการผลิต } j \text{ มีงาน } i \text{ ผลิตหลังงาน } i' \end{cases}$

S_{ij} = เวลาเริ่มต้นการผลิตของงาน i ขั้นตอนการผลิต j

B_{ik} = เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่าง i ของแม่แบบ k

พารามิเตอร์ (Parameters)

P_j = ระยะเวลาการผลิตของขั้นตอนการผลิต j โดยที่ j = 1, 2, 4, 5

$P3_f$ = ระยะเวลาการบ่มของสูตรการผลิต f

$Cost_f$ = ต้นทุนการผลิตของสูตรการผลิต f

D = กำหนดเวลาส่งงาน

M = ตัวเลขที่มีค่ามาก ๆ กำหนดให้มีค่าเท่ากับกำหนดเวลาส่งงาน

แบบจำลอง (Model)

สมการวัตถุประสงค์ (Objective function)

สมการ (56) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้งานผลิตคอนกรีตทุกงานมีต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด

$$minimize \quad \sum_{i\in I}\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} Cost_f\, X_{ifk} + \sum_{i\in I}\sum_{f\in F}\sum_{l\in L} Cost_f Z_{ifl} \qquad (56)$$

เงื่อนไข (Constraints)

เงื่อนไข (57) กำหนดว่าแต่ละงาน จะสามารถเลือกผลิตเป็นงานชั้นล่างหรืองานซ้อนทับเท่านั้น ถ้าเลือกผลิตเป็นงานชั้นล่าง จะสามารถเลือกสูตรการผลิตได้เพียงสูตรเดียว และเลือกแม่แบบการผลิตได้เพียงแม่แบบเดียวเท่านั้น ในขณะที่ ถ้าเลือกผลิตเป็นงานซ้อนทับ จะสามารถเลือกสูตรการผลิตได้เพียงสูตรเดียวเช่นกัน และสามารถเลือกผลิตซ้อนทับงานชั้นล่างได้เพียงงานเดียวเท่านั้น

$$\sum_{f\in F}\sum_{k\in K} X_{ifk} + \sum_{f\in F}\sum_{l\in L} Z_{ifl} = 1 \qquad ,\forall i \in I \qquad (57)$$

เงื่อนไข (58) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 2 จะเริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า

$$S_{i2} \geq S_{i1} + P_1 \qquad ,\forall i \in I \qquad (58)$$

เงื่อนไข (59) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 3 จะเริ่มการผลิตได้ทันทีที่ขั้นตอนการผลิตก่อนหน้าเสร็จสิ้น

$$S_{i3} = S_{i2} + P_2 \qquad ,\forall i \in I \qquad (59)$$

เงื่อนไข (60) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 4 จะเริ่มการผลิตได้หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 3 โดยระยะเวลาการผลิตจะแตกต่างไปตามสูตรการผลิต

$$S_{i4} \geq S_{i3} + \sum_{f\in F}\sum_{k\in K} X_{ifk} P_{3f} + \sum_{f\in F}\sum_{l\in L} Z_{ifl} P_{3f} \qquad ,\forall i \in I \qquad (60)$$

เงื่อนไข (61) กำหนดเวลาเริ่มการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 5 จะเริ่มการผลิตได้หลังจาก เสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตขั้นตอนก่อนหน้า

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

$$S_{i5} \geq S_{i4} + P_4 \qquad ,\forall i \in I \qquad (61)$$

เงื่อนไข (62) หมายความว่า ถ้ามีงานซ้อนทับที่ผลิตบนงานชั้นล่าง จะสามารถเริ่มการผลิตงานซ้อนทับได้ ก็ต่อเมื่อเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ไปแล้ว 12 หน่วย

$$\left(1 - \sum_{f \in F} Z_{ifl}\right) \cdot M \geq S_{l3} + 12 - S_{i1} \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L, i \neq l \qquad (62)$$

เงื่อนไข (63) หมายความว่า ถ้ามีงานซ้อนทับที่ผลิตบนงานชั้นล่าง จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่างในขั้นตอนการผลิตที่ 4 ได้ หลังจากการผลิตงานซ้อนทับเสร็จสิ้น นั่นคือ เริ่มการผลิตงานชั้นล่างต่อได้ก็ต่อเมื่อ งานซ้อนทับเสร็จสิ้นการผลิตในขั้นตอนการผลิตที่ 5

$$\left(1 - \sum_{f \in F} Z_{ifl}\right) \cdot M \geq S_{i5} + P_5 - S_{l4} \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L, i \neq l \qquad (63)$$

เงื่อนไข (64) กำหนดเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่างในแต่ละแม่แบบ จะเสร็จสิ้นหลังจากผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 เสร็จสิ้น

$$\left(1 - \sum_{f \in F} X_{ifk}\right) \cdot M \geq S_{i5} + P_5 - B_{ik} \qquad ,\forall i \in I, \forall k \in K \qquad (64)$$

เงื่อนไข (65) หมายความว่า ถ้าไม่มีงานชั้นล่างผลิตในแม่แบบนั้น ๆ เวลาเสร็จสิ้นการผลิตในแม่แบบนั้น ๆ จะมีค่าเท่ากับ 0

$$\left(\sum_{f \in F} X_{ifk}\right) \cdot M \leq B_{ik} \qquad ,\forall i \in I, \forall k \in K \qquad (65)$$

เงื่อนไข (66) หมายความว่า ในแม่แบบเดียวกัน ถ้ามีการผลิตงานชั้นล่าง (งาน i') ต่อจากงานชั้นล่างก่อนหน้า (งาน i) จะสามารถเริ่มการผลิตงานชั้นล่างได้หลังจากเวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่างก่อนหน้า

$$\left(2 - \sum_{f \in F} X_{ifk} - \sum_{f \in F} X_{i'fk}\right) \cdot M \geq B_{ik} - S_{i'1} \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall k \in K, i' > i \qquad (66)$$

เงื่อนไข (67) และ (68) กำหนดให้ในแต่ละขั้นตอนการผลิตที่ 1 4 และ 5 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต นั่นคือถ้า $W_{ii'j}$ มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงาน i' ผลิตหลังจากงาน i จะสามารถเริ่มการผลิตงาน i' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า และถ้า $W_{ii'j}$ มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงาน i ผลิตหลังจากงาน i' จะสามารถเริ่มการผลิตงาน i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้า

$$S_{ij} + P_j - S_{i'j} \leq \left(1 - W_{ii'j}\right) \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J, i' \neq i, j \neq 2,3 \qquad (67)$$

$$-S_{ij} + P_j + S_{i'j} \leq W_{ii'j} \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J, i' \neq i, j \neq 2,3 \qquad (68)$$

เงื่อนไข (69) และ (70) กำหนดให้ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ไม่สามารถใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันในการผลิต โดยมีความแตกต่างจากขั้นตอนการผลิตอื่น เนื่องจาก ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ต้องการเวลา 1 หน่วยในการทำความสะอาดก่อน จึงจะสามารถผลิตงานถัดไปได้ นั่นคือ นั่นคือถ้า $W_{ii'2}$ มี

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 มีงาน i' ผลิตหลังจากงาน i ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงาน i' ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย และถ้า $W_{ii'_2}$ มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ในขั้นตอนการผลิต j มีงาน i ผลิตหลังจากงาน i' ซึ่งจะสามารถเริ่มการผลิตงาน i ได้ หลังจากเสร็จสิ้นการผลิตงานก่อนหน้าไปแล้ว 1 หน่วย

$$1 + S_{i2} + P_2 - S_{i'_2} \leq (1 - W_{ii'2}) \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, i' \neq i \qquad (69)$$

$$1 - S_{i2} + P_2 + S_{i'_2} \leq W_{ii'2} \cdot M \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, i' \neq i \qquad (70)$$

เงื่อนไข (71) กำหนดให้เวลาเสร็จสิ้นการผลิตเสร็จภายในกำหนดเวลาส่งงาน

$$S_{i5} + P_5 \leq D \qquad ,\forall i \in I \qquad (71)$$

เงื่อนไข (72) หมายความว่า ถ้ากำหนดให้ผลิตงานซ้อนทับ l บนงานชั้นล่าง i จะต้องมีงานชั้นล่าง i รองรับ

$$\sum_{f \in F} Z_{lfi} \leq \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} X_{ifk} \qquad ,\forall i \in I, \forall l \in L \qquad (72)$$

เงื่อนไข (73) กำหนดให้สามารถผลิตงานซ้อนทับได้เพียงหนึ่งงาน บนงานชั้นล่างใด ๆ

$$\sum_{i \in I} \sum_{f \in F} Z_{ifl} \leq 1 \qquad ,\forall l \in L \qquad (73)$$

เงื่อนไข (74), (75) และ (76) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าได้เพียง 2 ค่า คือ 0 และ 1

$$X_{ifk} \in \{0, 1\} \qquad ,\forall i \in I, \forall f \in F, \forall k \in K \qquad (74)$$

$$Z_{ifl} \in \{0, 1\} \qquad ,\forall i \in I, \forall f \in F, \forall l \in L \qquad (75)$$

$$W_{ii'j} \in \{0, 1\} \qquad ,\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J \qquad (76)$$

เงื่อนไข (77) และ (78) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0

$$S_{ij} \geq 0 \qquad ,\forall i \in I, \forall j \in J \qquad (77)$$

$$B_{ik} \geq 0 \qquad ,\forall i \in I, \forall k \in K \qquad (78)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะได้คำตอบคือสูตรการผลิตสำหรับงานชั้นล่างและงานซ้อนทับ แม่แบบของงานชั้นล่าง งานชั้นล่างสำหรับงานซ้อนทับ และตารางการผลิตสำหรับงานชั้นล่างและงานซ้อนทับ โดยจะหาคำตอบด้วยโปรแกรม ILOG OPL ดังรูปที่ 3.4 โดยมีข้อมูลนำเข้าดังรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นปัญหาที่มีงาน 8 งาน 2 แม่แบบ จะได้คำตอบจากโปรแกรม ดังนี้ จำนวนงานชั้นล่าง 4 งาน และงานซ้อนทับ 4 งาน ดังรูปที่ 3.6 ใช้สูตรการผลิตและจัดตารางการผลิตดังตารางที่ 3.2 โดยมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 90 หน่วย

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

```
int m=...; //number of processing step

int n=...; //number of job

int b=...; //number of mold

int a=...; //number of formulation

range i=1..n; //denote job

range ii=1..n; //denote job

range l=1..n; //denote job

range j=1..m; //denote processing step

range k=1..b; //denote mold

range f=1..a; //denote formulation

float P1=...; //processing time 1

float P2=...; //processing time 2

float P3[f]=...; //processing time 3

float P4=...; //processing time 4

float P5=...; //processing time 5

float cost[f]=...; // cost of formulation f

float D=...; //due date

float M=...; //large number

dvar boolean X[i][f][k];

dvar boolean Z[i][f][l];

dvar float+ S[i][j];

dvar float+ B[i][k];

dvar boolean W[i][ii][j];

minimize sum(i in i,f in f,k in k)cost[f]*X[i][f][k]+sum(i in i,f in f,l in
l)cost[f]*Z[i][f][l];

subject to {

ct2:    forall(i in i)

                        sum(f in f,k in k)X[i][f][k]  + sum(f in f,l in l)Z[i][f][l]
== 1;

ct3:    forall(i in i)

                        S[i][2] >= S[i][1] + P1;

ct4:    forall(i in i)

                        S[i][3] == S[i][2] + P2;

ct5:    forall(i in i)

                        S[i][4] >= S[i][3] + sum(f in f,k in k)P3[f]*X[i][f][k] +
sum(f in f,l in l)P3[f]*Z[i][f][l];

ct6:    forall(i in i)

                        S[i][5] >= S[i][4] + P4;
```

รูปที่ 3.4 การเขียนโปรแกรม ILOG OPL

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

```
ct7:   forall(i in i,l in l : i!=l)
                        (1-sum(f in f)Z[i][f][l])*M >= S[l][3] + 12 - S[i][1];
ct8:   forall(i in i,l in l : i!=l)
                        (1-sum(f in f)Z[i][f][l])*M >= S[i][5] + P5 - S[l][4];
ct9:   forall(i in i,k in k)
                        (1-sum(f in f)X[i][f][k])*M >= S[i][5] + P5 - B[i][k];
ct11:  forall(i in i,k in k)
                       B[i][k]<=sum(f in f)X[i][f][k]*M;
ct12:  forall(i in i,ii in ii,k in k : ii>i)
                        (2-sum(f in f)X[i][f][k]-sum(f in f)X[ii][f][k])*M >= B[i][k]
- S[ii][1];
ct13:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (1-W[i][ii][1])*M >= S[i][1] + P1 - S[ii][1];
ct14:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (1-W[i][ii][4])*M >= S[i][4] + P4 - S[ii][4];
ct15:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (1-W[i][ii][5])*M >= S[i][5] + P5 - S[ii][5];
ct16:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (W[i][ii][1])*M >= -S[i][1] + P1 + S[ii][1];
ct17:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (W[i][ii][4])*M >= -S[i][4] + P4 + S[ii][4];
ct18:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (W[i][ii][5])*M >= -S[i][5] + P5 + S[ii][5];
ct19:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (1-W[i][ii][2])*M >= 1 + S[i][2] + P2 - S[ii][2];
Ct20:  forall(i in i,ii in ii : ii!=i)
                        (W[i][ii][2])*M >= 1 - S[i][2] + P2 + S[ii][2];
Ct21:  forall(i in i)
                        S[i][5]+P5 <= D;
Ct22:  forall(i in i,l in l)
                        sum(f in f,k in k)X[i][f][k]>=sum(f in f)Z[l][f][i];
ct23:  forall(l in l)
                        sum(f in f,i in i)Z[i][f][l]<=1;}
```

รูปที่ 3.4 การเขียนโปรแกรม ILOG OPL (ต่อ)

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

```
m=5; //number of processing step
n=8;//number of job
b=2; //number of mold
a=5; //number of formulation
P1=3; //processing time 1
P2=4; //processing time 2
P3=[24,36,48,72,96]; //processing time 3
P4=1; //processing time 4
P5=3; //processing time 5
cost=[20,15,13,8,5]; // cost of formulation f
M=168; //large number
```

รูปที่ 3.5 แสดงข้อมูลนำเข้าจากโปรแกรม ILOG OPL

ตารางที่ 3.2 คำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบ

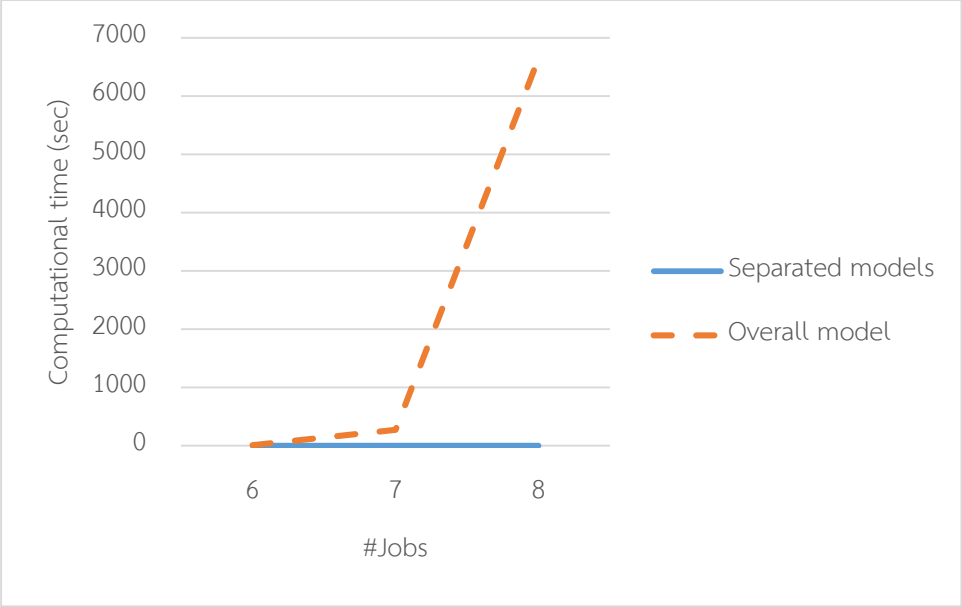
#Job	Formula	Starting time					Completion time
		Process 1	Process 2	Process 3	Process 4	Process 5	
1	4	0	3	7	79	80	83
2	3	19	22	26	74	75	78
3	4	83	86	90	162	163	166
4	3	102	105	109	157	158	161
5	3	5	8	12	67	68	71
6	2	24	27	31	71	72	75
7	4	75	78	82	149	150	153
8	3	94	97	101	154	155	158

