การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

นายกรรณ จิตเมตตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

APPLICATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR MULTI-OBJECTIVE SEQUENCING PROBLEMS ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES

Mr. Karn Jitmetta

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค สำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
โดย	นายกรรณ จิตเมตตา
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

……. ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

……. กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

……. กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

กรรณ จิตเมตตา : การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน (APPLICATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR MULTI-OBJECTIVE SEQUENCING PROBLEMS ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ปารเมศ ชุติมา, 385 หน้า.

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านถูกออกแบบมาเพื่อผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีขนาดใหญ่ ในการใช้งานสายการประกอบดังกล่าว จะต้องพิจารณาเกี่ยวกับการจัดลำดับการผลิต เพื่อทำให้สายการประกอบสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่ทว่าปัญหาการจัดลำดับสำหรับสายการประกอบดังกล่าวนี้ถูกจัดอยู่ในประเภท NP-Hard ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาขนาดใหญ่เป็นไปได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : PSONK) เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยจะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชัน ไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด โดยจะเทียบประสิทธิภาพของ PSONK กับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับทั่วไปว่ามีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ COMSOAL NSGA-II DPSO และ BBO ผลการเปรียบเทียบพบว่า PSONK สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว โดยคำตอบที่ค้นพบยังใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากที่สุด ทั้งในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ดังนั้น PSONK จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มากกว่าอัลกอริทึมอื่น

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554

5270208321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : PARTICLE SWARM OPTIMIZATION / SEQUENCING / MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINE / MULTI-OBJECTIVE FUNCTION

KARN JITMETTA : APPLICATION OF PARTICLE SWARM OPTIMIZATION FOR MULTI-OBJECTIVE SEQUENCING PROBLEMS ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES. ADVISOR: ASSOC.PROF.PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 385 pp.

Mixed-model two-side assembly lines are suitable for high volume manufacturing of similar and large-sized product models, e.g. buses, trucks, automobiles and appliances. To achieve the highest effectiveness of the assembly lines, the sequencing problem needs to be optimized. Since this type of problem is NP-hard, a new metaheuristic namely Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge (PSONK) is adapted for multi-objective sequencing problems on mixed-model two-sided assembly lines. Two objectives are simultaneously considered, i.e. minimize total setup cost and minimize total utility work. The performance of PSONK is tested against 4 well-known algorithms, namely Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines (COMSOAL), Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAII), Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) and Biogeography-Based Optimization (BBO), based on 4 metrics. The computational results show that PSONK outperforms COMSOAL NSGA-II DPSO and BBO at convergence, ratio of Pareto-optimal solutions and less CPU time.

Department : Industrial Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชุติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความเอาใจใส่คอยดูแลและติดตามความก้าวหน้าของงานวิจัยตลอดการดำเนินการวิจัยซึ่งส่งผลให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงลงไปได้ด้วยดี รวมถึง ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช กรรมการที่ได้ให้ความเชื่อเหลือในการตรวจสอบ ข้อคิดเห็นและแนวทางการปรับปรุงของงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ชรัด จิรโกเมศ และ ปาลิดา ฉิมคล้าย รวมทั้งทีมงานทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ ความรู้ และความช่วยเหลือต่างๆ เพื่อให้งานวิจัยเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มิได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…… ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ท

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2

1.4 ลักษณะของปัญหา..... 3

1.5 ขั้นตอนในการวิจัย..... 6

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 6

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย..... 6

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 9

2.1 ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป..... 9

2.2 ประเภทของสายงานประกอบ..... 14

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 18

2.4 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 20

2.5 การกำหนดค่าความแข็งแรง..... 27

2.6 การกำหนดความหนาแน่น..... 28

2.7 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดและการเก็บสติงคำตอบสำหรับรอบการทำงานถัดไป..... 29

2.8 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด..... 30

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 33

บทที่ หน้า

2 2.10 สรุปท้ายบท..... 40

3 การประยุกต์ใช้ COMSOAL สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 41

3.1 แนวคิดและหลักการของ COMSOAL..... 41

3.2 ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 41

3.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ COMSOAL สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 43

3.4 สรุปท้ายบท..... 54

4 การประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 55

4.1 แนวคิดและหลักการของเจนเนติกอัลกอริทึม..... 55

4.2 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 56

4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 59

4.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเจนเนติกอัลกอริทึม..... 88

4.3 สรุปท้ายบท..... 89

5 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 90

5.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง..... 90

บทที่ หน้า

5 5.2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 90
5.3 ตัวอย่างการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 93
5.4 การออกแบบการทดลอง..... 99
5.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 114
5.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน DPSO……..... 134
5.7 สรุปท้ายบท..... 135

6 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 136
6.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ..... 136
6.2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน…….. 137
6.3 ตัวอย่างการนำวิธี PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์... 140
6.4 การออกแบบการทดลอง..... 171
6.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 172
6.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน PSONK..... 189
6.4 สรุปท้ายบท..... 190

7 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน..... 192
7.1 แนวคิดและหลักการของ BBO..... 192

บทที่ หน้า

7 7.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน... 194

7.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 197

7.4 การออกแบบการทดลอง..... 230

7.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 231

7.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน PSONK..... 244

7.7 สรุปท้ายบท..... 246

8 ผลการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม..... 247

8.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... 247

8.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึม..... 256

8.3 สรุปท้ายบท..... 268

9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 271

9.1 สรุปงานวิจัย..... 271

9.2 ข้อเสนอแนะ..... 275

รายการอ้างอิง..... 276

ภาคผนวก..... 280

ภาคผนวก ก รายละเอียดของปัญหาการทดลอง..... 281

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ..... 318

ภาคผนวก ค ผลการทดลองจากโปรแกรม..... 326

ภาคผนวก ง ผลการทดลองจากโปรแกรมสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์..... 377

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 385

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของปัญหาการทดลอง 3
ตารางที่ 2.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 11
ตารางที่ 2.2 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 13
ตารางที่ 2.3 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 22
ตารางที่ 2.4 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 23
ตารางที่ 2.5 การคำนวณค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง 23
ตารางที่ 2.6 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 24
ตารางที่ 2.7 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิดและความยาวสถานีงาน 25
ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างผลการคำนวณหาค่า Utility Work ของคู่สถานีงานที่ 1 26
ตารางที่ 3.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ 45
ตารางที่ 3.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 45
ตารางที่ 3.3 สตริงคำตอบเบื้องต้น 46
ตารางที่ 3.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 48
ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ 49
ตารางที่ 3.6 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน 49
ตารางที่ 3.7 สตริงคำตอบเบื้องต้น 50
ตารางที่ 3.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 51
ตารางที่ 3.9 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ 52
ตารางที่ 3.10 การรวมกันของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน 52
ตารางที่ 3.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของสตริงคำตอบที่นำการรวมกัน 53
ตารางที่ 3.12 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ 54
ตารางที่ 3.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน 54
ตารางที่ 4.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ 60
ตารางที่ 4.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 60
ตารางที่ 4.3 สตริงคำตอบเบื้องต้น 62
ตารางที่ 4.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 63

หน้า

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ 64
ตารางที่ 4.6 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ 65
ตารางที่ 4.7 การสร้างตารางวงล้อรูเล็ต 66
ตารางที่ 4.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection 68
ตารางที่ 4.9 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ 69
ตารางที่ 4.10 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ 69
ตารางที่ 4.11 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการครอสโอเวอร์ 73
ตารางที่ 4.12 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน 74
ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน 75
ตารางที่ 4.14 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก 75
ตารางที่ 4.15 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของสตริงคำตอบที่นำการรวมกัน 76
ตารางที่ 4.16 ลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและ
ค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย 77
ตารางที่ 4.17 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน 77
ตารางที่ 4.18 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป 78
ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานที่ 2 78
ตารางที่ 4.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ในรอบการทำงานที่ 2 79
ตารางที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ 79
ตารางที่ 4.22 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ 80
ตารางที่ 4.23 การสร้างค่าวงล้อรูเล็ต 80
ตารางที่ 4.24 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection 81
ตารางที่ 4.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ 81
ตารางที่ 4.26 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ 82
ตารางที่ 4.27 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการครอสโอเวอร์ 84
ตารางที่ 4.28 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน 84
ตารางที่ 4.29 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน 85
ตารางที่ 4.30 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก 86
ตารางที่ 4.31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของสตริงคำตอบที่นำการรวมกัน 86

หน้า

ตารางที่ 4.32 ลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและ
ค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย 87
ตารางที่ 4.33 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน 87
ตารางที่ 4.34 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป 88
ตารางที่ 4.35 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน NSGAII 88
ตารางที่ 5.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 94
ตารางที่ 5.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 94
ตารางที่ 5.3 การใส่รหัสตำแหน่งให้กับผลิตภัณฑ์ 95
ตารางที่ 5.4 สตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 96
ตารางที่ 5.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 98
ตารางที่ 5.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 98
ตารางที่ 5.7 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 98
ตารางที่ 5.8 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 99
ตารางที่ 5.9 การรวมสตริงคำตอบแต่ละฝูงเข้าด้วยกัน 99
ตารางที่ 5.10 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบ 99
ตารางที่ 5.11 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร 100
ตารางที่ 5.12 สตริงคำตอบที่ดีของประชากร 100
ตารางที่ 5.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 1 101
ตารางที่ 5.14 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 101
ตารางที่ 5.15 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นของฝูงที่ 1 101
ตารางที่ 5.16 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นของฝูงที่ 2 102
ตารางที่ 5.17 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1 103
ตารางที่ 5.18 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 104
ตารางที่ 5.19 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 1 104
ตารางที่ 5.20 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 2 105
ตารางที่ 5.21 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 1 105
ตารางที่ 5.22 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 2 106
ตารางที่ 5.23 สตริงคำตอบของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 106
ตารางที่ 5.24 ค่าจากการคำนวณทั้ง 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 107

หน้า

ตารางที่ 5.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 107
ตารางที่ 5.26 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 108
ตารางที่ 5.27 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 108
ตารางที่ 5.28 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบ 108
ตารางที่ 5.29 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร 109
ตารางที่ 5.30 สตริงคำตอบที่ดีของประชากร 109
ตารางที่ 5.31 การรวมสตริงคำตอบเพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2 110
ตารางที่ 5.32 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2 110
ตารางที่ 5.33 กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 2 110
ตารางที่ 5.34 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1 112
ตารางที่ 5.35 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 112
ตารางที่ 5.36 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 1 113
ตารางที่ 5.37 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 2 113
ตารางที่ 5.38 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 1 114
ตารางที่ 5.39 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 2 114
ตารางที่ 5.40 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ DPSO ที่จะทำการทดสอบ 115
ตารางที่ 5.41 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน DPSO 134
ตารางที่ 6.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 141
ตารางที่ 6.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 141
ตารางที่ 6.3 การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ 142
ตารางที่ 6.4 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) 143
ตารางที่ 6.5 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) 143
ตารางที่ 6.6 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) 144
ตารางที่ 6.7 สตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 144
ตารางที่ 6.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 146
ตารางที่ 6.9 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 147
ตารางที่ 6.10 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 147
ตารางที่ 6.11 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 148
ตารางที่ 6.12 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 148

หน้า

ตารางที่ 6.13 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร 149
ตารางที่ 6.14 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร 150
ตารางที่ 6.15 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 1 150
ตารางที่ 6.16 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก ของฝูงที่ 1 152
ตารางที่ 6.17 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest 152
ตารางที่ 6.18 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest และ Lworst 152
ตารางที่ 6.19 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst และ Gbest 153
ตารางที่ 6.20 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst 153
ตารางที่ 6.21 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก ของฝูงที่ 2 154
ตารางที่ 6.22 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และGworst 154
ตารางที่ 6.23 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ของฝูงที่ 1 155
ตารางที่ 6.24 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest ของฝูงที่ 1 156
ตารางที่ 6.25 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest และ Lworst 156
ตารางที่ 6.26 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst และ Gbest 157
ตารางที่ 6.27 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst 158
ตารางที่ 6.28 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ของฝูงที่ 2 158

หน้า

ตารางที่ 6.29 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst 159
ตารางที่ 6.30 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว 159
ตารางที่ 6.31 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว 160
ตารางที่ 6.32 สตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 161
ตารางที่ 6.33 ค่าจากการคำนวณทั้ง 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 161
ตารางที่ 6.34 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 162
ตารางที่ 6.35 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 162
ตารางที่ 6.36 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 163
ตารางที่ 6.37 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 163
ตารางที่ 6.38 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร 164
ตารางที่ 6.39 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร 164
ตารางที่ 6.40 การรวมสตริงคำตอบเพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด 165
ตารางที่ 6.41 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด 165
ตารางที่ 6.42 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 2 166
ตารางที่ 6.43 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก ของฝูงที่ 1 167
ตารางที่ 6.44 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest 167
ตารางที่ 6.45 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest และ Lworst 167
ตารางที่ 6.46 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst และ Gbest 168
ตารางที่ 6.47 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst 168
ตารางที่ 6.48 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก ของฝูงที่ 2 168
ตารางที่ 6.49 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และGworst 169

หน้า

ตารางที่ 6.50 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ของฝูงที่ 1 169
ตารางที่ 6.51 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst..... 169
ตารางที่ 6.52 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ของฝูงที่ 2 170
ตารางที่ 6.53 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst..... 170
ตารางที่ 6.54 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว..... 171
ตารางที่ 6.55 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว..... 171
ตารางที่ 6.56 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ PSONK ที่จะทำการทดสอบ 172
ตารางที่ 6.57 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน PSONK 190
ตารางที่ 7.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ 198
ตารางที่ 7.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด..... 198
ตารางที่ 7.3 การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์..... 199
ตารางที่ 7.4 สตริงคำตอบเบื้องต้น 200
ตารางที่ 7.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2..... 201
ตารางที่ 7.6 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ 202
ตารางที่ 7.7 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพ แบบ Linear..... 203
ตารางที่ 7.8 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Linear..... 204
ตารางที่ 7.9 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพ แบบ Sinusoidal..... 204
ตารางที่ 7.10 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal 205
ตารางที่ 7.11 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 3..... 207
ตารางที่ 7.12 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 3 208
ตารางที่ 7.13 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 2..... 209
ตารางที่ 7.14 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 2 210
ตารางที่ 7.15 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 1..... 211

หน้า

ตารางที่ 7.16 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1 211
ตารางที่ 7.17 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ 212
ตารางที่ 7.18 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ท 213
ตารางที่ 7.19 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน 214
ตารางที่ 7.20 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว 214
ตารางที่ 7.21 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ 215
ตารางที่ 7.22 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 1 216
ตารางที่ 7.23 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป 216
ตารางที่ 7.24 สตริงคำตอบเบื้องต้น 217
ตารางที่ 7.25 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 217
ตารางที่ 7.26 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ 218
ตารางที่ 7.27 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพ
แบบ Linear 219
ตารางที่ 7.28 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Linear 219
ตารางที่ 7.29 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพ
แบบ Sinusoidal 220
ตารางที่ 7.30 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal 220
ตารางที่ 7.31 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 3 221
ตารางที่ 7.32 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 3 222
ตารางที่ 7.33 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 2 222
ตารางที่ 7.34 การปรับปรุงสตริงคำตอของสปีชี่ส์เคาท์ 2 224
ตารางที่ 7.35 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 1 225
ตารางที่ 7.36 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1 225
ตารางที่ 7.37 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ 226
ตารางที่ 7.38 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ท 227
ตารางที่ 7.39 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน 228
ตารางที่ 7.40 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว 228
ตารางที่ 7.41 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ 229
ตารางที่ 7.42 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2 230

หน้า

ตารางที่ 7.43 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป 230
ตารางที่ 7.44 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ BBO ที่ทำการทดสอบ 230
ตารางที่ 7.45 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO 245
ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์สำหรับ COMSOAL 253
ตารางที่ 8.2 พารามิเตอร์สำหรับ NSGA-II 253
ตารางที่ 8.3 พารามิเตอร์สำหรับ DPSO 254
ตารางที่ 8.4 พารามิเตอร์สำหรับ PSONK 254
ตารางที่ 8.5 พารามิเตอร์สำหรับ BBO 255
ตารางที่ 8.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.1 257
ตารางที่ 8.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.2 258
ตารางที่ 8.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.1 259
ตารางที่ 8.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.2 260
ตารางที่ 8.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.1 261
ตารางที่ 8.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.2 262
ตารางที่ 8.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.1 263
ตารางที่ 8.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.2 264
ตารางที่ 8.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.1 265
ตารางที่ 8.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.2 266
ตารางที่ 8.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Case Study 267
ตารางที่ 8.17 ผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึม 269

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 สายการประกอบแบบด้านเดียว 10
ภาพที่ 2.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 11
ภาพที่ 2.3 สายการประกอบแบบสองด้าน 12
ภาพที่ 2.4 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 และลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของ ผลิตภัณฑ์ A 13
ภาพที่ 2.5 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 และลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของ ผลิตภัณฑ์ B 13
ภาพที่ 2.6 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 และลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลัง ของผลิตภัณฑ์ C 13
ภาพที่ 2.7 สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว 14
ภาพที่ 2.8 สายการประกอบหลายผลิตภัณฑ์ 14
ภาพที่ 2.9 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม 15
ภาพที่ 2.10 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด 20
ภาพที่ 2.11 ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด 20
ภาพที่ 2.12 การเกิดการปรับตั้งเครื่องจักร 22
ภาพที่ 2.13 สายการประกอบแบบสองด้านและลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของ ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด 25
ภาพที่ 2.14 การเกิด Utility Work ในคู่สถานีงาน 27
ภาพที่ 2.15 วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting 28
ภาพที่ 2.16 การแบ่งปันค่าความแข็งแรงแบบ Crowding Distance 29
ภาพที่ 2.17 วิธีการเก็บค่าที่ดีที่สุด 30
ภาพที่ 2.18 สายการประกอบแบบสองด้าน 34
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL 43
ภาพที่ 3.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง 44
ภาพที่ 3.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน 46
ภาพที่ 3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting 49
ภาพที่ 3.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting 51

หน้า

ภาพที่ 3.6 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting 53
ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II 58
ภาพที่ 4.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง 59
ภาพที่ 4.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน..... 61
ภาพที่ 4.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting 64
ภาพที่ 4.5 วงล้อรูเล็ต..... 67
ภาพที่ 4.6 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 2 74
ภาพที่ 4.7 การกำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 76
ภาพที่ 4.8 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 1 85
ภาพที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO..... 92
ภาพที่ 5.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง 93
ภาพที่ 5.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน..... 95
ภาพที่ 5.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร 100
ภาพที่ 5.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร 109
ภาพที่ 5.6 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของค่าที่ดีที่สุด..... 110
ภาพที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 117
ภาพที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 117
ภาพที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 118
ภาพที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 118
ภาพที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 119
ภาพที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 119
ภาพที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 120

หน้า

ภาพที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 120
ภาพที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 121
ภาพที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 121
ภาพที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 122
ภาพที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 122
ภาพที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 123
ภาพที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 123
ภาพที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 124
ภาพที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 124
ภาพที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 125
ภาพที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 125
ภาพที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 126
ภาพที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 126
ภาพที่ 5.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 127

หน้า

ภาพที่ 5.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 127
ภาพที่ 5.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 128
ภาพที่ 5.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 128
ภาพที่ 5.31 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 129
ภาพที่ 5.32 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 129
ภาพที่ 5.33 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 130
ภาพที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 131
ภาพที่ 5.35 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 131
ภาพที่ 5.36 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 132
ภาพที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 132
ภาพที่ 5.38 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 133
ภาพที่ 5.39 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง . 133
ภาพที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK 139
ภาพที่ 6.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง 140
ภาพที่ 6.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน 142
ภาพที่ 6.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 1 147

หน้า

ภาพที่ 6.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 2 148
ภาพที่ 6.6 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร 149
ภาพที่ 6.7 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 1 162
ภาพที่ 6.8 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 2 163
ภาพที่ 6.9 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร 164
ภาพที่ 6.10 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด 166
ภาพที่ 6.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 173
ภาพที่ 6.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 173
ภาพที่ 6.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 174
ภาพที่ 6.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 174
ภาพที่ 6.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 175
ภาพที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 175
ภาพที่ 6.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 176
ภาพที่ 6.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 176
ภาพที่ 6.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 177
ภาพที่ 6.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..... 177

หน้า

ภาพที่ 6.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 178
ภาพที่ 6.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 178
ภาพที่ 6.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 179
ภาพที่ 6.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 180
ภาพที่ 6.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 180
ภาพที่ 6.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 181
ภาพที่ 6.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 182
ภาพที่ 6.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 182
ภาพที่ 6.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 183
ภาพที่ 6.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 183
ภาพที่ 6.31 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 184
ภาพที่ 6.32 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 184
ภาพที่ 6.33 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 185
ภาพที่ 6.34 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 185

หน้า

ภาพที่ 6.35 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 186
ภาพที่ 6.36 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 186
ภาพที่ 6.37 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 187
ภาพที่ 6.38 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 187
ภาพที่ 6.39 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 188
ภาพที่ 6.40 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 188
ภาพที่ 6.41 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง . 189
ภาพที่ 7.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO 196
ภาพที่ 7.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง 197
ภาพที่ 7.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน 199
ภาพที่ 7.4 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting 202
ภาพที่ 7.5 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 2 213
ภาพที่ 7.6 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting 215
ภาพที่ 7.7 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting 218
ภาพที่ 7.8 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 4 227
ภาพที่ 7.9 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting 229
ภาพที่ 7.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 232
ภาพที่ 7.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 233

หน้า

ภาพที่ 7.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 234
ภาพที่ 7.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 234
ภาพที่ 7.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 235
ภาพที่ 7.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 235
ภาพที่ 7.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 236
ภาพที่ 7.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 237
ภาพที่ 7.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 237
ภาพที่ 7.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 238
ภาพที่ 7.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 239
ภาพที่ 7.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 240
ภาพที่ 7.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 241
ภาพที่ 7.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 241
ภาพที่ 7.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 242
ภาพที่ 7.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 242

หน้า

ภาพที่ 7.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 243
ภาพที่ 7.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 244
ภาพที่ 8.1 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 1.1 247
ภาพที่ 8.2 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 1.2 247
ภาพที่ 8.3 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 2.1 248
ภาพที่ 8.4 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 2.2 248
ภาพที่ 8.5 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 3.1 249
ภาพที่ 8.6 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 3.2 249
ภาพที่ 8.7 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 4.1 250
ภาพที่ 8.8 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 4.2 250
ภาพที่ 8.9 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 5.1 251
ภาพที่ 8.10 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 5.2 251
ภาพที่ 8.11 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Case Study 252
ภาพที่ 8.12 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.1 ... 257
ภาพที่ 8.13 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.2 ... 258
ภาพที่ 8.14 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.1 ... 259
ภาพที่ 8.15 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.2 ... 260
ภาพที่ 8.16 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.1 ... 261
ภาพที่ 8.17 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.2 ... 262
ภาพที่ 8.18 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.1 ... 263
ภาพที่ 8.19 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.2 ... 264
ภาพที่ 8.20 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.1 ... 265
ภาพที่ 8.21 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.2 ... 266
ภาพที่ 8.22 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Case Study 267

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับสิ่งจูงใจที่ทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน รวมถึงวัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และการสรุปเนื้อหาในแต่ละบท ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีปริมาณการผลิตสูง เช่น รถบัส รถบรรทุก รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ตู้เย็น ตู้อบ และเครื่องซักผ้า (Özcan and Toklu, 2010) การเลือกใช้สายการประกอบดังกล่าวควรมีการพิจารณาปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing) และปัญหาการจัดลำดับการผลิต (Sequencing) เพื่อให้การทำงานของสายการประกอบมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในงานวิจัยนี้ขอกำหนดให้สายการประกอบดังกล่าวได้ถูกจัดสมดุลมาแล้ว และจะศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตเท่านั้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาประเภท NP-hard (Rahimi-Vahed et al., 2007) หมายความว่า ถ้าปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้คำตอบที่เป็นไปได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปแนนเชียล ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นไปได้ยากโดยเฉพาะปัญหาขนาดใหญ่ เราจึงควรนำวิธีเมทาฮิวริสติก (Metaheuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งเป็นวิธีที่นักวิชาการให้การยอมรับและนิยมเลือกใช้ เพราะสามารถค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดและใช้เวลาค้นหาคำตอบไม่นานจนเกินไป เช่น งานวิจัยของ Hyun et al. (1998) ได้พัฒนาเจนเนติกอัลกอริทึมขึ้นมาใหม่ที่มีชื่อว่า Pareto Stratum-Niche Cubic Genetic Algorithm (PS-NC GA) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณามี 3 ฟังก์ชัน ได้แก่ ความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด Mansouri (2005) ได้เสนอวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการจัดลำดับที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm : MOGA) โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสรุปผลได้ว่า MOGA เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่ดีเหมาะกับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต Liao et al. (2007) ได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิต ที่เรียกว่า Discrete Version of Particle Swarm Optimization (DPSO) โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง DPSO กับเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) และ

สรุปผลว่า DPSO มีประสิทธิภาพสูงกว่า GA ต่อมา Rahimi-Vahed et al. (2007) ได้พัฒนาเจนเนติกอัลกอริทึมขึ้นมาใหม่ที่มีชื่อว่า Multi-Objective Scatter Search (MOSS) โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เหมือนกับงานวิจัยของ Hyun et al. (1998) ซึ่งสรุปผลงานวิจัยไว้ว่า MOSS มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดีกว่า NSGA-II และ NSGA-II มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบดีกว่า PS-NC GA แต่สิ่งที่ MOSS ด้อยกว่าอัลกอริทึมทั้งสองอย่างชัดเจน คือ MOSS ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่ามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้แก้ปัญหาในอุตสาหกรรมจริง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การพัฒนาอัลกอริทึมควรให้มีประสิทธิภาพทั้งด้านคุณภาพคำตอบที่ดี และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบไปพร้อมกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีเมทาฮิวริสติกที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge : PSONK) โดยจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของ PSONK กับวิธีเมทาฮิวริสติกที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพที่ดี ได้แก่ COMSOAL NSGA-II DPSO และ BBO เพื่อหาอัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานจนเกินไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. ทำการศึกษาเฉพาะการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีความสมดุลแล้วเท่านั้น และการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบสามารถสลับลำดับกันอย่างไรก็ได้

2. นำวิธีการของ PSO มาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการค้นหาคำตอบ

3. การค้นหาคำตอบของปัญหาในงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สนใจศึกษา 2 ฟังก์ชัน คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมจะประเมินจากคำตอบที่ค้นหาได้ โดยใช้ตัวชี้วัด 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) (นพพล คำภิรมย์, 2551)

5. ปัญหาการทดลองที่ศึกษาในงานวิจัยนี้นำมาจากปัญหามาตรฐานของ Mcmullen (2001) และปัญหากรณีศึกษา (Case Study) เป็นปัญหาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด โดยรายละเอียดของปัญหาการทดลองมีดังนี้

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ปัญหา	จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set : MPS)	ความยาวสตริง	จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้
Set 1.1	5	4:3:2:2:1	12	831600
Set 1.2	5	3:3:2:2:2	12	1663200
Set 2.1	5	4:3:3:3:2	15	1.26E+08
Set 2.2	5	3:3:3:3:3	15	1.68E+08
Set 3.1	5	5:4:4:4:3	20	2.44E+11
Set 3.2	5	4:4:4:4:4	20	3.06E+11
Set 4.1	10	4:4:4:2:1:1:1:1:1:1	20	8.80E+13
Set 4.2	10	2:2:2:2:2:2:2:2:2:2	20	2.38E+15
Set 5.1	15	15:15:10:10:10:10:10:10:4:1:1:1:1:1:1	100	9.96E+92
Set 5.2	15	7:7:7:7:7:7:7:7:7:6:6:6:6:6	100	4.56E+106
Case Study	2	15:15	30	1.55E+08

1.4 ลักษณะของปัญหา

ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน เป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ โดยผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับมีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางรายละเอียดของปัญหาการทดลองที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

2. คำตอบหรือสตริงคำตอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ รูปแบบของลำดับการผลิต (Model Sequence) ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต (Minimum Part Set : MPS) โดยใช้วิธีสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่มีการกระจายแบบยูนิฟอร์มต่อเนื่อง (Continuous Uniform Distribution : U[0,1]) เช่น สมมติให้มีความต้องการผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ A, B และ C และมีสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดเท่ากับ (6:4:2) ดังนั้น Model Sequence ที่สร้างขึ้นจะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 12 คือ AAAAAABBBBCC หรือ BAACBBACBAAA เป็นต้น

3. การจัดลำดับการผลิตเข้าสู่สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านของงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา 2 วัตถุประสงค์ คือ เพื่อหาค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และเพื่อหาปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด (Hyun et al., 1998) ซึ่งค่าวัตถุประสงค์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Minimize \;\; f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{1.1}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ

$$Minimize \;\; f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_m} \left(\sum_{i=1}^{I} U_{i,n_m} + Z_{I+1,n_m} / v_c \right) \tag{1.2}$$

โดยที่

$$U_{i,n_m} = \left\lfloor \begin{array}{l} \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \right) - L_{n_m} \right) / v_c \right] + \\ \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \right) - L_{n_m} \right) / v_c \right] \end{array} \right\rfloor \tag{1.3}$$

$$Z_{i+1,n_m} = \max \left\lfloor \begin{array}{l} \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right] \end{array} \right\rfloor \tag{1.4}$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w} = v_c \times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

4. สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

- สายการประกอบที่นำมาจัดลำดับการผลิตได้ถูกจัดสมดุลมาแล้ว
- ลักษณะสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
- ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมีหลายรุ่นแต่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันจึงสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้
- สถานีงานเป็นแบบปิด
- การเริ่มทำงานของพนักงานที่อยู่ในคู่สถานีงานเดียวกันจะเริ่มทำงานพร้อมกันและเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อพนักงานที่มีภาระงานมากกว่าทำงานเสร็จ
- รอบเวลาการปล่อยสินค้าเข้าสู่สายพานการผลิตคงที่
- ไม่พิจารณาถึงเวลาการเดินของพนักงาน
- ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องขึ้นอยู่กับลำดับงานก่อนหน้า
- เครื่องจักรทุกเครื่องพร้อมใช้งานและประสิทธิภาพร้อยเปอร์เซ็นต์
- วัตถุดิบ พนักงาน และเครื่องมือมีความพร้อมใช้งานและมีอยู่ไม่จำกัด
- พนักงานหนึ่งคนต่อหนึ่งสถานีงาน
- ในกระบวนการผลิตไม่มีงานเสียหรืองานที่ต้องนำกลับไปแก้ไข
- ณ เวลาหนึ่งเครื่องจักรสามารถทำงานได้เพียงงานเดียวเท่านั้น
- ไม่มีการยกเลิกคำสั่งผลิต
- พื้นที่แถวคอยในกระบวนการผลิตมีไม่จำกัด

- ไม่มีการแทรกงาน
- งานทุกงานมีความพร้อมทำตลอดเวลา
- ความต้องการผลิตภัณฑ์พิจารณาจากสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (Minimum part set)

1.5 ขั้นตอนในการวิจัย

ขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB
- สร้างอัลกอริทึมโดยใช้โปรแกรม MATLAB
- ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่เขียนขึ้น
- ประเมินผลการใช้อัลกอริทึมแก้ไขปัญหา
- สรุปผลและวิเคราะห์ผล
- จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้

- ช่วยลดระยะเวลาและความยุ่งยากในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
- เป็นแนวทางในการตัดสินใจจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
- มีการพัฒนาอัลกอริทึมและโปรแกรมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
- สามารถนำผลวิจัยไปพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้มีประโยชน์ต่อสังคมมากยิ่งขึ้น

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย

เนื้อหาในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีเกี่ยวกับการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบสองด้าน งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การนำอัลกอริทึมต่างๆ เข้ามาประยุกต์ใช้กับปัญหาในงานวิจัย การออกแบบการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม การ

กำหนดค่าพารามิเตอร์ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ข้อเสนอแนะ และการสรุปผลงานวิจัย ซึ่งเนื้อหาในหัวข้อที่กล่าวมาทั้งหมดได้ถูกแบ่งออกเป็นบทๆ ดังนี้

- **บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

- **บทที่ 3 COMSOAL** มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดของวิธี Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines (COMSOAL) ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL และตัวอย่างการนำ COMSOAL ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

- **บทที่ 4 NSGA-II** มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ขั้นตอนการทำงานของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ตัวอย่างการนำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน และการกำหนดค่าพารามิเตอร์

- **บทที่ 5 DPSO** มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization : DPSO) ขั้นตอนการทำงานของ DPSO ตัวอย่างการนำ DPSO ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ DPSO ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

- **บทที่ 6 PSONK** มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge: PSONK) ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ตัวอย่างการนำ PSONK ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

- **บทที่** 7 **BBO** มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธี Biogeography-Based Optimization (BBO) ขั้นตอนการทำงานของวิธี BBO ตัวอย่างการนำวิธี BBO ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

- **บทที่** 8 **ผลการทดลอง** มีเนื้อหาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม คือ COMSOAL NSGA-II DPSO PSONK และ BBO เพื่อหาอัลกอริทึมที่มีความเหมาะสมกับการแก้ปัญหาการในงานวิจัยนี้มากที่สุด โดยการเปรียบเทียบจะประเมินค่าจากคำตอบที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึม โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะ 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) เป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึม

- **บทที่** 9 **สรุปและข้อเสนอแนะ** มีเนื้อหาเกี่ยวกับการสรุปผลงานวิจัย ข้อเสนอแนะที่คาดว่าเป็นประโยชน์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

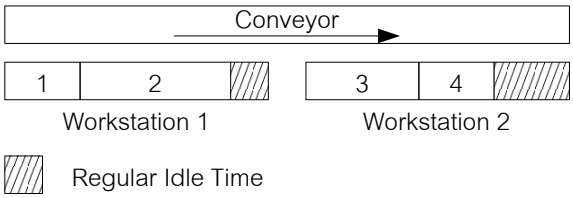
ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้แก่ ลักษณะสายการประกอบ ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ และวิธีการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบ รวมถึงการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วย โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ คือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบเส้นตรง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมและการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

2.1 ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป

สายการประกอบ (Assembly Line) ที่ใช้กันในอุตสาหกรรมการผลิตจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของกระบวนการผลิตสินค้าแต่ละชนิด โดยทั่วไปแล้วสายการประกอบจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ หน่วยการผลิตหรือสถานีงาน (Workstation: n_w) และขั้นงาน (Task: k) ที่จัดสรรลงในสถานีงาน ในระบบสายการประกอบแบบต่อเนื่อง ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์จะถูกเคลื่อนย้ายมายังสถานีงานเริ่มต้นเพื่อทำการประกอบ เมื่อสถานีงานเริ่มต้นนี้ประกอบเสร็จชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์จะถูกส่งต่อไปยังสถานีถัดไปเรื่อยๆ จนได้เป็นสินค้าสำเร็จรูป โดยสายการประกอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ สายการประกอบแบบด้านเดียว (one-sided assembly lines: 1SALs) และแบบสองด้าน (two-sided assembly lines: 2SALs)

2.1.1 สายการประกอบแบบด้านเดียว

สายการประกอบแบบด้านเดียวถูกออกแบบมาเพื่อผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก โดยมีลักษณะการจัดวางสถานีงานอยู่ที่ด้านใดด้านหนึ่งของสายการประกอบเท่านั้น ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นสายการประกอบแบบด้านเดียวที่มี 2 สถานีงาน มีขั้นงานเท่ากับ 4 ขั้นงาน และมีเวลาเดินเปล่าปกติ (Regular Idle Time) เกิดขึ้นทางด้านขวาของสถานีงาน เนื่องจากในสถานีงานมีปริมาณงานน้อยกว่าขอบเขตสถานีงานที่กำหนดไว้



ภาพที่ 2.1 สายการประกอบแบบด้านเดียว

2.1.2 สายการประกอบแบบสองด้าน

สายการประกอบแบบสองด้านถูกออกแบบมาเพื่อผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณการผลิตสูง เช่น รถบัส รถบรรทุก รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ตู้เย็น ตู้อบ เครื่องซักผ้า เป็นต้น โดยสายการประกอบแบบสองด้านมีลักษณะดังภาพที่ 2.3 ซึ่งมีสายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์อยู่ตรงกลางระหว่างสถานีด้านซ้ายและด้านขวา โดยสถานีงานที่อยู่ตรงข้ามกันแบบสถานีงานที่ 1 และ 2 เรียกว่า คู่สถานีงาน (Mated Station: n_m) ที่ 1 ส่วนสถานีงานที่ 3 และ 4 เรียกว่า คู่สถานีงานที่ 2 โดยลักษณะการจัดวางสถานีงานดังกล่าวทำให้สายการประกอบแบบสองด้านมีข้อดีกว่าสายการประกอบแบบด้านเดียว คือ ความยาวสายการประกอบแบบสองด้านสั้นกว่าแบบด้านเดียวจึงใช้พื้นที่การผลิตน้อยกว่า ช่วยลดระยะทางการเคลื่อนที่ของพนักงาน ช่วยลดค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง และช่วยลดต้นทุนด้านเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ในคู่สถานีงานเดียวกัน (Özcan and Toklu, 2010)

สายการประกอบแบบสองด้านได้แบ่งขั้นงานที่จัดสรรลงในสายการประกอบออกเป็น 3 ประเภท คือ ขั้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านซ้ายเท่านั้น (Left-Type : L) ขั้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านขวาเท่านั้น (Right-Type : R) และขั้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบได้ทั้งสองด้าน (Either-Type : E) เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์กำหนดให้ขั้นงานการประกอบพวงมาลัยรถยนต์ที่ขายในประเทศไทยเป็นแบบ R ส่วนขั้นงานการประกอบหม้อกรองอากาศให้เป็นแบบ L และขั้นงานการประกอบกันชนเป็นแบบ E เป็นต้น

การจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีของสายการประกอบแบบสองด้านมีขั้นตอนดังนี้ (1) กำหนดรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 10 (2) กำหนดสัดส่วนผลิตภัณฑ์ในหนึ่งรอบการผลิต (Minimum Part Set : MPS) โดยเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ผลิตภัณฑ์ผสม $(d_1, d_2, ..., d_M)$ เมื่อ $d_m = D_m / h$ โดยที่ d_m คือ จำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ m $(m = 1,2,...,M)$, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด และ h คือ ตัวหารร่วมมากของ $(D_1, D_2, ..., D_M)$ โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้ MPS = (1:1:1) ดังตารางที่

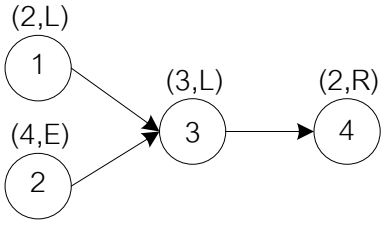
2.1 และ (3) คำนวณเวลาการดำเนินงานเฉลี่ยของขั้นงาน k $(\bar{p}_k)$ ตามสัดส่วนผลิตภัณฑ์ โดยมีสมการดังนี้

$$\bar{p}_k = \sum_{m=1}^{M} p_{km} d_m \Big/ \sum_{m=1}^{M} d_m \qquad (2.1)$$

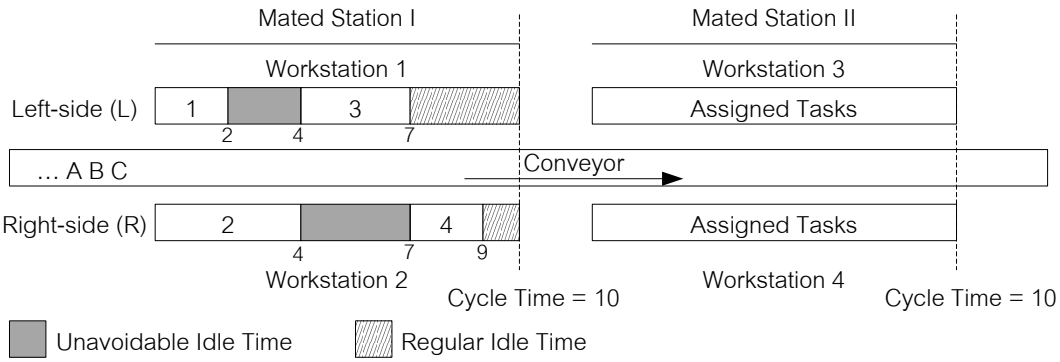
เมื่อ p_{km} คือ เวลาการดำเนินงานในขั้นงาน k ของผลิตภัณฑ์ m โดยในตัวอย่างนี้แสดงผลการคำนวณค่า $\bar{p}_k$ ในตารางที่ 2.1 และพิจารณาเงื่อนไขการจัดขั้นงานลงสู่สายการประกอบ ได้แก่ เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงในแต่ละด้านของสายการประกอบและเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อนหลัง (Precedence Constraint) โดยในตัวอย่างนี้จะพิจารณาจากภาพที่ 2.2 ทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงในสายการประกอบแต่ละด้าน ที่กำหนดให้ขั้นงาน 1 กับขั้นงาน 3 สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านซ้ายเท่านั้น ขั้นงาน 4 สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านขวาเท่านั้น และขั้นงาน 2 สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบได้ทั้งสองด้าน และทราบเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อนหลัง ที่กำหนดให้ขั้นงาน 1 และ 2 สามารถเริ่มงานได้ทันที โดยขั้นงาน 1 และ 2 ต้องทำเสร็จก่อนจึงจะเริ่มขั้นงาน 3 และขั้นงาน 3 ต้องทำเสร็จก่อนจึงจะเริ่มขั้นงาน 4

ตารางที่ 2.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

ขั้นงาน (k)	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (A:B:C)=(1:1:1)			เวลาเฉลี่ย $(\bar{p}_k)$
	A	B	C	
1	3	2	1	2
2	5	3	4	4
3	4	1	4	3
4	2	1	3	2



ภาพที่ 2.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด



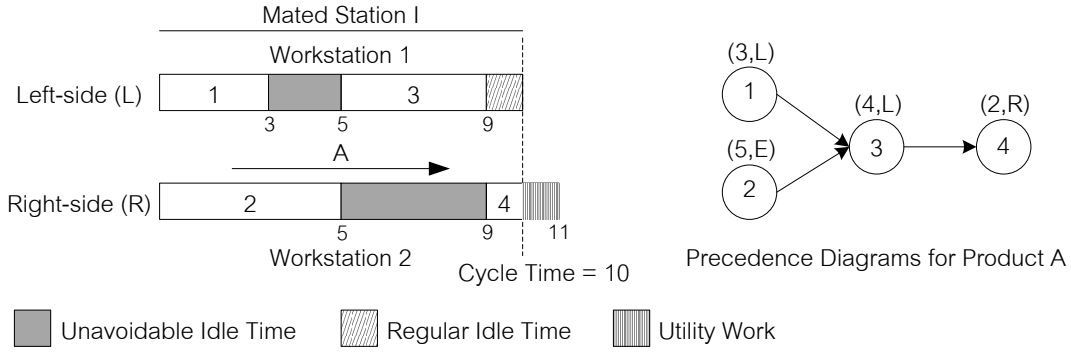
ภาพที่ 2.3 สายการประกอบแบบสองด้าน

จากการจัดสรรขั้นงานลงในสายการประกอบตามเงื่อนไขที่กล่าวมาจะได้ผลดังภาพที่ 2.3 ทำให้ทราบข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบด้านเดียวและแบบสองด้าน คือ สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบด้านเดียวจะมีเวลาเดินเปล่าเกิดขึ้นระหว่างขั้นงานในสถานีงานเดียวกันเพียงแบบเดียว คือ เวลาเดินเปล่าปกติ (Regular Idle Time : R) แต่สำหรับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านจะมีเวลาเดินเปล่าเกิดขึ้นระหว่างขั้นงานในสถานีงานเดียวกัน 2 แบบ คือ เวลาเดินเปล่าปกติ และเวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ (Unavoidable Idle Time : Y) โดยสังเกตได้จากบริเวณที่แรงเงาด้วยเส้นทแยงมุม และสีเทาตามลำดับ ดังนั้นเวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m ที่แท้จริง ($t'_{n_w m}$) จึงเท่ากับเวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m ($t_{n_w m}$) บวกกับเวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w (Y_{n_w}) โดยมีสมการดังนี้

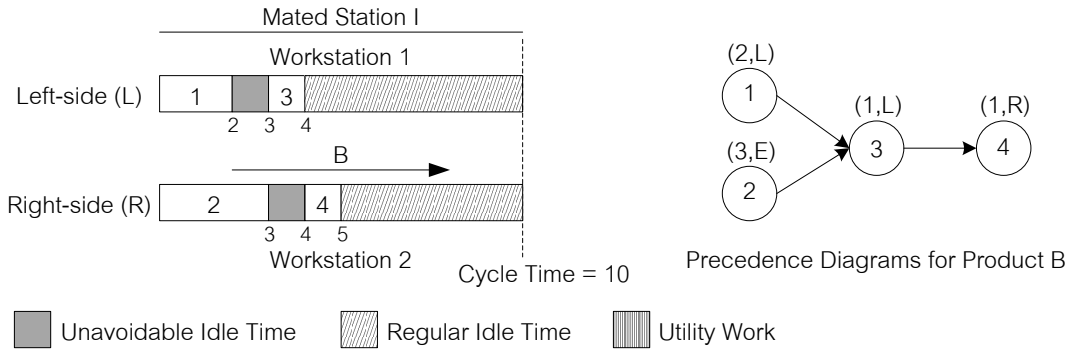
$$t_{n_w m} = \sum_{k \in K_{n_w}} p_{km} \tag{2.2}$$

$$t'_{n_w m} = t_{n_w m} + Y_{n_w m} \tag{2.3}$$

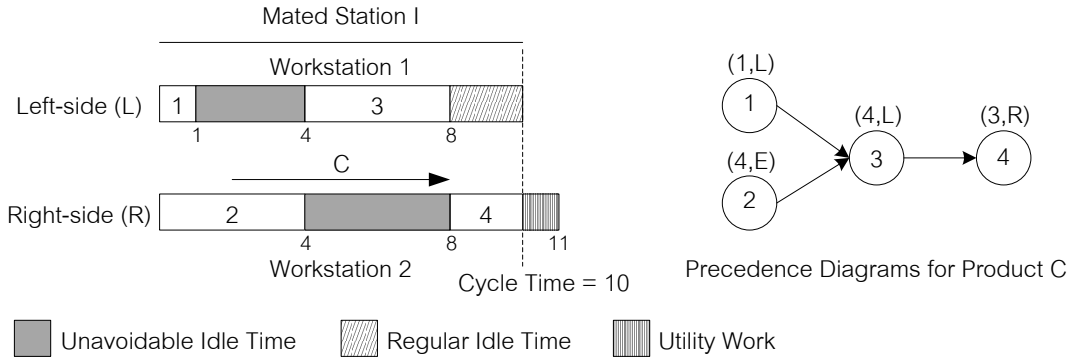
เมื่อ p_{km} คือ เวลาการดำเนินงานในขั้นงาน k ของผลิตภัณฑ์ m และ K_{n_w} คือ เซตของขั้นงานที่อยู่ในสถานีงาน n_w โดยเงื่อนไขที่กล่าวมาในข้างต้นและเวลาดำเนินงานในตารางที่ 2.1 สามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณเวลาการดำเนินงานในสถานีงานที่ 1 และ 2 ของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ดังภาพที่ 2.4-2.6 และตารางที่ 2.2 จากภาพที่ 2.4 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสายการประกอบในภาพที่ 2.3 ขณะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ A โดยการเพิ่มขึ้นของเวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จะส่งผลต่อการลดลงของเวลาเดินเปล่าปกติ และการเพิ่มขึ้นของปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ (Utility Work)



ภาพที่ 2.4 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 และลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A



ภาพที่ 2.5 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 และลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B



ภาพที่ 2.6 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 และลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ C

ตารางที่ 2.2 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

คู่สถานีงาน (n_m)	สถานีงาน (n_w)	ผลิตภัณฑ์		
		A	B	C
1	1	(3+4)+[2]=9	(2+1)+[1]=4	(1+4)+[3]=8
	2	(5+2)+[4]=11	(3+1)+[1]=5	(4+3)+[4]=11

หมายเหตุ: ค่าในเครื่องหมาย ( ) คือ เวลาดำเนินงาน และ [ ] คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

2.2 ประเภทของสายงานประกอบ

สายการประกอบสามารถแยกออกได้หลายประเภท โดยพิจารณาจากหลายองค์ประกอบดังนี้ (นพพล คำภิรมย์, 2551)

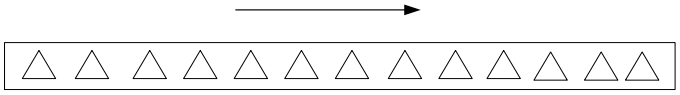
- สายการประกอบที่แยกประเภทตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต
- สายการประกอบที่แยกประเภทตามการเคลื่อนย้ายงานระหว่างสถานีงาน
- สายการประกอบที่แยกประเภทตามลักษณะเวลาทำงานของสถานีงาน
- สายการประกอบที่แยกประเภทตามลักษณะของสถานีงาน

2.2.1 สายการประกอบที่แยกประเภทตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต

สายการประกอบที่แยกประเภทตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้ (Becker และ Scholl, 2006)

2.2.1.1 สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว

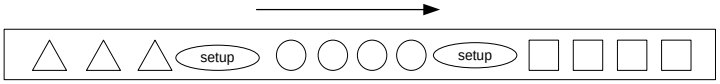
สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Line) เป็นสายงานการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียวเท่านั้นดังรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2.7 สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว

2.2.1.2 สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์

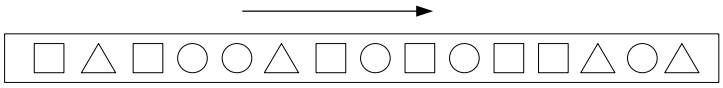
สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Multi Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีรูปแบบและกระบวนการประกอบที่ใกล้เคียงกัน และสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้ โดยจะทำการผลิตทีละชุดและในช่วงระหว่างการเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์จะต้องมีการปรับตั้งสายการประกอบใหม่ทุกครั้งดังรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2.8 สายการประกอบหลายผลิตภัณฑ์

2.2.1.3 สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม

สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่นเดียวกับสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ จะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกันโดยไม่มีการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นชุดและระหว่างการผลิตจะไม่มีการปรับตั้งสายการประกอบใหม่ดังรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2.9 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

จากรูปสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ถ้าหากเราปรับให้ขนาดของชุดผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่มาก สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ก็จะคล้ายกับสายการปะกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว แต่ถ้าเราปรับให้ขนาดของชุดผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กลงจนเหลือประมาณหนึ่ง สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ก็จะคล้ายกับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม และจากรูปแบบสายการประกอบที่ได้กล่าวมาทั้ง 3 แบบ จะสังเกตได้ว่าสายการประกอบที่ควรมีการจัดลำดับการผลิตคือสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์และแบบผลิตภัณฑ์ผสม

2.2.2 สายการประกอบที่แยกประเภทตามการเคลื่อนย้ายงานระหว่างสถานีงาน

สายการประกอบที่แยกประเภทตามการเคลื่อนย้ายงานระหว่างสถานีงาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.2.2.1 การเคลื่อนย้ายงานด้วยมือ

การเคลื่อนย้ายงานด้วยมือ (Manual Transfer) เป็นการเคลื่อนย้ายงานจากสถานีงานหนึ่งไปยังอีกสถานีงานถัดไปด้วยตัวพนักงานเอง ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ได้ดังนี้

- การไม่มีงานป้อน (Starving) คือ เหตุการณ์ที่คนงานได้ทำงานของตนเสร็จเรียบร้อยแล้ว แต่ยังไม่สามารถเริ่มงานในชิ้นงานต่อไปได้เนื่องจากต้องคอยงานที่คนงานในสถานีก่อนหน้ายังทำไม่เสร็จ

- การไม่มีที่ส่งงาน (Blocking) คือ เหตุการณ์ที่คนงานได้ทำงานของตนเสร็จเรียบร้อยแล้ว แต่ไม่สามารถส่งชิ้นงานที่เสร็จนั้นไปยังสถานีงานถัดไปได้ เนื่องจากต้องรอให้คนงานในสถานีงานถัดไปทำงานที่ค้างอยู่ให้เสร็จเสียก่อน จึงจะสามารถส่งงานของตนเองไปได้ แล้วตนเองจึงเริ่มทำงานชิ้นใหม่ได้

ปัญหาทั้งสองแบบจะมีผลทำให้ระบบการผลิตมีการไหลของงานไม่สม่ำเสมอหรือรอบเวลาการผลิตไม่คงที่ จึงส่งผลให้เกิดการวางแผนกำลังการผลิตทำได้ยากขึ้นเพราะกำลังการผลิตจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทางแก้ไขปัญหานี้คือ ควรมีการเตรียม Buffer Storage ระหว่างสถานีงานไว้ เพื่อช่วยลดผลกระทบจากปัญหาทั้งสองนี้ ทำให้สายการผลิตมีอัตราการผลิตที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องยิ่งขึ้น

2.2.2.2 **การเคลื่อนย้ายงานด้วยสายพาน**

การเคลื่อนย้ายงานด้วยสายพาน (Moving Conveyor) เป็นการเคลื่อนย้ายงานจากสถานีงานหนึ่งไปยังสถานีงานถัดไป โดยใช้สายพานเป็นตัวลำเลียงชิ้นงาน ซึ่งมีทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent) ซึ่งปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อใช้การเคลื่อนย้ายงานด้วยสายพาน คือ

- การไม่มีงานป้อน (Starving) สามารถเกิดขึ้นได้เหมือนกับสายการประกอบที่มีลักษณะการเคลื่อนย้ายงานด้วยมือ

- การมีงานล้นมือ (Congestion) คือมีงานที่ทำไม่เสร็จตามที่กำหนดไว้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากคนงานไม่สามารถทำงานชิ้นนั้นให้เสร็จได้ทัน ชิ้นงานนั้นจึงวิ่งผ่านไปในสภาพที่ไม่สมบูรณ์

- สำหรับปัญหาการไม่มีที่ส่งงาน (Blocking) จะไม่เกิดขึ้นกับลักษณะการย้ายงานแบบนี้

การป้อนผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบสามารถกำหนดช่วงระยะเวลาระหว่างผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นได้จากจุดเริ่มต้นของสายการประกอบ ซึ่งมีหลักปฏิบัติ 2 แบบ คือ

- การป้อนแบบแปรผัน (Variable Rate Launching) คือ การป้อนงานเข้าสู่สายการประกอบโดยมีช่วงเวลาการป้อนที่แปรผันตามเวลาที่ใช้ในการผลิตของ

ผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า ณ สถานีงานแรก นั่นคือทันทีที่สถานีงานแรกว่างเราก็จะป้อนงานต่อไปเข้าสู่สายการประกอบทันที

- การป้อนแบบคงที่ (Fixed Rate Launching) คือ การป้อนงานเข้าสู่สายการประกอบโดยมีช่วงเวลาการป้อนเท่ากันทุกครั้ง ในกรณีการป้อนแบบคงที่นี้จะเหมาะสมกับสายการประกอบที่ใช้สายพานเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ แต่ผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นจากการป้อนแบบคงที่ คือ ถ้าผลิตภัณฑ์ที่ถูกป้อนเข้ามาบนสายการประกอบใช้เวลาผลิตในสถานีงานหนึ่งน้อยกว่าช่วงเวลาป้อนจะทำให้สถานีนั้นมีเวลาว่างงาน แต่ถ้าหากใช้เวลาผลิตในสถานีงานหนึ่งมากกว่าช่วงเวลาป้อนจะทำให้สถานีงานนั้นมีผลิตภัณฑ์รอคิวการผลิตอยู่และถ้ามีผลิตภัณฑ์รอคิวสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ สถานีงานนี้ก็จะกลายเป็นจุดคอขวด (Bottleneck) หรือถ้าใช้สายพานเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นไม่สมบูรณ์ แต่ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขให้ดีขึ้นด้วยการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ (Model Sequencing) อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะจะทำให้ภาระงานมีความสม่ำเสมอและมีความสัมพันธ์กับกำลังการผลิตที่มีอยู่

2.2.3 **สายการประกอบที่แยกประเภทตามลักษณะเวลาทำงานของสถานีงาน**

สายการประกอบที่แยกประเภทตามลักษณะเวลาทำงานของสถานีงาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้ (Becker and Scholl, 2006)

2.2.3.1 **สายการประกอบแบบก้าวเดิน**

สายการประกอบแบบก้าวเดิน (Paced Line) คือ สายการประกอบที่มีการกำหนดรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ให้กับสถานีงานที่มีค่าเท่ากับ CT โดยที่ค่า CT จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเวลาการผลิตที่มากที่สุดเท่านั้น โดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปยังสถานีงานต่างๆ ด้วยระบบสานพานลำเลียงอัตโนมัติและชิ้นงานแต่ละชิ้นที่ผลิตในสถานีงานเดียวกันจะใช้เวลาการผลิตไม่เท่ากัน จึงทำให้ชิ้นงานอาจต้องรอคิวผลิตในสถานีงานถัดไปหรือสถานีงานถัดไปอาจจะมีเวลาว่างเปล่าเพราะต้องรอชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าและบางครั้งอาจได้ชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์ทำให้ต้องนำชิ้นงานไปแก้ไขและเข้าสู่สายการประกอบซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

2.2.3.1 สายการประกอบแบบไม่ก้าวเดิน

สายการประกอบแบบไม่ก้าวเดิน (Unpaced Line) คือ สายการประกอบที่ไม่มีกำหนดรอบเวลาการผลิต การทำงานของแต่ละสถานีงานจะทำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะเสร็จ แล้วจึงส่งชิ้นงานไปยังสถานีงานถัดไป ดังนั้นเวลาทำงานของแต่ละสถานีงานอาจมากกว่าหรือน้อยกว่ารอบเวลาการผลิตก็ได้ ทำให้ Unpaced Line จำเป็นต้องมีพื้นที่รองรับชิ้นงาน (Buffer) ระหว่างการผลิต

2.2.4 สายการประกอบที่แยกประเภทโดยพิจารณาลักษณะของสถานีงาน

สายการประกอบที่แยกประเภทโดยพิจารณาลักษณะของสถานีงาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.2.4.1 สถานีงานแบบปิด

สถานีงานแบบปิด (Closed Station) คือสถานีงานที่แบ่งขอบเขตการทำงานออกจากกันอย่างชัดเจน ดังนั้นคนงานที่อยู่ต่างสถานีงานกันจะไม่สามารถเข้าไปทำงานในเขตสถานีงานอื่นได้ เช่น สถานีงานขัดสี พ่นสี ห้องอบสี เป็นต้น

2.2.4.2 สถานีงานแบบเปิด

สถานีงานแบบเปิด (Open Station) คือสถานีงานที่ไม่แบ่งขอบเขตการทำงานออกจากกันอย่างชัดเจน ดังนั้นคนงานที่อยู่ต่างสถานีงานกันจึงสามารถเข้าไปทำงานในเขตสถานีงานอื่นได้ ซึ่งบางกรณีอาจมีข้อจำกัดในการทำงานร่วมกัน เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนการทำงานซึ่งกันและกัน หรือในบางกรณีอาจไม่มีข้อจำกัดใดๆ เลยก็ได้

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเป็นการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งอาจมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ามากที่สุดหรือค่าน้อยที่สุดก็ได้ ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัด (Constraint) ที่ได้กำหนดไว้ โดยปัญหาดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Optimization Problem) และหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problem) ซึ่งความแตกต่างระหว่างปัญหาทั้งสองแบบนี้ คือ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์เดียวเป็นการค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียว จึงทำให้คำตอบที่ดีที่สุดมีเพียงคำตอบเดียวเท่านั้น แต่สำหรับปัญหาการหาค่า

เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาคำตอบเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กัน จึงเป็นเรื่องยากหรือเป็นไปไม่ได้เลยที่คำตอบที่ดีที่สุดจะมีเพียงคำตอบเดียว เพราะฉะนั้นคำตอบที่ได้จึงเป็นในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Rahimi-Vahed et al., 2007)

สำหรับปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์คณิตศาสตร์ ได้ดังนี้

$$\text{Minimize } y = F(x) = \{f_1(x), f_2(x), ..., f_l(x), ..., f_k(x)\} \; ; \; k > 1 \tag{2.4}$$

โดยที่ $$y \in R^k \text{ และ } x \in \Omega \; ; \; \Omega = \left\{ x \middle| \begin{array}{l} g_i(x) \geq 0; i = 1,2,...,m_1 \\ h_j(x) = 0; j = 1,2,...,m_2 \\ x = [x_1, x_2, ..., x_n]^T \end{array} \right\} \tag{2.5}$$

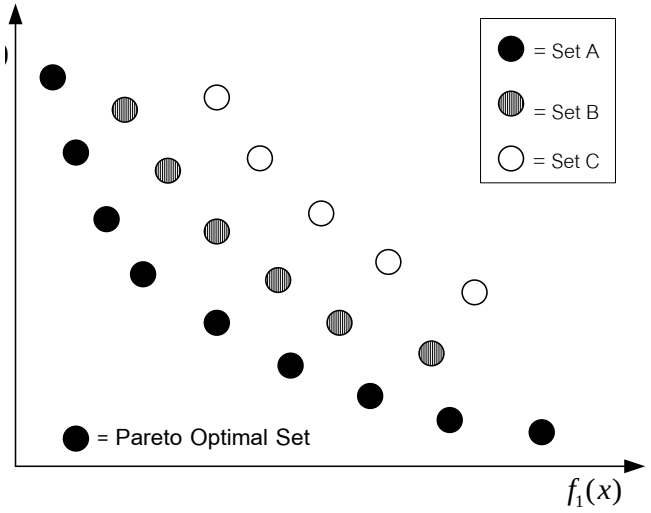
เมื่อ x คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ, $f_l(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์, $g_i(x)$ คือ ฟังก์ชันเงื่อนไขแบบอสมการ และ $h_j(x)$ คือ ฟังก์ชันเงื่อนไขแบบสมการ โดยคำตอบ (y) ที่ไม่ได้อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เรียกว่า คำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Solution) ในทางกลับกันถ้าคำตอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เรียกว่า คำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) และกลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด เรียกว่า บริเวณคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) (Liu et al., 2003)

จากปัญหาการหาค่าน้อยที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ สมมติว่ามีคำตอบที่ค้นพบจากบริเวณคำตอบที่เป็นไปได้ 2 คำตอบ คือ a และ b โดยจะเรียกคำตอบ a ว่าเป็นคำตอบที่เด่นกว่าหรือครอบงำ (Dominate) คำตอบ b ($a \succ b$) ก็ต่อเมื่อทั้งสองเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$f_i(a) \leq f_i(b) \; ; \; \forall_i \in \{1,2,...,k\} \tag{2.6}$$

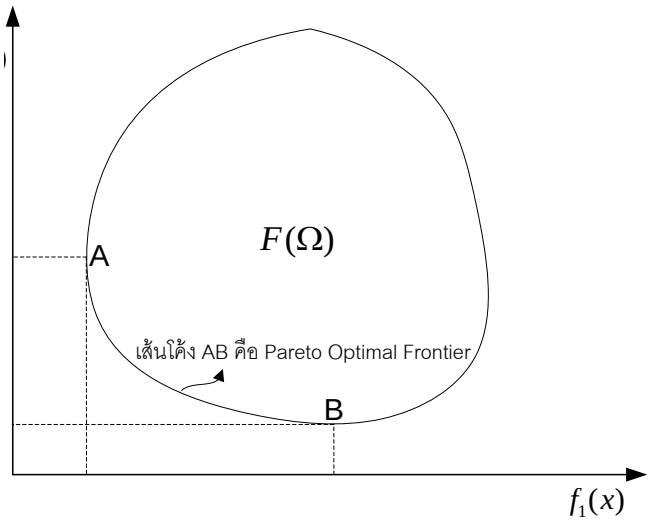
$$\text{และ} \quad f_i(a) < f_i(b) \; ; \; \exists_i \in \{1,2,...,k\} \tag{2.7}$$

โดยคำตอบที่ครอบงำคำตอบอื่นแต่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลยเราเรียกคำตอบนั้นว่า คำตอบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated Solution) หรือคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Solution) และเมื่อนำคำตอบที่ดีที่สุดมารวมกัน เราเรียกว่า กลุ่มคำตอบที่ดีสุด (Pareto Optimal Set) โดยกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดนี้เป็นตัวบอกถึงระดับชั้นที่ดีที่สุดของบริเวณคำตอบที่เป็นไปได้หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) (Rahimi-Vahed et al., 2007)



ภาพที่ 2.10 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

จากภาพที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงการค้นหาคำตอบที่มีเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าน้อยที่สุดของ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กัน โดยมีกลุ่มคำตอบ A ครอบงำกลุ่มคำตอบ B และ C ตามลำดับ หรือ $A \succ B \succ C$



ภาพที่ 2.11 ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

2.4 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังนี้ (1) เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ด้วยระบบสายพานลำเลียงที่มีความเร็วคงที่ (v_c) และมีอัตราการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบคงที่ (γ) (2) สายการประกอบถูกแบ่งออกเป็น n_w สถานีงาน

และเป็นสถานีงานแบบปิด พนักงานจึงต้องทำงานอยู่ภายในขอบเขตของสถานีงานที่กำหนดเท่านั้น (3) สายการประกอบมีการจัดความสมดุลเรียบร้อยแล้ว (4) ไม่คำนึงถึงเวลาการเดินของพนักงานในระหว่างการประกอบผลิตภัณฑ์ (5) การเริ่มทำงานของพนักงานที่อยู่ในคู่สถานีงานเดียวกันจะเริ่มทำงานพร้อมกันและเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อพนักงานที่มีภาระงานมากกว่าทำงานเสร็จ (6) ในหนึ่งรอบการผลิตจะมีผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ตามสัดส่วน MPS (7) การคำนวณหาช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ (Launch Interval : γ) และระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงาน (w) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Rahimi-Vahed et al., 2007)

$$\gamma = T/(I \times N_m) \tag{2.8}$$

$$T = \sum_{n_m=1}^{N_m} \max\left(\sum_{m=1}^{M} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\right) d_m, \sum_{m=1}^{M} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\right) d_m \right) \tag{2.9}$$

$$I = \sum_{m=1}^{M} d_m \tag{2.10}$$

$$w = \gamma v_c \tag{2.11}$$

เมื่อ T คือ เวลาการผลิตทั้งหมดในหนึ่งรอบการผลิต, I คือ จำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมดในหนึ่งรอบการผลิต, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด และ M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

2.4.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

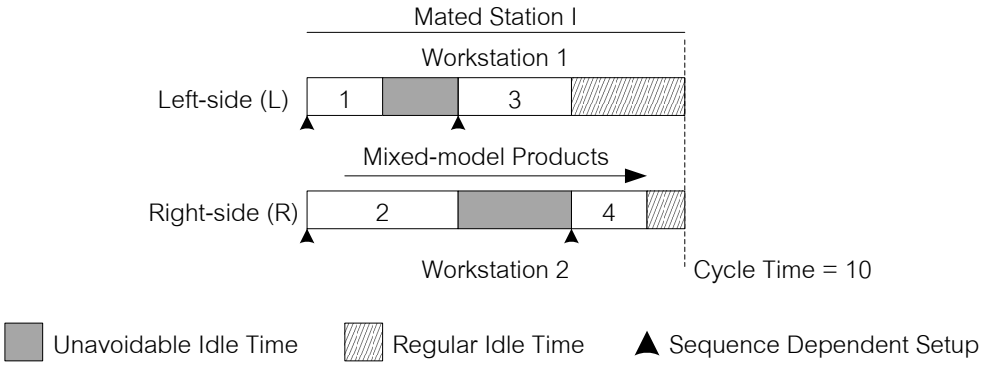
การจัดลำดับการผลิตเข้าสู่สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านของงานวิจัยนี้ต้องการตอบสนองฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชัน คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องที่น้อยสุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด (Hyun et al., 1998) โดยผู้วิจัยได้แสดงสมการและตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองไว้ในหัวย่อยต่อไปนี้

2.4.1.1 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรที่น้อยที่สุด

การพิจารณาค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรที่ขึ้นอยู่กับชนิดผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า (Sequence Dependent Setup Cost) เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \;\; f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{2.12}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ K คือ ขั้นงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ โดยสามารถแสดงตัวอย่างการเกิดการปรับตั้งเครื่องจักรได้ดังรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2.12 การเกิดการปรับตั้งเครื่องจักร

โดยค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรสามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณได้ดังนี้ (1) กำหนดลักษณะของสายการประกอบที่จะใช้ในการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ โดยในที่นี้พิจารณาสายการประกอบจากภาพที่ 2.12 (2) กำหนดลำดับการผลิต (Model Sequence) ที่จะนำเข้าสู่สายการประกอบ โดยในที่นี้กำหนดให้ลำดับการผลิตประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด และมี MPS=1:1:1 โดยสมมติให้ลำดับการผลิต คือ ABC (3) สมมติให้เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด และค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรที่ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ก่อนหน้ามีค่าดังตารางที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.3 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

ขั้นงาน	ผลิตภัณฑ์		
	A	B	C
1	3	2	1
2	0	3	4
3	4	1	0
4	0	0	3

ตารางที่ 2.4 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

From/To	A	B	C
A	0	7.1	9.5
B	7.3	0	9.8
C	7.6	8.1	0

จากนั้นเริ่มคำนวณค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องของแต่ละขั้นงาน โดยเริ่มจากขั้นงานที่ 1 ไปจนถึงขั้นงานสุดท้าย ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 2.5 การคำนวณค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง

ขั้นงาน	ลำดับการผลิต			ค่าใช้จ่าย
1	A	B	C	[7.6+7.1+9.8]=24.5
2	B	C	-	[8.1+9.8]=17.9
3	A	B	-	[7.3+7.1]=14.4
4	A	C	-	[7.6+9.5]=17.1
รวม				73.9

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องทั้งหมดของลำดับการผลิต ABC มีค่าเท่ากับ 73.9 หน่วย

