การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม
ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

นางสาวทัศนีย์ ทองจันทร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Multi-objective Sequencing on Mixed-Model Parallel Assembly Lines with Biogeography-based Optimization

Miss Thasanee Thongjun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์
โดย	นางสาวทัศนีย์ ทองจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

ทัศนีย์ ทองจันทร์ : การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Multi-objective Sequencing on Mixed-Model Parallel Assembly Lines with Biogeography-based Optimization) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ปารเมศ ชุติมา, 211 หน้า.

การจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เป็นการแก้ปัญหาที่พิจารณาวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันจัดเป็นปัญหาแบบ NP-Hard (Non-deterministic Polynomial-Hard) ในการค้นหาคำตอบจำเป็นต้องนำวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด

งานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอลิทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน คือ ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด และ เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด ตามลำดับ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับในการจัดลำดับการผลิต ทั้งหมด 3 อัลกอริทึม คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E) วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-II) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO)

ผลการทดลองพบว่า COIN-E มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่า BBO, NSGA-II และ DPSO ทั้งในดัชนีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต ดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ NSGA-II ในส่วนของใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ COIN-E ใช้เวลาที่เร็วกว่า BBO

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

5670210921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: MIXED-MODEL PARALLEL ASSEMBLY LINES / SEQUENCING

THASANEE THONGJUN: Multi-objective Sequencing on Mixed-Model Parallel Assembly Lines with Biogeography-based Optimization. ADVISOR: PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 211 pp.

Multi-objective sequencing on mixed-model parallel assembly lines is known as an NP-hard problem. Hence, to optimize this problem, heuristic approaches need to be developed.

In this research, a Biogeography-Based Optimization (BBO) algorithm is adapted to optimize three objectives simultaneously, i.e. minimum variance of production rates, minimum utility work, and minimum setup times. The performance of BBO is compared with the well-known algorithm, i.e. Combinatorial Optimization with Coincidence Extended: COIN-E), Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II (NSGA-II), and Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO)

The experimental results show that COIN-E outperforms BBO, NSGA-II and DPSO in terms of convergence, ratios of non-dominated solutions and the spread metric. In contrast, it is found that computation time to solution of is a marginally better than BBO

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้มอบความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ คุณปวริศ เอกพิทักษ์ธรรม สำหรับความช่วยเหลือในด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ดังที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งอยู่เบื้องหลังความสาเร็จของผู้วิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูปภาพ ..... ด

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

1.6 สรุปเนื้อหางานวิจัย 6

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 ปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน 8

2.2 วัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิต 11

2.2.1 ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด 13

2.2.2 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด 18

2.2.3 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด 28

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ 31

2.4 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ 32

2.5 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม 34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6 เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อรูเล็ต 37

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....38

บทที่ 3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัว ของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ 43

3.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ (Biography-Based Optimization: BBO) 43

3.2 ขั้นตอนการทำ BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มีหลายวัตถุประสงค์ 45

3.3 ตัวอย่างการใช้งาน BBO มาประยุกต์ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน.....50

3.3.1 การนำข้อมูลเข้า 50

3.3.2 การสร้างเซตสตริงคาตอบเริ่มต้น 50

3.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....52

3.3.4 การกาหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์.....53

3.3.5 การคำนวณค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพคำตอบ 54

3.3.6 การอพยพคำตอบ.....55

3.3.7 การมิวเตชัน.....60

3.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด.....62

3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล 65

3.4.1 ผังขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง 65

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์ 66

3.4.3 ตัวอย่างการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล 67

บทที่ 4 อัลลกอริทึมที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย.....74

4.1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ COIN-E.....75

4.1.2 ขั้นตอนการทำงานของ COIN-E.....76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.2 วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม II (NSGA-II).....77
4.2.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II.....78
4.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-II.....79
4.3 อัลกอริทึมวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO).....80
4.3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ DPSO.....81
4.3.2 ขั้นตอนการดาเนินงานของ DPSO.....82
บทที่ 5 ผลการทดลองและการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม.....84
5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....84
5.2 วิธีการทดลอง.....85
5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้กับอัลกอริทึม.....86
5.4 ผลการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม.....87
5.4.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 1.1.....88
5.4.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 1.2.....89
5.4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 2.1.....90
5.4.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 2.2.....92
5.4.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 3.1.....93
5.4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 3.2.....94
5.4.7 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 4.1.....96
5.4.8 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 4.2.....97
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 100
6.1 บทสรุปงานวิจัย..... 100
6.1.1 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง..... 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

6.1.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ 101
6.1.3 อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย 101
6.1.4 ผลการนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหา 102
6.2 ข้อเสนอแนะ 103
รายการอ้างอิง 104
ภาคผนวก 107
ภาคผนวก ก 108
ภาคผนวก ข 119
ภาคผนวก ค 134
ภาคผนวก ง 142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 211

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดปัญหาการทดลองการจัดลำดับการผลิต 4
ตารางที่ 2.1 จำนวนสถานีงานตามประเภทและขั้นงานที่ทำการผลิตในแต่ละสถานีงาน 9
ตารางที่ 2.2 ลำดับก่อนหลังของขั้นงานบนสายการประกอบ A และ B 10
ตารางที่ 2.3 เวลาการดำเนิดงานของแต่ขั้นงานของผลิตภัณฑ์ A และ B 10
ตารางที่ 2.4 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B 11
ตารางที่ 2.5 ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นงาน 13
ตารางที่ 2.6 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B2 B1 B3 15
ตารางที่ 2.7 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B2 B3 15
ตารางที่ 2.8 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ A คือ A2 A3 A1 16
ตารางที่ 2.9 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ A คือ A2 A3 16
ตารางที่ 2.10 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B1 B3 16
ตารางที่ 2.11 สรุปผลการคำนวณค่าความแปนผันของการผลิต B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3 ..17
ตารางที่ 2.12 แสดงเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ ml ที่ทำบนสถานีงาน j 21
ตารางที่ 2.13 ลำดับการผลิตที่จากการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน 21
ตารางที่ 2.14 เวลาดำเนินงานตามลำดับการผลิตบนแต่ละสถานีงานและความยาวสถานีงาน ...21
ตารางที่ 2.15 ผลการคำนวณเวลาที่ดำเนินงานที่ทำการผลิตบนสถานีงาน 24
ตารางที่ 2.16 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 1 25
ตารางที่ 2.17 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 2 25
ตารางที่ 2.18 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 3 26
ตารางที่ 2.19 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 4 26

ตารางที่ 2.20 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 5.....27
ตารางที่ 2.21 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 6.....27
ตารางที่ 2.22 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 7.....27
ตารางที่ 2.23 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 8.....28
ตารางที่ 2.24 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 9.....28
ตารางที่ 2.25 ขั้นตอนการสุ่มเวลาการปรับตั้งเครื่อง 29
ตารางที่ 2.26 ผลรวมเวลาการปรับตั้งเครื่องของลาดับผลิตภัณฑ์ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3.....30
ตารางที่ 3.1 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น.....52
ตารางที่ 3.2 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบชั่วคราว.....52
ตารางที่ 3.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว 53
ตารางที่ 3.4 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบ.....53
ตารางที่ 3.5 ค่าการอพยพและ ค่าความน่าจะเป็นของการอพยพ.....54
ตารางที่ 3.6 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ 56
ตารางที่ 3.7 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ 57
ตารางที่ 3.8 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ 58
ตารางที่ 3.9 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคาตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 3.....58
ตารางที่ 3.10 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคาตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2.....59
ตารางที่ 3.11 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคาตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 1.....59
ตารางที่ 3.12 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ.....60
ตารางที่ 3.13 ค่าที่ใช้ประกอบการมิวเตชันของสตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพ.....60
ตารางที่ 3.14 การเลือกบิตไปทำการมิวเตชัน.....62
ตารางที่ 3.15 การมิวเตชันสตริงคาตอบ $z2'$ 62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.16 การมิวเตชันสตริงคาตอบ $z3'$ 62
ตารางที่ 3.17 สตริงคำตอบและการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 63
ตารางที่ 3.18 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับสตรงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการ ...64
ตารางที่ 3.19 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรุ่นถัดไป 64
ตารางที่ 3.20 ค่าพารามิเตอร์และระดับปัญจัยที่ใช้ในการทดลอง.....68
ตารางที่ 3.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะตามระดับปัจจัยค่าพารามิเตอร์.....68
ตารางที่ 3.22 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง 73
ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....85
ตารางที่ 5.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO.....86
ตารางที่ 5.3การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน COIN-E 86
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ NSGA-II.....87
ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ DPSO.....87
ตารางที่ 5.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.1.....88
ตารางที่ 5.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.2.....90
ตารางที่ 5. 8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.1 91
ตารางที่ 5.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.2.....92
ตารางที่ 5.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.1.....94
ตารางที่ 5.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.2.....95
ตารางที่ 5.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.1.....96
ตารางที่ 5.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.2.....98
ตารางที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม 99
ตารางที่ ก.1 ค่าสิทธิของลำดับการผลิตตามจำนวนผลิตภัณฑ์ 108
ตารางที่ ก.2 ตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น 109
ตารางที่ ก.3 สตริงคำตอบเริ่มต้น 109

ตารางที่ ก.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น 110
ตารางที่ ก.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้น 110
ตารางที่ ก.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางวิธีการบรรจวบ 111
ตารางที่ ก. 7 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 111
ตารางที่ ก.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 112
ตารางที่ ก.9 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 112
ตารางที่ ก.10 ตารางวิธีการบรรจวบหลังการปรับปรุง 113
ตารางที่ ก.11 ตารางความน่าจะเป็นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 หลังการปรับปรุง 115
ตารางที่ ก.12 ตารางความน่าจะเป็นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 หลังการปรับปรุง 116
ตารางที่ ก. 13 ตารางความน่าจะเป็นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 หลังการปรับปรุง 117
ตารางที่ ก.14 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานก่อนหน้า 118
ตารางที่ ก.15 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในรอบการทำงานปัจจุบัน 118
ตารางที่ ก.16 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ารวมกับรอบปัจจุบัน 118
ตารางที่ ก.17 คำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใช้ในรอบต่อไป 118
ตารางที่ ข.1 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น 123
ตารางที่ ข.2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น 123
ตารางที่ ข.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น 124
ตารางที่ ข.4 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง 124
ตารางที่ ข.5 การสร้างวงล้อรูเล็ต 125
ตารางที่ ข.6 Binary Tournament Selection 127
ตารางที่ ข.7 การจับคู่สตริงคำตอบ 128
ตารางที่ ข.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการมิวเตชัน 130
ตารางที่ ข.9 สตริงคำตอบหลังการมิวเตชัน 130

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.10 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 131
ตารางที่ ข.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก 132
ตารางที่ ข. 12 ค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก 132
ตารางที่ ข.13 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป 133
ตารางที่ ค.1 ค่าสิทธิของลำดับการผลิตตามจำนวนผลิตภัณฑ์ 134
ตารางที่ ค.2 ค่าสิทธิในการเลือกงาน 6 สตริงคำตอบ 135
ตารางที่ ค.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้น..... 135
ตารางที่ ค.4 ค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดฝูงที่ 1 136
ตารางที่ ค.5 ค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดฝูงที่ 2 136
ตารางที่ ค.6 ค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในจำนวนประชากรทั้งหมด 137
ตารางที่ ค.7 ค่าสิทธิของรุ่นผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดในจำนวนประชากรทั้งหมด..... 137
ตารางที่ ค.8 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 1 138
ตารางที่ ค.9 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 2 138
ตารางที่ ค.10 ค่าสุ่ม $r1$ และ $r2$ 139
ตารางที่ ค.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1 139
ตารางที่ ค.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 140
ตารางที่ ค.13 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 1 140
ตารางที่ ค.14 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 2 140
ตารางที่ ค.15 Sigmoid ฝูงที่ 1 141
ตารางที่ ค. 16 Sigmoid ฝูงที่ 2 141
ตารางที่ ง.1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย..... 142
ตารางที่ ง.2 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.1.1 ขนาด 49 (25-24) ขั้นงาน 143
ตารางที่ ง.3 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.1.1 ขนาด 49 (25-24) ขั้นงาน..... 144

ตารางที่ ง.4 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.1.2 ขนาด 50 (25-25) ขั้นงาน 145
ตารางที่ ง. 5 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.1.2 ขนาด 50 (25-25) ขั้นงาน 146
ตารางที่ ง.6 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.2.1 ขนาด 104 (53-51) ขั้นงาน..... 147
ตารางที่ ง.7 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.2.1 ขนาด 104 (53-51) ขั้นงาน 150
ตารางที่ ง.8 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.2.2 ขนาด 106 (53-53) ขั้นงาน..... 152
ตารางที่ ง.9 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.2.2 ขนาด 106 (53-53) ขั้นงาน 155
ตารางที่ ง.10 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.3.1 ขนาด 146 (75 -71) ขั้นงาน 157
ตารางที่ ง.11 เวลาขั้นงานของปัญหาขนาด 75-71 ขั้นงาน 160
ตารางที่ ง.12 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.3.2 ขนาด 150 (75 -75) ขั้นงาน 163
ตารางที่ ง.13เวลาขั้นงานของปัญหา Set.3.2 ขนาด 150 (75 -75) ขั้นงาน 166
ตารางที่ ง.14 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set. 4.1 ขนาด 218 (111-107) ขั้นงาน..... 170
ตารางที่ ง.15 เวลาขั้นงานของปัญหา Set. 4.1 ขนาด 218 (111-107) ขั้นงาน 175
ตารางที่ ง. 16 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set. 4.2 ขนาด 222 (111-111) ขั้นงาน..... 179
ตารางที่ ง.17 เวลาขั้นงานของปัญหา Set. 4.2 ขนาด 222 (111-111) ขั้นงาน 185
ตารางที่ ง.18 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 1.1 191
ตารางที่ ง.19 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 1.2 192
ตารางที่ ง.20 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 2.1 193
ตารางที่ ง.21 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 2.2 195
ตารางที่ ง.22 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 3.1 197
ตารางที่ ง.23 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 3.2 199
ตารางที่ ง.24 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 4.1 202
ตารางที่ ง.25 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 4.2 205

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะสายการประกอบแบบขนาน....9
รูปที่ 2.2 ขั้นงานในสถานีงานร่วมบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16 สถานีที่ 1 และ 2....22
รูปที่ 2.3 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16....22
รูปที่ 2.4 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16....22
รูปที่ 2.5 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16....23
รูปที่ 2.6 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16....23
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการไหลของผลิตภัณฑ์ของสถานีงานที่ 1 ประเภทสถานีงานร่วม....23
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการไหลของผลิตภัณฑ์ของสถานีงานที่ 5 ประเภทสถานีงานแยก....24
รูปที่ 2.9 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต....33
รูปที่ 2.10 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว....36
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO....49
รูปที่ 3.2 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงอพยพออก....55
รูปที่ 3.3 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงไปทำการมิวเตชัน....61
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล....66
รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้การลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง....70
รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ....70
รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้....71

รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง 72

รูปที่ 3.9 วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวแปรตอบสนอง.....72

รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ COIN-E 75

รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-II.....78

รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการดำเนินงานของ DPSO.....81

รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.1 88

รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.2.....89

รูปที่ 5. 3การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.1 91

รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.2.....92

รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.1 93

รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.2.....95

รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.1 96

รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.2.....97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประผลิตภัณฑ์แบบขนาน รวมทั้งบอกถึงวัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และการสรุปเนื้อหางานวิจัยทั้ง 6 บทงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีค่าสูงสุด และรองรับการผลิตที่มีความต้องการผลิตภัณฑ์จำนวนมากและมีคุณภาพดี โดยมีการออกแบบสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Assembly Line) ที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันในตระกูลเดียวกันจะเข้าสู่สายการประกอบพร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่องบนสายการประกอบเส้นตรง (Straight Line) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการ (Hyun, Kim และ คณะ. (1998) ปัจจุบันได้มีการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้นจัดวางแบบขนานกันเป็นสายการประกอบแบบขนาน โดยแต่ละสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมเรียกว่า สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน (Mixed-Model Parallel Assembly Lines)

ปัญหาในการนำสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมาใช้ต้องทำการแก้ปัญหาด้วยการจัดสมดุลสายการประกอบ และการจัดลำดับการผลิตไปด้วยกัน เพื่อให้สายการประกอบเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ตามลักษณะที่เหมาะสมกับงานนั้น โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมได้ทำการจัดสมดุลมาแล้ว และศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพียงอย่างเดียว ซึ่งการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมต้องพิจารณาวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันทำให้มีความยุ่งยากและซับซ้อนอย่างมาก ปัญหาลักษณะนี้จัดเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) โดยการแก้ปัญหาจะใช้เวลายาวนานในการค้นหา ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะนำเอาวิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาประเภทนี้เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นและให้คำตอบที่ค่อนข้างดีเป็นที่ยอมรับได้และบ่อยครั้งที่วิธีฮิวริสติกได้ให้คำตอบที่ดีที่สุด

วิธีฮิวริสติกจะใช้เวลาการหาคำตอบที่ไม่มากและคำตอบที่ได้ก็เป็นคำตอบที่มีเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในปัญหาที่เกิดขึ้นจริง โดยฮิวริสติกที่นิยมใช้และเป็นวิธีที่มีการยอมรับว่าสามารถ

แก้ปัญหาได้ เช่น วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาในการจัดลำดับการผลิตที่มีความซับซ้อน โดย GA จะเป็นอัลกอริทึม ที่มีแนวคิดมาจากการตัดต่อทางพันธุกรรมของมนุษย์สามารถลดเวลาและให้คำตอบที่ดี ต่อมา Simon (2008)ได้นำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้แนวคิดการย้ายถิ่นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีความต้องการที่จะอยู่อาศัยในที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่ถ้าพื้นที่ที่อยู่นั้นมีความหนาแน่น สิ่งมีชีวิตจะเริ่มทำการย้ายที่อยู่อาศัยไปสู่ที่อื่นที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อยกว่า และพัฒนาที่อยู่ใหม่ให้มีความอุดมสมบูรณ์ ซึ่งนำแนวคิดนี้มาเปรียบเสมือนการค้นหาคำตอบ โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ได้มีการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากปัญหาในภาคปฏิบัติ ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมหลายตัว

ระบบการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้นจัดวางแบบขนานกัน เป็น สายการประกอบแบบขนาน (Parallel Assembly Lines: PALs) โดยแต่ละสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมเรียกว่า สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน (ณัฐชัย, 2014) ที่ผลิตสิ้นค้าหลายรุ่นสลับกันไปมาได้ ได้ทันทีโดยไม่ต้องปรับตั้งเครื่องจักรซึ่งสามารถใช้ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว ที่นิยมในปัจจุบัน ทั้งนี้ สายการประกอบแบบขนานสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบเพื่อใช้ในการพิจารณาปรับปรุงผลิตภาพ ได้แก่ รูปแบบ Passive และรูปแบบ Active ของ Gökçen, Ağpak และ คณะ (2006) โดยรูปแบบ Passive เป็นรูปแบบที่ทุกสายการประกอบในสายการประกอบแบบขนาน ผลิตสินค้าชนิดเดียวกันภายใต้รอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ที่เท่ากัน ขณะที่รูปแบบ Active นั้นเป็นรูปแบบที่แต่ละสายการประกอบทำหน้าที่ผลิตสินค้าต่างชนิดกัน ไม่ว่ารอบเวลาการผลิตจะเท่ากันหรือไม่ก็ตาม นั่นคือเป็นไปได้ที่จะพบเห็นพนักงานหลากทักษะทำหน้าที่ประกอบสินค้าต่างชนิดกันในรอบการผลิตหนึ่งๆ ภายในสายการประกอบแบบขนานรูปแบบนี้และเรียกสถานีงานที่ต้องอาศัยพนักงานหลากทักษะเพื่อรับผิดชอบงานจากทั้งสองสายการประกอบนี้ว่า “สถานีงานร่วม” (Common Workstation: ***cw***) ขณะที่สถานีงานที่เหลือจะถูกเรียกว่า “สถานีงานแยก” (Separate Workstation: ***sw***) (Kara, Gökçen และ คณะ 2009)

สายการประกอบแบบขนานเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สร้างประโยชน์ให้กับองค์กรและพนักงานเมื่อเปรียบเทียบกับสายการประกอบแบบเส้นตรงที่เป็นอิสระหลายๆ สาย อย่างไรก็ตาม สายการประกอบแบบขนานเมื่อพิจารณาด้านต้นทุนอาจก่อให้เกิดต้นทุนจากเครื่องมืออุปกรณ์ที่ต้องใช้เพิ่มเติมและการใช้พื้นที่ในการปรับปรุงเพิ่มขึ้น รวมทั้งเพิ่มความซับซ้อนในการดำเนินงาน การจัดการวัตถุดิบคงคลังและการจัดหาวัตถุดิบ (Gökçen, Ağpak และ คณะ 2006) (Lusa 2008)

(Baykasoglu, Ozbakur และ คณะ, 2009) ทำให้ สายการประกอบแบบขนานจึงถูกแนะนำให้ใช้ในกรณีที่ชิ้นงานและระบบขนย้ายวัสดุมีขนาดเล็ก (Scholl, 2008)

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการวิจัยครั้งนี้ถือเป็นครั้งแรกในการนำเอาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) มาประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานโดยจะมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของ BBO กับวิธีฮิวริสติกที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพดี ได้แก่ NSGA-II CION-E และ DPSO ในการหาความสามารถในการค้นหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน (Mixed-Model Parallel Assembly Lines Sequencing Problem: MPALSP)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการทำงานวิจัยผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิตบนสายประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน มีจำนวนทั้งสิ้น 3 วัตถุประสงค์ ดังนี้

    วัตถุประสงค์ที่หนึ่ง : เพื่อหาปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

    วัตถุประสงค์ที่สอง : เพื่อหาอัตราการผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด

    วัตถุประสงค์ที่สาม : เพื่อหาเวลาต่ำสุดในการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด

และในการทดลองใช้งานอัลกอริทึมได้มีสมมติฐานในการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบมีดังต่อไปนี้

- ลักษณะของสายการประกอบจะเป็นชนิดสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน
- สายการประกอบมีความสมดุลในการจัดลำดับการผลิต โดยการจัดลำดับการผลิตจะพิจารณาจากความต้องการผลิตภัณฑ์
- ผลิตภัณฑ์มีหลายรุ่นแต่มีคุณสมบัติที่มีความคล้ายคลึงหรืออยู่ในตระกูลเดียวกัน จึงสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้
- พิจารณาความต้องการผลิตภัณฑ์จาก Minimum Part Set (MPS)
- สถานีงานจะเป็นชนิดสถานีงานแบบปิด

- ทราบจำนวนสถานีงานในสายการผลิตจากผลการจัดสมดุลสายการประกอบมาแล้ว และทราบเวลาดำเนินงานของขั้นงานที่อยู่ในสถานีงาน
- พนักงานทำการผลิตประจำอยู่ที่สถานีงานทำให้ไม่เวลาเดินทางและ การหมุนกลับระหว่างสายการประกอบของพนักงานจะไม่นำเข้ามาพิจารณา
- ผลิตภัณฑ์รุ่นการประกอบบนสายการประกอบที่ 1 และ สายการประกอบที่ 2 เริ่มต้นเข้าสายการประกอบพร้อมกัน
- บริเวณแถวคอยในการผลิตมีพื้นที่ไม่จำกัด

2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างมีจำนวน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ BBO NSGA-II CION-E และ DPSO โดยได้รับการชี้วัดสมรรถนะด้วยตัวชี้วัด 5 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ ในแต่ละอัลกอริทึม

3. โปรแกรมที่ใช้งานในการใช้ทดลองอัลกอริทึมเพื่อแก้ปัญหาตัวอย่าง เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ภาษา C++

4. ปัญหาที่ใช้ในการทดลองเป็นปัญหาที่ได้รับการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานมาแล้ว(ณัฐชัย, 2014) ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดปัญหาการทดลองการจัดลำดับการผลิต

ปัญหา (Set)	ที่มา	จำนวนขั้นงาน		จำนวนรุ่นสินค้า [สัดส่วนการผลิตภัณฑ์ MPS)]		ความยาวสตริง	ลำดับก่อนหลังของขั้นงาน	เวลาขั้นงาน
		Line 1	Line 2	Line 1	Line 2			
1.1	Rosenberg และ Ziegler (1992)	25	24	2 [1:1]	2 [2:3]	7	ดังตารางที่ ง.2	ดังตารางที่ ง.3
1.2		25	25	3 [1:1:1]	3 [1:1:1]	8	ดังตารางที่ ง.4	ดังตารางที่ ง.5
2.1	Hahn (1972)	53	51	2 (1:2)	2 (1:2)	6	ดังตารางที่ ง.6	ดังตารางที่ ง.7
2.2		53	53	4 [1:1:1:1]	4 [1:2:2:3]	12	ดังตารางที่ ง.8	ดังตารางที่ ง.9
3.1	Wee และ	75	71	4 [1:2:2:3]	4 [1:1:2:4]	16	ดังตารางที่ ง.10	ดังตารางที่ ง.11

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) รายละเอียดปัญหาการทดลองการจัดลำดับการผลิต

ปัญหา (Set)	ที่มา	จำนวนขั้นงาน		จำนวนรุ่นสินค้า [สัดส่วนการผลิตภัณฑ์ MPS)]		ความยาวสตริง	ลำดับก่อนหลังของขั้นงาน	เวลาขั้นงาน
		Line 1	Line 2	Line 1	Line 2			
3.2	Magazine (1981)	75	75	2 [1:1:2:4]	2 [1:3:3:5]	20	ดังตารางที่ ง.12	ดังตารางที่ ง.13
4.1	Arcus (1965)	111	107	3 [1:1:1]	3 [1:1:3]	8	ดังตารางที่ ง.14	ดังตารางที่ ง.15
4.2		111	111	5 [1:1:1:3:3]	5 [1:2:3:3:6]	24	ดังตารางที่ ง.16	ดังตารางที่ ง.17

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. คิดค้นวิธีการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน และวิธีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม BBO NSGA-II DPSO และ COIN-E ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตดังกล่าว
3. เขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์อัลกอริทึม BBO NSGA-II DPSO และ COIN-E ด้วยภาษา C++
4. ทดลองใช้โปรแกรมอัลกอริทึม BBO NSGA-II DPSO และ COIN-E ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง
5. ประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม BBO NSGA-II DPSO และ COIN-E ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง
6. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานมีประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ดังนี้

1.ทำให้การแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานลดระยะเวลาและความยุ่งยากที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์

2. สามารถนำขั้นตอนการตัดสินใจในการจัดลำดับและวิธีการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานสายการประกอบในอุตสาหกรรมจริง

1.6 สรุปเนื้อหางานวิจัย

งานวิจัยนี้มีเนื้อหาที่ประกอบไปด้วยการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับการผลิตสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การนำอัลกอริทึมต่าง ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้กับปัญหาในงานวิจัย การออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม การกำหนดพารามิเตอร์ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอลิทึม ข้อเสนอะแนะ การสรุปผลงานวิจัย ที่กล่าวมานั้นได้แบ่งออกเป็นในงานวิจัย ดังนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ที่ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิต โดยการกำหนดวัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิต คำนวณการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม และ เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อรูเล็ต

บทที่ 3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) บทนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ในการแก้ปัญหาการจัดการจัดลำดับผลิตภัณฑ์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน และการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหา

บทที่ 4 อัลลกอริทึมที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมต่างๆ ที่นำมาทดลองแก้ปัญหาแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะร่วมกับอัลกอริทึม BBO โดยอัลกอริทึมอื่นๆ ที่นำมาใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Expand: COIN-E)

บทที่ 5 ผลการทดลองและการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ในบทนี้ได้แสดงผลการทดลองจากการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ทั้ง 8 ปัญหาการทดลอง มาทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของ

อัลกอริทึมต่าง ได้แก่ BBO NSGA-II DPSO และ COIN-E มีสมรรถนะในการหาคำตอบสูงหรือต่ำแตกต่างกันอย่างไร โดยตัวชี้วัดที่นำมาใช้เปรียบเทียบมีจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัว (Spread) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solutions : RNDS I) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solutions : RNDS II) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Time)

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง

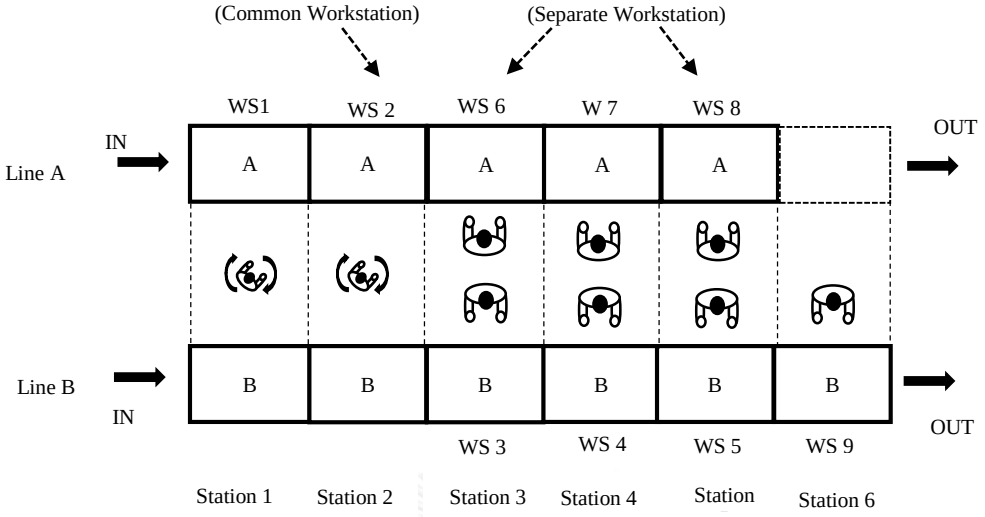
งานวิจัยฉบับนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิต ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยว ที่มีเนื้อหาตามหัวข้อดังนี้

1. ปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน
2. วัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิต
3. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์
4. การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ
5. การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม
6. เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อรูเล็ต
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

การจัดลำดับการผลิตให้กับบนสายการประกอบแบบขนานจะทำการพิจารณาพร้อมไปกันทั้ง 2 สาย โดยผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบที่หนึ่งและสองจะถูกส่งเข้าไปยังสายการประกอบพร้อมกันด้วยการลำเลียงไปตามสายพานผ่านสถานีต่างๆ ขั้นตอนในการพิจารณามีดังนี้

1. กำหนดให้ l เป็นจำนวนสายการประกอบ {l=1, l=2}
2. กำหนดให้รอบเวลาการผลิต (Cycle Time : CT)
3. กำหนดสัดส่วนในหนึ่งรอบการผลิต (Minimum Part set : MPS_1) โดย M เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ในตัวอย่างได้กำหนดให้ สายการการประกอบที่ 1 ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ A (line A) ที่ทำการผลิต 3 รุ่นคือ A1, A2 และ A3 มี MPS_1 (1:1:1) และสายการประกอบที่ 2 ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ B (line B) ที่ทำการผลิต 3 รุ่น คือ B1, B2 และ B3 มี MPS_2 (1:1:3)
4. กำหนดลักษณะสายการประกอบแบบขนานที่ผ่านการจัดสมดุลสายการประกอบมาแล้ว
5. กำหนดลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน ดังตารางที่ 2.2 เวลาดำเนินงานของขั้นงาน ดังตารางที่ 2.3 เวลาการปรับตั้งของผลิตภัณฑ์ที่การผลิตบนขั้นงาน ดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะสายการประกอบแบบขนาน

จากรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลมาแล้ว มีจำนวนสถานีงาน (Workstation: WS) ทั้งหมด 9 สถานีงาน และมีสถานี (Station) ทั้งหมด 6 สถานี สามารถจำแนกประเภทสายการประกอบออกเป็น 2 ประเภทคือ สถานีงานร่วม (Common Workstation: CW) มีจำนวนทั้งหมด 2 สถานีงาน และ สถานีงานแยก (Separate Workstation: SW) มีจำนวนทั้งหมด 7 สถานีงาน มีข้อมูลสถานีงานตามประเภทและขั้นงานบนสายการประกอบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนสถานีงานตามประเภทและขั้นงานที่ทำการผลิตในแต่ละสถานีงาน

สถานีงานที่	**ประเภท**	**ขั้นงาน** (เรียงตามลำดับในการทำงาน)
1	ร่วม	12, 13, 4
2	ร่วม	7, 10, 15
3	แยก (Line B)	18
4	แยก (Line B)	14
5	แยก (Line B)	16, 17
6	แยก (Line A)	1, 3, 2
7	แยก (Line A)	5, 8
8	แยก (Line A)	6, 9, 11
9	แยก (Line B)	19, 20

ตารางที่ 2.2 ลำดับก่อนหลังของขั้นงานบนสายการประกอบ A และ B

สายการประกอบที่ A		สายการประกอบที่ B	
ขั้นงานก่อนหน้า	**ขั้นงานตามหลัง**	**ขั้นงานก่อนหน้า**	**ขั้นงานตามหลัง**
1	2	1	2
1	3	1	3
2	5	2	4
3	6	3	6
4	7	4	5
5	6	4	7
5	8	5	8
6	7	6	9
7	10	7	9
8	11	8	9
9	11	-	-
10	11	-	-

ตารางที่ 2.3 เวลาการดำเนิดงานของแต่ขั้นงานของผลิตภัณฑ์ A และ B

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A		
	A1	A2	A3
1	4	2	4
2	0	1	3
3	9	3	9
4	6	4	5
5	10	4	9
6	7	7	5
7	9	5	8
8	7	3	7
9	5	2	5
10	0	2	1
11	3	6	3

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ B		
	B1	B3	B3
12	4	4	4
13	0	6	3
14	9	9	9
15	6	4	5
16	10	8	9
17	7	0	5
18	9	7	8
19	7	7	7
20	5	5	5

ตารางที่ 2.4 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A		
	A1	A2	A3
1	0.178	0.327	0.207
2	0.087	0.119	0.129
3	0.666	0.406	0.547
4	0.266	0.471	0.344
5	0.404	0.648	0.625
6	0.525	0.320	0.440
7	0.724	0.379	0.711
8	0.416	0.529	0.477
9	0.232	0.238	0.299
10	0.090	0.079	0.098
11	0.304	0.296	0.274

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ B		
	B1	B3	B3
12	0.286	0.225	0.290
13	0.165	0.282	0.183
14	0.611	0.615	0.712
15	0.363	0.268	0.363
16	0.691	0.766	0.653
17	0.352	0.312	0.348
18	0.524	0.724	0.731
19	0.350	0.425	0.389
20	0.368	0.456	0.460

2.2 วัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิต

การค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กัน เป็นเรื่องยาก หรือเป็นไปไม่ได้เลยที่จะมีคำตอบที่ดีที่สุดเพียงคำตอบเดียว โดยคำตอบที่ได้จะเป็นในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การจัดลำดับการผลิตบนสายประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ได้ทำการพิจารณา 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พร้อมกัน นั้นคือ

วัตถุประสงค์ที่หนึ่ง ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด สมการที่ 2.1

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_{ml}}{I} \right]^2 \qquad (2.1)$$

วัตถุประสงค์ที่สอง ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด (Utility Work) สมการที่ 2.2

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{i=1}^{D_T} U_{i,j} + Z_{(j+1)} / v_c \right] \qquad (2.2)$$

โดยที่

กรณีสถานีงานร่วม

$$U_{i,j} = \max\left[0, \left(\sum_{k=1}^{K} Z_{j.k} + v_c \sum_{i=1}^{I} X_{i,m} t_{i,m} - L\right) / v_c\right]$$

$$Z_{j+1,k} = \max\left[0, \min\left(\sum_{k=1}^{K} Z_{j,k} + v_c \sum_{i=1}^{I} X_{i,m} t_{i,m} - L\right)\right]$$

กรณีสถานีงานแยก

$$U_{i,j} = \max\left[0, \left(\sum_{k=1}^{K} Z_{j.k} + v_c \sum_{i=1}^{I} X_{i,m} t_{i,m} - L\right) / v_c\right]$$

$$Z_{j+1,k} = 0$$

วัตถุประสงค์ที่สาม เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด ดังสมการที่ 2.3

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M} s_i t_m \qquad (2.3)$$

กำหนดให้

$D_{T(l)}$ คือ ความต้องการในการผลิตทุกผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ l โดยที่ $l = 1,...,L$ และ ใช้แทนในลำดับการผลิต โดยที่ $D_{T(l)} = \sum_{m_l=1}^{M} d_{m_l}$

d_{ml} คือ ความต้องการผลิตภัณฑ์ m บนสายการประกอบ l ที่ขนานกัน

U_{ij} คือ เวลางานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ที่ i ที่ทำบน j โดยที่ $j = \{1,...,J\}$

$Z_{(ij)}$ คือ เวลาเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ i บนสายการการประกอบ j

X_{im} คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในลำดับที่ i โดยที่ $X_{im} = 1$ เมื่อผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ที่ m และ $X_{im} = 0$ เมื่อผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ไม่ตรงกับผลิตภัณฑ์ที่ m

$\sum_{m=1}^{M} X_{im} = 1$; $\forall i$ คือ ที่ลำดับที่ i ของลำดับผลิตภัณฑ์ ที่กำหนดให้ ซึ่งมีเพียงผลิตภัณฑ์เดียวเท่านั้นที่จะดำเนินการผลิต

$\sum_{i=1}^{I} X_{im} = d_m$; $\forall i$ คือ ความต้องการผลิตภัณฑ์ชนิด m ในหนึ่งรอบการผลิต

$t_{i,m}$ คือ เวลาดำเนินงานในสถานี j ของผลิตภัณฑ์ m

J คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

v_c คือ อัตราการการปล่อยผลิตภัณฑ์ที่ลำเลียงโดยสายพานที่มีความเร็วคงที่ในที่นี้กำหนดให้ $v_c = 1$

L คือ ความยาวของสถานีงาน โดยที่ L คือ รอบเวลาการผลิตหรือ CT

2.2.1 ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด

การป้อนงานเข้าสายการผลิตแบบผลิตภัณฑ์ผสมเป็นการป้อนงานอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องกัน ถ้ามีการป้อนผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันมากจะทำให้เกิดความแปรผันในการผลิตมาก ในการจัดลำดับการผลิตจึงมีความต้องการให้ความแปรผันในการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

ตัวอย่างการคำนวณความแปรผันในการผลิต กำหนดให้ลำดับการผลิต คือ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3

ตารางที่ 2.5 ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นงาน

ขั้นงาน	**ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์**				
1	B3	B3	B2	B1	B3
2	B3	B3	B2	B3	
3	A2	A3	A1		
4	A2	A3	A1		
5	A2	A3			
6	B3	B3	B2	B1	B3
7	B3	B3	B2	B1	B3
8	B3	B3	B2	B1	B3
9	B3	B3	B2	B1	B3
10	B3	B3	B1	B3	
11	A2	A3	A1		
12	A2	A3	A1		
13	A2	A3			
14	A2	A3	A1		

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นงาน

ขั้นงาน	ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์				
15	A2	A3	A1		
16	A2	A3	A1		
17	A2	A3	A1		
18	A2	A3	A1		
19	B3	B3	B2	B1	B3
20	B3	B3	B2	B1	B3

จากตารางที่ 2.5 ตารางลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นงานบอกจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต เช่น ขั้นงานที่ 1 มีการผลิตผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 5 ขั้นงานที่ 2 ผลิตบนสายการประกอบ B มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 4 ทั้งที่จากจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เท่ากับ 5 เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ B1 ไม่ได้ทำการผลิตในขั้นงานนี้ ขั้นงานที่ 3 ผลิตบนสายการประกอบ A มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 3 ขั้นงานที่ 5 ผลิตบนสายการประกอบ A มีผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 2ทั้งที่จากจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เท่ากับ 3 เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ A1 ไม่ได้ทำการผลิตในขั้นงานนี้และ ในขั้นงานที่ 10 ผลิตบนสายการประกอบ B ผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 4 ทั้งที่จากจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เท่ากับ 5 เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ B2 ไม่ได้ทำการผลิตในขั้นงานนี้

เมื่อทราบลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นงานแล้วนำมาคำนวณหาค่าความผันแปรของการผลิตของขั้นงานที่ 1 จนถึงขั้นงานสุดท้าย ทำการคำนวณค่าได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความผันแปร

จากสมการ $\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im}-i\frac{d_m}{I}\right]^2$

ขั้นงานที่ 1 ขั้นงานบนสายการประกอบ A มี ผลิตรุ่น A1, A2 และ A3 ซึ่งมี $d_1=1$, $d_2=1$ $d_3=1$ และ I คือ $\sum_{m=1}^{M} d_{ml}=1+1+3=5$

ขั้นงานที่ 1

ตารางที่ 2.6 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B2 B1 B3

ลำดับที่ (i)	x_{im}						$i \times (\frac{d_m}{I})$						PS	$\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.2	0.2	0.6	3	0.24
2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0.4	0.4	1.2	3	0.96
3	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0.6	0.6	1.8	2	0.56
4	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0.8	0.8	2.4	1	0.24
5	0	0	0	1	1	3	0	0	0	1	1	3	3	0.00
ความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 1 $\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$														2.00

จากตารางลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละขั้นงาน ทำให้ทราบว่าความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 1, 6, 7, 8, 9, 19, และ 20 เท่ากัน

ขั้นงานที่ 2

ตารางที่ 2.7 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B2 B3

ลำดับที่ (i)	x_{im}						$i \times (\frac{d_m}{I})$						PS	$\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.25	0.25	0.75	3	0.188
2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0.5	0.5	1.5	3	0.750
3	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0.75	0.75	2.25	2	0.688
4	0	0	0	0	1	3	0	0	0	1	1	3	3	0
ความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 2 $\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[X_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$														2.625

ขั้นงานที่ 3 ขั้นงานบนสายการประกอบ A มี ผลิตรุ่น A1, A2 และ A3 ซึ่งมี $d_1 = 1$, $d_2 = 1$ $d_3 = 1$ และ I คือ $\sum_{m=1}^{M} d_m = 1 + 1 + 1 = 3$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นงานที่ 3

ตารางที่ 2.8 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ A คือ A2 A3 A1

ลำดับที่ (i)	x_{im}						$i \times (\frac{d_m}{I})$						PS	$\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
1	0	1	0	0	0	0	0.33	0.33	0.33	0	0	0	2	0.66
2	0	1	1	0	0	0	0.66	0.66	0.66	0	0	0	3	0.66
3	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0.00
ความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 3 $\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[X_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$														1.33

จากตารางลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในขั้นงานที่ 3 ทำให้ทราบว่าความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 3, 4, 11, 12, 14, 15, 16, 17, และ 18 เท่ากัน

ขั้นงานที่ 5

ตารางที่ 2.9 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ A คือ A2 A3

ลำดับที่ (i)	x_{im}						$i \times (\frac{d_m}{I})$						PS	$\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
1	0	1	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	2	0.5
2	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	0.0
ความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 5 $\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[X_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$														0.5

จากตารางลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในขั้นงานที่ 5 ทำให้ทราบว่าความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 5 และ 13 เท่ากัน

ขั้นงานที่ 10

ตารางที่ 2.10 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B1 B3

ลำดับที่ (i)	x_{im}						$i \times (\frac{d_m}{I})$						PS	$\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.25	0.25	0.75	3	0.188
2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0.5	0.5	1.5	3	0.750
3	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0.75	0.75	2.25	1	0.688

ตารางที่ 2.10 (ต่อ) ลำดับการผลิตบนสายการประกอบ B คือ B3 B3 B1 B3

ลำดับที่ (i)	x_{im}						$i \times (\frac{d_m}{I})$						PS	$\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1	A2	A3	B1	B2	B3		
4	0	0	0	1	0	3	0	0	0	1	1	3	3	2.000
ความแปรผันของการผลิตของขั้นงานที่ 10 $\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[X_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$														3.626

จากตารางลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในขั้นงานที่ 10 มีค่าความแปรผันของการผลิตเท่ากับ 3.626 ที่มีลำดับการผลิตแบบ B3 B3 B1 B3 เพียงขั้นงานเดียว

จากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละขั้นงานมารวมกันได้ ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 สรุปผลการคำนวณค่าความแปนผันของการผลิต B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3

ขั้นงาน	ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์					$\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im} - i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$
1	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
2	B3	B3	B2	B3		2.625
3	A2	A3	A1			1.333
4	A2	A3	A1			1.333
5	A2	A3				0.500
6	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
7	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
8	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
9	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
10	B3	B3	B1	B3		3.625
11	A2	A3	A1			1.333
12	A2	A3	A1			1.333
13	A2	A3				0.500
14	A2	A3	A1			1.333
15	A2	A3	A1			1.333
16	A2	A3	A1			1.333
17	A2	A3	A1			1.333

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.11 (ต่อ) สรปผลการคำนวณค่าความแปนผันของการผลิต B3 A2 A3 B3 B2

ขั้นงาน	ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์					$\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{M}\left[x_{im}-i\frac{d_m}{I}\right]^2\right)$
18	A2	A3	A1			1.333
19	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
20	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
20	B3	B3	B2	B1	B3	2.000
ความแปรผันของการผลิตของ B3A2A3B3B2A1B1B3						33.250