3.4 ผลการวิจัยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ณัฐพล (2554) ศึกษาการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปแบบซ้อนทับ โดยศึกษาปัญหาที่มี 2 แม่แบบ 4 แม่แบบ 8 แม่แบบ ที่กำหนดส่งงานครึ่งสัปดาห์ (168 หน่วย) และหนึ่งสัปดาห์ (336 หน่วย) ที่มีจำนวนงานแตกต่างกันออกไป เสนอการแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาย่อยและเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาสำหรับปัญหาย่อยทั้ง 2 ปัญหาคือแบบจำลองทาง

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

คณิตศาสตร์สำหรับงานชั้นล่างและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ [1] โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาปัญหาทุกปัญหาเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม (Overall model) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการแบ่งปัญหาย่อย (Separated models) รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (Computational time) ด้วย



รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบเวลาในการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมนั้น มีการเพิ่มเงื่อนไขในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม นั่นคือเงื่อนไข (57) ซึ่งใช้ตัดสินใจว่างานแต่ละงานจะใช้สูตรการผลิตใด และผลิตเป็นงานชั้นล่างหรืองานซ้อนทับ ถ้าเป็นงานชั้นล่างจะต้องเลือกแม่แบบที่ใช้ และถ้าเป็นงานซ้อนทับจะเลือกผลิตบนงานชั้นล่างใด ซึ่งการแบ่งปัญหาย่อยนั้นจะกำหนดแล้วว่างานใดเป็นงานชั้นล่างและงานใดเป็นงานซ้อนทับ ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมมีจำนวนตัวแปรตัดสินใจที่มากกว่า คือจำนวนตัวแปรตัดสินใจสำหรับงานชั้นล่าง = จำนวนงานทั้งหมด x สูตรการผลิต x แม่แบบ และจำนวนตัวแปรตัดสินใจสำหรับงานซ้อนทับ = จำนวนงานทั้งหมด x สูตรการผลิต x จำนวนงานทั้งหมด ในขณะที่การแบ่งปัญหาย่อยมีจำนวนตัวแปรตัดสินใจสำหรับงานชั้นล่าง = จำนวนงานชั้นล่าง x สูตรการผลิต x แม่แบบ และจำนวนตัวแปรตัดสินใจสำหรับงานซ้อนทับ = จำนวนงานซ้อนทับ x สูตรการผลิต x จำนวนงานชั้นล่าง ทำให้เมื่อมีจำนวนงานที่เพิ่มมากขึ้น เวลาในการหาคำตอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมจะมากกว่าการแบ่งปัญหาย่อย

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

จากรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงเวลาในการหาคำตอบสำหรับปัญหาที่มีจำนวนงาน 6, 7 และ 8 งาน 2 แม่แบบ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่มากขึ้น ในที่นี้คือมีจำนวนงานที่เพิ่มมากขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมจะใช้เวลาในการหาคำตอบสูงขึ้นมาก โดยเฉพาะจากปัญหาที่มี 7 งานไปเป็นปัญหาที่มี 8 งาน ซึ่งมีจำนวนงานเพิ่มมาเพียงงานเดียวเท่านั้น ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการแบ่งปัญหาย่อยนั้น เมื่อจำนวนงานมีค่าเพิ่มขึ้น เวลากลับไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ในขณะที่บางปัญหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการแบ่งปัญหาย่อยสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ เมื่อไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ จะได้คำตอบที่มีช่องว่าง (Gap) ซึ่งคำนวณมาจากความแตกต่างระหว่างคำตอบที่ได้กับคำตอบจากกิ่งที่ดีที่สุด (Best bound) โดยที่คำตอบจากกิ่งที่ดีที่สุดหาได้จากกำหนดการเชิงเส้นหย่อน (Linear programming relaxation) เป็นการตัดเงื่อนไขที่ให้ตัวแปรเป็นจำนวนเต็มออกเพื่อหาผลเฉลย ซึ่งเมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่ตัวแปรต้องเป็นจำนวนเต็มแล้ว อาจจะเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ก็ได้ โดยที่คำตอบจากกิ่งที่ดีที่สุดนี้ จะให้ผลเฉลยที่ดีกว่า (มีค่าต่ำกว่า) หรือเท่ากับผลเฉลยของกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed integer programming) นั่นเอง [22]

จากข้อจำกัดของการแบ่งปัญหาย่อยที่ไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานชั้นล่างได้นั้น ทำให้บางปัญหา เช่น ตัวอย่างปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบ ไม่สามารถผลิตงานชั้นล่าง 4 งานและงานซ้อนทับ 4 งานได้ ทำให้ต้องเลือกผลิตงานชั้นล่างที่มากขึ้น คือ 5 งานและงานซ้อนทับ 3 งาน ซึ่งเลือกใช้สูตรการผลิต 4-3-4-3-2-3-1-2 ซึ่งคิดเป็นต้นทุนการผลิต 105 หน่วยดังรูปที่ 3.7 ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมนั้น สามารถผลิตงานชั้นล่าง 4 งานและงานซ้อนทับ 4 งาน ซึ่งเลือกใช้สูตรการผลิต 4-3-4-3-3-2-4-3 ซึ่งคิดเป็นต้นทุนการผลิต 90 หน่วยดังรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าในแม่แบบที่ 1 คำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบเหมือนกันทุกประการ ทั้งจำนวนงานชั้นล่าง จำนวนงานซ้อนทับ และสูตรการผลิตที่ใช้ ส่วนในแม่แบบที่ 2 คำตอบจากการแบ่งปัญหาย่อยเลือกผลิตงานชั้นล่าง 3 งานและงานซ้อนทับ 1 งาน ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมเลือกผลิตงานชั้นล่าง 2 งานและงานซ้อนทับ 2 งาน เมื่อมีการผลิตงานชั้นล่างจำนวนมากกว่า ทำให้จำเป็นต้องเลือกสูตรการผลิตที่สั้นกว่าเพื่อให้เสร็จสิ้นการผลิตภายในกำหนดส่งงาน เมื่องานชั้นล่างเลือกสูตรการผลิตที่สั้น ทำให้งานซ้อนทับต้องเลือกสูตรการผลิตที่สั้นเช่นกันเพื่อให้ผลิตได้ทันเวลา ทำให้ในปัญหานี้ ต้องเลือกสูตรการผลิตที่ 1 สำหรับงานที่ 7 ซึ่งเป็นซ้อนทับที่ผลิตบนงานชั้นล่างที่ 6 ซึ่งใช้สูตรการผลิตที่ 3 เพราะถ้าเลือกสูตรการผลิตที่ถูกลง จะทำให้ไม่สามารถผลิตได้เสร็จสิ้นภายใน

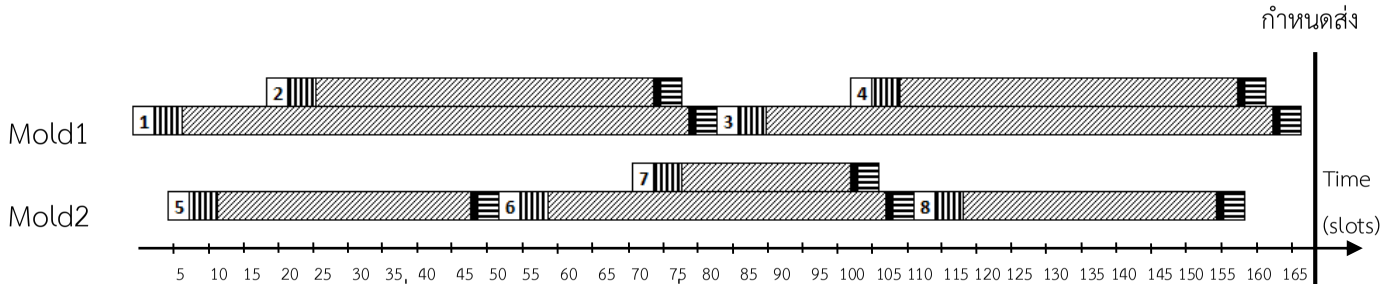
9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

กำหนดส่งงาน คำตอบจากการแบ่งปัญหาย่อยเลือกสูตรการผลิตที่แพงกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม 2 งาน คือ งานที่ 7 และ 8 โดยเลือกสูตรการผลิตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ขณะที่คำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมเลือกสูตรการผลิตที่ 4 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสูตรที่ถูกกว่าทั้งคู่ คำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมจึงให้คำตอบที่ดีกว่า

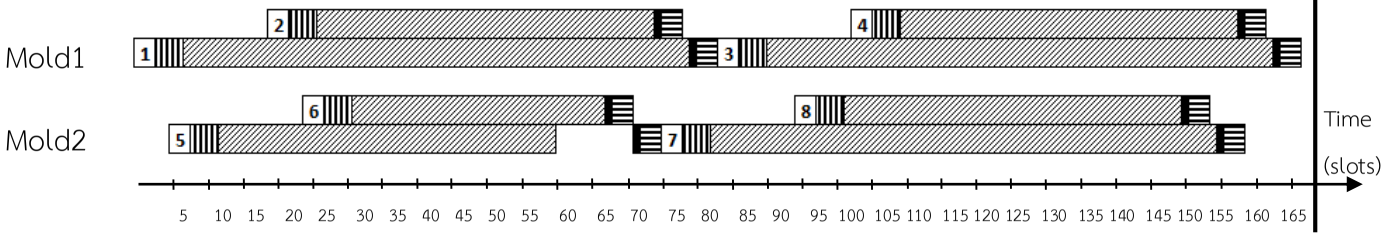
เมื่อหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบแล้วได้ผลดังนี้

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

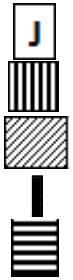
CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662



รูปที่ 3.7 คำตอบของปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบจากการแบ่งปัญหาย่อย



รูปที่ 3.8 คำตอบของปัญหาที่มี 8 งาน 2 แม่แบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม



แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของงาน J

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 3.3 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated models						Overall model				
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap1 (%)	Gap2 (%)	Time (sec)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap (%)	Time (sec)
1	6	3	3	52	-	-	0.16	3	3	52	-	10.63
2	7	4	3	70	-	-	0.20	4	3	70	-	272.82
3	8	5	3	105	-	-	0.45	4	4	91	-	6,638.67
4	9	6	3	144	-	-	1.69	5	4	128	45.31	5,400.38

ตารางที่ 3.4 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model						Overall model				
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap1 (%)	Gap2 (%)	Time (sec)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap (%)	Time(s)
5	15	11	4	189	-	-	8101.25	8	7	157	52.23	5000.34
6	16	8	8	183	-	-	13.66	8	8	180	55.56	4600.23

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 3.5 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated models						Overall model				
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap1 (%)	Gap2 (%)	Time (sec)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap (%)	Time (sec)
7	11	6	5	90	-	-	0.87	6	5	90	34.89	4,200.22
8	12	7	5	113	-	-	5.83	7	5	108	47.64	5,000.19
9	13	12	1	192	36.77	-	5,000.46	7	6	131	48.09	4,900.34
10	14	8	6	159	-	-	53.84	8	6	164	57.32	5,200.39
11	15	10	5	204	19.28	-	5,900.46	9	6	199	62.31	5,400.17

ตารางที่ 3.6 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model						Overall model				
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap1 (%)	Gap2 (%)	Time (sec)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap (%)	Time (sec)
12	27	14	13	246	28.57	-	2058.28	18	9	317	57.41	7500.45
13	29	24	5	417	64.81	-	4833.4	19	10	376	61.44	15500.47

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 3.7 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated models						Overall model				
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap1 (%)	Gap2 (%)	Time (sec)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap (%)	Time (sec)
14	19	10	9	160	-	34.69	7,230.33	11	8	170	44.12	5,400.42
15	20	12	8	185	16.67	27.29	17,900.25	12	8	196	48.98	6,700.52
16	21	14	7	226	35.61	-	29,220.84	15	6	243	56.79	7,000.44
17	22	18	4	278	59.86	16.33	7,567.01	14	8	270	59.26	8,300.47

ตารางที่ 3.8 ผลการวิจัยของปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model						Overall model				
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap1 (%)	Gap2 (%)	Time (sec)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Gap (%)	Time (sec)
18	43	32	11	460	52.80	36.67	18964.69	30	13	577	62.74	18501.51
19	44	25	19	453	22.36	56.15	9505.2	27	17	465	52.69	15650.97
20	45	28	17	431	39.13	44.28	15504.53	27	18	465	51.61	24401.24
21	48	36	12	587	59.46	45.45	23330.61	37	11	765	68.63	2804.92
22	49	45	4	724	67.63	31.03	24619.59	35	14	740	66.89	3603.44
23	50	41	9	710	67.51	42.92	17091.1	44	6	793	68.47	25500.5

สำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก จากตารางที่ 3.3 และ 3.4 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าหรือเท่ากับคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการแบ่งปัญหาย่อยได้ทุกปัญหา ไม่ว่าจะสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้หรือไม่ก็ตาม

เมื่อปัญหาเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้น คือปัญหาที่มี 4 แม่แบบ จากตารางที่ 3.5 และ 3.6 พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ในทุก ๆ ปัญหา โดยที่ส่วนใหญ่แบบทางจำลองทางคณิตศาสตร์รวมยังคงหาคำตอบได้ดีกว่า สำหรับปัญหาที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมหาคำตอบได้แย่กว่าในปัญหาที่ 10 เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ในขณะที่การแบ่งปัญหาย่อยสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด และในปัญหาที่ 12 ที่การแบ่งปัญหาย่อยสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ในปัญหาย่อยที่ 2 และสามารถเลือกผลิตงานชั้นล่างจำนวนน้อยกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม ทำให้การแบ่งปัญหาย่อยได้คำตอบที่ดีกว่า ส่วนในปัญหาที่ 13 ที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมนั้นหาคำตอบได้ดีกว่าแม้ว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ เพราะว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมนั้นเลือกผลิตงานชั้นล่างจำนวนน้อยกว่าการแบ่งปัญหาย่อย

สำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่มีกำหนดส่งงาน 168 หน่วย จากตารางที่ 3.7 พบว่าการแบ่งปัญหาย่อยสามารถหาคำตอบได้ดีกว่า ยกเว้นปัญหาที่ 17 ที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมสามารถหาคำตอบได้ดีกว่า โดยเลือกผลิตจำนวนงานชั้นล่างน้อยกว่าคำตอบที่ได้จากการแบ่งปัญหา และเมื่อปัญหาที่มีขนาดใหญ่มาก คือปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่มีกำหนดส่งงาน 336 หน่วยพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมไม่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าการแบ่งปัญหาย่อยในทุก ๆ ปัญหาแม้ว่าบางปัญหานั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมจะเลือกผลิตจำนวนงานชั้นล่างน้อยกว่าก็ตาม