2.4.1.2 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

การหาปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จที่น้อยที่สุด (Utility Work) เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยสร้างความสมดุลระหว่างปริมาณงานกับพนักงานและช่วยให้สามารถจัดการจำนวนพนักงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \;\; f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_m} \left(\sum_{i=1}^{I} U_{i,n_m} + Z_{I+1,n_m} / v_c \right) \qquad (2.13)$$

โดยที่

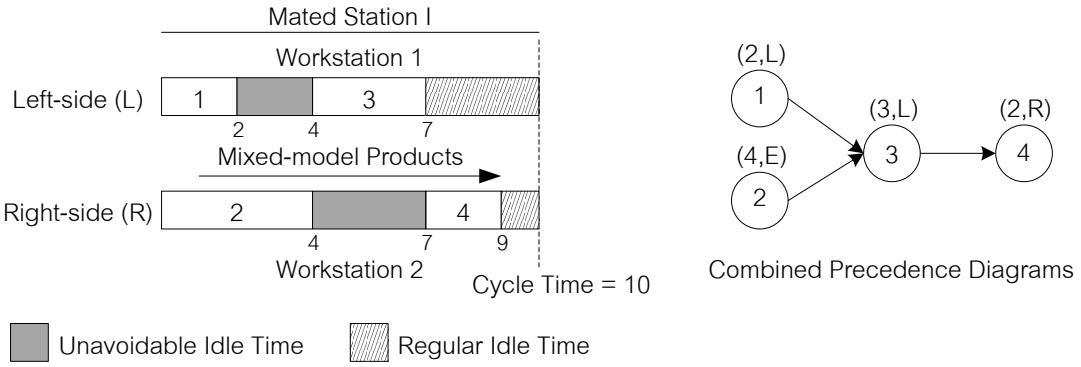
$$U_{i,n_m} = \begin{bmatrix} \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\right) - L_{n_m}\right)/v_c\right] + \\ \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\right) - L_{n_m}\right)/v_c\right] \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$Z_{i+1,n_m} = \max\begin{bmatrix} \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right] \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w} = v_c \times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

ตารางที่ 2.6 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

ขั้นงาน (k)	ผลิตภัณฑ์			เวลาเฉลี่ย $(\overline{p}_k)$
	A	B	C	
1	3	2	1	2
2	5	3	4	4
3	4	1	4	3
4	2	1	3	2



ภาพที่ 2.13 สายการประกอบแบบสองด้านและลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

โดยตัวอย่างการคำนวณปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จจะเริ่มจากการเตรียมข้อมูลนำเข้า คือ กำหนดให้เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าดังตารางที่ 2.6 สายการประกอบที่จะใช้ในการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ โดยในที่นี้พิจารณาสายการประกอบจากภาพที่ 2.13 ซึ่งมีจำนวนคู่สถานีงาน (n_m) เท่ากับ 1 คู่ ที่ประกอบด้วยสถานีงานที่ 1 และ 2 โดยในแต่ละสถานีงานมีความยาว (L_{n_w}) เท่ากับ 10 หน่วย และลำดับการผลิต (Model Sequence) ที่จะนำเข้าสู่สายการประกอบ โดยในที่นี้กำหนดให้ลำดับการผลิตประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด และมี MPS=1:1:1 โดยสมมติให้ลำดับการผลิต คือ ABC เมื่อมีข้อมูลครบแล้ว จึงเริ่มแทนค่าลงในสูตรย่อยต่างๆ เพื่อหาค่า ($t_{n_w,m} + Y_{n_w,m}$) และ (γ_c) ดังนี้

(1) หาเวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m ของสายการประกอบแบบสองด้าน ($t_{n_w,m} + Y_{n_w,m}$) โดยตัวอย่างการหาเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A B และ C ที่ใช้ในสถานีงาน 1 และ 2 ได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.1.2 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 2.7 เวลาดำเนินงานในคู่สถานีงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิดและความยาวสถานีงาน

คู่สถานีงาน (n_m)	สถานีงาน (n_w)	ผลิตภัณฑ์			ความยาวสถานีงาน (L_{n_w})
		A	B	C	
1	1	9	4	8	10
	2	11	5	11	10

(2) หาระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงาน (γ_c) ให้กับลำดับการผลิต [ABC] โดยทราบว่ามีความต้องการผลิตภัณฑ์ A B และ C อย่างละ 1 หน่วย เพราะฉะนั้นความ

ต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (I) จึงเท่ากับ $\sum_{m=1}^{3} d_m$ = 1+1+1 = 3 หน่วย และเวลาที่ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (T) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T = \sum_{n_m=1}^{N_m} \max\left(\sum_{m=1}^{M} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\right) d_m, \sum_{m=1}^{M} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\right) d_m \right)$$

$$T = \max\left(\sum_{m=1}^{3} \left(t_{1,m} + Y_{1,m}\right) d_m, \sum_{m=1}^{3} \left(t_{2,m} + Y_{2,m}\right) d_m \right)$$

$$T = \max\left((9\times1)+(4\times1)+(8\times1),(11\times1)+(5\times1)+(11\times1)\right)$$

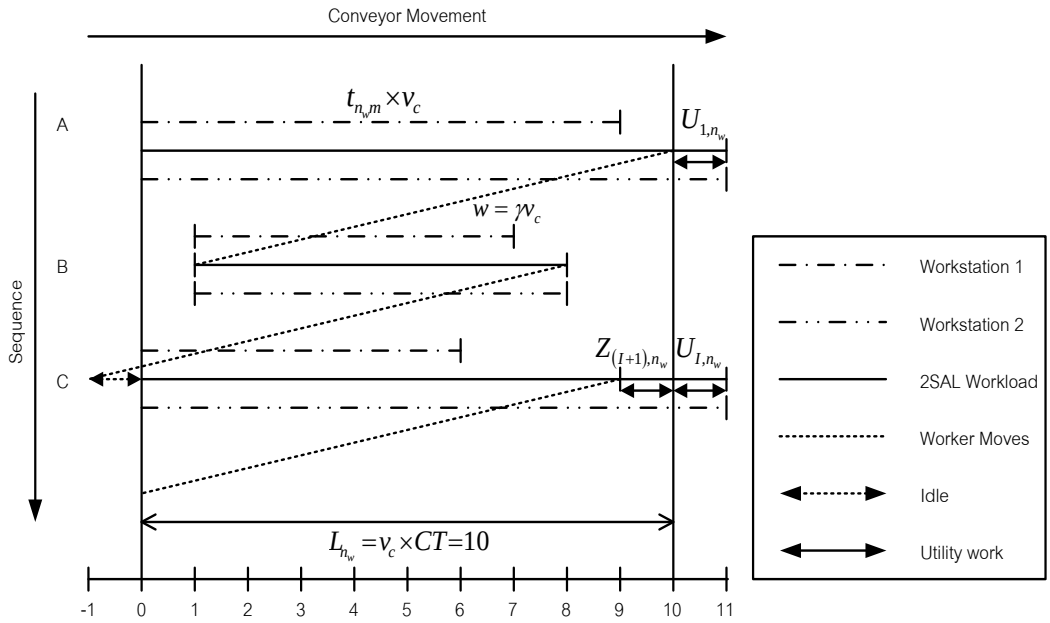
$$T = \max(21,27) \quad \therefore T = 27 \text{ หน่วย}$$

ขั้นตอนต่อไปนำค่าทั้งสองที่ได้มาคำนวณหาช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายพานการผลิต (γ) ได้ค่าเท่ากับ $T/(D_T \times n_m)$ = 27/(3x1) = 9 หน่วย ดังนั้นจึงได้ค่าระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงานเท่ากับ γv_c = 9x1 = 9 หน่วย

จากนั้นจึงนำค่า ($t_{n_w,m} + Y_{n_w,m}$) และ (γv_c) แทนลงในสมการ Z_{i+1,n_m} , U_{i,n_m} และ $f_2(x)$ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างผลการคำนวณหาค่า Utility Work ของคู่สถานีงานที่ 1

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	Z_{i+1,n_m} และ U_{i,n_m}
1	A	$Z_{(i+1)n_m}$ = max(0,min(0+9-9,10-9),min(0+11-9,10-9)) = 1
		U_{in_m} = max(0,0+9-10)+max(0,0+11-10) = 1
2	B	$Z_{(i+1)n_m}$ = max(0,min(1+4-9,10-9),min(1+5-9,10-9)) = 0
		U_{in_m} = max(0,1+4-10)+max(0,1+5-10) = 0
3	C	$Z_{(i+1)n_m}$ = max(0,min(0+8-9,10-9),min(0+11-9,10-9)) = 1
		U_{in_m} = max(0,0+8-10)+max(0,0+11-10) = 1
$\therefore f_2(x) = \sum_{i=1}^{3} U_{i,1} + Z_{4,1}/v_c$ = 2+1 = 3		



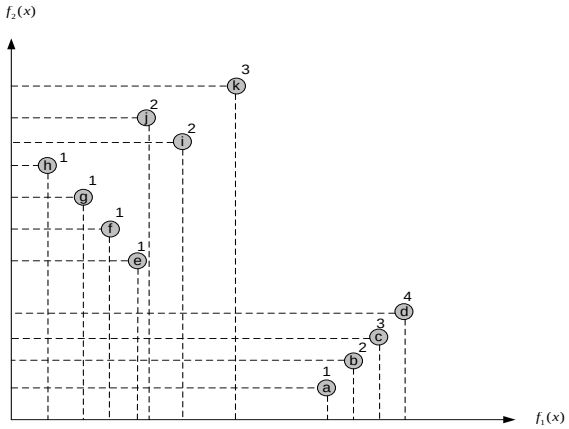
ภาพที่ 2.14 การเกิด Utility Work ในคู่สถานีงาน

จากภาพที่ 2.14 ทำให้ทราบว่าปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของคู่สถานีงานหนึ่งเกิดขึ้นจากงานที่เกินขอบเขตสถานีงานที่กำหนดบวกกับเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ $I+1$ โดยสาเหตุที่ต้องนำเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ $I+1$ มารวมด้วย เนื่องจากการเริ่มทำงานแรกของรอบการผลิตถัดไปจะเริ่มทำงานที่ต้นสถานีงานเสมอ

2.5 การกำหนดค่าความแข็งแรง

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์นั้น มีเป้าหมายเพื่อให้ได้ขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และมีลักษณะรูปแบบการกระจายของเซตคำตอบบนขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดแบบสม่ำเสมอ ซึ่งการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับคำตอบสามารถทำให้บรรลุเป้าหมายในข้อแรกได้ โดยกระบวนการกำหนดค่าความแข็งแรงเริ่มขึ้นหลังจากที่ได้คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สนใจศึกษาเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำคำตอบไปจัดลำดับเพื่อกำหนดค่าความแข็งแรง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting ที่ถูกคิดค้นขึ้นโดย Goldberg (1989) วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับคำตอบจากค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับจากคำตอบที่ค่าความแข็งแรงสูงที่สุด (อันดับที่ 1) หรือเรียกว่า Front ที่ 1 จนถึงคำตอบตัวที่มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด (อันดับสุดท้าย) ซึ่งผลที่ได้จากการจัดอันดับ คือ ได้ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Frontier) ไปจนถึงขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่แย่ที่สุด โดยที่เซตคำตอบหรือสมาชิก

คำตอบที่เด่นกว่าคำตอบอื่นๆ จะถูกจัดให้อยู่ในอันดับที่หนึ่งและจะถูกตัดออกจากประชากรคำตอบทั้งหมด และเซตคำตอบที่เหลือจะถูกพิจารณาจัดให้อยู่ในอันดับถัดไป โดยกระบวนการจัดอันดับแบบ Goldberg นี้จะทำการจัดอันดับต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งครบจำนวนคำตอบทั้งหมด ดังรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2.15 วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (นพพล คำภิรมย์, 2551)

2.6 การกำหนดความหนาแน่น

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์นั้น มีเป้าหมายเพื่อให้ได้ขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และมีลักษณะรูปแบบการกระจายของเซตคำตอบบนขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดแบบสม่ำเสมอ ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้บรรลุเป้าหมายในข้อแรกนั้นได้กล่าวในหัวข้อก่อนหน้านี้ไปแล้ว ในหัวข้อนี้จึงเป็นวิธีการบรรลุเป้าหมายข้อที่สองด้วยวิธีการสร้างความหลากหลายให้กับคำตอบหรือเรียกว่า การแบ่งปันค่าความแข็งแรง ซึ่งวิธีการแบ่งปันค่าความแข็งแรงนี้เป็นการลดค่าความแข็งแรงของคำตอบที่เกาะกลุ่มกันอยู่ เพื่อป้องกันการเกาะกลุ่มของคำตอบที่อยู่ในขอบเขตคำตอบเดียวกัน ในปัจจุบันได้มีผู้คิดค้นวิธีการแบ่งปันค่าความแข็งแรงหลายแบบหลายวิธีแตกต่างกันออกไป แต่วิธีที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ คือ วิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002) ซึ่งเป็นการคำนวณหาระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ในขอบเขตคำตอบเดียวกัน หรือระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ในอันดับเดียวกัน หรือระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ใน front เดียวกันเท่านั้น โดยวิธี Crowding Distance มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

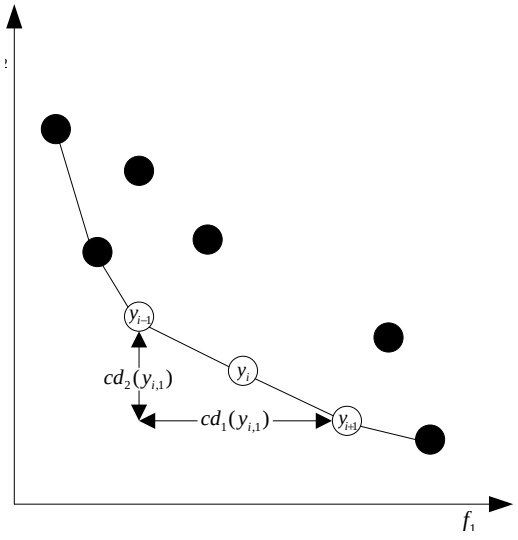
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้ l แทนจำนวนประชากรสตริงคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบอันดับที่ J เมื่อ $J \in I^+$ และ $f_k^{\min}$, $f_k^{\max}$ คือค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k จากนั้นจึงกำหนดค่าความหนาแน่นเริ่มต้นเท่ากับ 0 ให้กับทุกสตริงคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบอันดับที่ J ($CD(y_i)=0$; $\forall_i = 1,2,...,l$)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการเรียงลำดับ y_i โดยเรียงลำดับตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ; $k = 1,2$ จากค่าน้อยไปหาค่ามาก จากนั้นจึงกำหนดให้สตริงคำตอบที่อยู่ในลำดับที่ 1 และลำดับที่ l มีค่าความหนาแน่นเท่ากับค่าอนันต์ ($cd_k(y_{1,k}) = \infty$ และ $cd_k(y_{l,k}) = \infty$) และจึงคำนวณหาค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบที่อยู่ในลำดับที่ 2 ถึง $l-1$ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$cd_k(y_{i,k}) = \frac{f_k(y_{i+1,k}) - f_k(y_{i-1,k})}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \tag{2.16}$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าความหนาแน่นของ y_i โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$cd(y_i) = \sum_{k=1}^{K} cd_k(y_{i,k}) \tag{2.17}$$

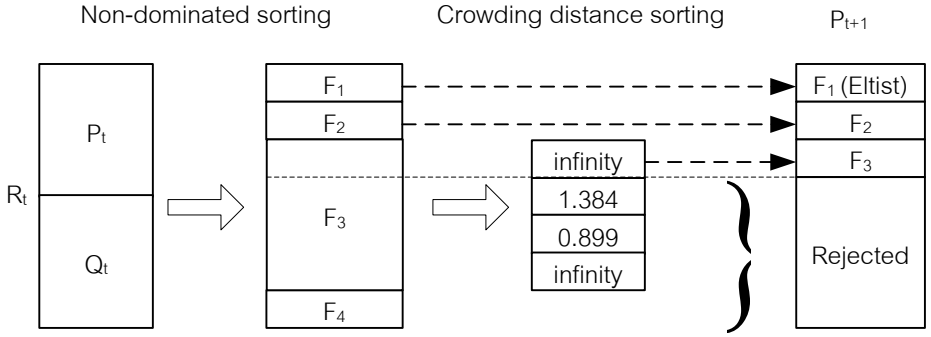


ภาพที่ 2.16 การแบ่งปันค่าความแข็งแรงแบบ Crowding Distance

2.7 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดและการเก็บสตริงคำตอบสำหรับรอบการทำงานถัดไป

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้ และป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีไปหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การครอสโอเวอร์และการมิวเตชัน ซึ่งอาจทำให้เกิดคำตอบที่แย่กว่าหรือดีกว่าคำตอบที่เคยปรากฏในเจนเนอเรชันที่ผ่านมา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเก็บค่าที่ดีที่สุดเอาไว้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่จะเกิดขึ้นในเจนเนอเรชันถัดไปและทำการเก็บค่าคำตอบที่ได้จาก Non-dominated Solution โดยให้ความสำคัญกับสตริงคำตอบที่มีอันดับต่ำสุด (ค่า Dummy Fitness น้อยสุด) และมีค่า Crowding Distance มากสุดก่อน หลังจากนั้นจึงทำการปรับปรุงสตริงคำตอบในบริเวณที่เก็บค่าที่ดีที่สุดด้วยการย้ายสตริง

คำตอบที่ดีที่สุดตัวเดิมที่แย่กว่าตัวใหม่ออกไปและเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวใหม่ที่ดีว่าตัวเดิมเข้าไป ดังรูปต่อไปนี้ (Deb et al., 2002)



ภาพที่ 2.17 วิธีการเก็บค่าที่ดีที่สุด

โดยกำหนดให้ P_t แทน สตริงคำตอบเริ่มต้นหรือสตริงคำตอบพ่อแม่

O_t แทน สตริงคำตอบลูก

R_t แทน การรวมกันของสตริงคำตอบพ่อแม่และสตริงคำตอบลูก

P_{t+1} แทน สตริงคำตอบสำหรับรอบการทำงานถัดไป

F_j แทน แทนกลุ่มคำตอบอันดับที่ j ; $j = \{1,2,...,J\}$

Elitist แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับรอบการทำงานปัจจุบัน

2.8 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบ คือการประเมินประสิทธิภาพของคำตอบที่ค้นหาพบเพื่อหากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยกลุ่มคำตอบที่ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) และมีลักษณะการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงโดยใช้วิธีการประมาณจากการนำกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของทุกอัลกอริทึมมารวมกัน และใช้หลักการ Pareto Optimal ในการคัดเลือกคำตอบเพื่อสร้างเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ดังนั้นการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจึงเป็นการวัดสมรรถนะหรือประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด 4 ตัว คือ ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ตัวชี้วัดด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง และเวลาการค้นหาคำตอบ

2.8.1 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันกลุ่มคำตอบที่แท้จริงและถือได้ว่าอัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูง (นพพล คำภิรมย์, 2551) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Convergence = \frac{1}{\left|S^*\right|}\sum_{y\in S*}\min\left\{d_{xy} \mid x \in S_j\right\} \tag{2.18}$$

เมื่อ $$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right)^2} \tag{2.19}$$

โดยที่ S_j แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกลุ่มที่ j เมื่อ $j = 1,2,...,J$

S^* แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

$\left|S^*\right|$ แทน จำนวนสมาชิกคำตอบในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

d_{xy} แทน ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ x กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง y

$f_i^{\max}$ และ $f_i^{\min}$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

$f_i(x)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่ค้นพบ

$f_i(y)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

2.8.2 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) เป็นการวัดการกระจายของสมาชิกคำตอบที่อยู่ภายในขอบเขตกลุ่มคำตอบเดียวกัน ถ้าตัวตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีการกระจายสม่ำเสมอ (Deb et al., 2002) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1}\left|d_i - \bar{d}\right|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (2.20)$$

โดยที่ d_f และ d_l แทน ระยะห่างระหว่างคำตอบปลายสุดทั้งสองด้านของเส้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

$\bar{d}$ แทน ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i แทน ระยะห่างระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ เมื่อ $i = 1,2,...,N-1$

N แทน จำนวนสมาชิกในกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

2.8.3 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (Ratio of Pareto-Optimal Solution) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบนั้นมีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและถือได้ว่าอัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูง (Chutima and Pinkoompee, 2009) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$R_{POS}(P_j) = \frac{\left|P_j - \left\{x \in P_j \mid \exists y \in P : y \prec x\right\}\right|}{\left|P_j\right|} \quad (2.21)$$

โดยที่ P_j แทน เซตคำตอบที่ j เมื่อ $j = 1,2,...,J$

P แทน การรวมกันของเซตคำตอบทั้งหมด j เซต โดยที่ $P = P_1 \cup P_2 .. \cup P_J$

x แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ

y แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

$y \succ x$ แทน กลุ่มคำตอบ x ถูกครอบงำด้วยกลุ่มคำตอบ y

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้สำรวจและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบเส้นตรง
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมและการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบเส้นตรง

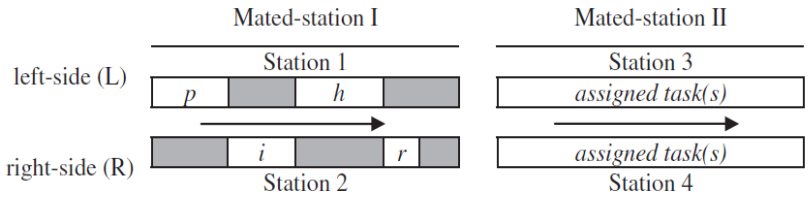
Becker และ Scholl (2006) ได้อธิบายลักษณะของสายการประกอบที่มีลักษณะต่างๆ ทั้งสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์และสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม และได้อธิบายสายการประกอบที่แบ่งประเภทตามการเคลื่อนที่ของพนักงาน คือ สายการประกอบแบบก้าวเดิน (Pace Line) กับสายการประกอบแบบไม่ก้าวเดิน (Unpace Line) หรือสายการประกอบแบบมีพื้นที่พักชิ้นงาน (Buffered Line)

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวกับสายการประกอบแบบสองด้าน ทำให้เรามีความรู้และความเข้าใจสายการประกอบแบบสองด้านมากยิ่งขึ้น เช่น สายการประกอบแบบสองด้านกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีปริมาณการผลิตสูง เช่น รถบัส รถบรรทุก รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ตู้เย็น ตู้อบ และเครื่องซักผ้า โดยสายการประกอบแบบสองด้านจะมีสายพานลำเลียงผลิตภัณฑ์อยู่ตรงกลางระหว่างสถานีด้านซ้ายและด้านขวา โดยสถานีงานที่อยู่ตรงข้ามกัน เรียกว่า คู่สถานีงาน (Mated Station) สายการประกอบแบบสองด้านได้แบ่งขั้นงานที่จัดสรรลงในสายการประกอบออกเป็น 3 ประเภท คือ ขั้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านซ้ายเท่านั้น (Left-Type : L) ขั้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบด้านขวาเท่านั้น (Right-Type : R) และขั้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสายการประกอบได้ทั้งสองด้าน (Either-Type : E) เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์กำหนดให้ขั้นงานการประกอบพวงมาลัยรถยนต์ที่ขายในประเทศไทยเป็นแบบ R ส่วนขั้นงานการประกอบหม้อกรองอากาศให้เป็นแบบ L และขั้นงานการ

ประกอบกันชนเป็นแบบ E เป็นต้น จากลักษณะดังกล่าวทำให้สายการประกอบแบบสองด้านมีข้อดีกว่าแบบด้านเดียว คือ ใช้พื้นที่การผลิตน้อยกว่า ช่วยลดระยะทางการเคลื่อนที่ของพนักงาน ช่วยลดค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง และช่วยลดต้นทุนด้านเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ในคู่สถานีงานเดียวกัน (Kim et al., 2000, Lee et al., 2001, Baykasoglu and Dereli, 2008, Kim, 2009, Özcan and Toklu, 2010)

- Ozcan และ Toklu (2010) ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านที่เวลาปรับตั้งเครื่องขึ้นอยู่กับลำดับผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า โดยวิธีที่นำมาแก้ปัญหานี้คือ mixed integer program (MIP) และ 2-COMSOAL/S ในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงสายการประกอบที่ได้เลือกมาศึกษาไว้พอสังเขปดังนี้ สายการประกอบที่ศึกษา คือสายการประกอบแบบสองด้าน ซึ่งมีลักษณะเด่นคือมีสถานีงานที่มีหน้าที่แตกต่างกันอยู่ทั้งสองด้านของสายการประกอบ และการจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีต่างๆ นั้นจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไข 2 ข้อด้วยกัน คือ เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานแต่ละด้านของสายการประกอบและเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อนหลัง



ภาพที่ 2.18 สายการประกอบแบบสองด้าน

จึงทำให้สายการประกอบแบบสองด้านมีสิ่งที่แตกต่างไปจากสายการประกอบแบบเส้นตรงธรรมดา คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ (Unavoidable Idle Time) ที่เกิดขึ้นในสถานีงานเนื่องจากเงื่อนไขลำดับงานก่อนหลัง (Precedence Constraint) ตัวอย่างเช่น สมมติให้งาน p และงาน h ต้องถูกจัดสรรลงในสถานีงานที่ 1 เท่านั้น และงาน i กับงาน r ต้องถูกจัดสรรลงในสถานีงานที่ 2 เท่านั้น และมีเงื่อนไขการผลิตว่างาน p ต้องทำเสร็จก่อนถึงจะเริ่มงาน i และ h ได้ และงาน i ต้องทำเสร็จก่อนถึงจะเริ่มงาน h และ r ได้ ดังนั้นด้วยเงื่อนไขทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจึงทำให้เกิดเวลาเดินเปล่าขึ้น (บริเวณที่แรงเงาในรูปด้านบน) เพราะฉะนั้นเวลาดำเนินงานที่แท้จริงของแต่ละสถานีงานจึงเท่ากับเวลาดำเนินงานของทุกขั้นงานที่อยู่ในสถานีงานเดียวกันบวกกับเวลาเดินเปล่าที่เกิดขึ้นในสถานีงานนั้น จากลักษณะของสายการประกอบแบบสอง

ด้านที่ได้กล่าวมาทำให้สายการประกอบแบบสองด้านมีข้อดีกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรงทั่วไป คือ 1. สายการประกอบมีความยาวน้อยกว่า 2. ช่วยลดความสูญเปล่า เช่น ระยะการเคลื่อนที่ของพนักงานสั้นลง เวลาปรับตั้งเครื่องและเวลาผลิตสั้นลง เป็นต้น 3. ช่วยลดต้นทุนจากการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่คู่สถานีงานเดียวกันสามารถใช้ร่วมกันได้

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมและการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

- Yano และ Rachamadugu (1991) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดลำดับบนสายการประกอบแบบก้าวเดิน (Pace assembly line) ที่มีหลายผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบปะปนกันไป โดยมีวัตถุประสงค์ของการจัดลำดับการผลิต คือ หาปริมาณงานเกินกำลังผลิตน้อยที่สุด (Minimize Work Overload) โดยประโยชน์ที่ได้จากการใช้วัตถุประสงค์นี้เป็นตัววัดสมรรถนะการจัดลำดับ คือ สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านคนงานได้เพราะการจัดสำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบอย่างมีประสิทธิภาพทำให้ปริมาณงานมีความสัมพันธ์กับแรงงานที่มีอยู่

- Tsai (1995) ได้เสนองานงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ที่ต้องการหาค่าปริมาณที่งานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด (Minimize Utility Work) และความเสี่ยงที่สายการประกอบต้องหยุดทำงานน้อยที่สุด (Minimize the Risk of Conveyor Stoppage) และได้พิสูจน์ว่าปัญหาการจัดลำดับการผลิตเป็นปัญหาแบบ NP-hard

- Hyun (1998) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่ต้องการบรรลุวัตถุประสงค์พร้อมกันหลายวัตถุประสงค์ด้วยการนำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมมาพัฒนากระบวนการค้นหาตอบให้ดีขึ้นโดยเรียกอัลกอริทึมที่พัฒนานี้ว่า Pareto Stratum-Niche Cubic genetic algorithm(PS-NC) และนำ PS-NC มาประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งวัตถุประสงค์การจัดลำดับการผลิตที่พิจารณามี 3 วัตถุประสงค์ คือ ความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ผลรวมของปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุดและผลรวมค่าใช้จ่ายปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ PS-NC กับ Vector Evaluated Genetic Algorithm(VEGA), Pareto genetic

algorithm(PGA) และ Niched Pareto Genetic Algorithm(NPGA) โดยวัดประสิทธิภาพอัลกอริทึมจากคุณภาพและความหลากหลายของคำตอบที่ได้ ผลสรุปงานวิจัยคือ PS-NC มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอทึมที่นำมาเปรียบเทียบทั้งหมด

- McMullen (2001) ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตในระบบการผลิตทันเวลาพอดี (Just In Time : JIT) ด้วยวิธีฮิวริกติก 3 วิธีด้วยกัน ได้แก่ เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA), ซิมูแลท แอนเนลลิ่ง(Simulated Annealing : SA) และทาบู เซิส (Tabu Search : TA) โดยปัญหาการจัดลำดับการผลิตนี้มีวัตถุประสงค์ที่สนใจ 2 วัตถุประสงค์ คือ ระบบการผลิตมีความยืดหยุ่นสูงสุดและการปรับตั้งเครื่องน้อยสุด และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีฮิวริกติก 3 วิธี ดังนี้ 1.ในกรณีปัญหาขนาดเล็กได้ผลสรุปคือวิธีฮิวริกติกทั้ง 3 วิธี มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบได้ดีใกล้เคียงกัน 2.ในกรณีปัญหาขนาดใหญ่ได้ผลสรุปคือการหาคำตอบด้วยวิธี GA มีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี SA และ วิธี TS

- Mansouri (2005) เสนอวิธีการเจนเนติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm : MOGA) ในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just in time : JIT) วัตถุประสงค์ คือ จำนวนปรับตั้งเครื่องน้อยสุดและความแปรผันของอัตราการผลิตน้อยสุด สิ่งที่ยากคือการหาค่าวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมทั้งสองไปพร้อมๆ กันและปัญหาการจัดลำดับเป็นปัญหาแบบ NP-hard การหาคำตอบสามารถใช้ได้ทั้งวิธี IP/LP หรือ วิธีการหาคำตอบแบบสมบูรณ์ (Total Enumeration : TE) ซึ่งการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมจะใช้เวลานานมากจึงไปนิยมใช้วิธี MOGA ใช้ non-dominated frontier จัดกลุ่มคำตอบที่เกิดจากวัตถุประสงค์ทั้งสองที่ต้องการหาค่าน้อยที่สุดไปพร้อมกัน การเปรียบประสิทธิภาพของ MOGA จะทำการเปรียบเทียบดังนี้ คือ เปรียบเทียบกับ TE ในกรณีปัญหาขนาดเล็ก และเปรียบเทียบกับ 3 อัลกอริทึม ได้แก่ Tabu Search (TS), Simulated Annealing (SA), Genetic Algorithm (GA) ในกรณีปัญหาขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบคือ MOGA มีประสิทธิภาพสูงกว่า TE มาก ที่เห็นได้ชัดเจนคือใช้เวลาคำนวณน้อยกว่ามาก MOGA มีประสิทธิภาพดีว่า TS, SA และGA ทั้งเรื่องของคุณภาพที่ดีกว่าและได้คำตอบที่หลากหลายมากว่า สุดท้ายในงานวิจัยนี้ได้แนะนำแนวทางงานวิจัยในอนาคตว่าควรปรับปรุง MOGA ให้ดียิ่งขึ้นและเลือกพิจารณาวัตถุประสงค์อื่นๆ ที่สำคัญสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ผสม เช่น ความยาวสายการผลิตน้อยสุด

ปริมาณงานที่เกินกำลังการผลิตน้อยสุด และความเสี่ยงที่สายการประกอบต้องหยุดน้อยสุด เป็นต้น

- Konak และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเจนเนติกอัลกอริทึมที่นำมาใช้หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกันหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งมีความยากตรงที่การหาคำตอบที่ดีที่สุดจากวัตถุประสงค์หนึ่งนั้นอาจไม่ดีที่สุดสำหรับวัตถุประสงค์อื่นอีกหลายวัตถุประสงค์ เพราะบางวัตถุประสงค์ก็มีความสอดคล้องกันคำตอบที่ออกมาก็จะแปรผันตามกัน แต่บางวัตถุประสงค์นั้นขัดแย้งกับวัตถุประสงค์อื่น ด้วยเหตุผลนี้เองที่ทำให้การตัดสินใจเลือกคำตอบที่ดีที่สุดพร้อมกันหลายวัตถุประสงค์ทำได้ยาก งานวิจัยนี้จึงได้รวมรวบเจนเนติกอัลกอริทึมที่มีการปรับปรุงและพัฒนากลไกการหาคำตอบให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้และหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ และที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับเจนเนติกอัลกอริทึมสำหรับหลายวัตถุประสงค์เป็นจำนวนมากและได้ทดสอบประสิทธิภาพโดยนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆมากมาย เจนเนติกอัลกอริทึมจึงเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ เช่น Vector Evaluated GA(VEGA),Multi-objective Genetic Algorithm(MOGA), Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA), Nondominated Sorting Genetic Algorithm(NSGA) และ Fast Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) เป็นต้น

- Kara และคณะ (2007) ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและการจัดลำดับบนสายการผลิตแบบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ที่ต้องการหาคำตอบของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ ค่าความผันแปรของภาระงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (ADW) ความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ (TU) และต้นทุนรวมจากการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด (TS) และนำวิธีฮิวริสติกแบบซิมูเลทแอนนีลลิ่ง (Simulated Annealing) มาหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลกับปัญหาการจัดลำดับ และหาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสาม ซึ่งพบว่า ADW แปรผันตาม TU, ADW แปรผกผันกับ TS และ TS แปรผกผันกับ TU

- เพ็ญพักตร์ ปิ่นกุมภีร์ (2551) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยเลือกพิจารณาวัตถุประสงค์การจัดลำดับที่ตอบสนองกับกระบวนการผลิตดังกล่าว คือ เวลาปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุดและความผันแปรในการผลิตน้อยที่สุด ใน

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multiple-Objective Evolutionaly) ที่มีชื่อว่า เมมเมติกอัลกอริทึม (Memetic Algorithm) และนำไปเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมเก่า 2 อัลกอริทึม ผลสรุปงานวิจัยคือวิธีเมมเมติกอัลกรทึมเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบ

- นายนพพล คำภิรมย์ (2551) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยวัตถุประสงค์ของการจัดลำดับ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด (Minimize Setup Time) และความผันแปรของภาระงานในระบบการผลิตน้อยที่สุด (Minimize Absolute Deviation of Workload) ในงานวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบอัลกอริทึมโดยใช้ตัววัดสมรรถนะกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด 3 ตัว คือ ตัววัดสมรรถนะในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measurement) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution)

2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

- Liao และคณะ (2007) เสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดตารางในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop) โดยการใช้แนวความคิดของการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) มาประยุกต์กับปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน ซึ่งได้นำเสนอวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization : DPSO) มาประยุกต์ใช้และมีการเปรียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมอื่น คือ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคต่อเนื่อง (Continuous Particle Swarm Optimization) และวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (GA) ผลสรุปการเปรียบเทียบที่ได้คือ การประยุกต์ใช้ DPSO สำหรับปัญหาการจัดตารางในระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนมีประสิทธิภาพมากกว่าอัลกอริทึมทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบ และสุดท้ายผู้ทำวิจัยได้แนะนำให้เพิ่มขบวนการค้นหาเฉพาะ (Local Search) ในอัลกอริทึม จึงเรียกว่า DPSO-LS ผลที่ได้คือได้คำตอบที่ดีกว่าเดิมแต่ใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่า

2.9.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

- Simon (2008) ได้นำเสนอแนวคิดและวิธีการทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization : BBO) ที่นำมาประยุกต์กับปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดโดยพัฒนามาจากหลักการการกระจายของสปีชี่ส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่อธิบายถึงวิธีการอพยพของสปีชี่ส์จากเกาะหนึ่งไปยังเกาะอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดสปีชี่ส์ใหม่และการสูญพันธ์ของสปีชี่ส์ โดยเกาะ (Island) หมายถึงถิ่นที่อยู่อาศัยของสปีชี่ส์ที่ถูกแยกออกจากถิ่นที่อยู่อาศัยอื่นด้วยน้ำ โดยเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์เหมาะกับการอยู่อาศัยจะมีจำนวนสปีชี่ส์อาศัยอยู่มาก (สปีชีส์เคาท์สูง) จึงกำหนดให้มีดัชนีความเหมาะสมของการอยู่อาศัย (Habitat Suitability Index : HSI) สูง และในทางตรงกันข้าม ถ้าเกาะใดมี HSI ต่ำแสดงว่ามีจำนวนสปีชี่ส์อาศัยอยู่น้อย (สปีชีส์เคาท์ต่ำ) โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เช่น ปริมาณน้ำฝน ขนาดพื้นที่ และอุณหภูมิ เราเรียกว่า ตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable : SIV) ดังนั้นเกาะที่มี HSI สูงจะมีอัตราการอพยพเข้าต่ำและอัตราการอพยพออกสูง เนื่องจากมีสปีชี่ส์อาศัยอยู่ในเกาะค่อนข้างแออัดจึงเหลือพื้นที่สำหรับสปีชี่ส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามาน้อยและสปีชี่ส์ที่อาศัยอยู่ก็พยายามอพยพออกจากเกาะเพราะความแออัด และในทางตรงกันข้าม เกาะที่มี HSI ต่ำจะมีอัตราการอพยพเข้าสูงและอัตราการอพยพออกต่ำ เนื่องจากมีสปีชี่ส์อาศัยอยู่ในเกาะน้อยจึงมีพื้นที่สำหรับสปีชี่ส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามามากและสปีชี่ส์ที่อาศัยอยู่ก็ไม่พยายามอพยพออกจากเกาะเพราะชอบที่อยู่อาศัยแบบไม่แออัด

- Ma (2010) ได้นำเสนอเกี่ยวกับ BBO ที่นำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด โดยสตริงคำตอบของ BBO จะประกอบไปด้วยคุณลักษณะเฉพาะตัว (Feature) หรือ SIV ซึ่งเปรียบได้กับยีน (Gene) หรือบิท (Bit) ในเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms : GAs) โดยมีการประเมินค่าความเหมาะสมให้กับสตริงคำตอบที่ค้นพบ ซึ่งแต่ละสตริงคำตอบจะมีค่า HSI หรือค่าสปีชี่ส์เคาท์ (Species Count) เป็นดัชนีวัดความเหมาะสมของสตริงคำตอบ ซึ่งเปรียบได้กับค่าความแข็งแรง (Fitness) ใน GAs และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่า HIS มากแสดงว่าสตริงคำตอบนั้นมีค่าสปีชี่ส์เคาท์มากและเป็นสตริงคำตอบที่ดีและในทางตรงกันข้ามถ้าสตริงคำตอบใดมีค่า HIS น้อยแสดงว่าสตริงคำตอบนั้นมีค่าสปีชีส์เคาท์น้อยและเป็นสตริงคำตอบที่แย่ เมื่อสตริงคำตอบ

ได้รับการประเมินค่าความเหมาะสมเรียบร้อยแล้ว จึงนำสตริงคำตอบไปพิจารณาในขั้นตอนต่อไป คือ การอพยพ (Migration) และการมิวเตชัน (Mutation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญของ BBO เพราะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการอพยพหลายรูปแบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบเชิงเส้นตรง และแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า รูปแบบมีผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ

2.10 สรุปท้ายบท

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านได้อธิบายถึงลักษณะสายการประกอบแบบเส้นตรงทั่วไป สายการประกอบแบบสองด้าน โดยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสายการประกอบทั้งสองแบบ เช่น เวลาดำเนินงานที่แท้จริงของแต่ละสถานีงานของสายการประกอบแบบสองด้านมีค่าเท่ากับผลรวมเวลาดำเนินงานของทุกขั้นงานที่อยู่ในสถานีงานเดียวกันบวกกับเวลาเดินเปล่าที่เกิดขึ้นในสถานีงานนั้นและทำให้ทราบข้อดีของสายการประกอบแบบสองด้าน เช่น ความยาวสายการประกอบแบบสองด้านสั้นกว่าสายการประกอบแบบด้านเดียวจึงใช้พื้นที่การผลิตน้อยกว่า สามารถลดระยะการเคลื่อนที่ของพนักงานสั้นลง สามารถลดเวลาปรับตั้งเครื่องและเวลาการผลิตให้สั้นลง สามารถลดต้นทุนด้านอุปกรณ์และเครื่องมือที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ในคู่สถานีงาน ทฤษฎีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์เดียวและปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่มีคำตอบในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่ค้นพบ วิธีการแบ่งปันความแข็งแรงระหว่างคำตอบที่อยู่ติดกัน วิธีการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดและวิธีการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบ และในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยได้แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบเส้นตรง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมและการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้ COMSOAL สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดของวิธี Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines (COMSOAL) ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL และตัวอย่างการนำ COMSOAL ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

3.1 แนวคิดและหลักการของ COMSOAL

COMSOAL เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Arcus (1966) ซึ่งได้การนำ COMSOAL เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ โดยลักษณะเด่นของ COMSOAL คือสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีวิธีการหรือขั้นตอนในการค้นหาคำตอบที่ไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อนมากนัก จึงสามารถทำความเข้าใจกับกระบวนการค้นหาคำตอบได้ง่ายและยังสามารถนำไปใช้กับงานจริงได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่น วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms : GAs) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) และวิธีการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization : BBO) ซึ่ง COMSOAL มีหลักการค้นหาคำตอบที่ง่ายๆ โดยเริ่มจากการสร้างคำตอบด้วยวิธีการสุ่มคำตอบจากบริเวณของคำตอบที่เป็นได้ทั้งหมด จากนั้นจึงทำการคัดเลือกเฉพาะคำตอบที่ดีไว้เท่านั้นและถ้าจำนวนคำตอบที่ถูกสุ่มมีจำนวนมากขึ้นก็จะทำให้คำตอบที่ได้มีโอกาสลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้นด้วย (Özcan and Toklu, 2010)

3.2 ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

วิธี COMSOAL ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการค้นหาคำตอบ 7 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1) Data Input : ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด รอบเวลาการผลิต เวลาการทำงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงานและแผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว

2) **Representation & Initialization** : สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยใช้วิธีการสุ่มให้ได้จำนวนสตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้

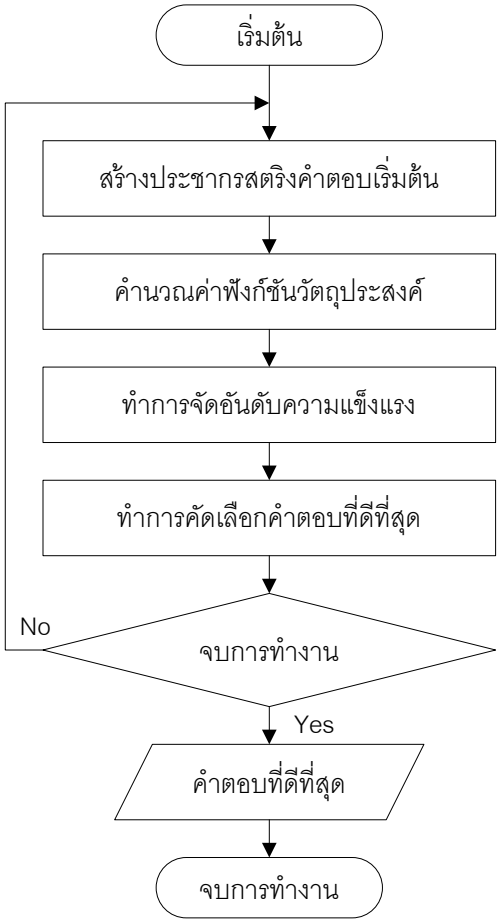
3) **Evaluation** : นำลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

4) **Selection** : คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (Goldberg, 1989) ในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบ โดยสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจะมีความแข็งแรงมากที่สุด (มีค่าเท่ากับ 1)

5) **Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population** : นำกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1) ที่ได้ในรอบนี้ไปรวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่รวมกันไปจัดอันดับด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เข้าสู่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า

6) **Stopping Criteria** : ทำการวนซ้ำจนครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนรอบการทำงานปัจจุบันยังน้อยกว่าจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนด ให้กลับไปทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้าการวนซ้ำครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 7

7) **Stop** : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL

3.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ COMSOAL สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

จากหัวข้อก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในขั้นตอนของ COMSOAL ที่มากขึ้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอด้วยการยกตัวอย่างประกอบไปพร้อมกับการอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

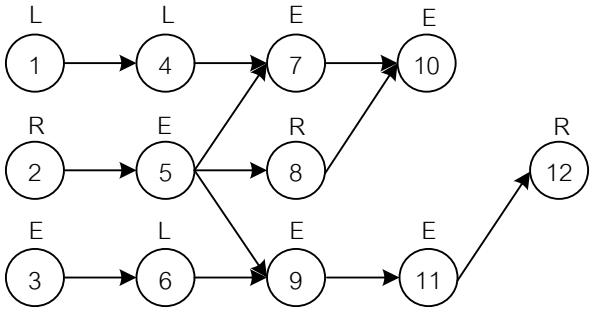
3.3.1 ข้อมูลนำเข้า

สำหรับปัญหาตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาขั้นตอนการแก้ปัญหาของ COMSOAL จะเป็นปัญหาขนาดเล็ก ที่มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ A, B และ C มีสัดส่วนของ Minimum Part Set (MPS) เท่ากับ (4:4:4) มีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 12 โดยทำการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบที่มีความสมดุลตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังในปัญหา

ของ Kim et al. (2000) ที่มีรอบเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 และมีจำนวนขั้นงานการประกอบผลิตภัณฑ์เท่ากับ 12 ขั้นงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน

จากรูปลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงานจะทำให้เราทราบเงื่อนไขการทำงานก่อนและหลังของแต่ละขั้นงาน เช่น ขั้นงานที่ 4 จะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อขั้นงานที่ 1 เสร็จแล้ว และทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีงานในแต่ละด้านของสายการประกอบ เช่น ขั้นงานที่ 1 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านซ้ายของสายการประกอบเท่านั้น (Left-side : L) ขั้นงานที่ 2 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านขวาของสายการประกอบเท่านั้น (Right-side : R) ส่วนขั้นงานที่ 3 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านใดของสายการประกอบก็ได้ (Either-side : E) (Kim et al., 2000)



ภาพที่ 3.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง

3.3.1.2 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ

เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน		
	A	B	C
1	2	3	1
2	3	3	3
3	2	0	1
4	3	2	1
5	1	2	3
6	1	0	2
7	3	2	1
8	3	1	2
9	2	1	0
10	2	3	1
11	1	2	3
12	0	1	2

3.3.1.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

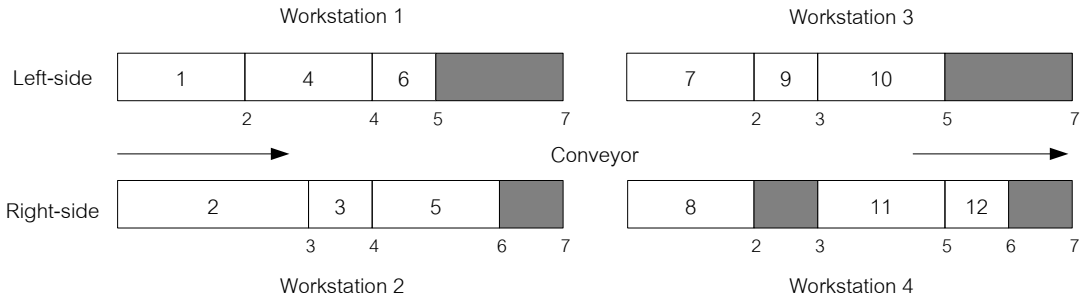
ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

From/To	A	B	C
A	0	7.1	9.5
B	7.3	0	9.8
C	7.6	8.1	0

3.3.1.4 สายการประกอบแบบสองด้านที่มีความสมดุล

สายการประกอบแบบสองด้านที่ใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการจัดสมดุลตามปัญหาของ Kim et al. (2000) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้วิธีการจัดสมดุลแบบเดียวกับงานวิจัยของปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้



ภาพที่ 3.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน

3.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นนี้เราจะทำการเลือกผลิตภัณฑ์ลงสู่ลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบโดยวิธีสุ่ม ด้วยความน่าจะเป็นของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่เท่ากันทั้งหมด ให้ครบตามสัดส่วนของ MPS ที่กำหนด เช่น ในตัวอย่างนี้มี MPS เท่ากับ (4:4:4) เพราะฉะนั้นในหนึ่งสตริงต้องมีจำนวนผลิตภัณฑ์ A เท่ากับ 4 หน่วย มีจำนวนผลิตภัณฑ์ B เท่ากับ 4 หน่วย และมีจำนวนผลิตภัณฑ์ C เท่ากับ 4 หน่วย ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 สตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์											
1	B	B	B	A	C	A	C	A	C	C	B	A
2	B	B	A	B	A	B	C	A	C	A	C	C
3	A	C	A	A	B	A	B	C	B	C	C	B
4	A	C	A	B	A	C	B	C	C	A	B	B
5	B	B	A	A	C	A	C	C	B	C	B	A

3.3.3 การประเมินค่า

เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแต่ละสตริงคำตอบ ดังนี้

3.3.3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด สามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้ในบทที่ 2 โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \;\; f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{3.1}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ

$$Minimize \;\; f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_m} \left(\sum_{i=1}^{I} U_{i,n_m} + Z_{I+1,n_m} / v_c \right) \tag{3.2}$$

โดยที่

$$U_{i,n_m} = \begin{bmatrix} \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \right) - L_{n_m} \right) / v_c \right] + \\ \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \right) - L_{n_m} \right) / v_c \right] \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$Z_{i+1,n_m} = \max \begin{bmatrix} \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right] \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของ

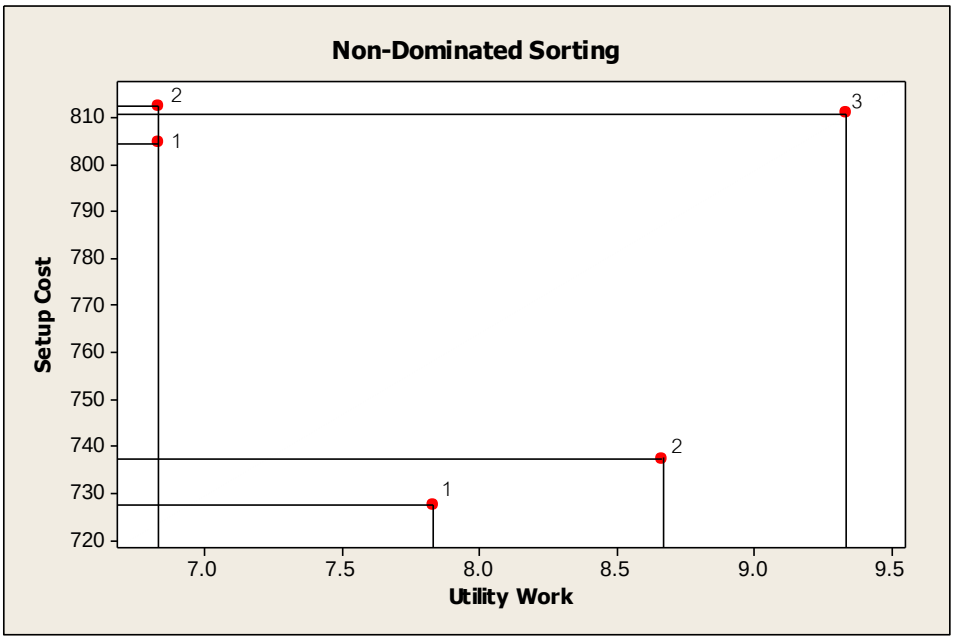
ผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w} = v_c \times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

ตารางที่ 3.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
5	727.40	7.83
3	804.50	6.83
1	737.30	8.67
4	812.50	6.83
2	810.90	9.33

3.3.3.2 **การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธี** Non-Dominated Sorting

เมื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบไปจัดลำดับด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับให้สตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) เป็นสตริงคำตอบอันดับที่ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากสุด) เป็นสตริงคำตอบอันดับสุดท้าย และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากโดยเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังนี้ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness
5	727.40	7.83	1
3	804.50	6.83	1
1	737.30	8.67	2
4	812.50	6.83	2
2	810.90	9.33	3

3.3.4 การคัดเลือกและการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อได้กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (มีค่าเท่ากับ 1) ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

ตารางที่ 3.6 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
5	B B A A C A C C B C B A
3	A C A A B A B C B C C B

3.3.5 การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2 จะดำเนินการตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 1 ซึ่งผลในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

3.3.5.1 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นนี้เราจะทำการเลือกผลิตภัณฑ์ลงสู่ลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบโดยวิธีสุ่ม ด้วยความน่าจะเป็นของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่เท่ากันทั้งหมด ให้ครบตามสัดส่วนของ MPS ที่กำหนด เช่น ในตัวอย่างนี้มี MPS เท่ากับ (4:4:4) เพราะฉะนั้นในหนึ่งสตริงต้องมีจำนวนผลิตภัณฑ์ A เท่ากับ 4 หน่วย มีจำนวนผลิตภัณฑ์ B เท่ากับ 4 หน่วย และมีจำนวนผลิตภัณฑ์ C เท่ากับ 4 หน่วย ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.7 สตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	B C A A A A B C B C C B
2	A C A A B A B C B C C B
3	A B C C A A B C C A B B
4	A C A B A C B C C A B B
5	B B A A C A C C B C B A

3.3.5.2 การประเมินค่า

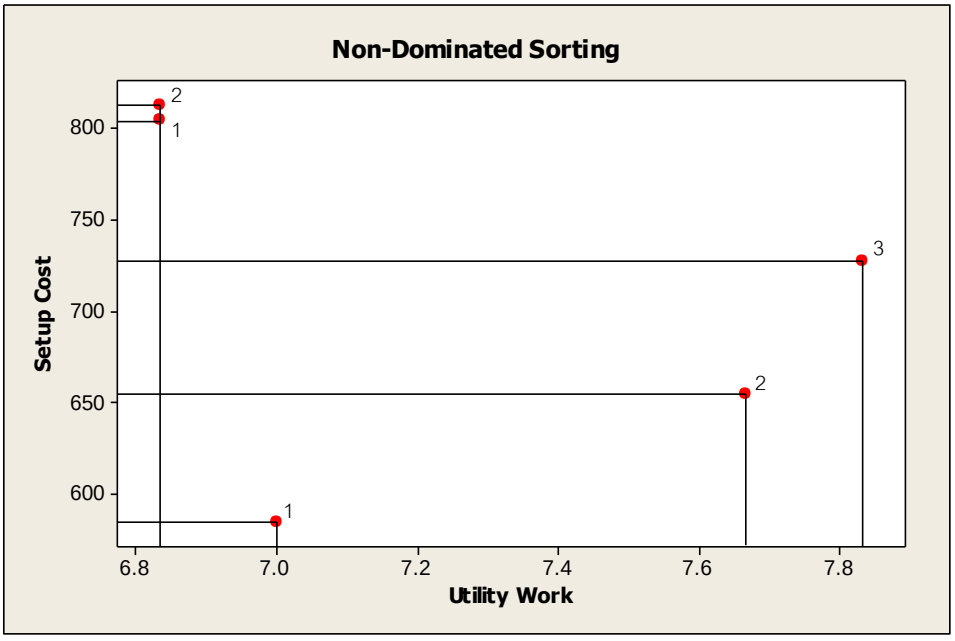
นำสตริงคำตอบเริ่มต้นมาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
1	584.70	7.00
2	804.50	6.83
3	654.60	7.67
4	812.50	6.83
5	727.40	7.83

3.3.5.3 การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

เมื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบไปจัดลำดับด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับให้สตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) เป็นสตริงคำตอบอันดับที่ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากสุด) เป็นสตริงคำตอบอันดับสุดท้าย และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากโดยเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังนี้ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 3.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 3.9 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness
1	584.70	7.00	1
2	804.50	6.83	1
3	654.60	7.67	2
4	812.50	6.83	2
5	727.40	7.83	3

3.3.5.4 การคัดเลือกและการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อเราได้กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (มีค่าเท่ากับ 1) แล้วจึงนำไปรวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานก่อนหน้าและทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไปเก็บไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3.10 การรวมกันของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

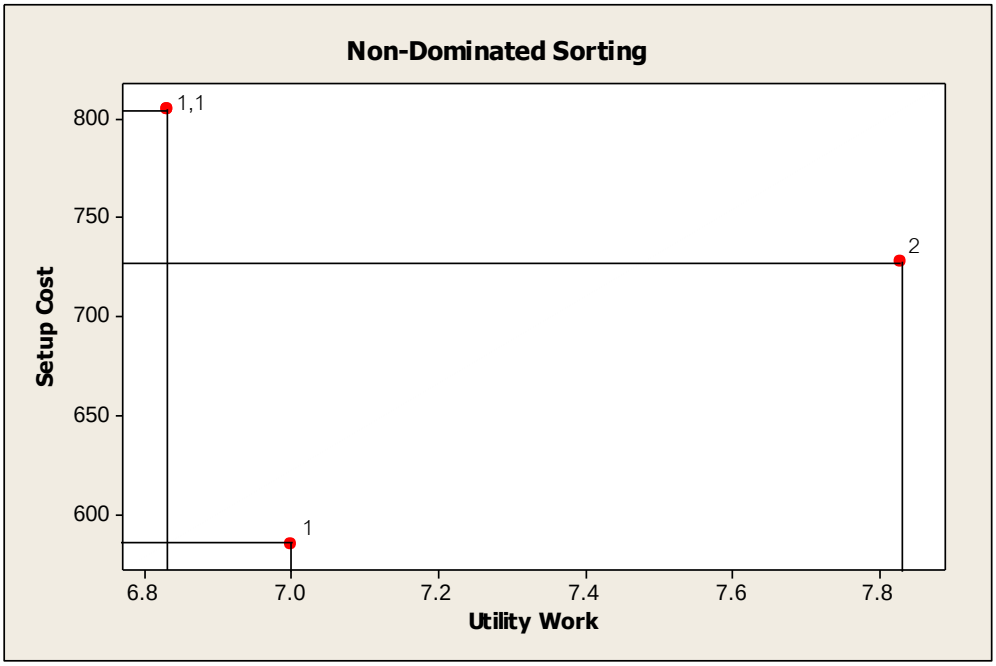
กลุ่มสตริงคำตอบ	สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
รอบก่อนหน้า	1	B B A A C A C C B C B A
	2	A C A A B A B C B C C B
รอบปัจจุบัน	3	B C A A A A B C B C C B
	4	A C A A B A B C B C C B

เมื่อได้นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบก่อนหน้ารวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบปัจจุบันเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปคำนวณค่าวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของสตริงคำตอบที่นำการรวมกัน

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
1	727.40	7.83
2	804.50	6.83
3	584.70	7.00
4	804.50	6.83

เมื่อคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรง ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมดและทำการเรียงสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมาก และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากโดยเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 3.6 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 3.12 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness
3	584.70	7.00	1
2	804.50	6.83	1
4	804.50	6.83	1
1	727.40	7.83	2

ตารางที่ 3.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
3	B C A A A A B C B C C B
2	A C A A B A B C B C C B

3.4 สรุปท้ายบท

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดของ COMSOAL ที่นำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยค้นหาคำตอบด้วยวิธีการสุ่มซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ไม่ยุ่งยาก จึงทำให้การค้นหาคำตอบทำได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ อย่างเช่น GAs PSO และ BBO ในบทนี้ได้แสดงตัวอย่างการนำ COMSOAL ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่แสดงให้เห็นถึงวิธีการค้นหาคำตอบที่ง่าย โดยเริ่มจากการสร้างคำตอบด้วยวิธีการสุ่มคำตอบจากบริเวณของคำตอบที่เป็นได้ทั้งหมด จากนั้นจึงทำการคัดเลือกเฉพาะคำตอบที่ดีไว้เท่านั้นและถ้าจำนวนคำตอบที่ถูกสุ่มมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้คำตอบที่ได้มีโอกาสลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดมากขึ้นด้วย

บทที่ 4
การประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ขั้นตอนการทำงานของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ตัวอย่างการนำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน และการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเจนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

4.1 แนวคิดและหลักการของเจนเนติกอัลกอริทึม

เจนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีหนึ่งของเมทาฮิวริสติกที่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี เช่น ปัญหาการจัดลำดับการผลิต ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ปัญหาการหาเส้นทางเดินที่ดีสุดของพนักงานขาย และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวการนำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเข้ามาช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้เป็นจำนวนมากจึงเป็นเครื่องบ่งชี้ได้ว่าวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมนั้นได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับจากนักวิชาการว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง เพราะวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบที่ดีและใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานจนเกินไป

เจนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่อาศัยกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural Selection) และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Natural Genetics) ที่มีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูก โดยวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมจะเริ่มจากการคัดเลือกสตริงคำตอบ (String) หรือ โครโมโซม (Chromosome) ที่มีคุณลักษณะ (Character) หรือ ยีน (Gene) ที่แตกต่างกันด้วยวิธีการสุ่มและกำหนดให้สตริงคำตอบที่สุ่มได้เป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่ได้ไปผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การประเมินค่า การกำหนดค่าความแข็งแรงและความหนาแน่น การครอสโอเวอร์ การมิวเตชัน และการเก็บค่าที่ดีที่สุด ทั้งนี้ก็เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ (Konak et al., 2006)

จากงานวิจัยที่ผ่านที่ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาต่างๆ อย่างมีประสิทธิภาพ นั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น Pareto Stratum-Niche Cubic Genetic Algorithm (PS-NC GA), Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), Strength

Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA) และ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) ซึ่งรูปแบบของเจนเนติกอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้เลือกใช้คือ NSGA-II เพราะเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพที่ดี โดยรายละเอียดของ NSGA-II จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

รูปแบบของเจนเนติกอัลกอริทึมที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้คือ NSGA-II ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1) **Data Input** : ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด รอบเวลาการผลิต เวลาการทำงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงานและแผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว
2) **Representation & Initialization** : สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว จากข้อมูลนำเข้าต่างๆ โดยใช้วิธีการสุ่ม
3) **Evaluation** : นำลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด
4) **Pareto Based Approach** : ใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดโดยเลือกใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (Goldberg, 1989) ในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบ โดยสตริงคำตอบที่มีอันดับต่ำจะมีโอกาสถูกคัดเลือกไปสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูกสูงกว่าสตริงคำตอบที่มีอันดับสูง
5) **Density Information** : คำนวณค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบ โดยใช้วิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002) โดยสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance มากจะมีโอกาสถูกคัดเลือกไปสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูกสูงกว่าสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance น้อย
6) **Selection** : คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection โดยสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมาก (ค่าอันดับน้อย) และมีความหนาแน่นมาก จะมีโอกาสในการถูกเลือกสูง

7) **Crossover** : ทำการจับคู่คำตอบที่อยู่ใน Mating Pool และทำการครอสโอเวอร์ด้วยค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ P_c โดยใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Modified Order Crossover (modOX) (Kim et al., 1996)

8) **Mutation** : ทำการมิวเตชันประชากรคำตอบด้วยค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ P_m โดยใช้วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation (Kim et al., 1996) โดยตำแหน่งที่จะทำการสลับนั้นทำโดยวิธีสุ่มแบบไม่ซ้ำ และในขั้นตอนนี้เราจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (O_t) ที่ได้รับการปรับปรุงจากการครอสโอเวอร์และการมิวเตชัน

9) **Combination Population** : ทำการรวมสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P_t) และสตริงคำตอบรุ่นลูก (O_t) เข้าด้วยกัน จึงได้เป็นประชากรคำตอบ R_t

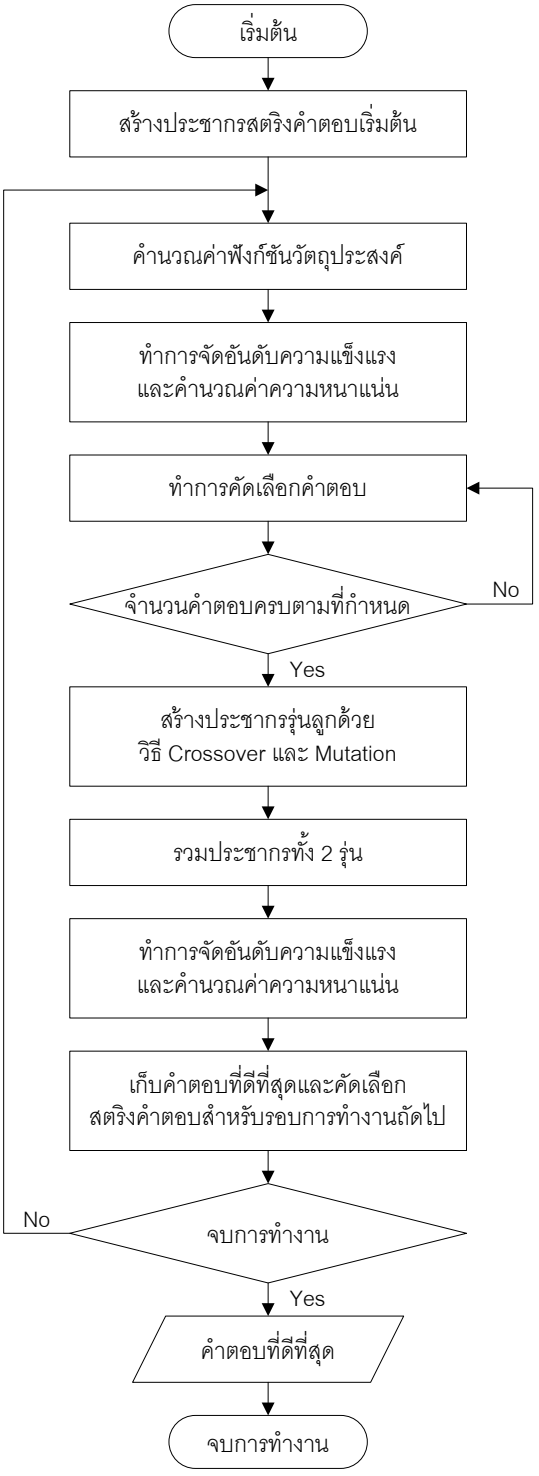
10) **Selection Next Population** : ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบ (R_t) เพื่อใช้ในเจนเนอเรชันถัดไป โดยใช้หลักการของ Non-Dominated Sorting และ Crowding Distance ซึ่งจะเริ่มพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่อยู่ในอันดับที่ 1 ก่อน แต่ถ้าจำนวนสตริงคำตอบน้อยกว่า N ตัว ก็ให้พิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่อยู่ในอันดับถัดไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้จำนวนสตริงคำตอบครบ N ตัว และถ้าการรวมกันของสตริงคำตอบตั้งแต่อันดับที่ 1 มาจนถึง อันดับที่ i แล้วมีจำนวนสตริงคำตอบมากกว่า N ตัว เราจะคัดเลือกสตริงคำตอบที่อยู่ในอันดับที่ i โดยการพิจารณาค่า Crowding Distance ที่มีค่ามากก่อน และค่อยๆ ลดหลั่นกันลงมาจนได้จำนวนสตริงคำตอบเท่ากับ N ตัว ซึ่งจะกลายเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชันถัดไป

11) **Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population** : นำกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1) ที่ได้ในรอบนี้ไปรวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่รวมกันไปจัดอันดับด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เข้าสู่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า

12) **Stopping Criteria** : ทำการวนซ้ำจนครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนรอบการทำงานปัจจุบันยังน้อยกว่าจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนด ให้กลับไปทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้าการวนซ้ำครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 13

13) **Stop** : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 11 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

เมื่อ t แทน รอบการทำงาน (เจนเนอเรชัน), P_t แทน ประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่หรือประชากรเริ่มต้น, O_t แทน ประชากรคำตอบรุ่นลูกหรือประชากรคำตอบใหม่, R_t แทน การรวมกันของประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่และประชากรคำตอบรุ่นลูก และ N แทน จำนวนประชากรทั้งหมด



ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II

4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

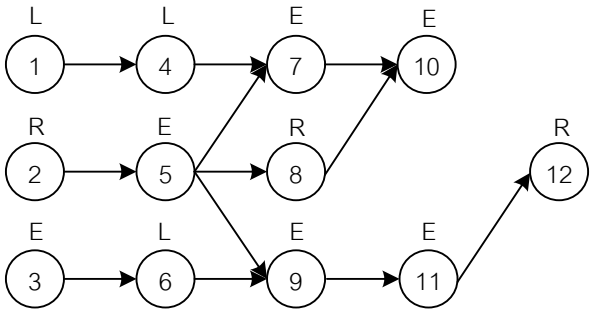
จากหัวข้อก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในขั้นตอนของ NSGA-II ที่มากขึ้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอด้วยการยกตัวอย่างประกอบไปพร้อมกับการอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ข้อมูลนำเข้า

สำหรับปัญหาตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาขั้นตอนการแก้ปัญหาของ NSGA-II จะเป็นปัญหาขนาดเล็ก ที่มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ A, B และ C มีสัดส่วนของ Minimum Part Set (MPS) เท่ากับ (4:4:4) มีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 12 โดยทำการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบที่มีความสมดุลตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังในปัญหาของ Kim et al. (2000) ที่มีรอบเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 และมีจำนวนขั้นงานการประกอบผลิตภัณฑ์เท่ากับ 12 ขั้นงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.1.1 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน

จากรูปลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงานจะทำให้เราทราบเงื่อนไขการทำงานก่อนและหลังของแต่ละขั้นงาน เช่น ขั้นงานที่ 4 จะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อขั้นงานที่ 1 เสร็จแล้ว และทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีงานในแต่ละด้านของสายการประกอบ เช่น ขั้นงานที่ 1 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านซ้ายของสายการประกอบเท่านั้น (Left-side : L) ขั้นงานที่ 2 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านขวาของสายการประกอบเท่านั้น (Right-side : R) ส่วนขั้นงานที่ 3 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านใดของสายการประกอบก็ได้ (Either-side : E) (Kim et al., 2000)