ในหนึ่งรอบการผลิตที่มีลำดับการผลิตแบบ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3 มีค่าความแปรผันของการผลิตของการผลิตเท่ากับ 33.25

2.2.2 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด

การจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบแบบขนานเป็นการป้อนผลิตภัณฑ์ลงแต่ละสถานีงานด้วยการลำเลียงแบบสายพานลงบนสายการประกอบทั้ง 2 สายการประกอบพร้อมกัน ดังรูปที่ 1 ทำให้การคำนวณหาค่าปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่เกิดจากปริมาณงานที่พนักไม่สามารถทำเสร็จภายในรอบเวลาการผลิต (Utility Work) การคำนวณได้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ในกรณีสถานีงานเป็นแบบสถานีงานร่วม และในกรณีที่เป็นสถานีงานแยก โดยการคำนวณหาค่า Utility Work ของ CW สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2.2

ในกรณี SW สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3 และ 4 โดยในเทอมของ $Z_{j+1,k}=0$ เนื่องเวลาเริ่มต้นของสายการประกอบบนและล่างป้อนเข้าพร้อมกัน เวลาเริ่มงาน เท่ากับ 0 ทำให้ค่า Utility Work ของ SW สามารถคำนวณได้

การหาค่าปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุดบนสายการประกอบแบบขนานในการคำนวณหาเวลาดำเนินของผลิตภัณฑ์ m_l โดยที่ $l=\{A,B\}$ ที่ผลิตบนสายการประกอบ A และ B ที่ทำในแต่ละขั้นงานบนสถานีงาน j และ $t_{jm_l}=\sum_{k\in s_j}p_{km}$ เป็นเวลาดำเนินงานที่ผลิตภัณฑ์ m_l ใช้ไปบนสถานีงาน j เมื่อ p_{km} คือเวลาดำเนินงานผลิตภัณฑ์ m_l ใช้ไปในขั้นงานที่ k และ s_j คือ ขั้นงานที่อยู่ในสถานีงาน j

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด

<u>สถานีงานที่ 1</u> เป็นสถานีงานร่วมที่ทำการผลิตทั้งสายการประกอบ A และ B ขั้นงานในสถานีงานคือ 12, 13 และ 4 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{11_B}= 4.345 + 0 = 4.345 ; s_j= s_1{12, 13, 4}

t_{12_B}= 4.325 + 6.578 = 10.903

t_{13_B}= 4.726 + 3.463 = 8.190

t_{11_A}= 6.539= 6.539

t_{12_A}= 4.255= 4.255

t_{13_A}= 5.320= 5.320

<u>สถานีงานที่ 2</u> เป็นสถานีงานร่วมที่ทำการผลิตทั้งสายการประกอบ A และ B ขั้นงานในสถานีงานคือ 7, 10 และ 15 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{21_A}= 9.787 + 0 = 9.787 ; s_j= s_2{7, 10, 15}

t_{22_A}= 5.258 + 2.196 = 7.455

t_{23_A}= 8.855 + 1.083 = 9.939

t_{21_B}= 6.416

t_{22_B}= 4.377

t_{23_B}= 5.773

สถานีงานที่ 3 เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ B ขั้นงานในสถานีงานคือ 18 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{31_B}= 9.811 ; s_j= s_3{18}

t_{32_B}= 7.372

t_{33_B}= 9.309

<u>สถานีงานที่ 4</u> เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ B ขั้นงานในสถานีงานคือ 18 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{41_B}= 9.555 ; s_j= s_4{14}

t_{42_B}= 9.589

t_{43_B}= 10.682

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>สถานีงานที่ 5</u> เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ B ขั้นงานในสถานีงานคือ 16 และ 17 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{51_B}= 10.673 + 7.604 = 18.277 ; s_j= s_5{16, 17}

t_{52_B}= 8.740 + 0 = 8.740

t_{53_B}= 10.605 + 5.784 = 16.389

<u>สถานีงานที่ 6</u> เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ A ขั้นงานในสถานีงานคือ 1, 3 และ 2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{61_A}= 4.320 + 9.762 + 0 = 14.082 ; s_j= s_6{1, 3, 2}

t_{62_A}= 2.171 + 3.235 + 1.083 = 6.490

t_{63_A}= 4.546 + 9.287+ 3.235 = 17.068

<u>สถานีงานที่ 7</u> เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ A ขั้นงานในสถานีงานคือ 5 และ 8 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{71_A}= 10.865 + 7.399 = 18.264 ; s_j= s_7{1, 8}

t_{72_A}= 4.382 + 3.277 = 7.660

t_{73_A}= 9.748 + 7.867 = 17.615

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>สถานีงานที่ 8</u> เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ A ขั้นงานในสถานีงานคือ 6, 9 และ 11 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{81_A}= 7.432+ 5.386+ 3.183 = 16.002 ; s_j= s_8{6, 9, 11}

t_{82_A}= 7.473+ 2.114 + 6.583 = 16.170

t_{83_A}= 5.501 + 5.245 + 3.338 = 14.085

<u>สถานีงานที่ 9</u> เป็นสถานีงานแยกที่ทำการผลิตสายการประกอบ B ขั้นงานในสถานีงานคือ 19 และ 20 สามารถคำนวณได้ดังนี้

t_{jm_l} = t_{71_A}= 7.598 + 5.284 = 12.881 ; s_j= s_9{19, 20}

t_{72_A}= 7.373 + 5.259 = 12.632

t_{73_A}= 8.121 + 5.811 = 13.933

ตารางที่ 2.12 แสดงเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ m_l ที่ทำบนสถานีงาน j

สถานีงานที่	ประเภท	ขั้นงาน	ผลิตภัณฑ์ A			ผลิตภัณฑ์ B		
			A1	A2	A3	B1	B2	B3
1	ร่วม AB	12, 13, 4	6.539	4.255	5.320	4.345	10.903	8.190
2	ร่วมAB	7, 10, 15	9.787	7.455	9.939	6.416	4.377	5.773
3	แยก (Line B)	18	-	-	-	9.811	7.372	9.309
4	แยก (Line B)	14	-	-	-	9.555	9.589	10.682
5	แยก (Line B)	16, 17	-	-	-	18.277	8.740	16.389
6	แยก (Line A)	1, 3, 2	14.082	6.490	17.068	-	-	-
7	แยก (Line A)	5, 8	18.264	7.660	17.615	-	-	-
8	แยก (Line A)	6, 9, 11	16.002	16.170	14.085	-	-	-
9	แยก (Line B)	19, 20	-	-	-	12.881	12.632	13.933

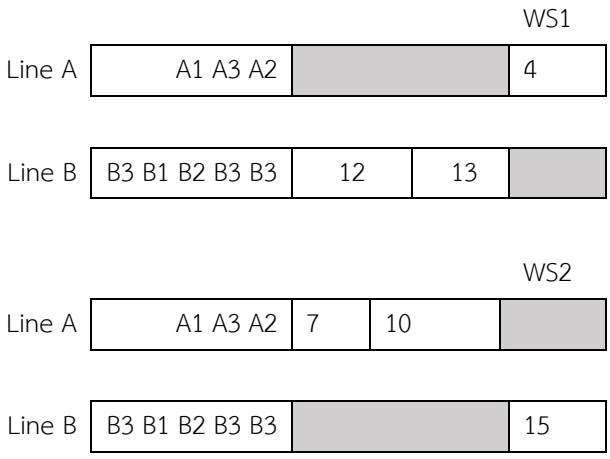
ตารางที่ 2.13 ลำดับการผลิตที่จากการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน

Task	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
WS	6	6	6	1	7	8	2	7	8	2	8	1	1	3	2	5	5	3	9	9
Sequence	12	13	4	7	10	15	18	14	16	17	1	3	2	5	8	6	9	11	19	20

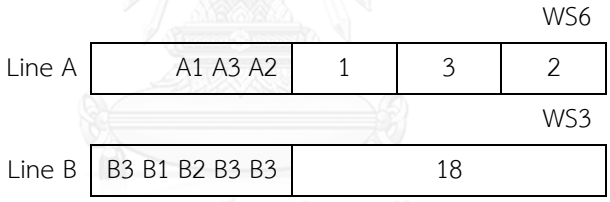
ตารางที่ 2.14 เวลาดำเนินงานตามลำดับการผลิตบนแต่ละสถานีงานและความยาวสถานีงาน

สถานีงานที่	ลำดับการผลิต								ความยาวสถานีงาน
	B3	A2	A3	B3	B2	A1	B1	B3	
1	8.190	4.255	5.320	7	10.903	6.539	4.345	8.190	**16**
2	5.773	7.455	9.939	5	4.377	9.787	6.416	5.773	**16**
3	9.309	-	-	8	7.372	-	9.811	9.309	**16**
4	10.682	-	-	9	9.589	-	9.555	10.682	**16**
5	16.389	-	-	14	8.740	-	18.277	16.389	**16**
6	-	6.490	17.068		-	14.082	-	-	**16**
7	-	7.660	17.615		-	18.264	-	-	**16**
8	-	16.170	14.085		-	16.002	-	-	**16**
9	13.933	-	-	12	12.632	-	12.881	13.933	**16**

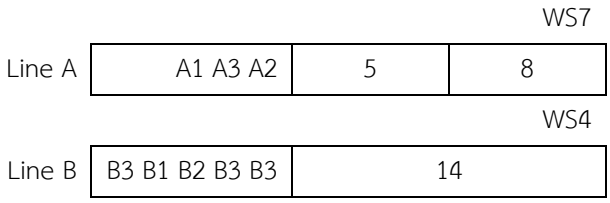
จากตารางที่ 2.14 ทำให้ทราบเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตบนสายการประกอบแต่ละสายการประกอบโดยผ่านสถานีงานต่างๆ จะเห็นว่า ลำดับการการผลิตที่เป็น B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3 เมื่อผ่านสถานีงานที่ 1 ซึ่งเป็นสถานีงานร่วม B3 และ A2 จะเข้าทำการผลิตบนสายการประกอบพร้อมกัน ดังรูปที่ 2.2



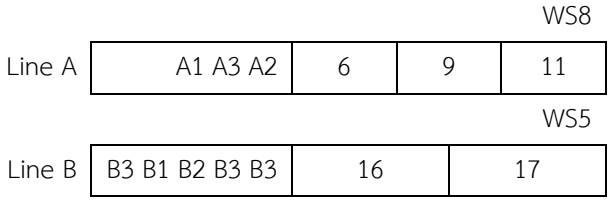
รูปที่ 2.2 ขั้นงานในสถานีงานร่วมบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16 สถานีที่ 1 และ 2



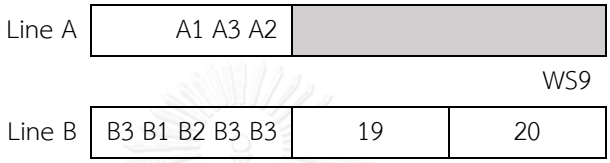
รูปที่ 2.3 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16 สถานีที่ 3



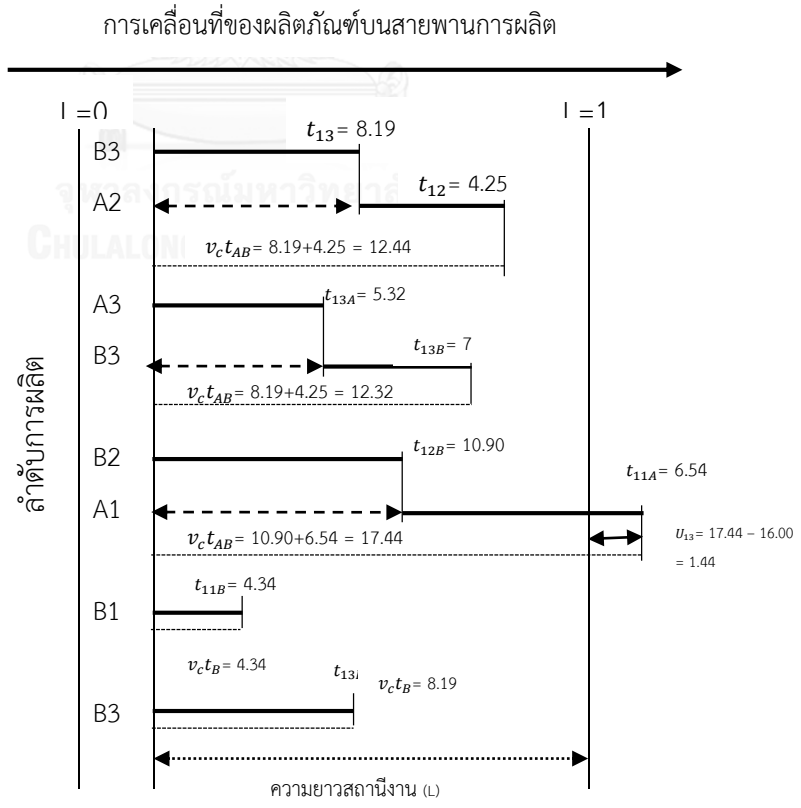
รูปที่ 2.4 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16 สถานีที่ 4



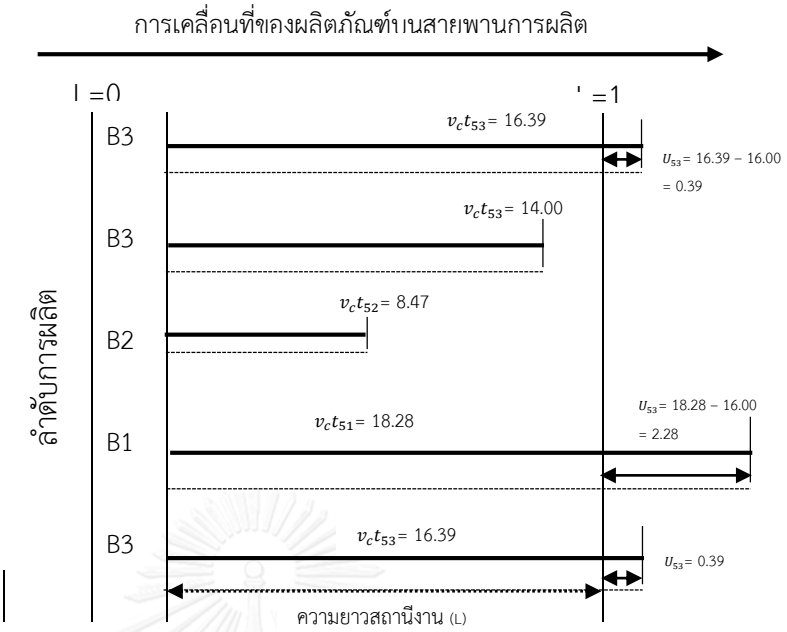
รูปที่ 2.5 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16 สถานีที่ 5



รูปที่ 2.6 ขั้นงานในสถานีงานแยกบนสายการประกอบแบบขนานในรอบการเวลาที่ผลิตเท่ากับ 16 สถานีที่ 6



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการไหลของผลิตภัณฑ์ของสถานีงานที่ 1 ประเภทสถานีงานร่วม



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการไหลของผลิตภัณฑ์ของสถานีงานที่ 5 ประเภทสถานีงานแยก

ตารางที่ 2.15 ผลการคำนวณเวลาที่ดำเนินงานที่ทำการผลิตบนสถานีงาน

สถานีงานที่	ประเภท	B3A2	A3B3	B2A1	B3	A2	A3	B3	B2	A1	B1	B3
1	ร่วม AB	12.44	12.32	17.44	-	-	-	-	-	-	4.35	8.19
2	ร่วมAB	13.23	14.94	14.16	-	-	-	-	-	-	6.42	5.77
3	แยก (Line B)	-	-	-	9.31	-	-	8	7.37	-	9.81	9.31
4	แยก (Line B)	-	-	-	10.68	-	-	9	9.589	-	9.555	10.68
5	แยก (Line B)	-	-	-	16.38	-	-	14	8.740	-	18.27	16.38
6	แยก (Line A)	-	-	-	-	6.490	17.06		-	14.08	-	-
7	แยก (Line A)	-	-	-	-	7.660	17.61		-	18.26	-	-
8	แยก (Line A)	-	-	-	-	16.17	14.08		-	16.00	-	-
9	แยก (Line B)	-	-	-	13.93	-	-	12	12.63	-	12.88	13.93

เมื่อได้เวลาในการดำเนินงานของการจัดลำดับการผลิต B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3 ของแต่ละสถานีงานมาแล้ว จากการจัดสมดุลสายการประกอบนี้ได้กำหนดให้รอบเวลาการผลิตทั้งหมดของแต่ละผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 16 ซึ่งเป็นความยาวของสถานีงาน จากนั้นทำการคำนวณหาค่าวัตถุประสงค์ โดยในที่นี้ได้ยกตัวอย่างการคำนวณค่า Utility Work ของสถานีงานร่วมได้แก่ สถานีงานที่ 1 บนสายการประกอบ AB และสถานีงานแยกได้แก่ สถานีงานที่ 5 บนสายการประกอบ B และสถานีงานที่ 7 บนสายการประกอบ A ตามลำดับ

จากสูตร $f_2(x) = \sum_{j=1}^{J}[\sum_{i=1}^{I} U_{i,j} + Z_{(i+1)}/v_c]$

คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานทั้ง 9 สถานี ได้ดังนี้

สถานีงานที่ 1

สถานีงานที่ 1 เป็นประเภทสถานีงานร่วม ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ AB มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 12, 13 และ 4 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 1

	i	$Z_{(i+1),j}$ = max[0, min ($Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L$), L]	U_{ij}= max[0, ($Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L$)/$v_c$
สถานีงานที่ 1	1	Z_{21}= max[0, min(0+(1)(8.19 + 4.25) – 16, 16] = 0	U_{11}= max[0,0+(12.44-16)] = 0
	2	Z_{31}= max[0, min(0+(1)(5.32 + 7) – 16, 16] = 0	U_{12}= max[0,0+(12.32-16)] = 0
	3	Z_{41}= max[0, min(0+(1)(10.90 + 6.54) – 16, 16] = 1.44	U_{13}= max[0,0+(17.44-16)] = 1.44
	4	Z_{51}= max[0, min(0+(1)(4.24-16), 16] = 0	U_{14}= max[0,0+(4.24-16)] = 0
	5	Z_{61}= max[0, min(0+(1)(8.16-16), 16] = 0	U_{15}= max[0,0+(4.24-16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{5} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 1.44		

สถานีงานที่ 2

สถานีงานที่ 2 เป็นประเภทสถานีงานร่วม ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ AB มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 7, 10 และ 15 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ *2*

	i	$Z_{(i+1),j}$ = max[0, min ($Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L$), L]	U_{ij}= max[0, ($Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L$)/$v_c$
สถานีงานที่ 2	1	Z_{22}= max[0, min(0+(1)(5.77 + 7.45) – 16, 16] = 0	U_{11}= max[0,0+(13.23-16)] = 0
	2	Z_{32}= max[0, min(0+(1)(9.94 + 5) – 16, 16] = 0	U_{12}= max[0,0+(14.94-16)] = 0
	3	Z_{42}= max[0, min(0+(1)(4.38 + 9.79) – 16, 16] = 0	U_{13}= max[0,0+(14.64-16)] = 0
	4	Z_{52}= max[0, min(0+(1)(6.46-16), 16] = 0	U_{14}= max[0,0+(6.46-16)] = 0
	5	Z_{62}= max[0, min(0+(1)(5.73-16), 16] = 0	U_{15}= max[0,0+(5.73-16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{5} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 0.00		

สถานีงานที่ 3

สถานีงานที่ 3 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ B มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 18 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 3

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 3	1	U_{13}= max[0,0+(9.31-16)] = 0
	2	U_{23}= max[0,0+(8-16)] = 0
	3	U_{33}= max[0,0+(7.37-16)] = 0
	4	U_{43}= max[0,0+(9.81-16)] = 0
	5	U_{53}= max[0,0+(9.31-16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{5} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 0.00	

สถานีงานที่ 4

สถานีงานที่ 4 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ B มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 14 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 4

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 4	1	U_{14}= max[0,0+(10.68 -16)] = 0
	2	U_{24}= max[0,0+(9 -16)] = 0
	3	U_{34}= max[0,0+(9.59 -16)] = 0
	4	U_{44}= max[0,0+(9.55 -16)] = 0
	5	U_{54}= max[0,0+(10.68 -16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{5} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 0.00	

สถานีงานที่ 5

สถานีงานที่ 5 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ B มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 16 และ 7 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 5

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 5	1	U_{15}= max[0,0+(16.39-16)] = 0.39
	2	U_{25}= max[0,0+(14.00-16)] = 0
	3	U_{35}= max[0,0+(8.47-16)] = 0
	4	U_{45}= max[0,0+(18.28-16)] = 2.28
	5	U_{55}= max[0,0+(16.39-16)] = 0.39
	$\therefore \sum_{i=1}^{5} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 3.06	

สถานีงานที่ 6

สถานีงานที่ 6 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ A มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 1, 3 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.21 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 6

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 6	1	U_{16}= max[0,0+(6.49-16)] = 0
	2	U_{26}= max[0,0+(17.07-16)] = 1.07
	3	U_{36}= max[0,0+(14.08-16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{3} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 1.07	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สถานีงานที่ 7

สถานีงานที่ 7 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ A มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 5 และ 8 คำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จได้ ดังตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 7

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 7	1	U_{17}= max[0,0+(7.66-16)] = 0
	2	U_{27}= max[0,0+(17.62-16)] = 1.62
	3	U_{37}= max[0,0+(18.26-16)] = 2.62
	$\therefore \sum_{i=1}^{3} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 3.88	

สถานีงานที่ 8

สถานีงานที่ 8 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ A มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 6, 9

ตารางที่ 2.23 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 8

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 8	1	U_{18}= max[0,0+(16.17-16)] = 0.17
	2	U_{28}= max[0,0+(14.09-16)] = 0
	3	U_{38}= max[0,0+(16.00-16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{3} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 0.17	

สถานีงานที่ 9

สถานีงานที่ 9 เป็นประเภทสถานีงานแยก ที่ทำการประกอบบนสายการประกอบ B มีขั้นงานที่ต้องทำได้แก่ 19 และ 20

ตารางที่ 2.24 วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณงานไม่เสร็จของสถานีงานที่ 9

	i	U_{ij}= max[0, $(Z_{ij} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} t_{jm} - L)/v_c$
สถานีงานที่ 9	1	U_{19}= max[0,0+(13.93-16)] = 0
	2	U_{29}= max[0,0+(12.00-16)] = 0
	3	U_{39}= max[0,0+(12.63-16)] = 0
	4	U_{49}= max[0,0+(12.88-16)] = 0
	5	U_{59}= max[0,0+(13.93-16)] = 0
	$\therefore \sum_{i=1}^{5} U_{i,1} + Z_{(i+1)}/v_c$ = 0.00	

จากตารางผลการคำนวณปริมาณไม่เสร็จของทั้ง 9 สถสนีงาน สรุปได้ว่า ในหนึ่งรอบการผลิตที่มีลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์แบบ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3 จะได้ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จรวมทุกสถานีงานเท่ากับ $\sum_{j=1}^{J}[\sum_{i=1}^{I} U_{i,j} + Z_{(i+1)}/v_c]$ = 1.44+0+0+0+3.06+1.07+3.88+0.17+0 = 9.62

2.2.3 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด

ในการจัดลำดับการผลิตเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า การทำให้เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุดจะทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตลง ผลผลิตที่ได้จะเพิ่มขึ้น ได้จากสมการที่ 2.3

เมื่อ S_i คือ สถานะการปรับตั้งเครื่องจักร เมื่อ $S_i = 1$ หมายถึงมีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น และ $S_i = 0$ หมายถึงไม่มีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น

$t_{k,m}$ คือ เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ที่ m ขั้นงาน k

เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้มจากการสุ่ม โดยกำหนดช่วงของเวลาการปรับตั้งเครื่องมี่ค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.1 (LummuG,1996) ของเวลาเฉลี่ยขั้นงานของผลิตภัณฑ์ A1, A2, A3, B1, B2, B3 ตามลำดับดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.25 ขั้นตอนการสุ่มเวลาการปรับตั้งเครื่อง

ขั้นงาน	เวลาเฉลี่ย	ช่วงการสุ่มค่า		เวลาปรับตั้งเครื่องที่เกิดจากการสุ่ม					
		0.05	0.1	A1	A2	A3	B1	B2	B3
1	4.000	0.200	0.400	-	-	-	0.253	0.355	0.248
2	3.000	0.150	0.300	-	-	-	0.153	0.250	0.274
3	5.000	0.250	0.500	0.419	0.464	0.410	-	-	-
4	7.333	0.367	0.733	0.467	0.620	0.607	-	-	-
5	1.000	0.050	0.100	0.051	0.065	0.064	-	-	-
6	5.000	0.250	0.500	-	-	-	0.417	0.288	0.280
7	8.000	0.400	0.800	-	-	-	0.707	0.613	0.460
8	9.000	0.450	0.900	-	-	-	0.680	0.609	0.642
9	9.000	0.450	0.900	-	-	-	0.846	0.521	0.678
10	4.250	0.213	0.425	-	-	-	0.383	0.397	0.410
11	3.333	0.167	0.333	0.248	0.288	0.276	-	-	-
12	7.000	0.350	0.700	0.443	0.542	0.660	-	-	-
13	1.333	0.067	0.133	0.122	0.070	0.073	-	-	-
14	7.667	0.383	0.767	0.669	0.645	0.462	-	-	-
15	5.667	0.283	0.567	0.412	0.553	0.526	-	-	-
16	6.333	0.317	0.633	0.484	0.380	0.588	-	-	-
17	4.000	0.200	0.400	0.265	0.201	0.256	-	-	-
18	4.000	0.200	0.400	0.226	0.310	0.200	-	-	-
19	7.000	0.350	0.700	-	-	-	0.581	0.425	0.358
20	5.000	0.250	0.500	-	-	-	0.372	0.412	0.302

ตารางที่ 2.26 ผลรวมเวลาการปรับตั้งเครื่องของลาดับผลิตภัณฑ์ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3

ขั้นงาน	ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์					$\sum_{m=1}^{M} t_m$
1	B3	B3	B2	B1	B3	1.104
	0.248	0	0.355	0.253	0.248	
2	B3	B3	B2	B3		0.677
	0.274	0	0.25	0.153	0	
3	A2	A3	A1			1.293
	0.464	0.419	0.41	0	0	
4	A2	A3	A1			1.694
	0.62	0.467	0.607	0	0	
5	A2	A3				0.116
	0.065	0.051	0	0	0	
6	B3	B3	B2	B1	B3	1.265
	0.28	0	0.288	0.417	0.28	
7	B3	B3	B2	B1	B3	2.240
	0.46	0	0.613	0.707	0.46	
8	B3	B3	B2	B1	B3	2.573
	0.642	0	0.609	0.68	0.642	
9	B3	B3	B2	B1	B3	2.724
	0.678	0	0.521	0.846	0.678	
10	B3	B3	B1	B3		1.190
	0.41	0	0.397	0.383	0	
11	A2	A3	A1			0.812
	0.288	0.248	0.276	0	0	
12	A2	A3	A1			1.645
	0.542	0.443	0.66	0	0	
13	A2	A3				0.192
	0.07	0.122				
14	A2	A3	A1			1.775
	0.645	0.669	0.462			
15	A2	A3	A1			1.491
	0.553	0.412	0.526	0	0	
16	A2	A3	A1			1.452
	0.38	0.484	0.588	0	0	
17	A2	A3	A1			0.722
	0.201	0.265	0.256	0	0	
18	A2	A3	A1			0.737
	0.31	0.226	0.2	0	0	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.26 (ต่อ)ผลรวมเวลาการปรับตั้งเครื่องของลาดับผลิตภัณฑ์ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3

ขั้นงาน	ลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์					$\sum_{m=1}^{M} t_m$
19	B3	B3	B2	B1	B3	1.721
	0.358	0	0.425	0.581	0.358	
20	B3	B3	B2	B1	B3	1.389
	0.302	0	0.412	0.372	0.302	
$f_3(x) = \sum_{i}^{20} \sum_{m}^{M} s_i \, t_m$						26.810

เวลาการปรับตั้งเครื่องของลาดับผลิตภัณฑ์ B3 A2 A3 B3 B2 A1 B1 B3 เท่ากับ 26.810

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) คือ กระบวนในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา โดยที่คำตอบที่ได้นั้นมีลักษณะไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่มีอยู่ โดยปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนี้อาจแบ่งได้สองรูปแบบ ได้แก่ ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Optimization Problem) และปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problem) หรืออาจเรียกว่าปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Optimization Problem) หรือปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเวกเตอร์ (Vector Optimization Problem) แบ่งตามจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนี้จะมีส่วนประกอบของเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (Vector of Decision Variables) ข้อจำกัด (Constraints) และฟังก์ชันเวกเตอร์ (Vector Functions) หรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ เกณฑ์ที่เป็นตัวกำหนดว่าเป้าหมายในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นไปในลักษณะใด โดยมีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่มากที่สุด (Maximization) และน้อยที่สุด (Minimization) ขณะที่ตัวแปรตัดสินใจคือตัวแปรที่สามารถควบคุมหรือปรับเปลี่ยนค่าได้ในระหว่างการค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป้าหมายในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดก็คือการหาค่าของเหล่าตัวแปรตัดสินใจที่จะทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์มุ่งเข้าสู่เป้าหมายให้ได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรตัดสินใจจะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดที่มีอยู่ด้วย ทั้งนี้ กรณีปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งฟังก์ชันอาจสร้างความยุ่งยากในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมากกว่ากรณีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว โดยต้องอาศัยประสบการณ์และเทคนิคต่างๆ มาใช้ในการแก้ปัญหาประกอบกันไป

การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือการหาเซตของคำตอบภายในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทุกฟังก์ชันที่กำหนดมีค่าที่ดีที่สุดพร้อมๆ กันไป ซึ่งเป้าหมายของเหล่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อาจเป็นรูปแบบที่ทุกฟังก์ชันต้องการค่าน้อยที่สุด มากที่สุด หรือเป็นรูปแบบที่บางฟังก์ชันต้องการค่าน้อยที่สุดและบางฟังก์ชันต้องการค่ามากที่สุดก็ได้ โดยรูปแบบของปัญหาในการวิจัยครั้งนี้เป็นรูปแบบที่ทุกๆ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด

การค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กัน จึงเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปไม่ได้เลยที่จะมีคำตอบที่ดีที่สุดเพียงคำตอบเดียว โดยคำตอบที่ได้จะเป็นในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์คณิตศาสตร์ (นพพล คำภิรมย์, 2008) ได้ดังนี้

$$Minimize\left\{f_1(x), f_2(x), ..., f_k(x)\right\} \tag{2.4}$$

โดยที่ $x = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ คือ คำตอบซึ่งเป็นเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจขนาด n ใน สเปซคำตอบ X ของปัญหาที่กำลังพิจารณา k คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด $f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i เมื่อ $i = \{1,2,..k\}$

ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ $\mathbf{x}$ ให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ $\mathbf{y}$ แล้ว จะได้ว่า $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่าของ $i \in \{1,2,...,k\}$ และ $f_i(x) < f_i(y)$ อย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1,2,...,k\}$

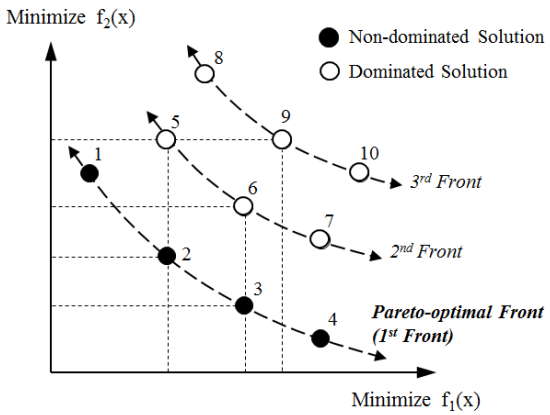
การจัดลำดับการผลิตบนสายประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ได้ทำการพิจารณา 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พร้อมกัน (ปารเมศ ชุติมา, 2008)

2.4 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ

การกำหนดความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับคำตอบนั้นกล่าวอีกมุมหนึ่งก็คือการชี้วัดคุณภาพของคำตอบ มีเป้าหมายเพื่อให้ทราบว่าแต่ละคำตอบที่พิจารณาเป็นคำตอบที่ดีหรือแย่เพียงใดเมื่อเทียบกับคำตอบอื่นๆ ความแข็งแรงมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในหลายๆ ขั้นตอน เช่น ใช้พิจารณาจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบ ใช้คัดเลือกประชากรคำตอบพ่อแม่ในแต่ละรอบการดำเนินการค้นหาคำตอบ ใช้เพื่อแปลงเป็นความน่าจะเป็นของแต่ละคำตอบที่จะถูกเลือกไปดำเนินการต่างๆ ระหว่างกระบวนการค้นหาคำตอบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์อาจมีความยุ่งยากและใช้เวลานานกว่ากรณีปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากในระหว่างการกำหนดความแข็งแรงจะต้องพิจารณาค่าวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันไป

งานวิจัยนี้อาศัยวิธีการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการกำหนดความแข็งแรงของคำตอบ โดยคำตอบทั้งหมดที่พิจารณาจะถูกจัดอันดับภายใต้หลักการการครอบงำเชิงพาเรโต และความแข็งแรงของแต่ละคำตอบจะถูกกำหนดขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับอันดับที่ได้ ทั้งนี้ เนื่องจากความแข็งแรงไม่ได้ถูกประเมินจากค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบโดยตรง แต่ประเมินจากอันดับ จึงอาจเรียกความแข็งแรงที่ประเมินได้ว่าเป็น “ความแข็งแรงไม่แท้จริง” (Dummy Fitness) วิธีการกำหนดความแข็งแรงที่ใช้มีชื่อว่าวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg’s Ranking) หรือการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) (Goldberg, 1989) มีขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการพิจารณาที่กราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบทั้งหมด คำตอบที่ไม่ได้ถูกครอบงำโดยคำตอบใดๆ เลยหรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน Pareto-optimal Front (Front ที่ 1) จะถูกจัดอันดับให้เป็นคำตอบอันดับที่ 1 จากนั้นให้ตัดคำตอบอันดับที่ 1 ออกจากการพิจารณา คำตอบในบรรดาคำตอบที่เหลือที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบใดเลยจะถูกจัดให้เป็นคำตอบอันดับที่ 2 (อยู่บน Front ที่ 2) ลำดับถัดไปก็ให้ตัดคำตอบอันดับที่ 2 ออกจากการพิจารณา และจัดอันดับคำตอบในอันดับถัดๆ ไปด้วยหลักการเดียวกันนี้จนครบ สุดท้ายแล้วให้ทำการกำหนดความแข็งแรงของแต่ละคำตอบ โดยให้มีค่าเท่ากับเลขอันดับของคำตอบนั้นหรือเท่ากับเลขลำดับของ Front ที่คำตอบนั้นตั้งอยู่

จากกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มตัวอย่างคำตอบ 10 คำตอบดังรูปที่ 2.1 เนื่องจากคำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นเลย มีการตั้งอยู่บน Front ที่ 1 จึงกำหนดให้เป็นคำตอบที่ดีเป็นอันดับ 1 และมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จากนั้นเมื่อตัดคำตอบที่ 1-4 ออกจากกราฟ จะพบว่าคำตอบที่ 5-7 เป็นคำตอบกลุ่มถัดไปที่ไม่ถูกงำโดยบรรดาคำตอบที่เหลือ นั่นคือตั้งอยู่บน Front ที่ 2 จึงถูกกำหนดให้เป็นคำตอบอันดับ 2 และมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 2 และในทำนองเดียวกันนี้ จะพบว่าคำตอบที่ 8-10 เป็นคำตอบอันดับ 3 มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 3



รูปที่ 2.9 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

(ณัฐชัย โยธาบริบาล, 2014)

2.5 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบจากการแก้ปัญหานั้นจะเป็นที่น่าพึงพอใจต่อผู้ใช้งานก็ต่อเมื่อมีจำนวนคำตอบที่มากเพียงพอ มีความหลายหลาย ตลอดจนมีความใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ดังนั้น ในการชี้วัดว่าสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในแก้ปัญหาจึงสามารถพิจารณาได้จากกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมเหล่านั้นค้นพบ ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวข้างต้นหรือไม่ งานวิจัยนี้อาศัยตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวชี้วัด ดังที่ Kumar และ Singh (2007) ได้นำเสนอไว้ ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต การกระจายตัว และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ โดยแต่ละตัวชี้วัดมีรายละเอียดดังนี้

ตัวชี้วัดที่ 1 การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set)

ตัวชี้วัดนี้ใช้แสดงถึงความแตกต่างระหว่างกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึมหามาได้ (A) กับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริง (A*) โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้

$$Convergence(A) = \frac{\sum_{i=1}^{|A^*|} dt_i}{|A^*|} \qquad 2.5$$

เมื่อ $dt_i = min_{j=1}^{|A^*|} \sqrt{\sum_{k=1}^{K} \left(\frac{f_k(i) - f_k(j)}{f_k^{max} - f_k^{min}}\right)^2}$

โดยที่ $|A^*|$ คือจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริง

K คือจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

dt_i คือระยะห่างยูคลีเดียนระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริงตัวที่ i กับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่หามาได้ตัวที่อยู่ใกล้คำตอบ i มากที่สุด โดย $i = \{1, \dots, |A^*|\}$

$f_k(i)$ และ $f_k(j)$ คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริงตัวที่ i และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่หามาได้ตัวที่ j ตามลำดับ โดย $k = \{1, \dots, K\}$

f_k^{max} และ f_k^{min} คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริง ตามลำดับ

ทั้งนี้ ยิ่งกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่หาได้มีค่า Convergence ต่ำเท่าใด จะยิ่งแสดงให้เห็นว่ามีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริงมากเท่านั้น โดยหากมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้นั้นมีสมาชิกเหมือนกลุ่มคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงทุกประการ และเนื่องจากกลุ่มคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงอาจไม่สามารถหาออกมาได้ จึงอาศัยกลุ่มคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณแทน ซึ่งหาได้จากการนำเอากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของทุกอัลกอริทึมมารวมกันแล้วจัดอันดับด้วยวิธีของ Goldberg โดยกลุ่มคำตอบที่อยู่บน Front ที่ 1 จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ

ตัวชี้วัดที่ 2 การกระจายตัว (Spread)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้เพื่อประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึมหามาได้ (กลุ่มคำตอบ A) โดยพิจารณาจากระยะทางเฉลี่ยระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้ (ดูรูปที่ 2.10 ประกอบ)

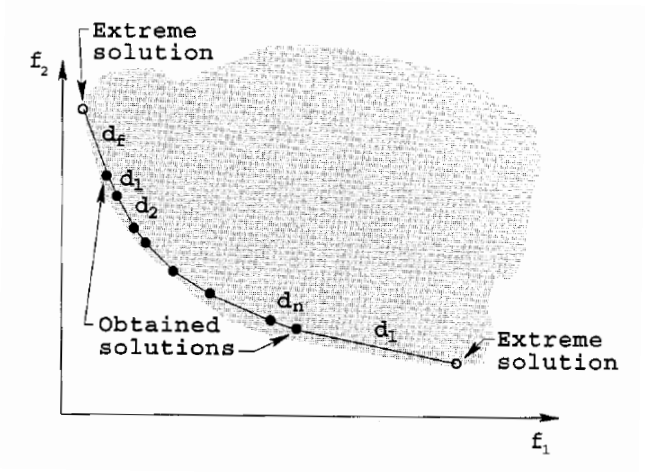
$$Spread\ (A) = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \qquad 2.5$$

โดยที่ d_f และ d_l คือระยะห่างระหว่างคำตอบที่อยู่ปลายสุดในบรรดากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Extreme Solution) กับคำตอบที่ปลายสุดของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้ (Boundary Obtained Solution) ของทั้งสองด้านบนพื้นที่คำตอบ

d_i คือระยะห่างเชิงยูคลีเดียนระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้ที่อยู่ต่อเนื่องกันลำดับที่ i โดย $i = 1, \ldots, (N-1)$ เมื่อ N คือจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้

$\bar{d}$ คือระยะห่าง d_i เฉลี่ย

ค่า Spread ที่ดีที่สุดนั้นมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นได้ โดยจะเกิดขึ้นในกรณีที่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้ มีคำตอบปลายสุดทั้งสองข้างอยู่บนตำแหน่งเดียวกันกับคำตอบปลายสุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง $(d_f = d_l = 0)$ หรือมีขอบเขตครอบคลุมขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงนั่นเอง รวมทั้งมีระยะห่างระหว่างคู่คำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันเท่ากันในทุกๆ คู่หรืออาจกล่าวได้ว่ามีการกระจายตัวของคำตอบในรูปแบบยูนิฟอร์ม ทั้งนี้ค่า Spread อาจสูงกว่า 1 ในกรณีที่กลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวที่แย่



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว
(Deb, Pratap และคณะ 2002)

ตัวชี้วัดที่ 3 อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions)

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-Dominated Solution) นี้ไว้ใช้แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้นมีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบที่อัลกอริทึมอื่น ๆ หามาได้ทั้งหมดคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด โดยแบ่งค่าชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนเป็น 2 ค่าชี้วัดสมรรถนะดังต่อไปนี้

1. Ratio of non-dominated solutions (self-comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (First Pareto frontier solution) ที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Approximated True Pareto optimum) ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีในตัวมันเอง (Own first Pareto frontier solutions) โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$R_{NDS1} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists\ y \in A : y \prec x\}|}{|A_j|} \quad 2.5$$

2. Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$R_{NDS2} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists_y \in A : y \prec x\}|}{|A|} \quad 2.6$$

กำหนดให้

A_j คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึม j หามาได้ทั้งหมด

เมื่อ $j = 1,2, \ldots j$

A คือ เซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหามาได้ของทุกอัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน

ซึ่ง $A = A1 \cup A2 \ldots \cup Aj$

x คือ คำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y \prec x$ คือ คำตอบ x เด่นกว่าคำตอบ y

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

ตัวชี้วัดที่ 4 การวัดสมรรถนะของจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ

จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (The number of non-dominated solution) คือจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดของตัวมันเอง (First Pareto frontier obtained)

ตัวชี้วัดที่ 5 การวัดสมรรถนะของเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) คือ การนับเวลาที่เริ่มทำการค้นหาคำตอบจนสิ้นสุดการค้นหาคำตอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6 เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อรูเล็ต

กรณีที่เรามีทางเลือกหลายทางที่ต้องการสุ่มเลือกออกมาเพียงทางเลือกเดียว โดยแต่ละทางเลือกมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับค่าบางค่าที่กำหนด เช่น โอกาสที่คำตอบจะถูกเลือกมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรง บิตในคำตอบมีโอกาสถูกเลือกมาดำเนินการบางอย่างมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราที่กำหนด เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะอาศัยวิธีการเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Selection) ของ Goldberg (1998) เป็นวิธีการสุ่มเลือกทางเลือกเหล่านั้น

วิธีการคือให้นำค่าที่บ่งชี้โอกาสในการถูกเลือกมาทำการ Normalized ให้ค่านั้นของทุกๆ ทางเลือกกลายเป็นค่าความน่าจะเป็นที่รวมกันแล้วเท่ากับ 1 พร้อมหาความน่าจะเป็นสะสมของแต่ละทางเลือก จากนั้นสร้างวงล้อรูเล็ตขึ้นมาโดยกำหนดให้มีพื้นที่ขนาดเท่ากับ 1 หน่วย ให้แบ่งพื้นที่วงล้อ

ออกเป็นส่วนๆ ให้กับแต่ละทางเลือกโดยมีขนาดของพื้นที่แต่ละส่วนตามความน่าจะเป็นของทางเลือกนั้นๆ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเชิงสำรวจ ที่ได้มีการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสายการประกอบแบบหลายสายหรือแบบขนานจากผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ของ Lusa (2000) ได้แสดงถึงประเภทต่างๆ ของสายการประกอบแบบขนาน ตลอดจนการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียกับสายการประกอบเดี่ยว อย่างไรก็ตาม นอกจากงานวิจัยชิ้นนี้แล้วยังมีงานวิจัยชิ้นอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบขนานดังแสดงในลำดับต่อไปนี้

ในการออกแบบสายการประกอบแบบขนานนั้น Süer และ Dagli (1994) ได้นำเสนอถึงขั้นตอนเชิงฮิวริสติกและอัลกอริทึม ที่ใช้การพิจารณาจำนวนสายการประกอบพร้อมกับลักษณะในการจัดวางสายการประกอบเหล่านั้น ต่อมา Süer (1998) ได้แสดงให้เห็นถึงการออกแบบสายการประกอบแบบขนานที่ใช้สำหรับผลิตสินค้าชนิดเดียว ในด้านกลยุทธ์ ภายใต้สถานการณ์ที่มีการใช้พนักงานในจำนวนที่มากกว่าจำนวนงานที่มีอยู่ในสายการประกอบ เพื่อรองรับความต้องการในด้านกำลังการผลิต เพื่อให้กำลังการผลิตที่สูงมากๆ โดยวัตถุประสงค์ของกลยุทธ์นี้ใช้ในการหาจำนวนสายการประกอบที่อาศัยจำนวนพนักงานน้อยที่สุด ซึ่งกระบวนการในการหาคำตอบประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) จัดสมดุลสายการประกอบ (2) พิจารณากำหนดสถานีงานแบบขนาน หรือ Parallel Stations และ (3) กำหนดสายการประกอบแบบขนาน โดยมีการดำเนินงานที่เป็นอิสระต่อกันของแต่ละสายการประกอบในสายการประกอบแบบขนาน