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

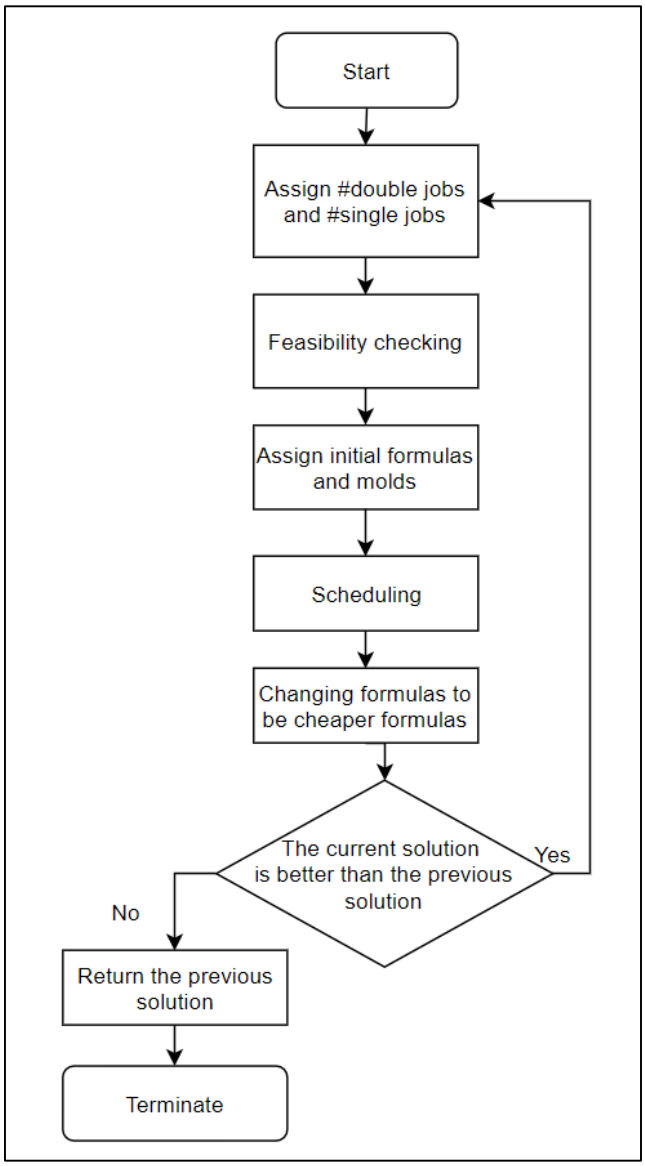
บทที่ 4
วิธีฮิวริสติกและผลการวิจัย

4.1 วิธีฮิวริติก

จากที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่แล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมสามารถหาคำตอบได้ดีเมื่อขนาดปัญหามีขนาดเล็กเท่านั้น เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่มากขึ้น เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบจะมากขึ้นหลายเท่าตัว ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีฮิวริสติกเพื่อใช้ในการหาคำตอบในระยะเวลาอันสั้น โดยยอมรับคำตอบที่อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด โดยวิธีฮิวริสติกที่เสนอนี้สามารถทำตามลำดับขั้นตอนตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งอธิบายแผนภูมิการไหล (Flow chart) และรหัสเทียม (Pseudo code) ตามลำดับ

จากแผนภูมิการไหลรูปที่ 4.1 จะเริ่มวิธีฮิวริสติกด้วยการกำหนดจำนวนงานคู่ซึ่งประกอบด้วยงานชั้นล่างและงานซ้อนทับ และจำนวนงานเดี่ยวซึ่งหมายถึงงานชั้นล่างเท่านั้น จากนั้นจะตรวจสอบความเป็นไปได้ของคำตอบ (Feasibility checking) โดยการให้ทุก ๆ งานใช้สูตรการผลิตที่สั้นที่สุดแล้วดูว่าปัญหานี้สามารถจัดตารางการผลิตได้หรือไม่ หากไม่สามารถจัดตารางการผลิตได้ทันกำหนดส่งงาน จะไม่นำปัญหาเข้าพิจารณาต่อ จากนั้นจะกำหนดสูตรการผลิตและแม่แบบแก่งาน โดยเริ่มพิจารณาสูตรที่ยาวที่สุดก่อน เนื่องจากต้องการต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด จากนั้นจึงนำงานที่กำหนดสูตรการผลิตแล้วไปจัดตารางการผลิต หากไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้ทันกำหนดส่งงาน จะนำไปเลือกสูตรการผลิตใหม่ที่แพงขึ้นแต่ใช้เวลาในการผลิตลดลง เมื่อได้สูตรการผลิตที่สามารถจัดตารางการผลิตได้แล้ว จะนำไปปรับปรุงสูตรการผลิตว่าสามารถใช้สูตรการผลิตที่ถูกลงได้หรือไม่ หลังจากนั้นจะปรับลดจำนวนงานคู่และเพิ่มจำนวนงานเดี่ยว เพื่อทดลองหาคำตอบว่าจะได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นหรือไม่ ถ้าได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นก็จะทดลองปรับลดจำนวนงานคู่ต่อ แต่ถ้าไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้น จะหยุดการพิจารณา

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



รูปที่ 4.1 แผนภูมิการไหลของวิธีฮิวริสติก

4.1.1 การกำหนดจำนวนงานคู่และงานเดี่ยว (Assigning the number of double jobs and number of single jobs)

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า เมื่อจำนวนงานชั้นล่างและงานซ้อนทับมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้มีแนวโน้มที่จะได้คำตอบที่ดีกว่า สาเหตุเพราะงาน 2 งานนั้น เมื่อจัดให้เป็นงานเดี่ยว (Single job) 2 งานดังรูปที่ 4.3(a) และเป็นงานคู่ (Double job) 1 งานดังรูปที่ 4.3(b) จะเห็นว่ารูปที่ 4.3(a) ใช้เวลาการผลิตนานกว่ารูปที่ 4.3(b) มาก และในกรณีที่กำหนดส่งงานเท่ากับ 168 หน่วยนั้น จะพบว่าไม่สามารถที่จะผลิตงานทั้งสองงานในสูตรการผลิตที่ 5 ได้ทั้งคู่หากไม่ทำการผลิตแบบซ้อนทับ

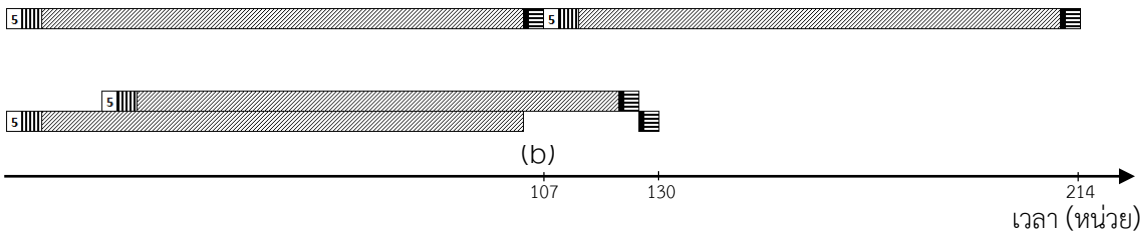
933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เนื่องจากเสร็จสิ้นเกินกำหนดส่งงาน แต่หากกำหนดให้เป็นงานคู่ จะสามารถผลิตได้ทันกำหนดส่งงาน จึงกำหนดจำนวนงานคู่ตั้งต้น (Initial number of double jobs) เท่ากับจำนวนงานทั้งหมดหารด้วยสอง โดยจะใช้ค่าที่เป็นจำนวนเต็มเท่านั้น และกำหนดจำนวนงานเดี่ยวตั้งต้น (Initial number of single jobs) เท่ากับ 1 กรณีที่จำนวนงานทั้งหมดเป็นจำนวนคี่ และเท่ากับ 0 กรณีที่จำนวนงานทั้งหมดเป็นจำนวนคู่ ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาที่ 9 ที่มีจำนวนงานทั้งหมด 13 งาน 4 แม่แบบ จะกำหนดจำนวนงานคู่ตั้งต้นเท่ากับ 6 งาน และจำนวนงานเดี่ยวตั้งต้นเท่ากับ 1 งาน รวมเป็น 7 งาน

```
Assign the initial number of double jobs and number of single jobs
While (Number of double jobs is at least 0)
        Assign the shortest formula to each job
        Assign the mold to each job
        Compute finising time of each mold
        If (Finishing time of any mold > due date)
                Terminate
        Assign the longest formula to each job
        Compute finishing time of each mold
        While (Completion time of any mold > due date)
                Reducing a lowest-weight formula
        Schedule
        While (Finishing time of each mold > due date)
                Reducing a lowest-weight formula
                Schedule
        Changing formula to be cheaper formulas
        If (The current solution is not better than the last solution)
                Terminate
        Decrease number of double jobs 1 job
```

รูปที่ 4.2 รหัสเทียมสำหรับการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติก

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



F แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 4.3 การจัดงาน 2 งานแบบงานเดี่ยวและงานคู่

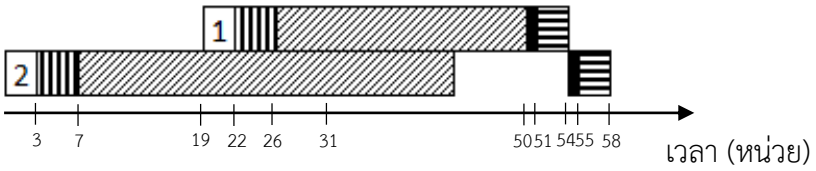
4.1.2 การตรวจสอบความเป็นไปได้ของคำตอบ (Feasibility checking)

1) การกำหนดสูตรการผลิตที่สั้นที่สุดและแม่แบบ (Assigning the shortest formula and the mold to each job)

สำหรับงานเดี่ยวนั้น จะพิจารณาเลือกสูตรการผลิตดังตารางที่ 4.1 ส่วนงานคู่ จะพิจารณาเป็นคู่สูตรการผลิต โดยคำนวณเวลาการผลิตรวมจากการลองจัดตารางการผลิตงานชั้นล่างและงานซ้อนทับโดยใช้สูตรการผลิตดังกล่าว คำนึงถึงเงื่อนไขของงานชั้นล่างและงานซ้อนทับเท่านั้น เช่น คู่สูตรการผลิตที่หนึ่งจะใช้สูตรการผลิตที่ 2 สำหรับงานชั้นล่างและสูตรการผลิตที่ 1 สำหรับงานซ้อนทับ ดังรูปที่ 4.4 ในตอนแรกจะพิจารณาเฉพาะคู่สูตรการผลิตดังตารางที่ 4.2 ซึ่งไม่พิจารณาคู่สูตรการผลิตที่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตที่ถูกลงได้โดยที่ไม่ส่งผลต่อเวลาการผลิตรวม เช่น ไม่พิจารณาคู่สูตรที่ใช้สูตรการผลิตที่ 4 สำหรับงานชั้นล่างและสูตรการผลิตที่ 2 สำหรับงานซ้อนทับ เพราะสามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตของงานซ้อนทับให้เป็นสูตรการผลิตที่ 3 ได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องเลื่อนเวลาการผลิต ดังรูปที่ 4.5(a) และ (b) แต่เมื่อลองใช้วิธีฮิวริสติกในการหาคำตอบแล้วพบว่าในบางปัญหา ไม่สามารถหาคำตอบได้ดีเท่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากจำกัดสูตรการผลิตในการเลือกมาก

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เกินไปโดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถเลือกสูตรการผลิตได้ทุกแบบ คู่สูตรการผลิตที่ไม่ได้นำมาพิจารณานั้น อาจจะไม่คุ้มค่าแก่การเลือกมาผลิต แต่ถ้าลองนำมาจัดตารางการผลิตแล้ว เงื่อนไขเรื่องการใช้ทรัพยากรอาจจะทำให้งานชั้นล่างหรืองานซ้อนทับต้องเลื่อนการผลิตออกไป จนในบางครั้งคู่สูตรการผลิตที่งานชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 4 และงานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 2 อาจคุ้มค่าจนทำให้ถูกเลือกให้มาผลิตก็ได้ ถึงแม้รูปที่ 4.5(a) และ 4.5(b) จะมีเวลาการผลิตรวมที่เท่ากัน แต่เวลาการผลิตงานซ้อนทับนั้นแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.5(a) นั้นสามารถเลื่อนการผลิตงานซ้อนทับได้มากกว่าโดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการผลิตรวม ทำให้อาจจะมีประโยชน์ในการนำมาจัดตารางการผลิต



แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างคู่สูตรการผลิต D1

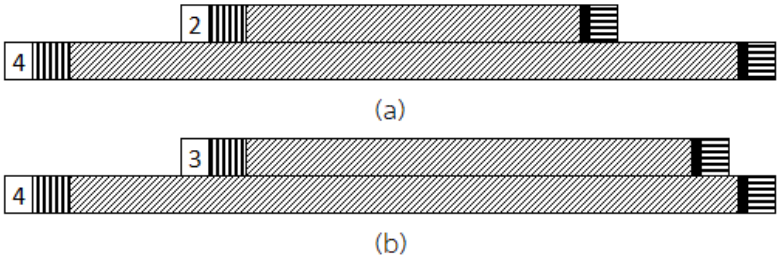
ตารางที่ 4.1 เวลาการผลิตรวม ต้นทุนการผลิตของสูตรการผลิต

สูตรการผลิต	เวลาการผลิตรวม (หน่วย)	ต้นทุนการผลิต (หน่วย)
S1	35	20
S2	47	15
S3	59	13
S4	83	8
S5	107	5

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ตารางที่ 4.2 คู่สูตรการผลิตที่นำมาพิจารณาในตอนแรก

คู่สูตรการผลิต	สูตรการผลิตของงานชั้นล่าง	สูตรการผลิตของงานซ้อนทับ	เวลาการผลิตรวม (หน่วย)	ต้นทุนการผลิต (หน่วย)
DD1	2	1	58	35
DD2	3	1	59	33
DD3	3	2	70	28
DD4	3	3	82	26
DD5	4	3	83	21
DD6	4	4	106	16
DD7	5	4	107	13
DD8	5	5	130	10



F แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

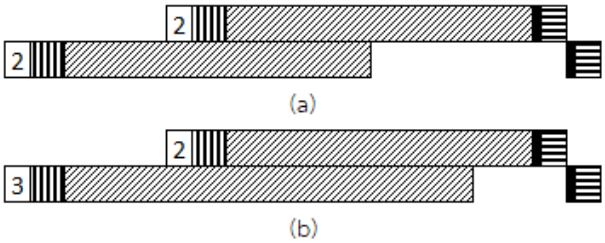
แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

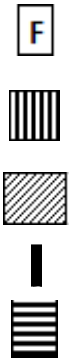
แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างคู่สูตรการผลิตที่ในตอนแรกไม่นำมาพิจารณา

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23





แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างคู่สูตรการผลิตที่ไม่นำมาพิจารณา

ตารางที่ 4.3 เวลาการผลิตรวม ต้นทุนการผลิตของคู่สูตรการผลิต

คู่สูตรการผลิต	สูตรการผลิตของงานชั้นล่าง	สูตรการผลิตของงานซ้อนทับ	เวลาการผลิตรวม (หน่วย)	ต้นทุนการผลิต (หน่วย)
D1	2	1	58	35
D2	3	1	59	33
D3	3	2	70	28
D4	4	1	83	28
D5	3	3	82	26
D6	5	1	107	25
D7	4	2	83	23
D8	4	3	83	21
D9	5	2	107	20
D10	5	3	107	18
D11	4	4	106	16
D12	5	4	107	13
D13	5	5	130	10