ภาพที่ 4.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง

4.3.1.2 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ

เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน		
	A	B	C
1	2	3	1
2	3	3	3
3	2	0	1
4	3	2	1
5	1	2	3
6	1	0	2
7	3	2	1
8	3	1	2
9	2	1	0
10	2	3	1
11	1	2	3
12	0	1	2

4.3.1.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

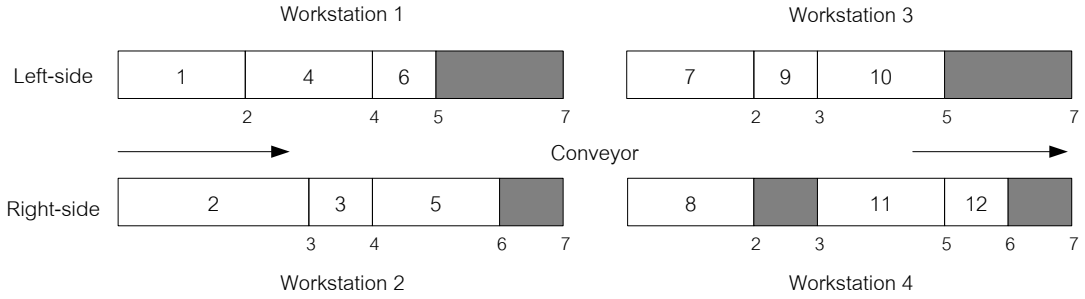
ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

From/To	A	B	C
A	0	7.1	9.5
B	7.3	0	9.8
C	7.6	8.1	0

4.3.1.4 สายการประกอบแบบสองด้านที่มีความสมดุล

สายการประกอบแบบสองด้านที่ใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการจัดสมดุลตามปัญหาของ Kim et al. (2000) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้วิธีการจัดสมดุลแบบเดียวกับงานวิจัยของปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้



ภาพที่ 4.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน

4.3.1.5 พารามิเตอร์ของ NSGA-II

ในที่นี้กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม NSGA-II มีดังนี้

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Modified Order Crossover (modOX)
- วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เท่ากับ 0.6 (P_c =0.6)
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.2 (P_m =0.2)

4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นนี้เราจะทำการเลือกผลิตภัณฑ์ลงสู่ลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบโดยวิธีสุ่มด้วยความน่าจะเป็นของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่เท่ากันทั้งหมด ให้ครบตามสัดส่วนของ MPS ที่กำหนด เช่น ในตัวอย่างนี้มี MPS เท่ากับ (4:4:4) เพราะฉะนั้นในหนึ่งสตริงต้องมีจำนวนผลิตภัณฑ์ A เท่ากับ 4 หน่วย มีจำนวนผลิตภัณฑ์ B เท่ากับ 4 หน่วย และมีจำนวนผลิตภัณฑ์ C เท่ากับ 4 หน่วย ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 สตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์											
1	B	B	B	A	C	A	C	A	C	C	B	A
2	B	B	A	B	A	B	C	A	C	A	C	C
3	A	C	A	A	B	A	B	C	B	C	C	B
4	A	C	A	B	A	C	B	C	C	A	B	B
5	B	B	A	A	C	A	C	C	B	C	B	A

4.3.3 การประเมินค่า

เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแต่ละสตริงคำตอบ ดังนี้

4.3.3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด สามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้ในบทที่ 2 โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \;\; f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{4.1}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ

$$Minimize \;\; f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_m} \left(\sum_{i=1}^{I} U_{i,n_m} + Z_{I+1,n_m} / v_c \right) \tag{4.2}$$

โดยที่

$$U_{i,n_m} = \begin{bmatrix} \max\left[0,\left(Z_{in_m} + v_c\sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\right) - L_{n_m}\right)/v_c\right] + \\ \max\left[0,\left(Z_{in_m} + v_c\sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\right) - L_{n_m}\right)/v_c\right] \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$Z_{i+1,n_m} = \max\begin{bmatrix} \max\left[0,\min\left(Z_{in_m} + v_c\sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right], \\ \max\left[0,\min\left(Z_{in_m} + v_c\sum_{m=1}^{M} X_{im}\left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c\right)\right] \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w} = v_c \times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

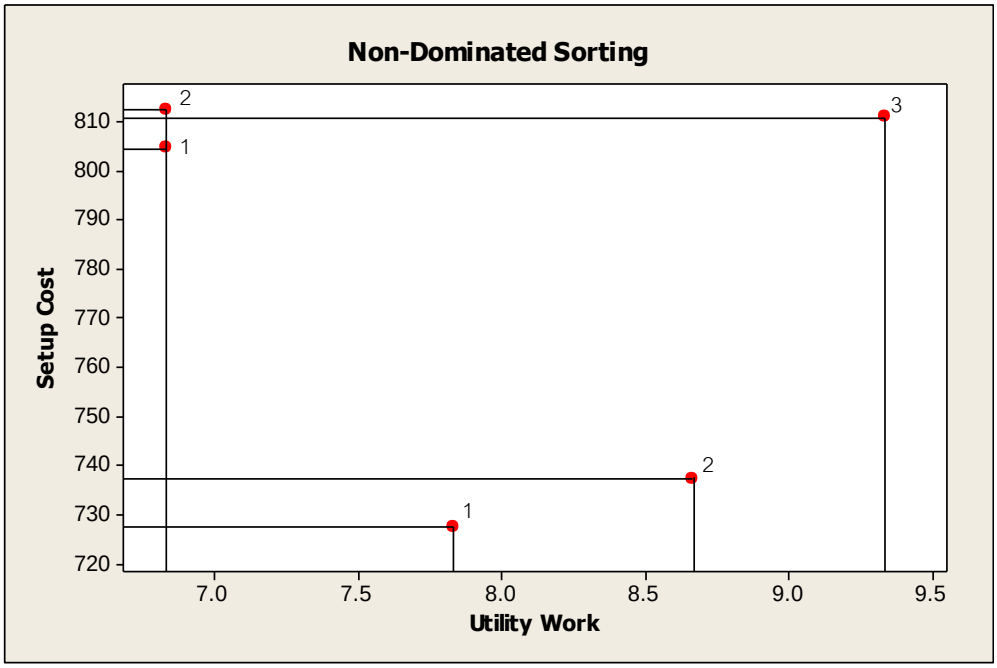
ตารางที่ 4.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
5	727.40	7.83
3	804.50	6.83
1	737.30	8.67
4	812.50	6.83
2	810.90	9.33

4.3.3.2 **การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธี** Non-Dominated Sorting

เมื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบไปจัดลำดับด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting

โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับให้สตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) เป็นสตริงคำตอบอันดับที่ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากสุด) เป็นสตริงคำตอบอันดับสุดท้าย และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากโดยเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังนี้ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 4.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness
5	727.40	7.83	1
3	804.50	6.83	1
1	737.30	8.67	2
4	812.50	6.83	2
2	810.90	9.33	3

4.3.3.3 **การคำนวณหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธี** Crowding Distance

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับทุกสตริงคำตอบแล้ว จึงทำการคำนวณหาค่า Crowding Distance โดยเริ่มพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากสุด ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.6 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness	Crowding Distance
5	727.40	7.83	1	Infinity
3	804.50	6.83	1	Infinity
1	737.30	8.67	2	Infinity
4	812.50	6.83	2	Infinity
2	810.90	9.33	3	Infinity

4.3.4 **การคัดเลือกคำตอบ**

การคัดเลือกสตริงคำตอบจะพิจารณาจากส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบที่อยู่อันดับเดียวกัน โดยสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมาก (ค่า Fitness น้อย) และมีความหนาแน่นมาก (ค่า Crowding Distance สูง) จะมีโอกาสได้รับการคัดเลือกสูง ซึ่งวิธีการคัดเลือกที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ คือ วิธี Binary Tournament Selection โดยขั้นตอนของวิธีคัดเลือก มีดังนี้

4.3.4.1 **การสร้างวงล้อรูเล็ต**

วงล้อรูเล็ต คือ วงกลมที่มีพื้นที่ขนาด 1 หน่วย และแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนย่อย โดยจำนวนส่วนย่อยจะเท่ากับจำนวนประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดและขนาดของพื้นที่ในแต่ละส่วนจะเท่ากับความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของสตริงคำตอบแต่ละตัวดังตารางด้านล่าง โดยการสร้างวงล้อรูเล็ตมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาค่า Adjust Fitness โดยการสลับค่า Fitness จากค่าน้อยเป็นค่ามากตามลำดับ เพื่อนำไปหาค่าความน่าจะเป็นสำหรับสร้างวงล้อรูเล็ต

ขั้นตอนที่ 2 หาผลรวมของค่า Adjust Fitness ของสตริงคำตอบทั้งหมดจากสมการต่อไปนี้

$$F = \sum_{i=1}^{N} f_i \quad \text{เมื่อ } i = 1,2,...,N \tag{4.5}$$

โดยที่ f_i คือ ค่า Adjust Fitness ของสตริงตัวที่ i

N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 3 หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก (Probability of Selection) ของสตริงคำตอบแต่ละตัวจากสมการต่อไปนี้

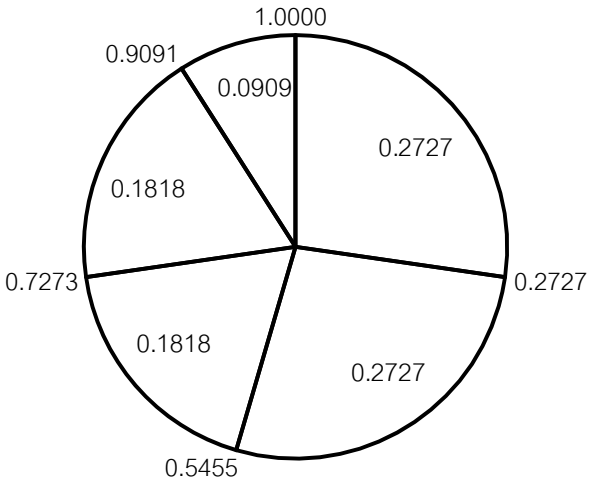
$$p_i = \frac{f_i}{F} \tag{4.6}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกสะสม (Cumulative Probability of Selection) ของสตริงคำตอบแต่ละตัวจากสมการต่อไปนี้

$$q_i = \sum_{j=1}^{i} p_j \tag{4.7}$$

ตารางที่ 4.7 การสร้างตารางวงล้อรูเล็ต

สตริงคำตอบ	Fitness	Adjust Fitness	p_i	q_i
5	1	3	0.2727	0.2727
4	1	3	0.2727	0.5455
3	2	2	0.1818	0.7273
1	2	2	0.1818	0.9091
2	3	1	0.0909	1.0000
รวม		11	1.0000	



ภาพที่ 4.5 วงล้อรูเล็ต

4.3.4.2 วิธีคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะเริ่มจากการสุ่มสตริงคำตอบโดยการหมุนวงล้อรูเล็ตมา 2 ตัว จากนั้นจึงนำค่า Fitness ของสตริงคำตอบ 2 ตัวที่สุ่มได้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Roulette Wheel Selection เพียงอย่างเดียวนั้นอาจจะสุ่มได้สตริงคำตอบที่ไม่ดีเท่าที่ควร โดยขั้นตอนการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างตัวเลขสุ่ม r_1 และ r_2 ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นมาอย่างละ 1 ค่า

ขั้นตอนที่ 2 ถ้า $r_1 < q_1$ ให้เลือกสตริงคำตอบตัวแรก แต่ถ้า $q_{i-1} < r_1 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าน้อยกว่าจำนวนประชากรทั้งหมด) ให้เลือกสตริงคำตอบตัวที่ i มาใส่ใน Population 1 และถ้า $r_2 < q_i$ ให้เลือกสตริงคำตอบตัวแรก แต่ถ้า $q_{i-1} < r_2 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าน้อยกว่าจำนวนประชากรทั้งหมด) ให้เลือกสตริงคำตอบตัวที่ i มาใส่ใน Population 2

ขั้นตอนที่ 3 นำค่า Fitness ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ตัวมาทำการเปรียบเทียบกัน ถ้าตัวใดมีค่า Fitness น้อยกว่าให้เลือกสตริงคำตอบนั้นเข้าสู่ Mating Pool แต่ถ้าค่า Fitness เท่ากันให้ไปพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่าเข้าสู่ Mating

Pool และถ้าค่าความหนาแน่นยังมีค่าเท่ากันอีก ก็ให้ใช้วิธีสุ่มเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool

ขั้นตอนที่ 4 ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จนกว่าจะได้จำนวนสตริงคำตอบใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากรสตริงคำตอบที่ได้กำหนดไว้

ตารางที่ 4.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				No. String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	
1	0.8158	0. 9091	4	2	0.4654	0.5455	5	1	5
2	0.2495	0.2727	5	1	0.3512	0.5455	3	1	3
3	0.9810	1.0000	2	3	0.3591	0.5455	3	1	3
4	0.0489	0.2727	5	1	0.6294	0.7273	1	2	5
5	0.8124	0. 9091	4	2	0.1653	0.2727	3	1	3

จากผลการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะได้สตริงคำตอบเท่ากับ 5 ตัว คือ สตริงคำตอบหมายเลข 5 3 3 5 และ 3 ซึ่งสตริงคำตอบเหล่านี้จะกลายเป็นสตริงคำตอบหมายเลข 1-5 ในขั้นตอนต่อไป

4.3.5 การครอสโอเวอร์

นำสตริงคำตอบที่ถูกเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection มาทำการสุ่ม เพื่อนำสตริงคำตอบที่สุ่มได้เข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ ซึ่งการสุ่มทำได้โดยสร้างตัวเลขสุ่ม r ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบแต่ละตัว จากนั้นจึงพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่ม r น้อยกว่าค่า P_C ที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.6 เพราะฉะนั้นจะมีสตริงคำตอบประมาณ 60% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือมีสตริงคำตอบโดยเฉลี่ยเท่ากับ $0.6 \times 5 = 3$ ตัว ที่คาดว่าจะถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์

ตารางที่ 4.9 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์	r_i	$r_i \leq 0.6$
1	B B A A C A C C B C B A	0.2078	Selected
2	A C A A B A B C B C C B	0.9556	-
3	A C A A B A B C B C C B	0.4741	Selected
4	B B A A C A C C B C B A	0.1037	Selected
5	A C A A B A B C B C C B	0.7249	-

เนื่องจากจำนวนสตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการครอสโอเวอร์เป็นจำนวนคี่ จึงทำการสุ่มเลข 0 หรือ 1 มาหนึ่งค่า ซึ่งค่าที่สุ่มได้ในที่นี้คือ 1 เราจึงเพิ่มสตริงคำตอบอีก 1 สตริง โดยสุ่มจากสตริงคำตอบที่เหลืออยู่ใน Mating Pool (สตริงคำตอบ 2 และ 5) ซึ่งเราสุ่มได้สตริงคำตอบที่ 5 ดังนั้นจะได้สตริงคำตอบที่นำไปครอสโอเวอร์ คือ สตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5 ซึ่งสามารถจับคู่แบบสุ่มได้เป็น 4-5 และ 3-1

ตารางที่ 4.10 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์	สถานะ
1	B B A A C A C C B C B A	Selected
2	A C A A B A B C B C C B	-
3	A C A A B A B C B C C B	Selected
4	B B A A C A C C B C B A	Selected
5	A C A A B A B C B C C B	Selected

หมายเหตุ ถ้าจำนวนสตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการครอสโอเวอร์ (N_C) เป็นจำนวนคี่ ให้ทำการปรับค่าให้เป็นจำนวนคู่ก่อน โดยมีเงื่อนไขดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้า N_C มีค่าเท่ากับ 1 ให้เพิ่มสตริงคำตอบอีก 1 สตริง โดยสุ่มจากสตริงคำตอบที่เหลืออยู่ใน Mating Pool

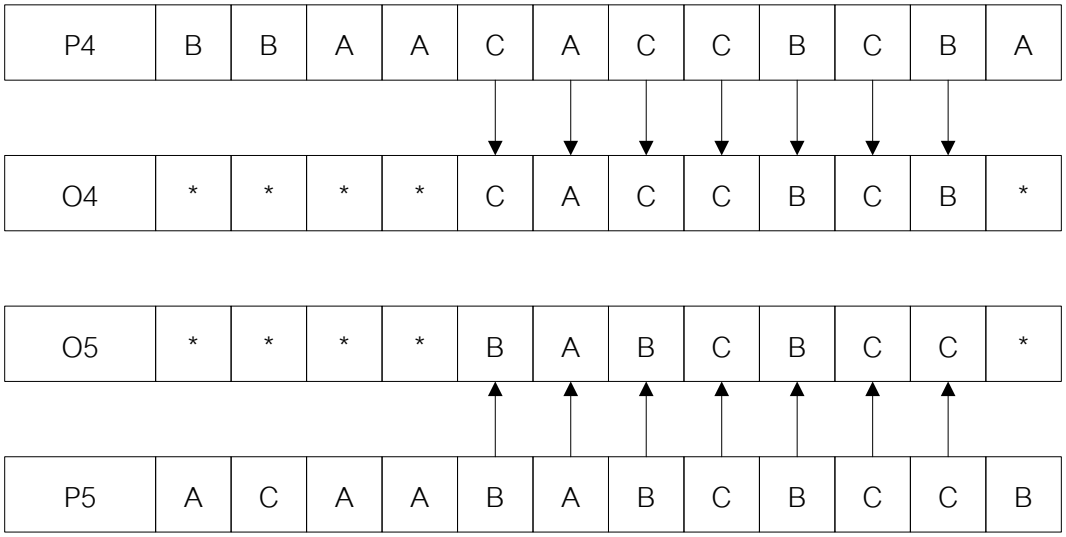
กรณีที่ 2 ถ้า N_C เป็นจำนวนคี่และมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึงจำนวนประชากรทั้งหมด (N) ให้ทำการสุ่มเลข 0 หรือ 1 มาหนึ่งค่า และถ้าสุ่มได้เลข 1 ให้เพิ่มสตริงคำตอบ

อีก 1 สตริง โดยสุ่มจากสตริงคำตอบที่เหลืออยู่ใน Mating Pool แต่ถ้าสุ่มได้เลข 0 ให้ลดสตริงคำตอบลง 1 สตริง โดยสุ่มจากสตริงคำตอบที่ได้เลือกไว้

กรณีที่ 3 ถ้า N_C มีค่าเท่ากับ N ซึ่งเป็นจำนวนคี่ 0 ให้ลดสตริงคำตอบลง 1 สตริง โดยสุ่มจากสตริงคำตอบที่ได้เลือกไว้

จากสตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการครอสโอเวอร์ ให้นำสตริงคู่แรก (สตริงคำตอบที่ 1 และ 3) ไปครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Modified Order Crossover (modOX) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการสุ่มตัวเลขขึ้นมา 2 ตัว เพื่อสร้างสตริงย่อย ซึ่งตัวเลขสุ่มที่มีค่าน้อยกว่าจะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของสตริงย่อยและตัวเลขสุ่มที่มีค่ามากจะเป็นตำแหน่งสุดท้ายของสตริงย่อย ซึ่งในที่นี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 5 และ 11 จากนั้นจึงคัดลอกสตริงย่อยจากสตริงพ่อแม่ที่ 4 และ 5 (P4 และ P5) มาใส่ในสตริงลูกที่ 4 และ 5 (O4 และ O5) ในตำแหน่งเดียวกันและตำแหน่งที่เหลือเป็นตำแหน่งว่างให้แทนด้วยเครื่องหมาย * ดังนี้

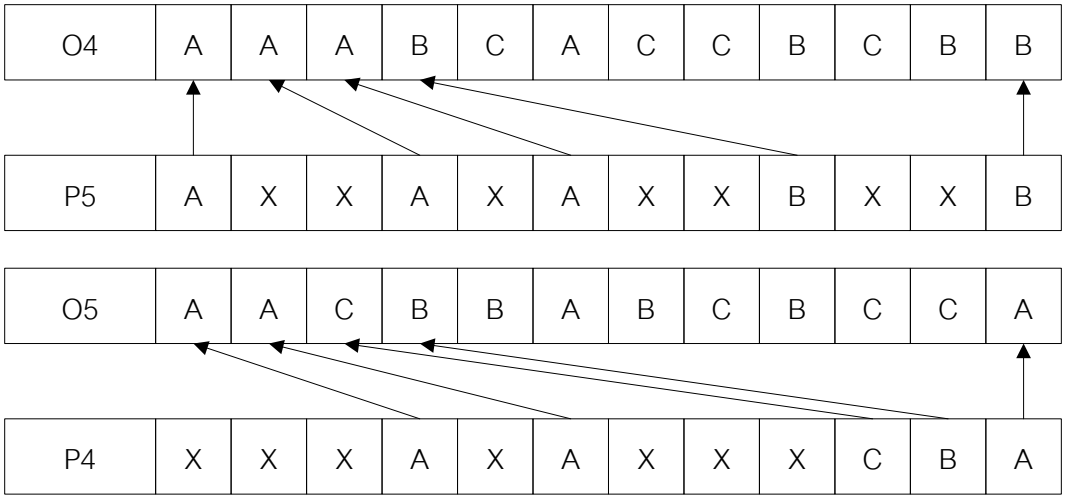


ขั้นตอนที่ 2 ลบค่าใน P4 ที่ซ้ำกับค่าใน O4 และ ลบค่าใน P4 ที่ซ้ำกับค่าใน O5 โดยเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 จนครบทุกค่าที่ซ้ำ และแทนที่ด้วยเครื่องหมาย x ดังนี้

O4	*	*	*	*	C	A	C	C	B	C	B	*
P5	A	X	X	A	X	A	X	X	B	X	X	B

O5	*	*	*	*	B	A	B	C	B	C	C	*
P4	X	X	X	A	X	A	X	X	X	C	B	A

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าที่เหลืออยู่ใน P5 มาแทนที่ * ใน O4 และนำค่าที่เหลือใน P4 มาแทนที่ * ใน O5 ดังนี้



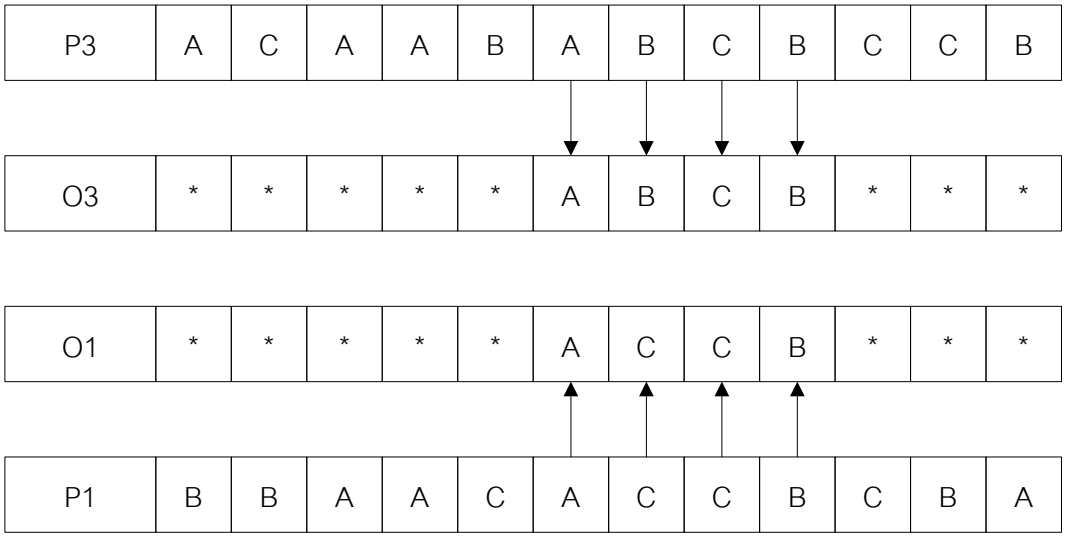
ดังนั้นจึงได้สตริงลูกที่ 4 และ 5 คือ

O4	A	A	A	B	C	A	C	C	B	C	B	B
O5	A	A	C	B	B	A	B	C	B	C	C	A

จากสตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการครอสโอเวอร์ ให้นำสตริงคู่ที่สอง (สตริงคำตอบที่ 3 และ 1) ไปครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Modified Order Crossover (modOX) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการสุ่มตัวเลขขึ้นมา 2 ตัว เพื่อสร้างสตริงย่อย ซึ่งตัวเลขสุ่มที่มีค่าน้อยกว่าจะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของสตริงย่อยและตัวเลขสุ่มที่มีค่ามากจะเป็นตำแหน่งสุดท้ายของสตริงย่อย ซึ่งในที่นี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 6 และ 9 จากนั้นจึงคัดลอกสตริงย่อยจาก

สตริงพ่อแม่ที่ 3 และ 1 (P3 และ P1) มาใส่ในสตริงลูกที่ 3 และ 1 (O3 และ O1) ในตำแหน่งเดียวกันและตำแหน่งที่เหลือเป็นตำแหน่งว่างให้แทนด้วยเครื่องหมาย * ดังนี้

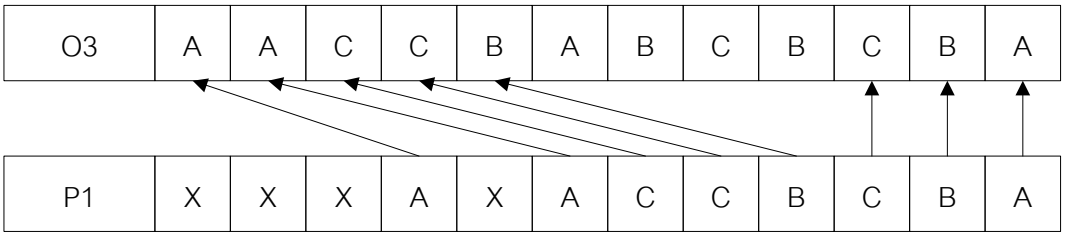


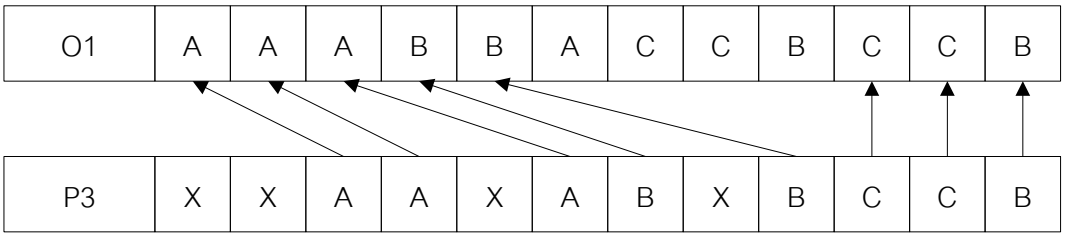
ขั้นตอนที่ 2 ลบค่าใน P1 ที่ซ้ำกับค่าใน O3 และ ลบค่าใน P3 ที่ซ้ำกับค่าใน O1 โดยเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 จนครบทุกค่าที่ซ้ำ และแทนที่ด้วยเครื่องหมาย x ดังนี้

O3	*	*	*	*	*	A	B	C	B	*	*	*
P1	X	X	X	A	X	A	C	C	B	C	B	A

O1	*	*	*	*	*	A	C	C	B	*	*	*
P3	X	X	A	A	X	A	B	X	B	C	C	B

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าที่เหลืออยู่ใน P1 มาแทนที่ * ใน O3 และนำค่าที่เหลือใน P3 มาแทนที่ * ใน O1 ดังนี้





ดังนั้นจึงได้สตริงลูกที่ 3 และ 1 คือ

O3	A	A	C	C	B	A	B	C	B	C	B	A
O1	A	A	A	B	B	A	C	C	B	C	C	B

ตารางที่ 4.11 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	A A A B B A C C B C C B
2	A C A A B A B C B C C B
3	A A C C B A B C B C B A
4	A A A B C A C C B C B B
5	A A C B B A B C B C C A

4.3.6 การมิวเตชัน

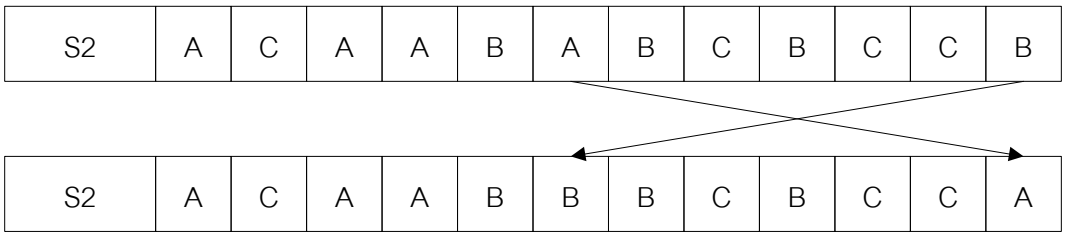
จากสตริงคำตอบที่ได้จากกระบวนการครอสโอเวอร์จะมีสตริงคำตอบเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกนำมาทำการมิวเตชัน ซึ่งจำนวนสตริงคำตอบที่จะถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน (M_m) นั้นขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) โดยวิธีการเลือกสตริงคำตอบมาทำการมิวเตชันจะเริ่มจากการสร้างตัวเลขสุ่ม r ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบแต่ละตัว แล้วพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่ม r น้อยกว่าค่า P_m ที่กำหนดไว้ ซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดไว้เท่ากับ 0.2 เพราะฉะนั้นจะมีจำนวนสตริงคำตอบโดยเฉลี่ยประมาณ 20% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือ

ประมาณ 0.2x5 = 1 สตริง ที่จะถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน ซึ่งการคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการมิวเตชันได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.12 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์	r_i	$r_i < 0.2$
1	A A A B B A C C B C C B	0.4134	-
2	A C A A B A B C B C C B	0.0748	Selected
3	A A C C B A B C B C B A	0.9695	-
4	A A A B C A C C B C B B	0.5695	-
5	A A C B B A B C B C C A	0.3298	-

ดังนั้นสตริงคำตอบตัวที่ 2 จะถูกเลือกให้ทำการมิวเตชัน ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation โดยการมิวเตชันของสตริงคำตอบเริ่มต้นจากการสุ่มเลข 2 ตัว ที่ไม่ซ้ำกันเพื่อใช้เป็นเลขบอกตำแหน่งในสตริงคำตอบ สมมติว่าสุ่มได้เลข 6 และ 12 ดังนั้นจึงสลับค่าในตำแหน่งที่ 6 และ 12 ดังนี้



ภาพที่ 4.6 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 2

หลังการทำมิวเตชันจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 ตัว เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้นและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดของสตริงคำตอบไว้

ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	A A A B B A C C B C C B
3	A A C C B A B C B C B A
4	A A A B C A C C B C B B
5	A A C B B A B C B C C A
2	A C A A B B B C B C C A

4.3.7 **เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด**

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้และป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบต่างๆ เช่น การครอสโอเวอร์และการมิวเตชัน สูญหายไป ดังนั้นเราจึงต้องนำสตริงคำตอบเริ่มต้นหรือที่เรียกว่าสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P) และสตริงคำตอบรุ่นลูก (O) มารวมกันและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนสตริงคำตอบเริ่มต้น ดังนี้

ตารางที่ 4.14 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

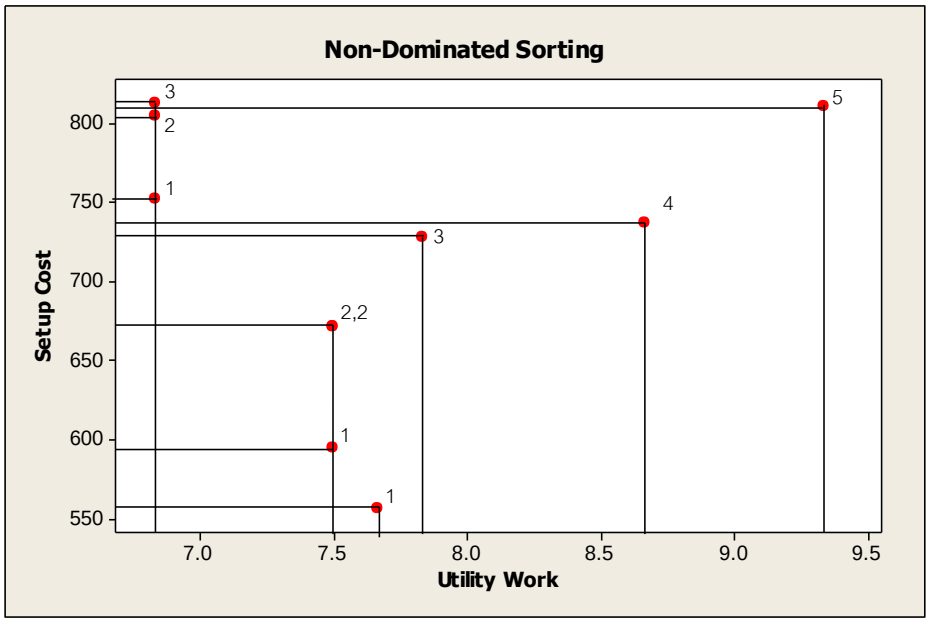
กลุ่มสตริงคำตอบ	สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
P	1	B B B A C A C A C C B A
	2	B B A B A B C A C A C C
	3	A C A A B A B C B C C B
	4	A C A B A C B C C A B B
	5	B B A A C A C C B C B A
O	6	A A A B B A C C B C C B
	7	A A C C B A B C B C B A
	8	A A A B C A C C B C B B
	9	A A C B B A B C B C C A
	10	A C A A B B B C B C C A

เมื่อได้นำสตริงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูกเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปคำนวณค่าวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.15 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของสตริงคำตอบที่นำการรวมกัน

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
6	556.40	7.67
7	751.70	6.83
10	594.60	7.50
8	671.40	7.50
9	671.40	7.50
3	804.50	6.83
4	812.50	6.83
5	727.40	7.83
1	737.30	8.67
2	810.90	9.33

เมื่อคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณค่า Crowding Distance ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด พร้อมกับเรียงค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและภายในค่าความแข็งแรงแต่ละค่า ให้ทำการเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 4.7 การกำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

ตารางที่ 4.16 ลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness	Crowding Distance
6	556.40	7.67	1	Infinity
7	751.70	6.83	1	Infinity
10	594.60	7.50	1	2
8	671.40	7.50	2	Infinity
9	671.40	7.50	2	Infinity
3	804.50	6.83	2	Infinity
4	812.50	6.83	3	Infinity
5	727.40	7.83	3	Infinity
1	737.30	8.67	4	Infinity
2	810.90	9.33	5	Infinity

เมื่อจัดลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและค่า Crowding Distance จากมากไปน้อยเรียบร้อยแล้ว ให้นำสตริงคำตอบที่ได้มาทำการคัดเลือก เพื่อทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ (ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1) และทำการเก็บสตริงคำตอบจำนวนเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้นเพื่อใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.17 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
6	A A A B B A C C B C C B
7	A A C C B A B C B C B A
10	A C A A B B B C B C C A

ตารางที่ 4.18 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
6	A A A B B A C C B C C B
7	A A C C B A B C B C B A
10	A C A A B B B C B C C A
8	A A C B B A B C B C C A
3	A C A A B A B C B C C B

4.3.8 การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2 มีความแตกต่างกับการแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 1 ตรงที่ไม่มีการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น เพราะสตริงคำตอบเริ่มต้นสำหรับรอบการทำงานที่ 2 ได้มาจากสตริงคำตอบที่ได้จัดเก็บไว้ในรอบการทำงานที่ 1 ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	A A A B B A C C B C C B
2	A A C C B A B C B C B A
3	A C A A B B B C B C C A
4	A A C B B A B C B C C A
5	A C A A B A B C B C C B

ส่วนขั้นตอนการทำงานอื่นๆ ยังคงเหมือนในรอบการทำงานที่ 1 ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการทำงานรอบที่ 2 ไว้ดังนี้

4.3.8.1 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเริ่มต้นมาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
1	556.40	7.67
2	751.70	6.83
3	594.60	7.50
4	671.40	7.50
5	804.50	6.83

เมื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบไปจัดลำดับด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เหมือนในรอบการทำงานก่อนหน้า โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับให้สตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) เป็นสตริงคำตอบอันดับที่ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากสุด) เป็นสตริงคำตอบอันดับสุดท้าย ซึ่งได้ผลดังนี้ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงและลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness
1	556.40	7.67	1
2	751.70	6.83	1
3	594.60	7.50	1
4	671.40	7.50	2
5	804.50	6.83	2

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับทุกสตริงคำตอบแล้ว จึงทำการคำนวณหาค่า Crowding Distance โดยเริ่มพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากสุด ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.22 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness	Crowding Distance
1	556.4	7.6667	1	Infinity
2	751.7	6.8333	1	Infinity
3	594.6	7.5	1	2.0000
4	671.4	7.5	2	Infinity
5	804.5	6.8333	2	Infinity

4.3.8.2 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

การคัดเลือกสตริงคำตอบจะพิจารณาจากส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบที่อยู่อันดับเดียวกัน โดยสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมาก (อันดับต่ำ) และมีค่าความหนาแน่นมาก (คำตอบมีการกระจายสูง) จะมีโอกาสได้รับการคัดเลือกสูง ซึ่งวิธีการคัดเลือกที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ คือ วิธี Binary Tournament Selection โดยขั้นตอนของการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะเริ่มจากการสุ่มสตริงคำตอบโดยการหมุนวงล้อรูเล็ตมา 2 ตัว แล้วนำค่า Adjust Fitness ของสตริงคำตอบ 2 ตัวนั้นมาเปรียบเทียบกันอีกครั้งหนึ่ง สตริงคำตอบที่ถูกเลือกจึงเป็นตัวที่มีความเหมาะสมมากกว่าการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Roulette Wheel Selection เพราะการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตเพียงอย่างเดียวนั้นมีโอกาสสูงที่จะสุ่มได้สตริงคำตอบที่มีค่า Adjust Fitness น้อย ซึ่งผลการคัดเลือกสตริงคำตอบมีดังนี้

ตารางที่ 4.23 การสร้างค่าวงล้อรูเล็ต

สตริงคำตอบ	Fitness	Adjust Fitness	p_i	q_i
1	1	2	0.2500	0.2500
2	1	2	0.2500	0.5000
3	1	2	0.2500	0.7500
4	2	1	0.1250	0.8750
5	2	1	0.1250	1.0000
รวม		8	1.0000	

ตารางที่ 4.24 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				No. String
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	Selected
1	0.9158	1.0000	5	2	0.8654	0.8750	4	2	5
2	0.8495	0.8750	4	2	0.3512	0.5000	2	1	2
3	0.4810	0.5000	2	1	0.7491	0.7500	3	1	2
4	0.1489	0.2500	1	1	0.9694	1.0000	5	2	1
5	0.7924	0.8750	4	2	0.6653	0.7500	3	1	3

จากผลการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะได้สตริงคำตอบเท่ากับ 5 ตัว คือ สตริงคำตอบหมายเลข 5 2 2 1 และ 3 ซึ่งสตริงคำตอบเหล่านี้จะกลายเป็นสตริงคำตอบหมายเลข 1-5 ในขั้นตอนถัดไป

4.3.8.3 **การครอสโอเวอร์**

นำสตริงคำตอบที่ถูกเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection มาทำการสุ่มเพื่อนำสตริงคำตอบที่สุ่มได้เข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ ซึ่งการสุ่มทำได้โดยสร้างตัวเลขสุ่ม r ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบแต่ละตัว จากนั้นจึงพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่ม r น้อยกว่าค่า P_C ที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.6 เพราะฉะนั้นจะมีสตริงคำตอบประมาณ 60% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือมีสตริงคำตอบโดยเฉลี่ยเท่ากับ $0.6 \times 5 = 3$ ตัว ที่คาดว่าจะถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์

ตารางที่ 4.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์	r_i	$r_i \le 0.6$
1	A C A A B A B C B C C B	0.9848	-
2	A A C C B A B C B C B A	0.3901	Selected
3	A A C C B A B C B C B A	0.2783	Selected
4	A A A B B A C C B C C B	0.0199	-
5	A C A A B B B C B C C A	0.7527	Selected

เนื่องจากจำนวนสตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการครอสโอเวอร์เป็นจำนวนคี่ จึงทำการสุ่มเลข 0 หรือ 1 มาหนึ่งค่า ซึ่งค่าที่สุ่มได้ในที่นี้คือ 0 เราจึงลดสตริงคำตอบลง 1 สตริง โดย

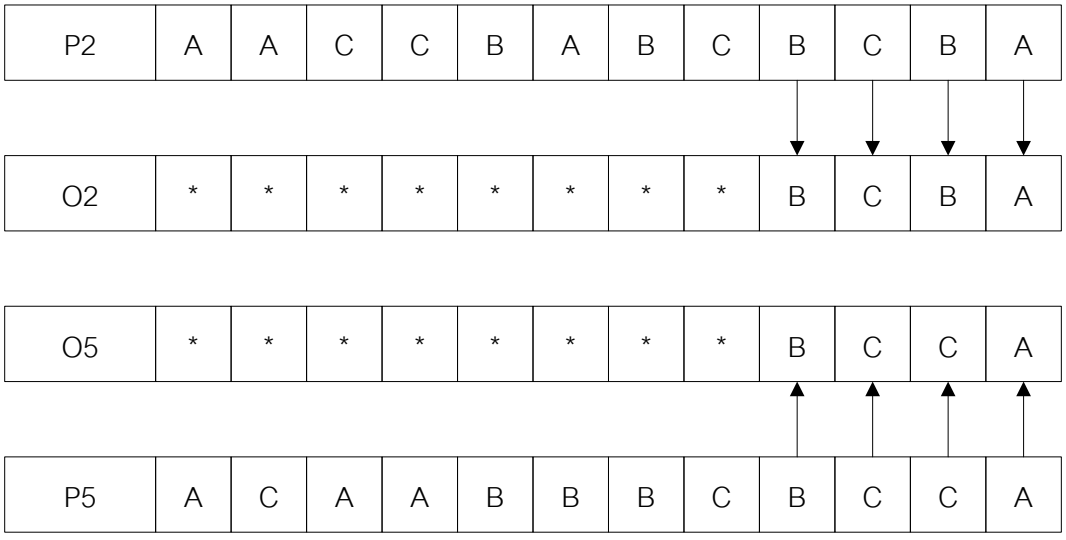
สุ่มจากสตริงคำตอบที่ถูกเลือก (สตริงคำตอบ 2,3 และ 5) ซึ่งเราสุ่มได้สตริงคำตอบที่ 3 ดังนั้น สตริงคำตอบที่ถูกนำไปทำครอสโอเวอร์ คือ สตริงคำตอบที่ 2 และ 5 ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.26 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์	สถานะ
1	A C A A B A B C B C C B	-
2	A A C C B A B C B C B A	Selected
3	A A C C B A B C B C B A	-
4	A A A B B A C C B C C B	-
5	A C A A B B B C B C C A	Selected

จากนั้นให้นำสตริงคำตอบที่ 2 และ 5 ไปครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Modified Order Crossover (modOX) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการสุ่มตัวเลขขึ้นมา 2 ตัว เพื่อสร้างสตริงย่อย ซึ่งตัวเลขสุ่มที่มีค่าน้อยกว่าจะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของสตริงย่อยและตัวเลขสุ่มที่มีค่ามากจะเป็นตำแหน่งสุดท้ายของสตริงย่อย ซึ่งในที่นี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 9 และ 12 จากนั้นจึงคัดลอกสตริงย่อยจากสตริงพ่อแม่ที่ 2 และ 5 (P2 และ P5) มาใส่ในสตริงลูกที่ 2 และ 5 (O2 และ O5) ในตำแหน่งเดียวกันและตำแหน่งที่เหลือเป็นตำแหน่งว่างให้แทนด้วยเครื่องหมาย * ดังนี้

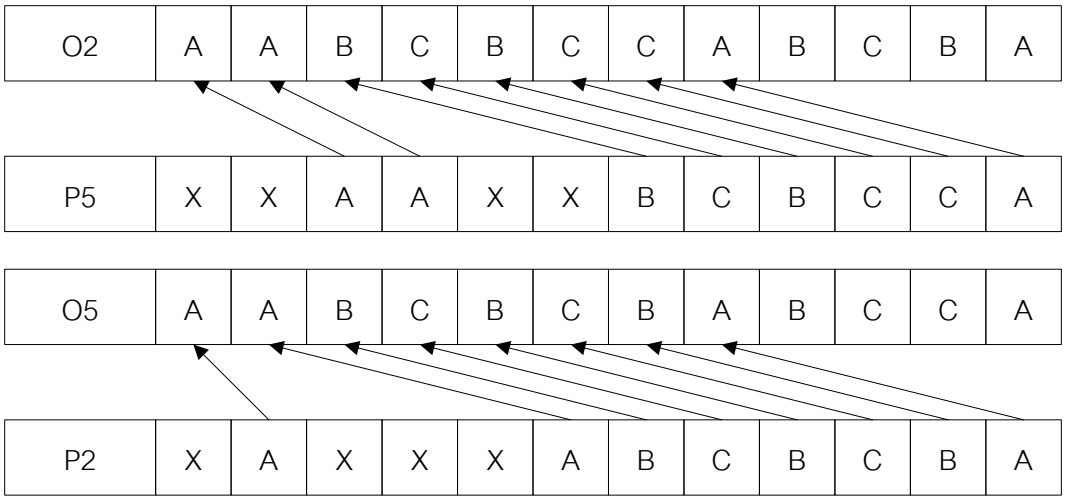


ขั้นตอนที่ 2 ลบค่าใน P5 ที่ซ้ำกับค่าใน O2 และ ลบค่าใน P2 ที่ซ้ำกับค่าใน O5 โดยเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 จนครบทุกค่าที่ซ้ำ และแทนที่ด้วยเครื่องหมาย x ดังนี้

O2	*	*	*	*	*	*	*	*	B	C	B	A
P5	X	X	A	A	X	X	B	C	B	C	C	A

O5	*	*	*	*	*	*	*	*	B	C	C	A
P2	X	A	X	X	X	A	B	C	B	C	B	A

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าที่เหลืออยู่ใน P5 มาแทนที่ * ใน O2 และนำค่าที่เหลือใน P2 มาแทนที่ * ใน O5 ดังนี้



ดังนั้นจึงได้สตริงลูกที่ 2 และ 5 คือ

O2	A	A	B	C	B	C	C	A	B	C	B	A
O5	A	A	B	C	B	C	B	A	B	C	C	A

ตารางที่ 4.27 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	A C A A B A B C B C C B
2	A A B C B C C A B C B A
3	A A C C B A B C B C B A
4	A A A B B A C C B C C B
5	A A B C B C B A B C C A

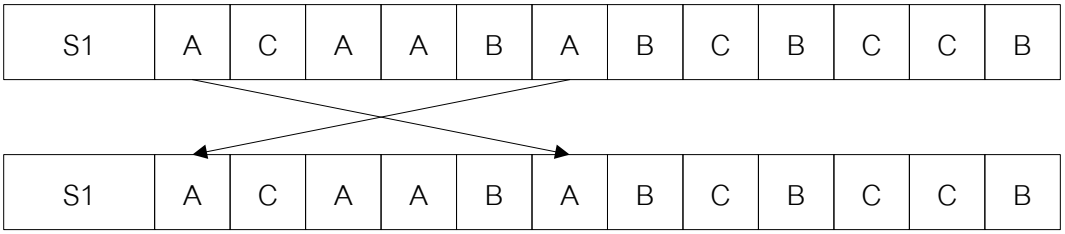
4.3.8.4 **การมิวเตชัน**

จากสตริงคำตอบที่ได้จากกระบวนการครอสโอเวอร์จะมีสตริงคำตอบเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะถูกนำมาทำการมิวเตชัน ซึ่งจำนวนสตริงคำตอบที่จะถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน (Nm) นั้นขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Pm) โดยวิธีการเลือกสตริงคำตอบมาทำการมิวเตชันจะเริ่มจากการสร้างตัวเลขสุ่ม r ที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบแต่ละตัว แล้วพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่ม r น้อยกว่าค่า P_m ที่กำหนดไว้ ซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดไว้เท่ากับ 0.2 เพราะฉะนั้นจะมีจำนวนสตริงคำตอบโดยเฉลี่ยประมาณ 20% ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือประมาณ 0.2x5 = 1 ตัว ที่จะถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน ซึ่งการคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการมิวเตชันได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.28 การคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์	r_i	$r_i < 0.2$
1	A C A A B A B C B C C B	0.0291	Selected
2	A A B C B C C A B C B A	0.6783	-
3	A A C C B A B C B C B A	0.3578	-
4	A A A B B A C C B C C B	0.8849	-
5	A A B C B C B A B C C A	0.4589	-

ดังนั้นสตริงคำตอบตัวที่ 1 จะถูกเลือกให้ทำการมิวเตชัน ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation โดยการมิวเตชันของสตริงคำตอบเริ่มต้นจากการสุ่มเลข 2 ตัว ที่ไม่ซ้ำกันเพื่อใช้เป็นเลขบอกตำแหน่งในสตริงคำตอบ สมมติว่าสุ่มได้เลข 1 และ 6 ดังนั้นจึงสลับค่าในตำแหน่งที่ 1 และ 6 ดังนี้



ภาพที่ 4.8 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 1

หลังการทำมิวเตชันจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 ตัว เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้นและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดของสตริงคำตอบไว้

ตารางที่ 4.29 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
2	A A B C B C B A B C C A
3	A A C C B A B C B C B A
4	A A A B B A C C B C C B
5	A A B C B C C A B C B A
1	A C A A B A B C B C C B

4.3.8.5 **เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด**

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้และป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบต่างๆ เช่น การครอสโอเวอร์และการมิวเตชันสูญหายไป ดังนั้นเราจึงต้องนำสตริงคำตอบเริ่มต้นหรือที่เรียกว่าสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P) และสตริงคำตอบรุ่นลูก (O) มารวมกันและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนสตริงคำตอบเริ่มต้น ดังนี้

ตารางที่ 4.30 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
P	1	A A A B B A C C B C C B
	2	A A C C B A B C B C B A
	3	A C A A B B B C B C C A
	4	A A C B B A B C B C C A
	5	A C A A B A B C B C C B
O	6	A A B C B C B A B C C A
	7	A A C C B A B C B C B A
	8	A A A B B A C C B C C B
	9	A A B C B C C A B C B A
	10	A C A A B A B C B C C B

เมื่อได้นำสตริงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูกเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปคำนวณค่าวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของสตริงคำตอบที่นำการรวมกัน

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
1	556.40	7.67
8	556.40	7.67
6	748.50	6.83
3	594.60	7.50
4	671.40	7.50
2	751.70	6.83
7	751.70	6.83
9	748.50	7.50
5	804.50	6.83
10	804.50	6.83

เมื่อคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการจัดอันดับสตริงคำตอบ โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เหมือนในรอบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.32 ลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Fitness	Crowding Distance
1	556.40	7.67	1	Infinity
8	556.40	7.67	1	Infinity
6	748.50	6.83	1	Infinity
3	594.60	7.50	1	2.0000
4	671.40	7.50	2	Infinity
2	751.70	6.83	2	Infinity
7	751.70	6.83	2	Infinity
9	748.50	7.50	3	Infinity
5	804.50	6.83	3	Infinity
10	804.50	6.83	3	Infinity

เมื่อจัดลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมากและค่า Crowding Distance จากมากไปน้อยเรียบร้อยแล้ว ให้นำสตริงคำตอบที่ได้มาทำการคัดเลือก เพื่อทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ (ค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1) และทำการเก็บสตริงคำตอบจำนวนเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้นเพื่อใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.33 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	A A A B B A C C B C C B
6	A A B C B C C A B C B A
3	A C A A B B B C B C C A

ตารางที่ 4.34 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

สตริงคำตอบ	ผลิตภัณฑ์
1	A A A B B A C C B C C B
6	A A B C B C C A B C B A
3	A C A A B B B C B C C A
4	A A C B B A B C B C C A
2	A A C C B A B C B C B A

4.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเจนเนติกอัลกอริทึม

การนำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเข้ามาช่วยแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว และในพารามิเตอร์แต่ละตัวก็มีให้เลือกหลายค่า ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา แต่ด้วยเวลาและทรัพยากรที่จำกัดจึงไม่สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทดลองได้ทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ 2 วิธี คือ การกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการอ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมาและการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในเจนเนติกอัลกอริทึมมีดังนี้

ตารางที่ 4.35 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน NSGAII

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Non-Dominated Sorting	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
วิธีการครอสโอเวอร์	modOX	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	Pc = 1.0	Chutima and Pinkoompee (2009)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	Pm = 0.1	Chutima and Pinkoompee (2009)

ตารางที่ 4.35 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน NSGAII (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ set 1.1-1.2 60 รอบ สำหรับ set 2.1-2.2 80 รอบ สำหรับ set 3.1-3.2 100 รอบ สำหรับ set 4.1-4.2 500 รอบ สำหรับ set 5.1-5.2 80 รอบ สำหรับ กรณีศึกษา	การทดลอง

4.5 **สรุปท้ายบท**

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดและหลักการของ NSGA-II ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่อาศัยกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural Selection) และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Natural Genetics) ที่มีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูก โดยบทนี้ได้แสดงตัวอย่างการนำ NSGA-II ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ซึ่งสังเกตได้ว่ากระบวนการที่จะนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดนั้น คือ การครอสโอเวอร์ การมิวเตชัน และการเก็บค่าที่ดีที่สุด โดยที่กระบวนการการครอสโอเวอร์และการมิวเตชันเป็นกระบวนการปรับปรุงคำตอบที่มีจุดประสงค์เพื่อทำให้ได้คำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบเดิมจนนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด ส่วนกระบวนการเก็บค่าที่ดีที่สุดนั้นเป็นกระบวนการที่ป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีในระหว่างการค้นหาคำตอบของแต่ละรอบการทำงาน นอกจากนี้ยังมีเรื่องของการกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ NSGA-II ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา ซึ่งถือได้ว่าเป็นเรื่องที่สำคัญเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิการค้นหาคำตอบของ NSGA-II

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) ขั้นตอนการทำงานของ DPSO ตัวอย่างการนำ DPSO ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ DPSO ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

5.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ถูกนำเสนอโดย Kennedy and Eberhart (1995) PSO เป็นวิธีฮิวริสติกหนึ่งที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมธรรมชาติ คือการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของฝูงนก โดยนกแต่ละตัวจะมีการเรียนรู้เส้นทางการหาอาหารจากประสบการณ์ของตนเองและประสบการณ์ของฝูง โดย PSO สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เป็นอย่างดีเพราะสามารถทำให้การค้นหาคำตอบลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว (Eberhart and Kennedy, 1995) หลังจากนั้นมีงานวิจัยของ Liao et al. (2007) ได้พัฒนา PSO ที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop) ที่เรียกว่า Discrete version of Particle Swarm Optimization (DPSO) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำ DPSO มาประยุกต์ใช้กับปัญหาในงานวิจัยนี้ ซึ่งรายละเอียดของวิธี DPSO จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

5.2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องที่นำเสนอมีขั้นตอนการค้นหาคำตอบ 10 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1) Data Input : ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด รอบเวลาการผลิต เวลาการดำเนินงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน แผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว

2) Representation & Initialization : ใช้วิธีการสุ่มสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นขึ้นมา S ฝูง ซึ่งในแต่ละฝูงมีจำนวนสตริงคำตอบ P ตัว

3) Evaluation : นำลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

4) Pareto Based Approach : ใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดโดยเลือกใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (Goldberg, 1989) ในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งวิธี DPSO ได้แบ่งการกำหนดค่าความแข็งแรงออกเป็นสองส่วน คือ การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบในแต่ละฝูงและการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด

5) Selection : หาสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) โดยคัดเลือกจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) ของแต่ละฝูงมาหนึ่งตัว แต่ถ้ามีมากกว่าหนึ่งตัวให้เลือกโดยสุ่มมาเพียงตัวเดียวเท่านั้น จากนั้นจึงทำการหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Gbest) โดยคัดเลือกจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) ของประชากรทั้งหมดมาหนึ่งตัว แต่ถ้ามีมากกว่าหนึ่งตัวให้เลือกโดยสุ่มมาเพียงตัวเดียวเท่านั้น

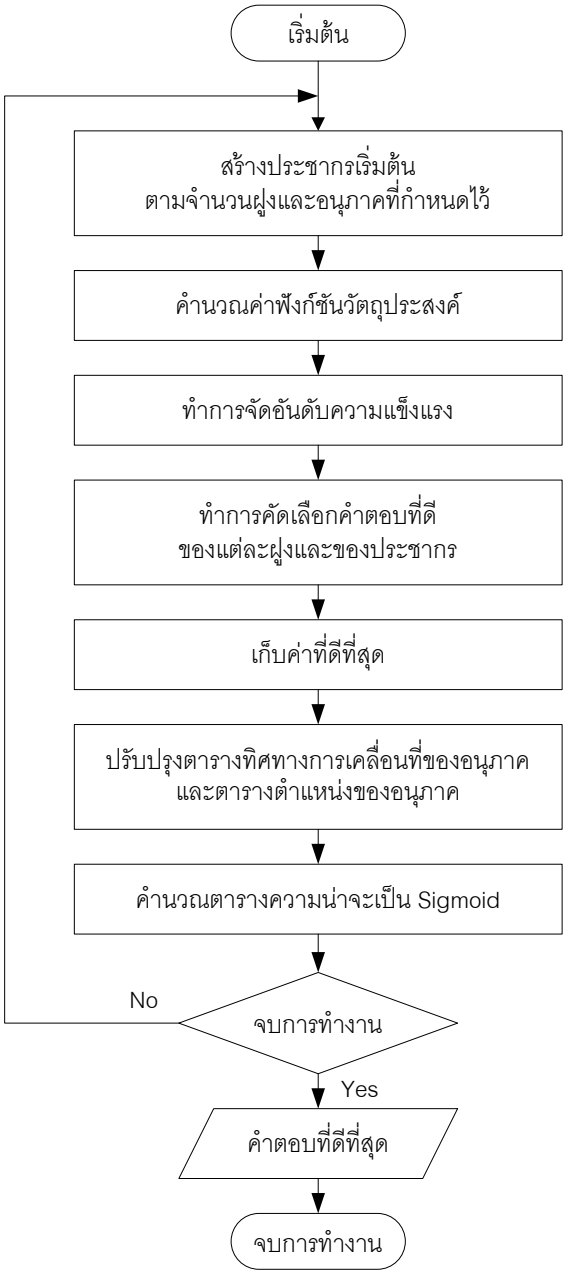
6) Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : นำกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ในรอบนี้ไปรวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่รวมกันไปจัดอันดับด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เข้าสู่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า

7) Update Matrix : ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) โดยใช้สตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Gbest)

8) Compute Sigmoid Matrix : ทำการแปลงค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้เป็นค่าความน่าจะเป็นด้วย Sigmoid Function เพื่อใช้สร้างสตริงคำตอบในรอบถัดไป

9) Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ ซึ่งถ้าจำนวนรอบการทำงานน้อยกว่าจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ใหม่ แต่ถ้าการวนซ้ำครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 10

10) Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำประชากรคำตอบที่ได้ในขั้นตอนที่ 6 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO

5.3 ตัวอย่างการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

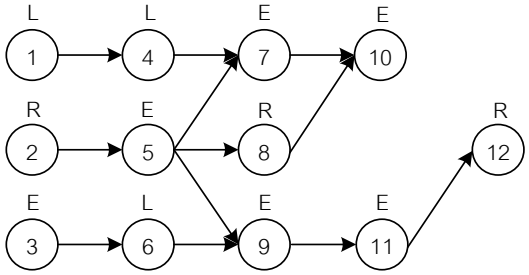
จากหัวข้อก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและขั้นตอนการทำงานของ DPSO ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในขั้นตอนของ DPSO ที่มากขึ้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอด้วยการยกตัวอย่างประกอบไปพร้อมกับการอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.3.1 ข้อมูลนำเข้า

สำหรับปัญหาตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาขั้นตอนการแก้ปัญหาของ DPSO จะเป็นปัญหาขนาดเล็ก ที่มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ A, B และ C มีสัดส่วนของ Minimum Part Set (MPS) เท่ากับ (4:4:4) มีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 12 โดยทำการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบที่มีความสมดุลตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังในปัญหาของ Kim et al. (2000) ที่มีรอบเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 และมีจำนวนขั้นงานการประกอบผลิตภัณฑ์เท่ากับ 12 ขั้นงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.3.1.1 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน

จากรูปลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงานจะทำให้เราทราบเงื่อนไขการทำงานก่อนและหลังของแต่ละขั้นงาน เช่น ขั้นงานที่ 4 จะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อขั้นงานที่ 1 เสร็จแล้ว และทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีงานในแต่ละด้านของสายการประกอบ เช่น ขั้นงานที่ 1 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านซ้ายของสายการประกอบเท่านั้น (Left-side : L) ขั้นงานที่ 2 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านขวาของสายการประกอบเท่านั้น (Right-side : R) ส่วนขั้นงานที่ 3 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านใดของสายการประกอบก็ได้ (Either-side : E) (Kim et al., 2000)



ภาพที่ 5.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง

5.3.1.2 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ

เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน		
	A	B	C
1	2	3	1
2	3	3	3
3	2	0	1
4	3	2	1
5	1	2	3
6	1	0	2
7	3	2	1
8	3	1	2
9	2	1	0
10	2	3	1
11	1	2	3
12	0	1	2

5.3.1.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

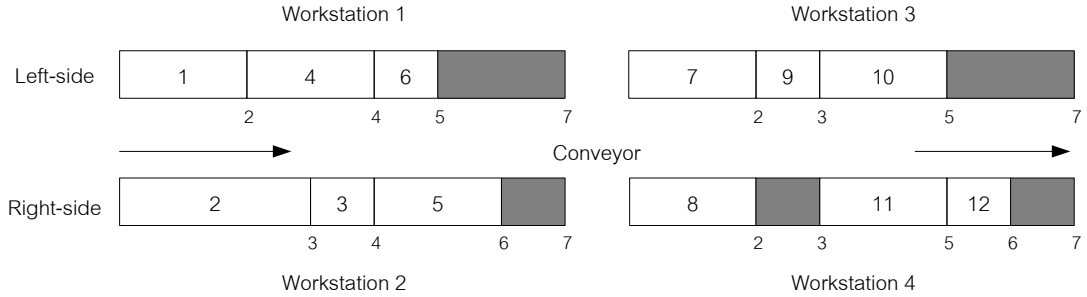
ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

From/To	A	B	C
A	0	7.1	9.5
B	7.3	0	9.8
C	7.6	8.1	0

5.3.1.4 แผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุล

สายการประกอบแบบสองด้านที่ใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการจัดสมดุลตามปัญหาของ Kim et al. (2000) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้วิธีการจัดสมดุลแบบเดียวกับงานวิจัยของปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้



ภาพที่ 5.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน

5.3.1.5 การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์

เมื่อทราบสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะจัดลำดับเข้าสู่สายการประกอบ ให้ทำการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามชนิดผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 การใส่รหัสตำแหน่งให้กับผลิตภัณฑ์

ประเภทสตริงคำตอบ	รหัส											
Product String	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Job String	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

5.3.1.6 พารามิเตอร์ของ DPSO

ในที่นี้กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม DPSO มีดังนี้

- จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarm: P) = 3
- จำนวนฝูง (Number of Swarms: S) = 2
- น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight: w) = 1
- ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor: c_1, c_2) = 0.1

5.3.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับรอบการทำงานที่หนึ่งนี้จะใช้วิธีสุ่มขึ้นมาตามจำนวนที่กำหนดไว้ คือ จำนวนฝูงเท่ากับ 2 ฝูงและในแต่ละฝูงมีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 3 ดังนั้นจึงได้สตริงคำตอบของฝูงที่ s อนุภาคที่ p ดังนี้

ตารางที่ 5.4 สตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
1,2	6	8	5	1	12	2	9	4	10	11	7	3
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
2,2	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12

5.3.3 การประเมินค่า

เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแต่ละสตริงคำตอบ ดังนี้

5.3.3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด สามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้ในบทที่ 2 โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \ \ f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{5.1}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ใน

ลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ

$$Minimize\ \ f_2(x)=\sum_{n_m=1}^{N_m}\left(\sum_{i=1}^{I}U_{i,n_m}+Z_{I+1,n_m}/v_c\right) \tag{5.2}$$

โดยที่

$$U_{i,n_m}=\left\lfloor \begin{array}{l} \max\left[0,\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m-1,m}+Y_{2n_m-1,m}\right)-L_{n_m}\right)/v_c\right]+ \\ \max\left[0,\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m,m}+Y_{2n_m,m}\right)-L_{n_m}\right)/v_c\right] \end{array}\right\rfloor \tag{5.3}$$

$$Z_{i+1,n_m}=\max\left\lfloor \begin{array}{l} \max\left[0,\min\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m-1,m}+Y_{2n_m-1,m}\right)-\gamma v_c,L_{n_m}-\gamma v_c\right)\right], \\ \max\left[0,\min\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m,m}+Y_{2n_m,m}\right)-\gamma v_c,L_{n_m}-\gamma v_c\right)\right] \end{array}\right\rfloor \tag{5.4}$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w}=v_c\times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

ตารางที่ 5.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work
1,1	727.40	7.83
1,2	737.30	8.67
1,3	810.90	9.33
2,1	804.50	6.83
2,2	812.50	6.83
2,3	930.70	7.50

5.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบ

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรง (Dummy Fitness) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Local Best Solution : Lbest) โดยเราจะเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) แต่ถ้ามีสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งตัว ให้ใช้วิธีการสุ่มเลือกสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันมาเพียงฝูงละหนึ่งตัวเท่านั้น ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	727.40	7.83	1	Lbest
1,2	737.30	8.67	2	-
1,3	810.90	9.33	3	-

ตารางที่ 5.7 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
2,1	804.50	6.83	1	Lbest
2,2	812.50	6.83	2	-
2,3	930.70	7.50	3	-

ตารางที่ 5.8 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2.1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6

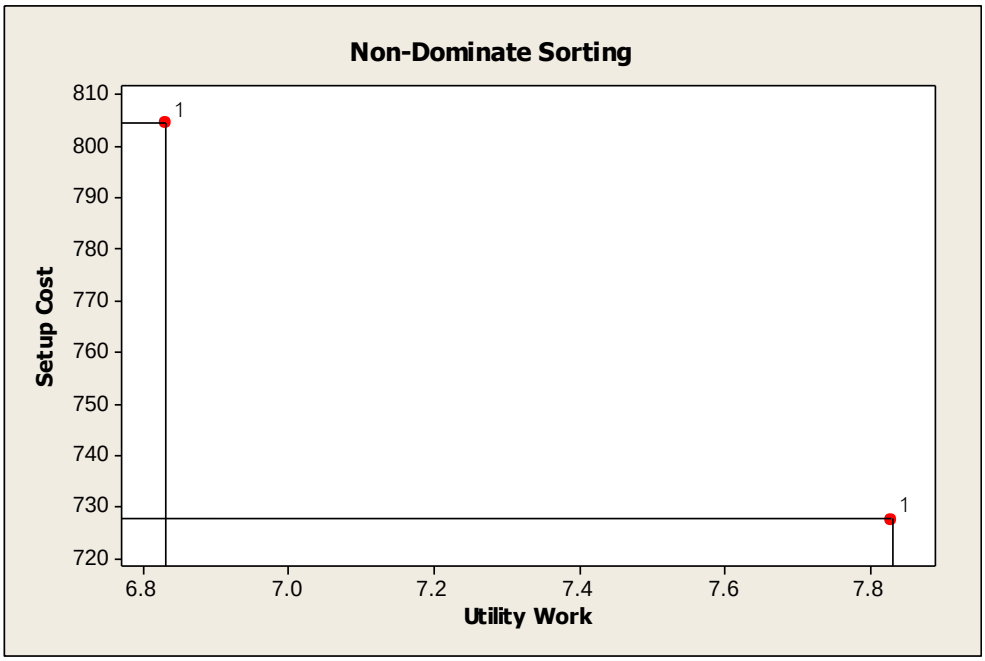
จากนั้นนำสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงมารวมกันและทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution: Gbest) โดยเรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมาก แต่ถ้าสตริงคำตอบมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 จากน้อยไปมาก ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.9 การรวมสตริงคำตอบแต่ละฝูงเข้าด้วยกัน

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2.1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6

ตารางที่ 5.10 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness
1,1	727.40	7.83	1
2,1	804.50	6.83	1



ภาพที่ 5.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร

เนื่องจากมีสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งตัว จึงใช้วิธีการสุ่มเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันมาเพียงหนึ่งตัว ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.11 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	727.40	7.83	1	Gbest
2,1	804.50	6.83	1	-

ตารางที่ 5.12 สตริงคำตอบที่ดีของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String
1,1	5 8 1 3 10 2 11 9 7 12 6 4

5.3.5 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อได้กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (มีค่าเท่ากับ 1) ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

ตารางที่ 5.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6

5.3.6 การปรับปรุงค่าในตาราง

การปรับปรุงค่าในตารางของรอบการทำงานที่ 1 จะเริ่มจากการสร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Position Matrix) ที่มีขนาด $n \times n$ เมื่อ n คือ จำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมด เท่ากับ 12 โดยค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้นจะมีค่าเท่ากับ 0 ทั้งหมด ส่วนค่าในตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งได้จากการแปลงค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) ลงในตารางตำแหน่งของอนุภาคที่เป็นตาราง From-To ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.14 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

Lbest (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2.1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6

ตารางที่ 5.15 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นของฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

ตารางที่ 5.16 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นของฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

เมื่อได้สร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้นและตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นเรียบร้อยแล้ว จึงทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) เพื่อนำไปใช้ในรอบการทำงานถัดไป โดยการปรับปรุงตารางทั้งสองจะพิจารณาจากสมการ $V_{(i,j)}$ และสมการ $X_{(i,j)}$ ตามลำดับ และเมื่อทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเรียบร้อยแล้ว จึงใช้ Sigmoid Function ($s(V_{(i,j)})$) แปลงค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นค่าความน่าจะเป็นเพื่อใช้สำหรับการสร้างสตริงคำตอบในรอบการทำงานถัดไป