Gökçen, Ağpak และคณะ (2006) ได้นำเสนอขั้นตอนเชิงฮิวริสติกและโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบขนานภายในรูปแบบ Passive และ Active โดยแสดงให้เห็นว่า การเกิดขึ้นของสถานีงานร่วมภายในสายการประกอบแบบขนาน ที่บรรจุขั้นงานจากสองสายการประกอบเดี่ยวที่อยู่ติดกัน จะทำให้การดำเนินงานทั้งระบบนั้นอาศัยจำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบการดำเนินงานในลักษณะสายการประกอบเดี่ยวที่เป็นอิสระต่อกันจำนวนหลายๆ สาย

Scholl และ Boysen (2009) ได้พิจารณาแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่ผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยการแก้ปัญหาย่อยสองปัญหาไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ (1) กำหนดชนิดผลิตภัณฑ์ลงสู่สายการประกอบแต่ละสาย และ (2) จัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดและมีการใช้พื้นที่ที่กระชับที่สุด ทั้งนี้แบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นฐานสอง (Binary Linear Programming) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไข

ปัญหาดังกล่าว โดยอาศัยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch-and-Bound) สำหรับแก้ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลางเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ขณะเดียวกันได้พัฒนาวิธีการเชิงฮิวริสติกในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่

Baykasoglu, Ozbakur และคณะ (2009) ได้นำเสนออัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจากวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบขนาน โดยที่มีสายการประกอบแต่สายการผลิตมีผลิตผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกัน ได้กำหนดวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานและเวลาสูญเปล่าของสถานีงานน้อยที่สุด ผลที่ได้จากอัลกอริทึมนี้คือได้มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบขนาดเล็กและขนาดกลางเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมจากงานวิจัยอื่นๆ นอกจากนั้น ยังได้แสดงให้เห็นศักยภาพในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดีด้วย ลำดับต่อมา อัลกอริทึมเชิงฮิวริสติกโดยมีพื้นฐานจากการค้นหาแบบกระจัดกระจาย (Scatter Search Based Algorithm) ได้ถูกพัฒนาโดย Qingxin และ Lixin (2009) เพื่อใช้สำหรับจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานสองสายการประกอบย่อย ให้ได้มาซึ่งจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ผลที่ได้คืออัลกอริทึมนี้สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในบางปัญหาการจัดสมดุล เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมของ Gökçen, Ağpak และคณะ (2006)

งานวิจัยเกี่ยวข้องกับลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

Tsai (1995) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตสาหรับหลายผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดวัตถุประสงค์การวิจัยคือเพื่อทำให้ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ และความเสี่ยงในการหยุดของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด โดยหลังจากการวิจัยได้พบว่าปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายผลิตภัณฑ์เป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากและมีความสลับซับซ้อนในการแก้ปัญหาหรือที่เรียกว่าเป็นปัญหาแบบ NP-hard

Hyun, Kim และคณะ (1998) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบสาหรับผลิตภัณฑ์แบบผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยได้ศึกษา 3 วัตถุประสงค์ไปพร้อมกัน คือ จำนวนผลรวมของปริมาณงานที่ไม่เสร็จมีค่าน้อยที่สุด อัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบสม่ำเสมอ และผลรวมจำนวนค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อยที่สุด โดยได้พัฒนาวิธีการการค้นหาคำตอบเพื่อทำให้ได้กลุ่มของคำตอบที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ จึงได้เสนอวิธีการที่มีชื่อว่า Pareto Stratum-Niche Cubic (PS-NC) มาใช้ในการแก้ปัญหา

McMullen และ Frazier (2000) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์สำหรับระบบผลิตที่เป็นแบบทันเวลาพอดี โดยได้นำอัลกอริทึม Simulated Annealing มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับที่มีวัตถุประสงค์คือการปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อย

ที่สุด และอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบที่สม่ำเสมอ ผลของงานวิจัยสรุปว่าอัลกอริทึม Simulated Annealing มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสาหรับปัญหาที่มีขนาดเล็ก

McMullen (2000) ได้ศึกษาลักษณะการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสาหรับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) โดยนำอัลกอริทึมหลายๆตัวมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาได้แก่วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม วิธี Simulated Annealing และวิธี Tabu Search มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต โดยสนใจในเรื่องของการทาให้ระบบการผลิตมีความยืดหยุ่นมากที่สุด และการปรับตั้งเครื่องให้เกิดขึ้นน้อยครั้งที่สุด โดยผลสรุปของงานวิจัยพบว่าวิธีทั้ง 3 วิธีมีประสิทธิภาพในการค้นหาคาตอบสาหรับการแก้ปัญหาประเภทนี้ได้มีความใกล้เคียงกันในกรณีปัญหาที่มีขนาดเล็ก ส่วนอัลกอริทึมของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสาหรับกรณีปัญหาที่มีขนาดใหญ่ได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสองวิธีที่กล่าวข้างต้น

Mansouri (2005) ได้ศึกษาลักษณะของปัญหาการจัดลำดับการผลิตสาหรับผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบของระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) โดยมีการนำเอาอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า เจนเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithms: MOGAs) มาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อจะทำให้เกิดอัตราความผันแปรในการผลิตที่น้อยที่สุดและจำนวนครั้งการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด แต่จากสิ่งที่สนใจในเรื่องทั้งสองที่จะใช้ในการแก้ปัญหาพบว่า เป็นเรื่องที่มีความขัดแย้งกันโดยตรงหรือกล่าวได้ว่าเป็นเรื่องที่มีความผันแปรกันในทิศทางตรงกันข้าม จึงทำให้จะได้คำตอบที่ไม่ใช่เป็นคำตอบที่น้อยที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์แต่จะเป็นคำตอบที่มีความเหมาะสมที่ใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งพบว่าวิธี MOGAs มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตมากกว่าวิธีการอื่นๆ

Ding, Zhu และคณะ (2006) ได้ศึกษาลักษณะของปัญหาการจัดลำดับการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์แบบผสมบนสายการประกอบโดยมีหลายวัตถุประสงค์ที่สนใจที่จะใช้ในการแก้ปัญหาก็คือเพื่อทำให้เปอร์เซ็นต์ของน้าหนักมีความแตกต่างกันของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดให้มีค่าน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยคือ ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ความสม่ำเสมอในเรื่องปริมาณปริมาณงานและภาระงานให้มีค่าน้อยที่สุด โดยในงานวิจัยได้นำวิธีการ Comparing Two Weighted มาใช้ในการแก้ปัญหาและผลการวิจัยก็จะชี้ให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวนั้นมีประสิทธิภาพสาหรับนำไปใช้ในปัญหานี้

Simon (2008) ได้มีการนำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้แนวคิดการย้ายถิ่นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีความต้องการที่จะอยู่อาศัยในที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่ถ้าพื้นที่ที่อยู่

นั้นมีความหนาแน่น สิ่งมีชีวิตจะเริ่มทำการย้ายที่อยู่อาศัยไปสู่ที่อื่นที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อยกว่า และพัฒนาที่อยู่ใหม่ให้มีความอุดมสมบูรณ์ โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ได้มีการเปรียบเทียบคาตอบที่ได้จากปัญหาในภาคปฏิบัติ ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้จึงมีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมหลายตัว

Hongwei และ Lifang (2010) ได้ทำวิจัยโดยได้นำเอาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์หรือ BBO มาทำการแก้ปัญหาที่เรียกว่า Travelling Salesman โดยนำมาประยุกต์ให้สามารถใช้ในการแก้ปัญหามีชื่อว่า TSPBMA (Travelling Salesman Biogeography Migration Algorithm) โดยมีอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คือ ACO GA PSO IA และ Fish Swarm ซึ่งผลสรุปงานวิจัยพบว่าวิธี TSPBMA (Travelling Salesman Biogeography Migration Algorithm) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา และยังเป็นอัลกอริทึมที่ใช้เป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาประเภทนี้

Ma (2010) ได้ศึกษาในเรื่องของรูปแบบชนิดต่างๆสำหรับนาไปใช้ในการอพยพเคลื่อนย้ายของวิธีการที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้ค่าของ Species Count ในการเลือกว่าควรจะมีการอพยพเข้ามากน้อยเท่าใด โดยงานวิจัยนี้ได้ทาการเปรียบเทียบชนิดของรูปแบบการอพยพออกเป็น 6 รูปแบบ โดยผลการวิจัยสรุปได้ว่า การอพยพรูปแบบที่ไม่ใช่เส้นตรง (Nonlinear Migration Models) มีความเหมาะสมกว่ารูปแบบเส้นตรง (Linear Migration Models)

นพพล คำภิรมย์ (2008)ได้นำเสนออัลกอริทึมการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence: COIN) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบตัวยู ได้กำหนดวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรและความผันแปรของภาระงานในระบบการผลิตน้อยที่สุด ผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยพบว่า COIN จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อได้มีการรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II สามารถนามาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลาดับผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบลักษณะตัวยูได้มีประสิทธิภาพสาหรับปัญหาขนาดใหญ่ จากงานวิจัยที่กล่าวมา พบว่า COIN มีประสิทธิภาพในการค้นหาคาตอบที่รวดเร็ว เนื่องจากมีการจดจำลักษณะต่ำแหน่งของคู่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ติดกันและมีการจดจำลักษณะต่ำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่ดีและไม่ดี

กรรณ จิตเมตตา (2011) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยมีวัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยทั้งหมด 2 วัตถุประสงค์ ที่พิจารณาไปพร้อมกันได้แก่ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และได้นำเอาอัลกอริทึมมา

เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาได้แก่ COMSOAL NSGA-II DPSO BBO และ PSONK ผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่าวิธี PSONK มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหามากกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ

วันวิสา นฤมิตวงคศ์ (2012) ได้ทำศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านโดยได้นำเรื่องของผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาศึกษาด้วย ได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ที่พิจารณาไปพร้อมกันคือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทาไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด โดยนำอัลกอริทึมที่มีการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาประเภทนี้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้แก่ BBO NSGA-II DPSO PSONK และ BBO Adaptive ผลการเปรียบเทียบงานวิจัยพบว่าวิธี BBO Adaptive มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหามากกว่าวิธีการอื่นๆ

สถารพ โอฬารวิวัฒน์ชัย (2013) ได้นำเสนอกำนำอัลกอริทึม การบรรจวบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Expand: COIN-E) ซึ่งเป็นอัลกอริทึม ที่ประยุกต์มาจาก COIN มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบแบบสองด้าน โดยมีการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน ในงานวิจัยคือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จำนวนรถยนต์ที่ละเมิดรวมน้อยที่สุด และจำนวนครั้ง การเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด และนำเสนอ โดยทำการ เปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ยอมรับในการแก้ปัญหา การจัดลำดับการผลิต ได้แก่ NSGA-II DPSO BBO และ COIN ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า COIN-E มี ประสิทธิภาพด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบ ด้านการกระจาย กลุ่มคำตอบและด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ พบว่า COIN-E มีประสิทธิภาพในการใช้การ แก้ปัญหาได้ดีกว่า NSGAII, DPSO, BBO และ COIN

ณัฐชัย โยธาบริบาล (2014) ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม โดยได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์ทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของงานสูงที่สุด ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับมาเปรียบเทียบด้วยตัววัดสมรรถนะทั้งในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ

บทที่ 3
การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัว
ของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

ในบทนี้ได้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ (Biography-Based Optimization: BBO) วิธีการและขั้นตอนการทำงานของ BBO มีการยกตัวอย่างการนำวิธี BBO ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มีหลายวัตถุประสงค์ การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO ที่ใช้กับปัญหาในการทดลอง

3.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ (Biography-Based Optimization: BBO)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ (Biography-Based Optimization: BBO) ที่นำมาประยุกต์กับปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดนั้นได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Simon (2008) ซึ่งมีแนวคิดนี้ได้มาจากหลักการเลียนแบบพฤติกรรมการกระจายหรือการอพยพย้ายถิ่นฐานของสปีชีส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของเกาะที่อยู่อาศัย อธิบายถึงการอพยพจากอีกเกาะหนึ่งไปยังเกาะอื่นๆ นั้นคือ เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์มากจะมีประชากรอาศัยอยู่มากทำให้เกิดความแออัด (ค่าสปีชีส์เคาท์สูง) ส่งผลให้มีอัตราการอพยพออกของประชากรสูงและมีอัตราการอพยพเข้าต่ำ ขณะที่เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์ไม่มากนักจะมีประชากรอาศัยอยู่น้อย (ค่าสปีชีส์เคาท์ต่ำ) อัตราการอพยพออกจะต่ำเนื่องจากมีพื้นที่อยู่ไม่แออัดและมีอัตราการอพยพเข้าสูงจากการมองหาที่อยู่ใหม่ โดยแนวคิดนี้จะสอดคล้องกับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแยกเป็นประเด็นดังนี้

(1) สตริงคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเปรียบเสมือน “เกาะ” และคุณภาพของคำตอบเปรียบเสมือนความอุดมสมบูรณ์ของเกาะซึ่งจะวัดด้วยค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัย (Habitat Suitability Index: HSI) หรือจำนวนสปีชีส์เคาท์ ซึ่งเปรียบได้กับค่า Fitness ที่ใช้จัดอันดับคำตอบ โดยคำตอบที่ดีจะมีค่า HSI สูง

(2) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เช่น ขนาดพื้นที่ อุณหภูมิ และปริมาณน้ำฝน จะเรียกว่าตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable: SIV) เปรียบเสมือนยีน (Gene) หรือบิต (Bit) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว (Feature) ของสตริงคำตอบ

(3) Migration Rate หรืออัตราการอพยพของสิ่งมีชีวิตมายังเกาะ แบ่งออกเป็นอัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate ; λ) และอัตราการอพยพออก (Emigration Rate; μ) โดยอัตราการอพยพเข้าเปรียบเสมือนอัตราหรือความน่าจะเป็นที่สตริงคำตอบ โดยแต่ละสตริงคำตอบจะมีความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) จะรับคุณลักษณะจากสตริงคำตอบอื่นเข้ามาเพื่อปรับปรุงสตริงคำตอบของตนเอง ขณะที่อัตราการอพยพออกเปรียบเสมือนอัตราหรือความน่าจะเป็นที่สตริงคำตอบจะถ่ายทอดคุณลักษณะของตนให้กับสตริงคำตอบอื่น ทั้งนี้ สตริงคำตอบที่ดีมีโอกาสน้อยที่จะรับคุณลักษณะจากสตริงคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง แต่มีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น ในทางตรงกันข้าม สตริงคำตอบที่แย่มีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น แต่มีโอกาสสูงที่จะรับคุณลักษณะจากสตริงคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง

หลังจากทำการอพยพคุณลักษณะเข้าออกจากสตริงคำตอบแล้วจะมีการมิวเตชันตามมาอีกขั้นตอนหนึ่ง กล่าวคือเป็นการเลือกคุณลักษณะของสตริงคำตอบมาส่วนหนึ่งเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยหวังว่าความหลากหลายที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้คำตอบที่แย่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น และทำให้สตริงคำตอบที่มีคุณภาพดีอยู่แล้วนั้นดียิ่งขึ้นไปอีก

ในการนำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานนั้น สตริงคำตอบ จะเปรียบเสมือนเกาะ ค่าความแข็งแรงของคำตอบเปรียบเสมือนค่า HSI และบิตต่างๆ ของคำตอบเปรียบเสมือนเป็น SIVs คำตอบที่ดีมีแนวโน้มสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่นโดยเฉพาะกับคำตอบที่แย่ แต่จะมีโอกาสน้อยที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่น อย่างไรก็ตาม แม้คำตอบที่ดีอาจมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็คาดหวังว่าจะพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งๆ ขึ้นไป ในทางตรงกันข้าม คำตอบที่แย่จะมีโอกาสสูงที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นโดยเฉพาะจากคำตอบที่ดีและพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้น แต่จะมีโอกาสน้อยในการถ่ายทอดคุณลักษณะของตัวเองให้กับคำตอบอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 ขั้นตอนการทำ BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มีหลายวัตถุประสงค์

BBO เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่มีการเลียนแบบพฤกติกรรมทางธรรมชาติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมอย่างปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย BBO มีขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่สำคัญ 2 ขั้นตอน นั้นคือ ขั้นตอนการอพยพของคำตอบและขั้นตอนการมิวเตชัน เพื่อต้องการให้คำตอบมีการปรับปรุงไปในทิศทางที่ดีขึ้นและทำให้คำตอบมีความหลากหลายมากขึ้นจนนำไปสู่คำตอบที่ดีทีสุด BBO มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิตของปัญหา ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์ของสายการประกอบที่ขนานกัน เวลาทำการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงาน จำนวนประชากรคำตอบ (N) และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m)
2) นำข้อมูลที่ได้นำเข้าจากขั้นตอนที่ 1 สร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ ด้วยวิธีการสุ่ม เมื่อ N คือขนาดของประชากรคำตอบที่กำหนด พร้อมคัดลอกออกมาเป็นเซตสตริงคำตอบชั่วคราว $Z = \{z_1, \dots, z_N\}$
3) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด y_i และ z_i
4) กำหนดค่าความแข็งแรงของทุกสตริงคำตอบ y_i และ z_i ด้วยวิธี Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ k ซึ่งจะมีค่ามากน้อยเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง โดยค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเรียงจากสตริงที่ดีที่สุดไปแย่สุดจะเท่ากับ $1, \dots, F$ ขณะที่ค่าสปีชีส์เคาท์จะเท่ากับ $F, \dots, 1$
5) คำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของแต่ละสตริงคำตอบ y_i และ z_i ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสปีชีส์เคาท์ k ที่มีอยู่ พฤติกรรมของค่าในการอพยพต่างๆ ข้างต้นนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งมีสมการที่ใช้คำนวณแตกต่างกันออกไป แต่ในงานวิจัยนี้จะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal ซึ่งจากการทดลองของ Ma (2010) พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสูงที่สุด โดยสมการที่ใช้มีดังนี้

$$\lambda_k = \frac{I}{2}\left(cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1\right) \quad 3.1$$

$$\mu_k = \frac{E}{2}\left(-cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1\right) \quad 3.2$$

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^{K} \lambda_k} \quad 3.3$$

$$P_{\mu,k} = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^{K} \mu_k} \quad 3.4$$

เมื่อ K คือค่าสปีชีส์เคาท์ที่สูงที่สุด และ $n = K + 1$

I และ E คืออัตราการอพยพเข้าและออกที่มากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 1

6) กำหนดให้

y_{k,n_k} คือสตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชีส์เคาท์ k ตัวที่ n_k

โดยที่ $k = 1, \dots, K$ และ $n_k = 1, \dots, N_k$

$z_{k',n_{k'}}$ คือสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ k' ตัวที่ $n_{k'}$

โดยที่ $k' = 1, \dots, K'$ และ $n_{k'} = 1, \dots, N_{k'}$

$y_{k,n_k}(e)$ และ $z_{k',n_{k'}}(e)$ คือค่าของบิตในตำแหน่งที่ e ของสตริงคำตอบ y_{k,n_k} และ $z_{k',n_{k'}}$ ตามลำดับ โดยที่ $e = 1, \dots, E$

ดำเนินการอพยพ โดยมีขั้นตอนดังนี้

(1) กำหนดให้ $k' = K'$, $n_{k'} = 1$ และ $e = 1$

(2) สร้างเลขสุ่ม r_1 ในช่วง 0 ถึง 1 ให้กับบิตที่ e ของคำตอบ $z_{k',n_{k'}}$ ถ้า $r_1 > P_{\lambda,k'}$ จะไม่มีการอพยพเข้าสู่บิตดังกล่าวและให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 6.6 แต่ถ้า

$r_1 \leq P_{\lambda,k'}$ แสดงว่าบิตนั้นจะได้รับการอพยพเข้าหรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตริงอื่น และให้ดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

(3) พิจารณาเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y สุ่มเลข r_2 ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมา เพื่อใช้เลือกสปีชีส์เคาท์ของคำตอบที่จะอพยพออกโดยอาศัยวงล้อรู้เล็ตของค่า $P_{\mu,k}$ ถ้าสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์นั้นมีสตริงเดียว ให้เลือกสตริง y_{k,n_k} นั้นเป็นสตริงอพยพออก แต่ถ้ามีหลายสตริงให้สุ่มเลือกสตริงใดก็ได้

(4) อพยพค่าบิต โดยแทนค่าของ $z_{k',n_{k'}}(e)$ ด้วยค่า $y_{k,n_k}(e)$

(5) ซ่อมแซมสตริง $z_{k',n_{k'}}$ โดยเปลี่ยนค่าของบิตตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่ตำแหน่ง e ที่มีค่าเท่ากับ $y_{k,n_k}(e)$ ไปเป็นค่าเท่ากับ $z_{k',n_{k'}}(e)$ เดิมก่อนอพยพ (ถ้าในขั้นตอน 6.4 มีค่า $z_{k',n_{k'}}(e) = y_{k,n_k}(e)$ ไม่ต้องทำการซ่อมแซมใดๆ)

(6) ถ้า $e < E$ ให้กำหนด $e = e + 1$ และกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า $e < E$ ให้ไปที่ขั้นตอนถัดไป

(7) ถ้า $n_{k'} < N_{k'}$ ให้กำหนดค่า $n_{k'} = n_{k'} + 1$ และ $e = 1$ แล้วกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า $n_{k'} = N_{k'}$ ให้ไปที่ขั้นตอนถัดไป

(8) ถ้า $k > 1$ ให้กำหนดค่า $k = k - 1, n_{k'} = 1$ และ $e = 1$ แล้วกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า $k = 1$ ให้หยุดกระบวนการอพยพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7) พิจารณาเฉพาะสตริงคำตอบภายในเซตคำตอบชั่วคราว Z (หลังอพยพ) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ z_i พร้อมกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ จากนั้นคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ k (P_k) และความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k ไปทำการมิวเตชัน (m_k) ด้วยสมการที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

$$P_k = \frac{\prod_{j=1}^{k}\left(\frac{I}{E}\right)^k\left(\frac{sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{i}\left(\frac{I}{E}\right)^i\left(\frac{sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \qquad 3.5$$

$$m_k = \frac{1-P_k}{\sum_{k=1}^{K}(1-P_k)} \quad 3.6$$

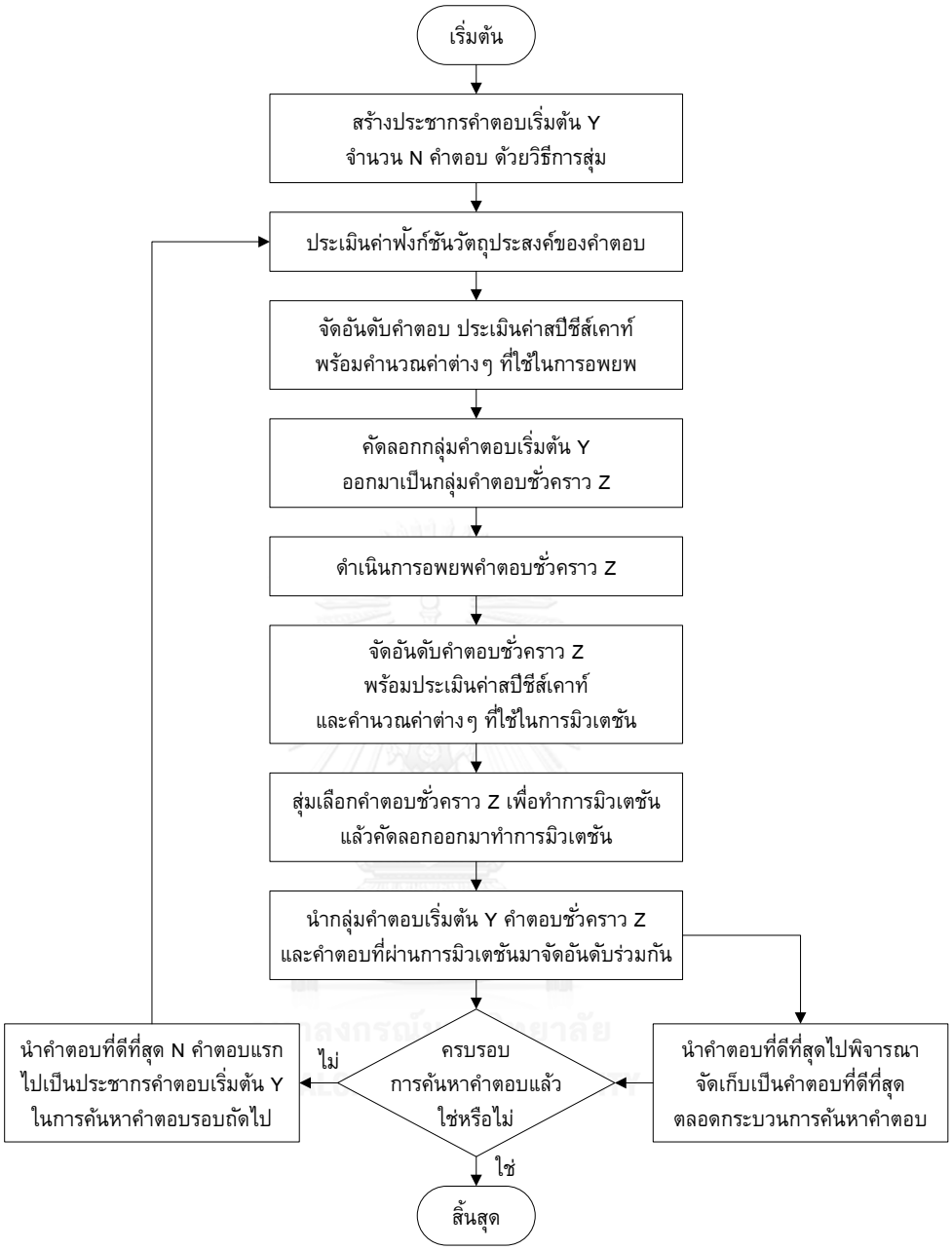
8) สุ่มเลข r_3 ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมาหนึ่งค่า หากค่านี้ตกอยู่ในช่วงวงล้อรูเล็ตค่า m_k ของสปีชีส์เคาท์ใด ให้คัดลอกสตริง z_i ในสปีชีส์เคาท์นั้นทั้งหมดไปทำการมิวเตชันเป็นสตริง z'_i โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange (Kim และคณะ, 1996)

9) นำเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y สตริงคำตอบชั่วคราว Z และสตริงที่ผ่านการมิวเตชัน Z' มารวมเข้าไว้ด้วยกัน หากมีสตริงที่ซ้ำกันหลายสตริงให้ตัดออกเหลือสตริงเดียว จากนั้นทำการจัดอันดับสตริงทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting พร้อมคำนวณค่า Crowding Distance

10) นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปพิจารณาจัดเก็บเป็นสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) โดยนำสตริงที่ดีที่สุดไปรวมเข้ากับ Elitist จากเจนเนอเรชันก่อนหน้าแล้วจัดอันดับร่วมกันด้วยวิธี Non-dominated Sorting สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้คือ Elitist ล่าสุดเมื่อดำเนินการมาถึงเจนเนอเรชันนี้นั่นเอง

11) สิ้นสุดกระบวนการของเจนเนอเรชันนี้ หากยังไม่ครบตามจำนวนเจนเนอเรชันที่กำหนดให้เลือกสตริงคำตอบในข้อ 9 ที่ดีที่สุดจำนวน N สตริงแรกไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจนเนอเรชันถัดไป ทั้งนี้ หากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวที่ N นั้นสามารถเลือกได้จากหลายสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากัน ให้เลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance สูงที่สุด และหากสตริงเหล่านั้นมีค่า Crowding Distance ยังเท่ากันอีก ในที่นี้กำหนดให้เลือกสตริงที่มีค่า $f_{3.1}(x)$ น้อยที่สุด จากนั้นเริ่มการดำเนินการเจนเนอเรชันถัดไปด้วยการกลับไปวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3 ถึง 11 แต่ถ้าครบเจนเนอเรชันที่กำหนดแล้วให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO

(ณัฐขัย โยธาบริบาล, 2014)

3.3 ตัวอย่างการใช้งาน BBO มาประยุกต์ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

3.3.1 การนำข้อมูลเข้า

การนำเข้าข้อมูลการจัดลำดับการผลิตมีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายขนาน ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนขั้น งาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รอบเวลาดาเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ ผสมแบบหลายขนานที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของ สิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ดังนี้

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal
- วิธีการมิวเตชั่นแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชั่นเท่ากับ 0.1

3.3.2 การสร้างเซตสตริงคาตอบเริ่มต้น

ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้วัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 3 วัตถุประสงค์ดังที่เสนอในงานวิจัยนี้ (ดูรายละเอียดในบทที่ 2)โดยสายการประกอบ A มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นได้แก่ A1 A2 และ A3 มีจำนวน Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:1 ขณะที่สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ B1 B2 และ B3 Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:3 แสดงว่าในการจัดอันดับครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A1 A2 A3 B1 และ B2 รุ่นละ 1 ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ B3 จำนวน 3 ผลิตภัณฑ์ เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการ จัดลำดับการผลิต ดังนี้

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
String	1	2	3	4	5	6	7	8

เมื่อกำหนดรหัสของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้แล้ว จะทำการสุ่มเพื่อสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด โดยมีขั้นตอนการสุ่มดังต่อไปนี้

ทำการสุ่มเลือกค่าตำแหน่ง 2 จุด เพื่อใช้ในการการสลับค่า โดยการหาจำนวนครั้งในการสลับจะมีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของจำนวนสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของทั้ง 2 สายการประกอบรวมกัน หรือ $\frac{I}{2}$ เมื่อ $I = \sum_{i=1}^{I} d_m$

ในกรนี $\frac{I}{2}$ มีค่าเป็นจำนวนคี่ให้ทาการปัดค่าขึ้นเสมอ

ตัวอย่างการคำนวณ

$I = \sum_{i=1}^{6} d_m =$ 1+1+1+1+1+3 =8 ดังนั้น $\frac{I}{2} = \frac{8}{2} = 4$

จึงทำให้การสุ่มสร้างประชากรเบื้องต้นมีจานวนครั้งในการสลับตาแหน่งเท่ากับ 4 ดังต่อไปนี้

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
priority	1	2	3	4	5	6	7	8

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 1	1	2	3	4	5	6	7	8

Model Sequence	A1	A2	B3	B1	B2	A3	B3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 2	1	2	6	4	5	3	7	8

Model Sequence	A1	B1	B3	A2	B2	A3	B3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 3	1	4	6	2	5	3	7	8

Model Sequence	A2	B1	B3	A1	B2	B3	A3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 4	2	4	6	1	5	7	3	8

เมื่อทำการสลับตำแหน่งจนครบ 4 ครั้ง จะได้ลำดับผลิตภัณฑ์ใหม่ดังนี้

Model Sequence	A2	B1	B3	A1	B2	B3	A3	B3
	2	4	6	1	5	7	3	8

แล้วทำการสร้างประชาการเริ่มต้นให้มีจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority	Model Sequence
Y_1	8 2 3 7 6 5 1 4	B3 A2 A3 B3 B3 B2 A1 B1
Y_2	1 2 3 5 6 4 7 8	A1 A2 A3 B2 B3 B1 B3 B3
Y_3	6 2 3 7 5 8 1 4	B3 A2 A3 B3 B2 B3 A1 B1
Y_4	1 7 5 4 3 2 8 6	A1 B3 B2 B1 A3 A2 B3 B3
Y_5	8 2 5 1 7 6 3 4	B3 A2 B2 A1 B3 B3 A3 B1

เมื่อได้เซตสตริงคาตอบเริ่มต้น (Y) แล้วจึงทาการคัดลอกเพื่อสร้างเซตสตริงคาตอบชั่วคราว (Z) ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	Priority	Model Sequence
Z_1	8 2 3 7 6 5 1 4	B3 A2 A3 B3 B3 B2 A1 B1
Z_2	1 2 3 5 6 4 7 8	A1 A2 A3 B2 B3 B1 B3 B3
Z_3	6 2 3 7 5 8 1 4	B3 A2 A3 B3 B2 B3 A1 B1
Z_4	1 7 5 4 3 2 8 6	A1 B3 B2 B1 A3 A2 B3 B3
Z_5	8 2 5 1 7 6 3 4	B3 A2 B2 A1 B3 B3 A3 B1

3.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราวแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 เพื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลาดับ

ตารางที่ 3.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
Y_1	39.2011	7.6161	179.1429
Y_2	39.2011	8.0057	248.8571
Y_3	48.4806	7.6161	151.7143
Y_4	39.2011	8.0057	162.0000
Y_5	39.2011	7.6161	154.2857
Z_1	39.2011	7.6161	179.1429
Z_2	39.2011	8.0057	248.8571
Z_3	48.4806	7.6161	151.7143
Z_4	39.2011	8.0057	162.0000
Z_5	39.2011	7.6161	154.2857

3.3.4 การกาหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคาตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และทำการกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ (k) ซึ่งจะมีค่าของสตริงคาตอบที่ดีเรียงลำดับไปหาสตริงคำตอบที่แย่จะเท่ากับ ซึ่งจะเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับค่าความแข็งแรง

ตารางที่ 3.4 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Species Count
Y_1	39.2011	7.6161	179.1429	2	2
Y_2	39.2011	8.0057	248.8571	3	1
Y_3	48.4806	7.6161	151.7143	1	3
Y_4	39.2011	8.0057	162.0000	2	2
Y_5	39.2011	7.6161	154.2857	1	3

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Species Count
Z_1	39.2011	7.6161	179.1429	2	2
Z_2	39.2011	8.0057	248.8571	3	1
Z_3	48.4806	7.6161	151.7143	1	3
Z_4	39.2011	8.0057	162.0000	2	2
Z_5	39.2011	7.6161	154.2857	1	3

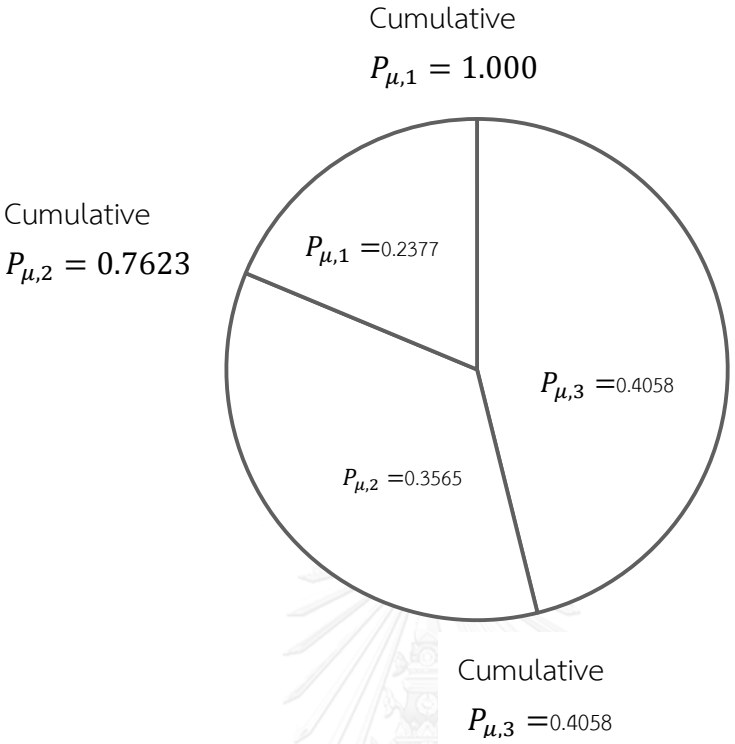
3.3.5 การคำนวณค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพคำตอบ

จากนั้นกำหนดค่าความแข็งแรงของแต่ละคำตอบด้วยวิธีการ Non-dominated Sorting พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์และคำนวณค่าต่างๆ ที่ใช้ในการอพยพ ได้ผลดังตารางที่ 3.4 สำหรับวงล้อรูเล็ตของค่าของค่า $P_{\mu,k}$ เป็นดังรูปที่ 3.2

วิธีการคำนวณค่าการอพยพแบบ Sinusoidal โดยการคำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของแต่ละสตริงคำตอบ y_i และ z_i โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.1ถึง สมการที่ 3.4 ผลการคำนวณดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าการอพยพและ ค่าความน่าจะเป็นของการอพยพ

Fitness	Species Count	N0.	String	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cumulative $P_{\mu,k}$
1	3	1	Y_3, Z_3	0.1464	0.8536	0.1634	0.4058	0.4058
		2	Y_5, Z_5					
2	2	1	Y_1, Z_1	0.2500	0.7500	0.2789	0.3565	0.7623
		2	Y_4, Z_4					
3	1	1	Y_2, Z_2	0.5000	0.5000	0.5578	0.2377	1.000



รูปที่ 3.2 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงอพยพออก

3.3.6 การอพยพคำตอบ

เมื่อได้ค่าในการอพยพครบถ้วนแล้ว ทำการอพยพคำตอบชั่วคราว ($\boldsymbol{Z_i}$) ทีละ สตริงคำตอบ โดยเรียงจากสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชีส์เคาท์มากที่สุดไปหาน้อยที่สุด มีขั้นตอนในการ อพยพคำตอบของแต่ละสตริงคำตอบดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มค่า$\boldsymbol{r_1}$ ซึ่งมีค่าระหว่าง [0, 1] ให้กับทุกบิต (Bit) ในสตริงคำตอบชั่วคราวที่ทำการพิจารณา
2. ถ้าค่า $r_1 \leq P_{\lambda,k}$ ในบิตใด แสดงว่าบิตนั้นจะเกิดการอพยพเข้าหรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตริงในเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น และจะถูกเลือกไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไป
3. ทำการสุ่มค่า $\boldsymbol{r_2}$ ซึ่งมีค่าระหว่าง [0, 1] ให้กับบิตที่ถูกเลือกในขั้นตอนที่ 2 แล้วพิจารณาว่าอยู่ในพื้นที่วงล้อรูเล็ตค่าสปีชีส์เคาท์ใด แล้วทำการเลือกสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y_i) ใน สปีชีส์เคาท์นั้นๆ (กรณีที่มีค่าสตริงคำตอบเริ่มต้นมากกว่า 1 สตริงคาตอบ ให้ทำการสุ่ม เลือก)
4. ทำการถ่ายทอดค่าบิตในตำแหน่งนั้นๆ ของสตริงคาตอบชั่วคราว ($\boldsymbol{Z_i}$) ให้มีค่าเหมือนกับค่าบิตในตาแหน่งนั้นๆของสตริงคาตอบเริ่มต้น (Y_i) ที่ถูกเลือกในขั้นตอนที่ 3

5. ทำการซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบตอบชั่วคราว ทำซ้ำจนครบทุกบิตในสตริงคำตอบ

6. ทำการประเมินค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ให้กับเซตของสตริงคำตอบชั่วคราว

ตารางที่ 3.6 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

สตริง	อพยพเข้า			อพยพออก				
	บิต	r_1	$r_1 \leq 0.1634$	r_2	สปีชีส์เคาท์	สตริงในสปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
Z_3	1	0.9317						
	2	0.3012						
	3	0.3743						
	4	0.9971						
	5	0.9869						
	6	0.0818	อพยพเข้า	0.684624	2	Y_1, Y_2	Y_1	5
	7	0.3178						
	8	0.9069						
Z_5	1	0.1495	อพยพเข้า	0.242097	3	Y_3, Y_5	Y_3	6
	2	0.2708						
	3	0.4495						
	4	0.5896						
	5	0.5377						
	6	0.3084						
	7	0.3899						
	8	0.2201						

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.7 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ

สตริง	อพยพเข้า			อพยพออก				
	บิต	r_1	$r_1 \leq 0.1634$	r_2	สปีชีส์เคาท์	สตริงในสปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
Z_1	1	0.6732						
	2	0.2747						
	3	0.5133						
	4	0.1229	อพยพเข้า	0.178116	3	Y_3, Y_5	Y_5	1
	5	0.0121	อพยพเข้า	0.377086	3	Y_3, Y_5	Y_3	5
	6	0.8709						
	7	0.8474						
	8	0.2747						
Z_4	1	0.8141						
	2	0.0473	อพยพเข้า	0.2864	3	Y_3, Y_5	Y_3	2
	3	0.9629						
	4	0.0213	อพยพเข้า	0.58121	2	Y_1, Y_4	Y_1	7
	5	0.5708						
	6	0.3742						
	7	0.4814						
	8	0.1254	อพยพเข้า	0.9215	1	Y_2	Y_2	8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.8 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ

สตริง	อพยพเข้า			อพยพออก				
	บิต	r_1	$r_1 \leq 0.1634$	r_2	สปีชีส์เคาท์	สตริงในสปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
Z_2	1	0.8909						
	2	0.0893	อพยพเข้า	0.6327	2	Y_1, Y_4	Y_4	7
	3	0.8676	อพยพเข้า	0.2592	3	Y_3, Y_5	Y_5	5
	4	0.9827						
	5	0.1292						
	6	0.1874	อพยพเข้า	0.4803	2	Y_1, Y_4	Y_4	2
	7	0.0003	อพยพเข้า	0.2401	3	Y_3, Y_5	Y_5	3
	8	0.9275						

ตารางที่ 3.9 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคาตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7	8
Z_3	6	8	5	เริ่มต้น	6	2	3	7	5	8	1	4
				ปรับปรุง	6	2	3	7	5	5	1	4
				ซ่อมแซม	6	2	3	7	8	5	1	4
Z_5	1	8	6	เริ่มต้น	8	2	5	1	7	6	3	4
				ปรับปรุง	6	2	5	1	7	6	3	4
				ซ่อมแซม	6	2	5	1	7	8	3	4

ตารางที่ 3.10 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคาตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7	8
Z_1	4	7	1	เริ่มต้น	8	2	3	7	6	5	1	4
				ปรับปรุง	8	2	3	1	6	5	1	4
				ซ่อมแซม	8	2	3	1	6	5	7	4
Z_1	5	6	5	เริ่มต้น	8	2	3	1	6	5	7	4
				ปรับปรุง	8	2	3	1	5	5	7	4
				ซ่อมแซม	8	2	3	1	5	6	7	4
Z_4	2	7	2	เริ่มต้น	1	7	5	4	3	2	8	6
				ปรับปรุง	1	2	5	4	3	2	8	6
				ซ่อมแซม	1	2	5	4	3	7	8	6
Z_4	4	4	7	เริ่มต้น	1	2	5	4	3	7	8	6
				ปรับปรุง	1	2	5	7	3	7	8	6
				ซ่อมแซม	1	2	5	7	3	4	8	6
Z_4	8	6	8	เริ่มต้น	1	2	5	7	3	4	8	6
				ปรับปรุง	1	2	5	7	3	4	8	8
				ซ่อมแซม	1	2	5	7	3	4	6	8

ตารางที่ 3.11 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคาตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 1

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7	8
Z_2	2	2	5	เริ่มต้น	1	2	3	5	6	4	7	8
				ปรับปรุง	1	5	3	5	6	4	7	8
				ซ่อมแซม	1	5	3	2	6	4	7	8
Z_2	3	3	5	เริ่มต้น	1	5	3	2	6	4	7	8
				ปรับปรุง	1	5	5	2	6	4	7	8
				ซ่อมแซม	1	3	5	2	6	4	7	8

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7	8
Z_2	6	4	2	เริ่มต้น	1	3	5	2	6	4	7	8
				ปรับปรุง	1	3	5	2	6	2	7	8
				ซ่อมแซม	1	3	5	4	6	2	7	8
Z_2	7	7	3	เริ่มต้น	1	3	5	4	6	2	7	8
				ปรับปรุง	1	3	5	4	6	2	3	8
				ซ่อมแซม	1	7	5	4	6	2	3	8

ตารางที่ 3.12 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ

String	Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Species Count
Z_1	8 2 3 1 5 6 7 4	29.9216	7.6161	210.8571	1	3
Z_2	1 7 5 4 6 2 3 8	48.4806	7.6161	151.7143	2	2
Z_3	6 2 3 7 8 5 1 4	39.2011	8.0057	162.0000	2	2
Z_4	1 2 5 7 3 4 6 8	39.2011	8.0057	248.8571	3	1
Z_5	6 2 5 1 8 7 3 4	39.2011	7.6161	154.2857	1	3

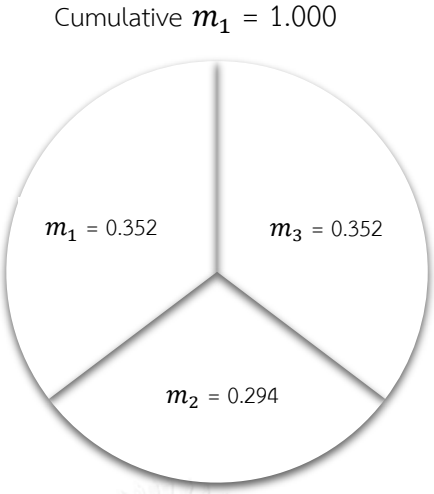
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.7 การมิวเตชัน