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

จากเหตุผลดังกล่าว จึงนำสูตรการผลิตที่ในตอนแรกไม่ได้พิจารณากลับมาพิจารณา โดยจะเลือกคู่สูตรการผลิตที่งานชั้นล่างเลือกสูตรการผลิตที่ยาวกว่าหรือเท่ากับงานซ้อนทับดังตารางที่ 4.3 โดยเรียงลำดับจากต้นทุนการผลิตแพงไปถูก เพื่อให้สะดวกในการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักและการเปลี่ยนให้ใช้สูตรการผลิตที่ถูกลงโดยจะเห็นว่ามีบางสูตรการผลิตที่ไม่นำมาพิจารณาเลย เช่นคู่สูตรการผลิตที่งานชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 2 และงานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 2 จากรูปจะเห็นว่า เวลาเสร็จสิ้นการผลิตของงานชั้นล่างและงานซ้อนทับของรูปที่ 4.6(a) มีค่าเท่ากับคู่สูตรการผลิตที่งานชั้นล่างใช้สูตรการผลิตที่ 3 และงานซ้อนทับใช้สูตรการผลิตที่ 2 ดังรูปที่ 4.6(b) จึงไม่พิจารณาคู่สูตรที่มีเวลาเสร็จสิ้นการผลิตงานชั้นล่างและงานซ้อนทับที่เท่ากัน แต่มีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า

ในขั้นตอนนี้จะกำหนดสูตรการผลิตที่สั้นที่สุด (แพงที่สุด) สำหรับทุกงาน โดยสำหรับงานคู่จะกำหนดให้ใช้สูตรการผลิต D1 และสำหรับงานเดี่ยว จะกำหนดให้ใช้สูตรการผลิต S1 จากนั้นกำหนดแม่แบบสำหรับงานต่าง ๆ โดยจะให้แต่ละแม่แบบมีจำนวนงานเท่า ๆ กัน จากปัญหาที่ 9 พบว่ามีจำนวนงานทั้งหมด 7 งาน แบ่งเป็นงานคู่ 6 งานและงานเดี่ยว 1 งาน โดยจะกำหนดให้งาน 6 งานแรกเป็นงานคู่และงานที่ 7 เป็นงานเดี่ยว ซึ่งจะใช้สูตรการผลิตดังนี้ D1-D1-D1-D1-D1-D1-S1 โดยมีแม่แบบที่ใช้คือ 1-2-3-4-1-2-3

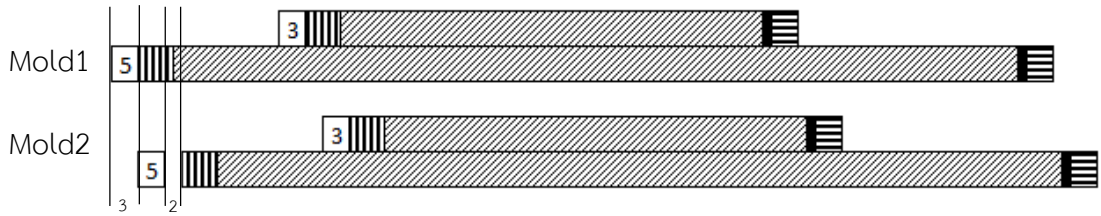
2) การคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบ (Computing completion time of each mold before scheduling)

เนื่องจากเงื่อนไขในการจัดตารางการผลิตของขั้นตอนการผลิตที่ 1 และขั้นตอนการผลิตที่ 2 จึงเลื่อนเวลาเริ่มการผลิตของแต่ละแม่แบบเท่ากับ 5 หน่วย ดังรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าขั้นตอนการผลิตที่ 1 และ 2 มีโอกาสที่จะใช้ทรัพยากรซ้อนทับกันสูง เพราะแต่ละแม่แบบสามารถเริ่มการผลิตที่เวลา 0 หน่วยได้พร้อมกัน ทำให้แม่แบบที่ 2 นั้น ต้องเลื่อนการผลิตขั้นตอนที่ 1 ออกไป 3 หน่วย และเลื่อนขั้นตอนการผลิตที่ 2 ออกไป 2 หน่วย รวมเป็น 5 หน่วยนั่นเอง จะกำหนดเวลาเริ่มการผลิตของแต่ละแม่แบบให้เท่ากับ 5x(ลำดับแม่แบบ – 1) นั่นคือเวลาเริ่มของแม่แบบที่ 1-4 จะเท่ากับ 0-5-10-15

การคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบสามารถคำนวณได้จาก นำเวลาเริ่มการผลิตมาบวกกับเวลาการผลิตรวมสำหรับแม่แบบนั้น ๆ เช่น สำหรับปัญหาที่ 9 ที่ยกตัวอย่างมานั้น ใช้สูตรการผลิตคือ D1-D1-D1-D1-D1-D1-S1 ซึ่งกำหนดแม่แบบดังนี้ 1-2-3-4-1-2-3 ขอยกตัวอย่างแม่แบบที่ 3 ซึ่งมีงานที่ 3 ซึ่งเป็นงานคู่และงานที่ 7 ซึ่งเป็นงานเดี่ยว เวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบที่ 3 จะเท่ากับ 5x(3 - 1) + 58 + 35 = 103 หน่วย นั่นเอง เมื่อคำนวณเสร็จสิ้นทุกแม่แบบแล้ว หากพบว่ามีแม่แบบ

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ใดแม่แบบหนึ่งที่มีเวลาเสร็จสิ้นเกินกำหนดส่ง จะสลับแม่แบบทีละคู่ เพื่อเปลี่ยนเวลาเริ่มการผลิต เช่น สลับแม่แบบ 1 และ 2 แม่แบบสำหรับงานจะเปลี่ยนเป็น 2-1-3-4-2-1-3 เวลาเสร็จสิ้นการผลิตก็จะเปลี่ยนไปตามสูตรการผลิตและลำดับแม่แบบ จะหยุดการสลับคู่แม่แบบก็ต่อเมื่อสลับแม่แบบครบทุกคู่แล้ว หรือไม่มีแม่แบบใดที่มีเวลาเสร็จสิ้นเกินกำหนดส่ง โดยจะเก็บแม่แบบที่ใช้และเวลาเริ่มผลิตไว้ใช้สำหรับจัดตารางการผลิตต่อไป สาเหตุที่ต้องสลับแม่แบบเนื่องจากในบางครั้ง เมื่อปรับเปลี่ยนแม่แบบที่ใช้ ทำให้สามารถเลื่อนเวลาเริ่มการผลิตจนอาจจะทำให้สามารถจัดตารางการผลิตได้



แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 1 (การเตรียมแม่แบบ) ของสูตรการผลิต F

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 2 (การผสมและหล่อคอนกรีต)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 3 (การบ่ม)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 4 (การตัดออกจากแม่แบบ)

แทน ขั้นตอนการผลิตที่ 5 (การขนย้ายออกจากแม่แบบ)

รูปที่ 4.7 ที่มาของการเลื่อนเวลาการผลิต

ดังปัญหาที่ 4 ที่มีงาน 9 งาน 2 แม่แบบ โดยให้มีงานคู่ 4 งาน และงานเดี่ยว 1 งาน โดยแต่ละงานใช้แม่แบบดังนี้ 1-2-1-2-1 เมื่อผ่านขั้นตอนการลดเวลาของสูตรการผลิตด้วยค่าถ่วงน้ำหนักแล้วจะได้สูตรการผลิตคือ D2-D8-D2-D8-S1 จะคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบที่ 1 ได้เท่ากับ 0 + 59 + 59 + 35 = 153 และเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบที่ 2 เท่ากับ 5 + 83 + 83 = 171 ซึ่งเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบที่ 2 มีค่าเกินกว่ากำหนดส่งงาน (168 หน่วย) เมื่อลองสลับแม่แบบ จะได้ลำดับแม่แบบคือ 2-1-2-1-2 ซึ่งเมื่อคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบที่ 1 จะได้เท่ากับ 0 + 83 + 83 = 166 และเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบที่ 2 เท่ากับ 5 + 59 + 59 + 35 = 158 ซึ่งเวลาเสร็จสิ้นของทั้ง 2 แม่แบบมีค่าน้อยกว่ากำหนดส่งงานทั้งคู่ ทำให้สามารถนำสูตรการผลิตนี้ไปจัดตารางการผลิตต่อได้

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

เมื่อกำหนดให้แต่ละงานใช้สูตรการผลิตที่สั้นที่สุดแล้ว จากนั้นคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบแล้ว ถ้าพบว่ามีเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบใดมีค่ามากกว่ากำหนดส่งงาน จะหยุดการทำงานทันที (Terminate)

4.1.3 การกำหนดสูตรการผลิตตั้งต้น (Assigning initial formulas to each job)

1) กำหนดสูตรการผลิตที่ยาวที่สุด (ถูกที่สุด) สำหรับทุกงาน โดยสำหรับงานคู่ จะกำหนดให้ใช้สูตรการผลิต D13 และสำหรับงานเดี่ยว จะกำหนดให้ใช้สูตรการผลิต S5 สำหรับปัญหาที่ 9 จะใช้สูตรการผลิต D13- D13- D13- D13- D13- D13-S5 และใช้แม่แบบ 1-2-3-4-1-2-3

2) การลดเวลาของสูตรการผลิตด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (Reducing a lowest-weight formula)

เมื่อคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบสำหรับปัญหาที่ 9 ซึ่งได้เท่ากับ 260-265-247-145 จะเห็นว่ามีแม่แบบที่ 1, 2 และ 3 ที่มีเวลาเสร็จสิ้นมากกว่ากำหนดส่ง ซึ่งไม่มีสามารถนำสูตรการผลิตนี้ไปจัดตารางการผลิตได้ จึงปรับลดเวลาของสูตรการผลิตด้วยค่าถ่วงน้ำหนักดังตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ซึ่งคำนวณมาจากต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นหารด้วยระยะเวลาการผลิตรวมที่ลดลง เช่น ปรับลดเวลาคู่สูตรการผลิต D13 ไปเป็นคู่สูตรการผลิต D12 จะมีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ (13 - 10)/(130 - 107) = 0.13 นั่นแปลว่าถ้าค่าถ่วงน้ำหนักยิ่งมีค่าน้อย จะคุ้มแก่การเปลี่ยนสูตรเป็นสูตรนั้น ๆ นั่นเอง โดยจะกำหนดให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าอนันต์ (Infinity) เมื่อคำนวณแล้วได้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าติดลบหรือมีค่าอนันต์

ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละงานจะพิจารณาว่าสูตรการผลิตปัจจุบันเมื่อปรับเปลี่ยนเป็นสูตรการผลิตใดมีค่าถ่วงน้ำหนักน้อยที่สุด เช่น เมื่อสูตรการผลิตปัจจุบันคือสูตรการผลิต D13 มีค่าถ่วงน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 0.13 สำหรับเปลี่ยนสูตรการผลิตเป็นสูตรการผลิต D12 และสำหรับสูตรการผลิตสำหรับงานเดี่ยว เมื่อสูตรปัจจุบันคือสูตรการผลิต S5 ค่าถ่วงน้ำหนักที่น้อยที่สุดคือ 0.125 สำหรับเปลี่ยนสูตรการผลิตเป็นสูตรการผลิต S4 จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับงานแต่ละงานคือ 0.13-0.13-0.13-0.13-0.13-0.13-0.13-0.125 สูตรการผลิตที่จะปรับเปลี่ยนคือ D12-D12-D12-D12-D12-D12-S4 ใช้แม่แบบดังนี้ 1-2-3-4-1-2-3 โดยจะเลือกแม่แบบที่มีเวลาเสร็จสิ้นมากที่สุดมาปรับสูตรการผลิตก่อน ในที่นี้ก็คือแม่แบบที่ 2 ซึ่งมีงานที่ 2 และงานที่ 6 จะเลือกเปลี่ยนสูตรการผลิตงานที่มีค่าถ่วงน้ำหนักที่น้อยที่สุด แต่ในกรณีนี้ที่ทั้งสองงานมีค่าถ่วงน้ำหนักที่เท่ากันเท่ากับ 0.13 จะเลือกเปลี่ยนสูตรการผลิตงานที่มีลำดับการผลิตที่ช้ากว่า นั่นคืองานที่ 6 จะได้สูตรการผลิตดังนี้ D13-D13-D13-

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

D13-D13-D12-S5 จากนั้นคำนวณเวลาเสร็จสิ้นทุกแม่แบบอีกครั้ง จะได้เวลาเสร็จสิ้นดังนี้ 260-242-223-145 ซึ่งมีค่าถ่วงน้ำหนักคือ 0.13-0.13-0.13-0.13-0.13-0.333-0.125 และสูตรการผลิตที่จะปรับเปลี่ยนคือ D12-D12-D12-D12-D12-D8-S4 ถ้ายังต้องการปรับสูตรการผลิตอีก จะพิจารณาเลือกแม่แบบที่ 1 แทน ซึ่งมีงานที่ 1 และงานที่ 5 ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากันเท่ากับ 0.13 โดยจะเลือกงานที่มีลำดับการผลิตที่ช้ากว่า ซึ่งก็คืองานที่ 5 จะได้สูตรการผลิตดังนี้ D13-D13-D13- D12-D12-S4 นั่นเอง จะได้เวลาเสร็จสิ้นคือ 237-242-223-145 แทน

จากรูปที่ 4.2 เมื่อปรับสูตรการผลิตจนได้เวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบไม่เกินกำหนดส่งงานแล้ว จะทำการจัดตารางการผลิตในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.4 ค่าถ่วงน้ำหนักของสูตรการผลิตสำหรับงานเดี่ยว

สูตรการผลิต	1	2	3	4	5
S1	-	-	-	-	-
S2	0.417	-	-	-	-
S3	0.292	0.167	-	-	-
S4	0.250	0.194	0.208	-	-
S5	0.208	0.167	0.167	0.125	-

4.1.4 การจัดตารางการผลิต (Scheduling)

เมื่อได้สูตรการผลิตหลังจากการลดเวลาของสูตรการผลิตด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก จะลองนำมาจัดตารางการผลิต ถ้าไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้ทุกงานเสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงานได้ จะลดเวลาของสูตรการผลิตด้วยค่าถ่วงน้ำหนักจนกว่าจะสามารถจัดตารางการผลิตได้ ดังรูปที่ 4.1

ถ้างานเป็นงานเดี่ยว จะมีขั้นตอนการจัดตารางการผลิตเรียงจากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 ตามลำดับ ส่วนขั้นตอนการจัดตารางการผลิตสำหรับงานคู่ มีดังนี้

- ขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานชั้นล่าง

- ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานชั้นล่าง

- ขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานชั้นล่าง

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ตารางที่ 4.5 ค่าถ่วงน้ำหนักของคู่สูตรการผลิตสำหรับงานคู่

คู่สูตรการผลิต	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
D1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D2	2.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	0.583	0.455	∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D4	0.280	0.208	0.154	∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D5	0.375	0.304	0.333	0.167	∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D6	0.204	0.167	0.135	0.081	0.125	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-
D7	0.480	0.417	0.538	0.385	∞	3.000	∞	-	-	-	-	-	-	-
D8	0.560	0.500	0.692	0.538	∞	5.000	∞	∞	-	-	-	-	-	-
D9	0.306	0.271	0.270	0.216	0.333	0.240	∞	0.125	0.042	-	-	-	-	-
D10	0.347	0.313	0.324	0.270	0.417	0.320	∞	0.208	0.125	∞	-	-	-	-
D11	0.396	0.362	0.389	0.333	0.522	0.417	∞	0.304	0.217	∞	∞	-	-	-
D12	0.449	0.417	0.459	0.405	0.625	0.520	∞	0.417	0.333	∞	∞	3.000	-	-
D13	0.347	0.324	0.333	0.300	0.383	0.333	0.652	0.277	0.234	0.435	0.348	0.250	0.130	-