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 \left(G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) \tag{5.5}$$

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \tag{5.6}$$

$$s(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(-V_{(i,j)})} \tag{5.7}$$

เมื่อ i คือ รอบการทำงาน

j คือ ฝูงอนุภาคที่ j

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

c_1 และ c_2 คือ ตัวประกอบการเร่ง (Learning Factor)

r_1 และ r_2 คือ ตัวเลขสุ่มในช่วง [0,1]

$P_{(i,j)}$ คือ ค่าตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i

$G_{(i,j)}$ คือ ค่าตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรในรอบการทำงานที่ i

5.3.6.1 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ตามสมการ $V_{(i,j)}$ โดยกำหนดให้ค่า c_1 และ c_2 เท่ากับ 0.1 และค่า w เท่ากับ 1 ส่วนค่าสุ่ม r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 1 สามารถสุ่มค่ามาได้เท่ากับ 0.9134 และ 0.6324 ตามลำดับ และของฝูงที่ 2 สามารถสุ่มค่ามาได้เท่ากับ 0.0975 และ 0.2785 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าต่างๆเหล่านี้ลงในสมการ $V_{(i,j)}$ จึงสามารถเขียนสมการสำหรับการปรับปรุงใหม่ได้ดังสมการด้านล่างนี้ และเมื่อนำสมการดังกล่าวมาทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละฝูงทำให้ได้ผลลัพธ์ดังตารางต่อไปนี้

$$V_{(i,1)} = 1\times V_{(i-1,1)} + 0.1\times 0.9134\left(P_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}\right) + 0.1\times 0.6324\left(G_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}\right) \quad (5.8)$$

$$V_{(i,2)} = 1\times V_{(i-1,2)} + 0.1\times 0.0975\left(P_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}\right) + 0.1\times 0.2785\left(G_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}\right) \quad (5.9)$$

ตารางที่ 5.17 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5.18 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-0.2785	0	0	0.2785	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	-0.2785	0	0	0	0	0	0	0	0.2785
5	0.2785	0	0	0	0	0	-0.2785	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2785	-0.2785
7	0	0	0	0	-0.2785	0	0	0	0.2785	0	0	0
8	0	0.2785	0	0	0	0	0	0	-0.2785	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0.2785	0	-0.2785	0	0
10	0	-0.2785	0	0	0.2785	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0.2785	-0.2785	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2785	-0.2785	0

5.3.6.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) แต่ละฝูง ด้วยสมการ $X_{(i,j)}$ ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 5.19 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

ตารางที่ 5.20 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0.7215	0	0	0.2785	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0.7215	0	0	0	0	0	0	0	0.2785
5	0.2785	0	0	0	0	0	0.7215	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2785	0.7215
7	0	0	0	0	0.7215	0	0	0	0.2785	0	0	0
8	0	0.2785	0	0	0	0	0	0	0.7215	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0.2785	0	0.7215	0	0
10	0	0.7215	0	0	0.2785	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0.2785	0.7215	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2785	0.7215	0

5.3.7 **การสร้างตารางความน่าจะเป็นด้วย** Sigmoid Function

เนื่องจากการสร้างสตริงคำตอบในรอบการทำงานถัดไปจะสร้างขึ้นโดยวิธีสุ่ม เราจึงทำการแปลงค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการ Sigmoid Function ทำให้ได้ค่าความน่าจะเป็นสำหรับการสร้างสตริงคำตอบของแต่ละฝูงในรอบการทำงานถัดไปดังนี้

ตารางที่ 5.21 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.5	0.5	0.5	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	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	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	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	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	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	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	0.5	0.5	0.5	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตารางที่ 5.22 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.5	0.5	0.5	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	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0.4308	0.5	0.5	0.5692	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4	0.5	0.5	0.5	0.4308	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5692
5	0.5692	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4308	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	0.5	0.5	0.5692	0.4308
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4308	0.5	0.5	0.5	0.5692	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5692	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4308	0.5	0.5	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5692	0.5	0.4308	0.5	0.5
10	0.5	0.4308	0.5	0.5	0.5692	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5692	0.4308	0.5	0.5	0.5	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5692	0.4308	0.5

5.3.8 การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

เริ่มจากการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นสำหรับรอบการทำงานที่ 2 ซึ่งจะสร้างขึ้นโดยวิธีสุ่มให้ได้สตริงคำตอบตามจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงที่ได้กำหนดไว้ คือ จำนวนฝูงเท่ากับ 2 ฝูง และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 3 อนุภาค โดยการสุ่มจะใช้ค่าความน่าจะเป็นจากตาราง Sigmoid ที่ได้คำนวณไว้ในรอบการทำงานก่อนหน้า ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบทั้งหมด 6 สตริงคำตอบ ดังนี้

ตารางที่ 5.23 สตริงคำตอบของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7
1,2	5	3	1	2	10	9	4	6	12	8	7	11
1,3	1	3	7	5	2	6	9	8	11	12	4	10
2,1	12	4	8	6	5	10	2	1	11	3	9	7
2,2	12	2	11	7	10	9	6	1	3	8	4	5
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10

5.3.8.1 การประเมินค่า

เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด ซึ่งได้ผลจากการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 5.24 ค่าจากการคำนวณทั้ง 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work
1,1	655.10	6.83
1,2	674.90	7.83
1,3	724.20	8.33
2,1	780.00	7.17
2,2	801.00	7.50
2,3	895.20	8.33

จากนั้นจึงนำไปพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงเพื่อทำการคัดเลือกหาสตริงคำตอบ Lbest และ Gbest ในขั้นตอนถัดไป

5.3.8.2 การกำหนดค่าความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบ

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรง (Dummy Fitness) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest) โดยเราจะเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) แต่ถ้ามีสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งตัว ให้ใช้วิธีการสุ่มเลือกสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันมาเพียงฝูงละหนึ่งตัวเท่านั้น ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	655.10	6.83	1	Lbest
1,2	674.90	7.83	2	-
1,3	724.20	8.33	3	-

ตารางที่ 5.26 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
2,1	780.00	7.17	1	Lbest
2,2	801.00	7.50	2	-
2,3	895.20	8.33	3	-

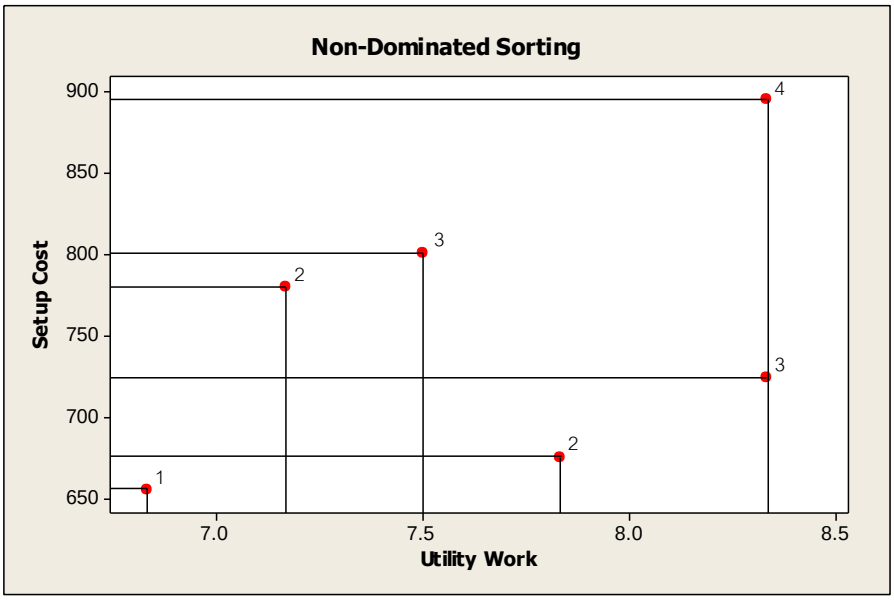
ตารางที่ 5.27 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

Lbest (s, p)	Position String											
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7
2,1	12	4	8	6	5	10	2	1	11	3	9	7

จากนั้นนำสตริงคำตอบของแต่ละฝูงมารวมกันและทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution : Gbest) โดยเรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าความแข็งแรงจากน้อยไปมาก แต่ถ้าสตริงคำตอบมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 จากน้อยไปมาก ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.28 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness
1,1	655.10	6.83	1
1,2	674.90	7.83	2
2,1	780.00	7.17	2
1,3	724.20	8.33	3
2,2	801.00	7.50	3
2,3	895.20	8.33	4



ภาพที่ 5.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร

เนื่องจากมีสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ตัว จึงไม่ต้องใช้วิธีการสุ่มเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.29 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	655.10	6.83	1	Gbest

ตารางที่ 5.30 สตริงคำตอบที่ดีของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String
1,1	11 9 1 4 6 5 2 3 10 8 12 7

5.3.8.3 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

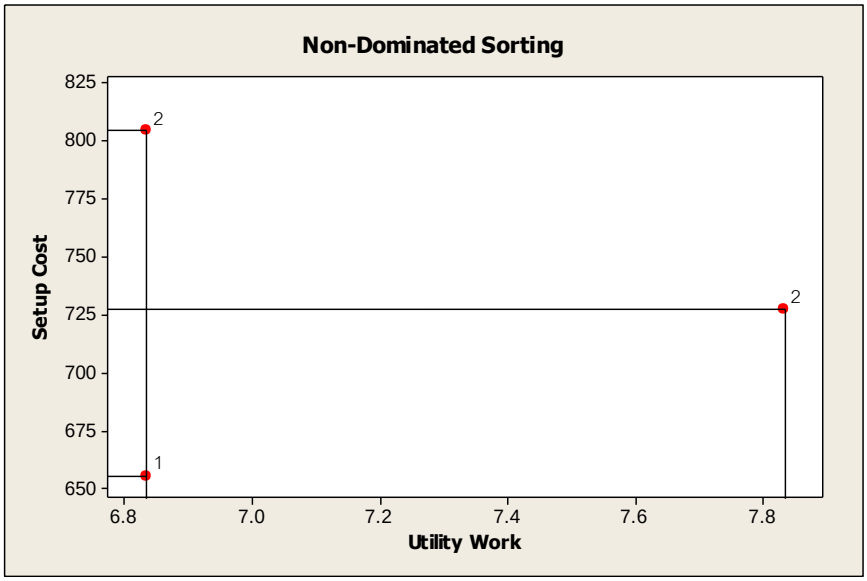
เมื่อเราได้กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงนำสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มารวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานก่อนหน้า แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่นำมารวมกันด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 แทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.31 การรวมสตริงคำตอบเพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1 (รอบที่ 1)	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2,1 (รอบที่ 1)	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
1,1 (รอบที่ 2)	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7

ตารางที่ 5.32 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1 (รอบที่ 2)	655.10	6.83	1	Selected
1,1 (รอบที่ 1)	727.40	7.83	2	-
2,1 (รอบที่ 1)	804.50	6.83	2	-



ภาพที่ 5.6 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของค่าที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5.33 กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1 (รอบที่ 2)	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7

5.3.8.4 การปรับปรุงค่าในตาราง

จากขั้นตอนการกำหนดค่าความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบ ผลที่ได้คือ สตริงคำตอบที่เป็น Lbest ของแต่ละฝูง และสตริงคำตอบที่เป็น Gbest ของประชากรทั้งหมด จากนั้นจึงทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) เพื่อนำไปใช้ในรอบการทำงานถัดไป ซึ่งการปรับปรุงตารางทั้งสองจะพิจารณาจากสมการ $V_{(i,j)}$ และสมการ $X_{(i,j)}$ ตามลำดับ และเมื่อทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเรียบร้อยแล้ว จึงใช้ Sigmoid Function แปลงค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้เป็นค่าความน่าจะเป็น เพื่อใช้สำหรับสร้างสตริงคำตอบในรอบการทำงานถัดไป

ก. การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ด้วยสมการ $V_{(i,j)}$ โดยกำหนดให้ค่า c_1 และ c_2 เท่ากับ 0.1 และค่า w เท่ากับ 1 ส่วนค่าสุ่ม r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 1 สามารถสุ่มค่ามาได้เท่ากับ 0.1576 และ 0.9706 ตามลำดับ และของฝูงที่ 2 สามารถสุ่มค่ามาได้เท่ากับ 0.9572 และ 0.4854 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าต่างๆเหล่านี้ลงในสมการ $V_{(i,j)}$ จึงสามารถเขียนสมการสำหรับการปรับปรุงใหม่ได้ดังสมการด้านล้างนี้ และเมื่อนำสมการดังกล่าวมาทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละฝูงทำให้ได้ผลลัพธ์ดังตารางต่อไปนี้

$$V_{(i,1)} = 1\times V_{(i-1,1)} + 0.1\times 0.1576\left(P_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}\right) + 0.1\times 0.9706\left(G_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}\right) \quad (5.10)$$

$$V_{(i,2)} = 1\times V_{(i-1,2)} + 0.1\times 0.9572\left(P_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}\right) + 0.1\times 0.4854\left(G_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}\right) \quad (5.11)$$

ตารางที่ 5.34 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	-1.1282	1.1282	0	0	0	0	0
3	0	0	0	-1.1282	0	0	0	1.1282	0	0	0	0
4	0	0	0	1.1282	0	0	0	0	0	0	0	-1.1282
5	-1.1282	0	0	0	0	1.1282	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1.1282	0	0	0	0	0	-1.1282	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.1282	0	0	1.1282
8	0	-1.1282	0	0	0	0	0	0	0	1.1282	0	0
9	0	1.1282	0	0	0	0	0	-1.1282	0	0	0	0
10	0	0	0	0	-1.1282	0	0	0	1.1282	0	0	0
11	1.1282	0	0	0	0	0	-1.1282	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.1282	1.1282	0

ตารางที่ 5.35 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	-0.9572	0	0	0	0	0.9572	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	-1.4425	1.4425	0	0	0	0	0
3	-1.3193	0	0	-0.1232	0	0	0	0.4854	0	0.9572	0	0
4	0	0.9572	0	-0.8339	0	0	0	0	0	0	0	-0.1232
5	-0.1232	0	0	0	0.9572	0.4854	-1.3193	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0.9572	0.4854	0	0	0	0	0	-0.1232	-1.3193
7	0	0	0	0	-1.3193	0	0	0	-0.1232	0	0	1.4425
8	0	-0.1232	0.9572	0	0	0	0	0	-1.3193	0.4854	0	0
9	0	0.4854	0	0	0	0	0	-0.1232	0	-1.3193	0.9572	0
10	0	-1.3193	0	0	-0.1232	0.9572	0	0	0.4854	0	0	0
11	0.4854	0	0	0	0	0	-0.1232	-1.3193	0.9572	0	0	0
12	0.9572	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1232	-0.8339	0

ข. การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) แต่ละฝูง ด้วยสมการ $X_{(i,j)}$ ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 5.36 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	-0.1282	1.1282	0	0	0	0	0
3	0	0	0	-0.1282	0	0	0	1.1282	0	0	0	0
4	0	0	0	1.1282	0	0	0	0	0	0	0	-0.1282
5	-0.1282	0	0	0	0	1.1282	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1.1282	0	0	0	0	0	-0.1282	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1282	0	0	1.1282
8	0	-0.1282	0	0	0	0	0	0	0	1.1282	0	0
9	0	1.1282	0	0	0	0	0	-0.1282	0	0	0	0
10	0	0	0	0	-0.1282	0	0	0	1.1282	0	0	0
11	1.1282	0	0	0	0	0	-0.1282	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1282	1.1282	0

ตารางที่ 5.37 ตารางตำแหน่งของอนุภาคฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0.0428	0	0	0	0	0.9572	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	-0.4425	1.4425	0	0	0	0	0
3	-0.5978	0	0	0.1553	0	0	0	0.4854	0	0.9572	0	0
4	0	0.9572	0	-0.1124	0	0	0	0	0	0	0	0.1553
5	0.1553	0	0	0	0.9572	0.4854	-0.5978	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0.9572	0.4854	0	0	0	0	0	0.1553	-0.5978
7	0	0	0	0	-0.5978	0	0	0	0.1553	0	0	1.4425
8	0	0.1553	0.9572	0	0	0	0	0	-0.5978	0.4854	0	0
9	0	0.4854	0	0	0	0	0	0.1553	0	-0.5978	0.9572	0
10	0	-0.5978	0	0	0.1553	0.9572	0	0	0.4854	0	0	0
11	0.4854	0	0	0	0	0	0.1553	-0.5978	0.9572	0	0	0
12	0.9572	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1553	-0.1124	0

5.3.8.5 **การสร้างตารางความน่าจะเป็นด้วย** Sigmoid Function

เนื่องจากการสร้างสตริงคำตอบในรอบการทำงานถัดไปจะสร้างขึ้นโดยวิธีสุ่ม เราจึงทำการแปลงค่าในตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการ Sigmoid Function ทำให้ได้ค่าความน่าจะเป็นสำหรับการสร้างสตริงคำตอบของแต่ละฝูงในรอบการทำงานถัดไปดังนี้

ตารางที่ 5.38 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.5	0.5	0.5	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	0.2872	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.5	0.5	0.5	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5
4	0.5	0.5	0.5	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872
5	0.2872	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.5
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.5	0.5	0.7128
8	0.5	0.2872	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7128	0.5	0.5
9	0.5	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.5	0.5	0.5	0.7128	0.5	0.5	0.5
11	0.7128	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.2872	0.7128	0.5

ตารางที่ 5.39 ตาราง Sigmoid ฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.5	0.4084	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5916	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3257	0.6743	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	0.4125	0.5	0.5	0.4076	0.5	0.5	0.5	0.5883	0.5	0.5916	0.5	0.5
4	0.5	0.5916	0.5	0.5009	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4076
5	0.4076	0.5	0.5	0.5	0.5916	0.5883	0.4125	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5916	0.5883	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4076	0.4125
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4125	0.5	0.5	0.5	0.4076	0.5	0.5	0.6743
8	0.5	0.4076	0.5916	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4125	0.5883	0.5	0.5
9	0.5	0.5883	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4076	0.5	0.4125	0.5916	0.5
10	0.5	0.4125	0.5	0.5	0.4076	0.5916	0.5	0.5	0.5883	0.5	0.5	0.5
11	0.5883	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4076	0.4125	0.5916	0.5	0.5	0.5
12	0.5916	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4076	0.5009	0.5

5.4 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้คุณภาพคำตอบหรือประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยมากที่สุด โดยพารามิเตอร์ของ DPSO ที่ผู้วิจัยสนใจนำมาทำการทดสอบได้แก่ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 5.40 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ DPSO ที่จะทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ปัจจัยที่ 1 จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง $(S-P)$	ระดับที่ 1 (4-25) ระดับที่ 2 (5-20) ระดับที่ 3 (10-10)

สำหรับรูปแบบการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การทดลองแบบ Full Factorial Design โดยมีจำนวนการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละการทดลองเท่ากับ 2 ครั้ง มีจำนวนปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว มีระดับปัจจัยเท่ากับ 3 ระดับ และมีปัญหาการทดลองเท่ากับ 11 ปัญหา ดังนั้นในบทนี้จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2x3x11 = 66 ครั้ง โดยจะใช้ตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาในการคำนวณ (Computation Time to Solution) ทั้งนี้ก็เพื่อให้บรรลุเป้าหมายทั้งสองด้านของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ กลุ่มคำตอบที่ได้ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและสมาชิกคำตอบภายในกลุ่มมีความหลากหลายมากที่สุด เมื่อออกแบบการทดลองเรียบร้อยแล้วจึงนำผลการทดลองทั้งหมดของ DPSO ไปวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาการทดลอง

5.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองของ DPSO มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

ขั้นตอนที่ 1 ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ถ้าสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่ามีระดับปัจจัยเพียงระดับเดียวที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 0) เราจึงกำหนดให้ระดับปัจจัยนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าไม่สามารถสรุปได้ว่าระดับปัจจัยใดให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด เราจะนำปัจจัยนั้นไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 2 ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ถ้าสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่ามีระดับ

ปัจจัยเพียงระดับเดียวที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 0) เราจึงกำหนดให้ระดับปัจจัยนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าไม่สามารถสรุปได้ว่าระดับปัจจัยใดให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด เราจะนำปัจจัยนั้นไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ถ้าสรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่ามีระดับปัจจัยเพียงระดับเดียวที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 1) เราจึงกำหนดให้ระดับปัจจัยนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าไม่สามารถสรุปได้ว่าระดับปัจจัยใดให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด เราจะนำปัจจัยนั้นไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 4 ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวชี้วัดด้านเวลาในการค้นหาคำตอบเป็นตัวแปรตอบสนอง และทำการเลือกระดับของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าน้อยที่สุดเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

จากการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 1-3 จะใช้วิธีการทางสถิติมาทำการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อสรุปได้ว่าปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง ให้นำปัจจัยนั้นไปทำการวิเคราะห์คู่ลำดับเพื่อหาระดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองและแตกต่างไปจากระดับปัจจัยอื่น ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ปารเมศ ชุติมา, 2545) ส่วนการทดสอบพารามิเตอร์ในขั้นตอนที่ 4 จะทำการวิเคราะห์หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยการพิจารณาเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ตัวชี้วัดด้านเวลาในการคำนวณมีค่าน้อยที่สุด

5.5.1 **การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 1.1**

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหาการทดลองจะพิจารณาจากการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้ DPSO สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0003111	0.0001556	8.27	0.060
Error	3	0.0000564	0.0000188		
Total	5	0.0003676			

S = 0.004338 R-Sq = 84.64% R-Sq(adj) = 74.41%

ภาพที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.02036	0.01018	1.06	0.450
Error	3	0.02895	0.00965		
Total	5	0.04931			

S = 0.09823 R-Sq = 41.29% R-Sq(adj) = 2.16%

ภาพที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0298	0.0149	0.66	0.579
Error	3	0.0679	0.0226		
Total	5	0.0978			

S = 0.1505 R-Sq = 30.51% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 1.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000144	0.000072	0.29	0.765
Error	3	0.000735	0.000245		
Total	5	0.000878			

S = 0.01565 R-Sq = 16.37% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0099	0.0050	0.31	0.755
Error	3	0.0482	0.0161		
Total	5	0.0581			

S = 0.1267 R-Sq = 17.05% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0539	0.0269	1.70	0.321
Error	3	0.0476	0.0159		
Total	5	0.1015			

S = 0.1259 R-Sq = 53.10% R-Sq(adj) = 21.83%

ภาพที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 2.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000127	0.000064	0.59	0.607
Error	3	0.000323	0.000108		
Total	5	0.000450			

S = 0.01037 R-Sq = 28.29% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.00086	0.00043	0.07	0.936
Error	3	0.01920	0.00640		
Total	5	0.02006			

S = 0.08001 R-Sq = 4.28% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0534	0.0267	0.86	0.506
Error	3	0.0929	0.0310		
Total	5	0.1463			

S = 0.1760 R-Sq = 36.50% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.4 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 2.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000135	0.000068	0.15	0.868
Error	3	0.001370	0.000457		
Total	5	0.001505			

S = 0.02137 R-Sq = 8.97% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.01496	0.00748	1.37	0.378
Error	3	0.01641	0.00547		
Total	5	0.03137			

S = 0.07396 R-Sq = 47.69% R-Sq(adj) = 12.81%

ภาพที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0334	0.0167	1.23	0.406
Error	3	0.0406	0.0135		
Total	5	0.0741			

S = 0.1164 R-Sq = 45.14% R-Sq(adj) = 8.56%

ภาพที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัว

แปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 3.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.002142	0.001071	3.26	0.177
Error	3	0.000985	0.000328		
Total	5	0.003127			

S = 0.01812 R-Sq = 68.49% R-Sq(adj) = 47.49%

ภาพที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.00410	0.00205	1.12	0.434
Error	3	0.00550	0.00183		
Total	5	0.00961			

S = 0.04283 R-Sq = 42.71% R-Sq(adj) = 4.52%

ภาพที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.1088	0.0544	1.85	0.299
Error	3	0.0880	0.0293		
Total	5	0.1968			

S = 0.1712 R-Sq = 55.28% R-Sq(adj) = 25.47%

ภาพที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.6 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 3.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0001271	0.0000635	1.13	0.430
Error	3	0.0001679	0.0000560		
Total	5	0.0002950			

S = 0.007482 R-Sq = 43.07% R-Sq(adj) = 5.12%

ภาพที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.02314	0.01157	2.27	0.251
Error	3	0.01527	0.00509		
Total	5	0.03841			

S = 0.07135 R-Sq = 60.24% R-Sq(adj) = 33.73%

ภาพที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.07322	0.03661	5.81	0.093
Error	3	0.01890	0.00630		
Total	5	0.09211			

S = 0.07936 R-Sq = 79.49% R-Sq(adj) = 65.81%

ภาพที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่

ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.7 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 4.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000236	0.000118	0.68	0.569
Error	3	0.000517	0.000172		
Total	5	0.000753			

S = 0.01313 R-Sq = 31.32% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.02441	0.01221	3.91	0.146
Error	3	0.00937	0.00312		
Total	5	0.03378			

S = 0.05587 R-Sq = 72.27% R-Sq(adj) = 53.79%

ภาพที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0532	0.0266	0.40	0.700
Error	3	0.1985	0.0662		
Total	5	0.2516			

S = 0.2572 R-Sq = 21.13% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.8 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 4.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.001080	0.000540	3.57	0.161
Error	3	0.000453	0.000151		
Total	5	0.001533			

S = 0.01229 R-Sq = 70.43% R-Sq(adj) = 50.72%

ภาพที่ 5.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.02467	0.01234	1.33	0.386
Error	3	0.02786	0.00929		
Total	5	0.05253			

S = 0.09636 R-Sq = 46.97% R-Sq(adj) = 11.61%

ภาพที่ 5.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.301	0.150	1.49	0.355
Error	3	0.302	0.101		
Total	5	0.603			

S = 0.3173 R-Sq = 49.91% R-Sq(adj) = 16.51%

ภาพที่ 5.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่

ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.9 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 5.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000413	0.000206	0.64	0.586
Error	3	0.000965	0.000322		
Total	5	0.001378			

S = 0.01794 R-Sq = 29.95% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.31 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.006393	0.003197	3.59	0.160
Error	3	0.002670	0.000890		
Total	5	0.009063			

S = 0.02983 R-Sq = 70.54% R-Sq(adj) = 50.90%

ภาพที่ 5.32 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

```
Source  DF       SS       MS      F      P
model    2  0.17324  0.08662  10.77  0.043
Error    3  0.02413  0.00804
Total    5  0.19738

S = 0.08969   R-Sq = 87.77%   R-Sq(adj) = 79.62%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  --+---------+---------+---------+-------
1      2  0.56087  0.05534                     (---------*---------)
2      2  0.16795  0.14323  (---------*---------)
3      2  0.48333  0.02357                (---------*---------)
                          --+---------+---------+---------+-------
                          0.00      0.20      0.40      0.60

Pooled StDev = 0.08969
```

ภาพที่ 5.33 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 1 และ 3 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองไม่แตกต่างกัน จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.10 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 5.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.001367	0.000684	2.19	0.260
Error	3	0.000938	0.000313		
Total	5	0.002306			

S = 0.01769 R-Sq = 59.30% R-Sq(adj) = 32.17%

ภาพที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0019	0.0009	0.05	0.950
Error	3	0.0535	0.0178		
Total	5	0.0554			

S = 0.1336 R-Sq = 3.39% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.35 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0776	0.0388	0.70	0.563
Error	3	0.1664	0.0555		
Total	5	0.2440			

S = 0.2355 R-Sq = 31.80% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.36 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.5.11 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000153	0.000077	0.76	0.540
Error	3	0.000302	0.000101		
Total	5	0.000455			

S = 0.01003 R-Sq = 33.70% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.00304	0.00152	0.57	0.617
Error	3	0.00800	0.00267		
Total	5	0.01105			

S = 0.05165 R-Sq = 27.55% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.38 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0404	0.0202	1.86	0.299
Error	3	0.0327	0.0109		
Total	5	0.0731			

S = 0.1043 R-Sq = 55.31% R-Sq(adj) = 25.52%

ภาพที่ 5.39 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่

ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

5.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน DPSO

การนำ DPSO เข้ามาช่วยแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่า ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ใน DPSO มีดังนี้

ตารางที่ 5.41 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน DPSO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
จำนวนฝูง	4	การทดลอง
จำนวนอนุภาคในฝูง	25	การทดลอง
Cognitive Component	$c_1 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
Social Component	$c_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
น้ำหนักความหน่วง	w = 0.1	Salman et al. (2002)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ set 1.1-1.2 60 รอบ สำหรับ set 2.1-2.2 80 รอบ สำหรับ set 3.1-3.2 100 รอบ สำหรับ set 4.1-4.2 500 รอบ สำหรับ set 5.1-5.2 80 รอบ สำหรับ กรณีศึกษา	การทดลอง

5.7 **สรุปท้ายบท**

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดและหลักการของ DPSO ที่มาจากการเลียนแบบพฤติกรรมธรรมชาติ คือการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของฝูงนก โดยนกแต่ละตัวจะมีการเรียนรู้เส้นทางการหาอาหารจากประสบการณ์ของตนเองและประสบการณ์ของฝูง และเมื่อนำ DPSO ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน เราจะใช้คำตอบแทนนกแต่ละตัวและกลุ่มคำตอบแทนฝูงนก และใช้หลักการเคลื่อนที่ ที่เรียกว่า Velocity สำหรับกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่คำตอบที่อิงมาจากตำแหน่งที่ดีที่สุดของกลุ่มคำตอบย่อย (Local Best Solution : Lbest) และตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง (Global Best Solution : Gbest) เป็นตัวขับเคลื่อนคำตอบไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีเรื่องของการกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ DPSO ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา ซึ่งถือได้ว่าเป็นเรื่องที่สำคัญเพราะค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิการค้นหาคำตอบของ DPSO

บทที่ 6
การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge: PSONK) ขั้นตอนการทำงานของ PSONK และตัวอย่างการนำ PSONK ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

6.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ

จากวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งเป็นฮิวริสติกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดได้เป็นอย่างดี โดย Kennedy and Eberhart (2001) ได้แสดงให้เห็นว่า PSO สามารถค้นหาคำตอบที่มีวัตถุประสงค์เดียวให้ลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงสนใจนำแนวคิดของ PSO มาประยุกต์ร่วมกับแนวคิดความรู้เชิงลบ (Negative Knowledge) หรือวิธีการบรรจวบ (COIN) โดย นพพล คำภิรมย์ (2552) ได้สรุปผลไว้ว่า COIN เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ เพราะสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการจดจำลักษณะตำแหน่งของคู่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ติดกันซึ่งส่งผลให้สตริงคำตอบมีคำตอบที่ดีที่สุดและยังตัดทอนการจดจำลักษณะตำแหน่งของคู่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ติดกันซึ่งส่งผลให้สตริงคำตอบที่ไม่ดีไม่ให้เกิดขึ้นในเจนเนอเรชั่นถัดไป ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยขั้นตอนการทำงานที่สำคัญของ PSONK คือ ขั้นตอนการปรับปรุงค่าในตารางความน่าจะเป็น เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของคำตอบที่ค้นพบหรือเป็นกระบวนการที่นำไปสู่การค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อมีการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดีที่ได้จากฝูงย่อยและจากประชากร (Local Best Solution : Lbest และ Global Best Solution : Gbest) จะเป็นการเพิ่มโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่ดีในรอบการทำงานถัดไป และมีการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ที่ได้จากฝูงย่อยและจากประชากร (Local Worst Solution : Lworst และ Global Worst Solution : Gworst) ซึ่งเป็นการลดโอกาสเกิดสตริงคำตอบ

ที่แย่ในรอบการทำงานถัดไป การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางจะทำการปรับปรุงทั้งหมด 3 ตาราง ได้แก่ ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) จากนั้นจึงนำตารางความน่าจะเป็นที่ได้ไปสร้างสตริงคำตอบสำหรับรอบการทำงานถัดไป

6.2 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบสำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบที่นำเสนอมีขั้นตอนการค้นหาคำตอบ 9 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1) **Data Input** : ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด รอบเวลาการผลิต เวลาการดำเนินงาน ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน แผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)
2) **Representation & Initialization** : ทำการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มขึ้นมา S ฝูง ซึ่งในแต่ละฝูงมีจำนวนสตริงคำตอบ P ตัว โดยใช้ค่าในตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกสำหรับการสุ่มเลือกงานแรก และใช้ค่าในตารางความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการสุ่มเลือกงานในลำดับอื่นๆ (งาน คือ ผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่จะทำการผลิต เช่น งานที่หนึ่ง คือ ผลิตภัณฑ์ A งานที่สอง คือ ผลิตภัณฑ์ B งานที่สาม คือ ผลิตภัณฑ์ A และงานที่ 4 คือ ผลิตภัณฑ์ C เราจึงเขียนให้อยู่ในรูปของลำดับการผลิตได้ดังนี้ ABAC)
3) **Evaluation** : นำลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด
4) **Pareto Based Approach** : ใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยเลือกใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (Goldberg, 1989) ในการกำหนดค่าความแข็งแรง

ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งวิธี PSONK ได้แบ่งการกำหนดค่าความแข็งแรงออกเป็นสองส่วน คือ การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบในแต่ละฝูงและการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด

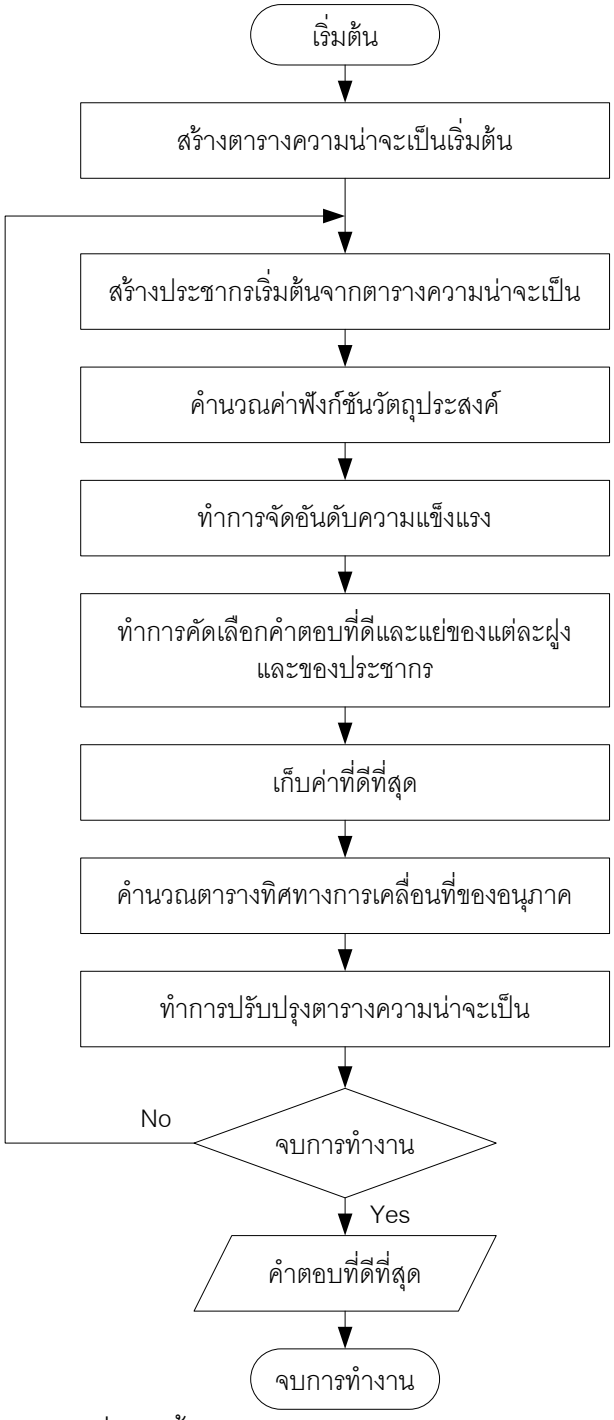
5) **Selection** : การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูง (Lbest และ Lworst) โดยที่ Lbest สามารถพิจารณาได้จากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) ของแต่ละฝูง และ Lworst สามารถพิจารณาได้จากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) ของแต่ละฝูง จากนั้นจึงทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรทั้งหมด (Gbest และ Gworst) โดยที่ Gbest สามารถพิจารณาได้จากสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดของประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด และ Gworst สามารถพิจารณาได้จากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดของประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด

6) **Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population** : นำกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ในรอบนี้ไปรวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่รวมกันไปจัดอันดับด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เข้าสู่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า

7) **Update Probability Matrix** : ปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งในตารางซึ่งเป็นตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดีและลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งในตารางซึ่งเป็นตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ จากนั้นจึงนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้มาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เพื่อใช้สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของรอบการทำงานถัดไป

8) **Stopping Criteria** : ทำการวนซ้ำจนครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนรอบการทำงานปัจจุบันยังน้อยกว่าจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนด ให้กลับไปทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 7 ซ้ำ แต่ถ้าการวนซ้ำครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 9

9) **Stop** : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำประชากรคำตอบที่ได้ในขั้นตอนที่ 6 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK

6.3 ตัวอย่างการนำวิธี PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์

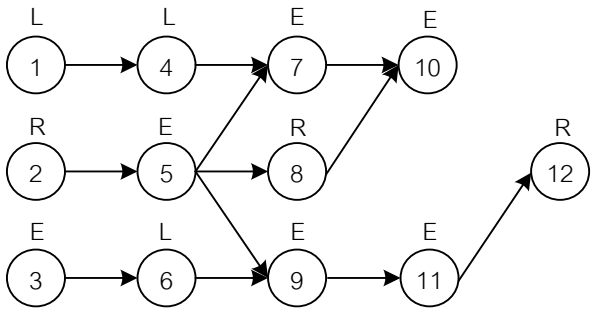
จากหัวข้อก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและขั้นตอนการทำงานของ PSONK ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในขั้นตอนของ PSONK ที่มากขึ้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอด้วยการยกตัวอย่างประกอบไปพร้อมกับการอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอน ซึ่งมีเนื้อหาดังนี้

6.3.1 ข้อมูลนำเข้า

สำหรับปัญหาตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาขั้นตอนการแก้ปัญหาของ PSONK จะเป็นปัญหาขนาดเล็ก ที่มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ A, B และ C มีสัดส่วนของ Minimum Part Set (MPS) เท่ากับ (4:4:4) มีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 12 โดยทำการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบที่มีความสมดุลตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังในปัญหาของ Kim et al. (2000) ที่มีรอบเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 และมีจำนวนขั้นงานการประกอบผลิตภัณฑ์เท่ากับ 12 ขั้นงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.3.1.1 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน

จากรูปลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงานจะทำให้เราทราบเงื่อนไขการทำงานก่อนและหลังของแต่ละขั้นงาน เช่น ขั้นงานที่ 4 จะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อขั้นงานที่ 1 เสร็จแล้ว และทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีงานในแต่ละด้านของสายการประกอบ เช่น ขั้นงานที่ 1 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านซ้ายของสายการประกอบเท่านั้น (Left-side : L) ขั้นงานที่ 2 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านขวาของสายการประกอบเท่านั้น (Right-side : R) ส่วนขั้นงานที่ 3 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านใดของสายการประกอบก็ได้ (Either-side : E) (Kim et al., 2000)



ภาพที่ 6.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง

6.3.1.2 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ

เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 6.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

ขั้นงาน	ผลิตภัณฑ์		
	A	B	C
1	2	3	1
2	3	3	3
3	2	0	1
4	3	2	1
5	1	2	3
6	1	0	2
7	3	2	1
8	3	1	2
9	2	1	0
10	2	3	1
11	1	2	3
12	0	1	2

6.3.1.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

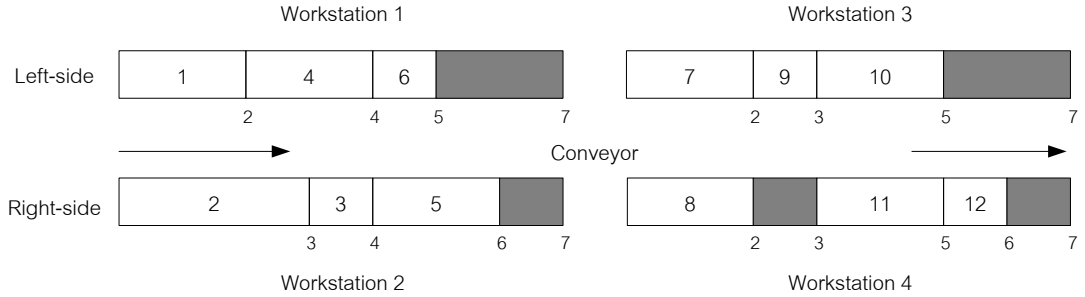
ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 6.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

From/To	A	B	C
A	0	7.1	9.5
B	7.3	0	9.8
C	7.6	8.1	0

6.3.1.4 แผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุล

สายการประกอบแบบสองด้านที่ใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการจัดสมดุลตามปัญหาของ Kim et al. (2000) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้วิธีการจัดสมดุลแบบเดียวกับงานวิจัยของปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้



ภาพที่ 6.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน

6.3.1.5 การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์

เมื่อทราบสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะจัดลำดับเข้าสู่สายการประกอบ ให้ทำการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามชนิดผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.3 การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์

ประเภทสตริงคำตอบ	รหัส											
Product String	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Job String	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

6.3.1.6 พารามิเตอร์ของ PSONK

ในที่นี้กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม PSONK มีดังนี้

- จำนวนฝูง (Number of Swarms : S) = 2
- จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarm : P) = 3
- น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight : W) = 1
- ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor : C_1, C_2) = 0.1

6.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นของแต่ละฝูงในรอบการทำงานที่หนึ่งนี้จะต้องสร้างตารางความน่าจะเป็นสำหรับสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของแต่ละฝูง ได้แก่ ตารางที่ 6.4 คือตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ขนาด $1\times n$ โดยที่ n คือ จำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเท่ากับ 12 และค่าความน่าจะเป็นในตารางมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $1/n = 1/12 = 0.0833$ ส่วนตารางที่ 6.5 คือตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ขนาด $n\times n$ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในตารางตามแนวทแยงมุมมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนค่าในตำแหน่งอื่นมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $1/(n-1) = 0.0909$ และตารางที่ 6.6 คือ ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ขนาด $n\times n$ ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 ทั้งหมด จากตารางเบื้องต้นที่ได้กล่าวมาทั้ง 3 ตาราง สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 6.4 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833

ตารางที่ 6.5 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
2	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
3	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
4	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
5	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
6	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
7	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
8	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
9	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.0909
10	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909
12	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0

ตารางที่ 6.6 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

จากนั้นจึงทำการการสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นของแต่ละฝูง โดยสตริงคำตอบแต่ละตัวจะเริ่มจากการสุ่มงานแรกด้วยค่าความน่าจะเป็นจากตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก จากนั้นสุ่มเลือกงานในลำดับถัดมาจนถึงงานลำดับที่ 12 ด้วยค่าความน่าจะเป็นจากตารางความน่าจะเป็นร่วม ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบของฝูงที่ s อนุภาคที่ p ดังนี้

ตารางที่ 6.7 สตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
1,2	6	8	5	1	12	2	9	4	10	11	7	3
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
2,2	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12

6.3.3 การประเมินค่า

เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้ง

เครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแต่ละสตริงคำตอบ ดังนี้

6.3.3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด สามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้ในบทที่ 2 โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \;\; f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{6.1}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ

$$Minimize \;\; f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_m} \left(\sum_{i=1}^{I} U_{i,n_m} + Z_{I+1,n_m} / v_c \right) \tag{6.2}$$

โดยที่

$$U_{i,n_m} = \begin{bmatrix} \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \right) - L_{n_m} \right) / v_c \right] + \\ \max\left[0, \left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \right) - L_{n_m} \right) / v_c \right] \end{bmatrix} \tag{6.3}$$

$$Z_{i+1,n_m} = \max \begin{bmatrix} \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right], \\ \max\left[0, \min\left(Z_{in_m} + v_c \sum_{m=1}^{M} X_{im} \left(t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \right) - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right] \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w

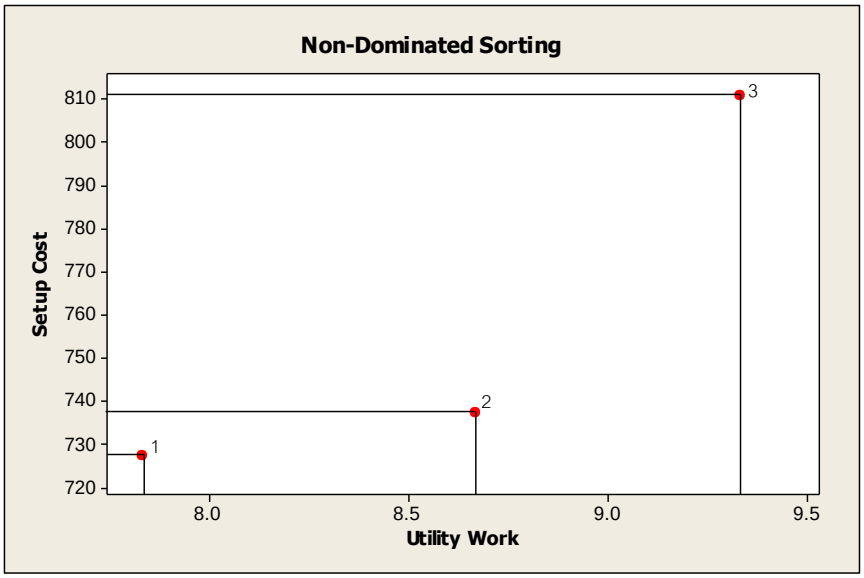
คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w} = v_c \times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

ตารางที่ 6.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work
1,1	727.40	7.83
1,2	737.30	8.67
1,3	810.90	9.33
2,1	804.50	6.83
2,2	812.50	6.83
2,3	930.70	7.50

6.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบ

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรง (Dummy Fitness) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest และ Local Worst Solution : Lworst) โดยเราจะเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) มาเป็นสตริงคำตอบ Lbest และเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) มาเป็นสตริงคำตอบ Lworst ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูง ดังนี้



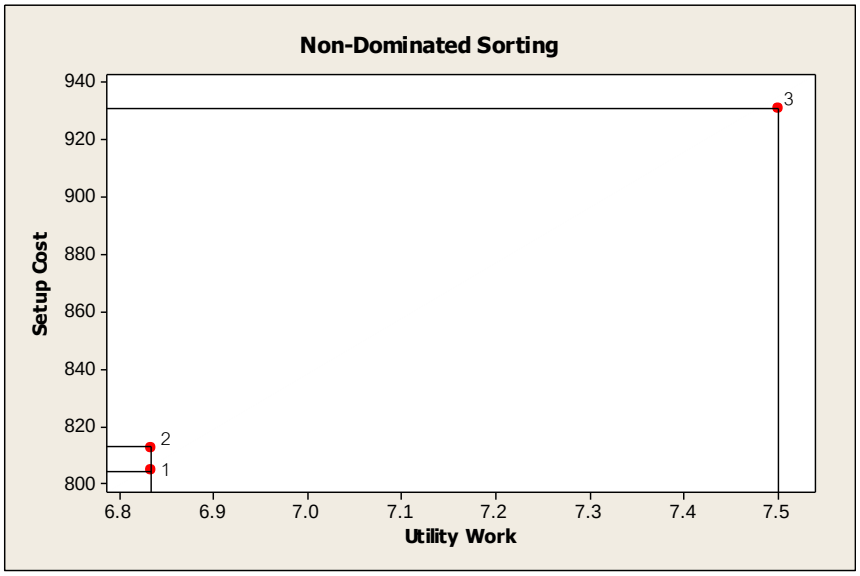
ภาพที่ 6.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 1

ตารางที่ 6.9 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	727.40	7.83	1	Lbest
1,2	737.30	8.67	2	-
1,3	810.90	9.33	3	Lworst

ตารางที่ 6.10 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String	Selection
1,1	5 8 1 3 10 2 11 9 7 12 6 4	Lbest
1,3	7 8 1 6 3 5 11 4 12 2 10 9	Lworst



ภาพที่ 6.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 2

ตารางที่ 6.11 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2

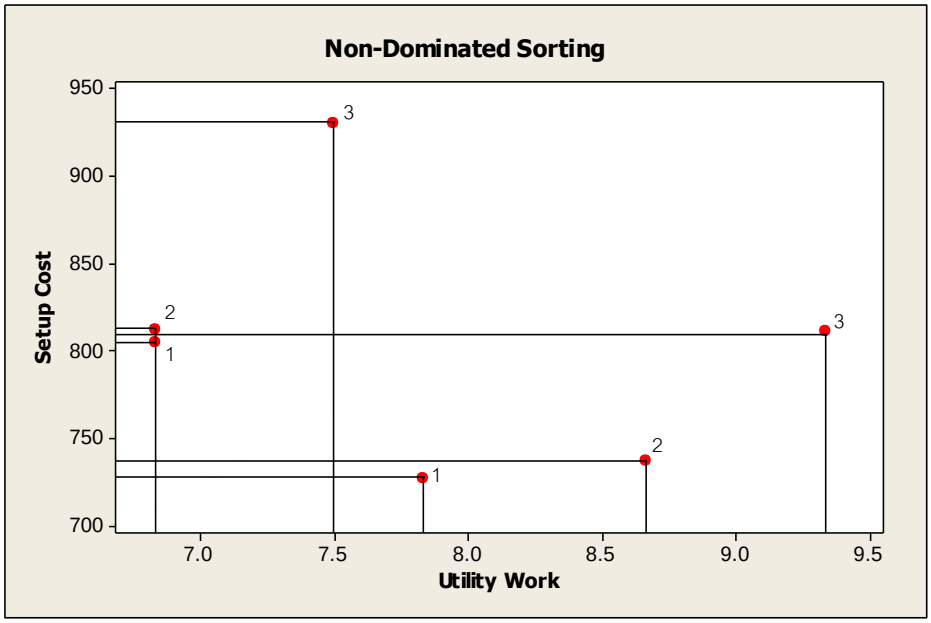
สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
2,1	804.50	6.83	1	Lbest
2,2	812.50	6.83	2	-
2,3	930.70	7.50	3	Lworst

ตารางที่ 6.12 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Lbest
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Lworst

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูงแล้ว จึงนำสตริงคำตอบของแต่ละฝูงมารวมกันและทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution : Gbest และ Global Worst Solution : Gworst) โดยเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) มาเป็นสตริงคำตอบ Gbest และเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) มาเป็นสตริงคำตอบ Gworst แต่ถ้าสตริงคำตอบมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 จากน้อยไปมาก และถ้าสตริงคำตอบยังมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ที่ 2 จากน้อยไปมาก ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดดังนี้



ภาพที่ 6.6 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร

ตารางที่ 6.13 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	727.4	7.8333	1	Gbest
2,1	804.5	6.8333	1	Gbest
1,2	737.3	8.6667	2	-
2,2	812.5	6.8333	2	-
1,3	810.9	9.3333	2	Gworst
2,3	930.7	7.5000	3	Gworst

ตารางที่ 6.14 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Gbest
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Gworst
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst

6.3.5 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อเราได้กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (มีค่าเท่ากับ 1) แล้วจึงนำไปรวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานก่อนหน้าและทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไปเก็บไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันและเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานก่อนหน้าสำหรับรอบการทำงานถัดไป

ตารางที่ 6.15 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6

6.3.6 การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของคำตอบที่ค้นพบหรือเป็นกระบวนการที่นำไปสู่การค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากมีการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดี ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่ดีในรอบการทำงานถัดไป และมีการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ ซึ่งเป็นการลดโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่แย่ในรอบการทำงานถัดไป โดยที่การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางจะทำการปรับปรุงทั้งหมด 3 ตาราง ได้แก่ ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) โดยการปรับปรุงค่า

ความน่าจะเป็นของตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (V) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (X) จะปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากสมการต่อไปนี้

$$V_{(i,s)} = wV_{(i-1,s)} + c_1 r_1 D_1 + c_2 r_2 D_2 \quad (6.5)$$

$$X_{(i+1,s)} = X_{(i,s)} + V_{(i,s)} \quad (6.6)$$

เมื่อ i คือ รอบการทำงาน

s คือ หมายเลขฝูงสตริงคำตอบ

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

c_1 และ c_2 คือ ตัวประกอบการเร่งของ Local และ Global (Cognitive and Social Component) ตามลำดับ

r_1 และ r_2 คือ ค่าสุ่มในช่วง [0,1] ของ Local และ Global ตามลำดับ

D_1 และ D_2 คือ ผลจากการปรับปรุงตารางที่ได้จาก Local และ Global ตามลำดับ

6.3.6.1 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก

ในที่นี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกไว้ 2 ตัว คือ กำหนดให้ $r = 1$ และ $c = 0.1$ เมื่อ r คือ ตัวเลขสุ่ม และ c คือ สัมประสิทธิ์การเรียนรู้ โดยการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่ดี (Lbest และ Gbest) โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของงานที่ถูกเลือกเป็นงานแรก ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 1}{(12-1)} = 0.0091$ เมื่อ n คือ จำนวนงานทั้งหมด และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(12-1)^2} = 0.0008$ จากนั้นจึงทำการปรับปรุงด้วยส่วนที่สองคือการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่แย่ (Lworst และ Gworst) โดยการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของงานที่ถูกเลือกเป็นงานแรก ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 1}{(12-1)} = 0.0091$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(12-1)^2} = 0.0008$ โดยการปรับตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 และ 2 ได้ผลดังนี้

ก. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.16 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Lbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Lworst
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Gbest
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Gworst
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 โดยเริ่มพิจารณาจากสตริงคำตอบ Lbest ของฝูงที่ 1 นั่นคือ สตริงคำตอบที่ 1,1 ซึ่งมีงานที่ 5 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0091 ให้กับตำแหน่งที่ 5 และลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0008 ให้กับตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.17 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0924	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lworst ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,3 ซึ่งมีงานที่ 7 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0091 ให้กับตำแหน่งที่ 1 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0008 ให้กับตำแหน่งอื่นๆ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.18 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest และ Lworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0933	0.0833	0.0734	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Gbest ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,1 และ 2,1 โดยเริ่มพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 1,1 ซึ่งมีงานที่ 5 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0091 ให้กับตำแหน่งที่ 5 และลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0008 ให้กับตำแหน่งอื่นๆ จากนั้นจึงพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 2,1 ซึ่งมีงานที่ 3 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0091 ให้กับตำแหน่งที่ 3 และลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0008 ในตำแหน่งอื่นๆ เมื่อทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบทั้งสองแล้ว จึงได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.19 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst และ Gbest

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0817	0.0817	0.0916	0.0817	0.1015	0.0817	0.0718	0.0817	0.0817	0.0817	0.0817	0.0817

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Gworst ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,3 และ 2,3 โดยเริ่มพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 1,3 ซึ่งมีงานที่ 7 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0091 ให้กับตำแหน่งที่ 7 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0008 ในตำแหน่งอื่นๆ จากนั้นจึงพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 2,3 ซึ่งมีงานที่ 1 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0091 ให้กับตำแหน่งที่ 1 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0008 ในตำแหน่งอื่นๆ ดังนั้นจึงได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังจากการปรับปรุงด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst ดังนี้

ตารางที่ 6.20 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0734	0.0833	0.0933	0.0833	0.1032	0.0833	0.0635	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833

ข. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.21 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Gbest
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Gworst
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst

สำหรับการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 2 จะใช้วิธีการปรับปรุงเหมือนกับฝูงที่ 1 จึงได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังจากการปรับปรุงด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst ดังนี้

ตารางที่ 6.22 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และGworst

0.0635	0.0833	0.1032	0.0833	0.0933	0.0833	0.0734	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833

6.3.6.2 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

ในที่นี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคไว้ 2 ตัว คือ กำหนดให้ $r = 1$ และ $c = 0.1$ โดยการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่ดี (Lbest และ Gbest) โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกัน ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 1}{(12-2)} = 0.01$ เมื่อ n คือ จำนวนงานทั้งหมด และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(12-2)^2} = 0.001$ จากนั้นจึงทำการปรับปรุงด้วยส่วนที่สองคือการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่แย่ (Lworst และ Gworst) โดยการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกัน ด้วยค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 1}{(12-2)} = 0.01$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ ด้วยค่าความน่าจะเป็น

เท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(12-2)^2} = 0.001$ โดยการปรับตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 และ 2 ได้ผลดังนี้

ก. การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.23 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Lbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Lworst
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Gbest
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Gworst
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 โดยเริ่มพิจารณาจากสตริงคำตอบ Lbest ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,1 โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1,1 คือ (5,8),(8,1),(1,3),…, (12,6),(6,4) และลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.001 ให้กับคู่ลำดับอื่นๆ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.24 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest ของฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.001	0.01	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
2	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001
3	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	-0.001
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
6	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
7	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01
8	0.01	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
9	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001
10	-0.001	0.01	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001
11	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	0	-0.001
12	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lworst ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,3 โดยการลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1,3 คือ (7,8),(8,1),(1,6),…,(2,10),(10,9) และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.001 ให้กับคู่ลำดับอื่นๆ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.25 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1ด้วยสตริงคำตอบ Lbest และ Lworst

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0.011	0	0	-0.011	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.011	0.011	0
3	0	0	0	0	-0.011	0	0	0	0	0.011	0	0
4	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	-0.01
5	0	0	0	0	0	0	0	0.011	0	0	-0.011	0
6	0	0	-0.011	0.011	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	-0.011	0	0	0	0.011
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001
10	0	0.011	0	0	0	0	0	0	-0.011	0	0	0
11	0	0	0	-0.011	0	0	0	0	0.011	0	0	0
12	0	-0.011	0	0	0	0.011	0	0	0	0	0	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Gbest ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,1 และ 2,1 ซึ่งเริ่มพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 1,1 โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1,1 คือ (5,8),(8,1),(1,3),…, (12,6),(6,4) และลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.001 ให้กับคู่ลำดับอื่นๆ จากนั้นจึงพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 2,1 โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 2,1 คือ (3,10),(10,1),(1,4),…,(9,12),(12,6) และลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.001 ให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เมื่อทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบทั้งสองแล้ว ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.26 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst และ Gbest

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.002	0.02	0.009	-0.002	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
2	-0.002	0	-0.002	-0.002	0.009	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.013	0.02	-0.002
3	-0.002	-0.002	0	-0.002	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0.031	-0.002	-0.002
4	0	0	0	0	0	0	0.011	0	0	0	0	-0.011
5	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0	-0.002	-0.002	0.02	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
6	-0.001	-0.001	-0.012	0.021	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
7	-0.002	0.009	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	0.02
8	0.009	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0	0.009	-0.002	-0.002	-0.002
9	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	0.019	-0.003	0	-0.003	-0.003	0.008
10	0.009	0.02	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.013	0	-0.002	-0.002
11	-0.002	-0.002	-0.002	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	0.009	0.02	-0.002	0	-0.002
12	-0.002	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	0.031	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Gworst ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,3 และ 2,3 ซึ่งเริ่มพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 1,3 โดยการลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1,3 คือ (7,8),(8,1),(1,6),…,(2,10),(10,9) และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.001 ให้กับคู่ลำดับอื่นๆ จากนั้นจึงพิจารณาปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ 2,3 โดยการลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 2,3 คือ (1,8),(8,2),(2,10),…,(9,3),(3,12) และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.001 ให้กับคู่ลำดับอื่นๆ ดังนั้นจึงได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังจากการปรับปรุงด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst ดังนี้

ตารางที่ 6.27 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0.022	0.011	0	-0.022	0	-0.011	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0.011	0	0	0	0	-0.033	0.022	0
3	0	0	0	0	-0.022	0	0	0	0	0.033	0	-0.011
4	0.002	0.002	0.002	0	0.002	0.002	0.013	0.002	0.002	0.002	-0.009	-0.02
5	0	0	0	0	0	0	0	0.022	-0.011	0	-0.011	0
6	0.001	0.001	-0.021	0.012	0.001	0	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
7	0	0.011	0	0	-0.011	0	0	-0.022	0	0	0	0.022
8	0	-0.011	0	0	0	0	0	0	0.011	0	0	0
9	-0.002	-0.002	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	0.02	-0.002	0	-0.002	-0.002	0.009
10	0.011	0.022	0	0	0	-0.011	0	0	-0.022	0	0	0
11	0	0	0	-0.022	0	0	-0.011	0.011	0.022	0	0	0
12	-0.001	-0.023	-0.001	-0.001	-0.001	0.032	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0

ข. การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) **ของฝูงที่** 2

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.28 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst
1,1	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4	Gbest
2,1	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6	Gbest
1,3	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9	Gworst
2,3	1	8	2	10	6	4	11	7	5	9	3	12	Gworst

สำหรับการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 จะใช้วิธีการปรับปรุงเหมือนกับฝูงที่ 1 จึงได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 หลังจากการปรับปรุงด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst ดังนี้

ตารางที่ 6.29 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0.011	0.022	0	-0.011	0	-0.022	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0.022	0	0	0	0	-0.033	0.011	0
3	0	0	0	0	-0.011	0	0	0	0	0.033	0	-0.022
4	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001	0.023	0.001	0.001	0.001	-0.021	-0.01
5	0	0	0	0	0	0	0	0.011	-0.022	0	0.011	0
6	0.002	0.002	-0.009	-0.009	0.002	0	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
7	0	0.022	0	0	-0.022	0	0	-0.011	0	0	0	0.011
8	0	-0.022	0	0	0	0	0	0	0.022	0	0	0
9	-0.001	-0.001	-0.023	-0.001	-0.001	-0.001	0.01	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.021
10	0.022	0.011	0	0	0	-0.022	0	0	-0.011	0	0	0
11	0	0	0	-0.011	0	0	-0.022	0.022	0.011	0	0	0
12	-0.002	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	0.031	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0

6.3.6.3 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

วิธีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ทำได้โดยนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหลังจากปรับปรุงเรียบร้อยแล้วมาบวกกับตารางความน่าจะเป็นร่วมในรอบการทำงานปัจจุบัน ดังสมการ $X_{(i+1,s)} = X_{(i,s)} + V_{(i,s)}$ จึงได้ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 และ 2 สำหรับรอบการทำงานถัดไปดังนี้

ตารางที่ 6.30 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.0909	0.1129	0.1019	0.0909	0.0689	0.0909	0.0799	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
2	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.1019	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0579	0.1129	0.0909
3	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0689	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.1239	0.0909	0.0799
4	0.0929	0.0929	0.0929	0	0.0929	0.0929	0.1039	0.0929	0.0929	0.0929	0.0819	0.0709
5	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.1129	0.0799	0.0909	0.0799	0.0909
6	0.0919	0.0919	0.0699	0.1029	0.0919	0	0.0919	0.0919	0.0919	0.0919	0.0919	0.0919
7	0.0909	0.1019	0.0909	0.0909	0.0799	0.0909	0	0.0689	0.0909	0.0909	0.0909	0.1129
8	0.0909	0.0799	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.1019	0.0909	0.0909	0.0909
9	0.0889	0.0889	0.0779	0.0889	0.0889	0.0889	0.1109	0.0889	0	0.0889	0.0889	0.0999
10	0.1019	0.1129	0.0909	0.0909	0.0909	0.0799	0.0909	0.0909	0.0689	0	0.0909	0.0909
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0689	0.0909	0.0909	0.0799	0.1019	0.1129	0.0909	0	0.0909
12	0.0899	0.0679	0.0899	0.0899	0.0899	0.1229	0.0899	0.0899	0.0899	0.0899	0.0899	0

ตารางที่ 6.31 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.0909	0.1019	0.1129	0.0909	0.0799	0.0909	0.0689	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
2	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.1129	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0579	0.1019	0.0909
3	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0799	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.1239	0.0909	0.0689
4	0.0919	0.0919	0.0919	0	0.0919	0.0919	0.1139	0.0919	0.0919	0.0919	0.0699	0.0809
5	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.1019	0.0689	0.0909	0.1019	0.0909
6	0.0929	0.0929	0.0819	0.0819	0.0929	0	0.0929	0.0929	0.0929	0.0929	0.0929	0.0929
7	0.0909	0.1129	0.0909	0.0909	0.0689	0.0909	0	0.0799	0.0909	0.0909	0.0909	0.1019
8	0.0909	0.0689	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.1129	0.0909	0.0909	0.0909
9	0.0899	0.0899	0.0679	0.0899	0.0899	0.0899	0.1009	0.0899	0	0.0899	0.0899	0.1119
10	0.1129	0.1019	0.0909	0.0909	0.0909	0.0689	0.0909	0.0909	0.0799	0	0.0909	0.0909
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0799	0.0909	0.0909	0.0689	0.1129	0.1019	0.0909	0	0.0909
12	0.0889	0.0779	0.0889	0.0889	0.0889	0.1219	0.0889	0.0889	0.0889	0.0889	0.0889	0

6.3.7 **การแก้ปัญหาในรอบการทำงานถัดไป**

การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2 นี้จะมีขั้นตอนรการทำงานเหมือนกับรอบการทำงานที่ 1 โดยเริ่มตั้งแต่การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายคือการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

6.3.7.1 **การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นในรอบการทำงานที่** 2

ทำการสร้างสตริงคำตอบของแต่ละฝูง โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นจากตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) และใช้ค่าความน่าจะเป็นจากตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ที่ได้จากรอบการทำงานที่ 1 สำหรับสุ่มเลือกงานแรกของสตริงคำตอบและสุ่มเลือกงานในลำดับถัดไปจนถึงงานลำดับที่ 12 ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบของฝูงที่ s อนุภาคที่ p ดังนี้

ตารางที่ 6.32 สตริงคำตอบเบื้องต้นสำหรับฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7
1,2	5	3	1	2	10	9	4	6	12	8	7	11
1,3	1	3	7	5	2	6	9	8	11	12	4	10
2,1	12	4	8	6	5	10	2	1	11	3	9	7
2,2	12	2	11	7	10	9	6	1	3	8	4	5
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10

6.3.7.2 การประเมินค่า

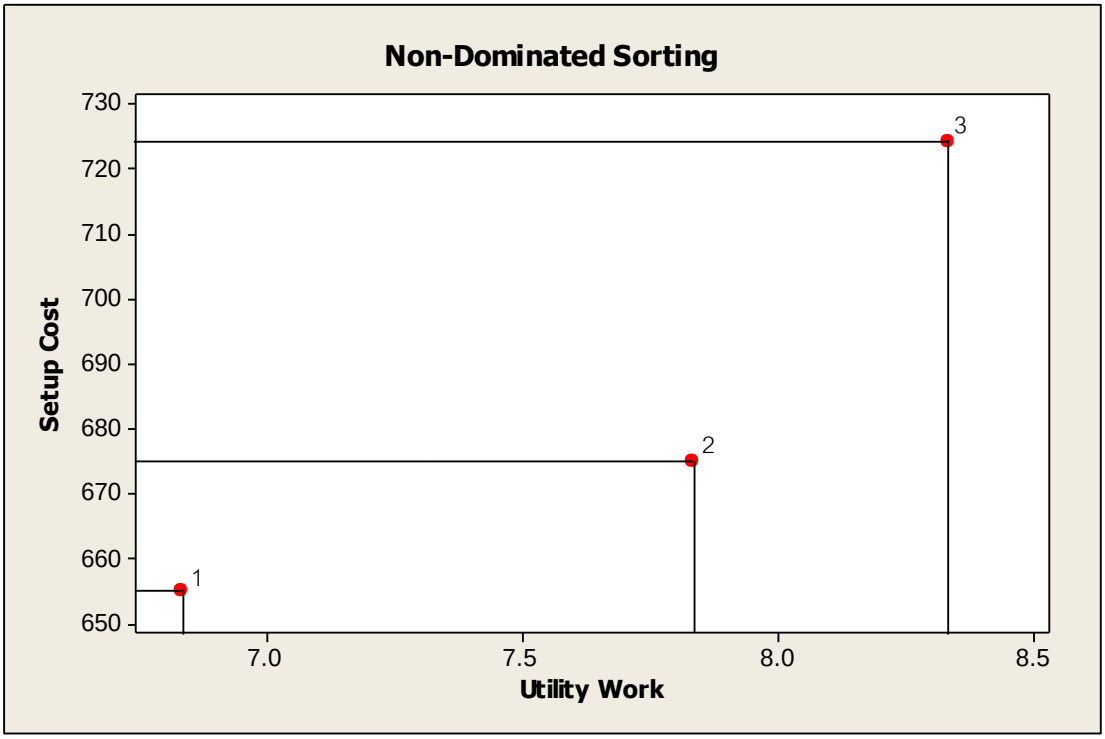
เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด ซึ่งได้ผลจากการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 6.33 ค่าจากการคำนวณทั้ง 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work
1,1	655.10	6.83
1,2	674.90	7.83
1,3	724.20	8.33
2,1	780.00	7.17
2,2	801.00	7.50
2,3	895.20	8.33

6.3.7.3 การกำหนดค่าความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบ

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรง (Dummy Fitness) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest และ Local Worst Solution : Lworst) โดยเราจะเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) มาเป็นสตริงคำตอบ Lbest และเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) มาเป็นสตริงคำตอบ Lworst ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูง ดังนี้