เมื่อได้ทำการอพยพสตริงคำตอบชั่วคราวทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว ได้สตริงออกมาดังแสดงในตารางที่ 3.13 สามารถกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท์ ตลอดจนคำนวณค่าต่างๆ ที่ใช้ประกอบการมิวเตชันได้ดังตารางที่ 3.14 ขณะที่วงล้อรูเล็ตของค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกไปมิวเตชันของคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k (m_k) เป็นดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.13 ค่าที่ใช้ประกอบการมิวเตชันของสตริงคำตอบชั่วคราว z หลังอพยพ

Fitness	Species Count (k)	No.	String	P_k	$1 - P_k$	m_k	Cumulative m_k
1	3	1	z_5, z_1	0.250	0.75	0.352	0.352
2	2	1	z_2, z_3	0.375	0.625	0.294	0.647
3	1	1	z_4	0.250	0.75	0.352	1.000



รูปที่ 3.3 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงไปทำการมิวเตชัน

ขั้นตอนต่อไปเป็นการสุ่มเลือกสตริงคำตอบชั่วคราวออกมาทำการมิวเตชัน ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation โดยพิจารณาบิตทีละบิตเริ่มจากตำแหน่งแรก มีขั้นตอน ดังนี้

1) สุ่มค่า r_3 ในช่วง [0, 1] ในที่นี้ได้ r_3 เท่ากับ 0.483 ตกอยู่ในวงล้อรูเล็ต m_k ของสปีชีส์เคาท์ 2

2) ทำการคัดลอกสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 ทั้งหมดมาทำการมิวเตชัน พบว่ามีสตริง z_2และ z_3 เพียงสตริงเดียว จึงคัดลอกออกมาเป็นสตริง z_2' และ z_3'

3) สุ่มค่า r_4 ในช่วง [0, 1] ให้กับทุกบิตของสตริงคำตอบ z_2' และ z_3'

4) เมื่อ $r_4 \leq P_m$ (ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน กำหนดให้ P_m เท่ากับ 0.1) ให้สุ่มเลือกบิตใดก็ได้ในสตริงเดียวกันนี้ขึ้นมาอีกหนึ่งบิตแล้วสลับค่าบิตกัน

5) จากนั้นให้พิจารณาการมิวเตชันด้วยการสุ่มเลข r_4 ในขั้นตอนที่ 3 และ 4 ให้กับบิตถัดๆ ไปจนครบทุกสตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.14 การเลือกบิตไปทำการมิวเตชัน

String	1	2	3	4	5	6	7	8
z_2'	0.2641	0.3190	0.0755	0.1252	0.3974	0.1067	0.4073	0.0004
	-	-	Selected	-	-	-	-	Selected
z_3'	0.7294	0.0169	0.9167	0.5037	0.7905	0.0053	0.3323	0.9837
	-	Selected	-	-	-	Selected	-	-

ตารางที่ 3.15 การมิวเตชันสตริงคาตอบ z_2'

ลำดับ	คู่บิตมิวเตชัน	1	2	3	4	5	6	7	8
	z_2' (ก่อนมิวเตชัน)	1	7	5	4	6	2	3	8
1	บิต 2 กับ บิต 3	1	5	7	4	6	2	3	8
2	บิต 8 กับ บิต 1	8	5	7	4	6	2	3	1
	z_2' (หลังมิวเตชัน)	8	5	7	4	6	2	3	1

ตารางที่ 3.16 การมิวเตชันสตริงคาตอบ z_3'

ลำดับ	คู่บิตมิวเตชัน	1	2	3	4	5	6	7	8
	z_3' (ก่อนมิวเตชัน)	6	2	5	1	7	8	3	4
1	บิต 2 กับ บิต 5	6	7	5	1	2	8	3	4
2	บิต 6 กับ บิต 4	6	7	5	8	2	1	3	4
	z_3' (หลังมิวเตชัน)	6	7	5	8	2	1	3	4

3.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดได้ถูกนำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดและเป็นการป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีหลักจากการผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบ เนื่องจากอาจทำให้เกิดคำตอบที่ดีกว่าหรือแย่กว่าคำตอบ ที่เคยปรากฏในเจนเนอเรชันที่ผ่านมา จึงได้มีการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของ กลุ่มสตริงคาตอบชุดใหม่ที่ได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการรวมสตริงคำตอบเริ่มต้น Y สตริงคำตอบชั่วคราว Z และสตริงคำตอบหลังการทำ มิวเตชัน Z' เพื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 3.17 สตริงคำตอบและการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

String		Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
Y	Y_1	8 2 3 7 6 5 1 4	39.2011	7.6161	179.1429
	Y_2	1 2 3 5 6 4 7 8	39.2011	8.0057	248.8571
	Y_3	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143
	Y_4	1 7 5 4 3 2 8 6	39.2011	8.0057	162.0000
	Y_5	8 2 5 1 7 6 3 4	39.2011	7.6161	154.2857
z	Z_1	8 2 3 1 5 6 7 4	29.9216	7.6161	210.8571
	Z_2	1 7 5 4 6 2 3 8	48.4806	7.6161	151.7143
	Z_3	6 2 3 7 8 5 1 4	39.2011	8.0057	162.0000
	Z_4	1 2 5 7 3 4 6 8	39.2011	8.0057	248.8571
	Z_5	6 2 5 1 8 7 3 4	39.2011	7.6161	154.2857
z'	z'_2	8 5 7 4 6 2 3 1	48.4806	8.0057	124.5714
	z'_3	6 7 5 8 2 1 3 4	39.2011	7.6161	144.0000

ตารางที่ 3.17 แสดงสตริงคำตอบทั้งหมดจากเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y เซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z และเซตสตริงคำตอบชั่วคราวที่ผ่านการมิวเตชัน Z' จากการพิจารณาพบว่าไม่สตริงซ้ำจึงไม่มีสตริงใดถูกตัดออกไป (ถ้ามี ให้ตัดสตริงตัวที่ซ้ำออกไปให้เหลือเพียงสตริงเดียว) ผลการจัดอันดับสตริงเหล่านี้ร่วมกันพร้อมค่า Crowding Distance ของแต่ละสตริงเป็นดังตารางที่ 3.17 คำตอบอันดับที่ 1 ทั้งหมดจะถูกนำไปพิจารณาจัดเก็บเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของกระบวนการค้นหาคำตอบ ซึ่งในที่นี้คือสตริงคำตอบ y_3 เพียงคำตอบเดียว และเนื่องจากการดำเนินการค้นหาคำตอบเพิ่งเสร็จสิ้นเป็นเจนเนอเรชันแรก สตริง y_3 จึงเป็นสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบทั้งหมดที่ผ่านมา (Elitist) สิ้นสุดที่เจนเนอเรชันที่ 1 ด้วย (ตารางที่ 3.19)

ลำดับต่อไป พิจารณาตารางที่ 3.18 เพื่อเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด 5 สตริงแรกไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ของเจนเนอเรชันถัดไป (เจนเนอเรชันที่ 2) ซึ่งผลการเลือก 5 สตริงเรียงจากสตริงที่ดีสุดไปแย่สุด ได้แก่ สตริง y_3, z_1, y_1, y_1 และ y_5 ตามลำดับ ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าสตริงตัวที่ 5 นั้นจริงๆ แล้วสามารถเลือกสตริง y_4 หรือ y_5 ก็ได้ เพราะเป็นคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากัน อีกทั้งยังมีค่า Crowding Distance เท่ากันอีก (ถ้าค่า Crowding Distance ต่างกัน จะเลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance สูง)

ตารางที่ 3.18 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับสตรงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการ

String		Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance
Y	Y_1	8 2 3 7 6 5 1 4	29.9216	7.6161	21.001	4	Infinity
	Y_2	1 2 3 5 6 4 7 8	39.2011	10.0057	14.3713	5	Infinity
	Y_3	6 2 3 7 5 8 1 4	65.4806	8.0057	12.4286	3	Infinity
	Y_4	1 7 5 4 3 2 8 6	83.242	15.6325	14.3713	3	Infinity
	Y_5	8 2 5 1 7 6 3 4	29.371	7.6161	19.2953	2	1.2500
z	Z_1	7 2 3 6 1 5 4 8	29.9216	7.6161	11.5201	1	Infinity
	Z_2	7 5 4 1 8 2 3 6	39.2101	8.0057	14.3713	2	1.0014
	Z_3	8 2 3 1 5 7 4 6	45.4386	8.0057	12.4286	2	Infinity
	Z_4	8 2 3 7 1 5 4 6	43.4251	8.6325	14.3713	5	Infinity
	Z_5	8 2 4 7 5 1 3 6	31.371	5.848	15.2813	2	1.7500
z'	z'_2	6 4 5 1 8 2 3 7	39.2101	8.0057	14.3713	1	1.9986
	z'_3	8 5 3 7 2 1 4 6	29.371	7.6161	19.2953	1	3.0000

2. ทำการเก็บค่าคำตอบที่ดีที่สุดให้เท่ากับจำนวนประชาการเริ่มต้นในรุ่นถัดไป

เก็บค่าคำตอบที่ดีที่สุดด้วยการเลือกคำตอบที่ดีที่สุด จากตารางที่ 3.18 จะเห็นว่าค่าสตริงคำตอบไม่มีสตริงคำใดที่ซ้ำกันเลยจึงไม่สามารถตัดสตริงคำตอบใดได้ จากนั้นหาค่า Fitness และ ค่า Crowding Distance โดยเลือกเก็บค่าที่ดีที่สุดจากค่า Fitness เท่ากับ 1 ซึ่งมี Z_1, Z'_2, Z'_3 ซึ่งยังไม่เพียงพอเนื่องจากจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้นคือ 5 สตริงคำตอบ เพราะฉะนั้นจึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบมีค่า Fitness เท่ากับ 2 มาอีก 2 สตริงคำตอบ โดยพิจารณาเลือกจากสตริงคำตอบที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด จากตารางที่ จะเห็นว่า Fitness เท่ากับ 2 มีอยู่ 4 สตริงคำตอบ ทำให้ต้องมีการพิจารณาจากค่า Crowding Distance พบว่ามีสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance สูงสุดคือ Z_3 และ Z_5 (ถ้าสริงตริงคำตอบมีค่าสูงสุดมากกว่า 1 ค่า ให้ทำการต้องสุ่มเลือกสตริงคำตอบมา 1 สตริงคำตอบ)

ตารางที่ 3.19 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรุ่นถัดไป

String	Priority
Y_1	8 2 3 7 6 5 1 4
Y_2	6 2 3 7 5 8 1 4
Y_3	8 2 5 1 7 6 3 4
Y_4	6 4 5 1 8 2 3 7
Y_5	8 5 3 7 2 1 4 6

3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

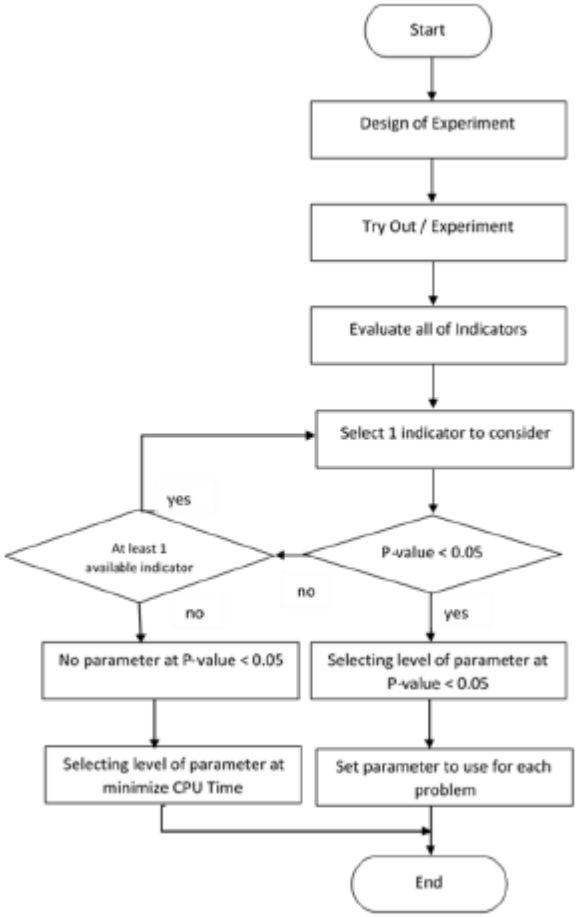
เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่มีความแตกต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบมีความแตกต่างกันดังนั้น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์จำต้องมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับปัญหาที่นำมาทำการทดลอง ทั้งนี้พารามิเตอร์ที่ใช้ของ BBO มีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ประกอบด้วยขนาดประชากร (N) รอบการทำงานของอัลกอริทึม (R) ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Pm) และรูปแบบการอพยพ เนื่องจากงานวิจัยได้ผ่านการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO ในส่วนของรูปแบบการอพยพ และรอบการทางานของอัลกอริทึมมาแล้วในงานวิจัยก่อนหน้า (ณัฐชัย โยธาบริบาล, 2014)

งานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าพารามิเตอร์เฉพาะค่าความน่าจะเป็นในการมิวชันและขนาดของประชากร จึงได้ ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยทำจำนวน 2 ซ้ำ โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 6 ตัวชี้วัด ประกอบด้วย การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) อัตราส่วนของจานวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบทีอัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time) เป็น ตัวแปรตอบสนองกับระดับปัจจัยที่กำหนดข้างต้น

3.4.1 ผังขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด สามารถสรุปได้ดังผังขั้นตอนการการทำงานรูปที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design
2. ทำการทดลองจำนวน 2 รอบการทดลองซ้ำ
3. คำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมดในทุกระดับปัจจัย เพื่อใช้เป็นค่าตัวแปรตอบสนอง
4. พิจารณาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ ครั้งละ 1 ตัวชี้วัด ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab 17

5. สรุปผลจากขั้นตอนข้างต้น โดยมีขั้นตอนการพิจารณาคือ

- ในกรณีที่ค่า p-value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ α=0.05 จะตัดสินใจยอมรับว่าที่ระดับปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แล้วจึงทำการเลือกระดับของค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- ในกรณีที่ค่า p-value ของปัจจัยร่วม มีค่ามากกว่าที่ระดับ α=0.05 จะตัดสินใจปฏิเสธว่าที่ระดับปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แล้วจึงทาการพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะถัดไปเป็นตัวแปรตอบสนอง จนครบทุกตัวชี้วัดสมรรถนะ
- ในกรณีที่ค่า P-value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ α=0.05 มากกว่า 1 ตัวชี้วัดสมรรถนะ จะทำการพิจารณาจากระดับความสำคัญของตัวชี้วัดสมรรถนะดังต่อไปนี้
  - ระดับที่ 1 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต
  - ระดับที่ 2 อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง
  - ระดับที่ 3 อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบทีอัลกอริทึมหาได้
  - ระดับที่ 4 จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต
  - ระดับที่ 5 การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ
- หากค่าตัวชี้วัดทุกตัวมีค่า P-value ของปัจจัยร่วม มีค่ามากกว่าที่ระดับ α=0.05 ทั้งหมด จะทำการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

6. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

3.4.3 ตัวอย่างการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

ในตัวอย่างนี้จะทำการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลในปัญหาขนาด 49 ขั้นงาน Set 1.1 มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์ร่วมเท่ากับ 1:1:1:2 บนสายการประกอบแบบขนานที่ผ่านการจัดสมดุล ที่มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 30 หน่วยเวลา กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 ค่าพารามิเตอร์และระดับปัญจัยที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1
		0.2
		0.3
	ขนาดของประชากร	80
		90
		100

จากตารางที่ 3.20 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการการมิวเตชันเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 ความน่าจะเป็นการมิวเตชันเท่ากับ 0.1 ระดับที่ 2 ความน่าจะเป็นการมิวเตชันเท่ากับ 0.2 และ ระดับที่ 3 ความน่าจะเป็นการมิวเตชันเท่ากับ 0.3 กำหนดให้ระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบพารามิเตอร์ด้านประชากรขนาดของประชากรเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 ขนาดประชากรเป็น 80 ระดับที่ 2 ขนาดประชากรเป็น 90 และ ระดับที่ 3 ขนาดประชากรเป็น 100 เมื่อนำไปทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ จะได้ผลตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะตามระดับปัจจัยค่าพารามิเตอร์

ค่าความน่าจะเป็น	ขนานของประชากร	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Times (s)
0.1	80	0.097404375	0.540681	0.500000	0.777778	12	2.631
0.1	80	0.073104386	0.334568	0.666667	0.888889	12	3.260
0.1	90	0.092844824	0.462498	0.471429	0.888889	10	3.812
0.1	90	0.094507049	0.34853	0.571429	0.888889	12	3.552
0.1	100	0.0000000	0.549864	0.750000	1.000000	12	3.457
0.1	100	0.0000000	0.461109	0.833333	1.000000	10	3.450
0.2	80	0.1113571	0.55698	0.700000	0.777778	10	2.598
0.2	80	0.042725768	0.486548	0.700000	0.777778	10	2.693
0.2	90	0.156375239	0.523586	0.461538	0.666667	11	3.800
0.2	90	0.149283599	0.493772	0.692308	1.000000	11	3.920
0.2	100	0.012705193	0.544791	0.636364	0.777778	12	3.475

ตารางที่ 3.21 (ต่อ) ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะตามระดับปัจจัยค่าพารามิเตอร์

ค่าความน่าจะเป็น	ขนานของประชากร	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Times (s)
0.2	100	0.011379065	0.381487	0.666667	0.888889	12	3.434
0.3	80	0.16587852	0.470332	0.583333	0.777778	10	2.686
0.3	80	0.155339516	0.452272	0.545455	0.666667	10	2.711
0.3	90	0.134868867	0.496945	0.555556	0.555556	9	3.780
0.3	90	0.140468892	0.562649	0.666667	0.666667	9	3.157
0.3	100	0.072826704	0.553375	0.5000000	0.444444	8	3.753
0.3	100	0.063927861	0.68589	0.5000000	0.444444	8	3.603

หลังจากได้ผลตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 3.21 ทำการกำหนดสมมติฐานดังต่อไปนี้

สมมติฐานการวิจัย : ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน และขนาดของประชากรไม่มีอิทธิพลต่อตัวชี้วัดสมรรถนะ

สมมติฐานสถิติ : $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \ldots \mu_k$

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \ldots \mu_k$

ระดับนัยสาคัญ (α) : 0.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลด้วย Two-way ANOVA ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.5

Two-way ANOVA : Convergence versus Pm, Popsize

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pm	2	0.012171	22.22%	0.012171	0.006085	19.64	0.001
Popsize	2	0.034404	62.80%	0.034404	0.017202	55.52	0.000
Pm*Popsize	4	0.005421	9.90%	0.005421	0.001355	4.37	0.031
Error	9	0.002789	5.09%	0.002789	0.000310		
Total	17	0.054785	100.00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.0176024	94.91%	90.39%	0.0111544	79.64%

รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้การลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ α=0.05 หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชัน และขนาดของประชากร มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คาตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงสามารถพิจารณา

2. วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายตัวของกลุ่มคาตอบเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.4

Two-way ANOVA : Spread versus Pm, Popsize

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pm	2	0.02299	18.93%	0.02299	0.011493	1.75	0.228
Popsize	2	0.01099	9.05%	0.01099	0.005493	0.84	0.464
Pm*Popsize	4	0.02844	23.42%	0.02844	0.007111	1.08	0.420
Error	9	0.05903	48.61%	0.05903	0.006559		
Total	17	0.12145	100.00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.0809904	51.39%	8.18%	0.236140	0.00%

รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วมมีค่ามากกว่าที่ระดับ α=0.05 หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชัน และขนาดของประชากร ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

3. วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบทีอัลกอริทึมหาได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.7

Two-way ANOVA : RNDS1 versus Pm, Popsize

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pm	2	0.02529	13.34%	0.02529	0.012645	2.02	0.189
Popsize	2	0.01841	9.71%	0.01841	0.009206	1.47	0.280
Pm*Popsize	4	0.08959	47.24%	0.08959	0.022397	3.58	0.052
Error	9	0.05634	29.71%	0.05634	0.006260		
Total	17	0.18963	100.00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.0791186	70.29%	43.88%	0.225351	0.00%

รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ α=0.05 หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชัน และขนาดของประชากร ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงาเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.8

Two-way ANOVA : RNDS2 versus Pm, Popsize

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pm	2	0.314129	62.14%	0.314129	0.157064	17.62	0.001
Popsize	2	0.001372	0.27%	0.001372	0.000686	0.08	0.927
Pm*Popsize	4	0.109739	21.71%	0.109739	0.027435	3.08	0.074
Error	9	0.080247	15.88%	0.080247	0.008916		
Total	17	0.505487	100.00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.0944263	84.12%	70.01%	0.320988	36.50%

รูปที่ 3.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ α=0.05 หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชันและ ขนาดของประชากร ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง

5. วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.9

Two-way ANOVA : NNDS versus Pm, Popsize

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pm	2	19.1111	58.90%	19.1111	9.5556	21.50	0.000
Popsize	2	0.4444	1.37%	0.4444	0.2222	0.50	0.622
Pm*Popsize	4	8.8889	27.40%	8.8889	2.2222	5.00	0.021
Error	9	4.0000	12.33%	4.0000	0.4444		
Total	17	32.4444	100.00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0.666667	87.67%	76.71%	16	50.68%

รูปที่ 3.9 วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วมมีค่ามากกว่าที่ระดับ α=0.05 หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชันและ ขนาดของประชากร ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

6. จากขั้นตอนที่ 1-5 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชัน และขนาดของประชากร จะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองมากกว่า 1 ตัวแปร จึงทำการพิจารณาจากระดับความสาคัญของตัวชี้วัดสมรรถนะ ซึ่งตัวแปรที่มีระดับความสาคัญมากที่สุดคือ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คาตอบที่แท้จริง พบว่าปัจจัยด้านค่าความน่าจะเป็นการมิวเตชันระดับที่ 1 คือ 0.1 และปัจจัยขนาดของประชากร ระดับที่ 2 คือ 100 มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าดังตารางที่ 3.22

ตารางที่ 3.22 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1
ขนาดของประชากร	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
อัลลกอริทึมที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย

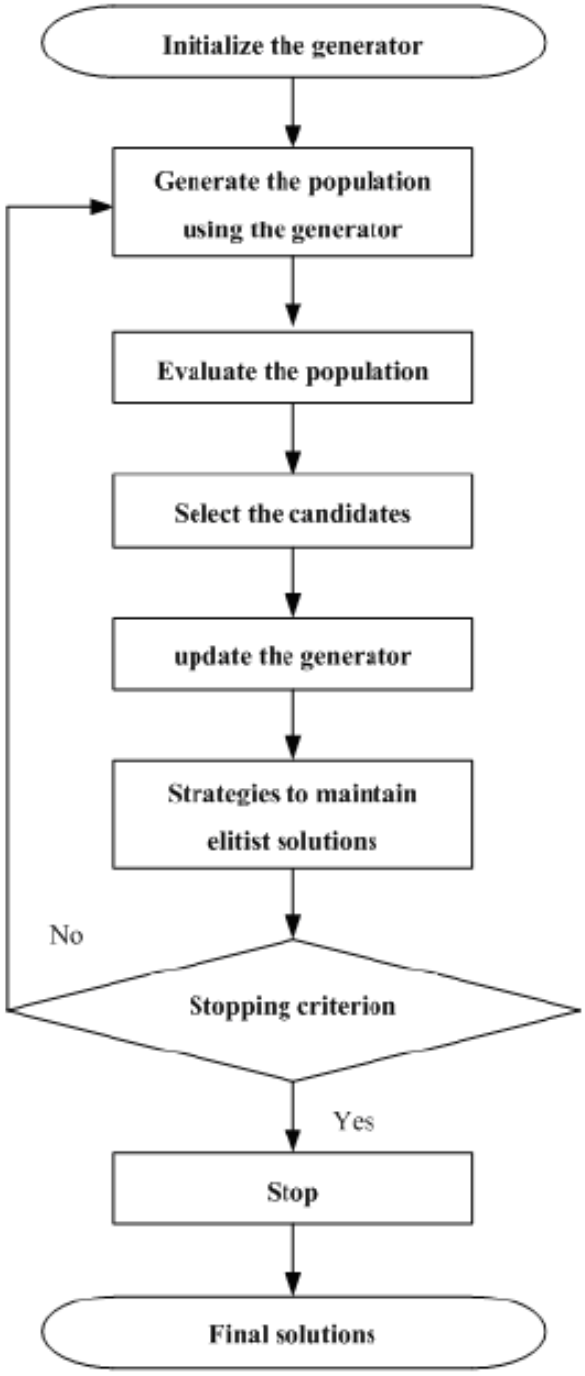
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและขั้นตอนการทำงานของแต่ละอัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ ซึ่งอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ วิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E) วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม II (NSGA-II) และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO)

4.1 อัลกอริทึมวิธีการบรรจวบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Expand: COIN-E)

วิธีกาบรรจวบแบบขยานวิธีการบรรจวบแบบขยายได้พัฒนามาจากแนวคิดหลักของ COIN คือ การค้นหาคำตอบที่ดี (Good) และคำตอบที่ไม่ดี (Not Good) ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดทิศทางของคำตอบสุดท้าย และทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นตลอดทุกๆรอบการทำงาน เพื่อให้รางวัลแก่คำตอบที่ดีทำให้โอกาสที่คู่อันดับในสตริงคำตอบที่ดีนั้นจะมีโอกาสถูกสุ่มเจอในรอบต่อไปมากยิ่งขึ้น และทำการลงโทษแก่สตริงคำตอบที่ไม่ดีทำให้คู่อันดับที่อยู่ในสตริงคำตอบที่ไม่ดีจะมีโอกาสถูกสุ่มเจอน้อยลงไปในรอบการทำงานต่อๆไป โดยที่ COIN-E จะเพิ่มตารางความน่าจะเป็นร่วมอีก 3 ตารางจากแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อช่วยปรับปรุงตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบให้ดียิ่งขึ้น (สถาพร โอฬารภิวัฒน์, 2013)

การทำงานของ COIN-E จะคัดเลือกคำตอบดีและไม่ดีจากทั้ง 4 ตาราง และทำการปรับปรุงโดยตารางที่1 ซึ่งเป็นตารางวิธีการ COIN สตริงคำตอบที่ดีจะมีค่าความแข็งแรง (Fitness) น้อยที่สุดและสตริงคำตอบที่ไม่ดีจะมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ส่วนตารางที่ 2, 3 และ 4 จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็น โดยคำตอบที่ดีคือคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และสตริงคำตอบที่ไม่ดีคือสตริงคำตอบที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากทีสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ ซึ่งตารางทั้ง 4 ตาราง จะใช้ในการสุ่มประชากรในรอบถัดไป โดยสุ่มจากตาราง COIN ร้อยละ 70 ที่เหลือสุ่มจากตารางวัตถุประสงค์อีกร้อยละ 30 ซึ่ง COIN-E มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ ดังรูปที่ 4.1

4.1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ COIN-E



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ COIN-E

4.1.2 ขั้นตอนการทำงานของ COIN-E

ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

1. Initialize the generator สร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นขนาด n x n โดยที่ n คือความยาวของผลรวม MPS ของแต่ละปัญหา

2. Generate the population using the generator สุ่มประชากรเริ่มต้นจากตารางความน่าจะเป็นร่วมจำนวนเท่ากับประชากร (Population Size) เริ่มต้นที่กำหนดไว้

3. Evaluation the population ประเมิณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละสตริงคำตอบ โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุดและ เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด จากนั้นทำการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับแต่ละสตริงคำตอบด้วยเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Non-dominated Sorting) โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดี

4. Select the candidates คัดเลือกคำตอบดีและไม่ดี โดยในตารางที่1 ซึ่งเป็นตารางวิธีการ COIN สตริงคำตอบที่ดีจะมีค่าความแข็งแรง (Fitness) น้อยที่สุด และสตริงคำตอบที่ไม่ดีจะมีค่าความแข็งแรงมากที่สุด ส่วนตารางที่ 2 3 และ 4 จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็น โดยคำตอบที่ดีคือคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และสตริงคำตอบที่ไม่ดีคือสตริงคำตอบที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์

5. Update the generator ทำการปรับปรุงค่าตารางความน่าจะเป็นร่วมโดยการให้รางวัล (Reward) แก่สตริงคำตอบที่ดีโดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็น และลงโทษ (Punish) สตริงคำตอบที่ไม่ดีโดยการลดความน่าจะเป็น เพื่อจะนำไปใช้ในการสุ่มเลือกประชากรในรอบถัดไป โดยที่การสุ่มประชากรในรอบถัดไปจะสุ่มจากตาราง COIN มาร้อยละ 70 ของประชากรทั้งหมด และจากตารางของแต่ละวัตถุประสงค์ ร้อยละ 10 ของประชากรทั้งหมด

6. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการ Non-dominated Sorting เพื่อทำการเก็บค่าคำตอบที่ดีที่สุดไว้

7. Repeat Step 2 กลับไปทาในขั้นตอนที่ 2 จนกระทั้งครบตามจานวนรอบที่กำหนด

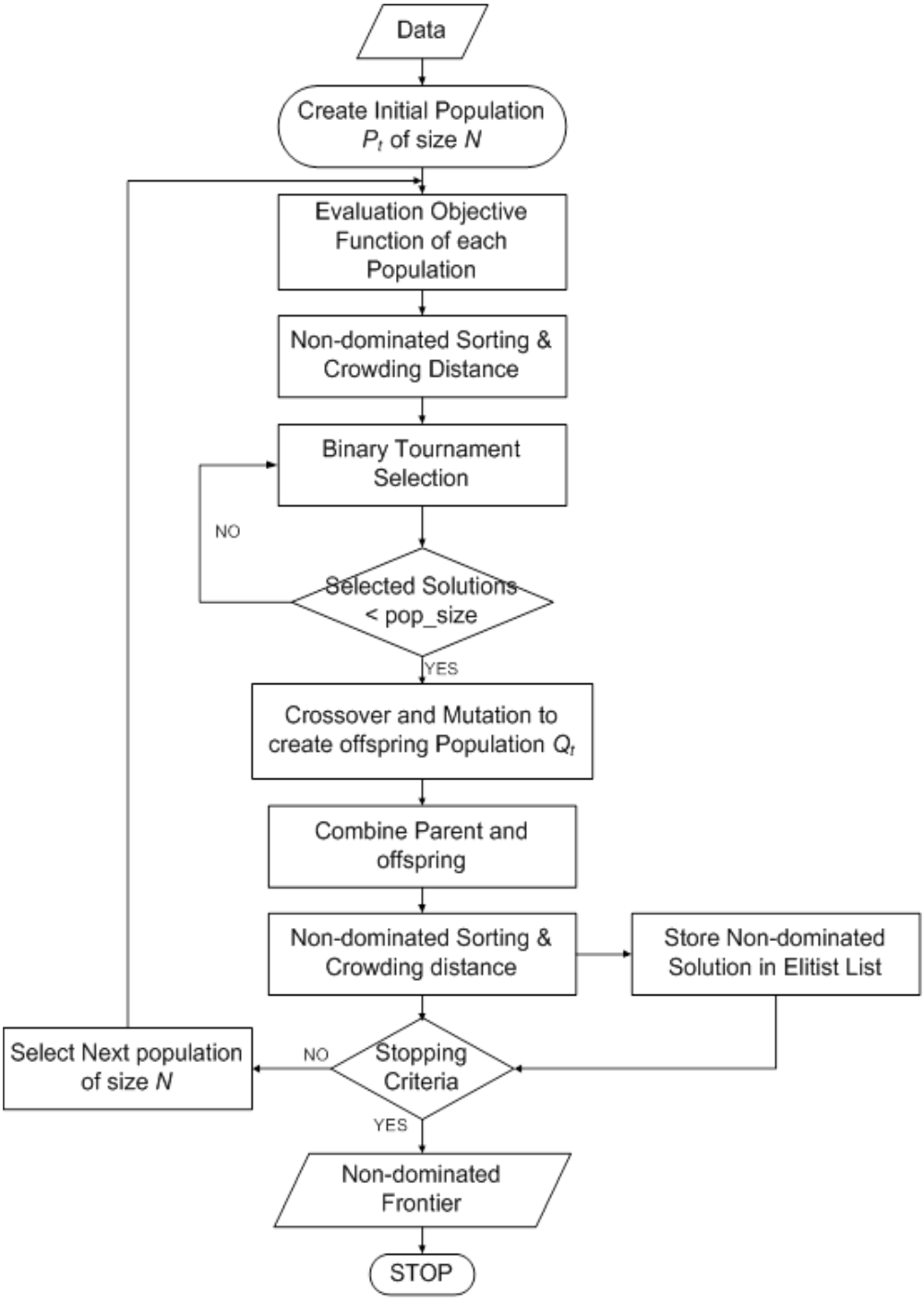
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มีหลายวัตถุประสงค์ สามารถศึกษาได้จาก ภาคผนวก ก

4.2 วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม II (NSGA-II)

วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีเมทาฮิวริสติกอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการค้นหาคำตอบหรือปัญหาที่มีความซับซ่อนไดเป็นอย่างดี อย่างเช่น ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบแบบต่างๆ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับเจนเนติกอัลกอริทึมนั้น พบว่างานวิจัยที่ที่เกี่ยวได้นำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมมาช่วยในการแก้ปัญหาจำนวนมากทำให้บ่งชี้ได้ว่าวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและเป็นวิธีที่นักวิชาการให้กานยอมรับว่าเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิการแก้ปัญหาเป็นอย่างดี

วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม II หรืออัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) เป็นอัลกอริทึมที่เกิดจากแนวความคิดเรื่องพันธุกรรมของมนุษย์ โดยอาศัยหลักที่ว่าพ่อแม่จะถ่ายทอดพันธุกรรมไปสู่รุ่นลูก โดยการคัดเลือกโครโมโซม (Chromosome) หรือสตริงคำตอบ (String) ออกมาด้วยวิธีการสุ่มอย่างอิสระ ซึ่งในแต่ละสตริงคำตอบจะประกอบไปด้วยยีน (Gene) หรือคุณลักษณะ (Character) ที่มีความแตกต่างกัน หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover) เพื่อทำการแลกเปลี่ยนคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อทำให้สตริงคำตอบรุ่นลูกเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ หลังจากนั้นจะทำการสุ่มสตริงคำตอบรุ่นลูกบางส่วนเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน (Mutation) เพื่อทำการแลกเปลี่ยนคุณสมบัติภายในสตริงคำตอบนั้นๆ เพื่อให้เกิดความหลากหลายของสตริงคำตอบ และเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้ประชากรในสตริงคำตอบติดอยู่ในกลุ่มของคำตอบเฉพาะที่ โดยวิธีการทางฮิวริสติกนี้ถือเป็นวิธีการที่นำมาใช้ได้การค้นหาคำตอบ เนื่องจากจะได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด หรือมีความใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ทำให้ NSGA-II เป็นอีกหนึ่งอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ ดังรูปที่ 4.2

4.2.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-II

4.2.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-II

ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

1. Data Input การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิต ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนขั้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รอบเวลาดาเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ ผสมแบบหลายขนานที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

2. Representation & Initialization นำข้อมูลจากการนำเข้าในขั้นตอนที่ 1 มาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเลือกอย่างอิสระมาจำนวน N ตัว

3. Evaluation ประเมิณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละสตริงคำตอบ โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting

5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowing Distance

6. Selection นำสตริงคำตอบที่ดีเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection

7. Crossover นำสตริงคำตอบที่จัดไว้ใน Mating Pool มาทำการแลกเปลี่ยนลักษณะของตำแหน่งการผลิตของแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX)

8. Mutation นำสตริงคำตอบมาสลับกันภายในสตริงคำตอบของตัวเองด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation

9. Combination Population ทำการนำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนออกมาเป็นรุ่นลูก มารวมกับสตริงคำตอบเริ่มแรกที่เป็นของพ่อแม่

10. Selection Next Population คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการขั้นตอนที่ 9 เพื่อนำไปใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในแต่ละรอบต่อไป

11. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population นำคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันแล้วทำการคัดเลือกด้วยวิธีการ Non-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

dominated Sorting แล้วเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้และนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปสร้างเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

12. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนคำตอบที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือครบจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้

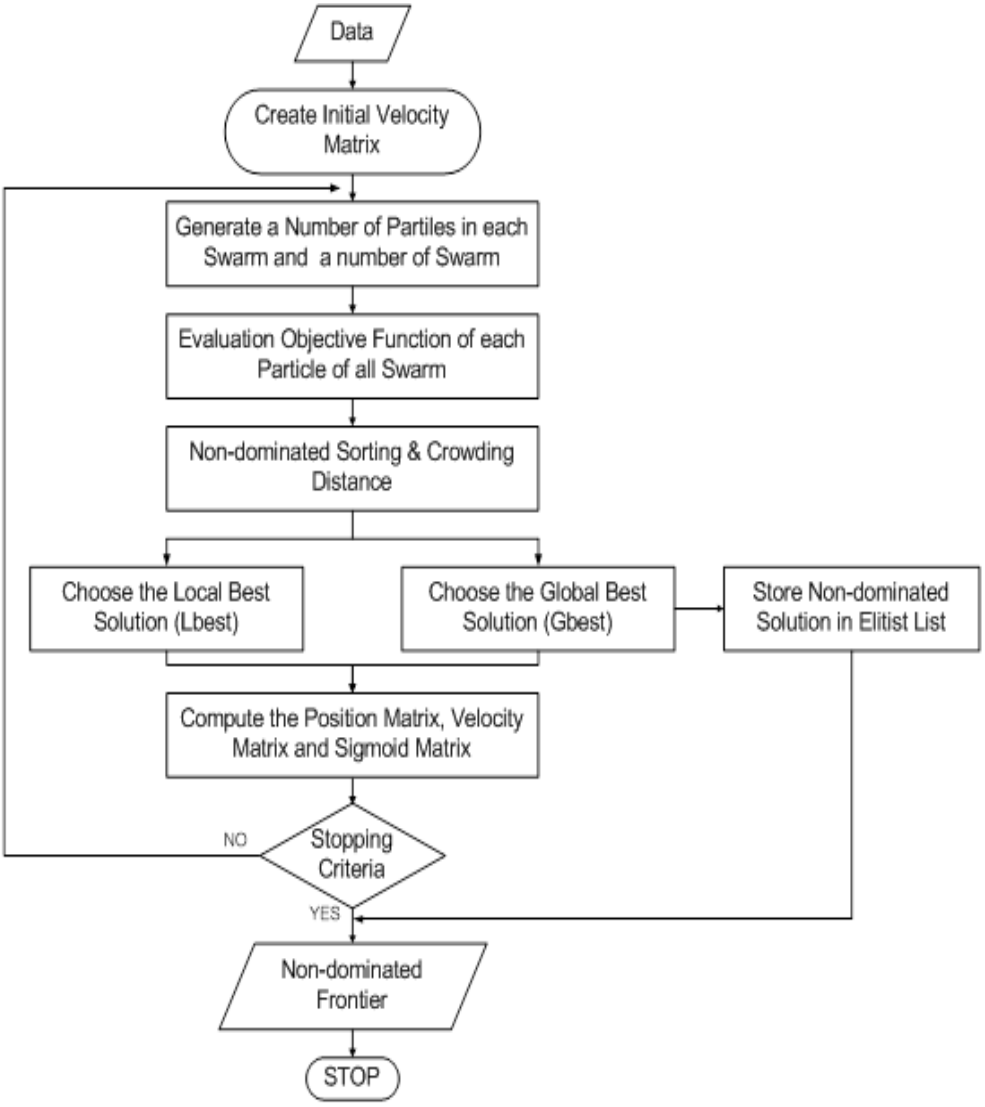
13. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วเก็บคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 12 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มีหลายวัตถุประสงค์ สามารถศึกษาได้จาก ภาคผนวก ข

4.3 อัลกอริทึมวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO)

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับการพัฒนามาจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งคิดค้นโดย Kennedy and Eberhart โดยเป็นอัลกอริทึมที่เกิดจากแนวความคิดเรื่องพฤติกรรมในการหาอาหารของนก โดยอาศัยการจดจำเส้นทางที่นกแต่ละฝูงใช้ในการออกบินเพื่อหาอาหารแล้วพบเจออาหารไว้ โดยที่นกในแต่ละฝูงจะจดจำเส้นทางที่ดีที่สุดไว้เพื่อที่จะสามารถบินมาหาอาหารได้ใหม่ในครั้งต่อไป โดยวิธีนี้จะทำให้สามารถค้นพบคำตอบได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากมีการจดจำเส้นทางที่ดีที่สุดที่จะนำไปสู่คำตอบที่ดี จากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) เพื่อให้เหมาะสมกับปัญหาการจัดตารางระบบผลิต มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ ดังรูปที่ 4.3

4.3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ DPSO



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการดำเนินงานของ DPSO

4.3.2 ขั้นตอนการดาเนินงานของ DPSO

ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

1. Data Input การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิต ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนขั้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รอบเวลาดาเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ ผสมแบบหลายขนานที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว
2. Representation & Initialization นำข้อมูลจากการนำเข้าในขั้นตอนที่ 1 มาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเลือกอย่างอิสระมาจำนวน N ตัว
3. Evaluation ประเมิณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละสตริงคำตอบ โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด
4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับแต่ละสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting
5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowing Distance
6. Selection เก็บค่าคำตอบจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) และเก็บคำตอบที่ดีจากสตริงคำตอบของประชากรทั้งหมด (Gbest) และนำมาคัดเลือกโดยวิธี Non-dominated Sorting
7. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population นำคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ทาการเก็บจากรอบก่อนหน้า แล้วมารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการเก็บในรอบปัจจุบันแล้วนำมาคัดเลือกหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยวิธี Non-dominated Sorting
8. Update Matrix ทำการอัพเดทตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และอัพเดทตารางตำแหน่งอนุภาค (Position Matrix) โดยที่ได้จากคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) และจากคำตอบที่ดีของสตริงคำตอบทั้งหมด (Gbest)
9. Compute Sigmoid Matrix นำตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมาสร้างเป็นค่าความน่าจะเป็นที่เรียกว่าตาราง Sigmoid Function โดยใช้ตารางนี้ในการสุ่มเลือกประชากรในรอบถัดไป

10. Stopping Criteria ทำการวนซ้ากระบวนการจนคำตอบที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือครบจำนวนรอบที่กำหนด

11. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วเก็บคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
ผลการทดลองและการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่เกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึมและทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม โดยมีอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกันได้แก่ BBO, COIN-E NSGA-II และ DPSO ซึ่งนำมาใช้กับการทดลองการแก้ปัญหาการจัดลำดับบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ปัญหาที่นำมาพิจารณาทั้งสิ้น 8 ปัญหา ซึ่งใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด (Chutima และ Olanviwatchai, 2010) ดังต่อไปนี้

- การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)
- การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)
- อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบทีอัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I)
- อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II)
- จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Number of Non-Dominated Solution)
- เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองบนสายการประกอบแบบขนานที่ผ่านการจัดสมดุลสายการประกอบมาแล้ว ซึ่งมีสายการประกอบแบบเส้นตรง 2 สายการประกอบขนานกันเท่านั้น แบ่งเป็นสายการประกอบ A และ B ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีทั้งสิ้น 8 ปัญหา ได้แก้ปัญหาขนาด 49 50 104 106 150 218 และ 222 ขั้นงาน โดยมีสายการการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลสายการประกอบมาแล้ว 8 สายการประกอบ โดยแต่ละปัญหาจะทำการทดลองซ้ำปัญหาละ 2 รอบการทดลอง ทำให้การทดลองย่อยในงานวิจัยนี้มีขนาด 16 การทดลองต่อ 1 อัลกอริทึม

ตัวอย่างเช่น ปัญหาการทดลองขนาด 49 (Set 1.1) จะมีขั้นงานบนสายการประกอบ A เท่ากับ 25 และ ขั้นงานบนสายการประกอบ B เท่ากับ 24 โดยสายการประกอบ A มีสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์เป็น 2 (1:1) สายการประกอบ B มีสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์เป็น 5 (2:3) ใน

การทดลองการจัดลำดับการผลิต จะมีสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ร่วมของกสายการประกอบ A และ B เท่ากับ 7 ปัญหาการทดลองนี้จะทำการทดลองบนสายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลของสายการประกอบ A และ B ทำการทดลองซ้ำสองครั้ง ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ที่มาของปัญหา	Set.	Line A (MPS A)	Line B (MPS B)	No. of Total Tasks	Total MPS	Replication	Problem
Rosenberg และ Ziegler (1992)	Set 1.1	25(1:1)	24(2:3)	49	7	1	1
						2	2
	Set 1.2	25(1:1:1)	25(1:1:3)	50	8	1	3
						2	4
Hahn (1972)	Set 2.1	53(1:2)	51(1:2)	104	6	1	5
						2	6
	Set 2.2	53(1:1:1:1)	53(1:2:2:3)	106	12	1	7
						2	8
Wee และ Magazine (1981)	Set 3.1	75(1:2:2:3)	71(1:1:2:4)	146	16	1	9
						2	10
	Set 3.2	75(1:1:2:4)	75(1:3:3:5)	150	20	1	11
						2	12
Arcus (1965)	Set 4.1	111(1:1:1)	107(1:1:3)	218	8	1	13
						2	14
	Set 4.2	111(1:1:1:3:3)	111(1:2:3:3:6)	222	24	1	15
						2	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 วิธีการทดลอง

ใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยวิธีการของแต่ละอัลกอริทึม โดยเมื่อทำการทดลองหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตลอดทั้งกระบวนการทำงานซ้ำเดิมตามจำนวนรอบการทำงานตามผลการทดลอง
2. เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แต่อัลกอริทึมหามาได้ (Obtained Pareto-optimal Solution) จึงนำมารวมกันแล้วจัดอันดับคำตอบด้วยวิธีแบบ Non-dominated

Sorting จึงทำการคัดเลือกคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงสูง (Fitness) นั้นคือ คำตอบที่อยู่ในอันดับที่ 1 (คำตอบที่มีค่าดีที่สุด) มากำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-optimal Solution)

3. นำค่าที่ได้มาประเมิณดัชนีชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึมมาทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งประกอบไปด้วยตัวดัชนีชี้วัดทั้งสิ้น 6 ตัว เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองแก้ตัวอย่างปัญหาผ่านผ่านโปรแกรม Visual Studio 2013 ภาษา C++ ประมวลผลด้วย คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ยี่ห้อ LENOVO Intel Core i5-2410M CPU 2.3 GHz RAM 4.0 GB 64 bit-Operation system

5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้กับอัลกอริทึม

ในการทำการทดลองของปัญหาการทดลองทั้ง 8 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง ได้มีการนำเอาอัลกอริทึมต่างๆ เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ค่าพารามิเตอร์อยู่หลายค่าด้วยกัน ดังนั้นควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาสมกับปัญหานั้น เนื่องด้วยปัญหาที่นำมาแก้ไขเป็นปัญหาจากงานวิจัยก่อนหน้าการกำหนดค่าพารามิเตอร์บางตัวจะอ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมาและจากการทดลองเบื้อง ดังนี้

ตารางที่ 5.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
ขนาดประชากร	100	การทดลอง
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	ณัฐชัย โยธาบริบาล (2556)
รูปแบบการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation	Kim (1996)
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	Pm = 0.1	การทดลอง

ตารางที่ 5.3การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน COIN-E

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร	100	(สถาพร โอฬารภิวัฒน์, 2013)
ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล	0.1	
ค่าความน่าจะเป็นในการลงโทษ	0.1	
ค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มจากตาราง COIN	0.7	
ค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มจากตารางวัตถุประสงค์	0.3	

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ NSGA-II

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร	100	(Chutima และ Chimklai 2012)
วิธีการครอสโอเวอร์	Weight Mapping Crossover	
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation	
ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.7	
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.3	

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ DPSO

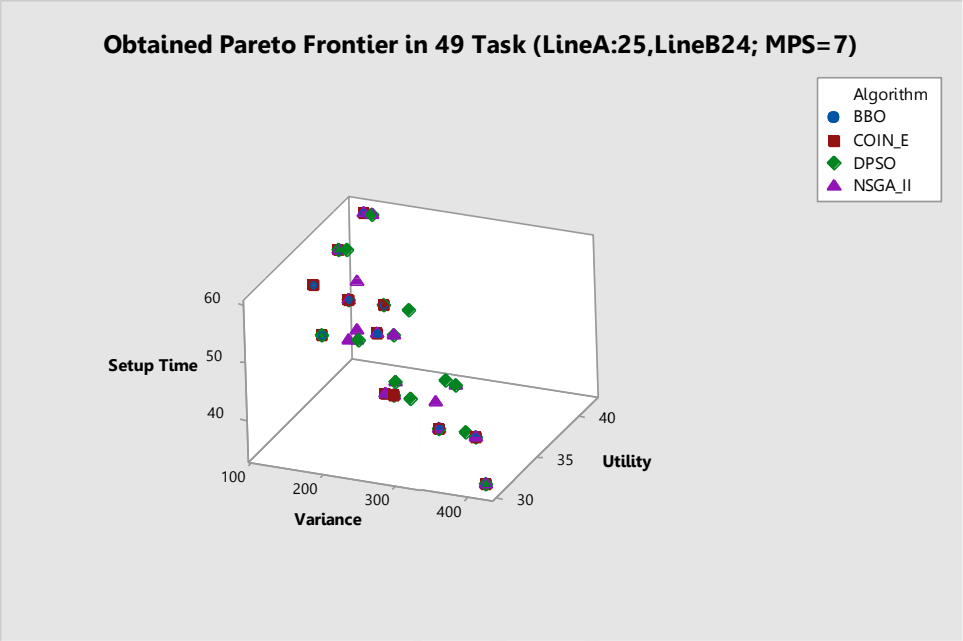
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร	100	(Chutima และ Chimklai 2012)
จำนวนฝูง	10	
จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง	10	
ค่าน้ำหนักการหน่วง	1	

5.4 ผลการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการทดลองการแก้ปัญหาขนาดขั้นงานต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จากจำนวนการทำซ้ำ 2 รอบ บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ได้ผ่านการจัดสมดุลมาแล้ว นำมาแสดงผลในรูปของกราฟ จากนั้นทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กาหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

5.4.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 1.1

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 1.1 ที่จำนวนขั้นงาน 49 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 2 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1 และบนสายการประกอบ B 2 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 2:3 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.1

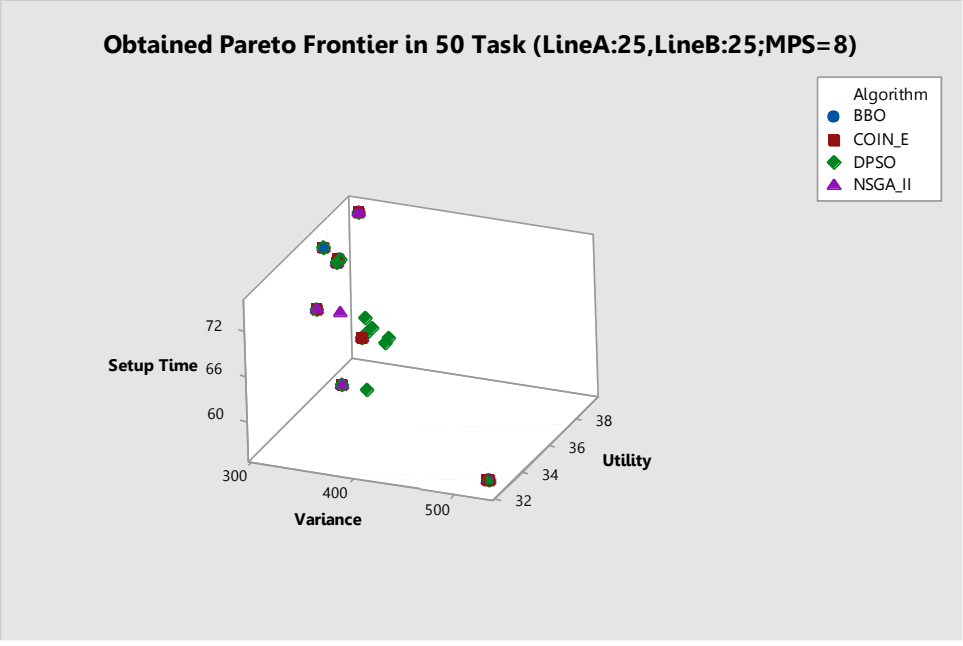
ตารางที่ 5.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.1

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0000	0.0000	0.0351	0.0471
Spread	0.5022	0.3827	0.5224	0.5844
RNDS1	0.6923	0.7500	0.3889	0.3333
RNDS2	1.0000	1.0000	0.7778	0.6667
NNDS	13	12	18	18
CPU Time (s)	26.6700	19.7320	35.641	165.6680

จากตารางที่ 5.6 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E และ BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ COIN-E สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E และ BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II และ DPSO ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า NSGA-II และ DPSO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO และ COIN-E ตามลำดับ ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 1.2

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 1.2 ที่จำนวนขั้นงาน 50 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 6 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 3 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:1 และบนสายการประกอบ B 3 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:3 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.2

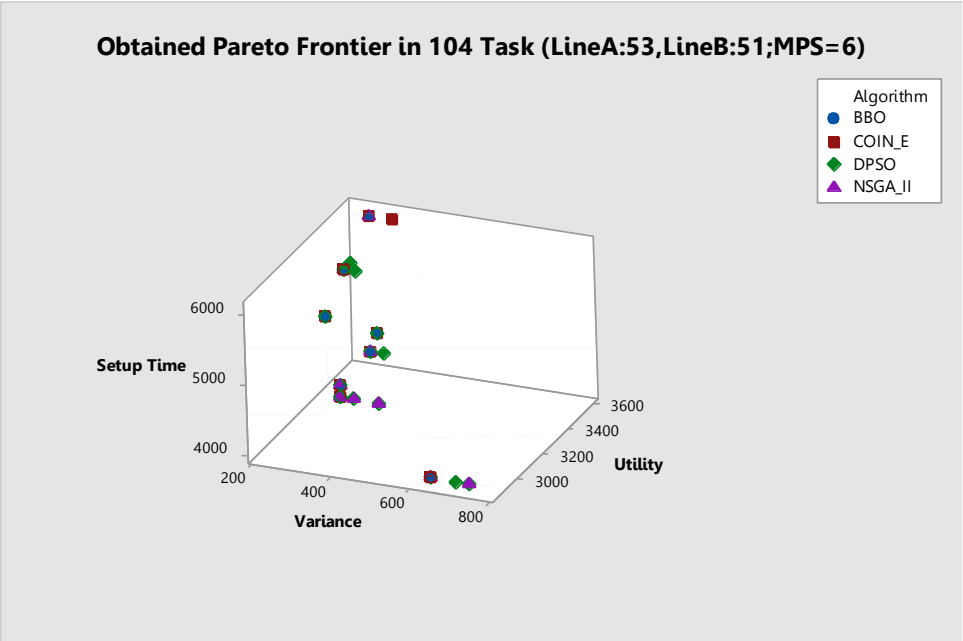
ตารางที่ 5.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 1.2

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0067	0.0000	0.0146	0.1801
Spread	0.5194	0.6704	0.7426	0.7254
RNDS1	0.714286	0.888889	0.230769	0
RNDS2	0.625	1	0.375	0
NNDS	7	9	13	12
CPU Time (s)	35.4300	26.2970	75.865	118.9050

จากตารางที่ 5.7 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E DPSO และ NSGA-II ตามลำดับ ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO และ NSGA-II ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า NSGA-II และ DPSO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E และ BBO ตามลำดับ ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 2.1

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 2.1 ที่จำนวนขั้นงาน 104 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 6 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 3 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:1 และบนสายการประกอบ B 3 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:3 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.1

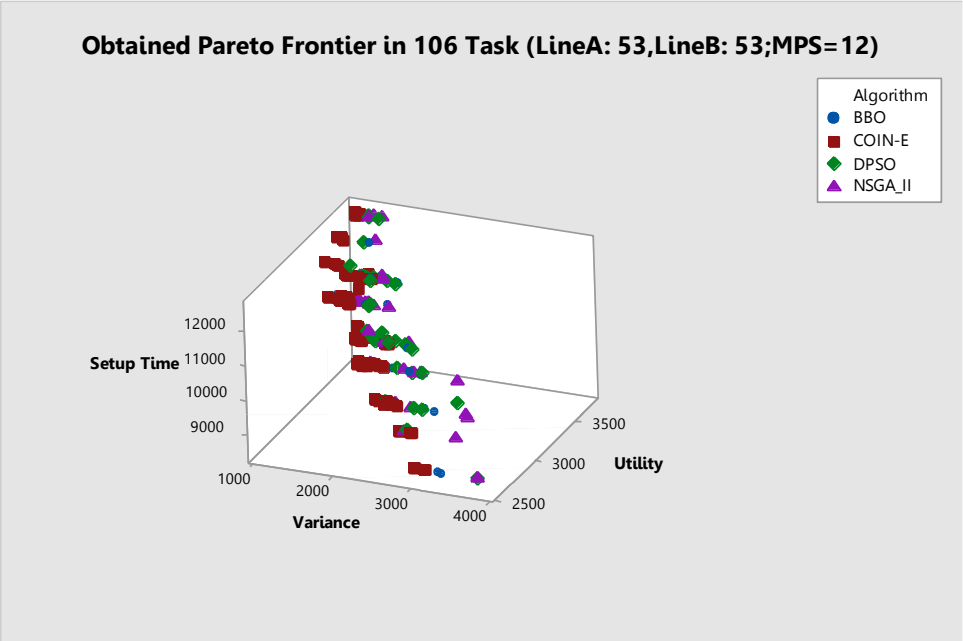
ตารางที่ 5.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.1

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0000	0.0000	0.0785	0.1046
Spread	0.3682	0.3651	0.5986	0.8195
RNDS1	1.0000	1.0000	0.6667	0.5000
RNDS2	1.0000	1.0000	0.6667	0.7778
NNDS	9	9	9	14
CPU Time (s)	35.9770	22.3080	26.85	314.4370

จากตารางที่ 5.8 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E และ BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ COIN-E สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO DPSO และ NSGA-II ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E และ BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ DPSO และ NSGA-II ตามลำดับ ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า DPSO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E และ BBO NSGA-II เท่ากัน ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 2.2

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 2.2 ที่จำนวนขั้นงาน 106 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 8 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 4 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:1:1 และบนสายการประกอบ B 4 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:2:2:3 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.2

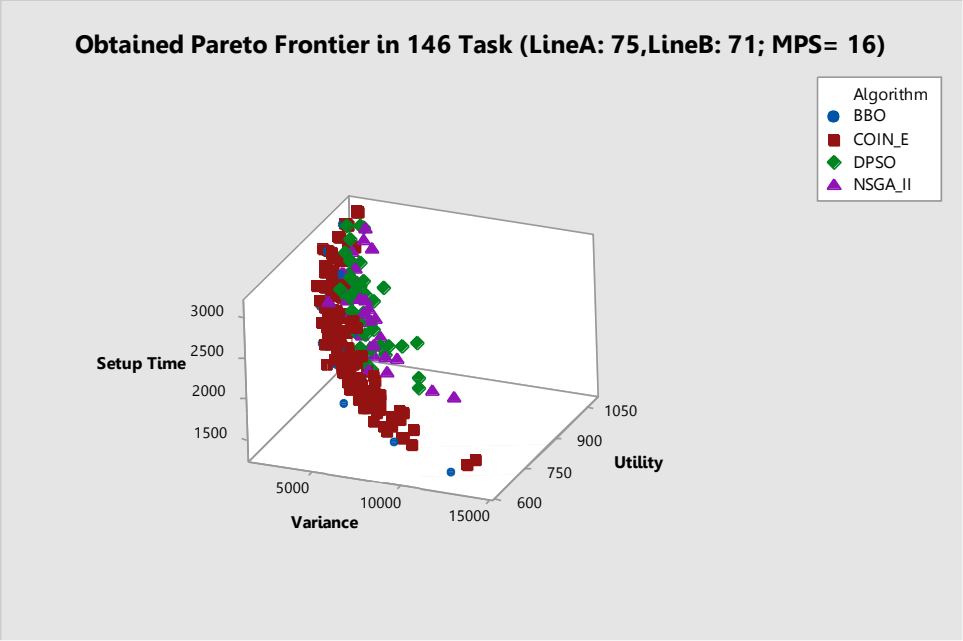
ตารางที่ 5.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 2.2

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0561	0.0000	0.0848	0.0913
Spread	0.4718	0.7452	0.5131	0.5516
RNDS1	0.1304	0.291667	0.0000	0.0000
RNDS2	0.0882	1.0000	0.0000	0.0000
NNDS	23	120	34	32
CPU Time (s)	64.47	23.4	49.476	626.85

จากตารางที่ 5.9 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II DPSO และ COIN-E ตามลำดับ ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II BBO และ DPSO ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.5 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 3.1

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 3.1 ที่จำนวนขั้นงาน 146 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 8 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 4 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:2:2:3 และบนสายการประกอบ B 4 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:2:4 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.1

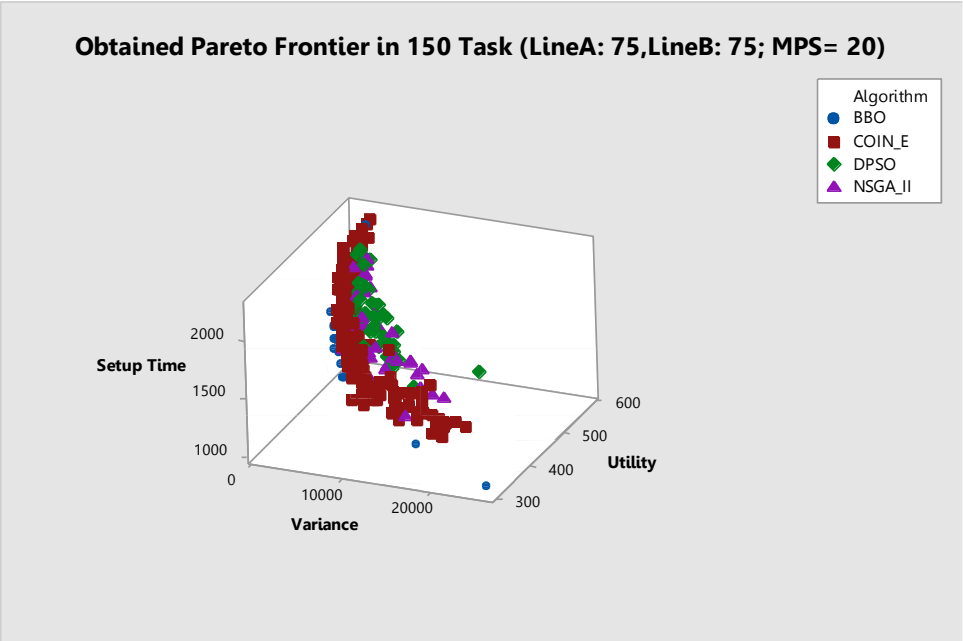
ตารางที่ 5.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.1

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0914	0.0074	0.1782	0.1828
Spread	0.5830	0.9016	0.6042	0.8055
RNDS1	0.666667	0.276243	0.0000	0.0000
RNDS2	0.285714	0.714286	0.0000	0.0000
NNDS	30	181	36	41
CPU Time (s)	149.6620	124.1220	135.724	970.7170

จากตารางที่ 5.10 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II DPSO และ COIN-E ตามลำดับ ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II BBO และ DPSO ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 3.2

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 3.2 ที่จำนวนขั้นงาน 150 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 8 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 4 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:2:4 และบนสายการประกอบ B 4 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:2:4 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.2

ตารางที่ 5.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 3.2

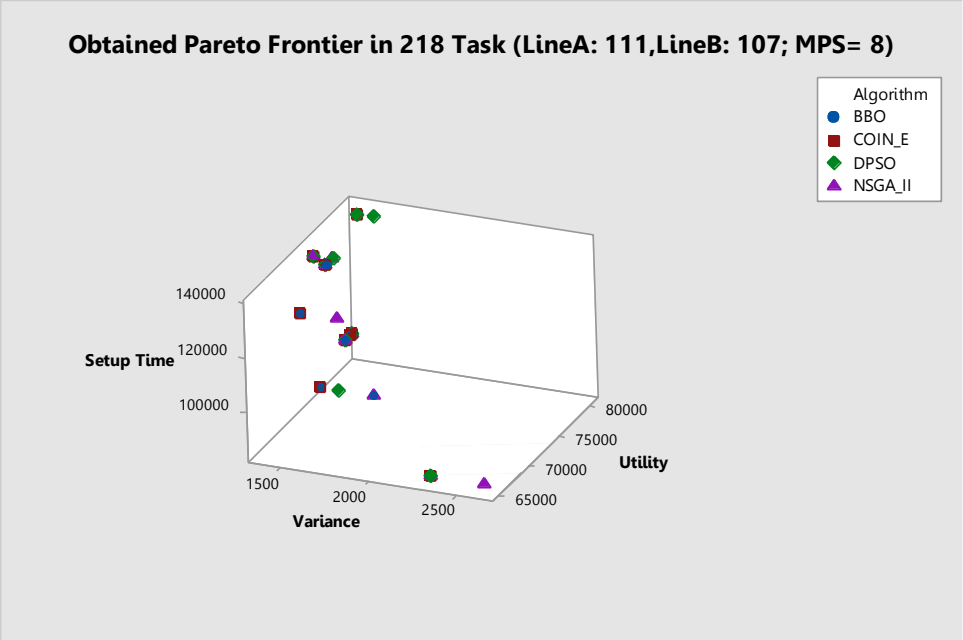
Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.1361	0.0160	0.1391	0.1737
Spread	0.8749	0.7440	0.5137	0.5429
RNDS1	0.6538	0.2450	0.0256	0.0000
RNDS2	0.2237	0.6447	0.0132	0.0000
NNDS	26	222	35	43
CPU Time (s)	241.5700	191.7130	250.229	241.8000

จากตารางที่ 5.11 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ NSGA-II สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ DPSO BBO และ COIN-E ตามลำดับ ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่าเมื่อเทียบกับคำตอบที่ได้ BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่าเมื่อเทียบกับคำตอบที่แท้จริง COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมา

คือ DPSO, NSGA-II และ BBO ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.7 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 4.1

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่4.1 ที่จำนวนขั้นงาน 218 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 6 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 3 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:1 และบนสายการประกอบ B 3 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:3 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.1

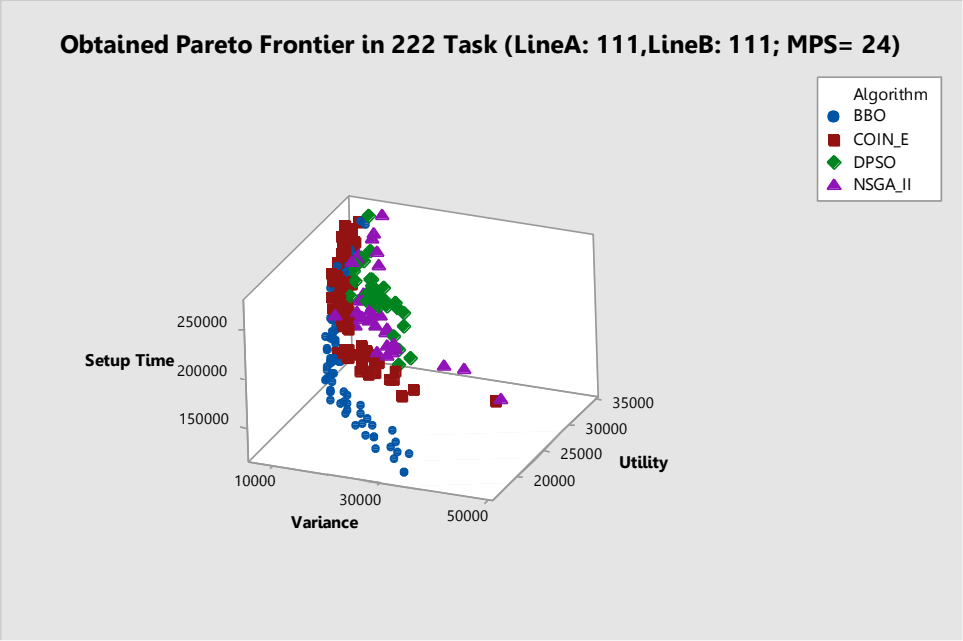
ตารางที่ 5.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.1

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0562	0.00000	0.10843	0.07579
Spread	0.9060	0.72958	0.72376	0.81108
RNDS1	0.6364	0.888889	0.444444	0.222222
RNDS2	0.875	1.000	0.5	0.25
NNDS	11	9	9	9
CPU Time (s)	130.922	101.101	101.76	310.855

จากตารางที่ 5.12 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ NSGA-II สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E DPSO และ ตามลำดับ BBO ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO และ NSGA-II ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ NSGA-II COIN-E และ DPSO มีกลุ่มคำตอบที่เท่ากัน ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

5.4.8 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมเซตปัญหาที่ 4.2

ผลคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ของเซตปัญหาที่ 4.2 ที่จำนวนขั้นงาน 222 ขั้นงาน จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตเท่ากับ 10 ผลิตภัณฑ์ แบ่งเป็นผลิตบนสายการประกอบ A 4 รุ่น สัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:1:1:3:3 และบนสายการประกอบ B 4 รุ่น มีสัดส่วนสัดส่วนความต้องการผลิตผลิตภัณฑ์เป็น 1:2:3:3:6 มีคำตอบที่ได้จากทั้ง 4 อัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ 4 อัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.2

ตารางที่ 5.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาที่ 4.2

Algorithm	BBO	COIN-E	NSGA-II	DPSO
Convergence	0.0182	0.1009	0.2177	0.2801
Spread	0.5207	0.5608	0.5902	0.5374
RNDS1	0.6824	0.1222	0.0000	0.0000
RNDS2	0.7250	0.2750	0.0000	0.0000
NNDS	85	180	34	33
CPU Time (s)	215.6110	178.5240	224.1800	878.6090

จากตารางที่ 5.13 พบว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ด้านการกระจ่ายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO สมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ DPSO NSGA-II และ COIN-E ตามลำดับ ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ COIN-E ด้านจำนวนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำพบว่า COIN-E มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ส่วนในด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบเร็วที่สุด รองลงมาคือ BBO NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ

จากการนำ BBO มาประยุกต์ใช้ในการทดลองแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบแบบขนานเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม ด้วยกัน คือ COIN-E NSGA-II และ DPSO จากผลการทดลองพบว่า คำตอบที่จากการนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดของค่าความต้องการใหญ่ขึ้น BBO จะให้ค่าสมรรถนะด้านตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงคำตอบดี เมื่อขนาดปัญหาเล็กลงค่าสรรถนะานตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีสมรรถนะดีที่สุดเพียง 3 เซตปัญหา คิดเป็นร้อยละ 37.5 ของเซตปัญหาทั้งหมด ในขณะที่ COIN-E ในด้านตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงคำตอบของ COIN-E มีสมรรถนะที่เหนือกว่า BBO คิดเป็นร้อยละ 87.5 ของเซตปัญหาทั้งหมด ด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบพบว่า BBO และ NSGA-II มีสมรรถนะดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 37.5 ของเซตปัญหาทั้งหมดและ DPSO ให้ค่าคิดเป็นร้อยละ 25 ของเซตปัญหาทั้งหมด COIN-E จะให้ค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบด้อยกว่า ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (RNDS I) พบว่า BBO และ NSGA-II มีสมรรถนะที่ดีที่สุดเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 50 ของเซตปัญหาทั้งหมด BBO ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (RNDS II) พบว่ามีสมรรถนะด้อยกว่าคิดเป็นร้อยละ 50 ของเซตปัญหาทั้งหมด โดยที่ COIN-E จะมีสมรรถนะที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 75 ของเซตปัญหาทั้งหมด ด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบ

พบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 100 ของเซตปัญหาทั้งหมด ในขณะที่ BBO ใช้เวลาในการหาคำตอบที่นานกว่า ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

Problem		P 1.1	P 1.2	P 2.1	P 2.2	P 3.1	P 3.2	P 4.1	P 4.2
No. of Tasks		49	50	104	106	146	150	218	222
Line A (MPS A)		25(1:1)	25(1:1:1)	53(1:2)	53(1:1:1:1)	75(1:2:2:3)	75(1:1:2:4)	111(1:1:1)	111(1:1:1:3:3)
Line B (MPS B)		24(2:3)	25(1:1:3)	51(1:2)	53(1:2:2:3)	71(1:1:2:4)	75(1:3:3:5)	107(1:1:3)	111(1:2:3:3:6)
MPS		7	8	6	12	16	20	8	24
Convergence	BBO	0.0000	0.0067	0.0000	0.0561	0.0914	0.1361	0.05618	0.0182
	COIN-E	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0074	0.0160	0.00000	0.1009
	NSGA-II	0.0351	0.0146	0.0785	0.0848	0.1782	0.1391	0.10843	0.2177
	DPSO	0.0471	0.1801	0.1046	0.0913	0.1828	0.1737	0.07579	0.2801
Spread	BBO	0.5022	0.5194	0.3682	0.4846	0.5151	0.8749	0.90596	0.6437
	COIN-E	0.3827	0.6704	0.3651	0.6554	0.8269	0.7440	0.72958	0.6067
	NSGA-II	0.5224	0.7426	0.5986	0.5529	0.6007	0.5137	0.72376	0.5891
	DPSO	0.5844	0.7254	0.8195	0.6514	0.5668	0.5429	0.81108	0.5674
RNDS1	BBO	0.6923	0.7143	1.0000	0.1304	0.6667	0.6538	0.6364	0.6824
	COIN-E	0.7500	0.8889	1.0000	0.2917	0.2762	0.2450	0.8889	0.1222
	NSGA-II	0.3889	0.2308	0.6667	0.0000	0.0000	0.0256	0.4444	0.0000
	DPSO	0.3333	0.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2222	0.0000
RNDS2	BBO	1.0000	0.6250	1.0000	0.0882	0.2857	0.2237	0.8750	0.7250
	COIN-E	1.0000	1	1.0000	1.0000	0.7143	0.6447	1	0.2750
	NSGA-II	0.7778	0.375	0.6667	0.0000	0.0000	0.0132	0.5	0.0000
	DPSO	0.6667	0	0.7778	0.0000	0.0000	0.0000	0.25	0.0000
NNDS	BBO	13	7	9	23	30	26	11	85
	COIN-E	12	9	9	120	181	222	9	90
	NSGA-II	18	13	9	34	36	35	9	34
	DPSO	18	12	14	32	41	43	9	33
CPU Time	BBO	26.6700	35.4300	35.9770	64.47	241.5700	149.6620	130.922	215.6110
	COIN-E	19.7320	26.2970	22.3080	23.4	191.7130	123.324	101.76	178.5240
	NSGA-II	35.641	75.865	26.85	49.476	124.1220	250.229	101.101	224.1800
	DPSO	165.6680	118.9050	314.4370	626.85	541.8000	970.7170	310.855	878.6090

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปงานวิจัย ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย ผลการนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยเนื้อหามีดังต่อไปนี้

6.1 บทสรุปงานวิจัย

การจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เป็นการแก้ปัญหาที่พิจารณาวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันจัดเป็นปัญหาแบบ NP-Hard (Non-deterministic Polynomial-Hard) ในการค้นหาคำตอบจำเป็นต้องนำวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอลิทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน คือ ความแปรผันในการผลิตที่น้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด และ เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด ตามลำดับ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับในการจัดลำดับการผลิต ทั้งหมด 3 อัลกอริทึม คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E) วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-II) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO)

6.1.1 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะสายการประกอบในงานวิจัยมีลักษณะดังนี้ 1.ลักษณะของสายการประกอบจะเป็นชนิดสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน 2.สายการประกอบมีความสมดุลในการจัดลำดับการผลิต โดยการจัดลำดับการผลิตจะพิจารณาจากความต้องการผลิตภัณฑ์ 3.ผลิตภัณฑ์มีหลายรุ่นแต่มีคุณสมบัติที่มีความคล้ายคลึงหรืออยู่ในตระกูลเดียวกัน จึงสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้ 4.พิจารณาความต้องการผลิตภัณฑ์จาก Minimum Part Set (MPS) 5 .สถานีงานจะเป็นชนิดสถานีงานแบบปิด 6.ทราบจำนวนสถานีงานในสายการผลิตจากผลการจัดสมดุลสายการประกอบมาแล้วและทราบเวลาดำเนินงานของขั้นงานที่อยู่ในสถานีงาน 7. พนักงานทำการผลิตประจำอยู่ที่สถานีงานทำให้ไม่เวลาเดินทางและ การหมุนกลับระหว่างสายการประกอบของพนักงานจะไม่นำเข้ามาพิจารณา 8. งานทุกงานมีการเตรียมพร้อมที่จะทำตลอดเวลา 9. ผลิตภัณฑ์รุ่นการประกอบบนสาย

การประกอบที่ 1 และ สายการประกอบที่ 2เริ่มต้นเข้าสายการประกอบพร้อมกัน 10.บริเวณแถวคอยในการผลิตมีพื้นที่ไม่จำกัด

6.1.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การพิจารณาแก้ปัญหาสำหรับหลายวัตถุประสงค์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีไปพร้อมกัน เป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปได้ยาก เนื่องจากวัตถุประสงค์นั้นอาจมีความขัดแย้งระหว่างกันในการหาค่าน้อยที่สุดหรือค่าที่มากที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์ จึงยากที่จะบอกได้ว่าเป็นคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Konak, Coit และ คณะ 2006) สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) มาใช้ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับสมาชิก โดยนำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดที่มีการจัดอันดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) มาใช้ คำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) ซึ่งเป็นกลุ่มคำตอบที่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีกว่ากันหรือไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่น (นพพล คำภิรมย์, 2008). ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาไปพร้อมกันทั้งหมด

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้มีการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสิ้น 3 วัตถุประสงค์ โดยให้น้ำหนักความสำคัญเท่ากันในทุกวัตถุประสงค์ จึงได้ใช้เทคนิคในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) มาใช้ในการแก้ปัญหา และสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับสมาชิก ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto -based Approach) ที่มีการจัดอันดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) มาใช้ คำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front) ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุดหรือไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่น

6.1.3 อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย

อัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ อัลกอริทึมวิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E) อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (NSGA-II) อัลกอริทึมวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดอยู่ในบทที่ 3 และบทที่ 4 และใช้ตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม 6 ตัวชี้วัด คือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต การ

กระจายตัวของกลุ่มคำตอบ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง จำนวนของกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ

6.1.4 ผลการนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหา

จากการนำ BBO มาประยุกต์ใช้ในการทดลองแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบแบบขนานเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม ด้วยกัน คือ COIN-E NSGA-II และ DPSO จากผลการทดลองพบว่า คำตอบที่จากการนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดของค่าความต้องการใหญ่ขึ้น BBO จะให้ค่าสมรรถนะด้านตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงคำตอบดี เมื่อขนาดปัญหาเล็กลงค่าสรรถนะตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงของ BBO มีสมรรถนะดีที่สุดเพียง 3 เซตปัญหา ทำให้ในด้านตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงคำตอบของ COIN-E มีสมรรถนะที่เหนือกว่า BBO ด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบพบว่า BBO และ NSGA-II มีสมรรถนะดีที่สุดและ DPSO ให้ค่าคิดเป็นร้อยละ 25 ของเซตปัญหาทั้งหมด COIN-E จะให้ค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบด้อยกว่า ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (RNDS I) พบว่า BBO และ NSGA-II มีสมรรถนะที่ดีที่สุดเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 50 ของเซตปัญหาทั้งหมด BBO ด้านอัตราส่วนกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (RNDS II) พบว่ามีสมรรถนะด้อยกว่า โดยที่ COIN-E จะมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ด้านเวลาที่ใช้ในการคำตอบพบว่า COIN-E ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด

ผลการทดลองพบว่า COIN-E มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่า BBO NSGA-II และ DPSO ทั้งในด้านดัชนีการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต ดัชนีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ ในส่วนของใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ COIN-E ใช้เวลาที่เร็วกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ปัญหาเรื่องการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานควรนำวัตถุประสงค์ที่มีความหลากหลายเพิ่มเติมนอกเหนือจากงานวิจัยมาทดลองใช้ในแก้ปัญหา
2) ทุกๆเซตปัญหาและทุกๆอัลกอริทึมควรมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละเซตปัญหา เพื่อจะทำให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพ เพราะจะมีผลต่อการหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม
3) งานวิจัยนี้ยังมีข้อกำหนด เงื่อนไขหรือสมมติฐานที่ยังไม่สามารถครอบคลุมกับลักษณะของปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องมีการต่อยอดหรือประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

Baykasoglu, A., L. Ozbakur, L. Gorkemli and B. Gorkemli (2009). Balancing parallel assembly lines via Ant Colony Optimization. Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on.

Chutima, P. and P. Chimklai (2012). "Multi-objective two sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge." Computer & Industrial Engineering 62(1): 39-55.

Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 6(2): 182-197.

Ding, F.-Y., J. Zhu and H. Sun (2006). "Comparing two weighted approaches for sequencing mixed-model assembly lines with multiple objectives." International Journal of Production Economics 102(1): 108-131.

Gökçen, H., K. Ağpak and R. Benzer (2006). "Balancing of parallel assembly lines." International Journal of Production Economics 103(2): 600-609.

Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

Hongwei, M. and X. Lifang (2010). Biogeography based optimization for Traveling Salesman Problem. Natural Computation (ICNC), 2010 Sixth International Conference on.

Hyun, C. J., Y. Kim and Y. K. Kim (1998). "A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines." Computers & Operations Research 25(7-8): 675-690.

Konak, A., D. W. Coit and A. E. Smith (2006). "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial." Reliability Engineering & System Safety 91(9): 992-1007.

Kumar, R. and P. K. Singh (2007). Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP. Hybrid Evolutionary Algorithms. A. Abraham, C. Grosan and H. Ishibuchi, Springer Berlin Heidelberg. 75: 361-398.

Lusa, A. (2008). "A survey of the literature on the multiple or parallel assembly line balancing problem." European Journal of Industrial Engineering 2(1): 50-72.

Ma, H. (2010). "An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization." Information Sciences 180(18): 3444-3464.

Mansouri, S. A. (2005). "A Multi-Objective Genetic Algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines." European Journal of Operational Research 167(3): 696-716.

McMullen, P. R. (2001). "An efficient frontier approach to addressing JIT sequencing problems with setups via search heuristics." Computers & Industrial Engineering 41(3): 335-353.

McMullen, P. R. and G. V. Frazier (2000). "A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line." Iie Transactions 32(8): 679-686.

Qingxin, G. and T. Lixin (2009). A scatter search based heuristic for the balancing of parallel assembly lines. Decision and Control, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE Conference on.

Scholl, A. and N. Boysen (2009). "Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure." International Journal of Production Economics 119(1): 90-100.

Simon, D. (2008). "Biogeography-Based Optimization." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 12(6): 702-713.

Süer, G. and C. Dagli (1994). A knowledge-based system for selection of resource allocation rules and algorithms. Handbook of Expert Systems Applications in Manufacturing Structures and rules. A. Mital and S. Anand, Springer Netherlands: 108-129.

Süer, G. A. (1998). "Designing parallel assembly lines." Computers & Industrial Engineering 35(3–4): 467-470.

Tsai, L. H. (1995). "Mixed-Model Sequencing to Minimize Utility Work and the Risk of Conveyor Stoppage." Management Science 41(3): 485-495.

กรรณ จิตเมตา (2011). การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน, วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.)--จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

ปารเมศ ชุติมา (2008). การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐชัย โยธาบริบาล (2014). การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นพพล คำภิรมย์ (2008). การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี, วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.)--จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

วันวิสา นฤมิตวงศ์ (2012). การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้, วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.)--จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

สถาพร โอฬารวิวัฒน์ชัย (2013). การจัดลาดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการบรรจวบแบบขยายในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนาน

การจัดลำดับการผลิตมีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานจะมีการนำเข้าข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการแก้ปัญหา ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนขั้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รอบเวลาดำเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจวบแบบขยาย (COIN-E)

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- ค่าการให้รางวัล (Reward) และค่าการลงโทษ (Punish) มีค่าเท่ากับ 0.1
- ร้อยละที่ใช้ในการสุ่มจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับร้อยละ 30 ของประชากรทั้งหมด โดยแบ่งออกเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร้อยละ 10 ที่เท่ากัน
- ร้อยละที่ใช้ในการสุ่มจากตารางวิธีการบรรจวบเท่ากับร้อยละ 70 ของประชากรทั้งหมด

1. การสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้น

ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้วัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 3 วัตถุประสงค์ดังที่เสนอในงานวิจัยนี้ ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 รุ่นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการผลิตคือ A มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นได้แก่ A1 A2 และ A3 มีจำนวน Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:1 ขณะที่สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ B1 B2 และ B3 Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:3 แสดงว่าในการจัดอันดับครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A1 A2 A3 B1 และ B2 รุ่นละ 1 ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ B3 จำนวน 3 ผลิตภัณฑ์เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการ จัดลำดับการผลิต ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ค่าสิทธิของลำดับการผลิตตามจำนวนผลิตภัณฑ์

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
String	1	2	3	4	5	6	7	8

หลังจากนั้นจึงทำการสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น โดยมีขนาดเท่ากับ n x n เนื่องจากสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์รวม (MPS) มีขนาด 8 ดังนั้นตารางเมทริกซ์นี้จึงมีขนาดเท่ากับ 8 x 8 โดยค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มเลือกจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{n-1} = \frac{1}{8-1} = 0.1429$ ดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
2	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
3	0.1429	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
4	0.1429	0.1429	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
5	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429	0.1429
6	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429
7	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0000	0.1429
8	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0000

2. การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

เมื่อได้ตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นแล้ว จะทำการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจากการสุ่มด้วยค่าความน่าจะเป็นจากตารางที่ ก.2 โดยจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น ซึ่งในตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากับ 5 ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 สตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority
1	8 2 3 7 6 5 1 4
2	1 2 3 5 6 4 7 8
3	6 2 3 7 5 8 1 4
4	1 7 5 4 3 2 8 6
5	8 2 5 1 7 6 3 4

3. การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่น

เมื่อได้ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 เพื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลาดับ ดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1	8 2 3 7 6 5 1 4	39.2011	7.6161	179.1429
2	1 2 3 5 6 4 7 8	39.2011	8.0057	248.8571
3	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143
4	1 7 5 4 3 2 8 6	39.2011	8.0057	162.0000
5	8 2 5 1 7 6 3 4	39.2011	7.6161	154.2857

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg ((1989หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และกำหนดค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance ดังตารางที่ ก.5

ตารางที่ ก.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	Infinity
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	Infinity
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	Infinity
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	Infinity
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	Infinity

4. การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดี

การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อที่จะนำไปปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ โดยพิจารณาเริ่มที่ตารางแรกคือ ตารางวิธีการบรรจวบ จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรง)Fitness) โดยคำตอบที่ดีจะมีค่า Fitness น้อยที่สุด และคำตอบที่ไม่ดีจะมีค่า Fitness มากที่สุด ดังตารางที่ ก.6

ตารางที่ ก.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางวิธีการบรรจวบ

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	-
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	Bad Solution
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	Good Solution
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	-
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	Good Solution

การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดีเพื่อที่จะนำไปปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลและลงโทษสำหรับตารางที่ 2 ถึง 4 คือตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่คำตอบที่ดีจะมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และคำตอบที่ไม่ดีจะมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด ดังตารางที่ ก.7 ตารางที่ ก.8 ตารางที่ ก.9 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก. 7 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ *1*

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	Good Solution
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	Good Solution
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	Bad Solution
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	Good Solution
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	Good Solution

ตารางที่ ก.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	Good Solution
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	Bad Solution
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	Good Solution
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	Bad Solution
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	Good Solution

ตารางที่ ก.9 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	-
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	Bad Solution
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	Good Solution
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	-
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	-

5. การปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมทั้งหมด ได้แก่ ตารางความน่าจะเป็นร่วม ตาราง 4 ของตารางวิธีการบรรจวบ ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, และ 3 ตามลำดับ เพื่อนำมาสร้างผล 2 สตริงคำตอบในรอบการทำงานต่อไป โดยกำหนดให้ k คือค่าพารามิเตอร์ในการให้รางวัลลงโทษ ดัง/ สมการที่4.1 และ 4.2 ตามลำดับ กำหนดให้ $k\,0 = .1$)

$$x = \frac{k}{n-1} \qquad \text{(ก.1)}$$

$$x = \frac{k}{(n-1)^2} \qquad \text{(ก.2)}$$

เริ่มทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางวิธีการบรรจวบ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.6 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 2 ค่าคือ สตริงคำตอบที่ 3 [6 2 3 7 5 8 1 4] และสตริงคำตอบที่ 5 [8 2 5 1 7 6 3 4] โดยจะทำการพิจารณาปรับปรุงไปทีละสตริงคำตอบ เริ่มต้นที่สตริงคำตอบที่ 3 ทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (6,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะ

เป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด รวมทั้งคู่ลำดับ))6,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ(6,1), (6,2), ..., (6,8) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่(2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 3 จากนั้นทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลสตริงคำตอบที่ 5 โดยเริ่มที่คู่อันดับ(8,2) จะเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143 และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ 8,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (8,1), (8,2), ..., (8,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 5

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.6 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีคือ สตริงคำตอบที่ 2 [1 2 3 5 6 4 7 8] การปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษ โดยเริ่มที่คู่อันดับ(1,2) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ 1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (1,2), (1,3), ..., (1,8) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 2 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางที่ ก.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.10 ตารางวิธีการบรรจวบหลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.1265	0.1408	0.1551	0.1408	0.1408	0.1551	0.1408
2	0.1408	0.0000	0.1408	0.1408	0.1551	0.1408	0.1408	0.1408
3	0.1408	0.1408	0.0000	0.1551	0.1265	0.1408	0.1551	0.1408
4	0.1449	0.1449	0.1449	0.0000	0.1449	0.1449	0.1306	0.1449
5	0.1551	0.1408	0.1408	0.1408	0.0000	0.1265	0.1408	0.1551
6	0.1408	0.1551	0.1551	0.1265	0.1408	0.0000	0.1408	0.1408
7	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408	0.1551	0.1551	0.0000	0.1265
8	0.1531	0.1531	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.1388	0.0000