- ขั้นตอนการผลิตที่ 1 ของงานซ้อนทับ
- ขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับ
- ขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานซ้อนทับ
- ขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานซ้อนทับ
- ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับ
- ขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานชั้นล่าง
- ขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับ

สาเหตุที่จัดตารางการผลิตเรียงขั้นตอนดังนี้เพราะว่า ทำให้ทราบเวลาเสร็จสิ้นของขั้นตอนการผลิตก่อนหน้า จึงสามารถคำนวณเวลาเริ่มการผลิตที่เร็วที่สุดที่เป็นไปได้ของขั้นตอนการผลิตถัดไป รวมไปถึงงานซ้อนทับที่สามารถเริ่มการผลิตได้หลังจากเริ่มขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานชั้นล่างไปแล้ว 12 หน่วย และเมื่อจัดตารางการผลิตงานซ้อนทับเรียบร้อยแล้ว จึงสามารถเริ่มขั้นตอนการผลิตที่ 4

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ของงานชั้นล่างได้เร็วที่สุดก็คือเวลาเสร็จสิ้นการผลิตงานซ้อนทับหรือเริ่มการผลิตได้หลังจากขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานชั้นล่างเสร็จสิ้นนั่นเอง ทำให้สามารถเปรียบเทียบได้ว่าเวลาเสร็จสิ้นการผลิตงานซ้อนทับหรือเวลาเสร็จสิ้นขั้นตอนการผลิตที่ 3 ของงานชั้นล่างมีค่ามากกว่ากัน ค่าใดที่มีค่ามากกว่าจะเป็นเวลาเริ่มการผลิตขั้นตอนที่ 4 ของงานชั้นล่างที่เร็วที่สุด

ในตอนแรกนั้น เริ่มจัดตารางการผลิตจากงานที่ 1 จนถึงงานสุดท้าย โดยแต่ละงานจะเริ่มจัดตารางการผลิตตามขั้นตอนที่กล่าวไปข้างต้น โดยเมื่อจัดตารางการผลิตในแต่ละขั้นตอน จะตรวจสอบทุกครั้งว่ามีงานใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกันหรือผิดเงื่อนไขอื่น ๆ หรือไม่ ถ้ามี จะเลื่อนงานที่กำลังจัดตารางการผลิตให้เริ่มหลังจากงานที่จัดตารางการผลิตไปแล้ว ดังรูปที่ 4.8(a) เป็นการจัดตารางการผลิตสำหรับปัญหาที่ 9 ซึ่งมีสูตรการผลิตหลังจากขั้นตอนที่แล้วคือ D8-D8-D12-D12-D2-D2-S2 แม่แบบที่ใช้คือ 1-2-3-4-1-2-3 ที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานชั้นล่างที่ 2 ผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 1 โดยจะเลื่อนขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานชั้นล่างที่ 1 ไปหลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานซ้อนทับที่ 1 ดังรูปที่ 4.8(b) ซึ่งเมื่อจัดตารางการผลิตต่อไปจนถึงขั้นตอนการผลิตที่ 5 เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่ามีการผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 1 อีกเช่นกัน จึงเลื่อนขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานชั้นล่างที่ 1 ให้เริ่มการผลิตหลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับที่ 1 ดังรูปที่ 4.8(c) จากนั้นเมื่อจัดตารางการผลิตจนถึงขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานชั้นล่างที่ 4 จะพบว่าผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 1 จึงเลื่อนการผลิตงานชั้นล่างที่ 4 ไปเริ่มหลังจากการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับที่ 4 เสร็จสิ้น 1 หน่วย ดังรูปที่ 4.8(d) ตรวจสอบแล้วพบว่าขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานชั้นล่างที่ 4 ผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 2 เช่นกัน จึงเลื่อนการผลิตงานชั้นล่างที่ 4 ไปเริ่มการผลิตหลังจากการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับที่ 2 เสร็จสิ้น 1 หน่วยดังรูปที่ 4.8(e) และยังคงพบว่ามีการผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 3 จึงเลื่อนการผลิตงานชั้นล่างที่ 4 ออกไปหลังจากการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับที่ 3 เสร็จสิ้น 1 หน่วย จากนั้นจะเห็นว่าในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานชั้นล่างที่ 4 ไม่มีการผิดเงื่อนไขแล้ว จึงจัดตารางการผลิตในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ต่อไป ทำเช่นนี้จนครบทุกงานจะได้ตารางการผลิตดังรูปที่ 4.8(f) ซึ่งจะเห็นว่าหลากหลายงานชั้นล่างที่ 4 ต้องรอการผลิตโดยที่ไม่จำเป็นค่อนข้างนาน จึงปรับเปลี่ยนวิธีการจัดตารางการผลิตเป็นหัวข้อถัดไป

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

1) การจัดตารางการผลิต (Scheduling)

เริ่มการจัดตารางการผลิตจากงานที่ 1 จนถึงงานสุดท้าย แต่ละงานจะมีลำดับการจัดตารางการผลิตดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งจะตรวจสอบว่ามีการใช้ทรัพยากรซ้อนทับกันหรือผิดเงื่อนไขหรือไม่ในทุกขั้นตอนการผลิต ถ้ามีการผิดเงื่อนไขเกิดขึ้น จะเปรียบเทียบว่าที่ขั้นตอนการผลิตนั้น ๆ งานใดเริ่มการผลิตก่อน จะไม่เลื่อนการผลิตงานที่เริ่มผลิตก่อน แต่จะไปปรับเลื่อนเวลาการผลิตงานที่เริ่มช้ากว่า ในกรณีที่มีการเริ่มผลิตพร้อมกัน จะเลื่อนการผลิตงานที่กำลังพิจารณาอยู่ ทุกครั้งที่มีการเลื่อนตารางการผลิตในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง จะจัดตารางการผลิตใหม่ตั้งแต่งานที่ 1 จนถึงงานและขั้นตอนที่กำลังพิจารณาอยู่ โดยใช้การจัดตารางการผลิตใหม่ (Rescheduling) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป เมื่อเริ่มจัดตารางการผลิตแล้ว จะเห็นว่าในขั้นตอนการผลิตที่ 4 ของงานซ้อนทับที่ 2 มีการผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 1 โดยทั้ง 2 งานเริ่มการผลิตพร้อมกันรูปที่ 4.9(a) จึงเลื่อนการผลิตงานที่กำลังพิจารณาคืองานชั้นล่างที่ 2 ให้เริ่มการผลิตหลังจากเสร็จสิ้นการผลิตขั้นตอนที่ 4 ของงานซ้อนทับที่ 1 จากนั้นจะเริ่มจัดตารางการผลิตใหม่โดยใช้การจัดตารางการผลิตแบบที่ 1 ตั้งแต่งานที่ 1 จนถึงงานและขั้นตอนการผลิตที่กำลังพิจารณาอยู่ นั่นคืองานซ้อนทับที่ 2 ที่ขั้นตอนการผลิตที่ 4 จากนั้นจะจัดตารางการผลิตต่อในขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับที่ 2 ต่อ โดยจะเห็นว่างานชั้นล่างที่ 2 มีการผิดเงื่อนไขกับงานซ้อนทับที่ 1 ดังรูปที่ 4.9b) เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่างานชั้นล่างที่ 2 เริ่มการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 ช้ากว่า จึงเลื่อนงานชั้นล่างที่ 2 ให้ผลิตหลังจากผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 5 ของงานซ้อนทับที่ 1 เสร็จสิ้น และจัดตารางการผลิตแบบที่ 1 จนครบแล้วจึงจัดตารรางการผลิตงานชั้นล่างที่ 3 ต่อไป จนเมื่อตรวจสอบแล้วพบว่าการผิดเงื่อนไขระหว่างงานชั้นล่างที่ 4 กับงานซ้อนทับที่ 1 ในขั้นตอนการผลิตที่ 2 ดังรูปที่ 4.9(c) เมื่อเปรียบเทียบเวลาเริ่มการผลิตแล้วพบว่างานชั้นล่างที่ 4 เริ่มการผลิตก่อน จึงเลื่อนขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานซ้อนทับที่ 1 ให้เริ่มหลังการผลิตขั้นตอนการผลิตที่ 2 ของงานชั้นล่างที่ 4 เสร็จสิ้น จากนั้นจะเริ่มจัดตารางการผลิตงานที่ 1 จนถึงงานและขั้นตอนที่กำลังพิจารณาโดยใช้การจัดตารางการผลิตแบบที่ 1 ดังรูปที่ 4.9(d) และ (e) จากนั้นจัดตารางการผลิตจนกว่าจะครบทุกงาน ซึ่งจะได้ตารางการผลิตดังรูปที่ 4.9(f) นั่นเอง

โดยทุกครั้งที่จัดตารางการผลิตงานใดงานหนึ่งเสร็จสิ้นแล้ว ให้ตรวจสอบก่อนว่างานนั้นเสร็จสิ้นล่าช้ากว่ากำหนดส่งงานหรือไม่ ถ้าใช่ ก็จะให้หยุดการจัดตารางการผลิตสำหรับสูตรการผลิตนั้น ๆ เมื่อไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงานได้ จะสลับสูตรสำหรับงานในแต่ละแม่แบบทีละคู่ โดยเริ่มจากแม่แบบแรกไปจนถึงแม่แบบสุดท้าย เช่น สำหรับปัญหาที่ 9 ซึ่งมีสูตรการผลิตคือ D8-D8-D12-D12-D2-D2-S2 แม่แบบที่ใช้คือ 1-2-3-4-1-2-3 จะสลับแม่แบบที่ 1 ก่อน ซึ่งมี

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

งานที่ 1 และงานที่ 5 ผลิตอยู่ในแม่แบบ จะสลับสูตรสำหรับงานคู่นี้ สูตรการผลิตจะเปลี่ยนไปเป็น D2-D8-D12-D12-D8-D2-S2 นั่นเอง จะหยุดการสลับก็ต่อเมื่อสลับสูตรการผลิตครบทุกคู่ของทุกแม่แบบแล้ว หรือสามารถจัดตารางการผลิตให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงาน

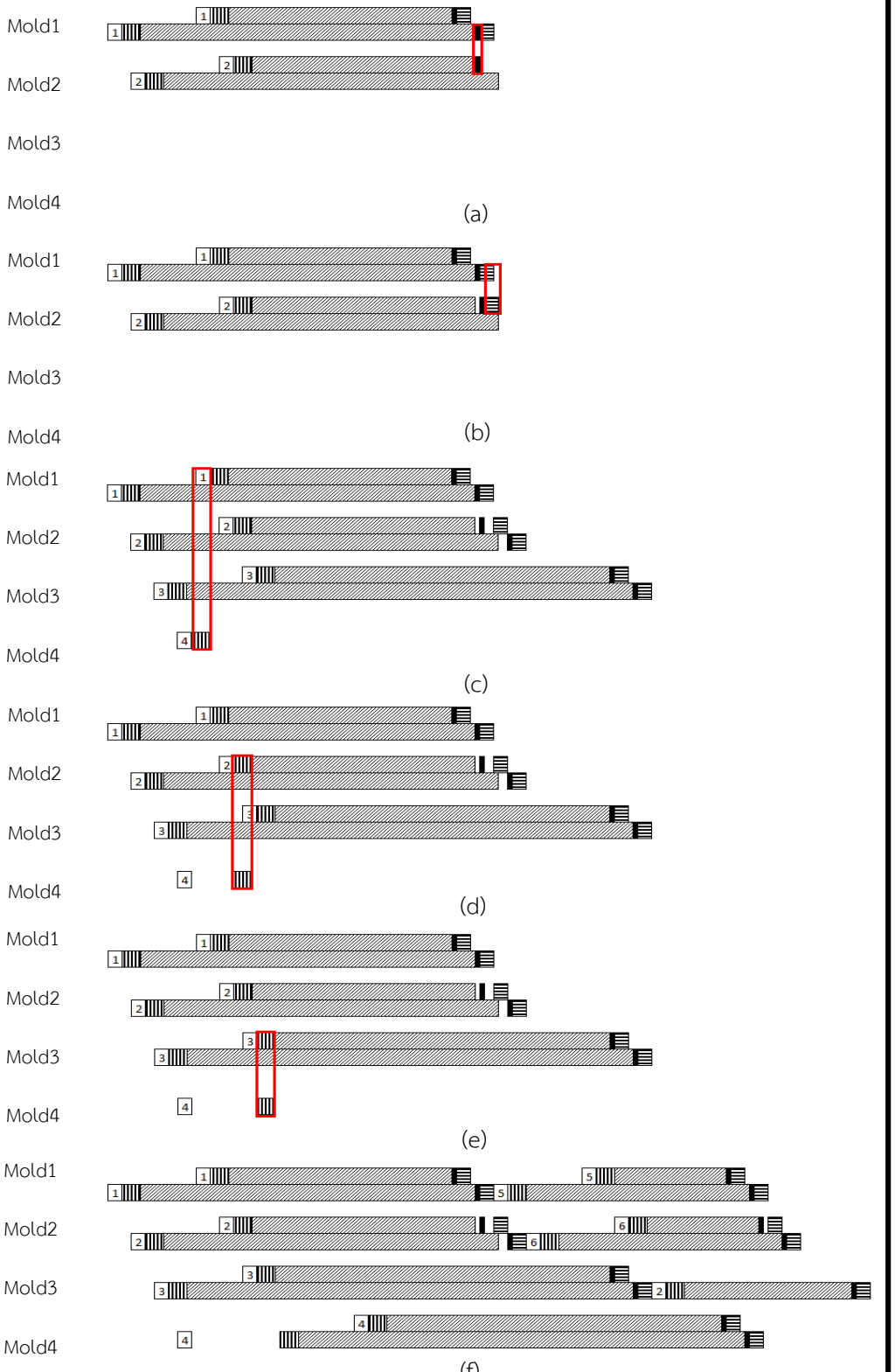
2) การจัดตารางการผลิตใหม่ (Rescheduling)

เริ่มจัดตารางการผลิตใหม่ตั้งแต่งานที่ 1 จนถึงงานและขั้นตอนการผลิตที่กำลังพิจารณาว่ามีการผิดเงื่อนไขอยู่ โดยทุก ๆ ขั้นตอนการผลิต จะต้องตรวจสอบว่ามีการผิดเงื่อนไขหรือไม่ ถ้ามีก็จะเลื่อนงานที่กำลังพิจารณาอยู่ให้เริ่มการผลิตหลังจากงานที่ได้จัดตารางการผลิตไปแล้ว วิธีการจัดตารางการผลิตใหม่จะเหมือนกับการจัดตารางการผลิตในตอนแรกนั่นเอง

4.1.5 การปรับสูตรการผลิตให้ใช้สูตรที่ถูกลง (Changing formulas to be cheaper formulas)