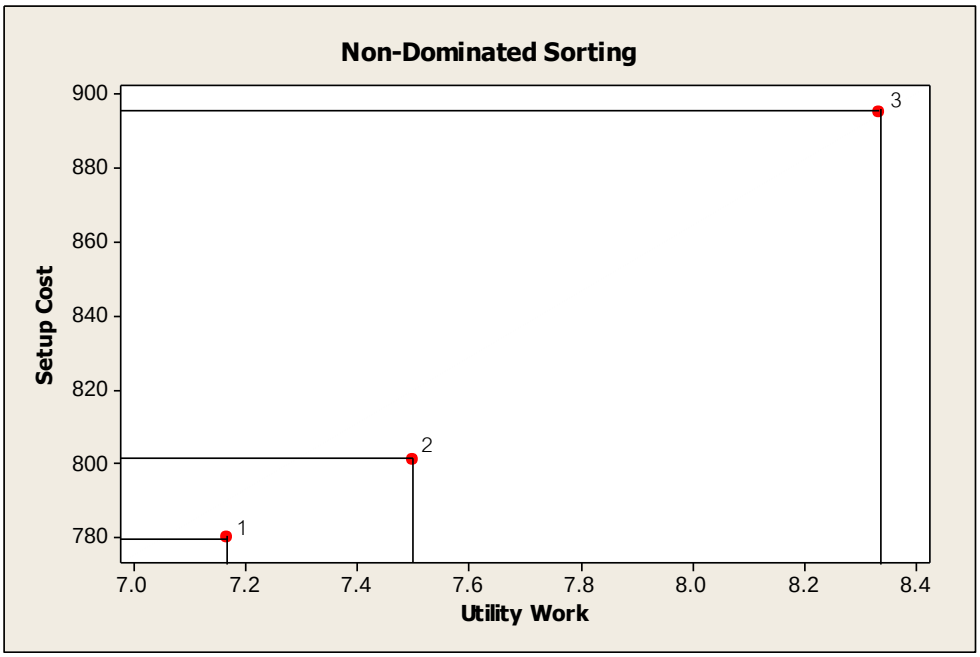
ภาพที่ 6.7 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 1

ตารางที่ 6.34 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	655.10	6.83	1	Lbest
1,2	674.90	7.83	2	-
1,3	724.20	8.33	3	Lworst

ตารางที่ 6.35 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Lbest
1,3	1	3	7	5	2	6	9	8	11	12	4	10	Lworst



ภาพที่ 6.8 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของฝูงที่ 2

ตารางที่ 6.36 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2

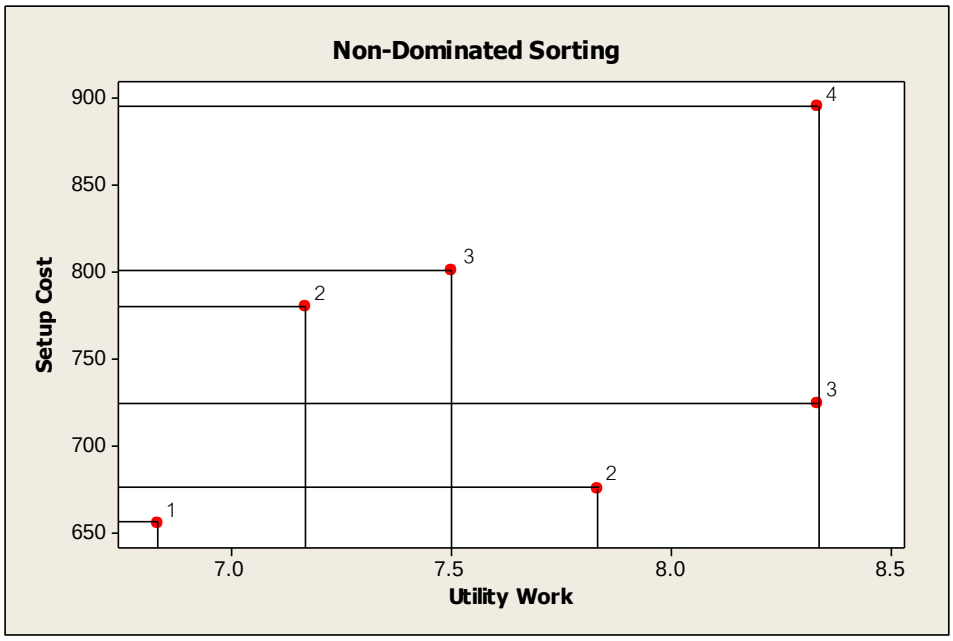
สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
2,1	780.00	7.17	1	Lbest
2,2	801.00	7.50	2	-
2,3	895.20	8.33	3	Lworst

ตารางที่ 6.37 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
2,1	12	4	8	6	5	10	2	1	11	3	9	7	Lbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Lworst

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูงแล้ว จึงนำสตริงคำตอบของแต่ละฝูงมารวมกันและทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำค่าความแข็งแรงที่ได้มาพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution : Gbest และ Global Worst Solution : Gworst) โดยเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) มาเป็นสตริงคำตอบ Gbest และเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) มาเป็นสตริงคำตอบ Gworst แต่ถ้า

สตริงคำตอบมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 จากน้อยไปมาก และถ้าสตริงคำตอบยังมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 จากน้อยไปมาก ดังนั้นเราจึงได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดดังนี้



ภาพที่ 6.9 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของประชากร

ตารางที่ 6.38 การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1	655.10	6.83	1	Gbest
1,2	674.90	7.83	2	-
2,1	780.00	7.17	2	-
1,3	724.20	8.33	3	-
2,2	801.00	7.50	3	-
2,3	895.20	8.33	4	Gworst

ตารางที่ 6.39 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String	Selection
1,1	11 9 1 4 6 5 2 3 10 8 12 7	Gbest
2,3	6 9 2 11 4 12 1 7 8 3 5 10	Gworst

6.3.7.4 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

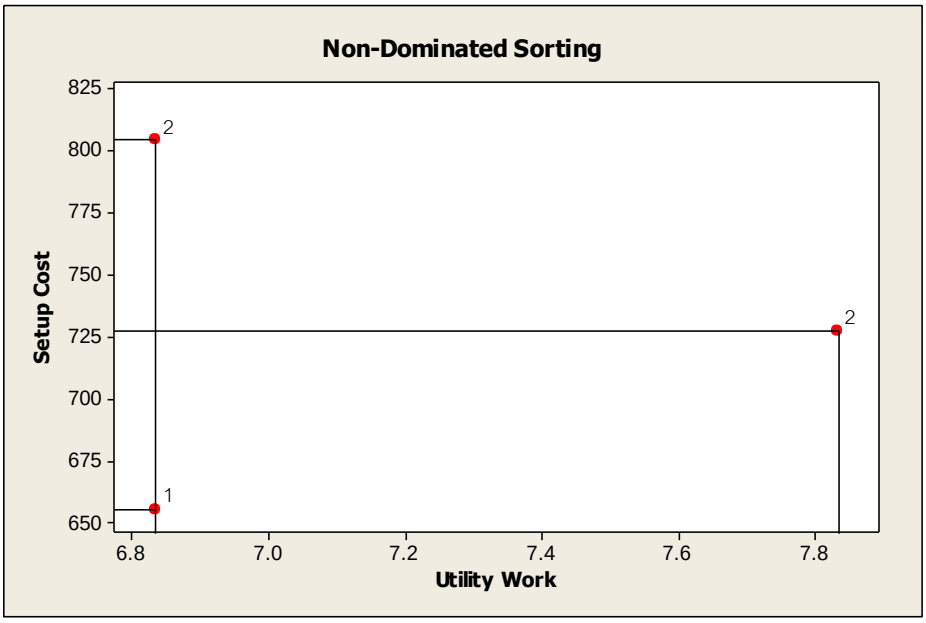
เมื่อเราได้กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว จึงทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (มีค่าเท่ากับ 1) แล้วจึงนำไปรวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานก่อนหน้าและทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-Dominated Sorting เพื่อนำสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไปเก็บไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันและเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานก่อนหน้าสำหรับรอบการทำงานถัดไป

ตารางที่ 6.40 การรวมสตริงคำตอบเพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String											
1,1 (รอบที่ 1)	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
2,1 (รอบที่ 1)	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
1,1 (รอบที่ 2)	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7

ตารางที่ 6.41 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

สตริงคำตอบ (s, p)	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Selection
1,1 (รอบที่ 2)	655.10	6.83	1	Selected
1,1 (รอบที่ 1)	727.40	7.83	2	-
2,1 (รอบที่ 1)	804.50	6.83	2	-



ภาพที่ 6.10 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 6.42 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String
1,1 (รอบที่ 2)	11 9 1 4 6 5 2 3 10 8 12 7

6.3.7.5 การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของคำตอบที่ค้นพบหรือเป็นกระบวนการที่นำไปสู่การค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากมีการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดี ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่ดีในรอบการทำงานถัดไป และมีการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ ซึ่งเป็นการลดโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่แย่ในรอบการทำงานถัดไป โดยที่การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางจะทำการปรับปรุงทั้งหมด 3 ตาราง ได้แก่ ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

ก. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.43 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Lbest
1,3	1	3	7	5	2	6	9	8	11	12	4	10	Lworst
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Gbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 โดยเริ่มพิจารณาจากสตริงคำตอบ Lbest ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,1 ซึ่งมีงานที่ 11 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 11 เท่ากับ 0.0091 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่น ๆ เท่ากับ 0.0008 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.44 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0726	0.0825	0.0924	0.0825	0.1023	0.0825	0.0627	0.0825	0.0825	0.0825	0.0924	0.0825

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lworst ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,3 ซึ่งมีงานที่ 1 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.0091 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0008 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.45 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest และ Lworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0635	0.0833	0.0933	0.0833	0.1032	0.0833	0.0635	0.0833	0.0833	0.0833	0.0933	0.0833

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Gbest ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 1,1 ซึ่งมีงานที่ 11 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 11 เท่ากับ 0.0091 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0008 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.46 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst และ Gbest

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0627	0.0825	0.0924	0.0825	0.1023	0.0825	0.0627	0.0825	0.0825	0.0825	0.1023	0.0825

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Gworst ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 2,3 ซึ่งมีงานที่ 6 เป็นงานลำดับที่ 1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.0091 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0008 ดังนั้นจึงได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังจากการปรับปรุงด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.47 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0635	0.0833	0.0933	0.0833	0.1032	0.0734	0.0635	0.0833	0.0833	0.0833	0.1032	0.0833

ข. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.48 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
2,1	12	4	8	6	5	10	2	1	11	3	9	7	Lbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Lworst
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Gbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Gworst

สำหรับการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ของฝูงที่ 2 จะใช้วิธีการปรับปรุงเหมือนกับฝูงที่ 1 จึงได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังจากการปรับปรุงด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst ดังนี้

ตารางที่ 6.49 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และGworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0635	0.0833	0.1032	0.0833	0.0933	0.0635	0.0734	0.0833	0.0833	0.0833	0.0933	0.0933

ค. การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.50 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Lbest
1,3	1	3	7	5	2	6	9	8	11	12	4	10	Lworst
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Gbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst โดยมีวิธีการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ 1 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.51 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0.011	0.033	0	-0.022	-0.011	-0.011	0	0	0	0
2	0	0	0.022	0	0.011	-0.011	0	0	0	-0.033	0.011	0
3	0	0	0	0	-0.033	0	-0.011	0	0	0.055	0	-0.011
4	0.002	0.002	0.002	0	0.002	0.024	0.013	0.002	0.002	-0.009	-0.009	-0.031
5	0	0.011	0	0	0	0	0	0.022	-0.011	-0.011	-0.011	0
6	0.001	0.001	-0.021	0.012	0.023	0	0.001	0.001	-0.021	0.001	0.001	0.001
7	0.002	0.013	0.002	0.002	-0.02	0.002	0	-0.031	0.002	0.002	0.002	0.024
8	0	-0.011	-0.011	0	0	0	0	0	0.011	0	-0.011	0.022
9	0.02	-0.013	-0.013	-0.002	-0.002	-0.002	0.02	-0.013	0	-0.002	-0.002	0.009
10	0.009	0.02	-0.002	-0.002	-0.002	-0.013	-0.002	0.02	-0.024	0	-0.002	-0.002
11	0	0	0	-0.033	0	0	-0.011	0.011	0.044	0	0	-0.011
12	-0.012	-0.023	-0.001	-0.012	-0.001	0.032	0.021	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0

ง. การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง ทำให้ได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2 และของประชากรดังนี้

ตารางที่ 6.52 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

สตริงคำตอบ (s, p)	Position String												Selection
2,1	12	4	8	6	5	10	2	1	11	3	9	7	Lbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Lworst
1,1	11	9	1	4	6	5	2	3	10	8	12	7	Gbest
2,3	6	9	2	11	4	12	1	7	8	3	5	10	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst โดยมีวิธีการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นเช่นเดียวกับรอบการทำงานที่ 1 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6.53 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ด้วยสตริงคำตอบ Lbest Lworst Gbest และ Gworst

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0.011	0.033	0	-0.011	-0.022	-0.022	0	0	0.011	0
2	0.011	0	0.011	0	0.022	0	0	0	0	-0.033	-0.011	0
3	0	0	0	0	-0.033	0	0	0	0.011	0.044	0	-0.022
4	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.012	0.023	0.012	0.001	0.001	-0.021	-0.032
5	0	0.011	0	0	0	0	0	0.011	-0.022	-0.011	0.011	0
6	0.002	0.002	-0.009	-0.009	0.024	0	0.002	0.002	-0.02	0.002	0.002	0.002
7	0.002	0.024	0.002	0.002	-0.02	0.002	0	-0.031	0.002	0.002	0.002	0.013
8	0	-0.022	-0.022	0	0	0.011	0	0	0.022	0	0	0.011
9	0.01	-0.023	-0.023	-0.001	-0.001	-0.001	0.021	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.021
10	0.02	0.02	-0.002	-0.002	-0.002	-0.024	-0.002	0.009	-0.013	0	-0.002	-0.002
11	0	0	0.011	-0.033	0	0	-0.022	0.022	0.022	0	0	0
12	-0.024	-0.013	-0.002	0.009	-0.002	0.031	0.009	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	0

จ. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2

วิธีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ทำได้โดยนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหลังจากปรับปรุงเรียบร้อยแล้วมาบวกกับตารางความ

น่าจะเป็นร่วมในรอบการทำงานปัจจุบัน ดังสมการ $X_{(i+1,s)} = X_{(i,s)} + V_{(i,s)}$ จึงได้ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 และ 2 สำหรับรอบการทำงานถัดไปดังนี้

ตารางที่ 6.54 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.0909	0.1239	0.1349	0.0909	0.0469	0.0799	0.0689	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
2	0.0909	0	0.1129	0.0909	0.1129	0.0799	0.0909	0.0909	0.0909	0.0249	0.1239	0.0909
3	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0359	0.0909	0.0799	0.0909	0.0909	0.1789	0.0909	0.0689
4	0.0949	0.0949	0.0949	0	0.0949	0.1169	0.1169	0.0949	0.0949	0.0839	0.0729	0.0399
5	0.0909	0.1019	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.1349	0.0689	0.0799	0.0689	0.0909
6	0.0929	0.0929	0.0489	0.1149	0.1149	0	0.0929	0.0929	0.0709	0.0929	0.0929	0.0929
7	0.0929	0.1149	0.0929	0.0929	0.0599	0.0929	0	0.0379	0.0929	0.0929	0.0929	0.1369
8	0.0909	0.0689	0.0799	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0	0.1129	0.0909	0.0799	0.1129
9	0.1089	0.0759	0.0649	0.0869	0.0869	0.0869	0.1309	0.0759	0	0.0869	0.0869	0.1089
10	0.1109	0.1329	0.0889	0.0889	0.0889	0.0669	0.0889	0.1109	0.0449	0	0.0889	0.0889
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0359	0.0909	0.0909	0.0689	0.1129	0.1569	0.0909	0	0.0799
12	0.0779	0.0449	0.0889	0.0779	0.0889	0.1549	0.1109	0.0889	0.0889	0.0889	0.0889	0

ตารางที่ 6.55 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ที่ทำการปรับปรุงแล้ว

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.0909	0.1129	0.1459	0.0909	0.0689	0.0689	0.0469	0.0909	0.0909	0.1019	0.0909
2	0.1019	0	0.1019	0.0909	0.1349	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0249	0.0909	0.0909
3	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0469	0.0909	0.0909	0.0909	0.1019	0.1679	0.0909	0.0469
4	0.0929	0.0929	0.0929	0	0.0929	0.1039	0.1369	0.1039	0.0929	0.0929	0.0489	0.0489
5	0.0909	0.1019	0.0909	0.0909	0	0.0909	0.0909	0.1129	0.0469	0.0799	0.1129	0.0909
6	0.0949	0.0949	0.0729	0.0729	0.1169	0	0.0949	0.0949	0.0729	0.0949	0.0949	0.0949
7	0.0929	0.1369	0.0929	0.0929	0.0489	0.0929	0	0.0489	0.0929	0.0929	0.0929	0.1149
8	0.0909	0.0469	0.0689	0.0909	0.0909	0.1019	0.0909	0	0.1349	0.0909	0.0909	0.1019
9	0.0999	0.0669	0.0449	0.0889	0.0889	0.0889	0.1219	0.0889	0	0.0889	0.0889	0.1329
10	0.1329	0.1219	0.0889	0.0889	0.0889	0.0449	0.0889	0.0999	0.0669	0	0.0889	0.0889
11	0.0909	0.0909	0.1019	0.0469	0.0909	0.0909	0.0469	0.1349	0.1239	0.0909	0	0.0909
12	0.0649	0.0649	0.0869	0.0979	0.0869	0.1529	0.0979	0.0869	0.0869	0.0869	0.0869	0

6.4 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้คุณภาพคำตอบหรือประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม

กับปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยมากที่สุด โดยพารามิเตอร์ของ PSONK ที่ผู้วิจัยสนใจนำมาทำการทดสอบ ได้แก่ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 6.56 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ PSONK ที่จะทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ปัจจัยที่ 1 จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง $(S-P)$	ระดับที่ 1 (4-25) ระดับที่ 2 (5-20) ระดับที่ 3 (10-10)

สำหรับรูปแบบการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การทดลองแบบ Full Factorial Design โดยมีจำนวนการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละการทดลองเท่ากับ 2 ครั้ง มีจำนวนปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว มีระดับปัจจัยเท่ากับ 3 ระดับ และมีปัญหาการทดลองเท่ากับ 11 ปัญหา ดังนั้นในบทนี้จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2x3x11 = 66 ครั้ง โดยจะใช้ตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาในการคำนวณ (Computation Time to Solution) ทั้งนี้ก็เพื่อให้บรรลุเป้าหมายทั้งสองด้านของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ กลุ่มคำตอบที่ได้ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและสมาชิกคำตอบภายในกลุ่มมีความหลากหลายมากที่สุด เมื่อออกแบบการทดลองเรียบร้อยแล้วจึงนำผลการทดลองทั้งหมดของ PSONK ไปวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาการทดลอง

6.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองทั้งหมดของ PSONK มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนกับบทที่ 5

6.5.1 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 1.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.001149	0.000574	5.15	0.107
Error	3	0.000334	0.000111		
Total	5	0.001483			

S = 0.01056 R-Sq = 77.46% R-Sq(adj) = 62.43%

ภาพที่ 6.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0219	0.0110	0.54	0.629
Error	3	0.0605	0.0202		
Total	5	0.0824			

S = 0.1420 R-Sq = 26.61% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.1180	0.0590	2.42	0.237
Error	3	0.0731	0.0244		
Total	5	0.1911			

S = 0.1561 R-Sq = 61.73% R-Sq(adj) = 36.22%

ภาพที่ 6.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 1.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.00493	0.00246	1.67	0.325
Error	3	0.00442	0.00147		
Total	5	0.00935			

S = 0.03839 R-Sq = 52.71% R-Sq(adj) = 21.18%

ภาพที่ 6.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.01027	0.00513	0.98	0.471
Error	3	0.01575	0.00525		
Total	5	0.02602			

S = 0.07246 R-Sq = 39.46% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.1100	0.0550	2.97	0.194
Error	3	0.0555	0.0185		
Total	5	0.1655			

S = 0.1360 R-Sq = 66.47% R-Sq(adj) = 44.11%

ภาพที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.3 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 2.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.004025	0.002012	2.55	0.225
Error	3	0.002365	0.000788		
Total	5	0.006390			

S = 0.02808 R-Sq = 62.98% R-Sq(adj) = 38.30%

ภาพที่ 6.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.01462	0.00731	1.74	0.315
Error	3	0.01259	0.00420		
Total	5	0.02721			

S = 0.06478 R-Sq = 53.73% R-Sq(adj) = 22.89%

ภาพที่ 6.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.2561	0.1281	4.31	0.131
Error	3	0.0892	0.0297		
Total	5	0.3453			

S = 0.1724 R-Sq = 74.18% R-Sq(adj) = 56.97%

ภาพที่ 6.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.4 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 2.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0001373	0.0000686	1.28	0.396
Error	3	0.0001606	0.0000535		
Total	5	0.0002979			

S = 0.007317 R-Sq = 46.08% R-Sq(adj) = 10.14%

ภาพที่ 6.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.00289	0.00144	0.83	0.516
Error	3	0.00521	0.00174		
Total	5	0.00810			

S = 0.04168 R-Sq = 35.64% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.094322	0.047161	74.87	0.003
Error	3	0.001890	0.000630		
Total	5	0.096212			

S = 0.02510 R-Sq = 98.04% R-Sq(adj) = 96.73%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1	2	0.60364	0.02179	(---*----)
2	2	0.31373	0.02773	(----*----)
3	2	0.37092	0.02542	(----*----)

0.36 0.48 0.60 0.72

Pooled StDev = 0.02510

ภาพที่ 6.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 1 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับอื่น โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.5 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 3.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS      F      P
model    2  0.0019404  0.0009702  30.08  0.010
Error    3  0.0000968  0.0000323
Total    5  0.0020372

S = 0.005680   R-Sq = 95.25%   R-Sq(adj) = 92.08%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev   -+---------+---------+---------+--------
1      2  0.011652  0.008416   (------*-----)
2      2  0.048669  0.003420                    (-----*------)
3      2  0.050840  0.003774                     (-----*------)
                                -+---------+---------+---------+--------
                               0.000     0.020     0.040     0.060

Pooled StDev = 0.005680
```

ภาพที่ 6.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 1 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับอื่น โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.6 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 3.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0010812	0.0005406	6.92	0.075
Error	3	0.0002343	0.0000781		
Total	5	0.0013155			

S = 0.008838 R-Sq = 82.19% R-Sq(adj) = 70.31%

ภาพที่ 6.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.01039	0.00520	1.63	0.332
Error	3	0.00958	0.00319		
Total	5	0.01997			

S = 0.05649 R-Sq = 52.04% R-Sq(adj) = 20.07%

ภาพที่ 6.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

```
Source  DF       SS       MS      F      P
model    2  0.59847  0.29923  76.35  0.003
Error    3  0.01176  0.00392
Total    5  0.61022

S = 0.06260   R-Sq = 98.07%   R-Sq(adj) = 96.79%

                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  --+---------+---------+---------+-------
1      2  0.82000  0.02828                           (---*----)
2      2  0.22333  0.08014       (---*----)
3      2  0.09524  0.06734  (----*----)
                              --+---------+---------+---------+-------
                              0.00      0.30      0.60      0.90

Pooled StDev = 0.06260
```

ภาพที่ 6.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 1 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับอื่นโดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.7 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 4.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.001110	0.000555	2.20	0.258
Error	3	0.000757	0.000252		
Total	5	0.001867			

S = 0.01588 R-Sq = 59.45% R-Sq(adj) = 32.42%

ภาพที่ 6.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0210	0.0105	0.98	0.471
Error	3	0.0322	0.0107		
Total	5	0.0531			

S = 0.1035 R-Sq = 39.47% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.3965	0.1983	5.31	0.103
Error	3	0.1121	0.0374		
Total	5	0.5086			

S = 0.1933 R-Sq = 77.96% R-Sq(adj) = 63.27%

ภาพที่ 6.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.8 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 4.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.0010483	0.0005242	6.12	0.087
Error	3	0.0002570	0.0000857		
Total	5	0.0013053			

S = 0.009256 R-Sq = 80.31% R-Sq(adj) = 67.19%

ภาพที่ 6.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.02392	0.01196	2.09	0.271
Error	3	0.01720	0.00573		
Total	5	0.04112			

S = 0.07573 R-Sq = 58.16% R-Sq(adj) = 30.27%

ภาพที่ 6.31 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.102115	0.051058	73.17	0.003
Error	3	0.002093	0.000698		
Total	5	0.104209			

S = 0.02642 R-Sq = 97.99% R-Sq(adj) = 96.65%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1	2	0.55778	0.00314	(---*----)
2	2	0.33807	0.03616	(----*----)
3	2	0.24697	0.02786	(----*----)

0.24 0.36 0.48 0.60

Pooled StDev = 0.02642

ภาพที่ 6.32 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 1 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับอื่นโดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.9 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 5.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000564	0.000282	1.02	0.460
Error	3	0.000830	0.000277		
Total	5	0.001394			

S = 0.01664 R-Sq = 40.44% R-Sq(adj) = 0.74%

ภาพที่ 6.33 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.00522	0.00261	0.43	0.686
Error	3	0.01824	0.00608		
Total	5	0.02346			

S = 0.07798 R-Sq = 22.24% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.34 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.2489	0.1244	6.45	0.082
Error	3	0.0579	0.0193		
Total	5	0.3067			

S = 0.1389 R-Sq = 81.14% R-Sq(adj) = 68.56%

ภาพที่ 6.35 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.1 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.10 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 5.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.000146	0.000073	0.49	0.657
Error	3	0.000451	0.000150		
Total	5	0.000597			

S = 0.01226 R-Sq = 24.46% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.36 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.01485	0.00742	0.97	0.474
Error	3	0.02306	0.00769		
Total	5	0.03790			

S = 0.08767 R-Sq = 39.17% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.37 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.1026	0.0513	0.98	0.469
Error	3	0.1563	0.0521		
Total	5	0.2589			

S = 0.2282 R-Sq = 39.63% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.38 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่

ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาในการค้นหาคำตอบ ซึ่งพบว่าในระดับปัจจัยที่ 1 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.5.11 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.002190	0.001095	1.88	0.296
Error	3	0.001751	0.000584		
Total	5	0.003940			

S = 0.02416 R-Sq = 55.57% R-Sq(adj) = 25.95%

ภาพที่ 6.39 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	2	0.02176	0.01088	9.03	0.054
Error	3	0.00361	0.00120		
Total	5	0.02537			

S = 0.03471 R-Sq = 85.76% R-Sq(adj) = 76.26%

ภาพที่ 6.40 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

```
Source  DF        SS        MS      F      P
model    2  0.008798  0.004399  11.64  0.039
Error    3  0.001134  0.000378
Total    5  0.009932

S = 0.01944   R-Sq = 88.58%   R-Sq(adj) = 80.97%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  -------+---------+---------+---------+--
1      2  0.40000  0.00000                   (--------*--------)
2      2  0.30952  0.03367  (--------*--------)
3      2  0.33333  0.00000       (--------*-------)
                               -------+---------+---------+---------+--
                                    0.300     0.350     0.400     0.450

Pooled StDev = 0.01944
```

ภาพที่ 6.41 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 1 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับอื่นโดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2 คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคเท่ากับ 4 และ 25 ตามลำดับ

6.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน PSONK

การนำ PSONK เข้ามาช่วยแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่า ดังนั้นจึงควรมีการ

กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ใน PSONK มีดังนี้

ตารางที่ 6.57 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน PSONK

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
จำนวนฝูง	4	การทดลอง
จำนวนอนุภาคในฝูง	25	การทดลอง
Cognitive Component	$c_1 = 1$	Salman et al. (2002)
Social Component	$c_2 = 1$	Salman et al. (2002)
น้ำหนักความหน่วง	$w = 0.1$	Salman et al .(2002)
ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้	$c = 0.1$	Wattanapornprom *et al.* (2009)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ set 1.1-1.2 60 รอบ สำหรับ set 2.1-2.2 80 รอบ สำหรับ set 3.1-3.2 100 รอบ สำหรับ set 4.1-4.2 500 รอบ สำหรับ set 5.1-5.2 80 รอบ สำหรับ กรณีศึกษา	การทดลอง

6.7 **สรุปท้ายบท**

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดและหลักการของ PSONK ซึ่งเป็นวิธีที่งานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยนำหลักการของ PSO รวมกับหลักการของ COIN ที่ได้นำแนวคิดความรู้เชิงลบ (Negative Knowledge : NK) เข้ามาช่วยค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (นพพล คำภิรมย์, 2552) ซึ่งขั้นตอนการทำงานที่สำคัญของ PSONK คือ ขั้นตอนการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตาราง เพราะเป็นขั้นตอนที่ส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพของคำตอบที่ค้นพบหรือเป็นกระบวนการที่นำไปสู่การค้นพบคำตอบที่ดีที่สุด เพราะมีการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดีที่ได้จากฝูงย่อยและจากประชากร (Local Best Solution : Lbest และ Global Best Solution : Gbest) ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่ดีในรอบการทำงาน

ถัดไป และมีการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ที่ได้จากฝูงย่อยและจากประชากร (Local Worst Solution : Lworst และ Global Worst Solution : Gworst) ซึ่งเป็นการลดโอกาสเกิดสตริงคำตอบที่แย่ในรอบการทำงานถัดไป นอกจากนี้ยังมีเรื่องของการกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา ซึ่งถือได้ว่าเป็นเรื่องที่สำคัญเพราะค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิการค้นหาคำตอบของ PSONK

บทที่ 7

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับทฤษฎีของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) ขั้นตอนการทำงานของวิธี BBO ตัวอย่างการนำวิธี BBO ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ การกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

7.1 แนวคิดและหลักการของ BBO

แนวคิดและวิธีการทำงานของ Biogeography-Based Optimization (BBO) ที่นำมาประยุกต์กับปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดถูกเผยแพร่ครั้งแรกเมื่อปี 2008 โดย Dan Simon ซึ่งแนวคิดของ BBO นี้ถูกพัฒนามาจากหลักการการกระจายของสปีชี่ส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่อธิบายถึงวิธีการอพยพของสปีชี่ส์จากเกาะหนึ่งไปยังเกาะอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดสปีชี่ส์ใหม่และการสูญพันธ์ของสปีชี่ส์ (MacArthur and Wilson, 1967) โดยเกาะ (Island) หมายถึงถิ่นที่อยู่อาศัยของสปีชี่ส์ที่ถูกแยกออกจากถิ่นที่อยู่อาศัยอื่นด้วยน้ำ โดยเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์เหมาะกับการอยู่อาศัยจะมีจำนวนสปีชี่ส์อาศัยอยู่มาก (สปีชี่ส์เคาท์สูง) จึงกำหนดให้มีดัชนีความเหมาะสมของการอยู่อาศัย (Habitat Suitability Index: HSI) สูง และในทางตรงกันข้าม ถ้าเกาะใดมี HSI ต่ำแสดงว่ามีจำนวนสปีชี่ส์อาศัยอยู่น้อย (สปีชี่ส์เคาท์ต่ำ) โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เช่น ปริมาณน้ำฝน ขนาดพื้นที่ และอุณหภูมิ เราเรียกว่า ตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable: SIV) ดังนั้นเกาะที่มี HSI สูงจะมีอัตราการอพยพเข้าต่ำและอัตราการอพยพออกสูง เนื่องจากมีสปีชี่ส์อาศัยอยู่ในเกาะค่อนข้างแออัดจึงเหลือพื้นที่สำหรับสปีชี่ส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามาน้อยและสปีชี่ส์ที่อาศัยอยู่ก็พยายามอพยพออกจากเกาะเพราะความแออัด และในทางตรงกันข้าม เกาะที่มี HSI ต่ำจะมีอัตราการอพยพเข้าสูงและอัตราการอพยพออกต่ำ เนื่องจากมีสปีชี่ส์อาศัยอยู่ในเกาะน้อยจึงมีพื้นที่สำหรับสปีชี่ส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามามากและสปีชี่ส์ที่อาศัยอยู่ก็ไม่พยายามอพยพออกจากเกาะเพราะชอบที่อยู่อาศัยแบบไม่แออัด

สำหรับ BBO ที่นำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด จะใช้สตริงคำตอบแทนเกาะ โดยสตริงคำตอบของ BBO จะประกอบไปด้วยคุณลักษณะเฉพาะตัว (Feature) หรือ SIV ซึ่งเปรียบได้กับยีน (Gene) หรือบิท (Bit) ในเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GAs) โดยมีการประเมินค่าความเหมาะสมให้กับสตริงคำตอบที่ค้นพบ ซึ่งแต่ละสตริงคำตอบจะมีค่า HSI หรือค่าสปีชี่ส์เคาท์ (Species Count) เป็นดัชนีวัดความเหมาะสมของสตริงคำตอบ ซึ่งเปรียบได้กับค่าความแข็งแรง (Fitness) ใน GAs และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่า HIS มากแสดงว่าสตริงคำตอบนั้นมีค่าสปีชี่ส์เคาท์มากและเป็นสตริงคำตอบที่ดีและในทางตรงกันข้ามถ้าสตริงคำตอบใดมีค่า HIS น้อยแสดงว่าสตริงคำตอบนั้นมีค่าสปีชี่ส์เคาท์น้อยและเป็นสตริงคำตอบที่แย่ เมื่อสตริงคำตอบได้รับการประเมินค่าความเหมาะสมเรียบร้อยแล้ว จึงนำสตริงคำตอบไปพิจารณาในขั้นตอนต่อไป คือ การอพยพ (Migration) และการมิวเตชัน (Mutation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญของ BBO เพราะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบ

การอพยพเป็นกระบวนการปรับปรุงสตริงคำตอบที่ใช้อัตราการอพยพ (Migration Rate) เป็นเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการแบ่งปันคุณลักษณะกันระหว่างสตริงคำตอบ โดยแต่ละสตริงคำตอบจะมีค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) ที่ได้จากอัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate: λ) และค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) ที่ได้จากอัตราการอพยพเข้า (Emigration Rate: μ) ที่แตกต่างกัน โดยสตริงคำตอบที่ดีจะมีค่า P_λ น้อยหรือมีโอกาสน้อยที่จะรับคุณลักษณะจากคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง แต่จะมีค่า P_μ มากหรือมีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะของคำตอบตนเองไปสู่คำตอบอื่น ส่วนสตริงคำตอบที่แย่จะมีค่า P_λ มากหรือมีโอกาสสูงที่จะรับคุณลักษณะจากคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง แต่จะมีค่า P_μ น้อยหรือมีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะของคำตอบตนเองไปสู่คำตอบอื่น สำหรับขั้นตอนการอพยพจะเริ่มพิจารณาทีละบิทของทุกๆสตริงคำตอบ โดยใช้ค่า P_λ สำหรับการตัดสินใจว่าจะมีการอพยพเข้าหรือไม่ และถ้าตัดสินใจให้มีการอพยพเข้า (รับคุณลักษณะ) จึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะมีการอพยพออก (ถ่ายทอดคุณลักษณะ) ด้วยค่า P_μ โดยวิธีการคัดเลือกจะใช้วิธีวงล้อรูเล็ทที่สร้างขึ้นจากค่า P_μ จากนั้นจึงทำการแบ่งปันคุณลักษณะกันระหว่างสตริงคำตอบสตริงคำตอบอพยพเข้ากับสตริงคำตอบอพยพออก ณ บิทที่กำลังพิจารณาอยู่ (Ma, 2010)

การมิวเตชันคือกระบวนการที่ใช้ความน่าจะเป็นเป็นเกณฑ์ตัดสินใจในการคัดเลือกคุณลักษณะของคำตอบมาส่วนหนึ่ง เพื่อทำให้คุณลักษณะที่ถูกเลือกมาเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้สตริงคำตอบมีความหลากหลายมากขึ้นและหวังว่าการมิวเตชันจะทำให้คำตอบที่แย่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นและทำให้คำตอบที่ดีอยู่แล้วดีกว่าเดิมขึ้นไปอีก (Simon, 2008)

การอพยพและการมิวเตชันเป็นกระบวนการปรับปรุงสตริงคำตอบ ซึ่งทำให้สตริงคำตอบเกิดการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนปรับปรุง จึงมีความจำเป็นที่ต้องสร้างประชากรสตริงคำตอบชั่วคราว (Temporary Population) ขึ้น โดยทำการคัดลอกประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) ลงในประชากรสตริงคำตอบชั่วคราว (Z) และนำประชากรสตริงคำตอบชั่วคราวมาเป็นประชากรสตริงคำตอบที่จะถูกอพยพเข้า ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้นซึ่งใช้เป็นประชากรสตริงคำตอบสำหรับการอพยพออกและการมิวเตชันเกิดการเปลี่ยนแปลงก่อนที่กระบวนการปรับปรุงคำตอบจะเสร็จสิ้น

7.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

BBO เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของ Evolution Algorithms (EAs) ที่มีวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยการเลียนแบบพฤติกรรมทางธรรมชาติและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาที่มีความยากอย่างปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization Problems) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย BBO มีขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่สำคัญอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการอพยพและขั้นตอนการมิวเตชัน โดยจุดประสงค์ของการอพยพและการมิวเตชันคือต้องการให้มีการแบ่งปันข้อมูลกันระหว่างคำตอบเพื่อให้คำตอบมีการปรับปรุงไปในทิศทางที่ดีและทำให้คำตอบที่ค้นพบมีความหลากหลายมากขึ้นจนนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด (Ma, 2010) ซึ่ง BBO ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

7.2.1 Data Input : ข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ ได้แก่ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด รอบเวลาการผลิต เวลาการดำเนินงาน ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงานและแผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว

7.2.2 Representation & Initialization : สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) จำนวน N ตัว ด้วยวิธีการสุ่มและคัดลอกสตริงคำตอบเริ่มต้นลงในสตริงคำตอบชั่วคราว (Z)

7.2.3 Evaluation : นำลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

7.2.4 **Pareto Based Approach** : ใช้เทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดโดยเลือกใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (Goldberg, 1989) ในการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชี่ส์เคาท์ให้กับสตริงคำตอบ

7.2.5 **Migration Rate** : กำหนดรูปแบบการอพยพ (Migration Model) และคำนวณหาอัตราการอพยพเข้า (λ), อัตราการอพยพออก (μ), ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_{λ}),ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_{μ}) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ (P_K)

7.2.6 **Migration** : กระบวนการอพยพเริ่มจากการพิจารณาเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ที่กำลังพิจารณาอยู่ขณะนั้นด้วยค่า $P_{\lambda,k}$ และถ้าตัดสินใจที่จะทำการอพยพเข้าให้คัดเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยค่า P_{μ} จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่ถูกเลือกและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ และให้ทำซ้ำจนครบทุกบิทของทุกๆสตริง โดยเริ่มพิจารณาการอพยพจากสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์มากที่สุดไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์น้อยที่สุด

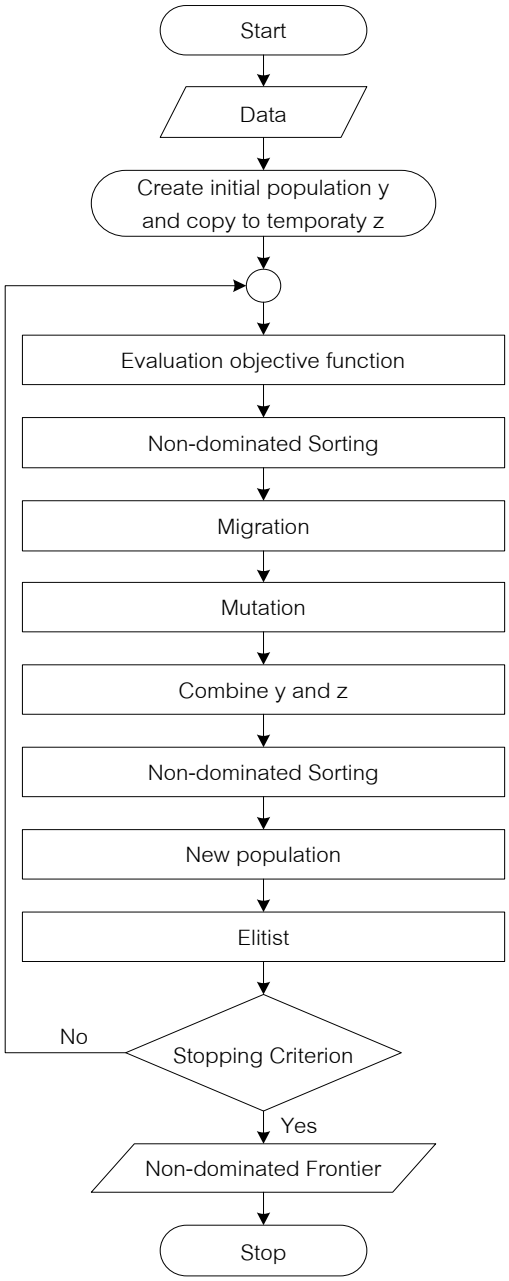
7.2.7 **Mutation** : นำสตริงคำตอบ Z ที่ได้จากกระบวนการอพยพเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน โดยการมิวเตชันจะเกิดขึ้นกับสตริงคำตอบเพียงบางส่วนเท่านั้น โดยเริ่มจากการคัดเลือกค่าสปีชี่ส์เคาท์หนึ่งค่าด้วยวงล้อรูเล็ทที่สร้างขึ้นจากค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ k ($P_{K,k}$) เพื่อนำสตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ที่สุ่มได้นั้นเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน จากนั้นจึงใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.01 (Ma, 2010) เป็นตัวกำหนดจำนวนบิทที่จะถูกมิวเตชัน ซึ่งจำนวนบิทที่คาดว่าจะได้รับการมิวเตชันมีจำนวนเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนบิทที่อยู่ในสปีชี่ส์เคาท์นี้ทั้งหมด

7.2.8 **Selection Next Population** : นำสตริงคำตอบชั่วคราวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบ (การอพยพและการมิวเตชัน) เรียบร้อยแล้วมารวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้นเพื่อนำไปประเมินค่าและทำการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting จากนั้นจึงทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนของสตริงคำตอบเริ่มต้น เพื่อนำไปใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป

7.2.9 Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (สปีชี่ส์เคาท์สูงสุดหรือค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1) ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า เพื่อใช้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

7.2.10 Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำจนครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนรอบการทำงานปัจจุบันยังน้อยกว่าจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนด ให้กลับไปทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 9 แต่ถ้าการวนซ้ำครบจำนวนรอบการทำงานสูงสุดที่กำหนดไว้ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 11

7.2.11 Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และนำคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 7.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO

7.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์

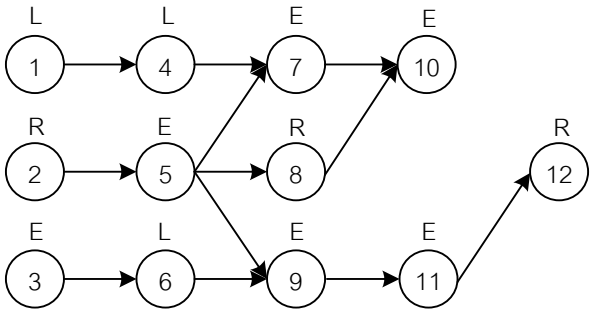
จากหัวข้อก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับหลักการและขั้นตอนการทำงานของ BBO ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในขั้นตอนการทำงานของ BBO ที่มากขึ้น ในหัวข้อนี้จึงนำเสนอโดยการยกตัวอย่างประกอบไปพร้อมกับการอธิบายรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังต่อไปนี้

7.3.1 ข้อมูลนำเข้า

สำหรับปัญหาตัวอย่างที่จะนำมาศึกษาขั้นตอนการแก้ปัญหาของ BBO จะเป็นปัญหาขนาดเล็ก ที่มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ A, B และ C มีสัดส่วนของ Minimum Part Set (MPS) เท่ากับ (4:4:4) มีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 12 โดยทำการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบที่มีความสมดุลตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังในปัญหาของ Kim et al. (2000) ที่มีรอบเวลาการทำงานของแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 และมีจำนวนขั้นงานการประกอบผลิตภัณฑ์เท่ากับ 12 ขั้นงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

7.3.1.1 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงาน

จากรูปลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของขั้นงานจะทำให้เราทราบเงื่อนไขการทำงานก่อนและหลังของแต่ละขั้นงาน เช่น ขั้นงานที่ 4 จะเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อขั้นงานที่ 1 เสร็จแล้ว และทำให้ทราบเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานลงสู่สถานีงานในแต่ละด้านของสายการประกอบ เช่น ขั้นงานที่ 1 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านซ้ายของสายการประกอบเท่านั้น (Left-side : L) ขั้นงานที่ 2 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านขวาของสายการประกอบเท่านั้น (Right-side : R) ส่วนขั้นงานที่ 3 สามารถจัดสรรให้อยู่ในสถานีงานด้านใดของสายการประกอบก็ได้ (Either-side : E) (Kim et al., 2000)



ภาพที่ 7.2 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลัง

7.3.1.2 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ

เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ของตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7.1 เวลาดำเนินงานในแต่ละขั้นงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน		
	A	B	C
1	2	3	1
2	3	3	3
3	2	0	1
4	3	2	1
5	1	2	3
6	1	0	2
7	3	2	1
8	3	1	2
9	2	1	0
10	2	3	1
11	1	2	3
12	0	1	2

7.3.1.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

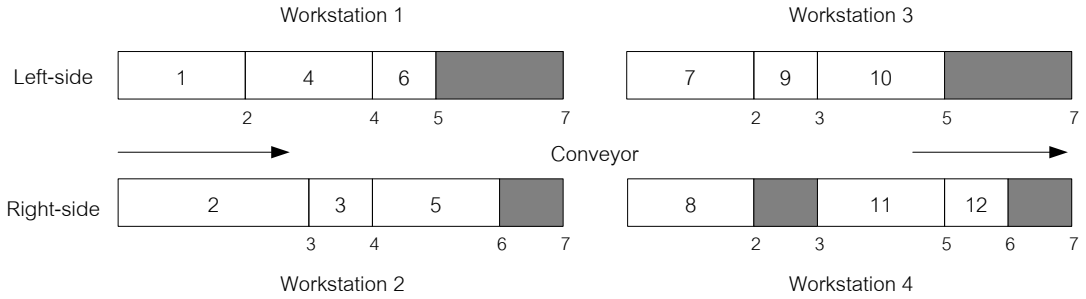
ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในตัวอย่างการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด

From/To	A	B	C
A	0	7.1	9.5
B	7.3	0	9.8
C	7.6	8.1	0

7.3.1.4 สายการประกอบแบบสองด้านที่มีความสมดุล

สายการประกอบแบบสองด้านที่ใช้เป็นตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการจัดสมดุลตามปัญหาของ Kim et al. (2000) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้วิธีการจัดสมดุลแบบเดียวกับงานวิจัยของปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้



ภาพที่ 7.3 สายการประกอบแบบสองด้านของปัญหา Kim et al. (2000) ที่มี 12 ขั้นงาน

7.3.1.5 **การใส่รหัสตำแหน่งให้กับผลิตภัณฑ์**

เมื่อทราบสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะจัดลำดับเข้าสู่สายการประกอบ ให้ทำการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามชนิดผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.3 การใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์

ประเภทสตริงคำตอบ	รหัส											
Product String	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Job String	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

7.3.1.6 **พารามิเตอร์ของ** BBO

ในที่นี้กำหนดให้พารามิเตอร์ที่ใช้ในการแสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม BBO มีดังนี้

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รูปแบบการอพยพใช้แบบ Linear และ Sinusoidal
- วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.01 (P_m =0.01)

7.3.2 **การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น**

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นนี้เราใช้วิธีการสุ่มแบบไม่ซ้ำในการเลือกค่าตำแหน่งให้กับแต่ละบิท โดยค่าตำแหน่งทุกค่าจะมีโอกาสในการถูกเลือกที่เท่ากันทั้งหมด เมื่อเราทำการสุ่มค่า

ตำแหน่งให้บิททั้งหมดแล้ว เราจะได้สตริงคำตอบมาหนึ่งสตริง จากนั้นให้สร้างสตริงคำตอบด้วยวิธีเดียวกันนี้ให้ครบตามจำนวนที่ต้องการ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.4 สตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบ	Position String											
1	6	8	5	1	12	2	9	4	10	11	7	3
2	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9
3	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
4	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
5	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4

7.3.3 การประเมินค่า

เมื่อได้สตริงคำตอบตามที่กำหนดไว้เรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบที่ได้มาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด จากนั้นจึงพิจารณากำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแต่ละสตริงคำตอบ ดังนี้

7.3.3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด สามารถดูตัวอย่างการคำนวณได้ในบทที่ 2 โดยมีสูตรคำนวณดังนี้

$$Minimize \ \ f_1(x) = \sum_{n_w=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{I} s_{i-1,i}^{n_w} \tag{7.1}$$

เมื่อ $f_1(x)$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในหนึ่งรอบการผลิต, $s_{i-1,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ $i-1$, $s_{0,i}^{n_w}$ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรในสถานีงาน n_w ที่เกิดขึ้นจากการผลิตผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ต่อจากผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ I และ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมดที่อยู่ในสายการประกอบ

$$Minimize\ \ f_2(x)=\sum_{n_m=1}^{N_m}\left(\sum_{i=1}^{I}U_{i,n_m}+Z_{I+1,n_m}/v_c\right) \tag{7.2}$$

โดยที่ $$U_{i,n_m}=\left\lfloor \begin{matrix}\max\left[0,\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m-1,m}+Y_{2n_m-1,m}\right)-L_{n_m}\right)/v_c\right]+\\ \max\left[0,\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m,m}+Y_{2n_m,m}\right)-L_{n_m}\right)/v_c\right]\end{matrix}\right\rfloor \tag{7.3}$$

$$Z_{i+1,n_m}=\max\left\lfloor \begin{matrix}\max\left[0,\min\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m-1,m}+Y_{2n_m-1,m}\right)-\gamma v_c,L_{n_m}-\gamma v_c\right)\right],\\ \max\left[0,\min\left(Z_{in_m}+v_c\sum_{m=1}^{M}X_{im}\left(t_{2n_m,m}+Y_{2n_m,m}\right)-\gamma v_c,L_{n_m}-\gamma v_c\right)\right]\end{matrix}\right\rfloor \tag{7.4}$$

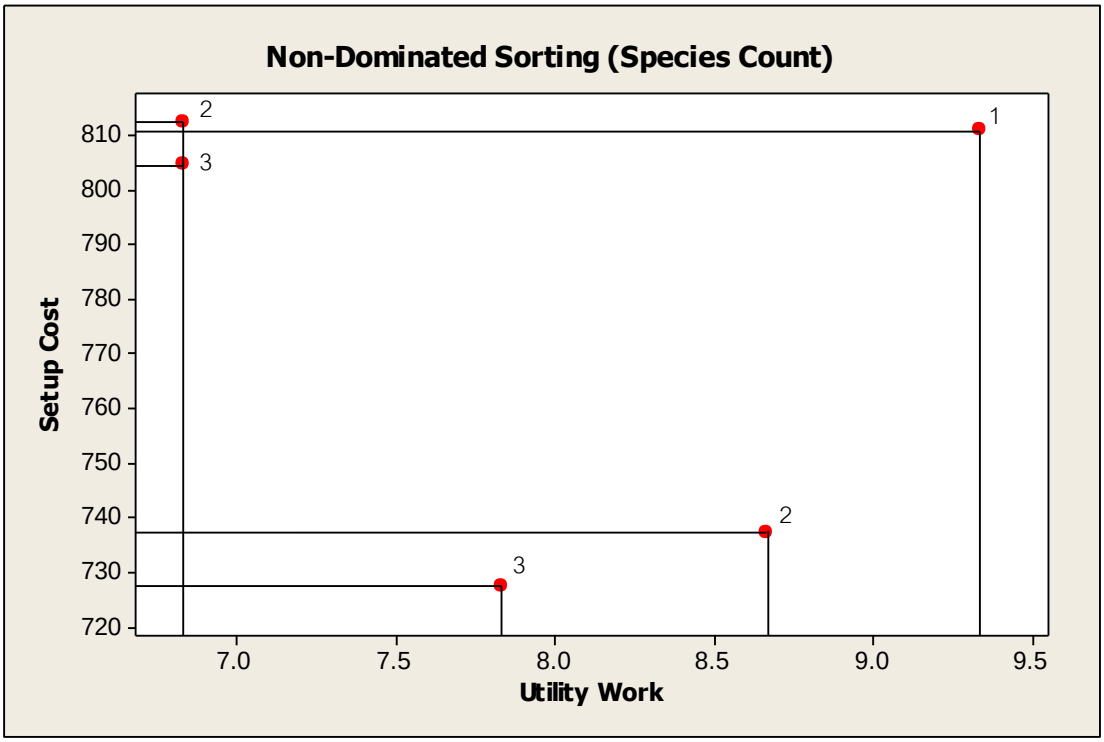
เมื่อ $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในหนึ่งรอบการผลิต, U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, Z_{i+1,n_m} คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m, I คือ จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด, N_m คือ จำนวนคู่สถานีงานทั้งหมด, n_w คือ สถานีงาน, M คือ จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมด, X_{im} คือ 1 ถ้าผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m ถ้าไม่ใช่ให้เท่ากับ 0, $t_{n_w m}$ คือ เวลาการดำเนินงานในสถานีงาน n_w ของผลิตภัณฑ์ m, Y_{n_w} คือ เวลาเดินเปล่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในสถานีงาน n_w, L_{n_w} คือ ความยาวของสถานีงาน n_w ($L_{n_w}=v_c\times CT$), CT คือ รอบเวลาการผลิต (Cycle Time), γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ และ v_c คือ ความเร็วของสายพานลำเลียง ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1

ตารางที่ 7.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
5	727.40	7.83
3	804.50	6.83
1	737.30	8.67
4	812.50	6.83
2	810.90	9.33

7.3.4 การกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์และการจัดลำดับสตริงคำตอบ

เมื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบไปจัดลำดับด้วยการกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์ ($k; k = 1,2,...,K$) โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับให้สตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงที่สุดเป็นอันดับที่ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบตัวที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์น้อยที่สุดเป็นอันดับสุดท้าย ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 7.4 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 7.6 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Species Count
5	727.40	7.83	1	3
3	804.50	6.83	1	3
1	737.30	8.67	2	2
4	812.50	6.83	2	2
2	810.90	9.33	3	1

7.3.5 การหาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์

อัตราการอพยพประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ อัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate : λ) และอัตราการอพยพออก (Emigration Rate : μ) ซึ่งลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราการอพยพเข้าและการอพยพออกจะทำให้เกิดรูปแบบการอพยพที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการอพยพสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงและไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยในแต่ละกลุ่มก็จะมีรูปแบบการอพยพที่แยกย่อยไปอีกหลายแบบด้วยกัน ซึ่งรูปแบบที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ BBO (Ma, 2010) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษารูปแบบการอพยพ 2 แบบ คือ แบบ Linear ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่เป็นเชิงเส้นตรงและแบบ Sinusoidal ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยทั้งสองรูปแบบมีอัตราการอพยพและค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์แตกต่างกันดังนี้

7.3.5.1 การอพยพแบบ Linear

ค่า Immigration Rate (λ_k) มีสมการคำนวณดังนี้

$$\lambda_k = I\left(1-\frac{k}{n}\right) \; ; \; n = K+1 \tag{7.5}$$

ค่า Emigration (μ_k)มีสมการคำนวณดังนี้

$$\mu_k = E\frac{k}{n} \; ; \; n = K+1 \tag{7.6}$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ k ($P_{K,k}$) มีสมการคำนวณดังนี้

$$P_{K,k} = \frac{\left(\frac{I}{E}\right)^k \left(\frac{n!}{k!(n-k)!}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{I}{E}\right)^i \left(\frac{n!}{i!(n-i)!}\right)} \tag{7.7}$$

ตารางที่ 7.7 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพแบบ Linear

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]	
					$P_{\mu,k}$	$P_{\lambda,k}$
3	1	5	0.75	0.25	0.5000	0.1667
	2	3				
2	1	1	0.50	0.50	0.3333	0.3333
	2	4				
1	1	2	0.25	0.75	0.1667	0.5000

ตารางที่ 7.8 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Linear

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	$P_{K,k}$
3	1	5	0.2500
	2	3	
2	1	1	0.3750
	2	4	
1	1	2	0.2500

7.3.5.2 การอพยพแบบ Sinusoidal

ค่า Immigration Rate (λ_k) มีสมการคำนวณดังนี้

$$\lambda_k = \frac{I}{2}\left(\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right) \;;\; n = K+1 \tag{7.8}$$

ค่า Emigration (μ_k)มีสมการคำนวณดังนี้

$$\mu_k = \frac{E}{2}\left(-\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right) \;;\; n = K+1 \tag{7.9}$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ k ($P_{K,k}$) มีสมการคำนวณดังนี้

$$P_{K,k} = \frac{\prod_{j=1}^{k}\left(\frac{I}{E}\right)^k\left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{i}\left(\frac{I}{E}\right)^i\left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \tag{7.10}$$

ตารางที่ 7.9 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	μ_k	λ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]	
					$P_{\mu,k}$	$P_{\lambda,k}$
3	1	5	0.8536	0.1464	0.5690	0.0967
	2	3				
2	1	1	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333
	2	4				
1	1	2	0.1464	0.8536	0.0967	0.5690

ตารางที่ 7.10 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	$P_{K,k}$
3	1	5	0.2500
	2	3	
2	1	1	0.4268
	2	4	
1	1	2	0.2500

จากผลการคำนวณด้านบนนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอัตราการอพยพเข้า อัตราการอพยพออกและค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ เมื่อใช้รูปแบบการอพยพที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ Linear และ Sinusoidal โดยรูปแบบการอพยพที่ใช้ในตัวอย่างนี้จะใช้แบบ Linear

7.3.6 การอพยพ

การอพยพเป็นกระบวนการปรับปรุงสตริงคำตอบที่ใช้อัตราการอพยพ (Migration Rate) เป็นเกณฑ์การตัดสินใจสำหรับการแบ่งปันคุณลักษณะกันระหว่างสตริงคำตอบ โดยแต่ละสตริงคำตอบจะมีค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) ที่ได้จากอัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate: λ) และค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) ที่ได้จากอัตราการอพยพเข้า (Emigration Rate: μ) ที่แตกต่างกัน โดยสตริงคำตอบที่ดีจะมีค่า P_λ น้อยหรือมีโอกาสน้อยที่จะรับคุณลักษณะจากคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง แต่จะมีค่า P_μ มากหรือมีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะของคำตอบตนเองไปสู่คำตอบอื่น ส่วนสตริงคำตอบที่แย่จะมีค่า P_λ มากหรือมีโอกาสสูงที่จะรับคุณลักษณะจากคำตอบอื่นเข้าสู่สตริงคำตอบตนเอง แต่จะมีค่า P_μ น้อยหรือมีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะของคำตอบตนเองไปสู่คำตอบอื่น สำหรับขั้นตอนการอพยพจะเริ่มพิจารณาทีละบิทของทุกๆสตริงคำตอบ โดยใช้ค่า P_λ สำหรับการตัดสินใจว่าจะมีการอพยพเข้าหรือไม่ และถ้าตัดสินใจให้มีการอพยพเข้า (รับคุณลักษณะ) จึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะมีการอพยพออก (ถ่ายทอดคุณลักษณะ) ด้วยค่า P_μ โดยวิธีการคัดเลือกจะใช้วิธีวงล้อรูเล็ทที่สร้างขึ้นจากค่า P_μ จากนั้นจึงทำการแบ่งปันคุณลักษณะกันระหว่างสตริงคำตอบสตริงคำตอบอพยพเข้ากับสตริงคำตอบอพยพออก ณ บิทที่กำลังพิจารณาอยู่ ซึ่งรายละเอียดของการอพยพที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

1. คัดลอก Y ลงใน Z เมื่อ Y คือ ประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น, y_k คือประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชี่ส์เคาท์ k, y_{k,n_k} คือสตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k, Z คือ ประชากรสตริงคำตอบชั่วคราว, z_k คือประชากรสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชี่ส์เคาท์ k และ z_{k,n_k} คือสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k เมื่อ $k=1,2,...,K$ และ $n_k=1,2,...,N_k$

2. กำหนดเลขดัชนี (b) เมื่อ $b=1,2,...,B$ ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด โดยกำหนดให้บิทซ้ายมือสุดของสตริงคำตอบมีเลขดัชนีเท่ากับ 1 และมีค่ามากขึ้นไปตามลำดับจนกระทั่งถึงบิทขวามือสุดของสตริงคำตอบซึ่งมีเลขดัชนีสูงสุดเท่ากับ B เช่น ถ้า $z_{1,1}$ =[41253] การกำหนดเลขดัชนีจะได้ผลดังนี้ $z_{1,1}(1)$ =4, $z_{1,1}(2)$ =1, $z_{1,1}(3)$ =2, $z_{1,1}(4)$ =5 และ $z_{1,1}(5)$ =3

3. กำหนดให้ $k=K$, $n_k=1$ และ $b=1$

4. สร้างเลขสุ่ม (r) ให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k บิทที่ b ($z_{k,n_k}(b)$) ถ้าค่า $r<P_{\lambda,k}$ จึงทำการอพยพค่าเข้าสู่ $z_{k,n}(b)$ โดยทำตามวิธีในขั้นตอนถัดไป แต่ถ้า $r(b)\geq P_{\lambda,k}$ ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 7

5. กำหนดให้ $X=Y-y_{k,n_k}$ เมื่อ X คือประชากรสตริงคำตอบอพยพออก, x_k คือประชากรสตริงคำตอบอพยพออกในสปีชี่ส์เคาท์ k, x_{k,m_k} คือสตริงคำตอบอพยพออกในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ m_k เมื่อ $k=1,2,...,K$ และ $m_k=\{1,2,...,M_k\}$ จากนั้นจึงพิจารณาการอพยพออกโดยเริ่มจากการสุ่มค่าสปีชี่ส์เคาท์มาหนึ่งค่าด้วยความน่าจะเป็นการอพยพออก (P_μ) และถ้าในสปีชี่ส์เคาท์ที่สุ่มได้มีจำนวนสมาชิกสตริงคำตอบเพียงหนึ่งตัว ($M_k=1$) ให้นำค่า $x_{k,m_k}(b)$ อพยพเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$ แต่ถ้าในสปีชี่ส์เคาท์ที่สุ่มได้มีจำนวนสมาชิกคำตอบมากกว่า 1 ตัว ($M_k>1$) ให้ทำการสุ่มสตริงคำตอบใน x_k มาหนึ่งสตริง จากนั้นจึงนำค่า $x_{k,m_k}(b)$ อพยพเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$

6. ทำการซ่อมแซมคำตอบ โดยนำค่า $y_{k,n_k}(b)$ ไปแทนที่ในบิทของสตริงคำตอบ z_{k,n_k} ที่มีค่าเท่ากับ $x_{k,m_k}(b)$

7. ถ้า $b<B$ ให้กำหนดค่า $b=b+1$ และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $b=B$ ให้ไปทำนำขั้นตอนถัดไป

8. ถ้า $n_k<N_k$ ให้กำหนดค่า $n_k=n_k+1$, $b=1$ และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $n_k=N_k$ ให้ไปทำนำขั้นตอนถัดไป

9. ถ้า $k>1$ ให้กำหนดค่า $k=k-1$, $n_k=1$, $b=1$ และกลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $k=1$ ให้หยุดกระบวนการอพยพ

สำหรับกระบวนการอพยพในตัวอย่างนี้เราจะใช้ค่า P_λ และ P_μ ที่มีรูปแบบการอพยพแบบ Linear โดยจากขั้นตอนของกระบวนการอพยพ 1-9 เราจะเริ่มพิจารณาที่สปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเป็นอันดับแรก ในที่นี้สปีชี่ส์เคาท์สูงสุด คือ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยสตริงคำตอบ 5 และ 3 จากนั้นจึงพิจารณาเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบทั้งสองด้วยค่า $P_{\lambda,3}$ และพิจารณาเลือกสตริงคำตอบอพยพออกด้วย P_μ จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณาและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ โดยสามารถแสดงวิธีทำได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.11 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 3

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_μ	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
5	1	0.5505	-	-	-	-	-
	2	0.8316	-	-	-	-	-
	3	0.0251	adjusted	3	{3}	3	1
	4	0.7175					
	5	0.5616	-	-	-	-	-
	6	0.2947	-	-	-	-	-
	7	0.5656	-	-	-	-	-
	8	0.2842	-	-	-	-	-
	9	0.4980	-	-	-	-	-
	10	0.1134	adjusted	2	{1,4}	4	1
	11	0.9249	-	-	-	-	-
	12	0.4550	-	-	-	-	-
3	1	0.8681	-	-	-	-	-
	2	0.5871	-	-	-	-	-
	3	0.8985	-	-	-	-	-
	4	0.4587					
	5	0.0433	adjusted	1	{2}	2	3
	6	0.7375	-	-	-	-	-
	7	0.2095	-	-	-	-	-
	8	0.1365	adjusted	3	{5}	5	9
	9	0.8667	-	-	-	-	-
	10	0.5158					

ตารางที่ 7.11 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 3 (ต่อ)

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
3	11	0.7675	-	-	-	-	-
	12	0.9802	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7.12 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 3

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	3	1	1	เริ่มต้น	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
				ปรับปรุง	5	8	<u>1</u>	3	10	2	11	9	7	12	6	4
				ซ่อมแซม	5	8	<u>1</u>	3	10	2	11	9	7	12	6	4
	10	12	1	เริ่มต้น	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
				ปรับปรุง	5	8	1	3	10	2	11	9	7	<u>1</u>	6	4
				ซ่อมแซม	5	8	<u>12</u>	3	10	2	11	9	7	1	6	4
3	5	7	3	เริ่มต้น	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
				ปรับปรุง	3	10	1	4	<u>3</u>	2	5	11	8	9	12	6
				ซ่อมแซม	<u>7</u>	10	1	4	3	2	5	11	8	9	12	6
	8	11	9	เริ่มต้น	7	10	1	4	3	2	5	11	8	9	12	6
				ปรับปรุง	7	10	1	4	3	2	5	<u>9</u>	8	9	12	6
				ซ่อมแซม	7	10	1	4	3	2	5	9	8	<u>11</u>	12	6

พิจารณาการอพยพที่สปีชี่ส์เคาท์ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยสตริงคำตอบที่ 1 และ 4 โดยเริ่มจากการคัดเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบทั้งสองด้วยค่า $P_{\lambda,2}$ และพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วย P_{μ} จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณาและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ ซึ่งสามารถแสดงวิธีทำได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.13 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 2

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
1	1	0.2290	adjusted	2	{4}	4	4
	2	0.7907	-	-	-	-	-
	3	0.1393	adjusted	2	{4}	4	2
	4	0.2353	adjusted	2	{4}	4	8
	5	0.5243	-	-	-	-	-
	6	0.7896	-	-	-	-	-
	7	0.9727	-	-	-	-	-
	8	0.9279	-	-	-	-	-
	9	0.9436	-	-	-	-	-
	10	0.6696	-	-	-	-	-
	11	0.6318	-	-	-	-	-
	12	0.0798	adjusted	3	{2}	2	9
4	1	0.5729	-	-	-	-	-
	2	0.2834	adjusted	2	{1}	1	8
	3	0.5100	-	-	-	-	-
	4	0.8194					
	5	0.7370	-	-	-	-	-
	6	0.1550	adjusted	3	{5,3}	5	2
	7	0.3947	-	-	-	-	-
	8	0.4338	-	-	-	-	-
	9	0.1648	adjusted	3	{5,3}	5	7
	10	0.9625					
	11	0.2383	adjusted	2	{1}	1	7
	12	0.8229	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7.14 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 2

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	6	4	เริ่มต้น	6	8	5	1	12	2	9	4	10	11	7	3
				ปรับปรุง	**4**	8	5	1	12	2	9	4	10	11	7	3
				ซ่อมแซม	4	8	5	1	12	2	9	**6**	10	11	7	3
	3	5	2	เริ่มต้น	4	8	5	1	12	2	9	6	10	11	7	3
				ปรับปรุง	4	8	**2**	1	12	2	9	6	10	11	7	3
				ซ่อมแซม	4	8	2	1	12	**5**	9	6	10	11	7	3
	4	1	8	เริ่มต้น	4	8	2	1	12	5	9	6	10	11	7	3
				ปรับปรุง	4	8	2	**8**	12	5	9	6	10	11	7	3
				ซ่อมแซม	4	**1**	2	8	12	5	9	6	10	11	7	3
	12	3	9	เริ่มต้น	4	1	2	8	12	5	9	6	10	11	7	3
				ปรับปรุง	4	1	2	8	12	5	9	6	10	11	7	**9**
				ซ่อมแซม	4	1	2	8	12	5	**3**	6	10	11	7	9
4	2	12	8	เริ่มต้น	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	**8**	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
				ซ่อมแซม	4	8	2	**12**	3	11	5	10	9	1	7	6
	6	11	2	เริ่มต้น	4	8	2	12	3	11	5	10	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	8	2	12	3	**2**	5	10	9	1	7	6
				ซ่อมแซม	4	8	**11**	12	3	2	5	10	9	1	7	6
	9	9	7	เริ่มต้น	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	8	11	12	3	2	5	10	**7**	1	7	6
				ซ่อมแซม	4	8	11	12	3	2	5	10	7	1	**9**	6
	11	9	7	เริ่มต้น	4	8	11	12	3	2	5	10	7	1	9	6
				ปรับปรุง	4	8	11	12	3	2	5	10	7	1	**7**	6
				ซ่อมแซม	4	8	11	12	3	2	5	10	**9**	1	7	6

พิจารณาการอพยพที่สปีชี่ส์เคาท์ 1 ซึ่งมีสตริงคำตอบที่ 2 เพียงสตริงเดียว โดยเริ่มจากการคัดเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบทั้งสองด้วยค่า $P_{\lambda,1}$ และพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วย P_{μ} จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณาและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.15 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 1

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
2	1	0.0172	adjusted	3	{5,3}	5	5
	2	0.8295	-	-	-	-	-
	3	0.9910					
	4	0.6758					
	5	0.4474	adjusted	3	{5,3}	5	10
	6	0.5695	-	-	-	-	-
	7	0.3302	adjusted	3	{5,3}	5	11
	8	0.1268	adjusted	3	{5,3}	3	11
	9	0.9345	-	-	-	-	-
	10	0.4201	adjusted	3	{5,3}	3	9
	11	0.8925	-	-	-	-	-
	12	0.2933	adjusted	3	{5,3}	5	4

ตารางที่ 7.16 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	1	7	5	เริ่มต้น	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9
				ปรับปรุง	**5**	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9
				ซ่อมแซม	5	8	1	6	3	**7**	11	4	12	2	10	9
	5	3	10	เริ่มต้น	5	8	1	6	3	7	11	4	12	2	10	9
				ปรับปรุง	5	8	1	6	**10**	7	11	4	12	2	10	9
				ซ่อมแซม	5	8	1	6	10	7	11	4	12	2	**3**	9
	7	11	11	เริ่มต้น	5	8	1	6	10	7	11	4	12	2	3	9
				ปรับปรุง	5	8	1	6	10	7	**11**	4	12	2	3	9
				ซ่อมแซม	5	8	1	6	10	7	**11**	4	12	2	3	9
	8	4	11	เริ่มต้น	5	8	1	6	10	7	11	4	12	2	3	9
				ปรับปรุง	5	8	1	6	10	7	11	**11**	12	2	3	9
				ซ่อมแซม	5	8	1	6	10	7	**4**	11	12	2	3	9

ตารางที่ 7.16 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1 (ต่อ)

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	10	2	9	เริ่มต้น	5	8	1	6	10	7	4	11	12	2	3	9
				ปรับปรุง	5	8	1	6	10	7	4	11	12	9	3	9
				ซ่อมแซม	5	8	1	6	10	7	4	11	12	9	3	2
	12	2	4	เริ่มต้น	5	8	1	6	10	7	4	11	12	9	3	2
				ปรับปรุง	5	8	1	6	10	7	4	11	12	9	3	4
				ซ่อมแซม	5	8	1	6	10	7	2	11	12	9	3	4

เมื่อพิจารณาการอพยพจนครบทุกสปีชี่ส์เคาท์แล้ว เราจะได้สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพดังนี้

ตารางที่ 7.17 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ

สตริงคำตอบ	Position String											
1	4	1	2	8	12	5	3	6	10	11	7	9
2	5	8	1	6	10	7	2	11	12	9	3	4
3	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
4	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
5	5	8	12	3	10	2	11	9	7	1	6	4

7.3.7 **การมิวเตชัน**

นำสตริงคำตอบ z ที่ได้จากกระบวนการอพยพเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เพื่อให้สตริงคำตอบมีความหลากหลายมากขึ้นและหวังว่าการมิวเตชันจะช่วยทำให้สตริงคำตอบเดิมที่มีอยู่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น (Ma, 2010) ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการมิวเตชันมีดังนี้

ก. การเลือกค่าสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เราจะใช้วิธีการคัดเลือกด้วยวงล้อรูเล็ท ซึ่งทำได้โดยการสร้างค่าวงล้อรูเล็ท (q_k) ให้กับทุกสปีชี่ส์เคาท์ด้วยค่า $m(k)$ ที่ได้มาจากค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ ($P_{K,k}$) ที่มีการอพยพแบบ Linear จากนั้นจึงสร้างเลขสุ่ม (r) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 มาหนึ่งค่าและพิจารณาเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่มีค่า $q_{k-1} \le r < q_k; q_0 = 0$ เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันต่อไป

$$m(k) = \frac{1 - P_{K,k}}{\sum_{k=1}^{K} \left(1 - P_{K,k}\right)} \tag{7.11}$$

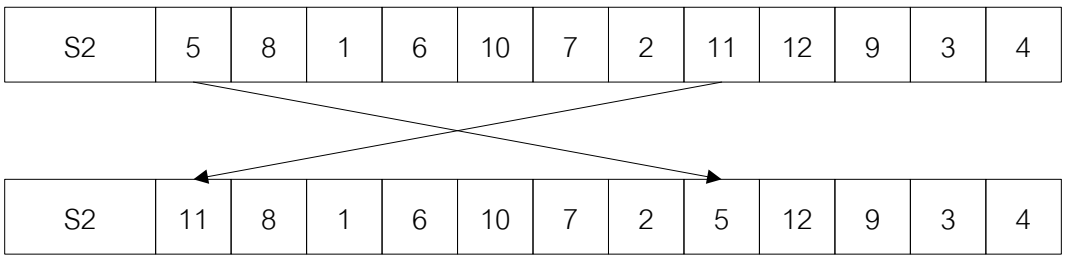
เมื่อ $m(k)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเลือกสปีชี่ส์เคาท์ k

$P_{K,k}$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ k

ตารางที่ 7.18 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ท

Species Count	$P_{K,k}$	$1 - P_{K,k}$	$m(k)$	ค่าวงล้อรูเล็ท q_k	r =0.8482
3	0.250	0.750	0.3529	0.3529	-
2	0.375	0.625	0.2941	0.6471	-
1	0.250	0.750	0.3529	1.0000	Selected

ข. จากสปีชี่ส์เคาท์ที่ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน ให้นำสตริงคำตอบที่อยู่ในสปีชี่ส์เคาท์นั้นเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน และใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.01 เป็นตัวกำหนดจำนวนบิทที่จะถูกมิวเตชัน ซึ่งจำนวนบิทที่คาดว่าจะได้รับการมิวเตชันมีจำนวนเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนบิทที่อยู่ในสปีชี่ส์เคาท์นี้ทั้งหมด ซึ่งในตัวอย่างนี้สุ่มเลือกได้สปีชี่ส์เคาท์ 1 ซึ่งมีสตริงคำตอบเพียงสตริงเดียว คือ สตริงคำตอบที่ 2 ดังนั้นบิทในสปีชี่ส์เคาท์ 1 มีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ 1X12 = 12 บิท เพราะฉะนั้นจำนวนบิทที่คาดว่าจะถูกมิวเตชันมีจำนวนเท่ากับ 0.01X12=0.12 บิท จากนั้นให้ทำการคัดเลือกบิทโดยเริ่มจากสร้างเลขสุ่มให้กับบิททั้งหมด ถ้าเลขสุ่มของบิทใดมีค่าน้อยกว่าค่า P_m เราจะทำการมิวเตชันบิทนั้นกับบิทอื่นที่อยู่ในสตริงคำตอบเดียวกัน ด้วยวิธี Reciprocal Exchange (Kim et al., 1996) ซึ่งในที่นี้บิทที่มีค่าเลขสุ่มน้อยกว่า P_m คือ บิทที่ 1 ของสตริงคำตอบที่ 2 (S2) จากนั้นให้ทำการสุ่มบิทที่ไม่ซ้ำกันมาหนึ่งบิท สมมติสุ่มได้บิทที่ 8 จึงนำค่าในบิทที่ 1 และ 8 มาสลับค่ากัน ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 7.5 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 2

ตารางที่ 7.19 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบ	Position String											
1	4	1	2	8	12	5	3	6	10	11	7	9
2	11	8	1	6	10	7	2	5	12	9	3	4
3	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
4	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
5	5	8	12	3	10	2	11	9	7	1	6	4

7.3.8 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

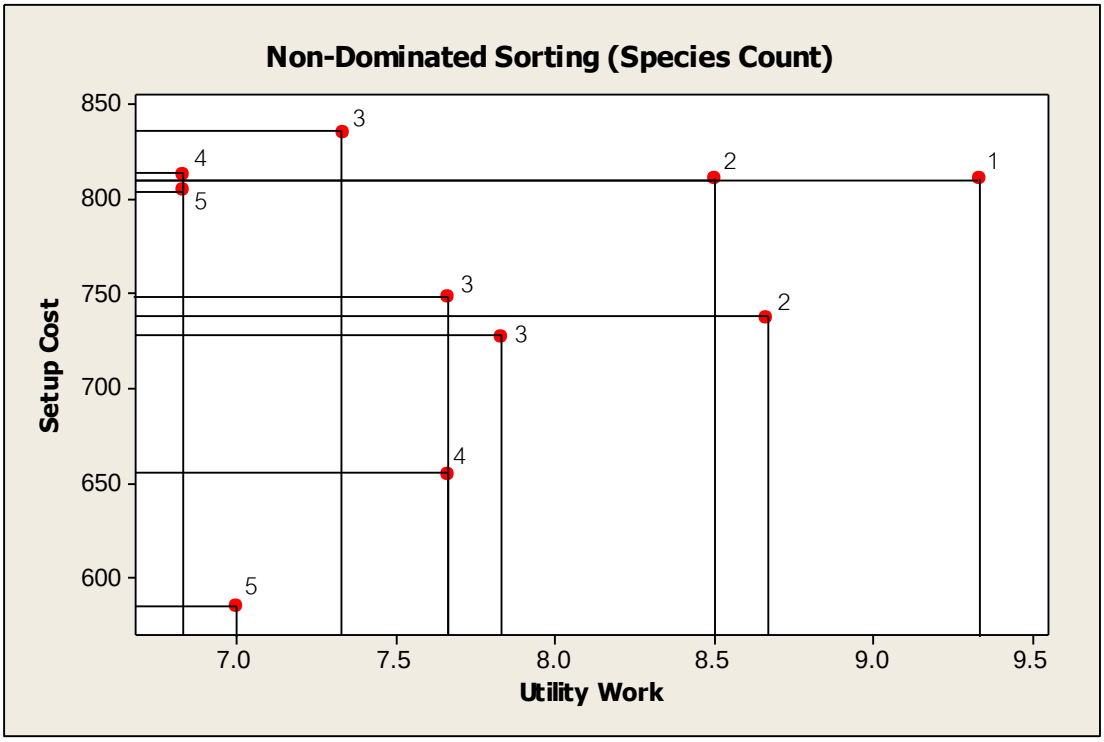
เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้และป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบต่างๆ เช่น การอพยพและการมิวเตชัน สูญหายไป ดังนั้นเราจึงต้องนำประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) และประชากรสตริงคำตอบชั่วคราว (Z) ซึ่งเป็นสตริงคำตอบที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบเรียบร้อยแล้วมารวมกันและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนสตริงคำตอบเริ่มต้น ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.20 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว

ประชากร	สตริงคำตอบ	Position String											
Y	1	6	8	5	1	12	2	9	4	10	11	7	3
	2	7	8	1	6	3	5	11	4	12	2	10	9
	3	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
	4	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
	5	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
Z	6	4	1	2	8	12	5	3	6	10	11	7	9
	7	11	8	1	6	10	7	2	5	12	9	3	4
	8	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
	9	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
	10	5	8	12	3	10	2	11	9	7	1	6	4

เมื่อได้นำ Y รวมกับ Z เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชัน และใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชี่ส์

เคาท์ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด พร้อมกับเรียงค่าสปีชี่ส์เคาท์จากมากไปน้อยและและถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากโดยเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 7.6 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 7.21 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Species Count
8	584.70	7.00	1	5
3	804.50	6.83	1	5
9	654.60	7.67	2	4
4	812.50	6.83	2	4
5	727.40	7.83	3	3
7	835.20	7.33	3	3
6	748.50	7.67	3	3
1	737.30	8.67	4	2
10	810.90	8.50	4	2
2	810.90	9.33	5	1

นำสตริงคำตอบที่กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์เรียบร้อยแล้วมาทำการคัดเลือกเพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ โดยเริ่มจากการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน จากนั้นจึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบเริ่มต้นสำหรับรอบการทำงานถัดไป โดยเริ่มพิจาณาจากค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดไปยังค่าสปีชี่ส์เคาท์ที่มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกว่าจะได้จำนวนสตริงคำตอบเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้น ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.22 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 1

สตริงคำตอบ	Position String											
8	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
3	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6

ตารางที่ 7.23 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป

สตริงคำตอบ	Position String											
8	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
3	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
9	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
4	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
5	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4

7.3.9 **การแก้ปัญหาในรอบถัดไป**

การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2 นี้จะเริ่มจากการนำสตริงคำตอบสำหรับรอบการทำงานถัดไปในรอบการทำงานที่ 1 มาเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นของรอบการทำงานที่ 2 ส่วนขั้นตอนอื่นๆ ยังคงเหมือนกับรอบการทำงานที่ 1 ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการทำงานรอบที่ 2 ไว้ดังนี้

7.3.9.1 **สตริงคำตอบเบื้องต้น**

ตารางที่ 7.24 สตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบ	Position String											
1	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
2	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
3	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
4	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
5	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4

7.3.9.2 **การประเมินค่า**

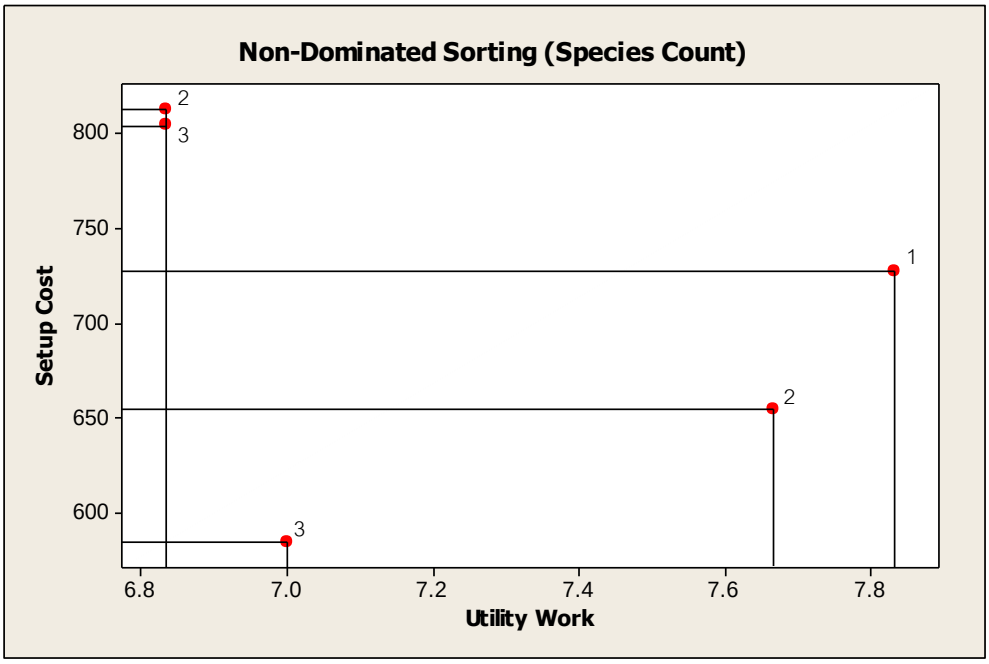
นำสตริงคำตอบเริ่มต้นมาประเมินค่า โดยการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.25 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work
1	584.70	7.00
2	804.50	6.83
3	654.60	7.67
4	812.50	6.83
5	727.40	7.83

7.3.9.3 **การกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์และการจัดลำดับสตริงคำตอบ**

เมื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสองเรียบร้อยแล้ว เราจึงนำสตริงคำตอบไปจัดลำดับด้วยการกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์ (Species Count) โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting โดยเริ่มพิจารณาจัดอันดับให้สตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงที่สุดเป็นอันดับที่ 1 ไปจนถึงสตริงคำตอบตัวที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์น้อยที่สุดเป็นอันดับสุดท้าย ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 7.7 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 7.26 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Species Count
1	584.70	7.00	1	3
2	804.50	6.83	1	3
3	654.60	7.67	2	2
4	812.50	6.83	2	2
5	727.40	7.83	3	1

7.3.9.4 การหาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์

อัตราการอพยพประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ อัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate : λ) และอัตราการอพยพออก (Emigration Rate : μ) ซึ่งลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราการอพยพเข้าและการอพยพออกจะทำให้เกิดรูปแบบการอพยพที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการอพยพสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงและไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยในแต่ละกลุ่มก็จะมีรูปแบบการอพยพที่แยกย่อยไปอีกหลายแบบด้วยกัน ซึ่งรูปแบบที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ BBO (Ma, 2010) ดังนั้นใน

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษารูปแบบการอพยพ 2 แบบ คือ แบบ Linear ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่เป็นเชิงเส้นตรง และแบบ Sinusoidal ซึ่งอยู่ในกลุ่มที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยทั้งสองรูปแบบมีอัตราการอพยพและค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์แตกต่างกัน และการคำนวณจะใช้สูตรเดียวกับรอบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งได้ผลดังนี้

- **การอพยพแบบ Linear**

ตารางที่ 7.27 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพแบบ Linear

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]	
					$P_{\mu,k}$	$P_{\lambda,k}$
3	1	1	0.75	0.25	0.5000	0.1667
	2	2				
2	1	3	0.50	0.50	0.3333	0.3333
	2	4				
1	1	5	0.25	0.75	0.1667	0.5000

ตารางที่ 7.28 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Linear

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	$P_{K,k}$
3	1	1	0.2500
	2	2	
2	1	3	0.3750
	2	4	
1	1	5	0.2500

- **การอพยพแบบ Sinusoidal**

ตารางที่ 7.29 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพออกและการอพยพเข้าที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	μ_k	λ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]	
					$P_{\mu,k}$	$P_{\lambda,k}$
3	1	1	0.8536	0.1464	0.5690	0.0967
	2	2				
2	1	3	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333
	2	4				
1	1	5	0.1464	0.8536	0.0967	0.5690

ตารางที่ 7.30 ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	$P_{K,k}$
3	1	1	0.2500
	2	2	
2	1	3	0.4268
	2	4	
1	1	5	0.2500

7.3.9.5 การอพยพ

สำหรับการอพยพในตัวอย่างนี้จะใช้การอพยพแบบ Linear และทำการอพยพตามขั้นตอนของกระบวนการอพยพ 1-9 ในรอบการทำงานก่อนหน้า โดยเริ่มพิจารณาจากสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเป็นอันดับแรก ซึ่งในที่นี้คือสปีชี่ส์เคาท์ 3 ที่ประกอบไปด้วยสตริงคำตอบ 1 และ 2 จากนั้นจึงพิจารณาเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบทั้งสองด้วยค่า $P_{\lambda,3}$ และพิจารณาเลือกสตริงคำตอบอพยพออกด้วย P_{μ} จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณาและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ ซึ่งสามารถแสดงวิธีทำได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.31 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 3

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
1	1	0.3257	-	-	-	-	-
	2	0.1563	adjusted	3	{5}	5	8
	3	0.6235		-	-	-	-
	4	0.4814					
	5	0.8708	-	-	-	-	-
	6	0.4765	-	-	-	-	-
	7	0.4032	-	-	-	-	-
	8	0.0230	adjusted	2	{3,4}	4	10
	9	0.1983	-	-	-	-	-
	10	0.9222	-	-	-	-	-
	11	0.1836	-	-	-	-	-
	12	0.2087	-	-	-	-	-
2	1	0.4297	-	-	-	-	-
	2	0.5943	-	-	-	-	-
	3	0.6200	-	-	-	-	-
	4	0.1181	adjusted	3	{1}	1	4
	5	0.8346	-	-	-	-	-
	6	0.4106	-	-	-	-	-
	7	0.5202	-	-	-	-	-
	8	0.7499	-	-	-	-	-
	9	0.8271	-	-	-	-	-
	10	0.7867					
	11	0.0493	adjusted	2	{3,4}	3	7
	12	0.7295	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7.32 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 3

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	10	8	เริ่มต้น	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
				ปรับปรุง	7	**8**	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
				ซ่อมแซม	7	8	1	4	3	2	5	9	**10**	11	12	6
	8	9	10	เริ่มต้น	7	8	1	4	3	2	5	9	10	11	12	6
				ปรับปรุง	7	8	1	4	3	2	5	**10**	10	11	12	6
				ซ่อมแซม	7	8	1	4	3	2	5	10	**9**	11	12	6
2	4	4	4	เริ่มต้น	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
				ปรับปรุง	3	10	1	**4**	7	2	5	11	8	9	12	6
				ซ่อมแซม	3	10	1	**4**	7	2	5	11	8	9	12	6
	11	12	7	เริ่มต้น	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
				ปรับปรุง	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	**7**	6
				ซ่อมแซม	3	10	1	4	**12**	2	5	11	8	9	7	6

พิจารณาการอพยพที่สปีชี่ส์เคาท์ 2 ซึ่งประกอบไปด้วยสตริงคำตอบที่ 3 และ 4 โดยเริ่มจากการคัดเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบทั้งสองด้วยค่า $P_{\lambda,2}$ และพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วย P_{μ} จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณาและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ ซึ่งสามารถแสดงวิธีทำได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.33 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 2

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
3	1	0.2997	adjusted	3	{1,2}	1	7
	2	0.5558	-	-	-	-	-
	3	0.7338	-	-	-	-	-
	4	0.8338	-	-	-	-	-
	5	0.0315	adjusted	2	{4}	4	3

ตารางที่ 7.32 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 2 (ต่อ)

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
3	6	0.6982	-	-	-	-	-
	7	0.0077	adjusted	3	{1,2}	2	5
	8	0.4396	-	-	-	-	-
	9	0.3989	-	-	-	-	-
	10	0.5457	-	-	-	-	-
	11	0.8274	-	-	-	-	-
	12	0.1833	adjusted	1	{5}	5	4
4	1	0.9267	-	-	-	-	-
	2	0.0855	adjusted	3	{1,2}	2	10
	3	0.2019	adjusted	2	{3}	3	11
	4	0.8890	-	-	-	-	-
	5	0.9142	-	-	-	-	-
	6	0.2107	adjusted	2	{3}	3	2
	7	0.8396	-	-	-	-	-
	8	0.9788	-	-	-	-	-
	9	0.6772	-	-	-	-	-
	10	0.1920	adjusted	3	{1,2}	1	11
	11	0.7524	-	-	-	-	-
	12	0.3849	-	-	-	-	-

ตารางที่ 7.34 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 2

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	1	4	7	เริ่มต้น	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
				ปรับปรุง	**7**	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
				ซ่อมแซม	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	**4**	6
	5	3	3	เริ่มต้น	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	4	6
				ปรับปรุง	7	8	11	12	**3**	2	5	10	9	1	4	6
				ซ่อมแซม	7	8	11	12	**3**	2	5	10	9	1	4	6
	7	5	5	เริ่มต้น	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	4	6
				ปรับปรุง	7	8	11	12	3	2	**5**	10	9	1	4	6
				ซ่อมแซม	7	8	11	12	3	2	**5**	10	9	1	4	6
	12	6	4	เริ่มต้น	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	4	6
				ปรับปรุง	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	4	**4**
				ซ่อมแซม	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	**6**	4
4	2	12	10	เริ่มต้น	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	**10**	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
				ซ่อมแซม	4	10	2	8	3	11	5	**12**	9	1	7	6
	3	2	11	เริ่มต้น	4	10	2	8	3	11	5	12	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	10	**11**	8	3	11	5	12	9	1	7	6
				ซ่อมแซม	4	10	11	8	3	**2**	5	12	9	1	7	6
	6	2	2	เริ่มต้น	4	10	11	8	3	2	5	12	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	10	11	8	3	**2**	5	12	9	1	7	6
				ซ่อมแซม	4	10	11	8	3	**2**	5	12	9	1	7	6
	10	1	11	เริ่มต้น	4	10	11	8	3	2	5	12	9	1	7	6
				ปรับปรุง	4	10	11	8	3	2	5	12	9	**11**	7	6
				ซ่อมแซม	4	10	**1**	8	3	2	5	12	9	11	7	6

พิจารณาการอพยพที่สปีชี่ส์เคาท์ 1 ซึ่งมีสตริงคำตอบที่ 5 เพียงสตริงเดียว โดยเริ่มจากการคัดเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบทั้งสองด้วยค่า $P_{\lambda,1}$ และพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วย P_{μ} จากนั้นจึงทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณาและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ ซึ่งได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.35 การอพยพเข้าและออกสำหรับสปีชี่ส์เคาท์ 1

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
5	1	0.1539	adjusted	2	{3,4}	3	4
	2	0.7421	-	-	-	-	-
	3	0.4082	adjusted	2	{3,4}	3	11
	4	0.5300	-	-	-	-	-
	5	0.1143	adjusted	3	{1,2}	1	3
	6	0.9899	-	-	-	-	-
	7	0.5978	-	-	-	-	-
	8	0.1970	adjusted	2	{3,4}	4	10
	9	0.2528	adjusted	3	{1,2}	1	8
	10	0.7848	-	-	-	-	-
	11	0.6732	-	-	-	-	-
	12	0.0424	adjusted	2	{3,4}	3	6

ตารางที่ 7.36 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	1	5	4	เริ่มต้น	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
				ปรับปรุง	**4**	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
				ซ่อมแซม	4	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	**5**
	3	1	11	เริ่มต้น	4	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	5
				ปรับปรุง	4	8	**11**	3	10	2	11	9	7	12	6	5
				ซ่อมแซม	4	8	11	3	10	2	**1**	9	7	12	6	5
	5	10	3	เริ่มต้น	4	8	11	3	10	2	1	9	7	12	6	5
				ปรับปรุง	4	8	11	3	**3**	2	1	9	7	12	6	5
				ซ่อมแซม	4	8	11	**10**	3	2	1	9	7	12	6	5
	8	9	10	เริ่มต้น	4	8	11	10	3	2	1	9	7	12	6	5
				ปรับปรุง	4	8	11	10	3	2	1	**10**	7	12	6	5
				ซ่อมแซม	4	8	11	**9**	3	2	1	10	7	12	6	5

ตารางที่ 7.36 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1 (ต่อ)

สตริงคำตอบ	บิท	Immigrate $z_{k,n_k}(b)$	Emigrate $x_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ z_{k,n_k}											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	9	7	8	เริ่มต้น	4	8	11	9	3	2	1	10	7	12	6	5
				ปรับปรุง	4	8	11	9	3	2	1	10	**8**	12	6	5
				ซ่อมแซม	4	**7**	11	9	3	2	1	10	8	12	6	5
	12	5	6	เริ่มต้น	4	7	11	9	3	2	1	10	8	12	6	5
				ปรับปรุง	4	7	11	9	3	2	1	10	8	12	6	**6**
				ซ่อมแซม	4	7	11	9	3	2	1	10	8	12	**5**	6

เมื่อพิจารณาการอพยพจนครบทุกสปีชี่ส์เคาท์แล้ว เราจะได้สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพดังนี้

ตารางที่ 7.37 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ

สตริงคำตอบ	Position String											
1	7	8	1	4	3	2	5	10	9	11	12	6
2	3	10	1	4	12	2	5	11	8	9	7	6
3	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	6	4
4	4	10	1	8	3	2	5	12	9	11	7	6
5	4	7	11	9	3	2	1	10	8	12	5	6

7.3.9.6 **การมิวเตชัน**

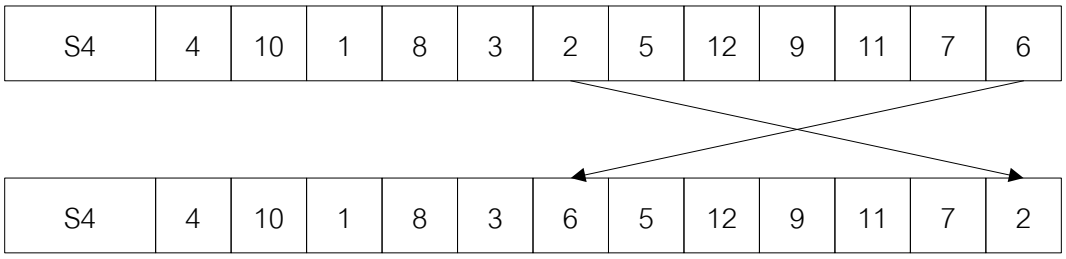
นำสตริงคำตอบ z ที่ได้จากกระบวนการอพยพเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เพื่อให้สตริงคำตอบมีความหลากหลายมากขึ้นและหวังว่าการมิวเตชันจะช่วยทำให้สตริงคำตอบเดิมที่มีอยู่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น (Ma, 2010) ซึ่งขั้นตอนของกระบวนการมิวเตชันมีดังนี้

- การเลือกค่าสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เราจะใช้วิธีการคัดเลือกด้วยวงล้อรูเล็ท ซึ่งทำได้โดยการสร้างค่าวงล้อรูเล็ท (q_k) ให้กับทุกสปีชี่ส์เคาท์ด้วยค่า $m(k)$ ที่ได้มาจากค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ ($P_{K,k}$) ที่มีการอพยพแบบ Linear จากนั้นจึงสร้างเลขสุ่ม (r) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 มาหนึ่งค่าและพิจารณาเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่มีค่า $q_{k-1} \le r < q_k; q_0 = 0$ เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันต่อไป โดยการคำนวณหาค่า $m(k)$ ใช้สูตรเดียวกับรอบการทำงานก่อนหน้า ซึ่งได้ผลได้นี้

ตารางที่ 7.38 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ท

Species Count	$P_{K,k}$	$1-P_{K,k}$	$m(k)$	ค่าวงล้อรูเล็ท q_k	r =0.5499
3	0.250	0.750	0.3529	0.3529	-
2	0.375	0.625	0.2941	0.6471	Selected
1	0.250	0.750	0.3529	1.0000	-

- จากสปีชี่ส์เคาท์ที่ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน ให้นำสตริงคำตอบที่อยู่ในสปีชี่ส์เคาท์นั้นเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน และใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.01 เป็นตัวกำหนดจำนวนบิทที่จะถูกมิวเตชัน ซึ่งจำนวนบิทที่คาดว่าจะได้รับการมิวเตชันมีจำนวนเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนบิทที่อยู่ในสปีชี่ส์เคาท์นี้ทั้งหมด ซึ่งในตัวอย่างนี้สุ่มเลือกได้สปีชี่ส์เคาท์ 2 ซึ่งมีจำนวนสตริงคำตอบเท่ากับ 2 สตริง คือ สตริงคำตอบที่ 3 และ 4 โดยสตริงคำตอบมีจำนวนบิทเท่ากับ 12 ดังนั้นบิทในสปีชี่ส์เคาท์ 2 มีจำนวนทั้งหมดเท่ากับ 2X12=24 บิท เพราะฉะนั้น จำนวนบิทที่คาดว่าจะถูกมิวเตชันมีจำนวนเท่ากับ 0.01X24=0.24 บิท จากนั้นให้ทำการคัดเลือกบิทโดยเริ่มจากสร้างเลขสุ่มให้กับบิททั้งหมด ถ้าเลขสุ่มของบิทใดมีค่าน้อยกว่าค่า P_m เราจะทำการมิวเตชันบิทนั้นกับบิทอื่นที่อยู่ในสตริงคำตอบเดียวกัน ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation (Kim et al., 1996) ซึ่งในที่นี้บิทที่มีค่าเลขสุ่มน้อยกว่า P_m คือ บิทที่ 6 ของสตริงคำตอบที่ 4 (S4) จากนั้นให้ทำการสุ่มบิทที่ไม่ซ้ำกันมาหนึ่งบิท สมมติสุ่มได้บิทที่ 12 จึงนำค่าในบิทที่ 6 และ 12 มาสลับค่ากัน ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 7.8 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 4

ตารางที่ 7.39 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบ	Position String											
1	7	8	1	4	3	2	5	10	9	11	12	6
2	3	10	1	4	12	2	5	11	8	9	7	6
3	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	6	4
4	4	10	1	8	3	6	5	12	9	11	7	2
5	4	7	11	9	3	2	1	10	8	12	5	6

7.3.9.7 **การเก็บค่าที่ดีที่สุด**

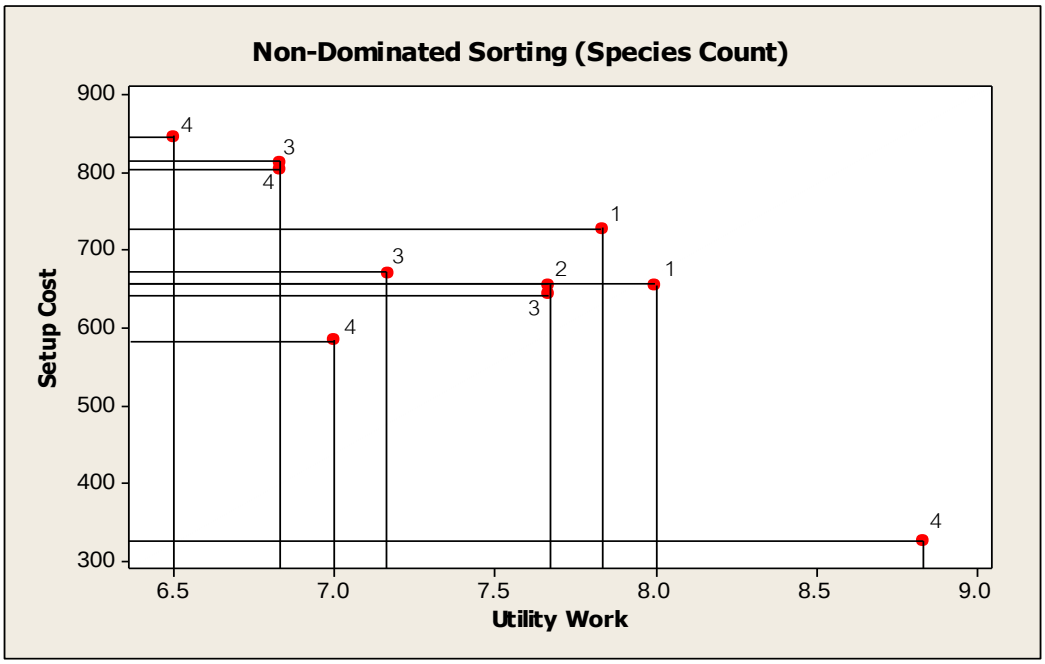
เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้และป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบต่างๆ เช่น การอพยพและการมิวเตชันสูญหายไป ดังนั้นเราจึงต้องนำประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) และประชากรสตริงคำตอบชั่วคราว (Z) ซึ่งเป็นสตริงคำตอบที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคำตอบเรียบร้อยแล้วมารวมกันและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนสตริงคำตอบเริ่มต้น ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.40 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว

ประชากร	สตริงคำตอบ	Position String											
Y	1	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
	2	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
	3	4	8	11	12	3	2	5	10	9	1	7	6
	4	4	12	2	8	3	11	5	10	9	1	7	6
	5	5	8	1	3	10	2	11	9	7	12	6	4
Z	6	7	8	1	4	3	2	5	10	9	11	12	6
	7	3	10	1	4	12	2	5	11	8	9	7	6
	8	7	8	11	12	3	2	5	10	9	1	6	4
	9	4	10	1	8	3	6	5	12	9	11	7	2
	10	4	7	11	9	3	2	1	10	8	12	5	6

เมื่อได้นำ Y รวมกับ Z เรียบร้อยแล้ว จึงนำไปคำนวณค่าวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ และใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรง

และค่าสปีชี่ส์เคาท์ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด พร้อมกับเรียงค่าสปีชี่ส์เคาท์จากมากไปน้อยและ และถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากโดยเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 7.9 กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์แบบ Non-Dominated Sorting

ตารางที่ 7.41 ค่าสปีชี่ส์เคาท์และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบ	Setup Cost	Utility Work	Dummy Fitness	Species Count
6	324.90	8.83	1	4
7	845.90	6.50	1	4
1	584.70	7.00	1	4
2	804.50	6.83	1	4
9	643.40	7.67	2	3
4	812.50	6.83	2	3
10	671.40	7.17	2	3
3	654.60	7.67	3	2
8	654.60	8.00	4	1
5	727.40	7.83	4	1

นำสตริงคำตอบที่กำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์เรียบร้อยแล้วมาทำการคัดเลือกเพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ โดยเริ่มจากการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน จากนั้นจึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบเริ่มต้นสำหรับรอบการทำงานถัดไป โดยเริ่มพิจาณาจากค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดไปยังค่าสปีชี่ส์เคาท์ที่มีค่าลดลงเรื่อยๆ จนกว่าจะได้จำนวนสตริงคำตอบเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้น ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 7.42 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบ	Position String											
6	7	8	1	4	3	2	5	10	9	11	12	6
1	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
2	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
7	3	10	1	4	12	2	5	11	8	9	7	6

ตารางที่ 7.43 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป

สตริงคำตอบ	Position String											
6	7	8	1	4	3	2	5	10	9	11	12	6
1	7	10	1	4	3	2	5	9	8	11	12	6
2	3	10	1	4	7	2	5	11	8	9	12	6
7	3	10	1	4	12	2	5	11	8	9	7	6
9	4	10	1	8	3	6	5	12	9	11	7	2

7.4 การออกแบบการทดลอง

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้คุณภาพคำตอบหรือประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยมากที่สุด โดยพารามิเตอร์ของ BBO ที่ผู้วิจัยสนใจนำมาทำการทดสอบได้แก่ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 7.44 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ BBO ที่ทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ปัจจัยที่ 1 รูปแบบการอพยพ	ระดับที่ 1 แบบ Linear ระดับที่ 2 แบบ Sinusoidal

สำหรับรูปแบบการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การทดลองแบบ Full Factorial Design โดยมีจำนวนการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละการทดลองเท่ากับ 2 ครั้ง มีจำนวนปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว มีระดับปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ และมีปัญหาการทดลองเท่ากับ 11 ปัญหา ดังนั้นในบทนี้จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 2x2x11 = 44 ครั้ง โดยจะใช้ตัวแปรตอบสนองในการวิเคราะห์ 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาในการคำนวณ (Computation Time to Solution) ทั้งนี้ก็เพื่อให้บรรลุเป้าหมายทั้งสองด้านของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ กลุ่มคำตอบที่ได้ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและสมาชิกคำตอบภายในกลุ่มมีความหลากหลายมากที่สุด เมื่อออกแบบการทดลองเรียบร้อยแล้วจึงนำผลการทดลองทั้งหมดของ BBO ไปวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาการทดลอง

7.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำผลการทดลองทั้งหมดของ BBO มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์เหมือนกับบทที่ 5

7.5.1 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 1.1

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหาการทดลองจะพิจารณาจากการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมซึ่งส่งผลให้ BBO สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS      F      P
model    1  0.0027836  0.0027836  37.20  0.026
Error    2  0.0001496  0.0000748
Total    3  0.0029333

S = 0.008650   R-Sq = 94.90%   R-Sq(adj) = 92.35%


                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  -------+---------+---------+---------+--
1      2  0.057367  0.011090                  (--------*--------)
2      2  0.004606  0.005162  (--------*-------)
                               -------+---------+---------+---------+--
                                    0.000     0.030     0.060     0.090

Pooled StDev = 0.008650
```