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.7 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 4 ค่าคือ สตริงคำตอบที่ 1 [8 2 3 7 6 5 1 4] สตริงคำตอบที่ 2 [1 2 3 5 6 4 7 8] สตริงคำตอบที่ 4 [1 7 5 4 3 2 8 6] และสตริงคำตอบที่ 5 [8 2 5 1 7 6 3 4] ทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นทีละสตริง โดยเริ่มที่สตริงที่ 1 ทำการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (8,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (8,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (8,1), (8,2), ..., (8,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1 จากนั้นเริ่มปรับปรุงความน่าจะเป็นสตริงที่ 2 โดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143 และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,2), (1,3), ..., (1,8) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 2 จากนั้นเริ่มปรับปรุงความน่าจะเป็นสตริงที่ 4 โดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,7) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143 และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (1,7)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ) (1,2), (1,3),..., (1,8) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (7,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 4 จากนั้นเริ่มปรับปรุงความน่าจะเป็นสตริงที่ 5 โดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (8,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143 และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (8,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (8,1), (8,2),..., (8,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 5

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.7 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีคือ สตริงคำตอบที่ 3 [6 2 3 7 5 8 1 4] โดยทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษสตริงคำตอบที่ 3 คู่อันดับ (6,2) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมคู่ทั้งอันดับ (6,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (6,1), (6,2), ..., (6,8) โดยเพิ่มค่าความ

น่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตาราง ความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่อันดับในสตริงคำตอบที่ 3 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางที่ ก.11

ตารางที่ ก.11 ตารางความน่าจะเป็นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 หลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.1510	0.1367	0.1367	0.1367	0.1367	0.1653	0.1367
2	0.1367	0.0000	0.1510	0.1367	0.1510	0.1367	0.1367	0.1510
3	0.1367	0.1510	0.0000	0.1510	0.1510	0.1367	0.1367	0.1367
4	0.1388	0.1388	0.1531	0.0000	0.1388	0.1388	0.1531	0.1388
5	0.1653	0.1367	0.1367	0.1510	0.0000	0.1510	0.1367	0.1224
6	0.1388	0.1245	0.1531	0.1531	0.1531	0.0000	0.1388	0.1388
7	0.1367	0.1367	0.1367	0.1367	0.1367	0.1653	0.0000	0.1510
8	0.1245	0.1673	0.1388	0.1388	0.1388	0.1531	0.1388	0.0000

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.8 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 3 ค่าคือ สตริงคำตอบที่ 1 [8 2 3 7 6 5 1 4] สตริงคำตอบที่ 3 [6 2 3 7 5 8 1 4] และสตริงคำตอบที่ 5 [8 2 5 1 7 6 3 4] โดยจะทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นทีละสตริง เริ่มที่สตริงที่ 1 ทำการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (8,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (8,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (8,1), (8,2), ..., (8,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1 จากนั้นเริ่มปรับปรุงความน่าจะเป็นสตริงที่ 3 โดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (6,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143 และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งอันดับ (6,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (6,1), (6,2),..., (6,8) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 3 จากนั้นเริ่มปรับปรุงความน่าจะเป็นสตริงที่ 5 โดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (8,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143

และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (8,2)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (8,1), (8,2),..., (8,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 5

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.8 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีอยู่ 2 ค่าคือ สตริงคำตอบที่ 2 [1 2 3 5 6 4 7 8] และสตริงคำตอบที่ 4 [1 7 5 4 3 2 8 6] ทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นทีละสตริงโดยเริ่มที่สตริงคำตอบที่ 2 จะทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษสตริงคำตอบที่ 2 คู่อันดับ (1,2) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่อันดับ (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,2), (1,3), ..., (1,8) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 2 จากนั้นจะทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษสตริงคำตอบที่ 4 คู่อันดับ (1,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0143 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,7)) ภายในแถวเดียวกันคือคู่อันดับ (1,2), (1,3),..., (1,8) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0020 ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (7,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 4 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางที่ ก.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 ตารางความน่าจะเป็นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 หลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.1265	0.1408	0.1694	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408
2	0.1408	0.0000	0.1551	0.1408	0.1551	0.1408	0.1408	0.1265
3	0.1408	0.1265	0.0000	0.1551	0.1265	0.1408	0.1694	0.1408
4	0.1469	0.1469	0.1327	0.0000	0.1469	0.1469	0.1327	0.1469
5	0.1694	0.1408	0.1408	0.1265	0.0000	0.1265	0.1408	0.1551
6	0.1388	0.1531	0.1531	0.1245	0.1531	0.0000	0.1388	0.1388
7	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408	0.1694	0.0000	0.1265
8	0.1531	0.1673	0.1388	0.1388	0.1388	0.1245	0.1388	0.0000

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.9 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 1 ค่าคือ สตริงคำตอบที่ 3 [6 2 3 7 5 8 1 4] โดยจะทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (6,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รามทั้งคู่อันดับ (6,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (6,1), (6,2),.., (6,8) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่3

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ก.9 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีอยู่ 1 ค่าคือ สตริง สตริงคำตอบที่ 2 [1 2 3 5 6 4 7 8] จะทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษสตริงคำตอบที่ 2 คู่อันดับ)1,2) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)} = 0.0143$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,2), (1,3), ..., (1,8) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(8-1)^2} = 0.0020$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 2 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางที่ ก.13

ตารางที่ ก. 13 ตารางความน่าจะเป็นของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 หลังการปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.1286	0.1429	0.1571	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
2	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429
3	0.1429	0.1429	0.0000	0.1429	0.1286	0.1429	0.1571	0.1429
4	0.1449	0.1449	0.1449	0.0000	0.1449	0.1449	0.1306	0.1449
5	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.0000	0.1286	0.1429	0.1571
6	0.1429	0.1571	0.1429	0.1286	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429
7	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1571	0.1429	0.0000	0.1286
8	0.1551	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408	0.1408	0.0000

6. เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด โดยการนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับรอบปัจจุบัน แล้วนำมาเรียงลำดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บค่าสตริงที่ให้ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในรอบการทำงานนั้นๆ ดังตารางที่ ก.17

ตารางที่ ก.14 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานก่อนหน้า

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness
4	29.9216	7.6161	210.8571	1

ตารางที่ ก.15 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในรอบการทำงานปัจจุบัน

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness
3	48.4806	7.6161	151.7143	1
5	39.2011	7.6161	154.2857	1

ตารางที่ ก.16 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ารวมกับรอบปัจจุบัน

String	Model sequence	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
รอบก่อนหน้า	5 4 1 7 6 8 3 2	29.9216	7.6161	210.8571
รอบปัจจุบัน	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143
	8 2 5 1 7 6 3 4	39.2011	7.6161	154.2857

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.17 คำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใช้ในรอบต่อไป

String	Model sequence	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness
1	5 4 1 7 6 8 3 2	29.9216	7.6161	210.8571	1
2	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143	1
3	8 2 5 1 7 6 3 4	39.2011	7.6161	154.2857	1

7. กลับไปทำขั้นที่ 2. เพื่อเริ่มกระบวนการค้นหาคำตอบรอบต่อไปโดยสุ่มประชากรเริ่มต้นรอบใหม่จากตารางวิธีการบรรจวบ ร้อยละ 70 และจากตารางวัตถุประสงค์อีกร้อยละ 30 จนครบจำนวนรอบที่กำหนด

ภาคผนวก ข

การประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

1 วิธีการของเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)

เจนเนติกอัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมที่พัฒนามาจากแนวความคิดเรื่องพันธุกรรมของมนุษย์ ในเรื่องที่พ่อแม่จะถ่ายทอดคุณสมบัติและลักษณะทางพันธุกรรมไปสู่รุ่นลูก โดยสตริงคำตอบ (String) จะเปรียบเทียบได้กับการการคัดเลือกโครโมโซม (Chromosome) ออกมาด้วยวิธีการสุ่มอย่างอิสระ ซึ่งในแต่ละสตริงคำตอบจะประกอบไปด้วยคุณลักษณะ (Character) หรือ ยีน (Gene) ที่มีความแตกต่างกัน หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover) เพื่อทำการแลกเปลี่ยนคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อทำให้สตริงคำตอบรุ่นลูกมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะที่ดีขึ้นจากรุ่นพ่อแม่ หลังจากนั้นจะทำการสุ่มสตริงคำตอบรุ่นลูกบางส่วนเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน (Mutation) เพื่อทำการแลกเปลี่ยนคุณสมบัติภายในสตริงคำตอบนั้นๆ เพื่อให้เกิดความหลากหลายของสตริงคำตอบ และไม่ติดอยู่ในกลุ่มคำตอบเฉพาะที่ โดยวิธีการทางฮิวริสติกนี้ถือเป็นวิธีการที่นำมาใช้ได้การค้นหาคำตอบ เนื่องจากจะได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด หรือมีความใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้

2. ขั้นตอนการดำเนินงานของเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิตของปัญหา ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์ของสายการประกอบที่ขนานกัน เวลาทำการผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงาน จำนวนประชากรคำตอบ (N) ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_c) และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m)
2. นำข้อมูลที่ได้นำเข้าจากขั้นตอนที่ 1 มาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเลือกอย่างอิสระมาจำนวน N ตัว
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

4. กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting
5. กำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowing Distance
6. นำสตริงคำตอบที่ดีเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection
7. นำสตริงคำตอบที่จัดไว้ใน Mating Pool มาทำการแลกเปลี่ยนคุณสมบัติของการจัดลำดับการผลิตด้วยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX)
8. นำสตริงคำตอบมาแลกเปลี่ยนคุณสมบัติภายในสตริงคำตอบของตัวเองด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation
9. ทำการนำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนออกมาเป็นสตริงคำตอบรุ่นลูกรุ่นลูก มารวมกับสตริงคำตอบเริ่มแรกที่เป็นของพ่อแม่
10. คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการขั้นตอนที่ 9 เพื่อนำไปใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในแต่ละรอบต่อไป
11. นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบันมารวมกัน แล้วทำการคัดเลือกด้วยวิธีการ Non-dominated Sorting แล้วเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้และนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปสร้างเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรอบถัดไป
12. ทำการวนซ้ำกระบวนการจนคำตอบที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือครบจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้
13. หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วเก็บคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 12 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ตัวอย่างการใช้งาน NSGA-II มาประยุกต์ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

3.1 การนำข้อมูลเข้า

การนำเข้าข้อมูลการจัดลำดับการผลิตมีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายขนาน ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนขั้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รอบเวลาดำเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในวิธีการของเจนเนติกอัลกอริทึม

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX)
- วิธีการมิวเตชั่นแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชั่นเท่ากับ 0.1

3.2 การสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้วัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 3 วัตถุประสงค์ดังที่เสนอในงานวิจัยนี้ (ดูรายละเอียดในบทที่ 2) โดยสายการประกอบ A มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นได้แก่ A1 A2 และ A3 มีจำนวน Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:1 ขณะที่สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ B1 B2 และ B3 Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:3 แสดงว่าในการจัดอันดับครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A1 A2 A3 B1 และ B2 รุ่นละ 1 ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ B3 จำนวน 3 ผลิตภัณฑ์ เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต ดังนี้

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
String	1	2	3	4	5	6	7	8

เมื่อกำหนดรหัสของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้แล้ว จะทำการสุ่มเพื่อสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด โดยมีขั้นตอนการสุ่มดังต่อไปนี้

ทำการสุ่มเลือกค่าตำแหน่ง 2 จุด เพื่อใช้ในการการสลับค่า โดยการหาจำนวนครั้งในการสลับจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของทั้ง 2 สายการประกอบรวมกัน หรือ $\frac{I}{2}$ เมื่อ $I = \sum_{i=1}^{I} d_m$ ในกรณีที่ $\frac{I}{2}$ มีค่าเป็นจำนวนคี่ให้ทำการปัดค่าขึ้นเสมอ

ตัวอย่างการคำนวณ

$$I = \sum_{i=1}^{6} d_m = 1+1+1+1+1+3 = 8 \text{ ดังนั้น } \frac{I}{2} = \frac{8}{2} = 4$$

จึงทำให้การสุ่มสร้างประชากรเบื้องต้นมีจานวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับ 4 ดังต่อไปนี้

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
priority	1	2	3	4	5	6	7	8

Model Sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 1	1	2	3	4	5	6	7	8

Model Sequence	A1	A2	B3	B1	B2	A3	B3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 2	1	2	6	4	5	3	7	8

Model Sequence	A1	B1	B3	A2	B2	A3	B3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 3	1	4	6	2	5	3	7	8

Model Sequence	A2	B1	B3	A1	B2	B3	A3	B3
การสลับตำแหน่งครั้งที่ 4	2	4	6	1	5	7	3	8

เมื่อทำการสลับตำแหน่งจนครบ 4 ครั้ง จะได้ลำดับผลิตภัณฑ์ใหม่ดังนี้

Model Sequence	A2	B1	B3	A1	B2	B3	A3	B3
	2	4	6	1	5	7	3	8

แล้วทำการสร้างประชาการเริ่มต้นให้มีจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority	Model Sequence
1	8 2 3 7 6 5 1 4	B3 A2 A3 B3 B3 B2 A1 B1
2	1 2 3 5 6 4 7 8	A1 A2 A3 B2 B3 B1 B3 B3
3	6 2 3 7 5 8 1 4	B3 A2 A3 B3 B2 B3 A1 B1
4	1 7 5 4 3 2 8 6	A1 B3 B2 B1 A3 A2 B3 B3
5	8 2 5 1 7 6 3 4	B3 A2 B2 A1 B3 B3 A3 B1

3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 เพื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ ข.2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1	39.2011	7.6161	179.1429
2	39.2011	8.0057	248.8571
3	48.4806	7.6161	151.7143
4	39.2011	8.0057	162.0000
5	39.2011	7.6161	154.2857

3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และกำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance

ตารางที่ ข.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	Infinity
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	Infinity
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	Infinity
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	Infinity
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	Infinity

3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบ (Selection)

การคัดเลือกสตริงคำตอบนั้น จะทำการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง โดยค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดหมายถึงสตริงคำตอบนั้นดีที่สุด โดยวิธีการที่ใช้ในการคัดเลือกคือวิธีการแบบ Binary Tournament Selection โดยจำนวนสตริงคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกจำนวนเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น จะผ่านเข้าสู่ Mating Pool เพื่อรอการจับคู่และดำเนินการขั้นต่อไป

3.5.1 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง

การแปลงค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบให้เปลี่ยนเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) คือขั้นตอนแรกของการคัดเลือกสตริงคำตอบ เพื่อให้สตริงคำตอบที่มีค่าที่ดีกว่านั้นมีโอกาสถูกคัดเลือกในกระบวนการถัดไปมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.4 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	39.2011	7.6161	179.1429	2	2	Infinity
2	39.2011	8.0057	248.8571	3	1	Infinity
3	48.4806	7.6161	151.7143	1	3	Infinity
4	39.2011	8.0057	162.0000	2	2	Infinity
5	39.2011	7.6161	154.2857	1	3	Infinity

3.5.2 การสร้างวงล้อรูเล็ต

วงล้อรูเล็ต คือ วงกลมสมมติที่มีขนาด 1 หน่วย และแบ่งพื้นที่ภายในวงกลมออกเป็นส่วน ๆ ตามจำนวนประชากร โดยพื้นที่ในแต่ละส่วนจะมีขนาดเท่ากับความน่าจะเป็นในการคัดเลือกสตริงคำตอบ

มีวิธีการสร้างวงล้อรูเล็ตดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. หาค่าความแข็งแรงรวมของสตริงคำตอบทั้งหมดเท่ากับจำนวนประชากร ดังสมการที่ ก.1

$$F = \sum_{i=1}^{popsize} f_1(X_i)$$

เมื่อ $f_1(x_i)$ คือ ค่าความแข็งแรงของของสตริงคำตอบที่ i

2. หาค่าความน่าจะเป็นในการคัดเลือกสตริงคำตอบ (Probability of Selection) ของสตริงคำตอบทุกตัวในกลุ่มประชากร ดังสมการที่ ก.2

$$p_i = \frac{f_1(x_i)}{F} \;;\; i = 1,2,..., popsize$$

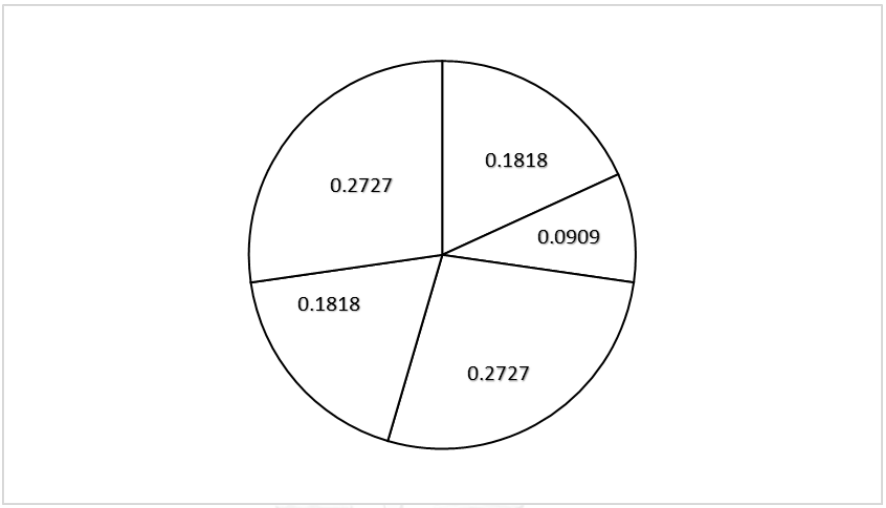
3. หาค่าความน่าจะเป็นในการคัดเลือกสตริงคำตอบสะสม (Cumulative Probability of Selection) ของสตริงคำตอบทุกตัวในกลุ่มประชากร ดังสมการที่ ข.5

$$q_i = \sum_{j=1}^{i} p_j$$

เมื่อทำการสร้างวงล้อรูเล็ตครบตามขั้นตอน จะได้ตัวอย่างผลลัพธ์ดังตารางที่ ข.5 และรูปที่ ข.2

ตารางที่ ข.5 การสร้างวงล้อรูเล็ต

String	Dummy Fitness	p_i	q_i
1	2	0.1818	0.1818
2	1	0.0909	0.2727
3	3	0.2727	0.5454
4	2	0.1818	0.7272
5	3	0.2727	1.0000
Total	11	1	



รูปที่ ข.2 วงล้อรูเล็ต

3.5.3 ขั้นตอนการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

ขั้นตอนนี้เป็นการสุ่มเลือกสตริงคำตอบตอบจากการหมุนวงล้อรูเล็ตมาครั้งละ 2 สตริงคำตอบ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง และทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงที่มีค่ามากกว่าเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดค่า r_1 จากการสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
2) ถ้าค่า $r_1 < q_1$ สตริงคำตอบตัวแรกจะถูกคัดเลือก แต่ถ้าค่า $q_{i-1} < r_1 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนประชากร) สตริงคำตอบตัวที่ i จะถูกคัดเลือก
3) กำหนดค่า r_2 จากการสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
4) ถ้าค่า $r_2 < q_1$ สตริงคำตอบตัวแรกจะถูกคัดเลือก แต่ถ้าค่า $q_{i-1} < r_2 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนประชากร) สตริงคำตอบตัวที่ i จะถูกคัดเลือก
5) เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงระหว่างสตริงที่ถูกคัดเลือกในขั้นตอนที่ 2 และ 4 โดยสตริงไหนที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงมากกว่า จะถูกคัดเลือกเข้า Mating Pool ต่อไป (ในกรณีที่ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเท่ากัน จะเลือกค่าที่มีความหนาแน่นมากกว่า)
6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 จนกว่าจะได้จำนวนสตริงใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากร

ตารางที่ ข.6 Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Dummy Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Dummy Fitness	
1	0.5324	0.5454	3	3	0.9831	1.0000	5	3	3
2	0.0991	0.1818	1	2	0.4821	0.5454	3	3	3
3	0.8412	1.0000	5	3	0.1038	0.1818	1	2	5
4	0.6344	0.7272	4	2	0.2419	0.2727	2	1	4
5	0.5988	0.7272	4	2	0.7273	1.0000	5	3	5

3.6 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

3.6.1 การจับคู่สตริงคำตอบ

หลังการคัดเลือกสตริงคำตอบครบตามจำนวนประชากร จะทำการจับคู่สตริงคำตอบเพื่อทำการครอสโอเวอร์ โดยที่จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกมาจับคู่จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_C) ส่วนสตริงคำตอบที่ไม่ได้ถูกเลือกจะยังคงอยู่ใน Mating Pool ดังเดิม ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดค่า r ให้กับสตริงคำตอบทุกตัวใน Mating Pool โดยสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
2) ถ้าค่า $r < P_C$ จะทำการเลือกสตริงคำตอบเพื่อไปทำการจับคู่ในขั้นตอนต่อไป
3) ถ้าไม่มีสตริงคำตอบใดเลยที่มีค่า $r < P_C$ ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 และ 2
4) ถ้าสตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกในขั้นตอนที่ 2 มีจำนวน N_C ตัว และเป็นจำนวนคี่ จะทำการปรับให้เป็นจำนวนคู่ก่อนโดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้
   - ถ้า N_C เป็นจำนวนคี่ และมีค่าระหว่าง 1 ถึงขนาดประชากร ให้ทำการสุ่มตัวเลข 0 หรือ 1 มา 1 ค่า ซึ่งถ้าสุ่มได้เลข 1 จะทำการสุ่มเลือกสตริงที่เหลือใน Mating pool มาเพิ่มอีก 1 สตริงคำตอบ แต่ถ้าสุ่มได้เลข 0 จะทำการตัดสตริงคำตอบที่เลือกไว้ทิ้งไป 1 ตัว
   - เมื่อ N_C มีค่าเท่ากับ 1 จะทำการเพิ่มสตริงคำตอบอีก 1 ตัวเท่านั้น
   - เมื่อ N_C มีค่าเท่ากับขนาดประชากรซึ่งเป็นจำนวนคี่ จะทำการตัดสตริงคำตอบที่เลือกไว้ไป 1 ตัว
5) เมื่อได้สตริงคำตอบทั้งหมด N_C ตัว ให้นำมาจับคู่ตามลำดับ จะได้จำนวนคู่เท่ากับ $\frac{N_C}{2}$ คู่

ในตัวอย่างนี้มีกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7 ดังนั้นจำนวนสตริงคำตอบที่จะทำการถูกครอสโอเวอร์ มีค่าเท่ากับ 0.7 x 5 = 3.5 หรือประมาณ 4 ตัว

ตารางที่ ข.7 การจับคู่สตริงคำตอบ

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	6 2 3 7 5 8 1 4	0.9281	-
2	6 2 3 7 5 8 1 4	0.1294	selected
3	8 2 5 1 7 6 3 4	0.5672	selected
4	1 7 5 4 3 2 8 6	0.4812	selected
5	8 2 5 1 7 6 3 4	0.6271	selected

3.6.2 ขั้นตอนการครอสโอเวอร์

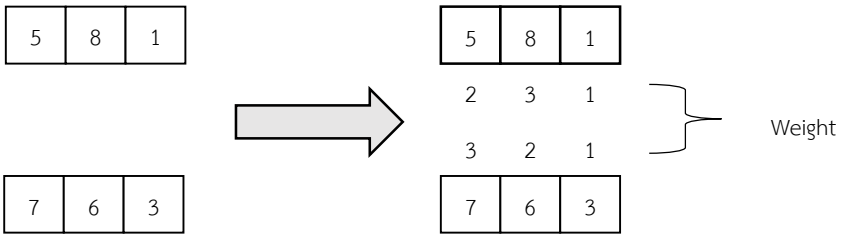
การครอสโอเวอร์จะเป็นการนำสตริงคำตอบที่ทำการจับคู่กันในขั้นตอนที่แล้วที่เรียกว่า “สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่” มาทำการแลกเปลี่ยนคุณลักษณะของสตริงคำตอบ เพื่อให้ได้สตริงคำตอบที่เรียกว่า “สตริงคำตอบรุ่นลูก” ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX) ซึ่งจะวิธีการดังต่อไปนี้

1) ทำการสุ่มตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนความของสตริงคำตอบ (จำนวน bit) เพื่อทำการระบุตำแหน่งของการทำครอสโอเวอร์ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำสตริงคำตอบคู่แรกมาทำการสุ่มได้ค่า 5 และ 7 ตามลำดับ จะใช้เครื่องหมาย “I” ในการกำหนดตำแหน่งดังต่อไปนี้

   สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ 2 = [6 2 3 7 I5 8 1I 4]

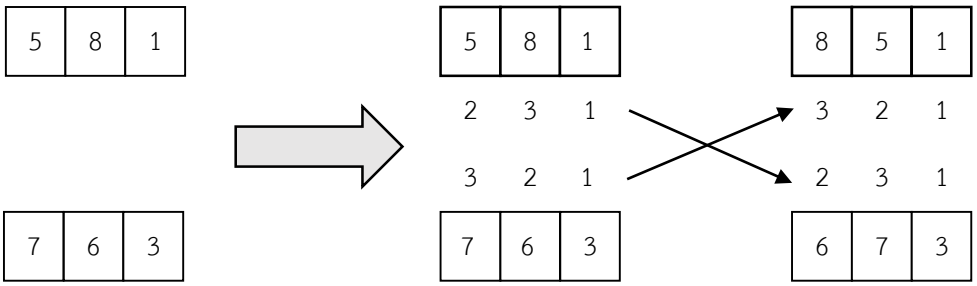
   สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ 3 = [8 2 5 1 I7 6 3I 4]

2) ทำการให้น้ำหนักกับค่าของสตริงที่อยู่ในตำแหน่งของการครอสโอเวอร์ ดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 การให้น้ำหนักกับค่าของสตริงของการครอสโอเวอร์

3) ทำการแลกเปลี่ยนค่าน้ำหนักระหว่างสตริงคำตอบที่จับคู่กัน แล้วเปลี่ยนค่าภายในสตริงคำตอบตามค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 การแลกเปลี่ยนค่าน้ำหนักระหว่างสตริงคำตอบ

เมื่อทำการครอสโอเวอร์ด้วยวิธีการแบบ Weight Mapping Crossover (WMX) ดังตัวอย่างข้างต้น ทำให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูกดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบรุ่นลูก 2 = [6 3 7 2 |8 5 1| 4]

สตริงคำตอบรุ่นลูก 3 = [8 1 2 5 |6 7 3| 4]

หลังจากนั้นจึงนำสตริงที่ 3 และ 4 มาทำการครอสโอเวอร์ด้วยวิธีการแบบ Weight Mapping Crossover (WMX) โดยสุ่มขอบเขตของการทำครอสโอเวอร์ได้ตำแหน่ง 1 และ 2 ตามลำดับ ได้สตริงคำตอบรุ่นลูกดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบรุ่นลูก 3 = [|7 1| 5 4 3 2 8 6]

สตริงคำตอบรุ่นลูก 4 = [|2 8| 5 1 7 6 3 4]

3.7 การมิวเตชัน

การมิวเตชัน (Mutation) เป็นกระบวนการ แลกเปลี่ยนค่าบิตภายในสตริงคำตอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ไม่อาจเรียกคืนได้ เนื่องจากในบางกรณี คำตอบที่ผ่านการดำเนินงานต่าง ๆ อาจเข้าไปติดอยู่ในกลุ่มคำตอบเฉพาะที่ การมิวเตชันช่วยให้คำตอบสามารถหลุดออกมาให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด วิธีการมิวเตชันนั้นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะขอเสนอวิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m)

   ซึ่งในตัวอย่างนี้ทำการกำหนดความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) เท่ากับ 0.3 ทำให้มีสตริงคำตอบที่จะทำการมิวเตชันเท่ากับ 0.3 x 5 = 1.5 หรือประมาณ 2 สตริงคำตอบ

2) กำหนดค่า r ให้กับสตริงคำตอบทุกตัวใน Mating Pool โดยการสุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 และเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า $r < P_m$ มาทำการมิวเตชัน

ตารางที่ ข.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการมิวเตชัน

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	6 2 3 7 5 8 1 4	0.6723	-
2	6 2 3 7 8 5 1 4	0.9871	-
3	8 2 5 1 6 7 3 4	0.2314	selected
4	7 1 5 4 3 2 8 6	0.9827	-
5	2 8 5 1 7 6 3 4	0.0028	selected

3) ทำการสุ่มตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนบิต เพื่อทำการระบุตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันของการทำมิวเตชัน ดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบที่ 3 = [|8| 2 5 1 |6| 7 3 4] สุ่มได้ตำแหน่งที่ 2, 5 ตามลำดับ

สตริงคำตอบที่ 5 = [2 8 |5| 1 7 |6| 3 4] สุ่มได้ตำแหน่งที่ 1, 3 ตามลำดับ

4) ทำการสลับค่า bit ของตำแหน่งที่ถูกเลือกในการทำมิวเตชัน จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบที่ 3 = [|6| 2 5 1 |8| 7 3 4]

สตริงคำตอบที่ 5 = [2 8 |6| 1 7 |5| 3 4]

ตารางที่ ข.9 สตริงคำตอบหลังการมิวเตชัน

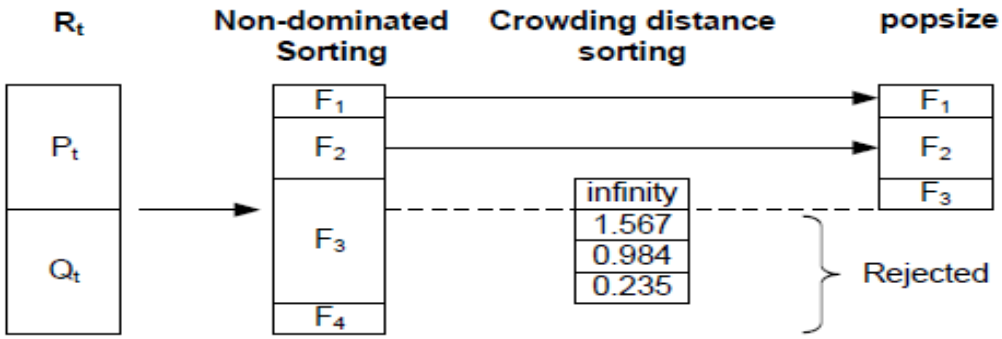
String No.	String Priority
1	6 2 3 7 5 8 1 4
2	6 2 3 7 8 5 1 4
3	6 2 5 1 8 7 3 4
4	7 1 5 4 3 2 8 6
5	2 8 6 1 7 5 3 4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เนื่องจากสตริงคำตอบที่ได้จากการครอสโอเวอร์และมิวเตชันนั้น อาจทำให้เกิดคำตอบที่ดีกว่าหรือแย่กว่าคำตอบที่เคยปรากฏในเจนเนอเรชันที่ผ่านมา เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดจึงเป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดและป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ โดยจะทำการเก็บสตริงคำตอบที่เป็น Non-dominated Solution ซึ่งได้จากการรวมกันของประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P_t) และประชากรคำตอบรุ่นลูก (Q_t) ในสถานที่รวมคำตอบ ($R_t = P_t + Q_t$) และทำการเก็บคำตอบที่ได้จาก Non-dominated Sorting และทำการปรับปรุง (Update) สตริงคำตอบใหม่ในสถานที่เก็บคำตอบด้วยการย้ายสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวเดิมออก และเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวใหม่เข้ามา โดยสตริงคำตอบที่ได้ในขั้นตอนนี้จะกลายเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชันต่อไปดังรูปที่ ข.5 และมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

รูปที่ ข.5 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด



1) นำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกมารวมกัน

ตารางที่ ข.10 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่	1	8 2 3 7 6 5 1 4
	2	1 2 3 5 6 4 7 8
	3	6 2 3 7 5 8 1 4
	4	1 7 5 4 3 2 8 6
	5	8 2 5 1 7 6 3 4
สตริงคำตอบรุ่นลูก	6	6 2 3 7 5 8 1 4
	7	6 2 3 7 8 5 1 4
	8	6 2 5 1 8 7 3 4
	9	7 1 5 4 3 2 8 6
	10	2 8 6 1 7 5 3 4

2) ทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับทุกสตริงคำตอบ

ตารางที่ ข.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่	1	8 2 3 7 6 5 1 4	39.2011	7.6161	179.1429
	2	1 2 3 5 6 4 7 8	39.2011	8.0057	248.8571
	3	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143
	4	1 7 5 4 3 2 8 6	39.2011	8.0057	162.0000
	5	8 2 5 1 7 6 3 4	39.2011	7.6161	154.2857
สตริงคำตอบรุ่นลูก	6	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143
	7	6 2 3 7 8 5 1 4	39.2011	8.0057	162.0000
	8	6 2 5 1 8 7 3 4	39.2011	7.6161	154.2857
	9	7 1 5 4 3 2 8 6	39.2011	8.0057	172.2857
	10	2 8 6 1 7 5 3 4	29.9216	7.6161	240.0000

3) ทำการประเมินค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก

ตารางที่ ข. 12 ค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก

String No.	String Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding distance
1	8 2 3 7 6 5 1 4	39.2011	7.6161	179.1429	2	Infinity
2	1 2 3 5 6 4 7 8	39.2011	8.0057	248.8571	4	Infinity
3	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143	1	Infinity
4	1 7 5 4 3 2 8 6	39.2011	8.0057	162.0000	2	Infinity
5	8 2 5 1 7 6 3 4	39.2011	7.6161	154.2857	1	0.5621
6	6 2 3 7 5 8 1 4	48.4806	7.6161	151.7143	1	3.6511
7	6 2 3 7 8 5 1 4	39.2011	8.0057	162.0000	2	Infinity
8	6 2 5 1 8 7 3 4	39.2011	7.6161	154.2857	1	1.8243
9	7 1 5 4 3 2 8 6	39.2011	8.0057	172.2857	3	Infinity
10	2 8 6 1 7 5 3 4	29.9216	7.6161	240.0000	1	Infinity

4) ทำการเก็บค่าที่ดีสุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น เพื่อเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป จากตารางที่ ข.12 จะเห็นได้ว่ามีสตริงคำตอบที่ 3, 5, 6, 8 และ 9 มีค่า Fitness

เท่ากับ 1 และมีจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้นคือ 5 สตริงคำตอบ เพราะฉะนั้นสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวที่กล่าวมานั้นจึงเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป

ตารางที่ ข.13 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป

String No.	String Priority
1	6 2 3 7 5 8 1 4
2	8 2 5 1 7 6 3 4
3	6 2 3 7 5 8 1 4
4	6 2 5 1 8 7 3 4
5	2 8 6 1 7 5 3 4

เมื่อได้สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป จึงเริ่มกระบวนการทำซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 3.3 เป็นต้นมาจนครบกระบวนการทั้งหมด และทำซ้ำเป็นจำนวนรอบเท่ากับที่กำหนดไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่องในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนาน

การจัดลำดับการผลิตมีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานจะมีการนำเข้าข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการแก้ปัญหา ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนขั้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน รอบเวลาดำเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว
ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง มีรายละเอียดดังนี้

1. จำนวนอนุภาคที่กำหนดให้แต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarms: P) P=3
2. จำนวนฝูงที่กำหนดให้แต่ละรอบการทำงาน (Number of Swarms: S) S=2
3. น้ำหนักการหน่วงที่ใช้ (Weight: W) W=1

1. การสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้น

ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้วัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 3 วัตถุประสงค์ดังที่เสนอในงานวิจัยนี้ ดังในรายละเอียดในบทที่ 2 ซึ่งมีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นได้แก่ A1 A2 และ A3 มีจำนวน Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:1 ขณะที่สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 3 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ B1 B2 และ B3 Minimum Part set (MPS) คือ 1:1:3 แสดงว่าในการจัดอันดับครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A1 A2 A3 B1 และ B2 รุ่นละ 1 ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ B3 จำนวน 3 ผลิตภัณฑ์ เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการ จัดลำดับการผลิต ดังนี้

ตารางที่ ค.1 ค่าสิทธิของลำดับการผลิตตามจำนวนผลิตภัณฑ์

Model sequence	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B3	B3
String	1	2	3	4	5	6	7	8

จากนั้นทำการสุ่มค่าสิทธิการจัดสมดุลการผลิตออกมาเป็นสตริงคำตอบเป็นจำนวนฝูงเท่ากับ 2 และจำนวนอนุภาคของฝูงเท่ากับ 3 โดยจะแสดงการสุ่มค่าสิทธิการจัดสมดุลการผลิต ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ค.2 ค่าสิทธิในการเลือกงาน 6 สตริงคำตอบ

Strings (s, p)	Model Sequence
1,1	5 7 3 8 1 2 4 6
1,2	3 7 6 1 8 5 4 2
1,3	6 2 1 3 7 8 5 4
2,1	2 8 7 4 3 5 1 6
2,2	8 6 3 2 5 7 4 1
2,3	5 8 3 6 4 1 2 7

2.การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่น

เมื่อได้ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 เพื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร จากสตริงคำตอบที่กล่าวมาข้างต้น สามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance
1,1	48.4806	8.0057	134.2857	1	Infinity
1,2	39.2011	7.6161	202.0000	2	Infinity
1,3	39.2011	7.6161	153.4286	1	Infinity
2,1	39.2011	8.0057	143.7143	1	3.0000
2,2	39.2011	7.6161	180.2857	1	Infinity
2,3	48.4806	8.0057	134.2857	1	Infinity

3.กำหนดค่าความแข็งแรงและระยะห่างความหนาแน่นแต่อนุภาคคำตอบ

ทำการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) และค่าความหนาแน่น (Crowding Distance) แล้วทำการกำหนดสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest) ที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 โดยถ้ากรณีที่ฝูงเดียวกันมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 หลายสตริงคำตอบจะพิจารณาที่สตริงคำตอบที่มีความหนาแน่นมากกว่ากัน แต่ถ้าสตริงคำตอบที่ให้ค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นหลายสตริงคำตอบจะทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ดีในฝูงนั้น

ตารางที่ ค.4 ค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดฝูงที่ 1

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance	Selected
1,1	48.4806	8.0057	134.2857	1	Infinity	Lbest
1,2	39.2011	7.6161	202.0000	2	Infinity	-
1,3	39.2011	7.6161	153.4286	1	Infinity	-

ตารางที่ ค.5 ค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดฝูงที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance	Selected
2,1	39.2011	8.0057	143.7143	1	3.0000	-
2,2	39.2011	7.6161	180.2857	1	Infinity	Lbest
2,3	48.4806	8.0057	134.2857	1	Infinity	-

หลังจากได้สตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูงเรียบร้อยแล้วนั้นจึงนำเอาสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูงมาหาค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่น โดยถ้าค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จะกำหนดให้สตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Global Best Solution: Gbest) ของจำนวนประชากรทั้งหมด แต่ถ้าค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากันจะทำการสุ่มสตริงคำตอบขึ้นมาเพื่อเป็นตัวแทนของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมด ดังตารางที่ ค.6

ตารางที่ ค.6 ค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในจำนวนประชากรทั้งหมด

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance	Selected
1,1	48.4806	8.0057	134.2857	1	Infinity	-
2,2	39.2011	7.6161	180.2857	1	Infinity	Gbest

4.เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

จัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดในจำนวนประชากรทั้งหมด (Gbest) ที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เท่านั้นแล้วนำเอาสตริงคำตอบนี้เก็บไว้พิจารณาในรอบถัดไป พิจารณาจากตารางที่ ง.7

ตารางที่ ค.7 ค่าสิทธิของรุ่นผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดในจำนวนประชากรทั้งหมด

Strings (s, p)	Model Sequence
1,1	5 7 3 8 1 2 4 6
2,2	8 6 3 2 5 7 4 1

5.การปรับปรุงตาราง

การปรับปรุงตารางนั้นจำต้องพิจารณาอยู่ 2 ตารางคือ ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Position Matrix) และตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Velocity Matrix) โดยมิติของตารางเท่ากับจำนวนขั้นงาน n=8 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นได้จากการแปลงค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 ทั้งหมด

5.1 การสร้างตารางตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น

แปลงค่าบิตในสตริงคำตอบเป็นค่าตำแหน่งอนุภาค ดังตารางที่ ค.8 และ ค.9

ตารางที่ ค.8 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 1

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0	0	0

ตารางที่ ค.9 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 2

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0

หลังจากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคและตารางตำแหน่งของอนุภาคดังสมการต่อไปนี้

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 (G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$

(ค.1)

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$

(ค.2)

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+exp(-V_{(i,j)})} \quad \text{(ค.3)}$$

โดยกำหนดให้ i คือ รอบที่การทำงาน

j คือ ฝูงของอนุภาคที่ j

w คือ น้ำหนักในการหน่วง กำหนดให้เท่ากับ 1

c_1 และ c_2 คือ ตัวประกอบอัตราการเร่ง กำหนดให้เท่ากับ 0.1

r_1 และ r_2 คือ ตัวเลขจากการสุ่มในช่วง 0 ถึง 1

$P_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดในฝูง j เมื่อรอบการทำงานที่ i

$G_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดในประชากร เมื่อรอบการทำงานที่ i

สร้างตาราง Sigmoid Function $S(V_{(i,j)})$ เพื่อใช้ในการสุ่มเลือกเดินทางในการเลือกประชากรที่ทำงานในแต่ละรอบ

5.2 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีตัวแปรสำคัญคือ ค่า c_1 และ c_2 ค่าเท่ากับ 1 ,ค่า w ค่าเท่ากับ 1 ,ค่า r_1 และ r_2 ค่าจากการสุ่ม

ตารางที่ ค.10 ค่าสุ่ม r_1 และ r_2

	r_1	r_2
ฝูงที่ 1	0.9942	0.0386
ฝูงที่ 2	0.2274	0.5971

ตารางที่ ค.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0039	0.0000	0.0000	0.0039
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	-0.0039	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	-0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0039
7	0.0000	-0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000
8	0.0039	0.0000	0.0000	-0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0

5.3 การปรับปรุงค่าตารางตำแหน่งของอนุภาค

การปรับปรุงตารางตำแหน่งอนุภาคจากสมการที่ ค.2

ตารางที่ ค.13 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 1

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9961	0.0000	0.0000	0.0039
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.9961	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
5	0.9961	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9961
7	0.0000	0.9961	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000
8	0.0039	0.0000	0.0000	0.9961	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค.14 ตำแหน่งอนุภาคของฝูงที่ 2

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0

6.การสร้างสตริงคำตอบสำหรับการใช้งานในรอบถัดไป

สร้างค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มเลือกประชากรในรอบถัดไป โดยใช้เมตริกซ์ Sigmoid Function ในการแปลงค่าการเคลื่อนที่อนุภาคในแต่ละฝูง ดังตาราง ค.15 และ ค.16 ต่อไปนี้

ตารางที่ ค.15 Sigmoid ฝูงที่ 1

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4990	0.5000	0.5000	0.5010
2	0.5000	0.5000	0.5000	0.5010	0.5000	0.4990	0.5000	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
5	0.4990	0.5000	0.5000	0.5000	0.5010	0.5000	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.5010	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4990
7	0.5000	0.4990	0.5000	0.5000	0.5000	0.5010	0.5000	0.5000
8	0.5010	0.5000	0.5000	0.4990	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000

ตารางที่ ค. 16 Sigmoid ฝูงที่ 2

From/to	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ภาคผนวก ง

รายละเอียดชนิดของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

1. รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ตารางที่ ง.1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

ที่มาของปัญหา	Set.	Line A (MPS A)	Line B (MPS B)	No. of Total Tasks	Total MPS	Replication	Problem
Rosenberg และ Ziegler (1992))	Set 1.1	25(1:1)	24(2:3)	49	7	1	1
						2	2
	Set 1.2	25(1:1:1)	25(1:1:3)	50	8	1	3
						2	4
Hahn (1972)	Set 2.1	53(1:2)	51(1:2)	104	6	1	5
						2	6
	Set 2.2	53(1:1:1:1)	53(1:2:2:3)	106	12	1	7
						2	8
Wee และ Magazine (1981)	Set 3.1	75(1:2:2:3)	71(1:1:2:4)	146	16	1	9
						2	10
	Set 3.2	75(1:1:2:4)	75(1:3:3:5)	150	20	1	11
						2	12
Arcus (1965)	Set 4.1	111(1:1:1)	107(1:1:3)	218	8	1	13
						2	14
	Set 4.2	111(1:1:1:3:3)	111(1:2:3:3:6)	222	24	1	15
						2	16

2. ลำดับก่อนหลังและเวลาในการดำเนินงานของปัญหา

ตารางที่ ง.2 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.1.1 ขนาด 49 (25-24) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	3	1	3
2	3	2	3
3	4	3	4
4	5	4	5
4	8	4	8
5	6	5	6
6	7	6	7
6	10	6	10
7	11	7	11
7	12	7	12
8	9	8	9
8	11	8	11
9	13	9	13
9	10	9	10
11	13	11	13
12	15	12	15
13	14	13	14
14	16	14	16
14	19	14	19
14	20	14	20
15	17	15	17
15	22	15	22
16	18	16	18
17	18	17	18
17	23	17	23
18	25	19	22
19	22	20	21
20	21	21	22
20	25	21	24
21	22	-	-