สุ่มงานที่จะนำมาปรับสูตร โดยจะพิจารณาทีละงาน พิจารณาเฉพาะสูตรที่ถูกกว่าสูตรปัจจุบันเท่านั้น เริ่มพิจารณาสูตรที่ถูกที่สุด คำนวณเวลาหย่อน (Slack time) ของแม่แบบของงานที่กำลังพิจารณา โดยเวลาหย่อนของแม่แบบนั้น ๆ จะเท่ากับกำหนดส่งงานลบเวลาเสร็จสิ้นของแม่แบบ ซึ่งเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบสามารถคำนวณได้จากหัวข้อ 4.3 นั่นเอง เพื่อดูว่าเวลาที่จะต้องใช้เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนสูตรในตารางที่ 4.6-4.7 นั้น มีค่าน้อยกว่าเวลาหย่อนหรือไม่ ถ้าใช่ ก็จะจัดตารางการผลิต เพื่อดูว่ามีงานใดที่เสร็จสิ้นเลยกำหนดเวลาส่งงานหรือไม่ ถ้าไม่มีงานใดที่เสร็จสิ้นเลยกำหนดเวลาส่งงานเลย ก็จะปรับให้งานนั้น ๆ ใช้สูตรที่กำลังพิจารณา และหยุดการพิจารณางานนั้น แต่ถ้าไม่ จะพิจารณาสูตรที่แพงขึ้นมาหนึ่งสูตร โดยสูตรการผลิตนั้น ๆ จะต้องมีเวลาที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นในการเปลี่ยนสูตรน้อยกว่าเวลาหย่อนด้วย จะหยุดขั้นตอนนี้ก็ต่อเมื่อพิจารณาครบทุกสูตรเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 4.10

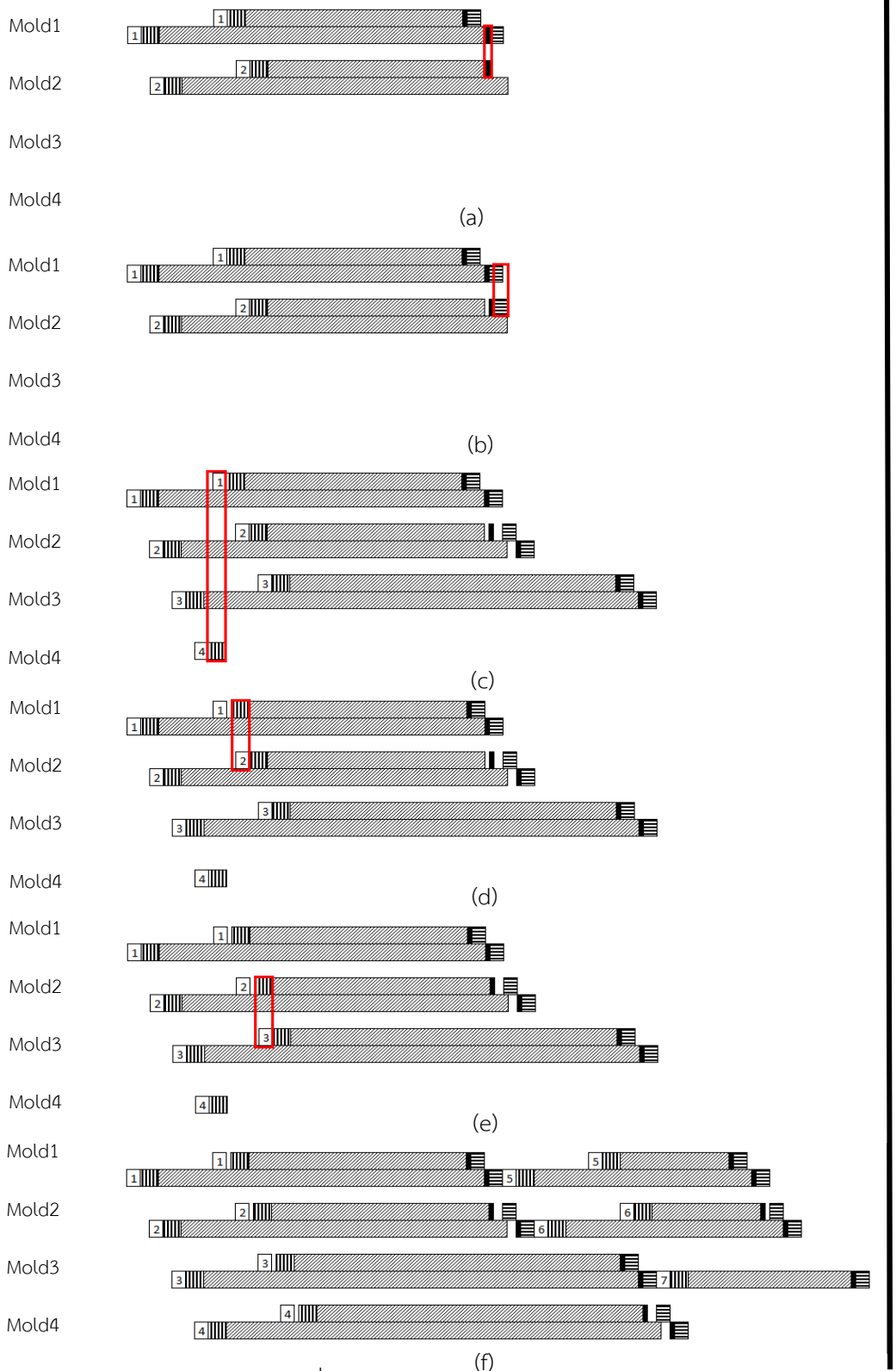
933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



รูปที่ 4.8 การจัดตารางการผลิตในตอนแรก

CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

กำหนดส่งงาน



รูปที่ 4.9 การจัดตารางการผลิต

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

จากขั้นตอนที่แล้ว จะได้สูตรการผลิตคือ D8-D8-D12-D12-D2-D2-S2 แม่แบบที่ใช้คือ 1-2-3-4-1-2-3 จะนำมาคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบได้เท่ากับ 142-147-164-122 ซึ่งจะได้เวลาหย่อนของแต่ละแม่แบบเท่ากับ 26-21-4-46 เมื่อสุ่มลำดับงานเพื่อที่จะนำมาปรับสูตรการผลิตได้ลำดับดังนี้ 7-5-2-3-1-6-4 จะเริ่มพิจารณาที่งานที่ 7 ซึ่งเป็นงานเดี่ยวเป็นลำดับแรก โดยมีเวลาหย่อนเท่ากับ 4 หน่วย จะเริ่มพิจารณาสูตรที่ถูกที่สุดก่อน นั่นก็คือสูตรการผลิต S5 เวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนสูตรการผลิตจากสูตรการผลิต S2 ไปเป็นสูตรการผลิต S5 เท่ากับ 60 หน่วย ซึ่งมีค่ามากกว่าเวลาหย่อน จึงไม่สามารถปรับเปลี่ยนสูตรการผลิตได้ จะพิจารณาเช่นนี้ไปจนถึงสูตรการผลิต S3 ซึ่งมีเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 12 หน่วย ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนสูตรการผลิตได้ เนื่องจากมีค่ามากกว่าเวลาหย่อน จึงพิจารณางานลำดับถัดไป คืองานที่ 5 ซึ่งเป็นงานคู่ที่ใช้สูตรการผลิตที่ D2 และมีเวลาหย่อนเท่ากับ 26 หน่วย จะเริ่มพิจารณาที่สูตรการผลิตที่ถูกที่สุดซึ่งก็คือสูตรการผลิต D13 แต่จะเห็นว่าเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนสูตรการผลิตมีค่ามากถึง 71 หน่วย ซึ่งมากกว่าเวลาหย่อน จึงไม่สามารถนำไปจัดตารางการผลิตได้ โดยคู่สูตรการผลิตแรกที่สามารถนำไปจัดตารางการผลิตได้ก็คือ สูตรการผลิต D8 ที่มีเวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนสูตรการผลิตเท่ากับ 24 หน่วย ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเวลาหย่อน จึงนำไปจัดตารางการผลิต ถ้าสามารถจัดตารางการผลิตให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงานได้ ก็จะปรับให้งานที่ 5 ใช้คู่สูตรการผลิตที่ D8 แต่ถ้าไม่ ก็จะพิจารณาสูตรการผลิต D7 แทนสูตรการผลิตที่ D2 และมีเวลาหย่อนเท่ากับ 26 หน่วยเช่นเดิม เมื่อลองจัดตารางการผลิตแล้วพบว่าสามารถจัดตารางการผลิตให้เสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงาน จึงปรับสูตรการผลิตเป็น D8-D8-D12-D12-D8-D2-S2 จากนั้นคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบได้เท่ากับ 166-147-164-122 และเวลาหย่อนเท่ากับ 2-21-4-46 จากนั้นจะพิจารณางานในลำดับถัดไปจนครบทุกงาน จะได้สูตรการผลิตคือ D8-D8-D12-D13-D8-D3-S2 และแม่แบบคือ 1-2-3-4-1-2-3 เมื่อนำไปจัดตารางการผลิตแล้วจะได้ดังรูปที่ 4.11(a) ซึ่งมีเวลาเสร็จสิ้นเกินกำหนดส่งงาน แต่เมื่อสลับสูตรการผลิตที่ได้กล่าวในการจัดตารางการผลิตหลังปรับปรุงแล้วพบว่าสามารถจัดตารางการผลิตได้ดังรูปที่ 4.11(b) ซึ่งมีสูตรการผลิตคือ D8-D3-D12-D13-D8-D8-S2 เป็นคำตอบ โดยจะได้ต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 129 หน่วย

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ตารางที่ 4.6 เวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนสูตรการผลิต

สูตรการผลิต	1	2	3	4	5
S1	-	-	-	-	-
S2	12	-	-	-	-
S3	24	12	-	-	-
S4	48	36	24	-	-
S5	72	60	48	24	-

```
Randomly choose jobs for changing the formula
Start considering the cheapest formula
While (The considered formula is cheaper than the current formula)
    Compute slack time of each mold
    While (The increasing completion time of the considered job is less than slack time of its mold)
        Schedule
        If (Finishing time of any job > due date)
            Consider the more expensive formula
            Recompute slack time
        Else
            The current formula will be changed to be the considered formula
            Break
```

รูปที่ 4.10 รหัสเทียมของการปรับสูตรของงานให้ใช้สูตรที่ถูกลง

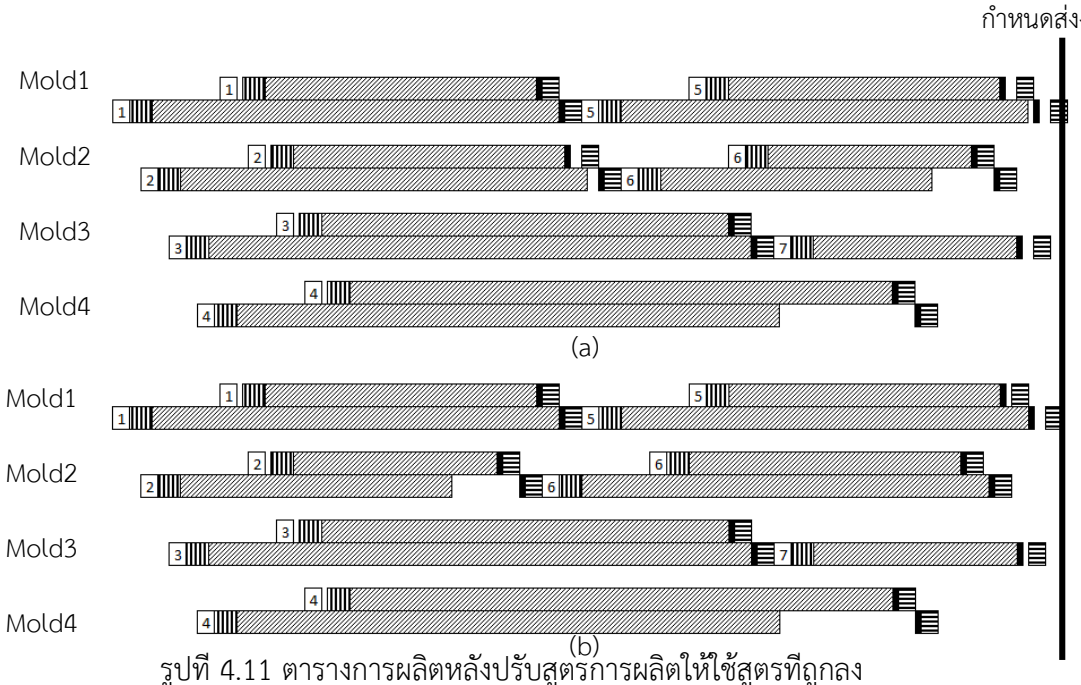
9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ในบางปัญหา การแบ่งจำนวนงานชั้นล่างและจำนวนงานซ้อนทับเท่า ๆ กันอาจจะไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุดจากวิธีฮิวริสติก เช่น ในปัญหาที่ 8 ที่มีจำนวนงาน 12 งาน 4 แม่แบบ จะพบว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมนั้น ได้ต้นทุนการผลิต 108 หน่วย โดยแบ่งเป็นงานชั้นล่าง 7 งาน และงานซ้อนทับ 5 งานดังรูปที่ 4.12(a) โดยคำตอบที่ได้มี 4 งานที่ใช้สูตรการผลิตที่ 5, 3 งานที่ใช้สูตรการผลิตที่ 4, 2 งานที่ใช้สูตรการผลิตที่ 3 และ 2 งานที่ใช้สูตรการผลิตที่ 2 เมื่อลองนำมาจัดตารางการผลิต โดยแบ่งจำนวนงานชั้นล่างและงานซ้อนทับเท่ากัน คืองานชั้นล่างจำนวน 6 งาน และงานซ้อนทับจำนวน 6 งาน ดังรูปที่ 4.12(b) แล้วพบว่าไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้เสร็จสิ้นทันเวลาได้ เนื่องจากการแบ่งงานชั้นล่างและงานซ้อนทับเท่ากันในกรณีนี้ ทำให้ช่วงเวลาใกล้กำหนดส่งนั้น มีโอกาสสูงที่จะใช้ทรัพยากรในเวลาเดียวกันเป็นจำนวนหลายงาน ทำให้ต้องรอให้งานก่อนหน้าเสร็จสิ้นก่อน เมื่อจัดสรรทรัพยากรเรียบร้อยแล้ว ทำให้บางงานเสร็จสิ้นเลยกำหนดส่งงานได้

ตารางที่ 4.7 เวลาการผลิตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนคู่สูตรการผลิต

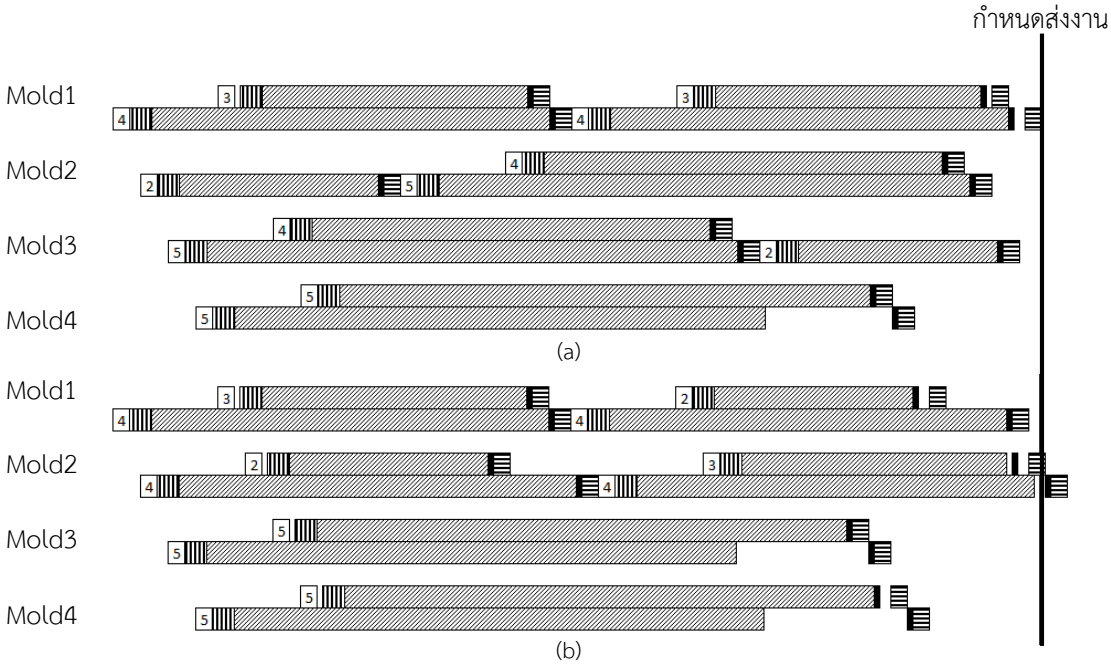
คู่สูตรการผลิต	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
D1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	12	11	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D4	25	24	13	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D5	24	23	12	12	-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D6	49	48	37	37	24	25	-	-	-	-	-	-	-	-
D7	25	24	13	13	0	1	-24	-	-	-	-	-	-	-
D8	25	24	13	13	0	1	-24	0	-	-	-	-	-	-
D9	49	48	37	37	24	25	0	24	24	-	-	-	-	-
D10	49	48	37	37	24	25	0	24	24	0	-	-	-	-
D11	48	47	36	36	23	24	-1	23	23	-1	-1	-	-	-
D12	49	48	37	37	24	25	0	24	24	1	0	1	-	-
D13	72	71	60	60	47	48	23	47	47	23	23	24	23	-