ภาพที่ 7.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.1 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.2 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 1.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS       F      P
model    1  0.0022038  0.0022038  112.29  0.009
Error    2  0.0000393  0.0000196
Total    3  0.0022430

S = 0.004430   R-Sq = 98.25%   R-Sq(adj) = 97.38%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  --+---------+---------+---------+-------
1      2  0.055763  0.006155                          (------*------)
2      2  0.008819  0.001168  (-----*------)
                              --+---------+---------+---------+-------
                              0.000     0.020     0.040     0.060

Pooled StDev = 0.004430
```

ภาพที่ 7.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.2 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.3 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 2.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS       F      P
model    1  0.0050716  0.0050716  182.42  0.005
Error    2  0.0000556  0.0000278
Total    3  0.0051272

S = 0.005273   R-Sq = 98.92%   R-Sq(adj) = 98.37%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  -----+---------+---------+---------+----
1      2  0.072206  0.007363                          (----*----)
2      2  0.000991  0.001178  (----*-----)
                             -----+---------+---------+---------+----
                                0.000     0.030     0.060     0.090

Pooled StDev = 0.005273
```

ภาพที่ 7.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.1 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.4 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 2.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF        SS        MS     F      P
model    1  0.001480  0.001480  5.47  0.144
Error    2  0.000541  0.000270
Total    3  0.002020

S = 0.01644   R-Sq = 73.24%   R-Sq(adj) = 59.86%
```

ภาพที่ 7.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.00472	0.00472	4.60	0.165
Error	2	0.00205	0.00103		
Total	3	0.00677			

S = 0.03202 R-Sq = 69.70% R-Sq(adj) = 54.55%

ภาพที่ 7.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.35257	0.35257	43.27	0.022
Error	2	0.01630	0.00815		
Total	3	0.36887			

S = 0.09027 R-Sq = 95.58% R-Sq(adj) = 93.37%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1	2	0.1929	0.0961	(--------*---------)
2	2	0.7867	0.0841	(--------*--------)
				0.00 0.30 0.60 0.90

Pooled StDev = 0.0903

ภาพที่ 7.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.2 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.5 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 3.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS      F      P
model    1  0.0034809  0.0034809  85.53  0.011
Error    2  0.0000814  0.0000407
Total    3  0.0035623

S = 0.006380   R-Sq = 97.72%   R-Sq(adj) = 96.57%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  ------+---------+---------+---------+---
1      2  0.063396  0.007245                          (------*-------)
2      2  0.004396  0.005376  (-------*-------)
                                ------+---------+---------+---------+---
                                    0.000     0.025     0.050     0.075

Pooled StDev = 0.006380
```

ภาพที่ 7.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.1 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.6 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 3.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.001350	0.001350	9.90	0.088
Error	2	0.000273	0.000136		
Total	3	0.001623			

S = 0.01168 R-Sq = 83.20% R-Sq(adj) = 74.80%

ภาพที่ 7.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.00069	0.00069	0.10	0.781
Error	2	0.01373	0.00686		
Total	3	0.01442			

S = 0.08284 R-Sq = 4.80% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 7.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

```
Source  DF       SS       MS       F      P
model    1  0.63711  0.63711  109.56  0.009
Error    2  0.01163  0.00582
Total    3  0.64874

S = 0.07626   R-Sq = 98.21%   R-Sq(adj) = 97.31%

                          Individual 95% CIs For Mean Based on
                          Pooled StDev
Level  N    Mean   StDev  ---+---------+---------+---------+------
1      2  0.1416  0.1028  (------*------)
2      2  0.9398  0.0327                       (------*-----)
                          ---+---------+---------+---------+------
                           0.00      0.35      0.70      1.05

Pooled StDev = 0.0763
```

ภาพที่ 7.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.2 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.7 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 4.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS      F      P
model    1  0.0024689  0.0024689  30.86  0.031
Error    2  0.0001600  0.0000800
Total    3  0.0026289

S = 0.008944   R-Sq = 93.91%   R-Sq(adj) = 90.87%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  -------+---------+---------+---------+--
1      2  0.055840  0.009183                  (--------*--------)
2      2  0.006152  0.008700  (--------*--------)
                               -------+---------+---------+---------+--
                                    0.000     0.030     0.060     0.090

Pooled StDev = 0.008944
```

ภาพที่ 7.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.1 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.8 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 4.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF         SS         MS       F      P
model    1  0.0029784  0.0029784  159.31  0.006
Error    2  0.0000374  0.0000187
Total    3  0.0030158

S = 0.004324   R-Sq = 98.76%   R-Sq(adj) = 98.14%


                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  --+---------+---------+---------+-------
1      2  0.063298  0.001633                        (----*-----)
2      2  0.008724  0.005893  (----*-----)
                              --+---------+---------+---------+-------
                              0.000     0.025     0.050     0.075

Pooled StDev = 0.004324
```

ภาพที่ 7.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.2 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.9 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 5.1

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF        SS        MS      F      P
model    1  0.023743  0.023743  23.76  0.040
Error    2  0.001998  0.000999
Total    3  0.025742

S = 0.03161   R-Sq = 92.24%   R-Sq(adj) = 88.36%

                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  ------+---------+---------+---------+---
1      2  0.19269  0.00569                (--------*---------)
2      2  0.03861  0.04434  (---------*--------)
                            ------+---------+---------+---------+---
                                0.00      0.10      0.20      0.30

Pooled StDev = 0.03161
```

ภาพที่ 7.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.1 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.10 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา set 5.2

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

```
Source  DF       SS       MS     F      P
model    1  0.01547  0.01547  3.05  0.223
Error    2  0.01015  0.00508
Total    3  0.02562

S = 0.07125   R-Sq = 60.37%   R-Sq(adj) = 40.56%
```

ภาพที่ 7.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.0071	0.0071	0.53	0.543
Error	2	0.0268	0.0134		
Total	3	0.0339			

S = 0.1158 R-Sq = 20.92% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 7.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

3) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Ratio versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.78666	0.78666	371.23	0.003
Error	2	0.00424	0.00212		
Total	3	0.79089			

S = 0.04603 R-Sq = 99.46% R-Sq(adj) = 99.20%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
1	2	0.0875	0.0648	(----*----)
2	2	0.9744	0.0061	(---*----)

0.00 0.30 0.60 0.90

Pooled StDev = 0.0460

ภาพที่ 7.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2 คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.5.11 การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study

1) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Convergence versus model

Source	DF	SS	MS	F	P
model	1	0.000056	0.000056	0.33	0.623
Error	2	0.000341	0.000171		
Total	3	0.000398			

S = 0.01306 R-Sq = 14.18% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 7.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นมากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงต้องไปทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไปดังนี้

2) การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

One-way ANOVA: Spread versus model

```
Source  DF        SS        MS      F      P
model    1  0.006787  0.006787  50.67  0.019
Error    2  0.000268  0.000134
Total    3  0.007055

S = 0.01157   R-Sq = 96.20%   R-Sq(adj) = 94.30%

                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  --+---------+---------+---------+-------
1      2  0.59010  0.01286                      (--------*-------)
2      2  0.50772  0.01013  (--------*--------)
                              --+---------+---------+---------+-------
                              0.480     0.520     0.560     0.600