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ลำดับก่อนหลังของของปัญหา Set.1.1 ขนาด 49 (25-24) ขั้น

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
21	24	-	-
23	25	-	-

ตารางที่ ง.3 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.1.1 ขนาด 49 (25-24) ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ A (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ B (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:3)		
	A1	A2	เวลาขั้นงานร่วม	B1	B2	เวลาขั้นงานร่วม
1	0	8	4	7	2	4
2	6	0	3	0	5	3
3	9	9	9	6	11	9
4	4	6	5	8	3	5
5	11	7	9	6	11	9
6	4	4	4	10	0	4
7	6	10	8	5	10	8
8	10	4	7	7	7	7
9	3	7	5	2	7	5
10	0	2	1	1	1	1
11	4	2	3	0	5	3
12	2	0	1	1	1	1
13	5	5	5	5	5	5
14	2	4	3	6	1	3
15	3	7	5	8	3	5
16	0	6	3	0	5	3
17	13	13	13	13	13	13
18	7	3	5	2	7	5
19	0	4	2	5	0	2
20	6	0	3	3	3	3
21	5	9	7	10	5	7
22	3	7	5	8	3	5
23	6	0	3	0	5	3

ตารางที่ ง.3 (ต่อ) เวลาขั้นงานของของปัญหา Set.1.1 ขนาด 49 (25-24) ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ A (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ B (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:3)		
	A1	A2	เวลาขั้นงานร่วม	B1	B2	เวลาขั้นงานร่วม
24	8	8	8	11	6	8
25	4	4	4	-	-	-

ตารางที่ ง.4 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.1.2 ขนาด 50 (25-25) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ A		สายการประกอบที่ B	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	3	1	3
2	3	2	3
3	4	3	4
4	5	4	5
4	8	4	8
5	6	5	6
6	7	6	7
6	10	6	10
7	11	7	11
7	12	7	12
8	9	8	9
8	11	8	11
9	13	9	13
9	10	9	10
11	13	11	13
12	15	12	15
13	14	13	14
14	16	14	16
14	19	14	19
14	20	14	20

ตารางที่ ง.4 (ต่อ) ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.1.2 ขนาด 50 (25-25) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ A		**สายการประกอบที่ B**	
ขั้นงานก่อนหน้า	**ขั้นงานตามหลัง**	**ขั้นงานก่อนหน้า**	**ขั้นงานตามหลัง**
15	17	15	17
15	22	15	22
16	18	16	18
17	18	17	18
17	23	17	23
18	25	19	22
19	22	20	21
20	21	21	22
20	25	21	24
21	22	21	22
21	24	21	24
23	25	23	25

ตารางที่ ง. 5 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.1.2 ขนาด 50 (25-25) ขั้นงาน

ขั้นงาน	**เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ A**				**เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ B**			
	(สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				**(สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)**			
	A1	**A2**	**A3**	**เวลาขั้นงานร่วม**	**B1**	**B2**	**B3**	**เวลาขั้นงานร่วม**
1	4	4	4	4	4	4	4	4
2	0	6	3	3	0	6	3	3
3	9	9	9	9	9	9	9	9
4	6	4	5	5	6	4	5	5
5	10	8	9	9	10	8	9	9
6	7	0	5	4	7	0	5	4.4
7	9	7	8	8	9	7	8	8
8	7	7	7	7	7	7	7	7
9	5	5	5	5	5	5	5	5

ตารางที่ ง.5 (ต่อ) เวลาขั้นงานของปัญหา Set.1.2 ขนาด 50 (25-25) ขั้น

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ A (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ B (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	A1	A2	A3	เวลาขั้นงานร่วม	B1	B2	B3	เวลาขั้นงานร่วม
10	0	2	1	1	0	2	1	1
11	3	3	3	3	3	3	3	3
12	1	1	1	1	1	1	1	1
13	3	4	6	4.33	3	4	6	5
14	4	2	3	3	4	2	3	3
15	5	5	5	5	5	5	5	5
16	5	6	0	3.67	5	6	0	2.2
17	13	13	13	13	13	13	13	13
18	5	5	5	5	5	5	5	5
19	1	3	2	2	1	3	2	2
20	0	6	3	3	0	6	3	3
21	7	7	7	7	7	7	7	7
22	6	4	5	5	6	4	5	5
23	3	3	3	3	3	3	3	3
24	6	8	10	8	6	8	10	8.8
25	4	4	4	4	4	4	4	4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.6 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.2.1 ขนาด 104 (53-51) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
1	3	1	3
1	4	1	4
1	5	1	5
1	6	1	6
1	7	1	7
2	36	2	36
3	36	3	36
4	9	4	9
5	9	5	9
6	9	6	9
7	9	7	9
8	9	8	9
9	10	9	10
10	11	10	11
11	12	11	12
12	13	12	13
12	14	12	14
12	15	12	15
13	16	13	16
13	17	13	17
13	18	13	18
14	22	14	22
15	16	15	16
15	17	15	17
16	29	16	29
16	30	16	30
16	31	16	31
17	19	17	19
18	42	18	42
19	20	19	20
19	21	19	21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
19	22	19	22
20	23	20	23
21	24	21	24
22	25	22	25
23	36	23	36
24	36	24	36
25	26	25	26
26	27	26	27
27	28	27	28
28	29	28	29
28	30	28	30
28	31	28	31
28	32	28	32
28	33	28	33
28	34	28	34
29	35	29	35
30	35	30	35
31	35	31	35
32	35	32	35
33	35	33	35
34	35	34	35
35	36	35	36
36	37	36	37
37	38	37	38
37	39	37	39
37	40	37	40
38	41	38	41
39	41	39	41
40	41	40	41
41	42	41	42
42	43	42	43
42	44	42	44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
42	45	42	45
42	46	42	46
42	47	42	47
43	48	43	48
44	49	44	49
45	51	45	51
45	52	46	50
46	50	47	51
47	51	48	51
47	52	49	51
48	51	50	51
48	52	-	-
49	51	-	-
49	52	-	-
50	51	-	-
50	52	-	-
51	53	-	-
52	53	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.7 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.2.1 ขนาด 104 (53-51) ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)		
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาขั้นงานร่วม
1	1201	856	971	1045	934	971
2	142	142	142	142	142	142
3	142	142	142	142	142	142
4	142	142	142	142	142	142
5	125	92	103	153	78	103
6	0	144	96	50	119	96
7	21	138	99	135	81	99
8	877	1372	1207	1399	1111	1207
9	358	61	160	230	125	160

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)		
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาขั้นงานร่วม
10	0	270	180	136	202	180
11	92	77	82	246	0	82
12	142	19	60	22	79	60
13	60	138	112	62	137	112
14	494	383	420	398	431	420
15	1556	1556	1556	1324	1672	1556
16	264	222	236	236	236	236
17	147	315	259	159	309	259
18	283	46	125	163	106	125
19	583	610	601	317	743	601
20	240	0	80	130	55	80
21	0	120	80	130	55	80
22	104	53	70	0	105	70
23	87	90	89	57	105	89
24	149	59	89	87	90	89
25	105	105	105	97	109	105
26	356	317	330	308	341	330
27	124	136	132	0	198	132
28	31	88	69	151	28	69
29	63	117	99	163	67	99
30	0	105	70	70	70	70
31	0	105	70	70	70	70
32	226	124	158	474	0	158
33	389	92	191	225	174	191
34	108	51	70	210	0	70
35	43	58	53	89	35	53
36	150	0	50	62	44	50
37	87	144	125	175	100	125
38	353	353	353	235	412	353
39	90	60	70	70	70	70
40	84	150	128	122	131	128
41	35	80	65	49	73	65

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)		
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาขั้นงานร่วม
42	1919	1703	1775	1775	1775	1775
43	91	91	91	109	82	91
44	91	91	91	47	113	91
45	193	73	113	51	144	113
46	337	562	487	383	539	487
47	414	0	138	82	166	138
48	34	103	80	240	0	80
49	76	82	80	240	0	80
50	57	69	65	53	71	65
51	26	47	40	28	46	40
52	690	768	742	-	-	-
53	367	1444	1085	-	-	-

ตารางที่ ง.8 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.2.2 ขนาด 106 (53-53) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
1	3	1	3
1	4	1	4
1	5	1	5
1	6	1	6
1	7	1	7
2	36	2	36
3	36	3	36
4	9	4	9
5	9	5	9
6	9	6	9
7	9	7	9
8	9	8	9
9	10	9	10
10	11	10	11

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
11	12	11	12
12	13	12	13
12	14	12	14
12	15	12	15
13	16	13	16
13	17	13	17
13	18	13	18
14	22	14	22
15	16	15	16
15	17	15	17
16	29	16	29
16	30	16	30
16	31	16	31
17	19	17	19
18	42	18	42
19	20	19	20
19	21	19	21
19	22	19	22
20	23	20	23
21	24	21	24
22	25	22	25
23	36	23	36
24	36	24	36
25	26	25	26
26	27	26	27
27	28	27	28
28	29	28	29
28	30	28	30
28	31	28	31
28	32	28	32
28	33	28	33
28	34	28	34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
29	35	29	35
30	35	30	35
31	35	31	35
32	35	32	35
33	35	33	35
34	35	34	35
35	36	35	36
36	37	36	37
37	38	37	38
37	39	37	39
37	40	37	40
38	41	38	41
39	41	39	41
40	41	40	41
41	42	41	42
42	43	42	43
42	44	42	44
42	45	42	45
42	46	42	46
42	47	42	47
43	48	43	48
44	49	44	49
45	51	45	51
45	52	46	50
46	50	47	51
47	51	48	51
47	52	49	51
48	51	50	51
48	52	48	52
49	51	49	51
49	52	49	52
50	51	50	51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	**ขั้นงานตามหลัง**	**ขั้นงานก่อนหน้า**	**ขั้นงานตามหลัง**
50	52	50	52
51	53	51	53
52	53	52	53

ตารางที่ ง.9 เวลาขั้นงานของปัญหา Set.2.2 ขนาด 106 (53-53) ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2				
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	A1	A2	A3	A4	เวลาขั้นงานร่วม	B1	B2	B3	B4	เวลาขั้นงานร่วม
1	971	971	971	971	971	971	971	971	971	971
2	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142
3	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142
4	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142
5	106	108	103	95	103	106	108	103	95	101.625
6	0	117	117	130	91	0	117	117	130	107.25
7	120	79	101	101	100.25	120	79	101	101	97.875
8	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207	1207
9	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
10	195	172	173	180	180	195	172	173	180	178.125
11	90	78	60	100	82	90	78	60	100	83.25
12	120	0	0	120	60	120	0	0	120	60
13	112	108	116	112	112	112	108	116	112	112
14	431	417	423	414	421.25	431	417	423	414	419.125
15	1556	1556	1556	1556	1556	1556	1556	1556	1556	1556
16	233	204	242	257	234	233	204	242	257	237

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2				
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	A1	A2	A3	A4	เวลาขั้นงานร่วม	B1	B2	B3	B4	เวลาขั้นงานร่วม
17	284	255	272	234	261.25	284	255	272	234	255
18	114	142	108	136	125	114	142	108	136	127.75
19	587	615	615	587	601	587	615	615	587	601
20	160	0	0	160	80	160	0	0	160	80
21	75	75	85	85	80	75	75	85	85	81.25
22	110	0	0	150	65	110	0	0	150	70
23	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
24	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
25	120	113	95	96	106	120	113	95	96	103
26	347	315	322	340	331	347	315	322	340	330.125
27	136	150	132	118	134	136	150	132	118	131.75
28	73	63	70	70	69	73	63	70	70	68.625
29	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
30	0	0	280	0	70	0	0	280	0	70
31	0	280	0	0	70	0	280	0	0	70
32	163	156	163	151	158.25	163	156	163	151	156.75
33	202	190	190	184	191.5	202	190	190	184	189.25
34	0	140	140	0	70	0	140	140	0	70
35	63	50	51	51	53.75	63	50	51	51	52.25
36	120	100	0	0	55	120	100	0	0	40
37	128	124	130	120	125.5	128	124	130	120	124.5
38	356	360	348	348	353	356	360	348	348	352
39	80	100	100	0	70	80	100	100	0	60

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2				
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	A1	A2	A3	A4	เวลาขั้นงานร่วม	B1	B2	B3	B4	เวลาขั้นงานร่วม
40	137	129	129	119	128.5	137	129	129	119	126.25
41	70	90	0	100	65	70	90	0	100	68.75
42	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775	1775
43	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
44	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
45	114	111	117	111	113.25	114	111	117	111	112.875
46	492	486	473	495	486.5	492	486	473	495	486.875
47	140	137	138	138	138.25	140	137	138	138	138
48	0	105	100	100	76.25	0	105	100	100	88.75
49	114	0	105	105	81	114	0	105	105	79.875
50	67	64	65	64	65	67	64	65	64	64.625
51	0	0	80	80	40	0	0	80	80	50
52	731	750	744	740	741.25	731	750	744	740	742.375
53	1085	1085	1085	1085	1085	1085	1085	1085	1085	1085

ตารางที่ ง.10 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.3.1 ขนาด 146 (75 -71) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		**สายการประกอบที่ 2**	
ขั้นงานก่อนหน้า	**ขั้นงานตามหลัง**	**ขั้นงานก่อนหน้า**	**ขั้นงานตามหลัง**
1	2	1	2
1	3	1	3
1	4	1	4
1	5	1	5
1	6	1	6
1	7	1	7
2	15	2	15

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
3	13	3	13
3	24	3	24
4	8	4	8
4	14	4	14
4	16	4	16
5	12	5	12
5	15	5	15
6	9	6	9
6	10	6	10
6	11	6	11
6	13	6	13
9	20	9	20
9	24	9	24
10	18	10	18
12	19	12	19
13	22	13	22
15	17	15	17
15	20	15	20
15	23	15	23
16	21	16	21
16	26	16	26
17	30	17	30
18	26	18	26
18	30	18	30
20	27	20	27
21	33	21	33
24	25	24	25
25	28	25	28
25	30	25	30
25	33	25	33
25	34	25	34
26	31	26	31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
26	32	26	32
26	41	26	41
27	29	27	29
27	35	27	35
27	36	27	36
31	37	31	37
31	39	31	39
32	44	32	44
32	45	32	45
33	41	33	41
35	38	35	38
35	42	35	42
36	40	36	40
36	43	36	43
39	51	39	51
40	46	40	46
42	47	42	47
43	48	43	48
43	50	43	50
46	51	46	51
46	48	46	48
47	49	47	49
47	50	47	50
47	52	47	52
47	53	47	53
49	59	49	59
49	61	49	61
49	62	49	62
50	54	50	54
50	55	50	55
50	60	50	60
50	62	50	62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
52	56	52	56
52	57	52	57
53	58	53	58
55	63	55	63
58	65	58	65
59	64	59	64
59	66	59	66
62	67	62	67
66	68	66	68
68	69	68	69
68	70	68	70
68	71	68	71
68	72	-	-
68	73	-	-
68	74	-	-
68	75	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.11 เวลาขั้นงานของปัญหาขนาด 75-71 ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:2:4)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
1	21	22	25	23	23	23	23	23	23	23
2	22	26	20	26	24	25	27	24	23	24
3	25	25	25	25	25	26	26	26	24	25
4	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
5	20	23	23	24	23	23	23	23	23	23
6	19	22	19	25	22	24	22	25	20	22

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:2:4)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
7	0	5	10	6	6	12	0	4	7	6
8	19	23	24	21	22	24	18	21	23	22
9	21	25	22	23	23	23	23	23	23	23
10	24	23	22	18	21	24	20	26	18	21
11	22	20	18	26	22	24	20	14	26	22
12	17	15	14	15	15	20	22	11	14	15
13	2	8	8	2	5	10	2	0	7	5
14	26	21	22	24	23	23	23	23	23	23
15	5	2	1	7	4	0	8	6	3	4
16	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
17	23	24	20	19	21	24	26	21	19	21
18	2	7	6	4	5	8	8	2	5	5
19	25	23	26	23	24	27	23	25	23	24
20	25	25	25	25	25	24	26	21	27	25
21	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
22	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
23	18	25	26	24	24	23	25	24	24	24
24	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
25	16	24	15	22	20	17	23	22	19	20
26	26	21	22	24	23	23	23	23	23	23
27	25	25	25	25	25	24	22	25	26	25
28	10	19	19	6	13	4	10	17	14	13
29	6	0	0	6	3	4	0	6	2	3
30	0	20	9	10	11	14	12	9	11	11
31	15	24	21	21	21	23	25	22	19	21
32	23	17	25	23	22	18	24	19	24	22
33	25	19	18	23	21	20	24	16	23	21
34	18	20	23	24	22	17	25	23	22	22
35	25	25	25	25	25	27	21	26	25	25
36	21	0	11	7	8	5	3	6	11	8
37	24	22	21	22	22	25	19	22	22	22
38	26	25	22	24	24	25	17	25	25	24
39	24	25	21	20	22	18	24	23	22	22
40	21	22	14	25	21	14	20	23	22	21
41	2	10	4	6	6	21	9	9	0	6
42	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
43	25	19	22	23	22	15	21	18	26	22
44	0	2	10	8	6	9	13	13	0	6
45	23	21	26	17	21	0	24	24	24	21

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:2:4)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
46	25	25	25	25	25	23	21	26	26	25
47	17	16	15	3	11	12	14	15	8	11
48	20	23	25	20	22	26	20	23	21	22
49	14	22	25	20	21	23	25	22	19	21
50	25	25	25	25	25	24	22	25	26	25
51	17	22	23	23	22	17	21	21	24	22
52	24	20	20	24	22	23	21	26	20	22
53	22	25	23	22	23	23	23	23	23	23
54	23	21	21	23	22	14	16	23	25	22
55	25	25	22	19	22	20	20	24	22	22
56	25	25	25	25	25	27	23	25	25	25
57	23	24	19	25	23	23	23	23	23	23
58	16	23	20	22	21	19	21	22	21	21
59	21	23	26	19	22	24	18	27	20	22
60	22	24	23	20	22	21	15	22	24	22
61	23	24	21	21	22	25	23	22	21	22
62	23	24	15	25	22	24	20	20	23	22
63	18	18	21	24	21	20	22	25	19	21
64	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
65	23	20	26	23	23	23	23	23	23	23
66	4	3	3	0	2	0	2	1	3	2
67	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
68	25	25	25	25	25	27	23	27	24	25
69	24	26	25	22	24	20	22	25	25	24
70	15	25	18	25	22	15	23	23	23	22
71	21	26	22	25	24	25	17	27	24	24
72	8	0	0	8	4	-	-	-	-	-
73	21	21	19	25	22	-	-	-	-	-
74	4	13	13	8	10	-	-	-	-	-
75	25	25	25	25	25	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.12 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set.3.2 ขนาด 150 (75 -75) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
1	3	1	3
1	4	1	4
1	5	1	5
1	6	1	6
1	7	1	7
2	15	2	15
3	13	3	13
3	24	3	24
4	8	4	8
4	14	4	14
4	16	4	16
5	12	5	12
5	15	5	15
6	9	6	9
6	10	6	10
6	11	6	11
6	13	6	13
9	20	9	20
9	24	9	24
10	18	10	18
12	19	12	19
13	22	13	22
15	17	15	17
15	20	15	20
15	23	15	23
16	21	16	21
16	26	16	26
17	30	17	30
18	26	18	26
18	30	18	30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
20	27	20	27
21	33	21	33
24	25	24	25
25	28	25	28
25	30	25	30
25	33	25	33
25	34	25	34
26	31	26	31
26	32	26	32
26	41	26	41
27	29	27	29
27	35	27	35
27	36	27	36
31	37	31	37
31	39	31	39
32	44	32	44
32	45	32	45
33	41	33	41
35	38	35	38
35	42	35	42
36	40	36	40
36	43	36	43
39	51	39	51
40	46	40	46
42	47	42	47
43	48	43	48
43	50	43	50
46	51	46	51
46	48	46	48
47	49	47	49
47	50	47	50
47	52	47	52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
47	53	47	53
49	59	49	59
49	61	49	61
49	62	49	62
50	54	50	54
50	55	50	55
50	60	50	60
50	62	50	62
52	56	52	56
52	57	52	57
53	58	53	58
55	63	55	63
58	65	58	65
59	64	59	64
59	66	59	66
62	67	62	67
66	68	66	68
68	69	68	69
68	70	68	70
68	71	68	71
68	72	68	72
68	73	68	73
68	74	68	74
68	75	68	75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.13เวลาขั้นงานของปัญหา Set.3.2 ขนาด 150 (75 -75) ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2				
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
1	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
2	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
3	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
4	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
5	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
6	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
7	0	6	7	7	6	0	6	7	7	6.17
8	23	21	22	22	22	23	21	22	22	21.83
9	21	24	23	23	22.88	21	24	23	23	23.08
10	23	23	19	21	21	23	23	19	21	21.17
11	23	23	23	21	22	23	23	23	21	22.17
12	12	16	14	16	15	12	16	14	16	15.17
13	6	0	6	6	5.25	6	0	6	6	4.5
14	25	23	21	24	23.25	25	23	21	24	23.08
15	8	5	0	5	4.13	8	5	0	5	4
16	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
17	24	23	20	20	20.88	24	23	20	20	21.08
18	9	9	9	0	4.5	9	9	9	0	5.25
19	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
20	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
21	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
22	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
23	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
24	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
25	18	22	20	20	20	18	22	20	20	20.33
26	20	24	20	25	23	20	24	20	25	23.08
27	27	24	27	24	25.13	27	24	27	24	25
28	14	12	13	13	13	14	12	13	13	12.83
29	0	0	4	4	3	0	0	4	4	2.67
30	7	7	23	7	11	7	7	23	7	11
31	26	24	18	20	20.75	26	24	18	20	21
32	23	24	24	20	21.88	23	24	24	20	22.25
33	22	22	18	22	21	22	22	18	22	21
34	23	25	20	22	22	23	25	20	22	22.33
35	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
36	5	4	4	12	8.13	5	4	4	12	7.42
37	23	21	22	22	22	23	21	22	22	21.83
38	23	23	21	26	24	23	23	21	26	23.75
39	22	23	23	21	21.88	22	23	23	21	22.08
40	21	19	22	21	21	21	19	22	21	20.75
41	0	7	7	6	5.63	0	7	7	6	6
42	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
43	21	23	22	22	22	21	23	22	22	22.17
44	7	0	7	8	6.63	7	0	7	8	5.67
45	23	22	20	21	21.13	23	22	20	21	21.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
46	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
47	10	12	9	12	11	10	12	9	12	11.08
48	21	21	23	22	22	21	21	23	22	21.92
49	20	20	24	20	21	20	20	24	20	21
50	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
51	25	23	22	21	22	25	23	22	21	22.08
52	22	22	24	21	22	22	22	24	21	22.08
53	21	24	25	22	22.88	21	24	25	22	23.17
54	26	24	23	20	22	26	24	23	20	22.25
55	23	21	24	21	22	23	21	24	21	21.92
56	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
57	24	22	23	23	23	24	22	23	23	22.83
58	24	24	19	20	20.75	24	24	19	20	21.08
59	14	20	23	24	22	14	20	23	24	21.92
60	22	21	21	23	22.13	22	21	21	23	21.92
61	22	21	20	24	22.38	22	21	20	24	22.08
62	23	21	22	22	22	23	21	22	22	21.83
63	20	22	19	22	21	20	22	19	22	21.08
64	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
65	23	22	22	24	23.13	23	22	22	24	22.92
66	0	0	0	4	2	0	0	0	4	1.67
67	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
68	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลาขั้นงานร่วม
69	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
70	20	20	23	23	22.25	20	20	23	23	22
71	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
72	14	14	0	0	3.5	14	14	0	0	4.67
73	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
74	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
75	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.14 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set. 4.1 ขนาด 218 (111-107) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
2	3	2	3
3	4	3	4
4	5	4	5
4	6	4	6
4	7	4	7
4	8	4	8
4	9	4	9
4	10	4	10
5	39	5	39
6	39	10	11
7	83	10	12
8	71	11	13
9	32	11	14
10	11	11	15
10	12	11	16
11	13	11	17
11	14	11	18
11	15	11	19
11	16	11	20
11	17	11	21
11	18	12	13
11	19	12	14
11	20	12	15
11	21	12	16
12	13	12	17
12	14	12	18
12	15	12	19
12	16	12	20
12	17	12	21
12	18	13	71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
12	19	14	22
12	20	14	23
12	21	14	24
13	71	14	25
14	22	15	26
14	23	16	27
14	24	17	28
14	25	18	29
15	26	19	30
16	27	20	91
17	28	22	31
18	29	22	83
19	30	23	32
20	91	23	33
21	111	24	69
22	31	24	70
22	83	25	34
23	32	26	82
23	33	27	35
24	69	28	36
24	70	29	37
25	34	30	38
26	82	31	39
27	35	32	41
28	36	34	42
29	37	35	43
30	38	36	44
31	39	36	91
32	41	37	45
33	111	37	91
34	42	38	46
35	43	38	91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
36	44	39	40
36	91	41	69
37	45	41	70
37	91	42	47
38	46	43	48
38	91	43	49
39	40	44	50
40	111	45	51
41	69	46	52
41	70	47	54
42	47	47	55
43	48	47	56
43	49	47	57
44	50	47	58
45	51	47	59
46	52	47	60
47	54	48	53
47	55	49	91
47	56	54	69
47	57	54	70
47	58	55	61
47	59	55	62
47	60	55	63
48	53	56	63
49	91	56	64
50	111	57	65
51	111	57	91
52	111	58	66
53	111	58	91
54	69	59	67
54	70	59	91
55	61	60	68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
55	62	60	91
55	63	61	69
56	63	61	70
56	64	62	71
57	65	64	72
57	91	69	77
58	66	69	78
58	91	70	73
59	67	71	91
59	91	72	74
60	68	73	75
60	91	74	76
61	69	75	77
61	70	75	78
62	71	75	79
63	111	76	80
64	72	76	81
65	111	76	82
66	111	77	83
67	111	78	84
68	111	79	85
69	77	80	86
69	78	80	91
70	73	81	87
71	91	81	91
72	74	83	91
73	75	84	88
74	76	84	89
75	77	84	91
75	78	87	90
75	79	88	105
76	80	89	105

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
76	81	91	92
76	82	91	93
77	83	91	94
78	84	92	95
79	85	93	95
80	86	94	95
80	91	95	96
81	87	95	97
81	91	95	98
82	111	95	99
83	91	95	100
84	88	95	104
84	89	96	101
84	91	97	102
85	111	98	103
86	111	101	105
87	90	102	106
88	105	102	107
89	105	103	107
90	111	-	-
91	92	-	-
91	93	-	-
91	94	-	-
92	95	-	-
93	95	-	-
94	95	-	-
95	96	-	-
95	97	-	-
95	98	-	-
95	99	-	-
95	100	-	-
95	104	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
96	101	-	-
97	102	-	-
98	103	-	-
99	111	-	-
100	111	-	-
101	105	-	-
102	106	-	-
102	107	-	-
103	107	-	-
103	108	-	-
104	111	-	-
105	111	-	-
106	109	-	-
107	111	-	-
108	110	-	-
109	111	-	-
110	111	-	-

ตารางที่ ง.15 เวลาขั้นงานของปัญหา Set. 4.1 ขนาด 218 (111-107) ขั้นงาน

Task	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม
1	2411	0	3469	1960	0	1703	2699	1960
2	776	2546	1823	1715	1253	2408	1638	1715
3	0	432	1773	735	1743	1932	0	735
4	2156	2267	722	1715	1502	1025	2016	1715
5	184	826	460	490	350	327	591	490
6	1512	0	2163	1225	1074	521	1510	1225
7	0	89	418	169	0	122	241	169
8	3586	1585	1585	2252	1210	0	3350	2252
9	1459	1108	1108	1225	4028	2097	0	1225
10	1652	3267	2038	2319	2319	2319	2319	2319
11	1309	2788	1048	1715	1732	975	1956	1715

Task	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม
12	1266	654	1020	980	1015	705	1060	980
13	920	574	711	735	583	1343	583	735
14	1637	2414	2792	2281	2281	2281	2281	2281
15	3680	2285	2285	2750	2750	2750	2750	2750
16	21	147	63	77	71	44	90	77
17	132	91	44	89	113	113	73	89
18	21	41	91	51	36	90	43	51
19	770	77	245	364	628	262	310	364
20	347	521	347	405	260	361	468	405
21	1979	4665	2536	3060	3108	4821	2457	3060
22	169	182	24	125	144	103	126	125
23	3585	3902	2800	3429	3444	4923	2926	3429
24	22	85	22	43	31	46	46	43
25	2373	3464	4453	3430	3894	3314	3314	3430
26	2375	1453	2052	1960	2784	1592	1808	1960
27	26	15	46	29	22	63	20	29
28	36	45	0	27	0	0	45	27
29	14	23	8	15	17	7	17	15
30	0	0	363	121	126	128	117	121
31	1366	1240	2539	1715	2276	2048	1417	1715
32	2404	1590	2387	2127	2127	2127	2127	2127
33	1775	1775	860	1470	1491	1839	1340	1470
34	4037	4037	4037	4037	4037	4037	4037	4037
35	76	97	31	68	145	0	65	68
36	71	55	60	62	55	90	55	62
37	62	24	40	42	47	22	47	42
38	410	437	245	364	395	240	395	364
39	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998
40	2184	1287	939	1470	1644	774	1644	1470
41	3816	1443	3630	2963	3369	3046	2800	2963
42	5689	5689	5689	5689	5689	5689	5689	5689
43	87	87	30	68	56	116	56	68
44	19	25	10	18	24	30	12	18
45	3	18	9	10	6	11	11	10
46	59	86	98	81	105	141	53	81
47	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200

Task	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม
48	85	16	16	39	16	53	42	39
49	64	81	56	67	87	41	69	67
50	0	81	0	27	32	46	19	27
51	12	24	9	15	19	17	13	15
52	162	50	151	121	0	143	154	121
53	35	35	104	58	26	66	66	58
54	1232	1736	2177	1715	1614	2119	1614	1715
55	178	72	125	125	94	138	131	125
56	4010	4010	4010	4010	4010	4010	4010	4010
57	1971	468	1971	1470	938	2173	1413	1470
58	1950	1950	510	1470	1047	1761	1514	1470
59	2778	3159	972	2303	2303	2303	2303	2303
60	1097	1097	3686	1960	2222	2046	1844	1960
61	3079	1411	2125	2205	2205	2205	2205	2205
62	4018	4018	4018	4018	4018	4018	4018	4018
63	998	3617	3617	2744	2744	2744	2744	2744
64	3340	3740	1917	2999	2999	2999	2999	2999
65	1150	134	921	735	836	331	836	735
66	800	409	996	735	789	336	850	735
67	521	1304	380	735	635	553	829	735
68	748	601	856	735	643	197	945	735
69	432	401	802	545	528	850	449	545
70	4213	2464	3481	3386	3093	2833	3668	3386
71	3621	4365	1716	3234	3002	2668	3500	3234
72	2791	1492	2332	2205	4263	0	2254	2205
73	2109	2109	2400	2206	2206	2206	2206	2206
74	759	711	0	490	148	148	718	490
75	812	812	851	825	377	805	981	825
76	2440	4072	4072	3528	1089	3888	4221	3528
77	3664	3097	3943	3568	3391	4276	3391	3568
78	770	767	2063	1200	924	924	1384	1200
79	948	152	754	618	1089	669	444	618
80	1024	912	2474	1470	3135	2697	506	1470
81	2350	1301	1494	1715	2168	4226	727	1715
82	735	735	735	735	897	495	761	735
83	1441	3183	1256	1960	801	932	2689	1960

Task	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาขั้นงานร่วม
84	2889	2889	2889	2889	2889	2889	2889	2889
85	400	488	966	618	752	442	632	618
86	477	570	423	490	624	356	490	490
87	869	231	1105	735	712	542	807	735
88	486	199	785	490	934	160	452	490
89	841	815	1107	921	1600	557	816	921
90	156	156	666	326	422	422	262	326
91	5390	5390	5390	5390	5390	5390	5390	5390
92	219	256	254	243	0	1215	0	243
93	0	0	1113	371	185	251	473	371
94	38	61	75	58	39	83	56	58
95	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059
96	1194	1460	1021	1225	1591	1624	970	1225
97	2307	0	0	769	3845	0	0	769
98	926	1378	0	768	1302	2538	0	768
99	985	2485	1540	1670	584	2285	1827	1670
100	1058	2894	1058	1670	1548	361	2147	1670
101	235	428	807	490	389	123	646	490
102	182	83	341	202	149	192	223	202
103	236	236	137	203	48	214	251	203
104	150	228	228	202	162	212	212	202
105	2561	2664	3007	2744	2744	2744	2744	2744
106	186	214	86	162	36	231	181	162
107	267	438	267	324	266	217	379	324
108	125	186	175	162	-	-	-	-
109	128	173	62	121	-	-	-	-
110	217	217	52	162	-	-	-	-
111	34	91	148	91	-	-	-	-

ตารางที่ ง. 16 ลำดับก่อนหลังของปัญหา Set. 4.2 ขนาด 222 (111-111) ขั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
2	3	2	3
3	4	3	4
4	5	4	5
4	6	4	6
4	7	4	7
4	8	4	8
4	9	4	9
4	10	4	10
5	39	5	39
6	39	10	11
7	83	10	12
8	71	11	13
9	32	11	14
10	11	11	15
10	12	11	16
11	13	11	17
11	14	11	18
11	15	11	19
11	16	11	20
11	17	11	21
11	18	12	13
11	19	12	14
11	20	12	15
11	21	12	16
12	13	12	17
12	14	12	18
12	15	12	19
12	16	12	20
12	17	12	21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
12	18	13	71
12	19	14	22
12	20	14	23
12	21	14	24
13	71	14	25
14	22	15	26
14	23	16	27
14	24	17	28
14	25	18	29
15	26	19	30
16	27	20	91
17	28	22	31
18	29	22	83
19	30	23	32
20	91	23	33
21	111	24	69
22	31	24	70
22	83	25	34
23	32	26	82
23	33	27	35
24	69	28	36
24	70	29	37
25	34	30	38
26	82	31	39
27	35	32	41
28	36	34	42
29	37	35	43
30	38	36	44
31	39	36	91
32	41	37	45
33	111	37	91
34	42	38	46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
35	43	38	91
36	44	39	40
36	91	41	69
37	45	41	70
37	91	42	47
38	46	43	48
38	91	43	49
39	40	44	50
40	111	45	51
41	69	46	52
41	70	47	54
42	47	47	55
43	48	47	56
43	49	47	57
44	50	47	58
45	51	47	59
46	52	47	60
47	54	48	53
47	55	49	91
47	56	54	69
47	57	54	70
47	58	55	61
47	59	55	62
47	60	55	63
48	53	56	63
49	91	56	64
50	111	57	65
51	111	57	91
52	111	58	66
53	111	58	91
54	69	59	67
54	70	59	91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
55	61	60	68
55	62	60	91
55	63	61	69
56	63	61	70
56	64	62	71
57	65	64	72
57	91	69	77
58	66	69	78
58	91	70	73
59	67	71	91
59	91	72	74
60	68	73	75
60	91	74	76
61	69	75	77
61	70	75	78
62	71	75	79
63	111	76	80
64	72	76	81
65	111	76	82
66	111	77	83
67	111	78	84
68	111	79	85
69	77	80	86
69	78	80	91
70	73	81	87
71	91	81	91
72	74	83	91
73	75	84	88
74	76	84	89
75	77	84	91
75	78	87	90
75	79	88	105

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
76	80	89	105
76	81	91	92
76	82	91	93
77	83	91	94
78	84	92	95
79	85	93	95
80	86	94	95
80	91	95	96
81	87	95	97
81	91	95	98
82	111	95	99
83	91	95	100
84	88	95	104
84	89	96	101
84	91	97	102
85	111	98	103
86	111	101	105
87	90	102	106
88	105	102	107
89	105	103	107
90	111	90	111
91	92	91	92
91	93	91	93
91	94	91	94
92	95	92	95
93	95	93	95
94	95	94	95
95	96	95	96
95	97	95	97
95	98	95	98
95	99	95	99
95	100	95	100

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง	ขั้นงานก่อนหน้า	ขั้นงานตามหลัง
95	104	95	104
96	101	96	101
97	102	97	102
98	103	98	103
99	111	99	111
100	111	100	111
101	105	101	105
102	106	102	106
102	107	102	107
103	107	103	107
103	108	103	108
104	111	104	111
105	111	105	111
106	109	106	109
107	111	107	111
108	110	108	110
109	111	109	111
110	111	110	111

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.17 เวลาขั้นงานของปัญหา Set. 4.2 ขนาด 222 (111-111) ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1						เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)						(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม
1	1965	1960	1960	1960	1960	1960.56	1965	1960	1960	1960	1960	1960.33
2	1715	1715	1715	1715	1715	1715.00	1715	1715	1715	1715	1715	1715.00
3	735	735	735	735	735	735.00	735	735	735	735	735	735.00
4	1715	1715	1715	1715	1715	1715.00	1715	1715	1715	1715	1715	1715.00
5	490	485	500	495	485	490.56	490	485	500	495	485	490.33
6	1227	1220	1217	1231	1225	1225.78	1227	1220	1217	1231	1225	1224.07
7	168	171	171	165	171	168.67	168	171	171	165	171	169.60
8	2252	2252	2252	2252	2252	2252.00	2252	2252	2252	2252	2252	2252.00
9	1222	1217	1233	1231	1220	1225.00	1222	1217	1233	1231	1220	1224.53
10	2319	2319	2319	2319	2319	2319.00	2319	2319	2319	2319	2319	2319.00
11	1690	1715	1710	1725	1715	1715.00	1690	1715	1710	1725	1715	1714.33
12	983	977	980	983	977	980.00	983	977	980	983	977	979.20
13	750	732	746	728	732	734.22	750	732	746	728	732	735.20
14	2281	2281	2281	2281	2281	2281.00	2281	2281	2281	2281	2281	2281.00
15	2750	2750	2750	2750	2750	2750.00	2750	2750	2750	2750	2750	2750.00
16	81	76	80	76	76	77.00	81	76	80	76	76	77.13
17	87	90	92	88	88	88.56	87	90	92	88	88	89.00
18	49	55	49	46	54	50.33	49	55	49	46	54	51.20

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1						เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)						(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม
19	357	370	357	360	369	363.44	357	370	357	360	369	364.13
20	392	398	411	412	403	405.11	392	398	411	412	403	405.00
21	3060	3060	3060	3060	3060	3060.00	3060	3060	3060	3060	3060	3060.00
22	113	134	119	126	127	125.00	113	134	119	126	127	125.20
23	3429	3429	3429	3429	3429	3429.00	3429	3429	3429	3429	3429	3429.00
24	44	42	44	42	44	43.11	44	42	44	42	44	43.33
25	3430	3430	3430	3430	3430	3430.00	3430	3430	3430	3430	3430	3430.00
26	1967	1958	1958	1963	1957	1960.33	1967	1958	1958	1963	1957	1959.20
27	27	29	30	31	28	29.22	27	29	30	31	28	29.07
28	31	31	31	20	30	27.00	31	31	31	20	30	28.40
29	0	0	20	16	20	14.22	0	0	20	16	20	15.20
30	119	124	123	119	122	121.00	119	124	123	119	122	121.67
31	1697	1721	1715	1715	1718	1714.67	1697	1721	1715	1715	1718	1715.80
32	2127	2127	2127	2127	2127	2127.00	2127	2127	2127	2127	2127	2127.00
33	1510	1450	1470	1460	1475	1470.56	1510	1450	1470	1460	1475	1470.00
34	4037	4037	4037	4037	4037	4037.00	4037	4037	4037	4037	4037	4037.00
35	60	72	72	72	64	68.00	60	72	72	72	64	68.00
36	58	64	64	64	60	62.00	58	64	64	64	60	62.00
37	40	46	46	46	36	42.00	40	46	46	46	36	41.60
38	368	367	368	362	362	363.89	368	367	368	362	362	364.27

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1						เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)						(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม
39	4998	4998	4998	4998	4998	4998.00	4998	4998	4998	4998	4998	4998.00
40	1460	1480	1480	1470	1465	1469.44	1460	1480	1480	1470	1465	1470.67
41	2963	2963	2963	2963	2963	2963.00	2963	2963	2963	2963	2963	2963.00
42	5689	5689	5689	5689	5689	5689.00	5689	5689	5689	5689	5689	5689.00
43	68	67	69	67	69	68.00	68	67	69	67	69	68.27
44	0	15	0	20	30	18.33	0	15	0	20	30	18.00
45	45	50	0	0	0	10.56	45	50	0	0	0	9.67
46	80	79	80	83	82	81.56	80	79	80	83	82	81.27
47	5200	5200	5200	5200	5200	5200.00	5200	5200	5200	5200	5200	5200.00
48	41	33	35	41	41	39.44	41	33	35	41	41	38.73
49	61	64	64	70	69	67.33	61	64	64	70	69	67.00
50	29	29	30	25	26	26.78	29	29	30	25	26	27.20
51	0	0	0	15	30	15.00	0	0	0	15	30	15.00
52	121	115	117	124	123	121.56	121	115	117	124	123	120.80
53	61	60	56	58	57	58.00	61	60	56	58	57	57.67
54	1720	1714	1739	1722	1699	1715.11	1720	1714	1739	1722	1699	1715.00
55	127	123	125	125	125	125.00	127	123	125	125	125	124.87
56	4010	4010	4010	4010	4010	4010.00	4010	4010	4010	4010	4010	4010.00
57	1471	1465	1464	1474	1471	1470.56	1471	1465	1464	1474	1471	1469.40
58	1480	1479	1475	1466	1466	1470.00	1480	1479	1475	1466	1466	1470.47

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1						เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)						(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม
59	2303	2303	2303	2303	2303	2303.00	2303	2303	2303	2303	2303	2303.00
60	1970	1950	1950	1960	1965	1960.56	1970	1950	1950	1960	1965	1959.33
61	2205	2205	2205	2205	2205	2205.00	2205	2205	2205	2205	2205	2205.00
62	4018	4018	4018	4018	4018	4018.00	4018	4018	4018	4018	4018	4018.00
63	2744	2744	2744	2744	2744	2744.00	2744	2744	2744	2744	2744	2744.00
64	2999	2999	2999	2999	2999	2999.00	2999	2999	2999	2999	2999	2999.00
65	735	735	735	735	735	735.00	735	735	735	735	735	735.00
66	735	735	735	735	735	735.00	735	735	735	735	735	735.00
67	735	735	735	735	735	735.00	735	735	735	735	735	735.00
68	735	735	735	735	735	735.00	735	735	735	735	735	735.00
69	545	540	545	540	550	544.44	545	540	545	540	550	545.33
70	3386	3386	3386	3386	3386	3386.00	3386	3386	3386	3386	3386	3386.00
71	3234	3234	3234	3234	3234	3234.00	3234	3234	3234	3234	3234	3234.00
72	2205	2205	2205	2205	2205	2205.00	2205	2205	2205	2205	2205	2205.00
73	2206	2206	2206	2206	2206	2206.00	2206	2206	2206	2206	2206	2206.00
74	490	495	495	485	490	489.44	490	495	495	485	490	490.67
75	827	830	835	831	813	824.89	827	830	835	831	813	824.20
76	3528	3528	3528	3528	3528	3528.00	3528	3528	3528	3528	3528	3528.00
77	3568	3568	3568	3568	3568	3568.00	3568	3568	3568	3568	3568	3568.00

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1						เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)						(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม
78	1215	1200	1195	1197	1200	1200.11	1215	1200	1195	1197	1200	1199.40
79	618	610	625	620	616	617.89	618	610	625	620	616	617.93
80	1463	1463	1480	1484	1460	1470.89	1463	1463	1480	1484	1460	1469.40
81	1722	1731	1715	1705	1715	1714.22	1722	1731	1715	1705	1715	1715.60
82	740	730	735	735	735	735.00	740	730	735	735	735	734.67
83	1968	1955	1963	1953	1963	1959.33	1968	1955	1963	1953	1963	1960.27
84	2889	2889	2889	2889	2889	2889.00	2889	2889	2889	2889	2889	2889.00
85	612	636	624	615	613	617.33	612	636	624	615	613	618.60
86	495	480	485	490	495	490.56	495	480	485	490	495	490.00
87	741	746	746	729	729	734.11	741	746	746	729	729	735.47
88	470	470	485	495	500	490.00	470	470	485	495	500	490.00
89	917	923	925	920	921	920.89	917	923	925	920	921	921.60
90	328	333	323	329	322	326.33	328	333	323	329	322	325.47
91	5390	5390	5390	5390	5390	5390.00	5390	5390	5390	5390	5390	5390.00
92	247	249	238	244	241	243.22	247	249	238	244	241	242.47
93	367	360	375	372	373	370.78	367	360	375	372	373	371.07
94	62	56	56	56	60	58.00	62	56	56	56	60	58.00
95	5059	5059	5059	5059	5059	5059.00	5059	5059	5059	5059	5059	5059.00
96	1232	1225	1213	1224	1228	1225.11	1232	1225	1213	1224	1228	1224.07
97	769	763	759	771	774	769.56	769	763	759	771	774	768.60