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23



รูปที 4.11 ตารางการผลิตหลังปรับสูตรการผลิตให้ใช้สูตรที่ถูกลง

ในขั้นตอนนี้จึงลดจำนวนงานคู่ลง 1 งาน และปรับจำนวนงานเดี่ยวเท่ากับจำนวนงานทั้งหมดลบสองเท่าของจำนวนงานคู่ นั่นคือจากจำนวนงานคู่ 5 งาน และจำนวนงานเดี่ยว 1 งาน จะปรับเป็นจำนวนงานคู่ 4 งาน และจำนวนงานเดี่ยวเท่ากับ 11 – (2x4) = 3 งาน ซึ่งก็คือขั้นตอนการกำหนดงานคู่และงานเดี่ยวในขั้นตอนที่ 4.1.1 หลังจากนั้นจะทำตามขั้นตอน 4.1.2-4.1.5 ซ้ำ ปรับลดจำนวนงานคู่จนกว่าจำนวนงานคู่มีค่าติดลบ หรือเมื่อได้คำตอบที่ไม่ดีกว่าคำตอบก่อนหน้าดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.12 ตารางการผลิตสำหรับปัญหา 12 งาน 4 แม่แบบ

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

โดยจะได้คำตอบออกมาเป็นจำนวนงานคู่ จำนวนงานเดี่ยว แม่แบบที่ใช้ ตารางการผลิตงานทุกประเภทในแต่ละขั้นตอนการผลิตและสูตรการผลิตที่ใช้ ซึ่งคำตอบจากวิธีฮิวริสติกสำหรับปัญหาที่ 9 คือปัญหาที่มี 13 งาน 4 แม่แบบ จะจัดให้มีการผลิต 6 งานคู่ และ 1 งานเดี่ยว โดยที่ 6 งานแรกเป็นงานคู่ และงานที่ 7 เป็นงานเดี่ยว มีลำดับแม่แบบคือ 1-2-3-4-1-2-3 โดยจะมีตารางการผลิตดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 คำตอบจากวิธีฮิวริสติกสำหรับปัญหา 13 งาน 4 แม่แบบ

#Job	Formula	Starting time										Completion time
		Based job					Top-layer job					
		P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	
1	D8	0	3	7	79	80	19	23	27	75	76	83
2	D3	5	8	12	72	73	24	28	32	68	69	76
3	D12	10	13	17	113	114	29	33	37	109	110	117
4	D13	15	18	22	142	143	34	38	42	138	139	146
5	D8	83	86	90	162	165	102	105	109	157	159	168
6	D8	76	79	83	155	156	95	98	102	150	151	159
7	S2	117	120	124	160	162	-	-	-	-	-	165

4.2 ผลวิจัยจากวิธีฮิวริสติกเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อนำวิธีฮิวริสติกมาหาคำตอบสำหรับปัญหา 2 แม่แบบ, 4 แม่แบบ และ 8 แม่แบบ ที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วยและ 336 หน่วย เพื่อเปรียบเทียบคำตอบและเวลากับแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ดังตารางที่ 4.9-4.14 สำหรับปัญหา 2 แม่แบบจะเห็นว่าวิธีฮิวริสติกสามารถหาคำตอบได้เท่ากับคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทั้ง 2 แบบในทุกปัญหา ยกเว้นปัญหาที่ 5 ซึ่งสามารถหาคำตอบได้ดีกว่า 1.91% เทียบกับคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม โดยใช้เวลาในการหาคำตอบทุกปัญหาน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับปัญหา 4 แม่แบบ ที่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าหรือเท่ากับคำตอบที่ดีที่สุดของแบบจำลองทั้ง 2 แบบ โดยปัญหาที่ 13 วิธีฮิวริสติกสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองรวมถึง 17.55% ยกเว้นปัญหาที่ 12 ที่ยังไม่สามารถหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบจากการแบ่งปัญหาย่อยได้ ซึ่งคำตอบที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก แตกต่างเพียง 3.25% เท่านั้น แต่สามารถใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วกว่ามาก

สำหรับปัญหา 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย พบว่าวิธีฮิวริสติกนั้นในบางปัญหา ไม่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองได้ ซึ่งก็คือปัญหาที่ 14-16 โดยในปัญหาที่ 14 นั้นคำตอบที่ได้แย่กว่าคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถึง 15.63% แต่ใช้เวลาในการหา

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

คำตอบเพียง 42.74 วินาที ซึ่งใช้เวลาน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คิดเป็นเกือบ 100% และเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อกำหนดส่งงานมีค่าเท่ากับ 336 หน่วย พบว่าบางปัญหาใช้เวลาในการหาคำตอบค่อนข้างนาน ซึ่งมีเพียง 1 ปัญหาที่เวลาในการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกแย่กว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 37.65% คือปัญหาที่ 22 แต่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบ ซึ่งสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากการแบ่งปัญหาย่อยถึง 32.73% โดยปัญหาส่วนนี้พบว่าวิธีฮิวริสติกสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทุกปัญหา

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

4.3 ผลวิจัยจากปัญหาเพิ่มเติม

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ศึกษาปัญหาเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผลวิจัย โดยการสร้างปัญหาสำหรับ 2 แม่แบบ 4 แม่แบบ และ 8 แม่แบบ อย่างละ 2 ปัญหา โดยเลือกปัญหาที่มีจำนวนงานทั้งจำนวนคู่และจำนวนคี่ ในกำหนดส่งงานที่มากขึ้นเป็น 504 หน่วย โดยใช้พิจารณาเฉพาะปัญหาที่มีความยากในการจัดตารางการผลิต นั่นคือไม่ใช่ปัญหาที่ใช้สูตรการผลิตที่ถูกที่สุดสำหรับทุกงานแล้วสามารถจัดตารางการผลิตได้ และไม่เลือกปัญหาเมื่อใช้สูตรการผลิตที่แพงที่สุดสำหรับทุกงานแล้ว ไม่สามารถจัดตารางการผลิตได้ ซึ่งจะกำหนดให้ผลิตงานชั้นล่างและงานซ้อนทับจำนวนเท่า ๆ กัน โดยตรวจสอบจากการคำนวณเวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบในหัวข้อ 4.1.3 เช่นสำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบ ปัญหาที่มี 13 งาน เป็นปัญหาสุดท้ายที่เมื่อให้ทุกงานใช้สูตรการผลิตที่ถูกที่สุดแล้ว เวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกำหนดส่งงาน และปัญหาที่มี 34 งาน เป็นปัญหาแรกที่เมื่อให้ทุกงานใช้สูตรการผลิตที่แพงที่สุดแล้ว เวลาเสร็จสิ้นของแต่ละแม่แบบมีค่ามากกว่ากำหนดส่งงาน ปัญหาที่สามารถนำมาศึกษาได้คือปัญหาที่มีจำนวนงานระหว่าง 14 งานและ 33 งาน โดยปัญหาที่เลือกมาหาคำตอบมีดังตารางที่ 4.15 พบว่าทุกปัญหาที่ไม่เคยศึกษามาก่อน วิธีฮิวริสติกสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบในทุกปัญหา ยกเว้นปัญหาที่ 24 ซึ่งคำตอบที่ได้แตกต่างจากคำตอบจากแบบจำลองรวมเพียง 1.25% และใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบในทุกปัญหา โดยช่วยลดเวลาในการหาคำตอบมากกว่า 78.24% ส่วนในปัญหาที่ 29 สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากการแบ่งปัญหาย่อยสูงมากที่สุด ซึ่งสูงถึง 42.05%

จากปัญหาที่ได้ศึกษามาทั้งสิ้น 29 ปัญหานั้น พบว่า วิธีการหาคำตอบทั้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการแบ่งปัญหาย่อย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม และวิธีฮิวริสติกจะสามารถหาคำตอบที่ถูกที่สุดได้เมื่อแบ่งงานให้ผลิตเป็นงานชั้นล่างที่มีค่าใกล้เคียงกับงานซ้อนทับ

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 4.9 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
1	6	3	3	52	0.16	3	3	52	10.63	3	3	52	0.01	0	93.16
2	7	4	3	70	0.2	4	3	70	272.82	4	3	70	0.02	0	91.02
3	8	5	3	105	0.45	4	4	91	6638.67	4	4	91	0.04	0	91.14
4	9	6	3	144	1.69	5	4	(128)	5400.38	5	4	128	0.03	0	98.16

ตารางที่ 4.10 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 2 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
5	15	11	4	189	8101.25	8	7	(157)	5000.34	8	7	154	0.05	1.91	100.00
6	16	8	8	183	13.66	8	8	(180)	4600.23	8	8	180	1.28	0	90.64

<u>หมายเหตุ</u> ต้นทุนการผลิตที่อยู่ในวงเล็บหมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 4.11 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
7	11	6	5	90	0.87	6	5	(90)	4200.22	6	5	90	0.05	0	93.70
8	12	7	5	113	5.83	7	5	(108)	5000.19	7	5	108	0.48	0	91.72
9	13	12	1	(192)	5000.46	7	6	(131)	4900.34	7	6	129	0.54	1.53	99.99
10	14	8	6	159	53.84	8	6	(164)	5200.39	7	7	159	0.93	0	98.26
11	15	10	5	(204)	5900.46	9	6	(199)	5400.17	8	7	185	0.74	7.04	99.99

ตารางที่ 4.12 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
12	27	14	13	(246)	2058.28	18	9	(317)	7500.45	15	12	254	25.88	-3.25	98.74
13	29	24	5	(417)	4833.4	19	10	(376)	15500.47	15	14	310	43.07	17.55	99.11

หมายเหตุ ต้นทุนการผลิตที่อยู่ในวงเล็บหมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 4.13 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 168 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
14	19	10	9	(160)	7230.33	11	8	(170)	5400.42	12	7	185	42.74	-15.63	99.21
15	20	12	8	(185)	17900.25	12	8	(196)	6700.52	12	8	204	47.90	-10.27	99.29
16	21	14	7	(226)	29220.84	15	6	(243)	7000.44	12	9	244	57.33	-7.96	99.18
17	22	18	4	(278)	7567.01	14	8	(270)	8300.47	16	6	265	126.38	1.85	98.33

ตารางที่ 4.14 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่มี 8 แม่แบบที่กำหนดส่งงาน 336 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
18	43	32	11	(460)	18964.69	30	13	(577)	18501.51	24	19	348	1918.28	24.35	89.63
19	44	25	19	(453)	9505.20	27	17	(465)	15650.97	24	20	364	2480.27	19.65	73.91
20	45	28	17	(431)	15504.53	27	18	(465)	24401.24	23	22	393	1200.78	8.82	92.26
21	48	36	12	(587)	23330.61	37	11	(765)	2804.92	24	24	479	2789.52	18.40	0.55
22	49	45	4	(724)	24619.59	35	14	(740)	3603.44	27	22	487	4960.28	32.73	-37.65
23	50	41	9	(710)	17091.10	44	6	(793)	25500.50	26	24	530	4404.70	25.35	74.23

<u>หมายเหตุ</u> ต้นทุนการผลิตที่อยู่ในวงเล็บหมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

CU ithesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

ตารางที่ 4.15 ผลงานวิจัยสำหรับปัญหาที่สร้างขึ้นมาศึกษาใหม่ที่กำหนดส่งงาน 504 หน่วย

Prob.	# Jobs	Separated model				Overall model				Heuristic				% Cost imp.	% Time decrease
		# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)	# Based jobs	# Top-layer jobs	Cost	Time (s)		
24	20	10	10	(162)	17.7	10	10	(160)	5000.38	10	10	162	0.12	-1.25	99.29
25	25	13	12	(299)	3628.69	14	11	(316)	11000.47	13	12	291	0.72	2.68	99.98
26	35	18	17	(238)	6303.3	21	14	(315)	19000.66	18	17	237	21.36	0.42	99.66
27	40	22	18	(334)	7604.24	24	16	(414)	35000.73	20	10	332	98.92	0.60	98.70
28	55	28	27	(346)	20005.75	34	21	(434)	14501.34	28	27	296	487.73	14.45	96.64
29	60	31	29	(616)	13006.84	44	16	(901)	12000.51	30	30	357	2611.68	42.05	78.24

หมายเหตุ ต้นทุนการผลิตที่อยู่ในวงเล็บหมายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตแบบซ้อนทับ งานชั้นล่างสามารถเลือกผลิตในแม่แบบที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการแม่แบบใดก็ได้ และงานซ้อนทับสามารถเลือกผลิตบนงานชั้นล่างใดก็ได้ โดยแต่ละงานชั้นล่างจะมีงานซ้อนทับได้ไม่เกิน 1 งาน โดยแต่ละงานนั้นจะมีขั้นตอนการผลิต 5 ขั้นตอน ซึ่งต้องผลิตตามลำดับ ห้ามหยุดการผลิตขั้นตอนการผลิตใด ๆ กลางคันเพื่อไปทำงานอื่น แต่ละขั้นตอนการผลิตต้องการทรัพยากรเฉพาะที่มีเพียง 1 หน่วยเท่านั้นทำให้ไม่สามารถผลิตขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งในเวลาเดียวกันได้ โดยงานซ้อนทับนั้น จะสามารถเริ่มการผลิตได้ก็ต่อเมื่องานชั้นล่างเริ่มการผลิตในขั้นตอนการผลิตที่ 3 ไปแล้ว 12 หน่วย และสามารถกลับมาผลิตงานชั้นล่างได้ก็ต่อเมื่อเสร็จสิ้นการผลิตงานซ้อนทับแล้ว นอกจากนี้งานชั้นล่างและงานซ้อนทับสามารถเลือกสูตรการผลิตใดก็ได้ โดยมีสูตรการผลิตทั้งหมด 5 สูตร เพื่อให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดและผลิตเสร็จสิ้นภายในกำหนดส่งงาน ซึ่งณัฐพล (2554) ได้ศึกษาปัญหานี้โดยการแบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาย่อย โดยปัญหาย่อยแรกนั้น ศึกษาเฉพาะงานชั้นล่างเพื่อเลือกสูตรและจัดตารางการผลิต โดยจะนำคำตอบที่ได้จากปัญหาย่อยแรกมาเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับปัญหาย่อยที่ 2 ซึ่งก็คือสูตรการผลิตและแม่แบบสำหรับงานชั้นล่าง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเลือกสูตรการผลิตสำหรับงานซ้อนทับ ถูกจำกัดด้วยสูตรการผลิตของงานชั้นล่าง ทำให้ต้องเลือกสูตรการผลิตที่สั้นเพื่อไม่ให้ต้องเลื่อนการผลิตจนเสร็จสิ้นเลยกำหนดส่งงาน [1] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัญหาทั้งหมด โดยพิจารณาการเลือกสูตรและการจัดตารางการผลิตสำหรับงานชั้นล่างและงานซ้อนทับไปพร้อม ๆ กัน สามารถเลือกได้ว่าจะให้งานใดผลิตเป็นงานชั้นล่าง และงานใดผลิตเป็นงานซ้อนทับ ทำให้สามารถเลือกสูตรการผลิตสำหรับงานได้ค่อนข้างหลากหลายกว่า จึงสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าเมื่อสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวม และในปัญหาที่มี 2 แม่แบบซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็กพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าการแบ่งปัญหาย่อยแม้ว่าจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ก็ตาม แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น สำหรับปัญหาที่มี 4 แม่แบบพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมยังคงหาคำตอบได้ดีกว่าเกือบทุกปัญหา แต่สำหรับปัญหาที่มี 8 แบบซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุด พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมไม่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการแบ่งปัญหาย่อยได้แล้ว จึงเสนอ