Pooled StDev = 0.01157
```

ภาพที่ 7.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปด้านบนพบว่าค่า P-Value นั้นน้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าระดับปัจจัยที่ 2 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับที่ 1 โดยมีค่าตัวแปรตอบสนองเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set Case Study คือ รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO

การนำ BBO เข้ามาช่วยแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านมีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่า ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO มีดังนี้

ตารางที่ 7.45 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	การทดลอง
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นมิวเตชัน	Pm = 0.01	Ma (2010)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Non-Dominated Sorting	Goldberg (1989)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ Set 1.1-1.2	การทดลอง
	60 รอบ สำหรับ Set 2.1-2.2	
	80 รอบ สำหรับ Set 3.1-3.2	
	100 รอบ สำหรับ Set 4.1-4.2	
	300 รอบ สำหรับ Set 5.1-5.2	
	60 รอบ สำหรับ Case Study	

7.7 **สรุปท้ายบท**

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับแนวคิดและหลักการของ BBO ที่มาจากการเลียนแบบพฤติกรรมธรรมชาติ คือ การเลียนแบบพฤติกรรมการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ โดยพื้นที่อยู่อาศัยที่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตจะมีสิ่งมีชีวิตอยู่อาศัยเป็นจำนวนมาก ทำให้ในพื้นที่ดังกล่าวมีอัตราการอพยพเข้าต่ำและอัตราการอพยพออกสูง เพราะความแออัดนั่นเอง และในทางตรงกันข้ามพื้นที่อยู่อาศัยที่ไม่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตจะมีสิ่งมีชีวิตอยู่อาศัยเป็นจำนวนน้อย ทำให้ในพื้นที่ดังกล่าวมีอัตราการอพยพเข้าสูงและอัตราการอพยพออกต่ำ เพราะมีพื้นที่เหลือมากพอสำหรับการรับสิ่งมีชีวิตใหม่เข้ามาอยู่อาศัย สำหรับการนำ BBO มาประยุกต์ใช้ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม ควรให้ความสำคัญกับกระบวนการอพยพเป็นอันดับแรก เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นกว่าเดิม โดยแต่ละคำตอบจะได้รับคุณลักษณะที่ดีหรือได้รับการปรับปรุงจากหลายคำตอบ ซึ่งคาดว่าคำตอบใหม่ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ดีขึ้น จนนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีเรื่องของการกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 11 ปัญหา ซึ่งถือได้ว่าเป็นเรื่องที่สำคัญเพราะค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิการค้นหาคำตอบของ BBO

บทที่ 8

ผลการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ในบทนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม 5 อัลกอริทึม ได้แก่ COMSOAL NSGA-II DPSO PSONK และ BBO โดยพิจารณาจากตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Chutima and Olanviwatchai, 2010)

8.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

การนำอัลกอริทึมต่างๆ เข้ามาช่วยแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มีค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่า ดังนั้นจึงควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหา ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์จากการอ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมาและจากการทดลองเบื้องต้น ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้ โดยในบทนี้จะเป็นการสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของอัลกอริทึมทั้งหมด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

8.1.1 จำนวนรอบการทำงาน

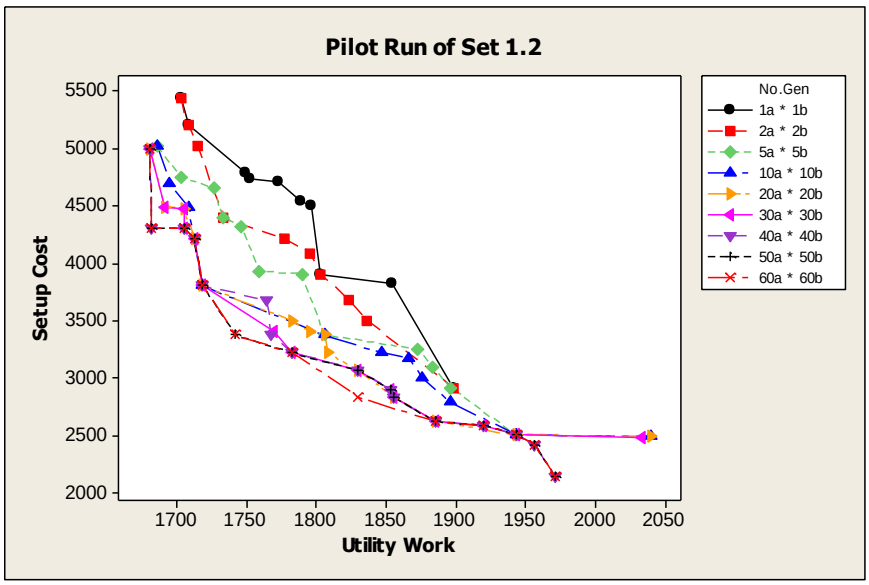
จำนวนรอบการทำงานเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึม เนื่องจากการกำหนดจำนวนรอบการทำงานที่ไม่เหมาะสมกับขนาดปัญหาการทดลองอาจส่งผลให้กระบวนการเปรียบเทียบอัลกอริทึมผิดพลาด เช่น ถ้ากำหนดให้จำนวนรอบการทำงานน้อยเกินไปอาจทำให้คำตอบที่ค้นพบไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าอัลกอริทึมใดมีประสิทธิภาพแตกต่างกันบ้าง และถ้ากำหนดให้จำนวนรอบการทำงานมากเกินไปจะทำให้เสียเวลาในการค้นหาคำตอบนานขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองด้วยวิธี Pilot Run เพื่อหาจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหาการทดลองทั้ง 11 ปัญหา ดังตารางที่ 1.1 (นพพล คำภิรมย์, 2552)

8.1.1.1 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 1.1

ภาพที่ 8.1 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 1.1

จากภาพที่ 8.1 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 1.1 คือ 40 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

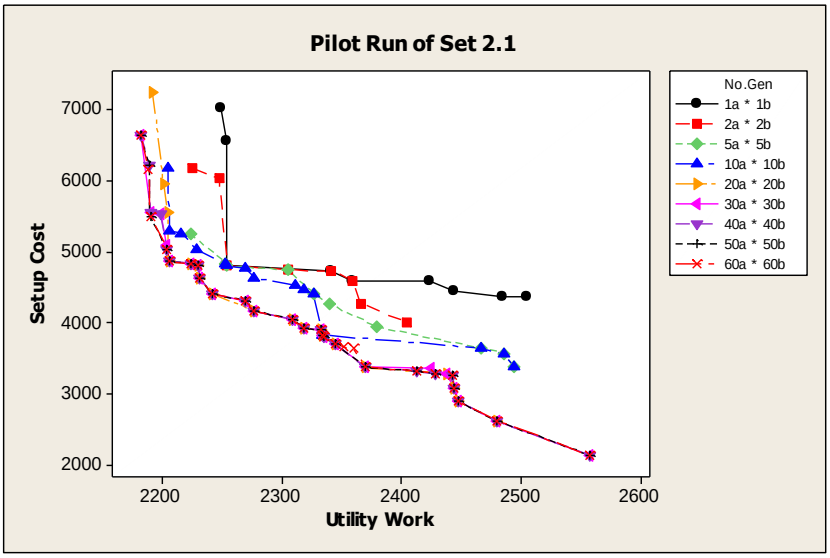
8.1.1.2 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 1.2



ภาพที่ 8.2 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 1.2

จากภาพที่ 8.2 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 1.2 คือ 40 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

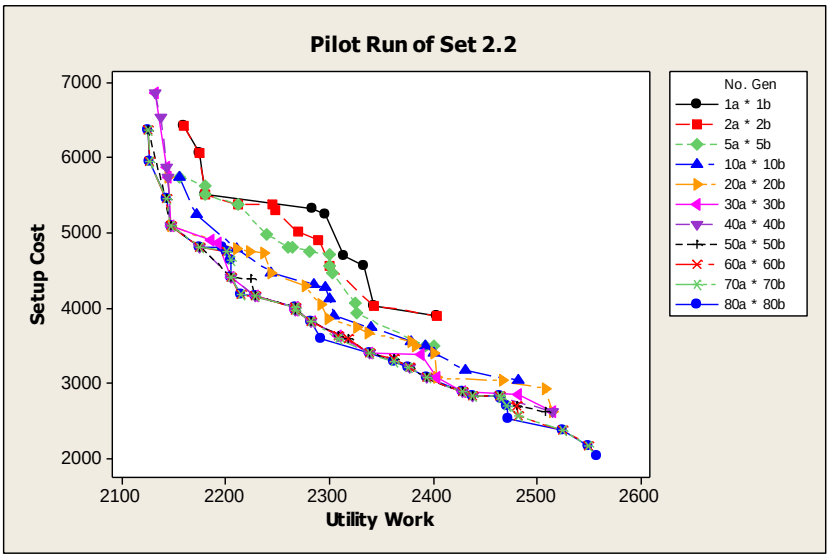
8.1.1.3 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 2.1



ภาพที่ 8.3 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 2.1

จากภาพที่ 8.3 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 2.1 คือ 60 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

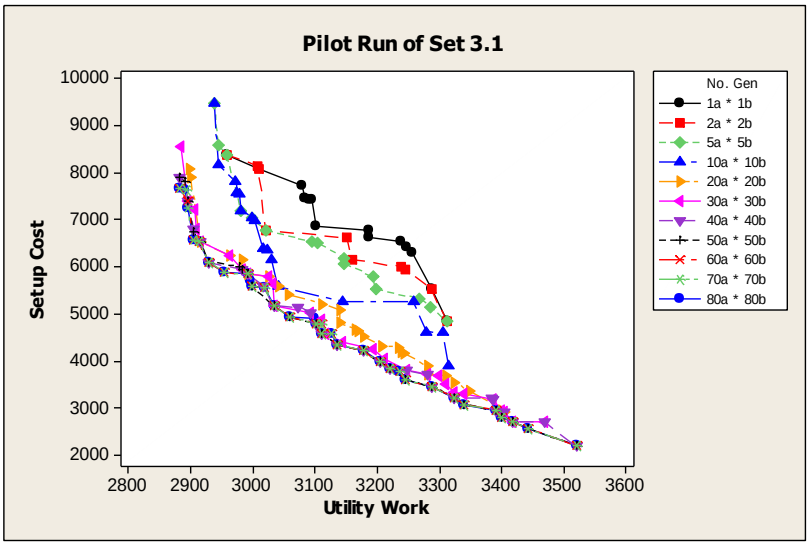
8.1.1.4 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 2.2



ภาพที่ 8.4 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 2.2

จากภาพที่ 8.4 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 2.2 คือ 60 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

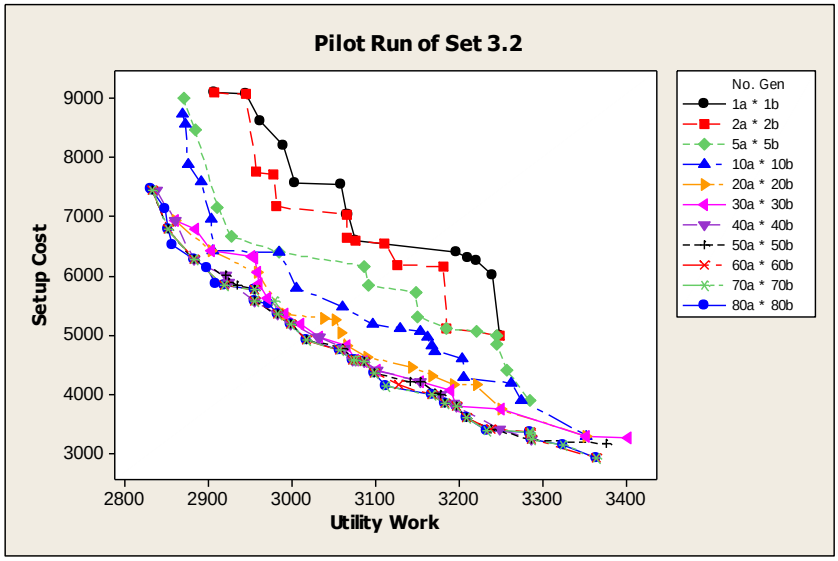
8.1.1.5 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 3.1



ภาพที่ 8.5 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 3.1

จากภาพที่ 8.5 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 3.1 คือ 80 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

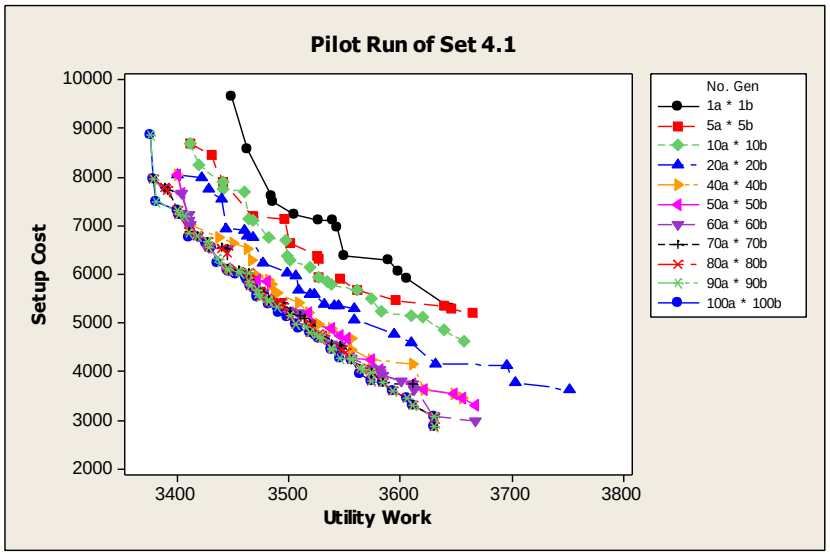
8.1.1.6 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 3.2



ภาพที่ 8.6 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 3.2

จากภาพที่ 8.6 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 3.2 คือ 80 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

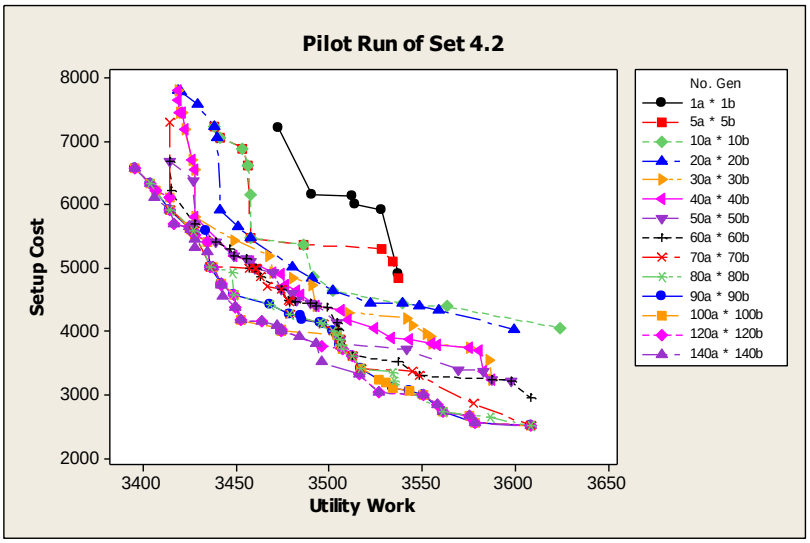
8.1.1.7 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 4.1



ภาพที่ 8.7 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 4.1

จากภาพที่ 8.7 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 4.1 คือ 100 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

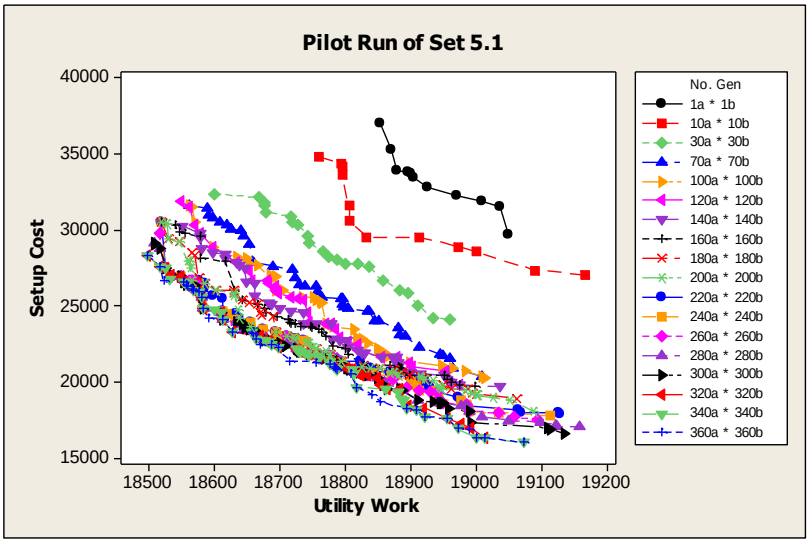
8.1.1.8 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 4.2



ภาพที่ 8.8 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 4.2

จากภาพที่ 8.8 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 4.2 คือ 100 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

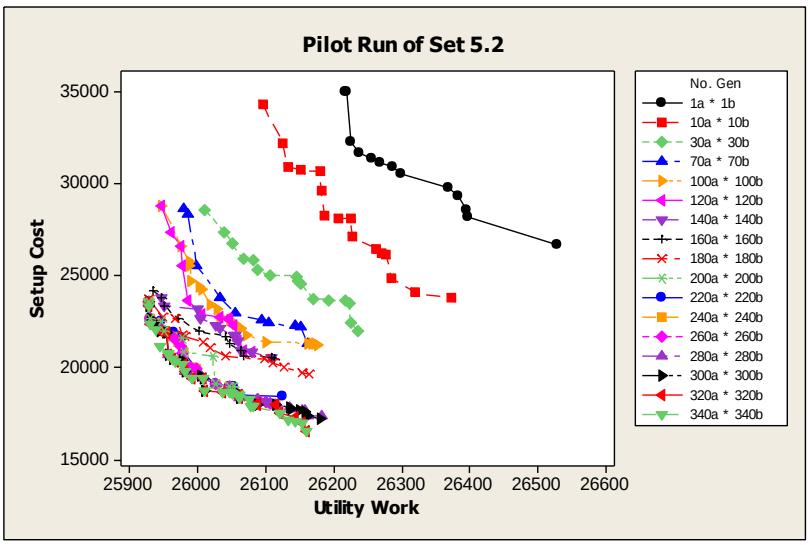
8.1.1.9 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 5.1



ภาพที่ 8.9 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 5.1

จากภาพที่ 8.9 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 5.1 คือ 300 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

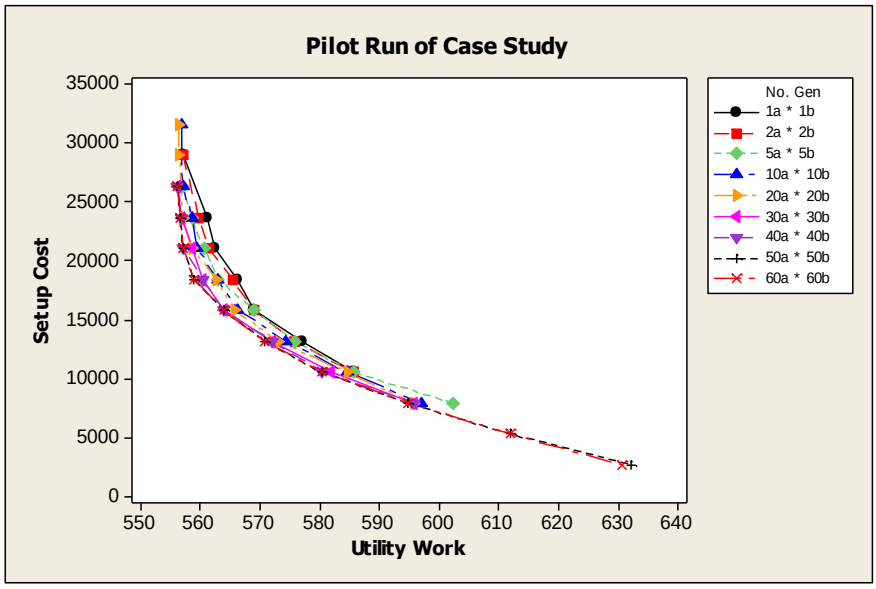
8.1.1.10 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 5.2



ภาพที่ 8.10 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Set 5.2

จากภาพที่ 8.10 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Set 5.2 คือ 300 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

8.1.1.11 **จำนวนรอบการทำงานของปัญหา** Case Study



ภาพที่ 8.11 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา Case Study

จากภาพที่ 8.11 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมกับปัญหา Case Study คือ 60 รอบ เนื่องจากจำนวนรอบการทำงานดังกล่าวให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและเกือบคงที่

8.1.2 **ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึม**

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้ สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์สำหรับ COMSOAL

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Non-Dominated Sorting	Goldberg (1989)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ Set 1.1-1.2	การทดลอง
	60 รอบ สำหรับ Set 2.1-2.2	
	80 รอบ สำหรับ Set 3.1-3.2	
	100 รอบ สำหรับ Set 4.1-4.2	
	300 รอบ สำหรับ Set 5.1-5.2	
	60 รอบ สำหรับ Case Study	

ตารางที่ 8.2 พารามิเตอร์สำหรับ NSGA-II

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Non-Dominated Sorting	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
วิธีการครอสโอเวอร์	modOX	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นครอสโอเวอร์	Pc = 1.0	Chutima and Pinkoompee (2009)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นมิวเตชัน	Pm = 0.1	Chutima and Pinkoompee (2009)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ Set 1.1-1.2	การทดลอง
	60 รอบ สำหรับ Set 2.1-2.2	
	80 รอบ สำหรับ Set 3.1-3.2	
	100 รอบ สำหรับ Set 4.1-4.2	
	500 รอบ สำหรับ Set 5.1-5.2	
	80 รอบ สำหรับ Case Study	

ตารางที่ 8.3 พารามิเตอร์สำหรับ DPSO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
จำนวนฝูง	4	การทดลอง
จำนวนอนุภาคในฝูง	25	การทดลอง
Cognitive Component	$c_1 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
Social Component	$c_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
น้ำหนักความหน่วง	w = 0.1	Salman et al. (2002)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ Set 1.1-1.2 60 รอบ สำหรับ Set 2.1-2.2 80 รอบ สำหรับ Set 3.1-3.2 100 รอบ สำหรับ Set 4.1-4.2 500 รอบ สำหรับ Set 5.1-5.2 80 รอบ สำหรับ Case Study	การทดลอง

ตารางที่ 8.4 พารามิเตอร์สำหรับ PSONK

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
จำนวนฝูง	4	การทดลอง
จำนวนอนุภาคในฝูง	25	การทดลอง
Cognitive component	$c_1 = 1$	Salman et al. (2002)
Social component	$c_2 = 1$	Salman et al. (2002)
น้ำหนักความหน่วง	$w = 0.1$	Salman et al .(2002)
ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้	$c = 0.1$	Wattanapornprom *et al.* (2009)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ Set 1.1-1.2 60 รอบ สำหรับ Set 2.1-2.2 80 รอบ สำหรับ Set 3.1-3.2 100 รอบ สำหรับ Set 4.1-4.2	การทดลอง

	500 รอบ สำหรับ Set 5.1-5.2 80 รอบ สำหรับ Case Study	

ตารางที่ 8.5 พารามิเตอร์สำหรับ BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	การทดลอง
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นมิวเตชัน	Pm = 0.01	Ma (2010)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Non-Dominated Sorting	Goldberg (1989)
จำนวนรอบการทำงาน	40 รอบ สำหรับ Set 1.1-1.2	การทดลอง
	60 รอบ สำหรับ Set 2.1-2.2	
	80 รอบ สำหรับ Set 3.1-3.2	
	100 รอบ สำหรับ Set 4.1-4.2	
	300 รอบ สำหรับ Set 5.1-5.2	
	60 รอบ สำหรับ Case Study	

8.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำผลการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมมาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) โดยการค้นหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์มีเป้าหมายเพื่อให้ได้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและคำตอบมีความหลากหลาย ในงานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึม COMSOAL NSGA-II DPSO BBO และ PSONK ด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์เหมือนกับที่ใช้ในงานวิจัยของ Chutima and Olanviwatchai (2010) ดังนี้

1) การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดี

ที่สุดที่แท้จริง จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันกลุ่มคำตอบที่แท้จริงและถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

2) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) เป็นการวัดการกระจายของสมาชิกคำตอบที่อยู่ภายในกลุ่มเดียวกัน ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีการกระจายสม่ำเสมอ

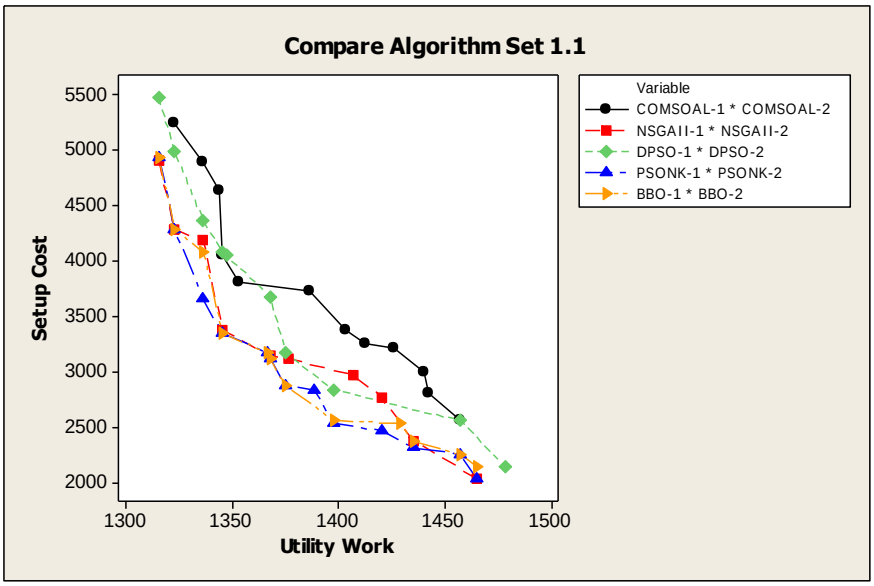
3) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบนั้นมีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี

4) เวลาการค้นหาคำตอบ (CPU Time) เป็นการวัดเวลาการทำงานของอัลกอริทึมตั้งแต่การทำงานรอบแรกจนถึงรอบสุดท้าย ถ้าอัลกอริทึมใดใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยแสดงว่าอัลกอริทึมนั้นเป็นทางเลือกที่ดี

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้ง 5 อัลกอริทึม จะทำการทดสอบด้วยปัญหามาตรฐานของ Mcmullen (2001) จำนวน 11 ปัญหา โดยผลการเปรียบเทียบได้มาจากการรันโปรแกรม Matlab 2009a บนคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i5 CPU 760 2.80GHz Ram 4 GB Windows 7 ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

8.2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 1.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.12 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.1

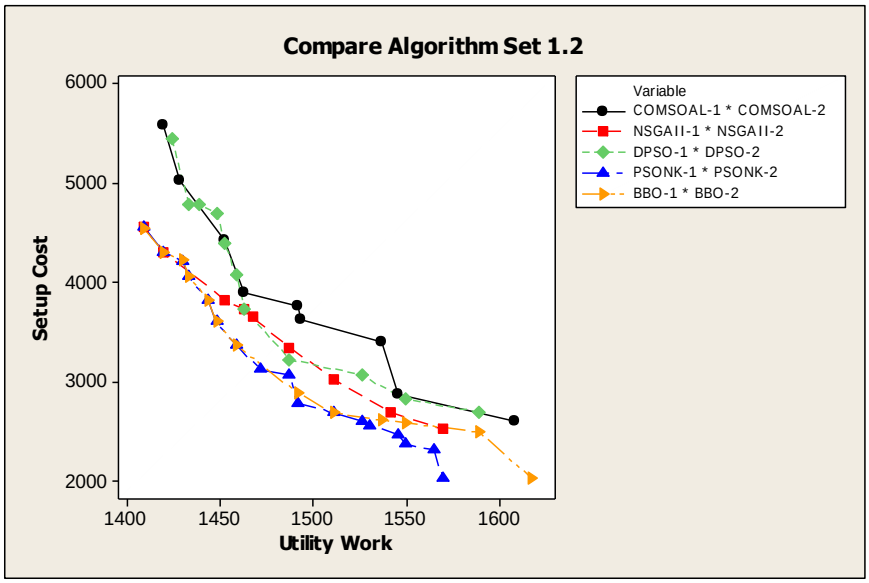
ตารางที่ 8.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.1763	0.4305	0.0000	69
NSGA-II	0.0537	0.4796	0.3000	311
DPSO	0.0948	0.4519	0.0000	156
PSONK	0.0025	0.4478	0.7692	107
BBO	0.0208	0.5289	0.4167	133

จากตารางที่ 8.6 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ COMSOAL มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.12 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 1.1 มากที่สุด

8.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 1.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.13 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.2

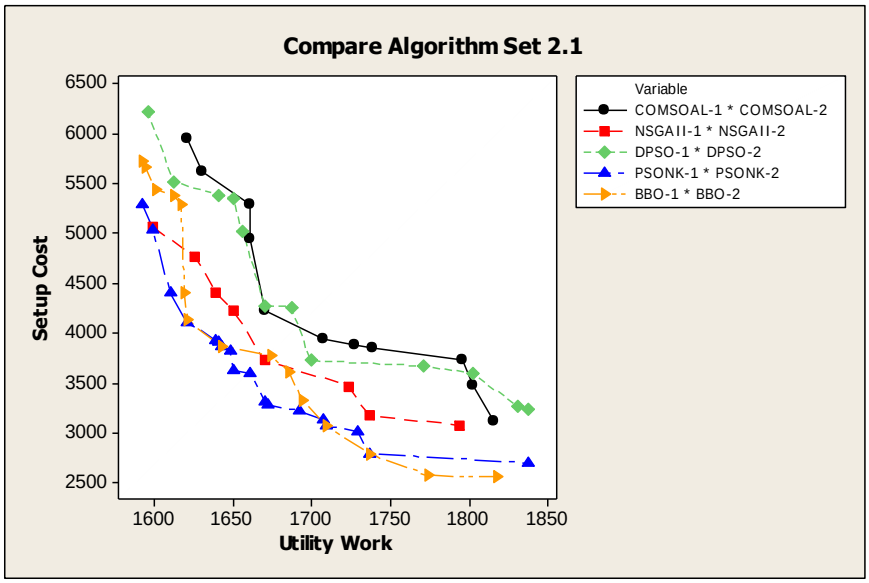
ตารางที่ 8.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 1.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.1557	0.4686	0.0000	70
NSGA-II	0.1053	0.4907	0.0000	309
DPSO	0.1289	0.5538	0.0000	151
PSONK	0.0127	0.3235	0.9412	110
BBO	0.0422	0.4909	0.2308	135

จากตารางที่ 8.7 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด และ COMSOAL มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาการค้นหาคำตอบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.13 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 1.2 มากที่สุด

8.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 2.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.14 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.1

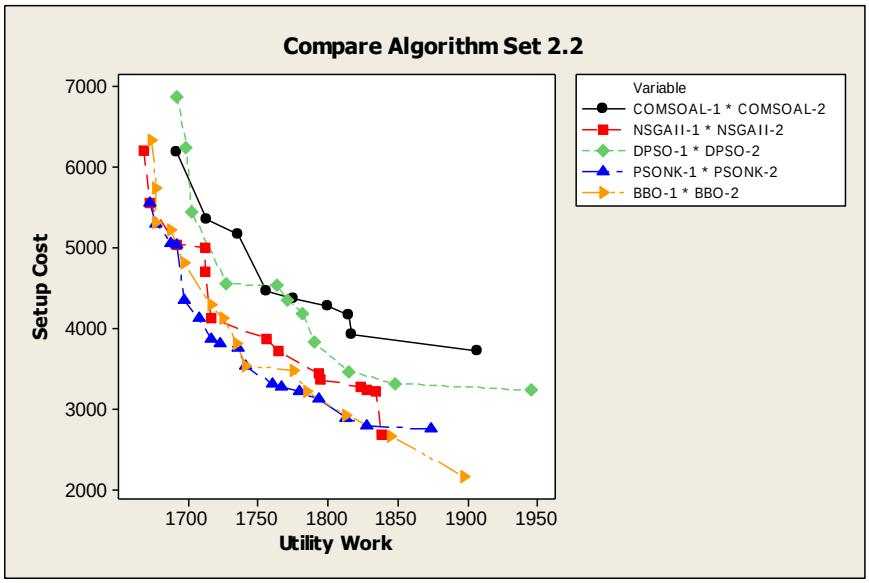
ตารางที่ 8.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.2218	0.4844	0.0000	108
NSGA-II	0.1199	0.4533	0.1250	497
DPSO	0.1867	0.5491	0.0000	232
PSONK	0.0124	0.7180	0.9444	161
BBO	0.0390	0.5288	0.3333	183

จากตารางที่ 8.8 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ NSGA-II มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.14 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 2.1 มากที่สุด

8.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 2.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.15 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.2

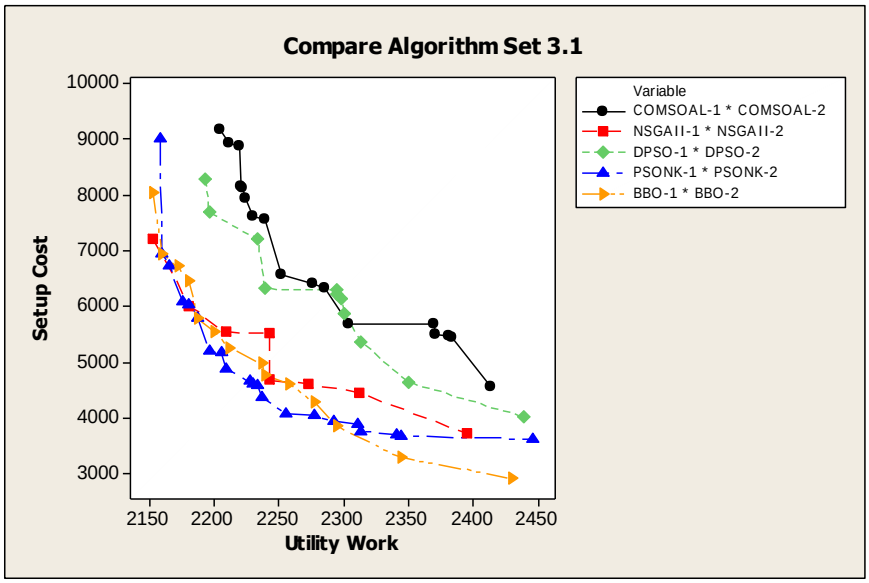
ตารางที่ 8.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 2.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.2182	0.7256	0.0000	107
NSGA-II	0.0629	0.5765	0.2857	496
DPSO	0.1338	0.5802	0.0000	227
PSONK	0.0209	0.5115	0.9412	158
BBO	0.0384	0.5002	0.2143	194

จากตารางที่ 8.9 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ BBO มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.15 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 2.2 มากที่สุด

8.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 3.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.16 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.1

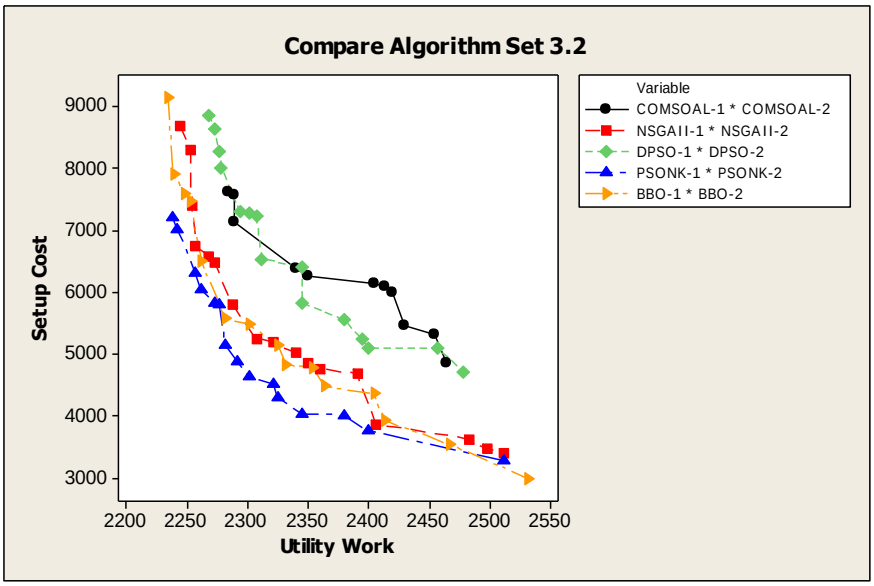
ตารางที่ 8.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.2903	0.7765	0.0000	223
NSGA-II	0.1004	0.5818	0.2500	1,010
DPSO	0.2411	0.6503	0.0000	480
PSONK	0.0116	0.8133	0.7619	333
BBO	0.0363	0.6386	0.4286	377

จากตารางที่ 8.10 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ NSGA-II มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.16 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 3.1 มากที่สุด

8.2.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 3.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.17 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.2

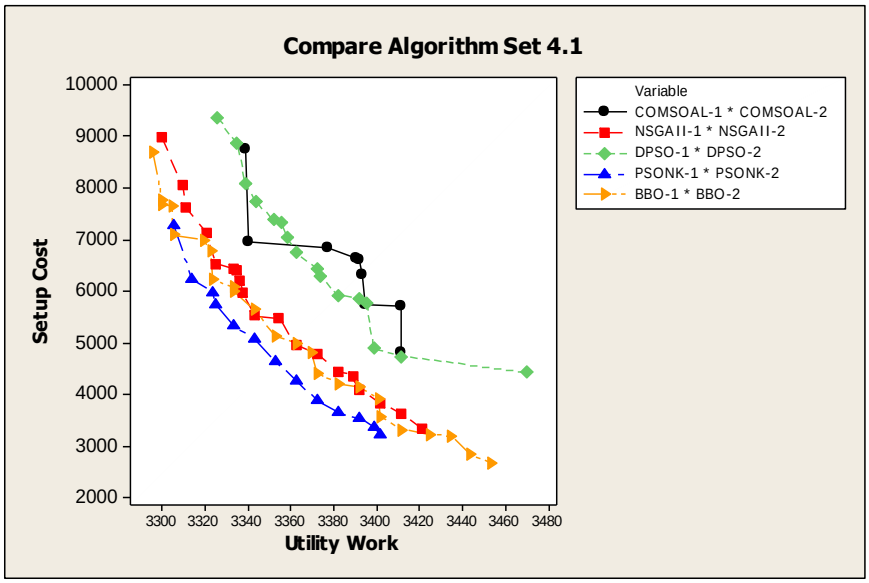
ตารางที่ 8.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 3.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.2590	0.6126	0.0000	226
NSGA-II	0.0671	0.5531	0.1176	999
DPSO	0.2118	0.5428	0.0000	478
PSONK	0.0336	0.6690	1.0000	340
BBO	0.0622	0.6041	0.2000	375

จากตารางที่ 8.11 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ DPSO มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.17 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 3.2 มากที่สุด

8.2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 4.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.18 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.1

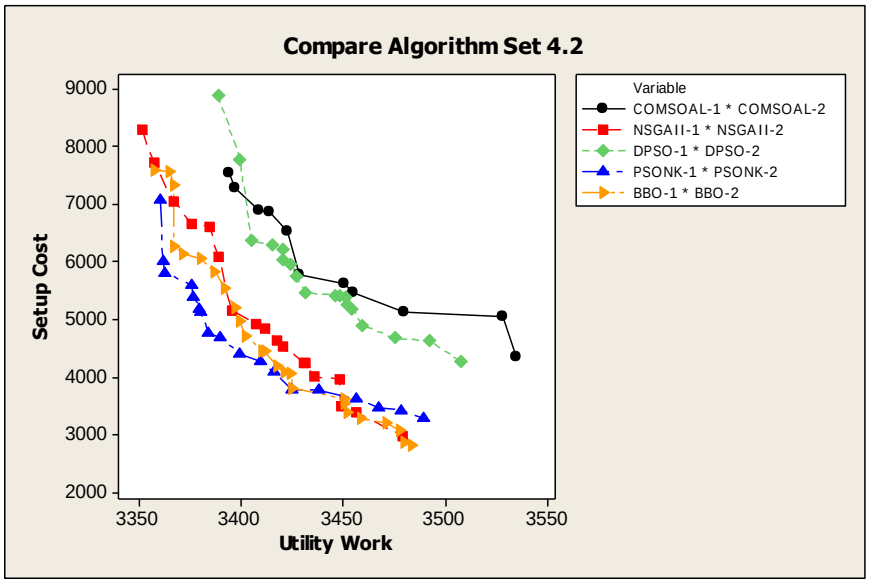
ตารางที่ 8.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.2747	0.6648	0.0000	317
NSGA-II	0.0873	0.4195	0.0000	1,296
DPSO	0.2401	0.6569	0.0000	877
PSONK	0.0683	0.4127	0.9231	527
BBO	0.0366	0.3797	0.4167	462

จากตารางที่ 8.12 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ DPSO มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.18 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 4.1 มากที่สุด

8.2.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 4.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.19 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.2

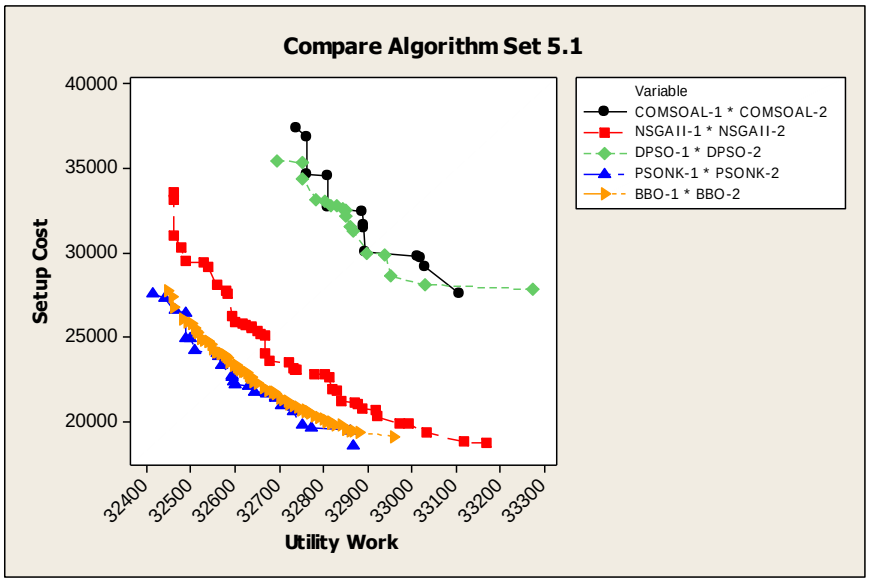
ตารางที่ 8.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 4.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.3119	0.5241	0.0000	317
NSGA-II	0.0710	0.5113	0.2222	1,330
DPSO	0.2627	0.7381	0.0000	864
PSONK	0.0412	0.4828	0.7778	534
BBO	0.0492	0.4978	0.3200	488

จากตารางที่ 8.13 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงและการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด และ COMSOAL มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาการค้นหาคำตอบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.19 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 4.2 มากที่สุด

8.2.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 5.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.20 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.1

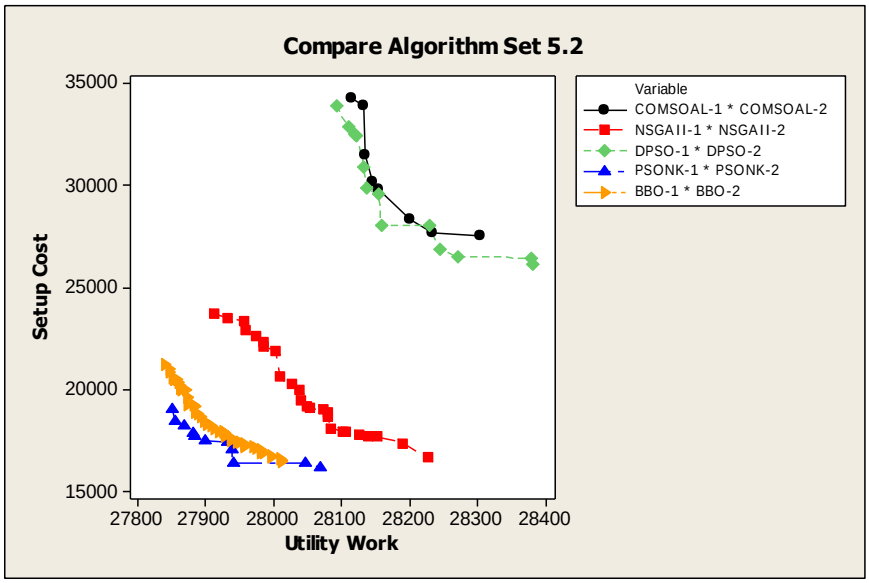
ตารางที่ 8.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.5784	0.6282	0.0000	2,415
NSGA-II	0.1358	0.6141	0.0000	5,994
DPSO	0.5433	0.7644	0.0000	4,600
PSONK	0.0045	0.5700	0.9630	2,903
BBO	0.0331	0.5485	0.0896	4,071

จากตารางที่ 8.14 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ BBO มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.20 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 5.1 มากที่สุด

8.2.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Set 5.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.21 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.2

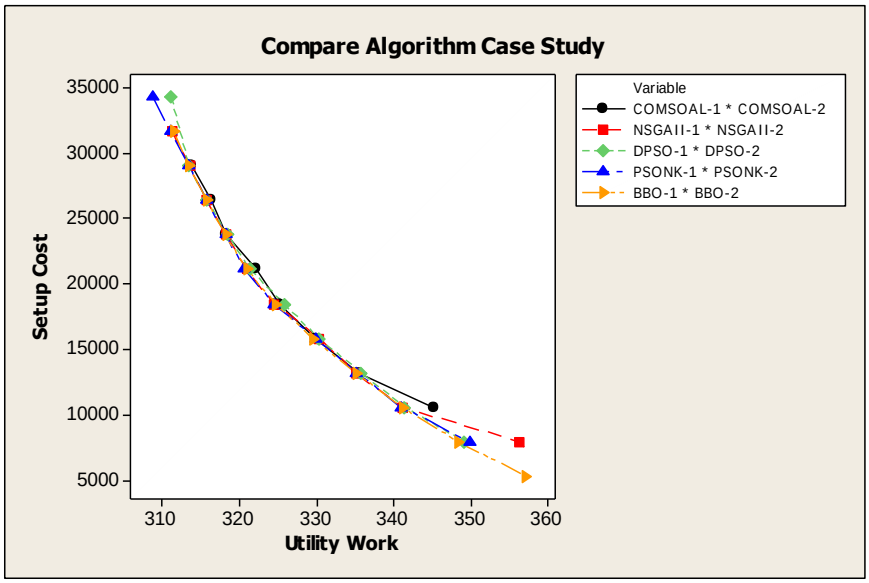
ตารางที่ 8.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Set 5.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.8413	0.5628	0.0000	2,370
NSGA-II	0.4046	0.4819	0.0000	5,518
DPSO	0.7381	0.5605	0.0000	5,703
PSONK	0.0985	0.5462	1.0000	3,182
BBO	0.0988	0.5518	0.0769	3,960

จากตารางที่ 8.15 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และ NSGA-II มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.21 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Set 5.2 มากที่สุด

8.2.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมในปัญหา Case Study

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมจะทำโดยนำคำตอบของปัญหา Case Study ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม มาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งได้ผลดังนี้



ภาพที่ 8.22 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Case Study

ตารางที่ 8.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึม ในปัญหา Case Study

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	0.0717	0.4113	0.1250	283
NSGA-II	0.0283	0.4525	0.2000	1,237
DPSO	0.0316	0.3770	0.1000	437
PSONK	0.0159	0.3692	0.6364	357
BBO	0.0090	0.3469	0.4545	557

จากตารางที่ 8.16 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงและเวลาการค้นหาคำตอบดีที่สุด และ BBO มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว และภาพที่ 8.22 จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะกับปัญหา Case Study มากที่สุด

8.3 สรุปท้ายบท

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมจะทำโดยนำผลการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมมาเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งประกอบด้วย การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

(Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาการค้นหาคำตอบ (CPU Time) โดยอัลกอริทึมที่ดีจะมีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 1 และใช้เวลาค้นหาคำตอบน้อย โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทั้ง 5 อัลกอริทึม จะทำการทดสอบด้วยปัญหามาตรฐานของ Mcmullen (2001) จำนวน 11 ปัญหา โดยผลการเปรียบเทียบได้มาจากการรันโปรแกรม Matlab ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 8.17

จากตารางที่ 8.17 เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่าแทบจะครบทุกปัญหาการทดลองที่ PSONK มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด ยกเว้นแค่เพียงปัญหา Set 4.1 เท่านั้น ที่ PSONK มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 เป็นอันดับที่ 2 รองจาก BBO

เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ พบว่า BBO มีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด 4 ปัญหา คือ ปัญหา Set 2.2 Set 4.1 Set 5.1 และ Case Study NSGA-II มีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด 3 ปัญหา คือ ปัญหา Set 2.1 Set 3.1 และ Set 5.2 ส่วน PSONK มีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด 2 ปัญหา คือ ปัญหา Set 1.2 และ Set 4.2 แสดงให้เห็นว่าคำตอบที่ PSONK ค้นพบนั้นมีความหลากหลายไม่มากนักเมื่อเทียบกับ BBO และ NSGA-II

เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่า ในทุกปัญหาการทดลอง PSONK มีค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 1 มากที่สุด รองลงมาคือ BBO และ NSGA-II

เมื่อพิจารณาถึงตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาการค้นหาคำตอบ พบว่าโดยรวมแล้ว COMSOAL ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK BBO DPSO และ NSGA-II ตามลำดับ

จากการพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ด้าน สรุปได้ว่าโดยรวมแล้ว PSONK สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว และคำตอบที่ค้นพบยังใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากที่สุด แม้ว่าคำตอบที่ค้นพบจะมีความหลากหลายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ BBO และ NSGA-II ดังนั้น PSONK จึงเป็นอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพและมีความเหมาะสมสำหรับใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มากกว่าอัลกอริทึมอื่น

ตารางที่ 8.17 ผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึม

ตัววัดสมรรถนะ	อัลกอริทึม	ปัญหาการทดลอง										
		Set 1.1	Set 1.2	Set 2.1	Set 2.2	Set 3.1	Set 3.2	Set 4.1	Set 4.2	Set 5.1	Set 5.2	Case Study
Convergence	COMSOAL	0.1763	0.1557	0.2218	0.2182	0.2903	0.2590	0.2747	0.3119	0.5784	0.8413	0.0717
	NSGA-II	0.0537	0.1053	0.1199	0.0629	0.1004	0.0671	0.0873	0.0710	0.1358	0.4046	0.0283
	DPSO	0.0948	0.1289	0.1867	0.1338	0.2411	0.2118	0.2401	0.2627	0.5433	0.7381	0.0316
	PSONK	0.0025	0.0127	0.0124	0.0209	0.0116	0.0336	0.0683	0.0412	0.0045	0.0985	0.0159
	BBO	0.0208	0.0422	0.0390	0.0384	0.0363	0.0622	0.0366	0.0492	0.0331	0.0988	0.0090
Spread	COMSOAL	0.4305	0.4686	0.4844	0.7256	0.7765	0.6126	0.6648	0.5241	0.6282	0.5628	0.4113
	NSGA-II	0.4796	0.4907	0.4533	0.5765	0.5818	0.5531	0.4195	0.5113	0.6141	0.4819	0.4525
	DPSO	0.4519	0.5538	0.5491	0.5802	0.6503	0.5428	0.6569	0.7381	0.7644	0.5605	0.3770
	PSONK	0.4478	0.3235	0.7180	0.5115	0.8133	0.6690	0.4127	0.4828	0.5700	0.5462	0.3692
	BBO	0.5289	0.4909	0.5288	0.5002	0.6386	0.6041	0.3797	0.4978	0.5485	0.5518	0.3469
Ratio	COMSOAL	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1250
	NSGA-II	0.3000	0.0000	0.1250	0.2857	0.2500	0.1176	0.0000	0.2222	0.0000	0.0000	0.2000
	DPSO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000
	PSONK	0.7692	0.9412	0.9444	0.9412	0.7619	1.0000	0.9231	0.7778	0.9630	1.0000	0.6364
	BBO	0.4167	0.2308	0.3333	0.2143	0.4286	0.2000	0.4167	0.3200	0.0896	0.0769	0.4545
Time(s)	COMSOAL	69	70	108	107	223	226	317	317	2,415	2,370	283
	NSGA-II	270	297	440	438	866	887	1,120	1,262	5,090	5,542	1,097
	DPSO	165	150	229	233	468	469	880	880	4,540	5,717	441
	PSONK	107	110	161	158	333	340	527	534	2,903	3,182	357
	BBO	131	129	181	190	381	375	461	489	4,046	4,090	565

บทที่ 9
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ลักษณะปัญหาการทดลอง การนำ PSONK เข้ามาแก้ปัญหา การกำหนดและการทดสอบพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับปัญหา ผลการนำ PSONK เข้ามาแก้ปัญหา และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยนี้

9.1. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีเมทาฮิวริสติกที่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ซึ่งเป็นสายการประกอบที่เหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ มีลักษณะคล้ายคลึงกัน และมีปริมาณการผลิตสูง เช่น รถบัส รถบรรทุก รถยนต์นั่งส่วนบุคคล ตู้เย็น ตู้อบ และเครื่องซักผ้า โดยปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาประเภท NP-hard หมายความว่า ถ้าปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้คำตอบที่เป็นไปได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปแนนเชียล ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะปัญหาขนาดใหญ่ เราจึงควรนำวิธีเมทาฮิวริสติก (Metaheuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งเป็นวิธีที่นักวิชาการให้การยอมรับและนิยมเลือกใช้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีเมทาฮิวริสติกที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge: PSONK) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยมีการปรับขั้นตอนการทำงานของ PSONK ให้เข้ากับปัญหาด้วยการใส่รหัส (Encoding) ให้กับสตริงคำตอบหรือรูปแบบลำดับการผลิต (Model Sequence)

9.1.1 ลักษณะของปัญหาการทดลอง

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังนี้ (1) เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ด้วยระบบสายพานลำเลียงที่มีความเร็วคงที่และมีอัตราการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบคงที่ (2) สายการประกอบถูกแบ่งออกเป็น n_w สถานีงาน และเป็นสถานีงานแบบปิด พนักงานจึงต้องทำงานอยู่ภายในขอบเขตของสถานีงานที่กำหนดเท่านั้น (3) สายการประกอบมีการจัดความสมดุลเรียบร้อยแล้ว (4) ไม่คำนึงถึงเวลาการเดินของพนักงานในระหว่างการประกอบผลิตภัณฑ์ และการเริ่มทำงานของพนักงานที่อยู่ในคู่สถานีงานเดียวกันจะเริ่มทำงานพร้อมกันและเริ่มทำงานได้ก็ต่อเมื่อพนักงานที่มีภาระงานมากกว่าทำงานเสร็จ

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ใช้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับ (Sequencing) ควรมีการพิจารณาปัญหาการจัดสมดุล (Balancing) ตามสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set : MPS) ที่จะทำการผลิตให้เรียบร้อยเสียก่อน เพื่อให้สายการประกอบมีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาปัญหาการจัดลำดับต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ได้นำสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ได้ผ่านการจัดสมดุลเรียบร้อยแล้วมาจากงานวิจัยของ ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) มาศึกษาปัญหาการจัดลำดับ โดยการจัดลำดับการผลิตจะขึ้นอยู่กับ MPS ที่กำหนดขึ้นโดยอาศัยข้อมูลจากการปฏิบัติงานจริงหรือข้อมูลจากปัญหามาตรฐานที่มีอยู่ เช่น ปัญหาของ Hyun et al. (1998) ปัญหาของ Mcmullen (2001) เป็นต้น โดยงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้นำปัญหามาตรฐานของ Mcmullen มาศึกษาในปัญหาการจัดลำดับ เช่น งานวิจัยของ Mansouri (2005) Chutima and Pinkoompee (2009) Chutima and Kampirom (2010) และในงานวิจัยนี้ได้นำปัญหามาตรฐานดังกล่าวเข้ามาศึกษาในปัญหาการจัดลำดับการผลิตเช่นกัน

9.1.2 **การประยุกต์ใช้** PSONK

การประยุกต์ใช้ PSONK กับปัญหาในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงาน 8 ขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1. ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้าประกอบด้วย จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด รอบเวลาการผลิต เวลาการดำเนินงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน แผนผังสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

2. การใส่รหัสงาน

เมื่อทราบสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะจัดลำดับเข้าสู่สายการประกอบ ให้ทำการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มตามชนิดผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงทำการใส่รหัสงาน (Encoding) ให้กับผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยงาน หมายถึง ผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่จะทำการผลิต เช่น งานที่หนึ่ง คือ ผลิตภัณฑ์ A งานที่สอง คือ ผลิตภัณฑ์ A งานที่สาม คือ ผลิตภัณฑ์ B และงานที่ 4 คือ ผลิตภัณฑ์ C เราจึงเขียนให้อยู่ในรูปของลำดับการผลิตได้ดังนี้ AABC หรือ เขียนให้อยู่ในรูปของรหัสงานได้ดังนี้ 1234

3. การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นเริ่มจากการสุ่มจำนวนฝูงขึ้นมา S ฝูง ซึ่งในแต่ละฝูงมีจำนวนสตริงคำตอบ P ตัว โดยใช้ค่าในตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกสำหรับการสุ่มเลือกงานแรก และใช้ค่าในตารางความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการสุ่มเลือกงานในลำดับอื่นๆ

4. การประเมินค่า

การประเมินค่าสตริงคำตอบจะกระทำโดยนำลำดับการผลิตหรือสตริงคำตอบมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดและปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด

5. วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ คือ วิธีการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting (Goldberg, 1989) ในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งวิธี PSONK ได้แบ่งการกำหนดค่าความแข็งแรงออกเป็นสองส่วน คือ การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบในแต่ละฝูงและการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด

6. การคัดเลือกสตริงคำตอบ

การคัดเลือกสตริงคำตอบ คือ การเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูง (Lbest และ Lworst) โดย Lbest ได้มาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) ของแต่ละฝูง และ Lworst ได้มาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) ของแต่ละฝูง จากนั้นจึงทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรทั้งหมด (Gbest และ Gworst) โดย Gbest ได้มาจากสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด (ค่าเท่ากับ 1) ของประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด และ Gworst ได้มาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่ามากที่สุด) ของประชากรสตริงคำตอบทั้งหมด

7. เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด จะกระทำโดยนำกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ในรอบนี้ไปรวมกับกลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่รวมกันไปจัดอันดับด้วย

วิธี Non-Dominated Sorting และทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เข้าสู่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่กลุ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า

8. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น ประกอบด้วยการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งในตารางซึ่งเป็นตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดีและลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งในตารางซึ่งเป็นตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ จากนั้นจึงนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้มาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เพื่อใช้สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของรอบการทำงานถัดไป

9.1.3 ข้อจำกัดของ PSONK ที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อจำกัดของ PSONK ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ค่าพารามิเตอร์ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันอาจส่งผลให้คุณภาพคำตอบหรือประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบแตกต่างกัน และทำให้ PSONK เหมาะกับปัญหาแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบการทดลองเพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับ PSONK ที่นำมาใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาของ ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ได้แนะนำพารามิเตอร์ที่สำคัญของ PSONK ไว้ คือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบพารามิเตอร์ดังกล่าว โดยผลการทดสอบพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยมากที่สุด คือ จำนวนฝูงเท่ากับ 4 ฝูง และจำนวนอนุภาคในฝูงเท่ากับ 25 อนุภาค

9.1.4 ผลการนำ PSONK เข้ามาแก้ปัญหา

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าโดยรวมแล้ว PSONK สามารถค้นหากลุ่มคำตอบได้ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากที่สุด ทั้งในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบของ PSONK ยังด้อยกว่า NSGA-II และ BBO โดยกล่าวได้ว่าคุณภาพคำตอบของ PSONK ดีกว่า COMSOAL NSGA-II DPSO และ BBO แต่คำตอบของ PSONK ยังมีความหลากหลายน้อยกว่า NSGA-II และ BBO นอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ พบว่า PSONK ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยเป็นอันดับที่ 2 รองจาก COMSOAL แต่มีบางกรณีที่อัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบได้ดีและต้องใช้เวลามาก เช่น ในกรณี NSGA-II กับ DPSO ที่

NSGA-II สามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่า DPSO แต่กลับใช้เวลานานกว่า โดยการพัฒนาอัลกอริทึมบางครั้งอาจค้นหาคำตอบได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดแต่กลับใช้เวลานานมากจนไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้ ดังนั้นการพัฒนาอัลกอริทึมควรให้ความสำคัญทั้งด้านความสามารถและเวลาในการค้นหาคำตอบไปพร้อมกัน

9.2. ข้อเสนอแนะ

1. วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบสามารถค้นหากลุ่มคำตอบได้ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แต่คำตอบยังมีความหลากหลายไม่มากเท่าที่ควร จึงควรพัฒนาวิธีการดังกล่าวให้สามารถค้นหาคำตอบได้หลากหลายยิ่งขึ้น เพื่อให้คำตอบที่ค้นพบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. ปัญหาการจัดลำดับการผลิตยังมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ศึกษาอีกมาก จึงควรมีการนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้มาศึกษาเพิ่มเติม

3. ค่าพารามิเตอร์บางค่าส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม จึงควรมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหามากที่สุด

4. งานวิจัยนี้เน้นในเรื่องของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึม เพื่อหาอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดี โดยปัญหาการทดลองที่ใช้เป็นเพียงปัญหามาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ซึ่งมีข้อสมมติฐานและข้อจำกัดที่ขัดแย้งกับความเป็นจริงค่อนข้างมาก จึงทำให้อัลกอริทึมที่ศึกษาไว้ยังไม่เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริง ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตสามารถนำอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้ได้ศึกษาไว้ไปต่อยอด โดยการลดข้อสมมติฐาน ลดข้อจำกัดดังกล่าวให้น้อยลงและไปเพิ่มเงื่อนไขที่ใช้ในการทำงานจริงให้มากขึ้น เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

นพพล คำภิรมย์. การประยุกต์ใช้วิธีการบรรจวบร่วมกับเมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ปาลิดา ฉิมคล้าย. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

เพ็ญพักตร์ ปิ่นกุมภีร์. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Arcus, A. L. COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. International Journal of Production Research 4(4) (1966): 259–277.

Baykasoglu, A., and Dereli, T. Two-sided assembly line balancing using an ant-colony based heuristic. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 36 (2008): 582-588.

Becker, C., and Scholl, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. European Journal of Operational Research 168(3) (2006): 694-715.

Chutima, P., and Olanviwatchai, P. Mixed-model U-shaped assembly line balancing problems with coincidence memetic algorithm. Journal of Software Engineering and Applications 03(04) (2010): 347-363.

Chutima, P., and Pinkoompee, P. Multi-objective sequencing problems of mixed-model assembly systems using memetic algorithms. Science Asia 35(3) (2009): 295-305.

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

Eberhart, R., and Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory. IEEE Micro Machine and Human Science (1995): 39-43.

Goldberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989.

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

Kara, Y., Ozcan, U., and Peker, A. Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives. Applied Mathematics and Computation 184(2) (2007) 566-588.

Kennedy, J., and Eberhart, R. C. Particle swarm optimization, IEEE international conference on neural networks, NJ: Piscataway, 1995.

Kennedy, J., and Eberhart, R. C. Swarm intelligence. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 2001.

Kim, Y. K., Song, W. S. and Kim, J. H. A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. Computers and Operations Research 36 (2009): 853-865.

Kim, Y. K., Hyun, C. J., and Kim, Y. Sequencing in mixed model assembly lines: A genetic algorithm approach. Computers and Operations Research 23(12) (1996): 1131-1145.

Kim, Y. K., Kim, Y., and Kim, Y. J. Two-sided assembly line balancing a genetic algorithm approach. Production Planning and Control 11(1) (2000): 44-53.

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

Lee, T. O., Kim, Y. H., and Kim, Y. K. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. Computers and Industrial Engineering 40 (2001): 273-292.

Liao, C., Tseng, C. T., and Luarn, P. A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems. Computers and Operations Research 34(10) (2007): 3099-3111.

Liu, G. P., Yang, J. B., and Whidborne, J. F. Multiobjective optimisation and control. Hertfordshire: Research studies press, 2003.

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

Macarthur, R., and Wilson, E. The theory of biogeography. NJ: Princeton University Press, 1967.

Mansouri, S. A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. European Journal of Operational Research 167(3) (2005): 696-716.

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

Özcan, U., and Toklu, B. Balancing two-sided assembly lines with sequence-dependent setup times. International Journal of Production Research 48(18) (2010) 5363-5383.

Rahimi-Vahed, A., Rabbani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Torabi, S. A., and Jolai, F. A multi-objective scatter search for a mixed-model assembly line sequencing problem. Advanced Engineering Informatics 21(1) (2007): 85-99.

Salman, A., Ahmad, I., and Al-Madani, S. Particle swarm optimization for task assignment problem. Microprocessors and Microsystems 26 (2002): 363–371.

Simon, D. Biogeography-based optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 12(6) (2008): 702-713.

Tsai, L. H. Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. Management Science 41(3) (1995): 485-495.

Wattanapornprom, W., Olanviwitchai, P., Chutima, P., and Chongstitvatana, P. Multi-objective combinatorial optimisation with coincidence algorithm. Evolutionary Computation. (2009): 1675 - 1682.

Yano, C. A., and Rachamadugu, R. Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. Management Science 37(5) (1991): 572-586.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

1. รายละเอียดปัญหาการทดลอง

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ปัญหา	จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set : MPS)	ความยาวสตริง	จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้
Set 1.1	5	4:3:2:2:1	12	831600
Set 1.2	5	3:3:2:2:2	12	1663200
Set 2.1	5	4:3:3:3:2	15	1.26E+08
Set 2.2	5	3:3:3:3:3	15	1.68E+08
Set 3.1	5	5:4:4:4:3	20	2.44E+11
Set 3.2	5	4:4:4:4:4	20	3.06E+11
Set 4.1	10	4:4:4:2:1:1:1:1:1:1	20	8.80E+13
Set 4.2	10	2:2:2:2:2:2:2:2:2:2	20	2.38E+15
Set 5.1	15	15:15:10:10:10:10:10:10:4:1:1:1:1:1:1	100	9.96E+92
Set 5.2	15	7:7:7:7:7:7:7:7:7:7:6:6:6:6:6	100	4.56E+106
Case Study	2	15:15	30	1.55E+08

2. การเจนเนอเรทค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักร

การจัดลำดับการผลิตเข้าสู่สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านของงานวิจัยนี้ต้องการตอบสนองฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชัน คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องที่น้อยสุด และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด (Hyun et al., 1998) ในงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องที่ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ก่อนหน้าด้วยวิธีสุ่มที่มีการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ U[0,10] และค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องที่สร้างขึ้นจะต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (Coefficient of Variation : C_v) โดยค่า C_v ควรมีค่าเท่ากับ 0.33 (Lee et al., 1997) ซึ่งมีสมการคำนวณดังนี้

$$C_v = Var(s)/\bar{s} \qquad \text{(ก.1)}$$

เมื่อ s คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักร, $Var(s)$ คือ ความแปรปรวนของค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักร และ $\bar{s}$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่อง

2.1 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาการทดลองที่มีชนิดผลิตภัณฑ์ 5 ชนิด

ตารางที่ ก.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาการทดลองที่มีชนิดผลิตภัณฑ์ 5 ชนิด

From/To	1	2	3	4	5
1	0.0	7.1	9.5	8.9	7.9
2	7.3	0.0	9.8	5.6	8.9
3	7.6	8.1	0.0	9.1	6.8
4	9.3	6.7	7.5	0.0	9.0
5	4.3	7.9	7.2	2.6	0.0

2.2 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาการทดลองที่มีชนิดผลิตภัณฑ์ 10 ชนิด

ตารางที่ ก.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาการทดลองที่มีชนิดผลิตภัณฑ์ 10 ชนิด

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.0	7.1	9.5	8.9	7.9	4.7	9.1	4.9	1.6	3.8
2	7.3	0.0	9.8	5.6	8.9	9.6	6.4	6.8	5.5	9.2
3	7.6	8.1	0.0	9.1	6.8	8.5	4.5	9.0	6.7	8.2
4	9.3	6.7	7.5	0.0	9.0	2.5	3.2	3.4	1.7	2.0
5	4.3	7.9	7.2	2.6	0.0	4.0	7.4	9.9	8.9	6.2
6	8.9	4.1	3.3	9.3	2.9	0.0	2.8	6.8	1.8	4.0
7	5.5	4.1	3.2	3.9	1.6	3.6	0.0	8.2	7.1	7.8
8	2.8	6.8	8.2	1.4	1.5	1.5	6.7	0.0	6.0	5.7
9	9.6	4.4	9.5	5.2	9.7	7.3	4.2	3.7	0.0	5.6
10	1.5	6.2	9.5	4.8	8.7	5.9	5.8	1.7	1.6	0.0

2.3 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาการทดลองที่มีชนิดผลิตภัณฑ์ 15 ชนิด

ตารางที่ ก.4 ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาการทดลองที่มีชนิดผลิตภัณฑ์ 15 ชนิด

From/To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.0	7.1	9.5	8.9	7.9	4.7	9.1	4.9	1.6	3.8	8.7	1.1	1.2	6.1	7.6
2	7.3	0.0	9.8	5.6	8.9	9.6	6.4	6.8	5.5	9.2	4.5	9.0	2.5	3.5	9.4
3	7.6	8.1	0.0	9.1	6.8	8.5	4.5	9.0	6.7	8.2	3.0	7.9	8.5	8.2	3.5
4	9.3	6.7	7.5	0.0	9.0	2.5	3.2	3.4	1.7	2.0	6.7	7.7	5.8	4.8	1.3
5	4.3	7.9	7.2	2.6	0.0	4.0	7.4	9.9	8.9	6.2	4.7	7.9	9.3	8.7	7.8
6	8.9	4.1	3.3	9.3	2.9	0.0	2.8	6.8	1.8	4.0	1.5	4.9	4.2	8.9	4.0
7	5.5	4.1	3.2	3.9	1.6	3.6	0.0	8.2	7.1	7.8	7.9	8.9	2.8	1.3	5.2
8	2.8	6.8	8.2	1.4	1.5	1.5	6.7	0.0	6.0	5.7	8.8	3.3	6.2	5.3	3.5
9	9.6	4.4	9.5	5.2	9.7	7.3	4.2	3.7	0.0	5.6	7.3	8.1	4.7	6.2	9.2
10	1.5	6.2	9.5	4.8	8.7	5.9	5.8	1.7	1.6	0.0	8.2	9.3	5.6	8.0	4.1
11	2.0	3.1	2.1	2.2	1.9	6.2	1.2	6.1	4.3	6.5	0.0	5.9	2.9	4.3	7.8
12	1.2	2.5	3.9	9.5	5.8	2.8	2.8	4.3	6.0	3.1	3.6	0.0	7.5	7.3	9.7
13	6.6	3.2	1.3	5.7	1.0	7.4	3.7	2.8	2.6	7.3	2.2	4.0	0.0	7.4	3.2
14	7.6	5.6	2.4	1.5	1.3	1.0	7.9	1.6	7.1	5.7	7.7	3.2	2.7	0.0	8.1
15	3.0	2.7	5.4	1.4	9.4	2.5	9.5	1.0	7.8	3.9	5.3	1.3	3.8	4.1	0.0

3. เวลาดำเนินงานของปัญหาการทดลองทั้ง 11 ปัญหา

3.1 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 1.1

ตารางที่ ก.5 ดำเนินงานของปัญหา Set 1.1

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
1	26.70	26	28	33	10
2	17.90	15	38	6	21
3	10.65	54	58	15	31
4	15.15	1	11	6	8
5	26.60	33	16	24	17
6	25.40	26	2	19	28
7	111.00	61	88	128	9
8	58.50	5	54	87	9
9	31.75	16	32	8	45
10	78.75	40	43	95	33
11	55.95	56	40	33	67
12	41.30	47	12	29	39
13	85.55	132	33	124	95
14	39.60	6	54	37	40
15	33.55	1	33	28	12
16	34.35	16	121	125	9
17	14.70	2	12	30	12
18	114.10	58	184	124	136
19	29.50	14	10	4	28
20	59.55	19	77	69	104
21	21.45	14	24	26	29
22	11.70	24	8	24	14
23	26.95	61	8	36	58
24	21.30	76	22	56	6
25	70.40	43	33	79	35
26	58.20	45	45	58	43
27	40.40	6	35	41	50
28	187.10	249	227	145	211
29	16.65	48	82	85	17
30	19.60	33	25	28	19
31	5.05	5	4	4	4

ตารางที่ ก.5 ดำเนินงานของปัญหา Set 1.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
32	19.45	12	3	7	27
33	17.00	53	3	11	45
34	50.70	39	52	19	71
35	40.25	63	34	99	68
36	38.00	28	8	41	50
37	138.40	103	79	133	127
38	53.65	12	85	33	51
39	20.00	24	19	15	32
40	19.85	1	7	24	2
41	21.25	5	17	39	40
42	32.55	80	104	125	19
43	24.95	18	28	22	27
44	16.30	7	23	17	33
45	25.35	35	15	13	4
46	26.30	34	20	12	36
47	3.55	19	10	7	10
48	38.00	44	18	7	50
49	15.10	3	16	5	23
50	7.70	46	5	37	16
51	25.80	13	40	9	31
52	27.15	13	31	8	12
53	9.60	5	2	7	3
54	45.35	93	35	99	66
55	20.50	23	12	39	35
56	81.45	7	79	32	108
57	12.35	98	67	6	17
58	36.40	64	23	27	28
59	13.65	2	19	7	5
60	7.20	24	3	10	10
61	65.50	66	37	73	16
62	8.35	11	5	14	18
63	88.70	15	3	68	39
64	80.60	85	143	64	115
65	48.35	26	55	58	57

3.2 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 1.2

ตารางที่ ก.6 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 1.2

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
1	32.27	26	28	33	10
2	16.87	15	38	6	21
3	3.87	54	58	15	31
4	17.53	1	11	6	8
5	29.80	33	16	24	17
6	24.53	26	2	19	28
7	145.00	61	88	128	9
8	75.00	5	54	87	9
9	27.33	16	32	8	45
10	94.00	40	43	95	33
11	52.27	56	40	33	67
12	42.07	47	12	29	39
13	82.40	132	33	124	95
14	39.47	6	54	37	40
15	40.73	1	33	28	12
16	42.80	16	121	125	9
17	15.60	2	12	30	12
18	106.80	58	184	124	136
19	30.00	14	10	4	28
20	44.73	19	77	69	104
21	18.93	14	24	26	29
22	10.93	24	8	24	14
23	16.60	61	8	36	58
24	26.40	76	22	56	6
25	82.20	43	33	79	35
26	63.27	45	45	58	43
27	37.20	6	35	41	50
28	179.13	249	227	145	211
29	16.53	48	82	85	17
30	19.80	33	25	28	19
31	5.40	5	4	4	4
32	16.93	12	3	7	27

ตารางที่ ก.6 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 1.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
33	7.67	53	3	11	45
34	43.93	39	52	19	71
35	31.00	63	34	99	68
36	34.00	28	8	41	50
37	142.20	103	79	133	127
38	54.53	12	85	33	51
39	16.00	24	19	15	32
40	25.80	1	7	24	2
41	15.00	5	17	39	40
42	37.07	80	104	125	19
43	24.27	18	28	22	27
44	10.73	7	23	17	33
45	32.47	35	15	13	4
46	23.07	34	20	12	36
47	1.40	19	10	7	10
48	34.00	44	18	7	50
49	12.47	3	16	5	23
50	4.93	46	5	37	16
51	24.07	13	40	9	31
52	32.20	13	31	8	12
53	11.80	5	2	7	3
54	38.47	93	35	99	66
55	15.67	23	12	39	35
56	72.60	7	79	32	108
57	10.80	98	67	6	17
58	39.20	64	23	27	28
59	16.53	2	19	7	5
60	6.27	24	3	10	10
61	82.00	66	37	73	16
62	5.13	11	5	14	18
63	105.27	15	3	68	39
64	69.13	85	143	64	115
65	45.47	26	55	58	57

3.3 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 2.1

ตารางที่ ก.7 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 2.1

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
1	28.75	26	28	33	10
2	15.75	15	38	6	21
3	8.50	54	58	15	31
4	15.50	1	11	6	8
5	31.25	33	16	24	17
6	28.75	26	2	19	28
7	121.50	61	88	128	9
8	54.75	5	54	87	9
9	29.25	16	32	8	45
10	82.50	40	43	95	33
11	58.75	56	40	33	67
12	48.00	47	12	29	39
13	94.25	132	33	124	95
14	31.75	6	54	37	40
15	32.25	1	33	28	12
16	13.50	16	121	125	9
17	11.25	2	12	30	12
18	89.50	58	184	124	136
19	32.50	14	10	4	28
20	40.25	19	77	69	104
21	17.75	14	24	26	29
22	12.50	24	8	24	14
23	28.75	61	8	36	58
24	30.00	76	22	56	6
25	75.50	43	33	79	35
26	60.25	45	45	58	43
27	32.75	6	35	41	50
28	194.50	249	227	145	211
29	5.75	48	82	85	17
30	20.50	33	25	28	19
31	5.50	5	4	4	4
32	20.25	12	3	7	27

ตารางที่ ก.7 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 2.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
33	21.00	53	3	11	45
34	48.50	39	52	19	71
35	32.75	63	34	99	68
36	37.25	28	8	41	50
37	142.00	103	79	133	127
38	45.00	12	85	33	51
39	19.25	24	19	15	32
40	20.75	1	7	24	2
41	13.00	5	17	39	40
42	23.50	80	104	125	19
43	23.25	18	28	22	27
44	10.50	7	23	17	33
45	34.00	35	15	13	4
46	28.50	34	20	12	36
47	4.00	19	10	7	10
48	43.25	44	18	7	50
49	12.50	3	16	5	23
50	10.00	46	5	37	16
51	22.75	13	40	9	31
52	29.25	13	31	8	12
53	11.25	5	2	7	3
54	45.00	93	35	99	66
55	17.00	23	12	39	35
56	69.00	7	79	32	108
57	21.50	98	67	6	17
58	46.00	64	23	27	28
59	13.25	2	19	7	5
60	10.00	24	3	10	10
61	77.50	66	37	73	16
62	6.75	11	5	14	18
63	97.50	15	3	68	39
64	69.25	85	143	64	115
65	40.50	26	55	58	57

3.4 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 2.2

ตารางที่ ก.8 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 2.2

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
1	35	26	28	33	10
2	14	15	38	6	21
3	1	54	58	15	31
4	18	1	11	6	8
5	36	33	16	24	17
6	29	26	2	19	28
7	159	61	88	128	9
8	70	5	54	87	9
9	24	16	32	8	45
10	99	40	43	95	33
11	56	56	40	33	67
12	51	47	12	29	39
13	94	132	33	124	95
14	29	6	54	37	40
15	39	1	33	28	12
16	15	16	121	125	9
17	11	2	12	30	12
18	74	58	184	124	136
19	34	14	10	4	28
20	19	19	77	69	104
21	14	14	24	26	29
22	12	24	8	24	14
23	19	61	8	36	58
24	38	76	22	56	6
25	89	43	33	79	35
26	66	45	45	58	43
27	27	6	35	41	50
28	189	249	227	145	211
29	2	48	82	85	17
30	21	33	25	28	19
31	6	5	4	4	4
32	18	12	3	7	27

ตารางที่ ก.8 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 2.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
33	13	53	3	11	45
34	41	39	52	19	71
35	21	63	34	99	68
36	33	28	8	41	50
37	147	103	79	133	127
38	43	12	85	33	51
39	15	24	19	15	32
40	27	1	7	24	2
41	4	5	17	39	40
42	25	80	104	125	19
43	22	18	28	22	27
44	3	7	23	17	33
45	44	35	15	13	4
46	26	34	20	12	36
47	2	19	10	7	10
48	41	44	18	7	50
49	9	3	16	5	23
50	8	46	5	37	16
51	20	13	40	9	31
52	35	13	31	8	12
53	14	5	2	7	3
54	38	93	35	99	66
55	11	23	12	39	35
56	56	7	79	32	108
57	23	98	67	6	17
58	52	64	23	27	28
59	16	2	19	7	5
60	10	24	3	10	10
61	98	66	37	73	16
62	3	11	5	14	18
63	117	15	3	68	39
64	54	85	143	64	115
65	35	26	55	58	57

3.5 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 3.1

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 3.1

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
1	30.00	26	28	33	10
2	15.40	15	38	6	21
3	7.00	54	58	15	31
4	16.00	1	11	6	8
5	32.20	33	16	24	17
6	28.80	26	2	19	28
7	129.00	61	88	128	9
8	57.80	5	54	87	9
9	28.20	16	32	8	45
10	85.80	40	43	95	33
11	58.20	56	40	33	67
12	48.60	47	12	29	39
13	94.20	132	33	124	95
14	31.20	6	54	37	40
15	33.60	1	33	28	12
16	13.80	16	121	125	9
17	11.20	2	12	30	12
18	86.40	58	184	124	136
19	32.80	14	10	4	28
20	36.00	19	77	69	104
21	17.00	14	24	26	29
22	12.40	24	8	24	14
23	26.80	61	8	36	58
24	31.60	76	22	56	6
25	78.20	43	33	79	35
26	61.40	45	45	58	43
27	31.60	6	35	41	50
28	193.40	249	227	145	211
29	5.00	48	82	85	17
30	20.60	33	25	28	19
31	5.60	5	4	4	4
32	19.80	12	3	7	27

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 3.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
33	19.40	53	3	11	45
34	47.00	39	52	19	71
35	30.40	63	34	99	68
36	36.40	28	8	41	50
37	143.00	103	79	133	127
38	44.60	12	85	33	51
39	18.40	24	19	15	32
40	22.00	1	7	24	2
41	11.20	5	17	39	40
42	23.80	80	104	125	19
43	23.00	18	28	22	27
44	9.00	7	23	17	33
45	36.00	35	15	13	4
46	28.00	34	20	12	36
47	3.60	19	10	7	10
48	42.80	44	18	7	50
49	11.80	3	16	5	23
50	9.60	46	5	37	16
51	22.20	13	40	9	31
52	30.40	13	31	8	12
53	11.80	5	2	7	3
54	43.60	93	35	99	66
55	15.80	23	12	39	35
56	66.40	7	79	32	108
57	21.80	98	67	6	17
58	47.20	64	23	27	28
59	13.80	2	19	7	5
60	10.00	24	3	10	10
61	81.60	66	37	73	16
62	6.00	11	5	14	18
63	101.40	15	3	68	39
64	66.20	85	143	64	115
65	39.40	26	55	58	57

3.6 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 3.2

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 3.2

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
1	35	26	28	33	10
2	14	15	38	6	21
3	1	54	58	15	31
4	18	1	11	6	8
5	36	33	16	24	17
6	29	26	2	19	28
7	159	61	88	128	9
8	70	5	54	87	9
9	24	16	32	8	45
10	99	40	43	95	33
11	56	56	40	33	67
12	51	47	12	29	39
13	94	132	33	124	95
14	29	6	54	37	40
15	39	1	33	28	12
16	15	16	121	125	9
17	11	2	12	30	12
18	74	58	184	124	136
19	34	14	10	4	28
20	19	19	77	69	104
21	14	14	24	26	29
22	12	24	8	24	14
23	19	61	8	36	58
24	38	76	22	56	6
25	89	43	33	79	35
26	66	45	45	58	43
27	27	6	35	41	50
28	189	249	227	145	211
29	2	48	82	85	17
30	21	33	25	28	19
31	6	5	4	4	4
32	18	12	3	7	27

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 3.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E
33	13	53	3	11	45
34	41	39	52	19	71
35	21	63	34	99	68
36	33	28	8	41	50
37	147	103	79	133	127
38	43	12	85	33	51
39	15	24	19	15	32
40	27	1	7	24	2
41	4	5	17	39	40
42	25	80	104	125	19
43	22	18	28	22	27
44	3	7	23	17	33
45	44	35	15	13	4
46	26	34	20	12	36
47	2	19	10	7	10
48	41	44	18	7	50
49	9	3	16	5	23
50	8	46	5	37	16
51	20	13	40	9	31
52	35	13	31	8	12
53	14	5	2	7	3
54	38	93	35	99	66
55	11	23	12	39	35
56	56	7	79	32	108
57	23	98	67	6	17
58	52	64	23	27	28
59	16	2	19	7	5
60	10	24	3	10	10
61	98	66	37	73	16
62	3	11	5	14	18
63	117	15	3	68	39
64	54	85	143	64	115
65	35	26	55	58	57

3.7 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 4.1

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 4.1

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	23.50	26	28	33	10	30	9	22	32	29
2	16.75	15	38	6	21	24	11	17	33	39
3	39.00	54	58	15	31	24	17	20	38	59
4	19.50	1	11	6	8	23	3	15	2	15
5	16.00	33	16	24	17	5	21	14	19	14
6	36.25	26	2	19	28	27	27	20	30	11
7	115.50	61	88	128	9	128	73	59	61	112
8	42.00	5	54	87	9	62	13	18	14	30
9	36.50	16	32	8	45	23	2	37	36	51
10	100.75	40	43	95	33	42	16	75	56	149
11	39.25	56	40	33	67	31	35	21	68	15
12	36.50	47	12	29	39	39	16	8	34	26
13	105.00	132	33	124	95	26	116	130	67	57
14	35.75	6	54	37	40	23	52	26	31	33
15	37.75	1	33	28	12	7	6	52	34	30
16	51.50	16	121	125	9	92	80	25	116	128
17	22.25	2	12	30	12	13	9	22	10	29
18	10.25	58	184	124	136	34	69	5	90	43
19	30.75	14	10	4	28	8	15	14	29	9
20	97.50	19	77	69	104	98	96	87	85	74
21	24.00	14	24	26	29	24	9	21	27	34
22	20.50	24	8	24	14	2	37	21	35	13
23	76.25	61	8	36	58	60	80	91	73	43
24	34.50	76	22	56	6	34	33	74	57	54
25	92.00	43	33	79	35	104	31	89	15	68
26	32.00	45	45	58	43	2	40	57	8	26
27	40.50	6	35	41	50	21	48	35	20	16
28	160.50	249	227	145	211	251	181	168	264	141
29	48.50	48	82	85	17	32	87	65	11	23
30	22.75	33	25	28	19	6	3	29	7	12
31	7.50	5	4	4	4	4	7	4	6	11
32	45.50	12	3	7	27	41	20	24	23	41

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 4.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
33	28.75	53	3	11	45	7	37	40	44	28
34	65.75	39	52	19	71	92	28	81	72	19
35	80.25	63	34	99	68	25	94	36	128	122
36	52.00	28	8	41	50	27	6	31	51	49
37	122.50	103	79	133	127	27	137	121	89	59
38	31.75	12	85	33	51	65	24	10	75	10
39	16.25	24	19	15	32	8	23	21	7	30
40	38.00	1	7	24	2	25	25	22	11	29
41	30.25	5	17	39	40	39	4	23	20	31
42	53.00	80	104	125	19	12	99	78	161	161
43	23.25	18	28	22	27	20	12	23	30	29
44	15.00	7	23	17	33	4	34	13	13	17
45	65.50	35	15	13	4	31	39	18	88	94
46	13.75	34	20	12	36	23	10	14	17	11
47	4.50	19	10	7	10	18	2	21	10	11
48	43.25	44	18	7	50	34	50	2	35	44
49	19.00	3	16	5	23	2	27	12	16	16
50	33.25	46	5	37	16	34	38	48	34	49
51	21.50	13	40	9	31	41	8	8	40	24
52	29.25	13	31	8	12	40	22	6	43	12
53	44.25	5	2	7	3	15	50	54	18	23
54	63.25	93	35	99	66	113	44	107	62	41
55	45.25	23	12	39	35	40	44	43	39	28
56	117.50	7	79	32	108	119	63	36	40	164
57	5.50	98	67	6	17	4	95	58	91	41
58	32.00	64	23	27	28	51	3	54	22	40
59	22.00	2	19	7	5	4	20	29	17	23
60	9.25	24	3	10	10	21	19	9	2	10
61	100.00	66	37	73	16	59	72	106	66	91
62	14.25	11	5	14	18	6	18	21	5	15
63	154.25	15	3	68	39	78	69	104	111	18
64	53.50	85	143	64	115	31	154	67	93	102
65	49.25	26	55	58	57	43	55	29	47	58

3.8 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 4.2

ตารางที่ ก.12 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 4.2

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	35	26	28	33	10	30	9	22	32	29
2	14	15	38	6	21	24	11	17	33	39
3	1	54	58	15	31	24	17	20	38	59
4	18	1	11	6	8	23	3	15	2	15
5	36	33	16	24	17	5	21	14	19	14
6	29	26	2	19	28	27	27	20	30	11
7	159	61	88	128	9	128	73	59	61	112
8	70	5	54	87	9	62	13	18	14	30
9	24	16	32	8	45	23	2	37	36	51
10	99	40	43	95	33	42	16	75	56	149
11	56	56	40	33	67	31	35	21	68	15
12	51	47	12	29	39	39	16	8	34	26
13	14	132	33	124	95	26	116	130	67	57
14	29	6	54	37	40	23	52	26	31	33
15	39	1	33	28	12	7	6	52	34	30
16	15	16	121	125	9	92	80	25	116	128
17	11	2	12	30	12	13	9	22	10	29
18	74	58	184	124	136	34	69	5	90	43
19	34	14	10	4	28	8	15	14	29	9
20	19	19	77	69	104	98	96	87	85	74
21	14	14	24	26	29	24	9	21	27	34
22	12	24	8	24	14	2	37	21	35	13
23	19	61	8	36	58	60	80	91	73	43
24	38	76	22	56	6	34	33	74	57	54
25	89	43	33	79	35	104	31	89	15	68
26	66	45	45	58	43	2	40	57	8	26
27	27	6	35	41	50	21	48	35	20	16
28	189	249	227	145	211	251	181	168	264	141
29	2	48	82	85	17	32	87	65	11	23
30	3	33	25	28	19	6	3	29	7	12
31	6	5	4	4	4	4	7	4	6	11
32	18	12	3	7	27	41	20	24	23	41

ตารางที่ ก.12 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 4.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
33	13	53	3	11	45	7	37	40	44	28
34	41	39	52	19	71	92	28	81	72	19
35	21	63	34	99	68	25	94	36	128	122
36	33	28	8	41	50	27	6	31	51	49
37	147	103	79	133	127	27	137	121	89	59
38	43	12	85	33	51	65	24	10	75	10
39	15	24	19	15	32	8	23	21	7	30
40	27	1	7	24	2	25	25	22	11	29
41	4	5	17	39	40	39	4	23	20	31
42	25	80	104	125	19	12	99	78	161	161
43	22	18	28	22	27	20	12	23	30	29
44	3	7	23	17	33	4	34	13	13	17
45	44	35	15	13	4	31	39	18	88	94
46	26	34	20	12	36	23	10	14	17	11
47	2	19	10	7	10	18	2	21	10	11
48	41	44	18	7	50	34	50	2	35	44
49	9	3	16	5	23	2	27	12	16	16
50	8	46	5	37	16	34	38	48	34	49
51	20	13	40	9	31	41	8	8	40	24
52	35	13	31	8	12	40	22	6	43	12
53	14	5	2	7	3	15	50	54	18	23
54	38	93	35	99	66	113	44	107	62	41
55	11	23	12	39	35	40	44	43	39	28
56	56	7	79	32	108	119	63	36	40	164
57	23	98	67	6	17	4	95	58	91	41
58	52	64	23	27	28	51	3	54	22	40
59	16	2	19	7	5	4	20	29	17	23
60	10	24	3	10	10	21	19	9	2	10
61	98	66	37	73	16	59	72	106	66	91
62	3	11	5	14	18	6	18	21	5	15
63	117	15	3	68	39	78	69	104	111	18
64	54	85	143	64	115	31	154	67	93	102
65	35	26	55	58	57	43	55	29	47	58

3.9 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 5.1

ตารางที่ ก.13 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 5.1

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	35.27	26	28	33	10	30	9	22	32	29	17	29	22	32	24
2	44.24	15	38	6	21	24	11	17	33	39	18	28	44	38	9
3	91.78	54	58	15	31	24	17	20	38	59	48	11	34	53	51
4	30.91	1	11	6	8	23	3	15	2	15	13	13	22	23	14
5	38.42	33	16	24	17	5	21	14	19	14	38	31	25	23	25
6	11.96	26	2	19	28	27	27	20	30	11	23	13	17	11	19
7	99.27	61	88	128	9	128	73	59	61	112	55	32	87	127	9
8	61.82	5	54	87	9	62	13	18	14	30	48	28	17	71	31
9	52.58	16	32	8	45	23	2	37	36	51	40	10	26	32	45
10	237.69	40	43	95	33	42	16	75	56	149	79	145	93	127	131
11	40.80	56	40	33	67	31	35	21	68	15	30	37	14	64	66
12	38.07	47	12	29	39	39	16	8	34	26	41	42	18	42	9
13	215.62	132	33	124	95	26	116	130	67	57	77	63	19	14	131
14	24.33	6	54	37	40	23	52	26	31	33	20	33	22	37	16
15	65.07	1	33	28	12	7	6	52	34	30	47	37	21	17	41
16	136.69	16	121	125	9	92	80	25	116	128	9	130	40	134	138
17	44.98	2	12	30	12	13	9	22	10	29	18	35	15	38	27
18	116.51	58	184	124	136	34	69	5	90	43	93	193	66	159	35
19	42.16	14	10	4	28	8	15	14	29	9	24	31	28	16	17
20	67.27	19	77	69	104	98	96	87	85	74	49	106	99	41	87
21	23.56	14	24	26	29	24	9	21	27	34	22	10	16	27	23
22	8.67	24	8	24	14	2	37	21	35	13	13	11	10	13	30
23	20.82	61	8	36	58	60	80	91	73	43	62	20	41	67	51
24	43.60	76	22	56	6	34	33	74	57	54	63	57	36	30	48
25	115.71	43	33	79	35	104	31	89	15	68	108	67	97	72	64
26	17.42	45	45	58	43	2	40	57	8	26	44	33	14	40	18
27	28.73	6	35	41	50	21	48	35	20	16	53	26	34	32	18
28	90.49	249	227	145	211	251	181	168	264	141	197	91	261	19	246
29	141.87	48	82	85	17	32	87	65	11	23	31	17	78	47	68
30	50.64	33	25	28	19	6	3	29	7	12	11	15	26	10	32
31	17.62	5	4	4	4	4	7	4	6	11	10	10	10	9	10
32	46.31	12	3	7	27	41	20	24	23	41	31	29	38	22	19

ตารางที่ ก.13 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 5.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
33	7.53	53	3	11	45	7	37	40	44	28	18	42	19	11	28
34	54.02	39	52	19	71	92	28	81	72	19	11	98	104	60	28
35	83.82	63	34	99	68	25	94	36	128	122	84	123	55	17	38
36	55.44	28	8	41	50	27	6	31	51	49	37	36	31	21	47
37	63.20	103	79	133	127	27	137	121	89	59	133	60	72	56	91
38	81.82	12	85	33	51	65	24	10	75	10	26	81	79	60	50
39	18.60	24	19	15	32	8	23	21	7	30	26	18	11	20	28
40	45.22	1	7	24	2	25	25	22	11	29	32	23	19	20	23
41	45.51	5	17	39	40	39	4	23	20	31	18	51	28	44	37
42	88.58	80	104	125	19	12	99	78	161	161	26	89	80	76	72
43	31.69	18	28	22	27	20	12	23	30	29	28	31	21	19	20
44	19.04	7	23	17	33	4	34	13	13	17	18	12	27	29	21
45	136.42	35	15	13	4	31	39	18	88	94	93	89	25	71	18
46	12.07	34	20	12	36	23	10	14	17	11	31	9	10	37	13
47	17.42	19	10	7	10	18	2	21	10	11	20	14	14	25	23
48	108.16	44	18	7	50	34	50	2	35	44	89	72	64	62	50
49	25.58	3	16	5	23	2	27	12	16	16	26	14	14	25	9
50	7.20	46	5	37	16	34	38	48	34	49	15	36	12	30	24
51	49.36	13	40	9	31	41	8	8	40	24	36	33	31	40	24
52	51.49	13	31	8	12	40	22	6	43	12	25	32	46	10	39
53	38.73	5	2	7	3	15	50	54	18	23	30	43	40	12	14
54	15.56	93	35	99	66	113	44	107	62	41	69	52	89	34	92
55	9.89	23	12	39	35	40	44	43	39	28	13	9	40	44	20
56	166.73	7	79	32	108	119	63	36	40	164	112	19	74	103	152
57	45.89	98	67	6	17	4	95	58	91	41	70	84	42	51	53
58	20.02	64	23	27	28	51	3	54	22	40	12	51	12	33	37
59	34.93	2	19	7	5	4	20	29	17	23	13	27	20	21	14
60	2.29	24	3	10	10	21	19	9	2	10	9	11	17	12	12
61	107.20	66	37	73	16	59	72	106	66	91	92	83	61	93	28
62	12.27	11	5	14	18	6	18	21	5	15	16	20	10	14	16
63	157.33	15	3	68	39	78	69	104	111	18	98	85	113	59	88
64	117.73	85	143	64	115	31	154	67	93	102	109	133	70	105	148
65	44.71	26	55	58	57	43	55	29	47	58	42	46	18	44	60

3.10 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 5.2

ตารางที่ ก.14 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 5.2

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	34.71	26	28	33	10	30	9	22	32	29	17	29	22	32	24
2	16.67	15	38	6	21	24	11	17	33	39	18	28	44	38	9
3	4.67	54	58	15	31	24	17	20	38	59	48	11	34	53	51
4	21.24	1	11	6	8	23	3	15	2	15	13	13	22	23	14
5	40.05	33	16	24	17	5	21	14	19	14	38	31	25	23	25
6	26.48	26	2	19	28	27	27	20	30	11	23	13	17	11	19
7	146.71	61	88	128	9	128	73	59	61	112	55	32	87	127	9
8	71.33	5	54	87	9	62	13	18	14	30	48	28	17	71	31
9	25.52	16	32	8	45	23	2	37	36	51	40	10	26	32	45
10	122.90	40	43	95	33	42	16	75	56	149	79	145	93	127	131
11	56.00	56	40	33	67	31	35	21	68	15	30	37	14	64	66
12	51.14	47	12	29	39	39	16	8	34	26	41	42	18	42	9
13	81.33	132	33	124	95	26	116	130	67	57	77	63	19	14	131
14	25.43	6	54	37	40	23	52	26	31	33	20	33	22	37	16
15	43.00	1	33	28	12	7	6	52	34	30	47	37	21	17	41
16	23.33	16	121	125	9	92	80	25	116	128	9	130	40	134	138
17	16.52	2	12	30	12	13	9	22	10	29	18	35	15	38	27
18	87.10	58	184	124	136	34	69	5	90	43	93	193	66	159	35
19	37.19	14	10	4	28	8	15	14	29	9	24	31	28	16	17
20	20.71	19	77	69	104	98	96	87	85	74	49	106	99	41	87
21	12.76	14	24	26	29	24	9	21	27	34	22	10	16	27	23
22	10.29	24	8	24	14	2	37	21	35	13	13	11	10	13	30
23	16.76	61	8	36	58	60	80	91	73	43	62	20	41	67	51
24	38.86	76	22	56	6	34	33	74	57	54	63	57	36	30	48
25	99.95	43	33	79	35	104	31	89	15	68	108	67	97	72	64
26	61.62	45	45	58	43	2	40	57	8	26	44	33	14	40	18
27	28.29	6	35	41	50	21	48	35	20	16	53	26	34	32	18
28	170.05	249	227	145	211	251	181	168	264	141	197	91	261	19	246
29	3.43	48	82	85	17	32	87	65	11	23	31	17	78	47	68
30	21.24	33	25	28	19	6	3	29	7	12	11	15	26	10	32
31	8.05	5	4	4	4	4	7	4	6	11	10	10	10	9	10
32	20.95	12	3	7	27	41	20	24	23	41	31	29	38	22	19

ตารางที่ ก.14 เวลาดำเนินงานของปัญหา Set 5.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
33	10.86	53	3	11	45	7	37	40	44	28	18	42	19	11	28
34	45.19	39	52	19	71	92	28	81	72	19	11	98	104	60	28
35	18.33	63	34	99	68	25	94	36	128	122	84	123	55	17	38
36	33.95	28	8	41	50	27	6	31	51	49	37	36	31	21	47
37	137.57	103	79	133	127	27	137	121	89	59	133	60	72	56	91
38	51.76	12	85	33	51	65	24	10	75	10	26	81	79	60	50
39	15.57	24	19	15	32	8	23	21	7	30	26	18	11	20	28
40	29.90	1	7	24	2	25	25	22	11	29	32	23	19	20	23
41	10.38	5	17	39	40	39	4	23	20	31	18	51	28	44	37
42	16.52	80	104	125	19	12	99	78	161	161	26	89	80	76	72
43	22.33	18	28	22	27	20	12	23	30	29	28	31	21	19	20
44	5.38	7	23	17	33	4	34	13	13	17	18	12	27	29	21
45	54.05	35	15	13	4	31	39	18	88	94	93	89	25	71	18
46	25.86	34	20	12	36	23	10	14	17	11	31	9	10	37	13
47	5.90	19	10	7	10	18	2	21	10	11	20	14	14	25	23
48	57.62	44	18	7	50	34	50	2	35	44	89	72	64	62	50
49	11.24	3	16	5	23	2	27	12	16	16	26	14	14	25	9
50	4.14	46	5	37	16	34	38	48	34	49	15	36	12	30	24
51	24.48	13	40	9	31	41	8	8	40	24	36	33	31	40	24
52	38.90	13	31	8	12	40	22	6	43	12	25	32	46	10	39
53	18.14	5	2	7	3	15	50	54	18	23	30	43	40	12	14
54	36.76	93	35	99	66	113	44	107	62	41	69	52	89	34	92
55	8.05	23	12	39	35	40	44	43	39	28	13	9	40	44	20
56	66.29	7	79	32	108	119	63	36	40	164	112	19	74	103	152
57	27.76	98	67	6	17	4	95	58	91	41	70	84	42	51	53
58	48.48	64	23	27	28	51	3	54	22	40	12	51	12	33	37
59	18.29	2	19	7	5	4	20	29	17	23	13	27	20	21	14
60	10.19	24	3	10	10	21	19	9	2	10	9	11	17	12	12
61	99.43	66	37	73	16	59	72	106	66	91	92	83	61	93	28
62	4.71	11	5	14	18	6	18	21	5	15	16	20	10	14	16
63	129.57	15	3	68	39	78	69	104	111	18	98	85	113	59	88
64	64.57	85	143	64	115	31	154	67	93	102	109	133	70	105	148
65	32.95	26	55	58	57	43	55	29	47	58	42	46	18	44	60

3.11 เวลาดำเนินงานของปัญหา Case Study

ตารางที่ ก.15 เวลาดำเนินงานของปัญหา Case Study

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน	
	A	B
1	35	26
2	14	15
3	1	54
4	18	1
5	36	33
6	29	26
7	159	61
8	70	5
9	24	16
10	99	40
11	56	56
12	51	47
13	14	132
14	29	6
15	39	1
16	15	16
17	11	2
18	74	58
19	34	14
20	19	19
21	14	14
22	12	24
23	19	61
24	38	76
25	89	43
26	66	45
27	27	6
28	189	249
29	2	48
30	3	33
31	6	5
32	18	12

ตารางที่ ก.15 เวลาดำเนินงานของปัญหา Case Study (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน	
	A	B
33	13	53
34	41	39
35	21	63
36	33	28
37	147	103
38	43	12
39	15	24
40	27	1
41	4	5
42	25	80
43	22	18
44	3	7
45	44	35
46	26	34
47	2	19
48	41	44
49	9	3
50	8	46
51	20	13
52	35	13
53	14	5
54	38	93
55	11	23
56	56	7
57	23	98
58	52	64
59	16	2
60	10	24
61	98	66
62	3	11
63	117	15
64	54	85
65	35	26

4. ข้อมูลสายการประกอบที่นำมาใช้ในการจัดลำดับการผลิต

4.1 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของสายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของสายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ของ Kim et al. (2000) และเงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ก.16 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ของ Kim et al. (2000)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานลำดับถัดไป
1	E	3
2	E	3
3	E	4, 23
4	E	5, 6, 7, 9, 11, 12, 25, 26, 27, 41, 45, 49
5	E	14
6	E	14
7	R	8
8	R	14
9	L	10
10	L	14
11	E	14
12	E	14
13	E	14
14	E	15, 18, 20, 22
15	E	16
16	L	17
17	L	31
18	R	19
19	R	21
20	E	21

ตารางที่ ก.16 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ของ Kim et al. (2000) (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานลำดับถัดไป
21	E	31
22	E	31
23	E	24
24	E	31
25	L	31
26	R	31
27	R	28
28	R	50
29	L	50
30	L	50
31	E	32, 36, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62
32	E	33
33	E	34
34	E	35
35	R	50
36	E	37
37	E	38
38	E	39, 40
39	L	50
40	R	50
41	E	42
42	E	43
43	E	62
44	R	46
45	L	46
46	E	47
47	L	48
48	L	50
49	E	16

ตารางที่ ก.16 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ของ Kim et al. (2000) (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานลำดับถัดไป
50	E	66
51	R	65
52	E	65
53	L	65
54	E	65
55	R	65
56	E	57
57	E	65
58	L	65
59	R	65
60	E	65
61	R	65
62	E	63
63	L	64
64	L	65
65	E	-

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
1	L	5
2	R	6
3	L	7
4	R	8
5	L	12, 15, 17, 28, 36
6	R	9, 13, 16, 18, 29, 36
7	L	19, 30, 36
8	R	20, 31, 36
9	R	29
10	L	14, 21

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
11	R	21
12	L	43
13	R	44, 56
14	E	56
15	L	37
16	R	38
17	L	39
18	R	40
19	L	41
20	R	42
21	E	43, 44
22	E	49, 50
23	R	-
24	L	-
25	R	52
26	L	51
27	E	49, 50
28	L	45, 50, 55
29	R	46, 50, 55
30	L	47, 49, 50, 54
31	R	48, 49, 50, 54
32	E	49, 54
33	L	57
34	R	58
35	E	49, 54, 59
36	E	53
37	L	124
38	R	125

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
39	L	115, 126
40	R	116, 127
41	L	128, 134
42	R	129, 135
43	L	73, 92
44	R	73
45	L	84, 85, 86, 87
46	R	84, 85, 86, 87
47	L	83, 88, 89
48	R	83, 88, 89
49	E	57, 58, 76, 81, 83, 88, 89
50	E	54, 71, 72, 74
51	L	155
52	R	155, 156
53	E	99
54	E	59
55	E	91
56	E	77, 78, 79
57	L	59, 70
58	R	70
59	E	60, 61
60	E	61, 62, 63, 64, 66, 67, 68
61	E	62, 63, 64
62	E	67
63	L	65
64	R	65
65	E	66
66	E	67

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
67	E	68
68	E	69
69	E	70, 80, 82, 83
70	E	-
71	L	-
72	R	-
73	R	76
74	E	75
75	L	-
76	L	-
77	L	-
78	R	85
79	E	84
80	E	81
81	E	82
82	E	-
83	L	85, 88, 89, 91, 94, 95, 97, 147
84	L	86, 87, 90, 91, 93, 148
85	R	86, 87, 90, 98, 130
86	R	87, 90
87	R	88, 91, 93, 94, 98
88	R	95, 96, 97, 102
89	E	94, 95, 96
90	R	92, 93, 97
91	L	92, 97, 98
92	L	111
93	E	-
94	L	-

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
95	E	-
96	L	-
97	E	-
98	R	102
99	E	100, 101, 114, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 157, 160
100	E	149, 150, 151, 152
101	E	153, 154
102	E	103, 104, 105, 106, 107, 108, 109
103	R	104, 105, 118
104	E	105, 106, 107, 108
105	R	106, 107, 108, 109, 131
106	E	107, 108, 109, 119
107	R	110
108	E	110, 117
109	R	-
110	E	113
111	L	112
112	L	113
113	R	-
114	E	115
115	L	116, 132
116	R	127, 133
117	E	163
118	E	120
119	E	120, 121, 122, 123
120	E	121, 122, 123, 157, 160
121	L	164
122	R	165

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
123	E	166
124	L	140
125	R	141
126	L	-
127	R	-
128	L	142, 144
129	R	143
130	R	-
131	R	-
132	L	141, 142
133	R	136, 140, 141
134	L	137, 142
135	R	138, 142,143
136	L	-
137	R	139
138	L	-
139	R	-
140	L	144, 145, 146, 147, 148
141	R	144, 145, 146, 147, 148
142	L	144, 145, 146, 147, 148
143	R	144, 145, 146, 147, 148
144	E	145
145	E	146
146	E	147
147	E	-
148	L	-
149	L	-
150	R	-

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
151	L	-
152	R	-
153	L	-
154	R	-
155	L	158
156	R	-
157	E	158, 159
158	L	159
159	R	-
160	E	161, 162
161	L	-
162	R	-
163	E	-
164	L	165
165	R	166
166	E	167, 168
167	E	168
168	E	169
169	L	171, 172, 173, 174
170	R	171, 172, 173, 174
171	L	172, 173, 174, 179
172	R	173, 174
173	R	174, 181
174	L	175, 176, 177, 178, 182
175	R	176, 177, 178, 179
176	L	177, 178, 180
177	R	178, 180, 181
178	L	182

ตารางที่ ก.17 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานที่มี 183 ขั้นงาน ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานที่ทำถัดไป
179	R	-
180	R	-
181	R	-
182	L	183
183	L	-

4.2 สายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

สายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย สายการประกอบสำหรับ 2 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 183 ขั้นงาน สายการประกอบสำหรับ 5 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 65 ขั้นงาน สายการประกอบสำหรับ 10 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 65 ขั้นงาน และสายการประกอบสำหรับ 15 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 65 ขั้นงาน ดังนี้

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลสายการประกอบสำหรับ 2 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 183 ขั้นงาน

ลำดับขั้นงาน	10	25	22	26	4	27	14	1	8	34	31	48	2	6	33	16	51	24	32	3
	13	38	125	170	11	7	5	9	36	28	45	52	15	19	30	47	41	134	37	29
	53	20	17	50	71	18	40	124	55	128	137	56	35	54	23	99	114	156	78	74
	72	139	101	153	155	12	39	46	21	77	79	75	42	126	49	154	43	84	100	135
	138	129	151	58	152	115	150	57	143	132	142	116	133	127	140	59	60	61	44	63
	73	149	64	141	62	144	148	145	146	136	76	65	66	67	68	69	83	89	147	80
	70	81	82	85	130	86	90	87	94	93	91	92	98	111	112	88	95	102	96	103
	118	104	105	131	106	107	108	110	113	119	120	123	121	117	160	109	164	122	165	97
	162	163	166	167	168	169	171	157	172	173	158	174	159	175	161	176	177	181	178	182
	180	183	179																	
สถานีงาน	1	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1
	2	2	2	4	4	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	4
	3	4	3	3	3	4	4	3	3	3	4	3	3	6	6	5	5	6	6	5
	6	6	5	5	5	5	5	6	5	5	5	5	6	7	6	6	7	7	8	8
	7	8	7	8	8	7	8	7	8	7	7	8	8	8	7	8	8	7	8	9
	8	9	10	10	10	10	9	10	10	9	9	10	10	10	10	10	9	12	9	11
	11	11	11	12	12	12	12	12	11	12	11	13	14	13	13	14	14	14	13	14
	14	14	14	14	15	16	15	16	16	15	15	15	15	16	16	16	17	18	18	17
	18	17	17	17	17	17	17	18	20	20	19	19	20	22	21	21	22	22	21	21
	22	21	22																	

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลสายการประกอบสำหรับ 5 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 65 ขั้นงาน

ลำดับขั้นงาน	13	44	29	2	1	3	23	24	4	27	6	28	7	8	41	11	42	5	49	45
	25	9	43	46	12	30	26	47	10	14	18	15	19	22	16	20	21	17	48	31
	53	55	62	59	36	61	37	54	60	51	58	32	33	34	38	35	56	57	39	63
	40	52	64	50	65															
สถานีงาน	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	4	4	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	3	3	3	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	4	3	3	4
	3	4	4	4	3	4	5	6	6	6	5	6	6	6	5	6	5	6	5	5
	6	6	5	6	6															

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลสายการประกอบสำหรับ 10 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 65 ขั้นงาน

ลำดับขั้นงาน	13	2	30	29	1	3	23	44	24	4	26	5	27	45	46	47	28	9	7	8
	48	12	10	6	11	25	41	42	14	20	18	49	22	15	43	16	17	19	21	31
	51	56	54	60	61	36	37	58	62	32	59	33	38	39	63	40	53	55	52	34
	57	64	35	50	65															
สถานีงาน	1	2	1	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	4	4
	1	1	1	1	1	3	3	3	4	4	4	3	3	3	3	3	3	4	4	3
	4	3	4	3	6	3	5	5	6	6	6	6	5	5	5	6	5	6	6	6
	5	5	6	6	6															

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลสายการประกอบสำหรับ 15 ผลิตภัณฑ์ ที่มี 65 ขั้นงาน

ลำดับขั้นงาน	29	30	44	13	2	1	3	4	45	26	23	27	6	28	11	25	9	12	10	7
	5	41	46	42	49	8	14	47	15	20	18	16	48	19	22	21	24	17	43	31
	51	54	58	53	32	60	52	59	62	55	61	33	56	36	34	37	35	63	64	38
	40	39	57	50	65															
สถานีงาน	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	4
	3	3	3	3	4	4	4	3	4	3	4	3	3	4	4	4	4	3	3	4
	4	3	5	5	4	4	4	6	6	6	6	5	5	6	5	6	6	5	5	6
	6	5	6	5	5															

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ

ในภาคผนวกนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับการแสดงตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ 3 ตัว การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Pareto-Optimal Solution) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ

ประเภทกลุ่มคำตอบ	$f_1(x)$	$f_2(x)$
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ (Obtained Pareto Optimal Set)	1	12
	4	7
	11	5
	15	3
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal Set)	1	12
	4	7
	10	2

1. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง จึงกล่าวได้ว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันกลุ่มคำตอบที่แท้จริงและถือได้ว่าอัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูง (นพพล คำภิรมย์, 2551) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Convergence = \frac{1}{\left|S^*\right|} \sum_{y \in S^*} \min \left\{ d_{xy} \mid x \in S_j \right\} \qquad \text{(ข.1)}$$

โดยที่ $$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right)^2} \qquad \text{(ข.2)}$$

เมื่อ S_j แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกลุ่มที่ j เมื่อ $j = 1,2,...,J$

S^* แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

$|S^*|$ แทน จำนวนสมาชิกคำตอบในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

d_{xy} แทน ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ x กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง y

$f_i^{\max}$ และ $f_i^{\min}$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

$f_i(x)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่ค้นพบ

$f_i(y)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

โดยตัวอย่างการคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง มีวิธีการคำนวณดังนี้

1) หาระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง โดยเริ่มจากการนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบมารวมกันดังตารางที่ ข.1 จากนั้นทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ผลที่ได้ คือ $f_1^{\max}$ = 15, $f_1^{\min}$ = 1, $f_2^{\max}$ = 12 และ $f_2^{\min}$ = 2

2) ทำการ Normalized ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงในด้านของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ด้วยสมการ $\left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right)^2$ เมื่อ $i = 1,2$ โดยได้ผลการคำนวณดังตารางที่ ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ข.2 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงในด้านของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1

True Pareto	Obtained Pareto			
	1	4	11	15
1	0.0000	0.0459	0.5102	1.0000
4	0.0459	0.0000	0.2500	0.6173
10	0.4133	0.1837	0.0051	0.1276

ตารางที่ ข.3 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงในด้านของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

True Pareto	Obtained Pareto			
	1	4	11	15
1	0.0000	0.2500	0.4900	0.8100
4	0.2500	0.0000	0.0400	0.1600
10	1.0000	0.2500	0.0900	0.0100

3) หาระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง โดยคำนวณจากสมการ ข.1 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ ข.4 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

True Pareto	Obtained Pareto			
	1	4	11	15
1	0.0000	0.5440	1.0001	1.3454
4	0.5440	0.0000	0.5385	0.8817
10	1.1888	0.6585	0.3084	0.3709

4) หาระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงที่ใกล้ที่สุด จากนั้นหาผลรวมของระยะทางดังกล่าว (Total Minimum Distance) แล้วหารด้วยจำนวนสมาชิกคำตอบในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง สุดท้ายนี้จะได้ค่าเฉลี่ยของระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงที่ใกล้ที่สุด (Average Minimum Distance) ซึ่งก็คือค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดยได้ผลดังตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงที่ใกล้ที่สุดและค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

True Pareto	Obtained Pareto				Minimum Distance
	1	4	11	15	
1	0.0000	0.5440	1.0001	1.3454	0.0000
4	0.5440	0.0000	0.5385	0.8817	0.0000
10	1.1888	0.6585	0.3084	0.3709	0.3084
Total Minimum Distance					0.3084
Average Minimum Distance					0.1028

2. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) เป็นการวัดการกระจายของสมาชิกคำตอบที่อยู่ภายในขอบเขตกลุ่มคำตอบเดียวกัน ถ้าตัวตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีการกระจายสม่ำเสมอ (Deb et al., 2002) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} \left| d_i - \bar{d} \right|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \qquad \text{(ข.3)}$$

โดยที่ d_f และ d_l แทน ระยะห่างระหว่างคำตอบปลายสุดทั้งสองด้านของเส้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

$\bar{d}$ แทน ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i แทน ระยะห่างระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ เมื่อ $i = 1,2,...,N-1$

N แทน จำนวนสมาชิกในกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

จากตารางที่ ข.1 สมารถแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ ได้ดังนี้

1) ทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ผลที่ได้ คือ $f_1^{\max} = 15$, $f_1^{\min} = 1$, $f_2^{\max} = 12$ และ $f_2^{\min} = 3$

2) ทำการ Normalized ระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ด้วยสมการที่ ข.4 โดยได้ผลการคำนวณดังตารางที่ ข.6

$$f_i(z) = \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^2 \qquad \text{(ข.4)}$$

โดยที่ $f_i(x)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบก่อนหน้า

$f_i(y)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบถัดไป

$f_i(z)$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่ได้จากการ Normalized

$f_i^{\max}$ และ $f_i^{\min}$ แทน ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

จากนั้นจริงทำการหาระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Euclidean Distance) ด้วยสมการ $\sqrt{\sum_{i=1}^{k} (f_i(z))^2}$ เมื่อ $i = 1,2$ โดยได้ผลการคำนวณดังตารางที่ ข.6

ตารางที่ ข.6 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงที่ใกล้ที่สุดและค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

No.	Obtained Pareto		Normalized		Euclidean Distance	
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$		
1	1	12	0.0459	0.3086	$d_1 = d_f$	0.5954
2	4	7	0.2500	0.0494	d_2	0.5472
3	11	5	0.0816	0.0494	$d_3 = d_l$	0.3620
4	15	3	$\bar{d}$			0.5015

3) คำนวณหาผลต่างระหว่าง d_i และ $\overline{d}$ และหาผลรวมของผลต่างที่ได้ ซึ่งได้ผลการคำนวณดังตารางที่ ข7

ตารางที่ ข.7 ผลต่างระหว่างระยะทางของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันและค่าเฉลี่ยของระยะทาง

No.	d_i	$\left\|d_i - \overline{d}\right\|$
1	0.5954	0.0939
2	0.5472	0.0456
3	0.3620	0.1396
$\sum_{i=1}^{N-1}\left\|d_i - \overline{d}\right\|$		0.2791

4) คำนวณค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ โดยนำค่าที่ได้ในขั้นตอน 1 2 และ 3 แทนลงในสมการ ข.4 จึงได้ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเท่ากับ 0.5023

3. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Pareto-Optimal Solution) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบนั้นมีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและถือได้ว่าอัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูง (Chutima and Pinkoompee, 2009) ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$R_{POS}\left(P_j\right) = \frac{\left|P_j - \left\{x \in P_j \mid \exists y \in P : y \prec x\right\}\right|}{\left|P_j\right|} \qquad \text{(ข.5)}$$

โดยที่ P_j แทน เซตคำตอบที่ j เมื่อ $j = 1,2,\ldots,J$

P แทน การรวมกันของเซตคำตอบทั้งหมด j เซต โดยที่ $P = P_1 \cup P_2 .. \cup P_J$

x แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ค้นพบ

y แทน กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

$y \succ x$ แทน กลุ่มคำตอบ x ถูกครอบงำด้วยกลุ่มคำตอบ y

จากตารางที่ ข.1 สมารถแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ดังนี้ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

1) สร้างตารางขนาด $n \times m$ เมื่อ n คือ จำนวนกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และ m คือ จำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ

2) เปรียบเทียบคำตอบที่ค้นพบ (x) กับคำตอบที่แท้จริง (y) ด้วยวิธีการเชิงกลุ่มแบบ Non-Dominated Sorting โดยมีเงื่อนไขการเปรียบเทียบดังนี้

- ถ้าคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 จะให้ค่าในตารางการเปรียบเทียบเท่ากับ 1
- ถ้าคำตอบที่ค้นพบไม่เท่ากับคำตอบที่แท้จริงทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 จะให้ค่าในตารางการเปรียบเทียบเท่ากับ 0

3) หาจำนวนอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดยนำค่าผลรวมในตารางหารด้วยจำนวนคำตอบที่ค้นพบ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ ข.8 การเปรียบเทียบจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่าจำนวนคำตอบที่แท้จริง

No.	True Pareto	Obtained Pareto				Value
		1	2	3	4	
		1	4	11	15	
		12	7	5	3	
1	1	1	0	0	0	1
	12					
2	4	0	1	0	0	1
	7					
3	10	0	0	0	0	0
	2					
Total Value						2
Ratio of Pareto-Optimal Solution						0.5

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองจากโปรแกรม

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองจากโปรแกรม

ในภาคผนวกนี้จะแสดงผลการทดลองที่ได้จากการรันโปรแกรมของอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม คือ COMSOAL NSGA-II DPSO PSONK และ BBO โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ค.1 ความหมายของตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรม

ตัวแปร	ความหมาย
Set_Alg	ชื่อปัญหาและชื่ออัลกอริทึม
Sequence	ลำดับผลิตภัณฑ์
SetupCost_UtilityWork	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2

ตารางที่ ค.2 ความหมายของค่าตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรม

ค่า Alg	ชื่ออัลกอริทึม
1	COMSOAL
2	NSGA-II
3	DPSO
4	PSONK
6	BBO

ผลการทดลองจากโปรแกรม Matlab 2009(a)