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1						เวลาขั้นงานบนสายการประกอบที่ 1					
	(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)						(สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1:1)					
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	รุ่นที่ 5	เวลาขั้นงานร่วม
98	770	772	766	767	768	768.11	770	772	766	767	768	768.07
99	1674	1668	1675	1670	1668	1670.11	1674	1668	1675	1670	1668	1670.20
100	1666	1676	1671	1669	1670	1670.00	1666	1676	1671	1669	1670	1670.53
101	490	487	490	495	487	490.33	490	487	490	495	487	489.40
102	203	200	202	203	202	202.22	203	200	202	203	202	202.00
103	200	200	205	204	203	202.89	200	200	205	204	203	203.00
104	204	205	202	200	202	201.89	204	205	202	200	202	202.13
105	2744	2744	2744	2744	2744	2744.00	2744	2744	2744	2744	2744	2744.00
106	162	162	162	162	162	162.00	162	162	162	162	162	162.00
107	324	324	324	324	324	324.00	324	324	324	324	324	324.00
108	162	162	162	162	162	162.00	162	162	162	162	162	162.00
109	121	121	121	121	121	121.00	121	121	121	121	121	121.00
110	162	162	162	162	162	162.00	162	162	162	162	162	162.00
111	91	91	91	91	91	91.00	91	91	91	91	91	91.00

3. ข้อมูลเวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B

ตารางที่ ง.18 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 1.1

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A		ผลิตภัณฑ์ B	
	A1	A2	B1	B3
1	0.0000	0.4587	0.3289	0.2747
2	0.1141	0.0000	0.0000	0.1996
3	0.7283	0.8958	0.3714	0.9779
4	0.4294	0.4122	0.3365	0.3494
5	0.5900	0.6480	0.5790	0.4008
6	0.2919	0.3892	0.4322	0.0000
7	0.8559	0.5519	0.9328	0.3979
8	0.4131	0.4275	0.6572	0.3778
9	0.1645	0.2204	0.2585	0.6185
10	0.0000	0.0460	0.0862	0.0706
11	0.2000	0.2000	0.0000	0.3116
12	0.0934	0.0000	0.0807	0.0580
13	0.3863	0.3162	0.3081	0.3325
14	0.2347	0.3819	0.2451	0.1708
15	0.2552	0.3687	0.3892	0.3172
16	0.3644	0.5723	0.0254	0.4587
17	0.9663	1.2578	1.0265	0.8212
18	0.3398	0.3036	0.3314	0.2893
19	0.0000	0.3037	0.0026	0.0000
20	0.0777	0.0000	0.2128	0.2845
21	0.6298	0.4010	0.5000	0.5000
22	0.3579	0.5623	0.3281	0.3422
23	0.1364	0.0000	0.0000	0.4132
24	0.4616	0.7436	0.5712	0.5601
25	0.2065	0.3150	-	-

ตารางที่ ง.19 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 1.2

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A			ผลิตภัณฑ์ B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
1	0.2019	0.2425	0.3100	0.3008	0.3749	0.2569
2	0.0000	0.4909	0.2714	0.0000	0.3783	0.2503
3	0.8108	0.4948	0.6455	0.6611	0.7501	0.8137
4	0.3557	0.2778	0.3384	0.3072	0.2758	0.3733
5	0.9914	0.4716	0.6819	0.7852	0.5192	0.8090
6	0.6824	0.0000	0.3265	0.6425	0.0000	0.4807
7	0.5565	0.4387	0.7424	0.6106	0.5492	0.4901
8	0.6905	0.4950	0.4639	0.5360	0.4351	0.3882
9	0.3039	0.2997	0.4353	0.3400	0.4336	0.4467
10	0.0000	0.1596	0.0769	0.0000	0.1359	0.0859
11	0.2928	0.1846	0.2473	0.2858	0.2907	0.1570
12	0.0902	0.0831	0.0630	0.0649	0.0807	0.0608
13	0.1916	0.2939	0.3680	0.2781	0.3769	0.4264
14	0.3379	0.1776	0.1663	0.2742	0.1803	0.2963
15	0.2855	0.2793	0.4433	0.4761	0.3672	0.4444
16	0.2594	0.4501	0.0000	0.3312	0.3317	0.0000
17	0.7084	0.8050	0.9446	0.9851	0.9236	1.2227
18	0.2861	0.3837	0.4410	0.3931	0.3766	0.3300
19	0.0990	0.2676	0.1909	0.0976	0.1578	0.1812
20	0.0000	0.4128	0.1878	0.0000	0.3199	0.2044
21	0.4433	0.6289	0.6914	0.6899	0.4412	0.5765
22	0.4803	0.3415	0.2707	0.4740	0.3644	0.3354
23	0.2478	0.2262	0.2859	0.2074	0.2484	0.1978
24	0.3863	0.4299	0.5948	0.5730	0.7377	0.5800
25	0.2405	0.3264	0.2444	0.3390	0.3054	0.2662

ตารางที่ ง.20 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 2.1

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A		ผลิตภัณฑ์ B	
	A1	A2	B1	B3
1	74.304	48.657	57.118	81.767
2	11.741	10.587	13.110	8.668
3	10.602	13.103	13.867	8.018
4	12.572	11.672	10.805	12.377
5	7.743	5.766	12.432	6.110
6	0.000	9.338	4.628	6.904
7	1.348	13.520	12.442	6.488
8	86.368	97.596	117.695	83.297
9	32.457	5.383	18.539	10.073
10	0.000	26.604	10.048	13.758
11	8.987	7.580	17.845	0.000
12	8.505	1.578	1.150	6.897
13	4.654	8.463	5.468	10.954
14	32.054	33.254	26.249	32.917
15	150.027	142.952	80.714	129.423
16	25.105	21.702	12.350	15.925
17	8.424	25.576	14.186	22.808
18	16.837	2.910	13.657	8.422
19	53.629	45.721	22.027	59.491
20	12.198	0.000	9.281	3.983
21	0.000	7.355	6.550	3.739
22	7.862	5.170	0.000	8.161
23	5.929	5.763	5.519	7.707
24	9.932	3.926	5.479	6.602
25	9.779	9.502	6.613	8.612
26	34.444	21.326	23.503	18.530
27	12.161	9.085	0.000	10.083

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A		ผลิตภัณฑ์ B	
	A1	A2	B1	B3
28	2.907	6.497	12.356	2.130
29	5.528	8.288	16.102	3.368
30	0.000	9.437	4.865	4.527
31	0.000	10.029	6.587	6.887
32	17.596	11.054	42.812	0.000
33	20.297	7.984	18.744	15.024
34	5.514	4.870	15.527	0.000
35	3.086	5.380	7.434	2.959
36	13.123	0.000	3.938	3.955
37	5.469	9.054	9.416	8.660
38	19.663	27.392	17.518	24.527
39	7.184	3.632	3.531	3.560
40	4.357	10.922	9.169	7.533
41	2.368	5.292	4.295	5.884
42	122.197	153.293	146.178	162.237
43	7.463	6.516	8.745	6.375
44	8.795	4.558	3.908	7.176
45	15.239	5.044	4.305	11.000
46	19.894	40.615	21.243	50.639
47	28.633	0.000	6.431	13.284
48	2.147	7.910	17.936	0.000
49	7.434	7.914	13.817	0.000
50	3.138	6.899	3.799	5.796
51	1.771	3.660	1.976	3.656
52	56.975	50.819	-	-
53	30.978	105.664	-	-

ตารางที่ ง.21 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 2.2

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
1	75.2823	76.8404	50.3999	52.5252	70.0795	61.2488	66.5498	57.4716
2	12.1730	7.2554	8.5358	8.7633	12.6726	11.5555	10.7797	10.8165
3	12.9886	11.5642	13.4484	12.8003	13.1049	12.4895	13.1417	12.6073
4	12.8280	13.9672	7.9297	10.7882	10.0493	12.1650	8.6412	11.2935
5	8.3371	9.3578	9.8332	4.8810	9.5317	6.7982	5.4447	6.4151
6	0.0000	10.8253	11.6106	6.7750	0.0000	6.7161	10.1862	9.4648
7	11.8679	5.9509	6.6700	9.2276	11.1917	5.8861	9.1840	7.5706
8	76.6385	60.6209	98.8446	96.7922	86.9363	82.3918	114.446	62.0247
9	14.9935	9.3297	12.5389	12.4850	15.3399	15.7440	15.2783	9.0037
10	17.2908	14.3890	16.9081	10.7816	12.1190	15.0738	17.2644	13.0338
11	6.7118	4.5584	4.1256	8.4030	7.6762	4.7927	5.7242	5.5232
12	10.7735	0.0000	0.0000	7.8644	7.9198	0.0000	0.0000	9.1800
13	10.1503	6.3953	8.2593	10.5359	7.0974	6.8738	6.7919	9.9767
14	40.5460	34.5323	28.4505	33.0479	38.5334	29.2652	24.8970	24.2387
15	101.162	152.911	141.261	116.542	123.170	120.760	126.902	136.175
16	19.9043	11.3053	23.1787	18.5180	16.9511	15.4099	18.3781	24.3314
17	28.0491	21.0083	22.0615	16.8592	26.9571	24.4220	23.1987	16.7158
18	7.2218	8.8472	6.9891	7.7118	5.8185	10.9738	5.9939	12.7629
19	48.9566	31.4108	48.7658	46.8890	51.8665	48.1037	50.0138	44.8370
20	15.3667	0.0000	0.0000	12.6132	13.8105	0.0000	0.0000	11.8548
21	5.2279	5.7918	4.4683	7.8772	6.0849	6.8507	7.3585	4.3193
22	8.1101	0.0000	0.0000	14.9493	6.6386	0.0000	0.0000	10.4306
23	6.9333	6.3393	8.8386	6.1355	8.5501	8.8505	5.8575	5.9593
24	5.4765	4.6786	5.0098	6.1746	6.2972	7.8097	7.5883	4.4736
25	11.6797	10.1210	8.5907	4.9903	7.0980	9.3551	7.9555	6.5019
26	19.0216	27.0187	25.8054	25.4101	27.6015	28.4932	29.6830	18.8794

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
27	8.6584	13.5032	6.9084	7.5458	11.0453	13.9316	8.4094	7.4882
28	4.5242	4.2553	6.0903	3.8429	4.2953	6.0268	3.9006	3.8229
29	5.1069	8.2094	5.8029	7.5620	5.1728	7.8922	8.1917	7.6196
30	0.0000	0.0000	26.9527	0.0000	0.0000	0.0000	25.4667	0.0000
31	0.0000	15.4585	0.0000	0.0000	0.0000	27.0135	0.0000	0.0000
32	12.2857	13.9142	15.3770	13.6490	14.2575	13.0780	9.0307	14.2314
33	12.7757	17.7936	18.4222	14.7702	19.0933	17.2749	10.8528	10.7691
34	0.0000	8.8430	8.2889	0.0000	0.0000	9.7103	7.4733	0.0000
35	4.8713	3.0345	4.5595	2.8344	3.6108	4.8563	4.7189	3.5840
36	11.5004	5.1151	0.0000	0.0000	7.8112	6.8824	0.0000	0.0000
37	10.1753	12.0394	6.5515	7.9997	7.3036	6.5307	6.9379	8.9200
38	32.7129	20.4245	27.4243	21.7391	25.4535	32.7147	17.5145	27.8905
39	7.9105	5.8813	7.4889	0.0000	4.8768	6.8726	7.9264	0.0000
40	9.2465	7.6394	12.5833	9.9126	6.9521	7.1976	8.7750	10.4577
41	4.0265	8.2369	0.0000	9.5179	6.2056	6.2495	0.0000	9.2913
42	167.7800	158.6828	127.0577	160.4145	104.1802	157.4011	171.0626	156.7301
43	7.2889	6.3670	6.2660	7.4700	6.8798	5.8302	4.6339	5.5215
44	5.3980	5.4758	7.0787	7.0262	6.7320	6.7727	5.4000	5.9468
45	6.8569	9.6098	6.6710	8.7478	10.7865	7.9346	6.3416	9.3586
46	25.8763	28.0008	40.6743	31.8255	30.3237	29.1980	29.6442	26.4537
47	10.3333	11.1129	7.8050	13.4033	12.7642	7.3919	7.2684	13.3680
48	0.0000	9.8827	5.6936	8.5115	0.0000	8.7211	7.4342	5.2748
49	7.3102	0.0000	8.1403	5.5409	8.4905	0.0000	8.6542	9.5544
50	5.8034	5.0648	4.2051	3.6561	6.6186	6.3194	4.2959	4.1026
51	0.0000	0.0000	5.2003	5.6693	0.0000	0.0000	5.9842	6.2051
52	40.6856	64.1551	66.3264	73.0920	69.0533	40.1303	37.5787	54.1324
53	68.7929	75.9585	54.7786	92.4954	73.1163	78.6403	59.5483	71.7307

ตารางที่ ง.22 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 3.1

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
1	1.941	1.46	0.541	4.512	1.908	1.388	4.051	3.518
2	1.145	1.836	2.03	5.174	1.848	1.963	3.804	4.535
3	2.061	2.078	3.101	3.78	2.211	1.814	4.856	4.548
4	2.595	1.4	1.48	4.59	1.979	2.339	4.239	5.159
5	1.189	2.196	2.384	3.646	1.509	1.78	3.752	3.598
6	1.056	1.722	2.62	4.881	2.39	1.921	4.53	3.595
7	0	0.377	0.072	1.122	0.776	0	0.754	1.288
8	1.142	1.989	3.047	3.835	1.42	1.755	3.598	3.858
9	1.197	2.075	2.797	3.703	2.08	1.531	4.46	4.502
10	1.304	1.822	2.089	3.473	2.074	1.186	4.697	2.939
11	1.595	1.514	1.28	4.625	2.211	1.645	2.737	5.11
12	1.202	1.212	1.614	2.285	1.409	1.703	1.662	2.605
13	0.157	0.655	0.907	0.362	0.983	0.155	0	1.221
14	2.145	1.979	1.037	4.29	1.679	1.769	3.662	4.594
15	0.411	0.167	0.126	1.058	0	0.7	1.175	0.489
16	1.425	2.374	0.708	4.318	1.82	1.323	4.983	3.92
17	2.092	1.543	0.855	3.211	1.323	1.792	3.687	2.934
18	0.176	0.548	0.578	0.747	0.756	0.572	0.387	0.988
19	2.212	1.191	1.393	3.857	1.482	2.123	4.563	4.515
20	1.343	1.313	2.418	4.596	1.983	2.141	4.004	4.289
21	1.415	1.821	0.861	5.084	1.303	2.08	4.779	4.652
22	2.425	2.035	3.764	5.076	1.601	2.248	3.922	4.075
23	0.999	1.374	2.22	3.649	1.705	1.428	4.725	4.114
24	2.068	1.828	3.068	4.732	1.463	2.412	4.337	4.908
25	1.188	1.679	1.928	4.025	1.614	1.373	4.058	3.121
26	2.252	1.165	2.442	4.001	1.491	1.597	3.475	3.862
27	2.465	1.663	3.296	4.609	2.259	1.989	4.288	4.862
28	0.503	1.506	0.905	0.925	0.387	0.986	2.633	2.751
29	0.446	0	0.033	1.198	0.393	0	1.036	0.34

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
30	0	1.748	0.253	1.789	0.718	0.962	1.49	2.022
31	1.349	1.742	2.872	4.022	1.704	2.163	3.86	3.544
32	1.571	1.529	3.175	4.509	1.65	1.34	3.288	4.499
33	2.17	1.163	2.37	4.109	1.865	2.046	2.571	4.04
34	1.686	1.822	1.589	4.147	1.667	1.618	3.653	3.487
35	1.916	2.015	1.317	3.814	2.619	1.714	4.981	5
36	1.224	0	0.502	1.356	0.328	0.209	0.915	1.731
37	1.299	1.246	0.49	3.928	1.632	1.563	3.827	3.526
38	1.765	1.668	2.776	4.27	2.168	1.614	4.658	4.039
39	1.96	1.813	1.448	3.086	1.694	2.223	3.885	3.364
40	1.461	1.808	1.324	4.809	0.763	1.995	3.488	4.203
41	0.192	0.912	0.328	0.981	1.428	0.646	1.36	0
42	2.008	2.05	2.641	4.373	1.8	2.377	4.554	4.182
43	1.914	1.357	2.75	3.559	1.094	1.311	2.95	4.363
44	0	0.188	0.569	1.298	0.855	0.807	2.046	0
45	1.193	1.266	2.916	3.285	0	1.285	4.348	4.603
46	2.122	2.491	1.399	4.775	1.618	1.453	4.797	4.695
47	1.085	1.015	2.18	0.549	0.936	0.745	2.911	1.531
48	1.939	1.385	1.15	3.532	2.184	1.95	4.155	4.133
49	0.908	1.997	1.968	3.036	1.348	1.728	3.329	3.683
50	1.775	2.057	1.518	4.895	1.669	1.602	3.774	4.503
51	0.889	1.843	0.512	3.821	0.885	1.435	3.483	4.488
52	2.04	1.967	1.507	4.124	1.791	1.667	4.065	3.684
53	1.303	2.343	1.196	4.247	1.874	2.161	4.314	3.972
54	1.406	1.409	2.491	3.704	1.097	1.147	4.5	4.713
55	1.563	1.325	2.715	3.329	1.81	1.42	3.844	4.001
56	2.092	1.51	2.846	4.605	2.152	1.628	4.75	4.632
57	1.932	2.079	1.751	3.993	1.465	1.716	3.976	3.664
58	0.977	1.874	2.679	4.1	1.134	1.864	3.302	3.163
59	1.213	1.421	0.675	3.547	2.241	1.151	5.311	3.687
60	2.049	2.309	1.195	3.384	1.405	0.949	3.944	3.872
61	1.944	1.933	2.777	3.694	1.429	1.748	4.162	3.493

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
62	1.655	1.557	2.228	4.543	1.431	1.008	3.762	3.977
63	1.256	1.085	1.996	3.721	1.502	1.58	4.039	3.422
64	1.353	2.401	0.958	4.506	2.621	2.233	4.486	4.92
65	2.051	1.131	1.73	4.088	1.603	1.934	4.027	4.27
66	0.205	0.25	0.273	0	0	0.184	0.162	0.472
67	2.519	2.462	0.881	4.623	1.626	1.939	4.444	4.768
68	2.291	2.021	1.123	4.249	2.537	1.738	5.336	3.939
69	1.818	2.243	1.695	4.21	1.311	1.572	4.426	4.419
70	0.921	1.409	1.444	3.98	1.196	2.21	4.334	3.479
71	1.131	1.468	2.271	4.312	1.377	1.69	5.329	4.447
72	0.612	0	0.156	1.54	-	-	-	-
73	1.727	1.428	1.573	4.175	-	-	-	-
74	0.337	1.203	0.643	1.598	-	-	-	-
75	2.318	1.291	1.229	4.888	-	-	-	-

ตารางที่ ง.23 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 3.2

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
1	2.288	2.059	1.525	2.072	2.277	2.221	1.866	1.558
2	1.973	1.729	1.237	2.392	1.507	1.565	1.448	1.485
3	2.111	2.156	1.830	2.042	1.930	2.080	1.440	1.547
4	2.344	2.223	2.056	1.877	2.161	1.528	1.405	1.349
5	1.646	1.912	1.282	1.695	1.495	1.228	2.011	1.936
6	1.423	1.552	1.494	2.112	1.430	1.624	1.861	1.490
7	0.000	0.493	0.658	0.456	0.000	0.320	0.566	0.658
8	2.014	1.330	2.019	1.997	1.435	1.404	1.830	1.261
9	1.871	2.113	1.414	1.523	1.504	1.440	2.161	2.078
10	1.391	1.948	1.891	1.316	1.638	1.541	1.868	1.234
11	1.976	2.009	2.113	1.675	1.964	2.253	1.308	1.354
12	1.146	1.120	1.040	1.171	0.616	1.178	1.044	0.985

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
13	0.441	0.000	0.517	0.308	0.583	0.000	0.555	0.363
14	1.644	1.757	1.677	1.874	1.349	1.154	1.294	1.824
15	0.533	0.256	0.000	0.265	0.697	0.483	0.000	0.382
16	1.714	2.564	1.466	2.495	2.134	1.929	1.982	2.225
17	1.265	1.169	1.237	1.921	2.338	1.199	1.314	1.524
18	0.625	0.467	0.529	0.000	0.523	0.657	0.556	0.000
19	2.017	2.037	2.130	2.074	1.302	1.634	2.391	1.429
20	2.265	2.099	2.360	2.044	1.453	1.605	2.332	2.482
21	2.121	1.519	2.333	2.479	2.041	2.458	2.217	1.471
22	2.551	1.338	2.324	2.248	2.555	2.073	1.687	2.355
23	2.169	2.192	1.232	2.127	1.583	1.408	2.023	1.860
24	2.199	2.688	2.291	2.515	1.832	2.190	2.449	1.738
25	1.115	1.388	1.692	1.613	1.217	1.712	1.451	1.224
26	1.192	1.703	1.703	2.224	1.083	2.304	1.463	1.659
27	2.426	1.784	1.774	1.897	2.377	2.344	2.216	1.648
28	1.100	0.997	0.684	0.776	0.890	1.069	0.838	1.217
29	0.000	0.000	0.351	0.273	0.000	0.000	0.219	0.305
30	0.366	0.435	1.211	0.493	0.363	0.374	1.596	0.663
31	1.815	2.276	1.141	1.662	2.251	1.909	1.137	1.973
32	2.010	1.269	2.244	1.393	2.107	1.940	1.963	1.612
33	1.514	1.349	1.041	1.869	1.715	1.775	0.914	1.601
34	1.503	1.528	1.473	1.237	1.237	1.828	1.290	1.853
35	2.500	1.758	2.379	2.345	1.929	1.277	2.271	2.381
36	0.326	0.224	0.333	0.939	0.468	0.296	0.377	0.998
37	1.302	1.638	1.919	1.830	1.639	1.197	1.153	2.011
38	1.203	1.993	1.411	1.318	1.550	2.153	1.571	1.320
39	1.283	1.877	1.421	1.338	1.557	1.508	1.787	1.890
40	1.966	1.112	1.996	2.070	1.793	1.472	1.297	1.659
41	0.000	0.580	0.666	0.475	0.000	0.676	0.699	0.545
42	2.381	2.401	1.778	1.987	2.335	2.573	2.020	2.500
43	1.217	2.063	2.099	1.165	1.113	2.063	2.088	1.488
44	0.685	0.000	0.693	0.676	0.606	0.000	0.667	0.756
45	2.111	1.622	1.294	1.914	1.375	1.367	1.569	1.803
46	1.684	2.269	1.883	1.937	1.524	1.530	2.439	1.594
47	0.869	0.884	0.633	1.044	0.609	0.682	0.684	0.876

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A				ผลิตภัณฑ์ B			
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
48	1.189	1.382	1.429	1.977	1.523	1.752	1.778	1.845
49	1.690	1.675	1.831	1.770	1.926	1.165	2.214	1.710
50	1.299	1.338	1.309	1.389	1.588	1.974	1.551	1.719
51	1.852	2.066	1.769	1.747	1.813	2.045	1.464	1.925
52	1.430	1.762	2.374	1.376	1.351	1.530	2.394	1.639
53	1.977	1.410	2.193	1.760	1.689	2.027	2.274	1.526
54	2.340	2.357	1.891	1.674	2.297	1.772	1.771	1.316
55	1.794	1.292	2.080	2.045	1.510	1.114	1.685	1.279
56	2.336	2.297	2.111	1.638	2.120	1.273	1.453	1.534
57	1.561	1.835	2.110	1.160	1.654	1.203	1.736	1.186
58	1.398	2.269	1.556	1.234	1.455	2.265	1.676	1.293
59	1.019	1.444	2.220	1.202	1.185	1.831	2.109	1.330
60	1.521	1.282	1.208	1.942	1.762	1.815	1.698	2.141
61	1.450	1.409	1.337	2.179	1.414	2.050	1.330	1.782
62	1.938	1.979	2.064	1.268	1.579	1.982	1.343	1.411
63	1.335	2.177	1.302	1.213	1.131	1.622	1.542	1.531
64	2.015	1.482	1.881	2.573	2.057	2.284	2.010	2.031
65	2.116	1.789	1.967	1.777	1.566	2.197	1.162	1.341
66	0.000	0.000	0.000	0.339	0.000	0.000	0.000	0.281
67	2.293	1.838	1.826	2.228	2.365	2.315	2.405	1.841
68	1.344	2.048	2.010	1.379	1.468	1.423	1.790	1.446
69	1.297	1.562	1.561	1.361	2.309	1.401	1.904	2.345
70	1.495	1.157	1.577	2.104	1.688	1.711	1.629	2.079
71	1.296	1.205	1.719	2.109	1.444	1.202	2.166	1.317
72	0.834	1.126	0.000	0.000	0.702	0.751	0.000	0.000
73	1.790	1.532	2.162	1.789	1.795	2.158	1.153	1.840
74	0.584	0.920	0.671	0.790	0.680	0.668	0.748	0.545
75	2.289	2.140	1.337	2.059	1.743	1.907	1.325	1.443

ตารางที่ ง.24 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 4.1

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A			ผลิตภัณฑ์ B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
1	153.7829	0.0000	141.0121	0.0000	109.1500	425.6039
2	76.7699	200.0813	82.2771	79.2599	238.2191	263.8938
3	0.0000	24.8913	143.2974	165.9159	181.6012	0.0000
4	157.4210	180.6118	67.9274	109.8795	94.2854	319.0896
5	10.9238	81.6988	16.7064	23.6705	26.3881	89.2628
6	87.5750	0.0000	237.8556	83.8374	45.9562	286.2159
7	0.0000	8.1872	44.3240	0.0000	9.2118	42.6525
8	344.6895	153.3298	229.0679	87.4600	0.0000	669.3385
9	104.2511	102.9413	37.4254	245.6699	196.1839	0.0000
10	158.5823	174.4543	189.9878	144.5421	215.6819	430.4786
11	121.2274	150.7182	151.2601	169.1924	85.4971	345.6956
12	112.6266	35.8321	35.4784	61.5244	38.5084	160.7291
13	67.4079	39.7772	97.6348	51.1614	67.2819	113.2163
14	129.4250	201.0000	340.1746	179.6845	184.3646	447.3661
15	345.4456	152.4660	261.5472	273.7181	159.5262	437.6281
16	2.0344	8.8944	8.1753	5.5789	2.9141	17.6943
17	9.8643	7.1144	3.8271	5.7697	7.2892	11.7585
18	1.1514	3.7717	7.2267	1.8560	7.3815	8.4663
19	45.5185	6.5827	17.3877	42.4329	23.2295	58.2631
20	32.0818	33.8705	19.7907	18.5943	20.5494	85.9237
21	158.7453	365.8767	243.2728	155.7548	317.7110	411.8867
22	12.8348	16.1988	3.4643	11.5403	5.6807	20.6532
23	293.3015	340.3178	234.6061	211.1334	374.0140	528.2566
24	1.8001	7.2061	3.1671	2.5984	3.2236	7.6725
25	190.8958	223.9696	633.3809	241.4247	299.3298	508.3200
26	226.2369	123.9962	49.1399	242.0202	156.8225	288.5542
27	2.4414	1.1168	5.4429	1.8581	4.4172	3.7142
28	2.5672	3.5535	0.6731	0.0000	0.0000	7.7155
29	1.1179	1.5013	0.2927	1.3695	0.4250	2.6034
30	0.0000	0.0000	42.2713	9.3735	10.0275	20.9250
31	124.7703	120.9509	278.6619	166.4985	159.1467	228.3922

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A			ผลิตภัณฑ์ B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
32	161.5203	106.3673	253.7909	199.4895	177.1084	399.0461
33	101.6924	170.7113	44.5368	82.6588	140.3751	232.5143
34	233.1564	282.5239	399.9406	259.0128	205.6589	718.1938
35	5.4335	7.1048	1.7993	13.8604	0.0000	10.3960
36	6.6483	4.8648	2.1579	3.1856	6.3977	8.6120
37	3.3595	2.3167	5.8458	3.1660	1.6917	8.3608
38	25.2183	41.2037	9.0142	27.5200	21.7426	76.6710
39	268.8031	329.9709	229.7849	398.5185	394.9897	877.3868
40	145.1987	114.4779	124.9998	127.5655	38.7701	291.2289
41	298.3289	134.5945	287.2779	240.6066	220.3726	546.1687
42	376.2864	398.0875	418.0612	418.1074	534.8996	941.8305
43	8.1692	4.4473	2.7393	5.0323	9.2896	9.1583
44	1.3761	1.4776	1.3307	1.3147	1.5609	1.9343
45	0.2951	1.5538	0.1942	0.3260	0.7558	2.1600
46	4.0826	6.1498	4.3573	10.3638	11.5422	8.8908
47	388.2163	397.0470	591.1894	384.3397	466.2887	994.7925
48	5.9493	1.2590	2.3043	1.2904	3.0738	8.2496
49	3.3205	5.2885	8.1448	5.5075	2.3864	13.2102
50	0.0000	5.5728	0.0000	2.3534	2.7395	3.4410
51	0.6603	2.3000	0.8257	1.3920	1.0356	1.9831
52	8.7728	2.7268	16.1650	0.0000	13.4459	29.1079
53	1.9809	1.9683	14.0595	1.6940	6.5591	10.0727
54	77.3567	166.1838	217.3030	147.1198	139.0575	244.8111
55	13.6672	5.8015	11.6135	5.9293	8.4247	22.4437
56	209.0153	304.7072	193.1075	299.5470	278.9829	613.4421
57	189.4869	26.5653	131.2007	62.4049	178.5678	243.2269
58	130.3564	183.9538	43.4004	54.4701	88.7227	238.5659
59	276.2532	175.2547	137.9504	151.8436	226.0600	438.5609
60	55.7455	73.6995	507.9697	197.8474	107.5562	339.2056
61	177.7177	118.5628	127.3046	188.5291	209.3233	362.0267
62	209.4554	245.9321	268.2025	294.3247	259.4243	773.6247
63	77.8837	268.7061	130.2808	159.6838	139.6999	531.3667

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A			ผลิตภัณฑ์ B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
64	251.3771	256.7221	207.3302	223.2528	205.8454	549.9537
65	67.1605	12.0437	109.8470	74.4018	24.7820	137.0987
66	49.0000	26.7228	55.3341	76.9859	17.1164	148.8605
67	36.0100	72.5529	45.0261	54.3358	31.1634	129.1902
68	53.0652	56.5883	110.7475	50.0098	11.1618	161.2848
69	23.5423	31.8958	45.8325	49.2881	68.9605	68.9658
70	257.3691	165.5851	99.8971	200.2192	261.9177	731.0845
71	256.1522	412.3655	121.0684	268.9189	192.6585	550.5682
72	177.7038	105.3759	254.7416	252.5473	0.0000	433.6639
73	158.8024	136.9268	245.9995	134.7277	141.2434	420.7591
74	60.5226	54.0334	8.7465	7.6176	9.0301	124.0348
75	76.2201	58.0117	94.4560	36.0446	75.1127	190.3253
76	143.5246	251.8717	336.5319	75.2948	362.4732	722.5282
77	249.1633	229.0379	431.2359	255.0779	242.1953	585.3681
78	42.3193	41.3105	54.8102	80.7015	90.4760	263.4265
79	63.7815	7.8485	100.9319	84.6546	51.8312	70.2865
80	89.2398	50.1248	218.6996	305.1352	135.9652	89.1556
81	150.0254	85.3109	172.6038	179.2523	390.6891	122.0398
82	65.5265	49.9983	79.1668	50.2301	34.7513	144.3155
83	81.2954	295.4392	96.0285	55.5559	56.5897	514.8480
84	201.6538	170.6238	419.4384	251.0480	265.3182	472.5127
85	25.8918	33.0539	117.2775	50.8228	44.0122	105.6177
86	27.5363	40.7372	35.3373	46.5193	23.6882	78.3628
87	45.0334	18.0937	89.0933	63.2036	50.1545	123.2288
88	39.5318	17.4069	31.4978	52.1741	13.8661	85.6876
89	77.7920	66.9595	54.1992	91.9790	54.4961	130.5138
90	7.8447	9.7176	77.4189	34.8534	25.2226	51.3902
91	467.4750	532.7890	624.8215	336.0409	476.2213	1068.7103
92	18.2320	24.1176	14.8429	0.0000	68.4917	0.0000
93	0.0000	0.0000	162.7864	11.6824	17.1396	79.0692
94	3.5299	5.2230	2.7284	2.4797	5.2918	11.1291
95	393.9955	370.8337	545.5970	355.6415	394.3947	913.0746

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A			ผลิตภัณฑ์ B		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
96	77.2182	77.6113	118.5555	132.3481	141.7151	176.0423
97	228.6896	0.0000	20.2425	245.6225	0.0000	0.0000
98	91.4657	100.9459	1.6449	99.5596	194.8695	0.0000
99	84.3470	130.2594	186.6552	53.2278	194.2683	320.4785
100	80.4630	213.3956	145.8039	138.9215	31.3806	414.9975
101	18.5187	33.9007	21.5280	34.0715	8.7408	103.0519
102	12.5518	4.7271	24.6817	10.5381	18.6800	37.6537
103	13.3269	13.3171	7.2563	3.5566	20.2478	47.2985
104	9.1264	18.8756	31.0368	9.5329	20.5416	33.1741
105	143.0105	244.7980	269.7788	217.8641	242.3685	456.0285
106	18.1207	20.3902	12.8271	2.8914	14.2160	32.5157
107	23.5453	31.9013	36.9918	20.2411	13.8408	64.3586
108	9.6674	11.4366	26.2426	-	-	-
109	11.9441	16.0598	4.3312	-	-	-
110	16.5129	20.8710	4.4571	-	-	-
111	1.9774	5.5910	0.9652	-	-	-

ตารางที่ ง.25 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ A และ B ของปัญหา Set 4.2

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A					ผลิตภัณฑ์ B				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
1	123.731	180.017	176.246	113.146	110.402	103.912	160.554	121.727	191.278	138.734
2	115.639	126.906	153.917	97.749	110.227	154.491	170.545	158.640	86.370	110.711
3	52.969	40.555	41.594	71.841	41.328	71.493	58.043	54.503	46.399	72.225
4	121.004	167.950	151.513	90.496	156.589	93.465	93.444	114.161	115.886	95.700
5	31.392	26.917	27.460	48.499	38.421	38.622	47.623	39.247	40.391	36.773
6	108.889	89.505	112.296	62.722	86.422	81.360	103.204	81.772	91.210	64.931
7	13.584	8.828	16.793	8.825	8.870	8.594	9.309	11.546	8.812	13.113
8	141.285	193.803	137.676	175.996	136.793	141.738	187.370	183.624	220.515	215.245
9	76.101	73.383	84.855	115.840	88.422	93.521	76.952	67.773	120.965	62.354
10	192.053	221.285	153.682	215.238	130.201	186.348	212.218	220.783	139.194	140.804
11	142.073	160.841	121.504	120.609	131.371	127.967	102.166	105.443	145.109	159.363
12	51.053	57.438	69.498	49.957	95.463	61.922	92.979	79.174	64.870	59.303

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A					ผลิตภัณฑ์ B				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
13	63.928	39.397	38.042	57.127	63.064	72.203	72.094	72.840	47.447	62.166
14	121.345	114.363	160.206	138.800	162.183	207.062	204.844	227.477	142.409	186.087
15	155.240	202.106	249.461	183.592	253.356	163.250	166.943	260.967	261.686	140.764
16	6.091	5.065	6.468	7.590	6.719	7.252	5.019	6.181	3.958	7.588
17	7.999	5.942	6.038	8.478	6.838	5.769	7.684	8.152	6.126	5.128
18	3.652	5.117	2.571	3.296	5.400	2.487	4.931	4.613	3.584	3.928
19	26.854	36.734	31.921	35.319	30.850	20.191	32.018	21.359	22.045	26.812
20	21.707	26.307	34.792	35.910	33.064	35.382	39.223	30.819	29.561	23.840
21	178.342	299.601	253.911	175.168	183.227	301.094	224.968	266.266	252.777	220.479
22	10.808	12.373	11.514	6.361	9.556	7.040	7.795	10.840	11.552	10.508
23	292.358	275.900	215.189	307.603	189.513	321.516	324.886	296.464	333.583	260.484
24	3.647	2.923	3.356	2.614	4.185	3.657	3.044	2.896	2.761	4.032
25	270.167	247.890	313.760	295.980	182.271	251.157	265.253	269.819	308.515	264.752
26	190.496	125.393	146.361	146.087	161.273	124.520	107.245	136.669	112.057	168.701
27	1.962	2.040	1.546	2.317	2.616	1.782	2.405	1.593	2.273	1.903
28	2.004	2.445	2.906	1.396	2.484	2.988	1.594	3.044	1.692	2.734
29	0.000	0.000	1.968	1.320	1.093	0.000	0.000	1.054	1.462	1.550
30	9.115	7.441	7.565	8.777	9.662	11.191	11.122	7.094	6.559	10.519
31	112.895	167.626	170.220	159.437	90.702	117.624	155.565	114.336	98.967	168.656
32	147.498	123.240	121.382	188.849	144.081	171.820	178.949	176.831	136.077	128.053
33	129.031	82.414	73.505	99.453	140.766	139.940	82.105	86.838	145.246	93.133
34	321.613	309.228	329.844	205.972	341.088	254.543	276.120	370.363	248.219	403.442
35	3.030	3.832	5.986	4.890	5.839	5.654	3.791	4.614	5.208	3.931
36	5.285	4.740	4.800	3.412	5.685	3.849	5.546	3.662	6.367	4.513
37	2.074	4.433	4.110	3.320	2.540	3.725	2.568	4.081	3.400	2.647
38	29.869	32.777	28.158	30.081	20.307	24.832	21.761	18.943	34.318	26.893
39	292.480	428.728	367.606	471.565	460.155	363.983	394.177	418.039	434.627	356.050
40	107.121	109.707	104.279	109.793	123.845	106.366	89.983	85.474	102.705	117.759
41	257.379	213.117	215.306	293.795	291.097	225.946	293.656	293.107	273.619	156.724
42	534.950	415.236	327.518	392.015	377.513	314.651	547.947	410.096	373.440	462.800
43	6.577	5.466	3.647	4.396	6.472	6.140	5.227	4.891	3.595	4.948
44	0.000	1.378	0.000	1.573	2.022	0.000	0.981	0.000	1.632	2.383

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A					ผลิตภัณฑ์ B				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
45	4.490	3.462	0.000	0.000	0.000	2.847	4.168	0.000	0.000	0.000
46	6.964	7.607	4.157	7.282	8.013	4.759	5.891	4.509	4.660	7.788
47	424.644	422.836	352.152	261.124	345.411	517.503	352.034	478.083	275.034	279.842
48	2.274	2.416	3.095	3.573	3.306	2.087	1.730	2.601	2.107	3.808
49	5.380	3.289	4.844	6.288	5.111	4.845	5.676	6.245	3.766	3.453
50	2.433	1.979	2.774	1.340	1.488	1.885	2.850	1.763	1.467	1.560
51	0.000	0.000	0.000	1.403	2.775	0.000	0.000	0.000	1.480	1.947
52	11.767	9.323	7.888	9.046	11.737	9.622	6.973	9.587	8.739	7.506
53	3.223	5.035	4.195	5.415	3.086	5.932	4.431	5.104	5.275	3.905
54	157.847	133.497	169.435	159.582	136.113	92.361	110.240	146.323	126.880	130.823
55	11.642	9.473	8.817	9.988	9.079	7.683	8.027	9.770	11.191	6.822
56	354.539	384.339	259.740	319.163	280.509	336.361	350.058	246.499	358.630	254.046
57	88.191	107.109	109.548	143.287	139.986	84.411	93.705	136.691	134.287	131.317
58	92.820	133.668	100.005	73.533	80.614	139.241	118.993	84.656	117.755	88.567
59	189.190	225.645	141.527	158.975	218.487	182.816	160.450	207.429	165.363	161.852
60	107.697	124.077	171.196	188.990	183.528	191.015	152.571	182.665	155.071	98.621
61	168.636	121.344	115.233	178.481	181.293	210.030	216.770	132.253	121.218	189.255
62	280.019	358.677	326.888	293.770	335.767	242.974	243.421	363.298	274.202	345.835
63	253.882	225.697	147.919	187.289	155.768	197.322	161.899	178.424	266.567	166.797
64	193.314	260.617	219.142	190.923	210.139	199.669	173.872	228.978	244.996	195.234
65	42.564	69.664	60.933	70.340	60.664	48.416	48.832	71.749	40.999	63.077
66	52.135	56.020	47.627	67.503	67.891	43.285	71.655	38.602	58.788	61.363
67	40.484	41.268	44.502	68.253	56.765	58.417	44.887	49.651	57.896	41.535
68	65.783	42.970	68.562	42.927	44.279	66.477	45.824	72.404	51.080	66.650
69	53.908	33.576	39.030	46.820	53.027	32.886	27.413	37.085	40.332	51.894
70	211.616	295.586	183.315	262.043	335.156	228.980	231.186	287.690	213.225	212.572
71	188.682	275.648	321.585	240.179	236.262	310.934	314.755	227.123	229.362	180.602
72	194.323	147.933	157.311	198.792	172.660	187.377	193.255	215.323	183.382	143.084
73	186.031	180.674	160.483	133.395	195.543	216.801	220.405	131.722	218.389	116.252
74	47.552	30.482	36.741	42.693	45.578	36.611	47.883	37.713	45.984	25.991
75	63.291	58.221	48.674	81.231	64.560	50.445	81.398	82.301	48.508	62.262
76	317.010	341.142	339.633	264.067	236.316	221.091	344.798	333.731	327.129	270.646

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A					ผลิตภัณฑ์ B				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
77	313.643	350.117	236.205	319.636	307.354	241.742	260.471	227.815	262.756	221.554
78	95.637	115.691	79.689	115.167	111.697	72.467	92.910	92.712	111.387	110.673
79	48.525	46.857	55.294	48.298	40.803	52.152	35.657	46.673	39.494	40.819
80	132.310	80.008	106.128	98.676	125.559	103.141	93.859	122.037	84.373	78.977
81	171.314	147.727	88.135	122.776	165.876	124.427	141.414	90.598	98.422	94.002
82	43.022	49.392	72.069	59.301	53.731	46.506	64.783	43.303	60.067	56.694
83	141.064	151.839	162.380	106.283	113.954	138.768	132.803	168.053	129.442	131.408
84	186.419	202.507	271.427	162.668	239.912	181.289	231.318	280.344	197.058	254.295
85	41.259	59.100	50.212	42.763	53.139	41.809	62.528	31.791	46.452	39.892
86	27.437	39.095	39.545	40.432	38.422	47.987	41.637	27.799	48.484	26.244
87	43.270	53.428	39.718	57.949	54.897	62.276	51.049	57.771	60.762	38.924
88	46.438	34.579	25.685	31.573	45.409	37.068	24.152	34.335	33.208	26.637
89	79.329	72.854	67.606	83.357	79.656	50.874	57.849	51.695	86.271	56.590
90	24.489	23.964	30.837	21.184	22.481	19.024	21.610	31.680	19.146	29.417
91	416.576	337.367	322.032	275.560	381.428	384.934	487.811	444.273	339.610	466.145
92	14.780	19.431	18.485	20.000	21.642	12.951	14.694	13.750	12.383	22.438
93	25.124	28.303	35.176	32.561	32.734	24.724	20.161	37.276	30.055	28.067
94	4.615	4.825	4.748	3.191	4.026	5.477	3.214	5.306	3.985	5.360
95	419.681	382.979	430.021	413.032	442.574	381.013	500.290	487.016	406.403	401.885
96	76.394	61.521	102.507	87.384	67.440	71.150	74.596	108.514	122.314	118.035
97	56.474	41.658	72.883	54.344	53.325	44.625	42.243	64.635	46.804	57.995
98	74.772	72.029	51.457	50.376	68.249	46.915	55.736	54.636	45.002	59.874
99	100.018	98.029	95.036	152.757	84.972	114.503	138.740	147.107	106.168	161.648
100	87.148	123.918	166.769	84.156	144.671	107.015	138.621	157.070	126.543	86.718
101	38.470	45.947	32.430	40.888	39.463	25.009	44.931	31.837	47.320	41.535
102	15.650	19.519	14.371	12.928	19.361	12.663	15.505	12.212	16.116	11.742
103	14.036	19.198	14.078	12.603	19.782	14.681	19.441	16.385	11.882	12.856
104	19.812	15.056	14.659	12.086	18.101	18.792	12.278	16.527	13.672	10.975
105	183.464	226.981	233.835	194.157	179.027	252.128	208.714	148.828	242.689	215.266
106	12.045	9.786	15.482	12.060	12.304	12.840	9.585	12.936	13.313	14.672
107	16.848	24.767	27.810	26.039	23.264	18.333	32.220	17.118	21.177	19.446
108	13.671	14.385	9.939	10.757	9.688	11.726	15.407	8.587	15.847	12.416

ขั้นงานที่	ผลิตภัณฑ์ A					ผลิตภัณฑ์ B				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
109	6.126	11.108	11.908	10.443	7.314	10.086	8.345	8.568	6.472	6.823
110	12.378	13.588	12.027	13.672	13.820	14.474	12.740	14.442	13.216	8.593
111	7.413	4.786	7.357	5.377	7.896	5.012	5.945	7.937	6.205	6.160

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ว่าที่ร้อยตรีหญิงทัศนีย์ ทองจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 8 กันยายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขต พระราชวังสนามจันทร์ ในปี พ.ศ. 2556 และหลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ว่าที่ร้อยตรีหญิงทัศนีย์ ทองจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 8 กันยายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขต พระราชวังสนามจันทร์ ในปี พ.ศ. 2556 และหลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University