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

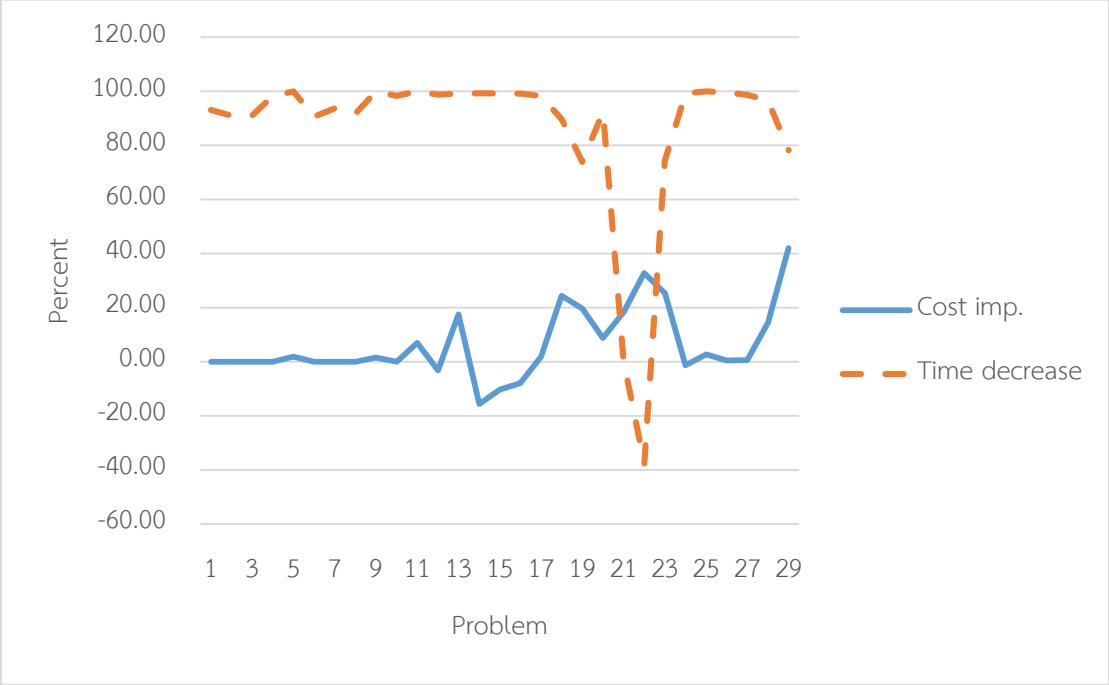
วิธีฮิวริสติกที่สามารถเลือกสูตรการผลิตและการจัดตารางการผลิตที่มีการผลิตแบบซ้อนทับได้ เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมใช้เวลาในการหาคำตอบมากและไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ซึ่งจะใช้เวลาในการหาคำตอบที่สั้นกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่อาจจะไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด

หลักการของวิธีฮิวริสติกที่เสนอนั้น จะผลิตให้มีงานซ้อนทับมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดเวลาการผลิต ทำให้สามารถเลือกสูตรการผลิตที่ถูกลงได้ โดยจะมองงานที่มีงานซ้อนทับเป็นงานคู่พิจารณาเลือกสูตรเป็นคู่สูตรการผลิต และมองงานที่ไม่มีงานซ้อนทับเป็นงานเดี่ยว โดยให้ใช้สูตรการผลิตที่ยาวที่สุด จากนั้นปรับลดสูตรการผลิตโดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อให้คำนวณเวลาเสร็จสิ้นคร่าว ๆ ไม่ให้มีแม่แบบใดมีเวลาเสร็จสิ้นเกินกำหนดส่งงาน เพื่อนำสูตรการผลิตนั้นไปจัดตารางการผลิต เมื่อจัดตารางการผลิตได้แล้ว จะนำมาปรับปรุงเพื่อเลือกสูตรการผลิตที่อาจจะยังไม่ได้พิจารณาจากการปรับลดสูตรโดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งขั้นตอนนี้อาจจะทำให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะปรับลดจำนวนงานคู่ 1 งาน โดยให้งานที่เหลือเป็นงานเดี่ยว เพื่อดูว่ามีแนวโน้มที่จะได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นหรือไม่ ถ้าไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้นก็จะหยุดการพิจารณา

วิธีฮิวริสติกที่เสนอนั้น พบว่าโดยส่วนมาก สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าหรือเท่ากับคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบ คือ 24 ปัญหา จากทั้งหมด 29 ปัญหา โดยสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าไม่เกิน 43% และแย่กว่าไม่เกิน 16% เมื่อเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 แบบ สำหรับปัญหาที่เคยศึกษาในงานวิจัย [1] นั้น ปัญหา 2 แม่แบบ วิธีฮิวริสติกสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าหรือเท่ากับคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้เวลาในการหาคำตอบไม่ถึง 2 วินาที และยังคงสามารถหาคำตอบได้ดีในปัญหา 4 แม่แบบ มีเพียงปัญหาเดียวที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และได้คำตอบที่แย่กว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงแค่ 3.25% เท่านั้น โดยใช้เวลาในการหาคำตอบไม่ถึง 1 นาที ส่วนในปัญหา 8 แม่แบบพบว่ามี 3 ปัญหาที่ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบที่ดีที่สุดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยได้คำตอบแย่กว่าไม่เกิน 16% โดยทั้ง 3 ปัญหานั้นเป็นปัญหาที่มีกำหนดส่งงานสั้นที่สุด และเป็นปัญหาที่มีจำนวนงานและแม่แบบมากที่สุดด้วย การพิจารณางานชั้นล่างและงานซ้อนทับพร้อม ๆ กัน ทำให้มีพื้นที่ในการหาคำตอบที่กว้างกว่า จึงใช้เวลาในการหาคำตอบนานและยังไม่เจอคำตอบที่ดีเท่ากับการแบ่งปัญหาย่อย แต่ยังคงใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และพบว่าบางปัญหาใช้เวลาในการหาคำตอบค่อนข้างนาน ซึ่งปัญหาที่วิธีฮิวริสติกใช้เวลาในการหาคำตอบแย่กว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น มีเพียงปัญหาเดียว ซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบแย่กว่าไม่เกิน 38% ดังปัญหาที่ 22 ในรูปที่ 5.1 นอกจากนี้ ปัญหาที่สร้างขึ้นมา

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ใหม่ เมื่อนำมาหาคำตอบแล้ว พบว่าวิธีฮิวริสติกสามารถหาคำตอบได้ดีในทุก ๆ ปัญหา มีเพียงปัญหาเดียวเท่านั้นที่ได้คำตอบแย่กว่า 1.25% ซึ่งใช้เวลาน้อยมากในการหาคำตอบ และสามารถหาคำตอบได้ดีกว่าคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มากที่สุด 42.05% คือปัญหาที่ 29 ซึ่งจากกราฟต้นทุนการผลิตที่ปรับปรุงและเวลาในการหาคำตอบที่ลดลงด้วยวิธีฮิวริสติกสำหรับปัญหาต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.1 พบว่าโดยรวมวิธีฮิวริสติกสามารถปรับปรุงลดต้นทุนการผลิต และใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวิธีฮิวริสติกสามารถลดเวลาในการหาคำตอบโดยเฉลี่ยได้ถึง 86.45%



รูปที่ 5.1 กราฟต้นทุนการผลิตที่ปรับปรุงและเวลาในการหาคำตอบที่ลดลงด้วยวิธีฮิวริสติก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น พบว่าวิธีฮิวริสติกที่ได้เสนอไปนั้น ใช้เวลาค่อนข้างนานในการหาคำตอบ ซึ่งในขั้นตอนการจัดตารางการผลิตนั้น ยังใช้เวลาค่อนข้างนานในการทำแต่ละครั้ง เนื่องจากถ้ามีงานใดงานหนึ่งที่ใช้ทรัพยากรในช่วงเวลาเดียวกัน ก็จะจัดตารางการผลิตใหม่ทั้งหมดจนกว่าจะถึงงานและขั้นตอนที่กำลังพิจารณา ถ้าสามารถปรับปรุงการจัดตารางการผลิตให้ใช้เวลาน้อยกว่านี้ได้ เวลาในการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกก็จะน้อยลงเช่นกัน

5.2.2 ในปัญหาที่วิธีฮิวริสติกไม่สามารถหาคำตอบให้ดีกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น เนื่องจากไม่สามารถจัดตารางการผลิตให้ได้ผลดีเท่ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ไม่สามารถ

CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23
9332566662

จัดตารางการผลิตงานที่ใช้สูตรการผลิตเดียวกับคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ทำให้ต้องเลือกสูตรการผลิตที่แพงมากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนรวมเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ถ้าสามารถปรับปรุงการจัดตารางการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้ ก็จะสามารถปรับปรุงคำตอบได้ดียิ่งขึ้น

5.2.3 เมื่อสามารถปรับลดเวลาในการหาคำตอบด้วยวิธีฮิวริสติกได้แล้ว ก็จะสามารถเพิ่มขั้นตอนในการปรับปรุงคำตอบได้ เช่น จับคู่งานเพื่อปรับสูตรการผลิต โดยงานแรกปรับให้ใช้สูตรการผลิตที่แพงขึ้น 1 สูตร และอีกหนึ่งงานปรับสูตรการผลิตใช้สูตรที่ถูกลง 1 สูตร โดยที่ต้นทุนรวมนั้นต้องมีค่าลดลง เพื่อนำไปลองจัดตารางการผลิต ก็อาจจะสามารถปรับปรุงจากวิธีฮิวริสติกที่งานวิจัยนี้เสนอได้

933256662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

บรรณานุกรม

[1] ณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์, "การเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตสำหรับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[2] W. T. Chan, and H. Hu, "Constraint programming approach to precast production scheduling," *Journal of Construction Engineering and Management,* vol. 128, no. 6, 2002.

[3] V. Benjaoran, N. Dawood, and B. Hobbs, "Flowshop scheduling model for bespoke precast concrete production planning," *Construction Management and Economics,* vol. 23, no. 1, 2005.

[4] C.-H. Ko and S.-F. Wang, "Precast production scheduling using multi-objective genetic algorithms," *Expert Systems with Applications,* vol. 38, no. 7, pp. 8293-8302, 7// 2011.

[5] Z. Yang, Z. Ma, and S. Wu, "Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production," *Automation in Construction,* vol. 72, Part 3, pp. 321-329, 12// 2016.

[6] L. Kong, H. Li, H. Luo, L. Ding, X. Luo, and M. Skitmore, "Optimal single-machine batch scheduling for the manufacture, transportation and JIT assembly of precast construction with changeover costs within due dates," *Automation in Construction,* vol. 81, pp. 34-43, 2017/09/01/ 2017.

[7] W. Tharmmaphornphilas, and N. Sareinpithak, "Formula selection and scheduling for precast concrete production," *International Journal of Production Research,* vol. 51, no. 17, 2013.

[8] ณัฐพล สุเรนทร์พิทักษ์ และ วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, "การเลือกสูตรและจัดตารางการผลิตสำหรับคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีการผลิตซ้อนทับ," *KKU Engineering Journal,* vol. 39, no. 2, 2012.

[9] J. Grabowski and J. Pempera, "Sequencing of jobs in some production system," *European Journal of Operational Research,* vol. 125, no. 3, pp. 535-550, 9/16/ 2000.

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

[10] E. B. Edis, and I. Qzkarahan, "A combined integer/constraint programming approach to a resource-constrained parallel machine scheduling problem with machine eligibility restrictions," *Engineering Optimization,* vol. 43, no. 2, 2011.

[11] S. Özpeynirci, B. Gökgür, and B. Hnich, "Parallel machine scheduling with tool loading," *Applied Mathematical Modelling,* vol. 40, no. 9–10, pp. 5660-5671, 5// 2016.

[12] A. C. Beezão, J.-F. Cordeau, G. Laporte, and H. H. Yanasse, "Scheduling identical parallel machines with tooling constraints," *European Journal of Operational Research,* vol. 257, no. 3, pp. 834-844, 2017.

[13] L. Fanjul-Peyro, F. Perea, and R. Ruiz, "Models and matheuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources," *European Journal of Operational Research,* vol. 260, no. 2, pp. 482-493, 2017.

[14] J. A. Ventura and D. Kim, "Parallel machine scheduling with earliness–tardiness penalties and additional resource constraints," *Computers & Operations Research,* vol. 30, no. 13, pp. 1945-1958, 11// 2003.

[15] A. J. Ruiz-Torres and G. Centeno, "Scheduling with flexible resources in parallel workcenters to minimize maximum completion time," *Computers & Operations Research,* vol. 34, no. 1, pp. 48-69, 1// 2007.

[16] A. Grigoriev, M. Sviridenko, and M. Uetz, "Machine scheduling with resource dependent processing times," *Mathematical Programming,* journal article vol. 110, no. 1, pp. 209-228, 2007.

[17] A. J. Ruiz-Torres, F. J. López, and J. C. Ho, "Scheduling uniform parallel machines subject to a secondary resource to minimize the number of tardy jobs," *European Journal of Operational Research,* vol. 179, no. 2, pp. 302-315, 6/1/ 2007.

[18] L.-H. Su and C.-Y. Lien, "Scheduling parallel machines with resource-dependent processing times," *International Journal of Production Economics,* vol. 117, no. 2, pp. 256-266, 2// 2009.

[19] X. Zhang, and D. Du, "Approximate algorithms for unrelated machine scheduling to minimize makespan," *Journal of Industrial and Management Optimization,* vol. 12, no. 2, 2016.

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

[20] W. L. Winston, *Operations research applications and algorithms*, 4 ed. Curt Hintichs, 2004.

[21] E. A. Silver, "An overview of heuristic solution methods," *Journal of the Operational Research Society,* journal article vol. 55, no. 9, pp. 936-956, 2004.

[22] IBM, *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio OPL Language User's Manual*, 12 ed. 2016.

[23] กิตติภณ พละการ, กิตติภพ พละการ, สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล และ สุกรี สินธุภิญโญ, *Python ๑๐๑*, พิมพ์ครั้งที่ 2 ed. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2561.

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นันทิยา เอี่ยมสำอางค์
วัน เดือน ปี เกิด	1 มิถุนายน 2536
สถานที่เกิด	สมุทรสงคราม
วุฒิการศึกษา	โรงเรียนดรุณานุกูล โรงเรียนถาวรานุกูล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	126/10 ตำบลแม่กลอง อำเภอเมืองฯ จังหวัดสมุทรสงคราม 75000

9332566662 CU iThesis 5870347421 thesis / recv: 25072562 16:00:35 / seq: 23