```
Set_Alg =

   1.1000    1.0000


Sequence =

AAAABBBCCDDE
DEAAACCABBBD
CAAAABBEDBDC
AABBDDBAECCA
AAABBCCEDDAB
CCDBAAAABBDE
CAAAABDEDCBB
ACCBBDEDAABA
ABDBCCEDAABA
AEDAACCBDBAB
```

AECBDBAACBDA
ABDABDAEABCC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.5545 1.4575
2.8015 1.4425
2.9900 1.4400
3.2110 1.4260
3.2500 1.4125
3.3800 1.4035
3.7245 1.3860
3.8025 1.3525
4.0495 1.3450
4.6410 1.3435
4.8945 1.3360
5.2455 1.3225

Set_Alg =

1.1000 2.0000

Sequence =

AAAABBBDDCCE
AAEDBABCCBDA
AAAABBBDDECC
AABCEDABCBDA
AAABBCCEDBDA
AAAABBBDCCDE
AAABBDECCBDA
AAAAEDBDCCBB
ABDAAABCCBDE
AAAABDEDBBCC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.0345 1.4650
2.3725 1.4350
2.7690 1.4200
2.9705 1.4065
3.1135 1.3765
3.1460 1.3675
3.3735 1.3450
4.1860 1.3360

```
    4.2835    1.3225
    4.9075    1.3150


Set_Alg =

    1.1000    3.0000


Sequence =

BAAAACCEDDBB
ABBBCCDDEAAA
ABDBBDCCEAAA
AAACCBDBBDEA
AAAEDABBDBCC
CEDBABDAAABC
AAABDBCCABDE
AACBDECBDBAA
ACBDABDECBAA
AEDAABDABCBC


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    2.1385    1.4784
    2.5545    1.4575
    2.8340    1.3975
    3.1720    1.3750
    3.6790    1.3675
    4.0495    1.3470
    4.0820    1.3450
    4.3615    1.3360
    4.9920    1.3225
    5.4730    1.3150


Set_Alg =

    1.1000    4.0000


Sequence =

DCCEAAAABBBD
AAAEDDBBBCCA
AAABBBCCEDDA
AAAAEDBBBDCC
AABBBDCCEDAA
AAABBDCCEDBA
AACCBBBDEDAA
```

ABBDBCCEDAAA
ACCBBDEDBAAA
ABCCBBDEDAAA
AABCCBDEDBAA
AABCCBDEDAAB
ABCBDEDAAABC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.0345 1.4650
2.2490 1.4575
2.3140 1.4350
2.4635 1.4200
2.5285 1.3975
2.8340 1.3885
2.8665 1.3750
3.1135 1.3675
3.1720 1.3660
3.3475 1.3450
3.6530 1.3360
4.2835 1.3225
4.9400 1.3150

Set_Alg =

1.1000 6.0000

Sequence =

AAAABBBDDCCE
AAAEDDBBBCCA
AAABBBCCEDDA
AAABBBDCCEDA
AACCBBBDEDAA
AABDBBCCEDAA
AACCBBDEDBAA
AAABBCCBDEDA
AAABDBACCBDE
AAABCEDBCBDA
AAABDEDABCCB
AAABCBDECBDA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.1385 1.4650

```
    2.2490    1.4575
    2.3725    1.4350
    2.5285    1.4290
    2.5610    1.3975
    2.8665    1.3750
    3.1135    1.3675
    3.1720    1.3660
    3.3475    1.3450
    4.0820    1.3360
    4.2835    1.3225
    4.9335    1.3150


Set_Alg =

    1.2000    1.0000


Sequence =

BBDDCCAAEEAB
DEECCBAAABBD
CCAAEEDBABBD
BAAEDCCEDBAB
AAEDBBAEDCCB
ABDCCBDBAEEA
ABDEBABDCCEA
AEDEABDCBCBA
AEABDECBDBAC


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    2.6000    1.6081
    2.8795    1.5452
    3.3995    1.5362
    3.6270    1.4927
    3.7635    1.4912
    3.9065    1.4627
    4.4330    1.4522
    5.0245    1.4282
    5.5835    1.4192


Set_Alg =

    1.2000    2.0000


Sequence =
```

BBDCCEEDAAAB
ABDEABCCEDBA
ACCEDDEABBBA
ABCCBBDEEDAA
AABDEEDBCCBA
CEDBBBAAAEDC
ABDEABDECCBA
ACCEDEDBBABA
ACCEAEDBBDBA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.5285 1.5692
2.6910 1.5412
3.0290 1.5107
3.3475 1.4867
3.6530 1.4672
3.7310 1.4627
3.8285 1.4522
4.3095 1.4192
4.5695 1.4088

Set_Alg =

1.2000 3.0000

Sequence =

AAABDDCCBBEE
AAEABBBDDCCE
CBBAAABDEEDC
AEDECCBBBDAA
AEDBACCEDBBA
ACECBBDEDBAA
ABAEDBBDEACC
ABDECCBDABEA
ABCEDBAEDCBA
AEABDCCBABDE
ACBABDBACEDE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.6975 1.5886
2.8275 1.5497
3.0680 1.5257

```
    3.2305    1.4867
    3.7310    1.4627
    4.0820    1.4582
    4.3940    1.4522
    4.6930    1.4477
    4.7905    1.4387
    4.7970    1.4327
    5.4470    1.4237


Set_Alg =

    1.2000    4.0000


Sequence =

AABBBDDCCEEA
ABBBCCEEDDAA
AACCBBBDDEEA
AEDDBBBCCEAA
ABBBDEEDCCAA
ABBBDDECCEAA
AAEDBBBDCCEA
AABBBDEDCCEA
AABBBCCEDEDA
AACCBBBDEDEA
AABBCCEDEDBA
AABCCBBDEDEA
ACCEDBABBDEA
ABDEACCBBDEA
AEDBABCCEDBA
ABDEDBABCCEA
ABDECCBDEABA


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    2.0345    1.5692
    2.3140    1.5647
    2.3725    1.5497
    2.4765    1.5452
    2.5610    1.5302
    2.6000    1.5257
    2.6910    1.5107
    2.7885    1.4912
    3.0680    1.4867
    3.1265    1.4717
    3.3735    1.4582
    3.6075    1.4477
    3.8285    1.4432
```

```
    4.0625    1.4327
    4.2120    1.4297
    4.3095    1.4192
    4.5695    1.4088


Set_Alg =

    1.2000    6.0000


Sequence =

BDDCCEEAAABB
ACCBBBEEDDAA
AADCCEEDBBBA
ABBCCEEDDBAA
AEDCCEDBBBAA
AACCEDEDBBBA
AABBCCEDEDBA
AABBCCBDEDEA
ACCEDEDBABBA
ABBACCBDEDEA
AECCEDBABDBA
ABCCEDEDBABA
ABABCCBDEDEA


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    2.0345    1.6171
    2.4960    1.5886
    2.5870    1.5497
    2.6195    1.5362
    2.6910    1.5107
    2.8925    1.4912
    3.3735    1.4582
    3.6075    1.4477
    3.8285    1.4432
    4.0625    1.4327
    4.2380    1.4297
    4.3095    1.4192
    4.5435    1.4088


Set_Alg =

    2.1000    1.0000


Sequence =
```

DDEAAAAEBBBCCCD
EDACCCAAADDBBBE
ACCEEABBDDDBCAA
AAEAAEDBDDBBCCC
ABDDBAAACCCEEDB
AAEDDEDBBCCCAAB
AABBDEDCCCEAABD
CEDACCEDAAABDBB
CAABDBDAACBDEEC
ABDABEDEDAACCCB
ABCBDAEDCCABDEA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.1200 1.8159
3.4775 1.8029
3.7310 1.7958
3.8415 1.7386
3.8740 1.7277
3.9390 1.7075
4.2185 1.6705
4.9465 1.6614
5.2845 1.6613
5.6160 1.6303
5.9475 1.6213

Set_Alg =

2.1000 2.0000

Sequence =

AABBDDDBACCCEEA
AAAAEDBBDCCCBDE
AABBDEABDCCCEDA
AAAACCCBBDDEEDB
AAABDABDECCCBDE
AAABDEABDCCCBDE
AAAAEEDBDCCCBBD
CCCBDEAAAABDEDB

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.0745 1.7939

```
    3.1720    1.7367
    3.4645    1.7236
    3.7245    1.6705
    4.2185    1.6504
    4.4070    1.6393
    4.7580    1.6263
    5.0635    1.5992


Set_Alg =

    2.1000    3.0000


Sequence =

DDDEEAAAACCBBBC
BEECCCDAAAADDBB
AACCCBAEDDDBBEA
CCCDBBBAAEDDEAA
BDEDCCCBAAAAEDB
AAABECCCDEDBBDA
AAACEDBBDEDCCBA
CBDAAABBCCAEDED
AABDECAEDBDCCBA
ABDEDCCBAAABCED
ABDECCEDBACBDAA
ABCCBDABDAECEDA


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    3.2370    1.8379
    3.2565    1.8309
    3.5945    1.8029
    3.6660    1.7717
    3.7245    1.6995
    4.2575    1.6875
    4.2705    1.6705
    5.0115    1.6563
    5.3430    1.6503
    5.3820    1.6413
    5.5120    1.6123
    6.2205    1.5961


Set_Alg =

    2.1000    4.0000
```

Sequence =

CCBBEEAAAABDDDC
AAABBBDDEDCCCEA
AAAAEDDEDBBBCCC
AAABBBCCCEDEDDA
AABBBDDEDECCCAA
AAAAEDEDBBBDCCC
AAABBBDCCCEDEDA
AAABBBDEDEDCCCA
AABBDCCCEDEDBAA
AACCCBBBDEDEDAA
AABBDEDEDCCCBAA
ABCCCEDEDBBDAAA
AAABBDEDEDBCCCA
AACCCBBDEDEDBAA
AAABBCCCBDEDEDA
AABCCCBDEDEDBAA
AAABDABCCCBDEDE
ABCBDEDECCBDAAA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.6975 1.8379
2.7885 1.7367
3.0030 1.7296
3.0680 1.7095
3.1265 1.7075
3.2175 1.6925
3.2825 1.6725
3.3150 1.6705
3.5880 1.6615
3.6205 1.6504
3.8220 1.6484
3.8675 1.6433
3.9000 1.6413
3.9260 1.6394
4.1015 1.6213
4.4070 1.6103
5.0375 1.5992
5.2910 1.5921

Set_Alg =

2.1000 6.0000

Sequence =

AAAABBBCCCDDDEE
AAAABBBCCCEDDDE
AAAABBBDCCCEDDE
AAABBBCCCEDDEDA
AAABDBBDCCCEEDA
AAAABBCCCBDEDDE
AAAEDBBCCCEDBDA
AAABDBBCCCEDEDA
AABBDECCCBDEDAA
AAABDBCCCBDEDEA
AABDEDBACCCABDE
ABDBABCCCAEDEDA
AABDABCCCEDABDE
ABDEDABCCBCEDAA
ABDEDABCCBDECAA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.5545 1.8179
2.5740 1.7737
2.7885 1.7367
3.0680 1.7095
3.3280 1.6945
3.6075 1.6855
3.7700 1.6744
3.8675 1.6433
4.1275 1.6213
4.4070 1.6193
5.2910 1.6173
5.3690 1.6123
5.4340 1.6012
5.6615 1.5941
5.7200 1.5921

Set_Alg =

2.2000 1.0000

Sequence =

DDCADCCBBBAAEEE
BDBBCCCEDEEAAAD
BBDDEECCCBAAEDA
AAABDEEEBDCCCDB
CCCEBEDEDAAABBD
CCCAABDBBDEDAEE
CCEDBECBDEAAABD
ABDBEDEAECCCBDA

ABDEAABCCDEDECB

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.7310 1.9073
3.9260 1.8173
4.1665 1.8143
4.2770 1.7993
4.3745 1.7750
4.4590 1.7553
5.1610 1.7357
5.3495 1.7130
6.1880 1.6917

Set_Alg =

2.2000 2.0000

Sequence =

AAEEDBBBDDCCCEA
AADEDEDBBBCCCEA
AABDEDEDBBCCCEA
AAABBCCBDEDEDCE
AAABCBDEDEDECCB
BAAAEEDEDCCCBDB
AABDDEEDBBCCCEA
BBBDDEEDAAAECCC
AAABCBDEDEDECBC
AAABBCCBDEDEDEC
AAABBCCBDEDECED
AAEEDDBDBBCCCEA
DEDBBBAAAEECCCD
DEDBBBAAAEDCCCE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.6910 1.8387
3.2305 1.8340
3.2370 1.8280
3.2760 1.8233
3.3735 1.7947
3.4450 1.7933
3.7245 1.7647
3.8805 1.7553

```
    4.1275    1.7160
    4.7060    1.7120
    5.0115    1.7113
    5.0440    1.6917
    5.5510    1.6720
    6.2075    1.6673


Set_Alg =

    2.2000    3.0000


Sequence =

DDDCCAAAEEEBBBC
BDCCCEDDAEEAABB
ACCBBBDCEEDDEAA
ABBDEEACCCEDDBA
AEDCCABBBDCEEDA
ABBAEEDEDCCCDBA
BDCCCBAAABDEEDE
CEDEBDAAABBDECC
ABEDECCCBDEABDA
ABDBAAEDCECBDEC
AACBDEABDECBCDE


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    3.2370    1.9460
    3.3215    1.8477
    3.4710    1.8150
    3.8285    1.7903
    4.1925    1.7817
    4.3615    1.7707
    4.5305    1.7630
    4.5565    1.7270
    5.4470    1.7023
    6.2530    1.6983
    6.8705    1.6917


Set_Alg =

    2.2000    4.0000


Sequence =

ABBBEDDDEECCCAA
```

CCCEEDEAAABBBDD
DBBBAAACCCEEDED
DEAAACCCBBBDEED
AAEEDEDBBBDCCCA
AABBBDCCCEDEEDA
AABBBDEDEEDCCCA
AABBBDEDEDCCCEA
AAEDEDEDBBBCCCA
AABBBCCCEDEDEDA
AABBBDEDEDECCCA
AABBCCCEDEDEDBA
AABCCCBBDEDEDEA
AAABBDEDEDECBCC
AABDEDBABCCCEDE
AABCCCBDEDEDEAB
ABDEDECBCCBDEAA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.7560 1.8733
2.7885 1.8280
2.8925 1.8130
3.1265 1.7933
3.2175 1.7797
3.2825 1.7660
3.3150 1.7600
3.5425 1.7403
3.7570 1.7357
3.8220 1.7220
3.8805 1.7160
4.1275 1.7070
4.3615 1.6963
5.0440 1.6917
5.0635 1.6873
5.2975 1.6767
5.5510 1.6720

Set_Alg =

2.2000 6.0000

Sequence =

AEEEDDDCCCBBBAA
AAEEEDDCCCBBBDA
EAAAEDCCCBBBDDE
CAAAEDEEDBBBDCC
AAAEDDECCCBBBDE

ABBBDEDCCCEDEAA
EAAABDCCCBBDEDE
CCEAAABDEDEDBBC
AEDEDECCCBDBBAA
AABDEDECCCABBDE
AEDBABDECCCBDEA
ABDEABDECCCBDEA
ABABDECCCABDEDE
AAECBDECBCBDEDA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.1710 1.8977
2.6650 1.8447
2.9250 1.8130
3.2175 1.7847
3.4905 1.7750
3.5425 1.7403
3.8220 1.7343
4.1275 1.7250
4.2900 1.7160
4.8165 1.6963
5.2260 1.6873
5.3235 1.6767
5.7525 1.6767
6.3375 1.6733

Set_Alg =

3.1000 1.0000

Sequence =

ECCCEADDEDDCAAAABBBB
CBDDBCAAAABBDDEEECCA
CEDEDDDCABECBBBAAAAC
DEECCCAECDDABBBAAABD
CECCAEEDDDABBBDAABAC
AEDCCCCBEBBBDADEDAAA
DEDEAABDCEABBCCCBAAD
AAAABDBDECCECEDDACBB
EDCCEDAAABCCBAEDBBDA
ABDBBDACBAAEDACEDCCE
ABDAAEDEDCBAABCCCDEB
EDECBBDABDACDECCAAAB
CEDECCDAAABCBDBDAEAB
DECBCCBDEDCBAAEABDAA
ABBCEDAECACABDCABDED

CCAEDEDBDACAEDABABCB
ABDECBDAACEDCBCDABAE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

4.5435 2.4138
5.4470 2.3834
5.4730 2.3819
5.4860 2.3712
5.6745 2.3700
5.6940 2.3039
6.3310 2.2850
6.4220 2.2757
6.5715 2.2517
7.5725 2.2395
7.6180 2.2302
7.9430 2.2237
8.1445 2.2223
8.1510 2.2209
8.8920 2.2197
8.9310 2.2113
9.1780 2.2051

Set_Alg =

3.1000 2.0000

Sequence =

AAABCCCEDBBBDDDCEEAA
AAABCCCBBBDDCEEDEDAA
AABCCBCBDECBDEDEDAAA
AACBCCCBBBDEDEDEDAAA
AAACCCCBBBDBDEDEDEAA
AABBCCCBCBDEDEDEDAAA
AAABCCCBCBBDDEDEDEAA
AAABCCCCDBBBDEEDEDAA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.7180 2.3951
4.4460 2.3121
4.6020 2.2731
4.6800 2.2429
5.5250 2.2424

```
    5.5380    2.2087
    6.0190    2.1808
    7.2085    2.1529


Set_Alg =

    3.1000    3.0000


Sequence =

BCCCAAAAAEDDCBBEEDDB
AADBBBDCEDBEEDCCCAAA
BBDDECBDAAACCCEAAEDB
CBDBCEDDAABAAAEEDBCC
BBAAEDCCCEDCBDADEAAB
CCBDECCBEDBAABAAAEDD
DBBBDAABCCCEAEDACAED
ABDACCCCAAEDBBDABDEE
BCCAABDBDEABDEDEAACC
CCCBDAEDBABDAEAEDABC
ABDACBDEDBCACECEDBAA


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    4.0105    2.4393
    4.6410    2.3497
    5.3690    2.3133
    5.8695    2.3003
    6.1425    2.2983
    6.2335    2.2950
    6.3050    2.2946
    6.3180    2.2395
    7.2085    2.2336
    7.6960    2.1961
    8.3070    2.1933


Set_Alg =

    3.1000    4.0000


Sequence =

BBBAAAEDDEEAADDCCCCB
AABBBBEDCCCCEDEDDAAA
ACCCCEDDEEDBBDBBAAAA
AAAEDEDEDDBBBBCCCCAA
```

CCBBBBDDEDEDEAAAAACC
CCCCEDBBBBDAAAAAEDED
AAAAABBBBDEDEDCCCCED
ABBBBDEDEDEDCCCCAAAA
AAACCCCBBBBDEDEDEDAA
AAAAABBBDEDEDEDCCCCB
AAAABBCCCCEDEDEDBBDA
AAAABBBDEDEDEDBCCCCA
AAAABDEDECCCCBBBDEDA
AAAABBDEDEDBCCCCBDEA
AAABDECCCCBBDEDEDBAA
AAABBCCCCBDEDABDEDEA
AABDEDEDECBBCCCBDAAA
ABCCCCBDBABDEDEDEAAA
ABDEDEDEDAABCCCCBAAB
ABCBCCCBDEDEDAAAABDE
ABCECCABDABDABDEDAEC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.6140 2.4457
3.6660 2.3440
3.6920 2.3412
3.7570 2.3133
3.8805 2.3105
3.9390 2.2918
4.0365 2.2768
4.0690 2.2553
4.3745 2.2367
4.5760 2.2339
4.6215 2.2302
4.6540 2.2274
4.8815 2.2087
5.1610 2.2059
5.1870 2.1969
5.7915 2.1873
6.0450 2.1808
6.0970 2.1755
6.7275 2.1658
6.9550 2.1593
9.0220 2.1585

Set_Alg =

3.1000 6.0000

Sequence =

ABBBBEDDCCCCEEDDAAAA
ABBBBDEDCCCCEEDDAAAA
ABBBBDEDECCCCEDDAAAA
ABBBBDEDCCCCDEDEAAAA
ABBBBDEDAAAEDEDCCCCA
ABBBBDEDACCCCEDEDAAA
ABBDEDAAABBDCCCCEDEA
ABBDEDAAABBCCCCEDEDA
AABDEDBAABBCCCCEDEDA
AABDEDEDABBCCCCBDEAA
AABDEDECABBCCCBDEDAA
ABCCEDEDBAABCCBDEDAA
ABCCBDEDEAABCCBDEDAA
ABDEDECABCBCCAABDEDA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.9120	2.4299
3.2825	2.3440
3.8480	2.2946
4.2770	2.2768
4.6020	2.2581
4.7710	2.2395
4.9725	2.2367
5.2520	2.2115
5.5575	2.1997
5.7915	2.1873
6.4740	2.1808
6.7210	2.1718
6.9550	2.1593
8.0665	2.1529

Set_Alg =

3.2000	1.0000

Sequence =

ACEDBBBDDDAAABECCCEE
AADCCEEBDEECBBBDDCAA
ADDECEEDDECCBBCBBAAA
AAEDDBDBBECCEDBEACCA
CBBAABDCCDEDDEEEABAC
BDCEBCCCEEDBBDAAAADE
DAAACCCEABDBDEEDECBB
DEAAABDBCCCEDBEABCED
CEEDBAABDABDEDABCCCE
ACCBDEBDABBDECECEDAA

ACBCCBAEDAABBDEDEDCE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

4.8620 2.4640
5.3105 2.4540
5.4600 2.4290
5.9800 2.4187
6.0775 2.4127
6.1360 2.4040
6.2660 2.3490
6.3765 2.3400
7.1435 2.2890
7.5790 2.2883
7.6115 2.2830

Set_Alg =

3.2000 2.0000

Sequence =

CCCCEEAAEAABBBBDDDDE
CCCCEEDBAAEDAABBBDDE
AAABBCCCCEEEDEDDBBDA
CBCCABDECEDAABDEDEAB
BABDECCCCEDAABDEDEAB
AABCCCCBBDEDEDABDEEA
ABDBAABDECEDABCCCEDE
EAAABBCCCCEDABBDDEDE
EDBBBCCCCAAAEDABDEDE
ABCCABCEDABDABDECEDE
CCCEEEEDDBAAAEABBBDDC
AAABCCCBBDEDECABDEDE
CCCEEEEEAAABBBDABDDDC
EDAAABBBCCCCEDABDEDE
AAABBCCCCEDEABBDDEDE
AAABBBCCCCDEEDBDEDEA
AABCCCCBBDEDEDABDEAE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.3930 2.5110
3.4645 2.4973
3.6270 2.4823

```
    3.8675    2.4050
    4.6865    2.3900
    4.7580    2.3597
    4.8620    2.3490
    5.0180    2.3400
    5.1870    2.3203
    5.2520    2.3067
    5.7915    2.2870
    6.4740    2.2720
    6.5845    2.2673
    6.7340    2.2567
    7.4035    2.2537
    8.2940    2.2520
    8.6905    2.2443


Set_Alg =

    3.2000    3.0000


Sequence =

AAEACEECEDDDBBBBDCCA
BBDBBEEDDCCCACEDEAAA
ABDCCCBAABBDEEEDDCEA
DCCCAAEDBBDEAABBDCEE
ABBBEDDCCAAABDEDECCE
ECCCEDCEAAABDBBDBDAE
EDBDBABCECCCEEDBDAAA
CCCBBDEDEABDBEDAAEAC
ABDABCCBEEDCCABDEDEA
ABCCEACEDEDBBDEAABDC
ECCCEDACEDABDABABBDE
AEDBCBAEDBACCCBDEDAE
ECBCCAEDABDEAABDEDCB
AEDEDEABDBCBCBCECDAA
ACBDEDEDBACABBCAEDEC


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    4.7125    2.4777
    5.0830    2.4567
    5.1025    2.3997
    5.2520    2.3937
    5.5445    2.3793
    5.8305    2.3450
    6.4155    2.3443
    6.5325    2.3113
    7.2280    2.3067
```

```
    7.2735    2.3007
    7.2930    2.2930
    8.0080    2.2780
    8.2745    2.2763
    8.6320    2.2730
    8.8595    2.2673


Set_Alg =

    3.2000    4.0000


Sequence =

BBCCCCEEDBBAAAAEEDDD
AAEDEDEEDDBBBBCCCCAA
AAAEDDBBBBDEDECCCCEA
EDCCCCEDEDAAAABBBBDE
AAAABBBBDEDEDCCCCEDE
AAAAEDEDEDEDBBBBCCCC
AABBBBDEDEDEDECCCCAA
ABBBCCCCEDEDEDEDBAAA
AAABBDEDEDECCCCBBDEA
AABDEDEDEDECBBBCCCAA
ABBDEDEDEDBAAABCCCCE
ABDEDEDEDEAAABCCCCBB
AABCCBDEDEDEDECCBBAA
ABABDEABDEDEDECCCCBA
ABCCBCCBDEAABDEDEDEA


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    3.2760    2.5110
    3.7570    2.3990
    4.0105    2.3793
    4.0365    2.3447
    4.2965    2.3250
    4.5110    2.3203
    4.6345    2.3007
    4.8815    2.2917
    5.1415    2.2810
    5.7980    2.2763
    5.8175    2.2720
    6.0515    2.2613
    6.3050    2.2567
    7.0135    2.2417
    7.2150    2.2370
```

Set_Alg =

3.2000 6.0000

Sequence =

CCCCAAAABBDDBBEEEEDD
CBDBBBAAAAEEDDDEECCC
CCCCAAAABBDDBBDEEEDE
ACCCCAAABBDDBBDEEEDE
CCBBBAAAAEDEDBDEEDCC
CCCCAAAABBDEBBDEEDED
ABBBBDAAAEDEDEDCCCCE
ABDBBBAAAEDEDEDCCCCE
ABDBBBAAAEDEDEDECCCC
ABBDEAAABBDEDEDECCCC
ABBDEAABABDEDEDECCCC
ABDBABDEAACBDEDECCCE
ABDBABDEAECBDEDECCCA
AABDEDABDECBDECCECBA
AABDEDABDECBDECAECBC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.9900 2.5307
3.5360 2.4670
3.9260 2.4127
4.3550 2.4037
4.4785 2.3627
4.7775 2.3537
4.8295 2.3310
5.1350 2.3250
5.4730 2.3007
5.5705 2.2810
6.5065 2.2613
7.4620 2.2523
7.5985 2.2477
7.9170 2.2383
9.1390 2.2337

Set_Alg =

4.1000 1.0000

Sequence =

AAGBBBDHECAFIBDJCCCA

ADHCCJFEDIBBBGCAAABC
CCBCFBBDHDAAJAABIEGC
GDFHEABDBIBBCCJCAAAC
CBBCBDEBJDCHFIGAAAAC
JBBABFAECCCIBDGDHAAC
CEBDFIBDBGJAHCBCAAAC
JCBABIBCACCBDHFGEAAD
ICAAGJBFHDBDBCABCECA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

4.8165 3.4116
5.7135 3.4112
5.7460 3.3944
6.3310 3.3934
6.5975 3.3916
6.6235 3.3902
6.8315 3.3770
6.9550 3.3398
8.7425 3.3388

Set_Alg =

4.1000 2.0000

Sequence =

IJAAAABBBDHEFBDGCCCC
IEGCBDJCABAABDHCBCAF
IFABDHJCBCAEGCABCABD
IBFJABDHEAAABDBCGCCC
IFJBDHEAAABDBCABCGCC
IFJAAABBBDHEGCCCCABD
IBFBABDJEAAABDHCCGCC
IFBDAEAABJBDHCABCGCC
FIBJABDHEAAABDBCCGCC
IFBDJEAABABDHCABCGCC
IBBJAAABDAFBDHEGCCCC
DIBJAAAAFBBBDHEGCCCC
IJAAAFBBBDHEGCCCCABD
IBFBABDJAAABDHEGCCCC
IBHDJEAAAABBFBDGCCCC
IJABDHEAAABBFBDGCCCC
IFBABJEAAABDHCCGCCBD
IJFBDHEAAABDBCABCGCC
IFBABJEAAABDHCBDGCCC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.3475 3.4214
3.6270 3.4116
3.8350 3.4018
4.0950 3.3920
4.3615 3.3888
4.4525 3.3822
4.7905 3.3724
4.9725 3.3626
5.4730 3.3542
5.5250 3.3430
5.9670 3.3374
6.2010 3.3360
6.4025 3.3346
6.4415 3.3332
6.5260 3.3248
7.1240 3.3206
7.6115 3.3108
8.0470 3.3094
8.9700 3.2996

Set_Alg =

4.1000 3.0000

Sequence =

CCCCAIEJAAAGFBHDDBBB
HEBBCCCCAAJDBDGFIBAA
CHEAFIGDJBCAAABBBDCC
AACBHFCCCBDJEABGDIBA
JBDDBAIBCAAAFHEGCCCB
AAGAEBDDHFIBBCCJABCC
ACCAACCBJDBBGEABDHFI
CCJDDBGCBIBCAAAFHEAB
CIBFAAAEABGCBBDJDCHC
CCHCAAADEBJBGAFBDIBC
JADHCBEABFGCBIDBCCAA
AHDBCAJBCCIFGCBEAABD
IBDGFEJABDBCBCACAAHC
IBEABDGJCBCBCAAHDAFC
JDBHFGCACACBACBDABIE
IACJBCGDAEHFCBCABDAB

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

```
    4.4265    3.4704
    4.7385    3.4116
    4.8880    3.3986
    5.7655    3.3954
    5.8565    3.3920
    5.9215    3.3822
    6.2855    3.3738
    6.4285    3.3724
    6.7405    3.3622
    7.0330    3.3584
    7.3255    3.3552
    7.3775    3.3518
    7.7350    3.3434
    8.0925    3.3388
    8.8660    3.3346
    9.3405    3.3258


Set_Alg =

    4.1000    4.0000


Sequence =

IBBBDHFBDJAAACCCCGEA
CGEAAAABBBDHDJFIBCCC
IBBBDHEAABDGCCCCJAAF
IBBDHFGCCCCAAAAEJBBD
IBBDHEAAAABDJBCCCCGF
IBCCCCGEAAAABDJBDHFB
IBCCCCBDHFGEAAAABJBD
IBDHFGEAABJBCCCCAABD
IBCCGCCBDHFBJAAAEABD
IBDHFGCCAEAAABJBCCBD
IBDHFGCCCAAAEABJBDBC
IBDJBCCAAAEABDHFGCBC
IBDHCCABCAAFBCGJEABD


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    3.2240    3.4018
    3.3670    3.3986
    3.5425    3.3920
    3.6465    3.3822
    3.8870    3.3724
    4.2640    3.3626
    4.6345    3.3528
    5.0635    3.3430
```

```
    5.3235    3.3332
    5.7460    3.3248
    5.9800    3.3234
    6.2400    3.3136
    7.2800    3.3052


Set_Alg =

    4.1000    6.0000


Sequence =

IBBBBJFCCCCGEAAAAHDD
IBBBBCCCCAFGEAAAJHDD
IBBBBCCCCHFGEAAAJADD
IBBBBJACCCCGEAAAFHDD
IBBBDFGCCCCHEJAAAABD
IBBJAFGCCCCHEAAABBDD
IBBBDJHCCCCGEAAAFABD
IBBBDJGCCCCHEAAAFABD
IBBAAFGCCCCJAABDHEBD
IBBAAFGCCCCHEABDJABD
IBBCBCCCAAFGEAABDHDJ
IBAAAFGCCCCJBABDHEBD
IBBCAEGCCCJAAABDHFBD
IBCBAEGCCCJAAABDHFBD
IBAAAFGCCCBJEABDHCBD
IBCAAFGCCBCAAJBDHEBD
IBCAAFGCCBCHEABDJABD
IBCAABCCAHFJEABDGCBD
IBCEAFJAABCGCABDHCBD
IBCAAFGCCABJEABDHCBD
IBCAABCACHFJEABDGCBD
IBCAAFGCABCJEABDHCBD
IBJEAFGCBCACAABDHCBD
IFAEABJCABCGCABDHCBD


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    2.6780    3.4532
    2.8470    3.4434
    3.2045    3.4346
    3.2240    3.4248
    3.3215    3.4116
    3.5750    3.4018
    3.9195    3.4008
    4.1470    3.3920
    4.2185    3.3822
```

```
    4.4070    3.3724
    4.8230    3.3692
    4.9985    3.3626
    5.1350    3.3528
    5.6420    3.3430
    6.0060    3.3332
    6.0905    3.3332
    6.2270    3.3234
    6.7730    3.3224
    6.9810    3.3192
    7.0915    3.3052
    7.6570    3.3042
    7.6635    3.2996
    7.7740    3.2996
    8.6905    3.2954


Set_Alg =

    4.2000    1.0000


Sequence =

ECGCHHEJAFFBBDDIIJAG
JIGAFJGBBEAFCCHHDIED
IDJJEFBHFCCGAIBHEAGD
AJBIHDGCEECAHFGFIDJB
AAJGJFBIBEHFIDGCCEDH
EHDGIGCCHJABDIBAFFJE
FGCEIBIHDJHCBDAFGJAE
ICGJAIBJEGFHAEFBCHDD
EHJFJAAHCBDIBCDGFIEG
ICEHJABCHDGEGFAJDBFI
CHFJDBDHABCGFIEAEGIJ


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+003 *

    4.3550    3.5346
    5.0375    3.5278
    5.1285    3.4798
    5.4535    3.4550
    5.6290    3.4504
    5.7655    3.4284
    6.5195    3.4222
    6.8705    3.4140
    6.8965    3.4082
    7.2865    3.3972
    7.5465    3.3938
```

Set_Alg =

4.2000 2.0000

Sequence =

CCGEEFIHFIBBDJAAJHDG
CGEDGFIHFIBBDJAAJHEC
IHEGFGCJAAFIEBDJBDHC
IEGFIFGCBJEHDAJABDHC
DGEEGFIHFIBBDJAAJHCC
CGEHFIEGFIBBDJAAJDHC
IEGFIFGJCBJEHDAABDHC
CABIEGFIFGJEHDJABDHC
CEGEHFIBDJAAJGFIBDHC
CGEGFIEHFIBBDJAAJHDC
IHEGFGCJAABJDFIEHDBC
CGFIHEEGFIBBDJAAJDHC
CGFIEHFIBAABDJJHDGEC
IEGFIFGCEHABDJJABDHC
CGFIEHFIBBDJAAJHDGEC
CGEEGFIHFIBBDJAAJHDC
CGEGEHFIFIBBDJAAJDHC
CGEGEHFIFIBBDJAAJHDC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.9705 3.4792
3.3800 3.4562
3.4970 3.4488
3.9585 3.4478
4.0040 3.4358
4.2380 3.4312
4.2445 3.4302
4.5305 3.4204
4.6215 3.4172
4.8295 3.4116
4.9075 3.4074
5.1415 3.3952
6.0905 3.3886
6.5975 3.3844
6.6625 3.3756
7.0460 3.3668
7.7155 3.3570
8.2875 3.3514

Set_Alg =

4.2000 3.0000

Sequence =

IICCBBDHDJAHAEGGEFFJ
FJDDJAAHGCCIGEIHEBBF
DHEJFGEFIHDJAICCABBG
CGBHFFIDBIGEEHJDJAAC
IDGIBBGEHEFJCCAAJDHF
HCGEJAAIDFBGCHFEIBDJ
ICJDGEEAAFGCJHFBDHIB
IBCIHDJGAJBHFGCAFEED
IGGEEAAJHDBCBCHJFIDF
IFECBDGDIBAAJJHFGCHE
JHECAJAEGFIBDDBGCHFI
IEGEFHDJBDBCCHJFGAAI
JBAAHDFIDHEGIBCGEJFC
JABCEDGIGABCHEHFFIDJ
ICHEEAJDJBDIACHFGFGB
IBDHAFJFIECGBCHEAJGD
DIEJAFGIAEHCJBDBHFGC
AEBDGJCHJEIFGIFHCBDA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

4.2705 3.5072
4.6280 3.4918
4.6735 3.4750
4.8945 3.4592
5.1805 3.4542
5.2650 3.4516
5.3755 3.4508
5.4015 3.4484
5.4145 3.4460
5.4600 3.4316
5.7330 3.4268
5.9605 3.4242
6.0190 3.4204
6.2140 3.4200
6.2920 3.4152
6.3635 3.4046
7.7610 3.3994
8.8855 3.3886

Set_Alg =

4.2000 4.0000

Sequence =

FBBDIJAAJHDHFIGGCCEE
JBBDDJAAIHFHFIGGCCEE
IBBDDJJAAHFHFIGGCCEE
IBBEEJAAJHDHFIGFCCGD
IHFEEJJAABDHFIGGCCBD
IBGEEJJAABDHFIHFCCGD
IBGEEJJAABDHFIGFCCHD
IHFEEJJAABDHFIGCGCBD
IBDHFJJAABDHFIGECCGE
IBDHFJJAABDHFIGEGCCE
JBDHFJAAIBDHFIEGCCGE
IGFHEJJAABDHFIEGCCBD
IBFHEJJAABDHFIEGCCGD
IEEHDJJAABCHFIGFGCBD
IEEHCJJAABDHFIGFGCBD
IEEHFGJAABDHFIBCGCJD
JEDHFGJAABDHFIBCGCIE
IAEHCJEJABDHFIGFGCBD

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

3.2695 3.4890
3.4190 3.4782
3.4515 3.4670
3.6270 3.4564
3.7700 3.4376
3.7765 3.4246
4.0755 3.4158
4.2705 3.4096
4.4070 3.3994
4.6735 3.3896
4.7515 3.3840
5.1285 3.3798
5.1870 3.3794
5.3885 3.3766
5.5965 3.3756
5.7980 3.3626
5.9930 3.3616
7.0720 3.3602

Set_Alg =

4.2000 6.0000

Sequence =

JAAIBBIJHDHFFGCCGEED
JAAIBBDIHJHFFGCCGEED
JAAIBBDJHFGIHFCCGEED
JAAIBBIJHDFHFGCCGEED
JAAIBBIFHDJHFGCCGEED
JAAIBBDIHFHFJGCCGEED
JAAIBBDIHFGFJGCCHEED
IBIHAJJABDHFFGCCGEED
IBIBDJJAHDFHFGCCGEEA
IBIDBDJAHFJHFGCCGEEA
JAABIBDIHFHFJGCCGEED
IBAJBDIDHFJHFGCCGEEA
JAABIBIDHFHDJFGCCGEE
JAABIBDIHFGEJFGCCHED
JAABJBDDHFHFIGCCGEEI
JAABIBIDJEHFHFGCCGED
IBICCGJABDHFGJAFHEED
JAABIBDDJEGFHFGCCHEI
IDHEABDIBCGCHFJAJFGE
IEGEABDIBCGCHFJFJAHD
IEHEABDIBCGCHFGFJAJD
IEHEABDIBCGFHFGCJAJD
IJEIABCABDHFHFGEGCJD
JEHCABDIJEGCHFIFGABD
IJEIABDABDHFHFGCCGJE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+003 *

2.8145	3.4834
2.8665	3.4800
3.0810	3.4772
3.1980	3.4712
3.2760	3.4582
3.3800	3.4516
3.5425	3.4506
3.6205	3.4502
3.8025	3.4250
4.0625	3.4240
4.0950	3.4208
4.1795	3.4176
4.4525	3.4112
4.4590	3.4100
4.7190	3.4022
4.9595	3.3990
5.2130	3.3966
5.5315	3.3914
5.8305	3.3868
6.0580	3.3802

6.1360 3.3714
6.2660 3.3668
7.3385 3.3668
7.5595 3.3648
7.5790 3.3574

Set_Alg =

5.1000 1.0000

Sequence =

AABHGCBKDCGHHDEIBHDAIDHGGBBAHFCDCEDDELACCEADFGAAAIEEEECBBAHFFOHHFGGNGJBBFFCABBFBBBBGCCDIFFEAHADAEMGA
AAAGBGCBGFBAICCDHBDEFFBBDGHHCBBEDCEIOHAAAMBHEFCICCADDHEGCEEFEAGFFFHBABNBKGDBEDGIHDDGAFAAHHEFALCBAJGB
BBFGGBLBAGBBDABDDDAFEFEDDBHAHFJCHEGIADHCEEDKDCGHACEAAMEEFBBBAAIABGBADBBGFCOHHGCGNICCACIHHFAGCAFFFEEH
AHDHEACCBKFBAHADGEICFAACAAAHHBBFCGJACIIGGGBMBBHHDGBEBFFEGNDDCCGBFFDHIBFHEFEAADBBGCLHDDADEEABAGBEFECO
ADIEAFBACFCEBADBABGFFCEJOBMBBIHNCLCKBGFFHHEAABFGHCDGDDDBHEABEEBHBAAFGDIBCGGDGGBAAICHHECHHAEDDFEGAFCA
AABNGFEAFBGDDHFOGCHFCCCHFEAFHGDBKIBAHBLFBAHFCHBBIECACBEEDDAAGDAAGBBDBAHEACFCAGDHEMEEBCGGDFBGABHEDIJI
CHFGDDCGKDAFFHALAHFFGCGDBADHEEDHFEBACIBCGCGGICCAGBCFABBBEAEAFABEBHECGDFEIHNEAMHAABAFGHBBDBDDJOEBABIH
AAHEAEEFHCAFBDJBDGLAHEFBBEDBHDMGBBCGBEGCIADOBABADCBAFFEGBAAAFIDFGFCDDECEDIBKGCCHGHBANBAFGFAHCHIHHCEG
AFBHGGFHFECIDHDDAHEABDOGCAEGMCBAFCGEJHIEDHGDEDHEFBNBAIBABBAABGFHCABADAHDCFHGGKEFCLFGACBBBIECFBBDCAAE
LDBKHBIDGECHBBMEABHCGIGABDDHAEDIGABGFFAAHADBHACBAEBABEAOFCFHECGCEAFEFCEJBGABBAFEDBDFDHANCHCFDGGHICGF
GMBDBDJEGABALAHIEEAHIAFFEFHDDABHDBHHCGFKBBADECEDEHGCEAFCHCEAFFGBCAHAFBOCGBAHFBDBIGCGBGCABCNGAEBFIDDA
EEFBBCBLCKDGIOBHFACDMIBAGECAFBAGHCABAAEDACIFDBEAHGDBABDAHDBACFFHHFEGBGCCGEHNHAGGEHDJCGBEIEFFDHDBFABA
AGFBEABDEAHFHCABIFCIEGCODABBFBEDFAIEGCAGHBAHBGCHCHNGEEFBLBABAAHCDAGBICEFBEDHDAFHGGBGHAFDJCBMACEDDFKD

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

2.7541 3.3108
2.9159 3.3029
2.9718 3.3020
2.9796 3.3013
3.0011 3.2894
3.1434 3.2893
3.1603 3.2892
3.2403 3.2887
3.2682 3.2811
3.4567 3.2810
3.4671 3.2762
3.6842 3.2762
3.7349 3.2739

Set_Alg =

5.1000 2.0000

Sequence =

OJCCCCCCCCCMKCCGGGGGGEEDDDNEEEEHEAFEHFGDIDFIHFBAAHDDFHFBAAAAAALHDHFBAAABBABBHBBAEFGBBHDIBBHFGFEDIABBG
OCCCKCCCCJGCGGMGCGNEEEEECGGAAAAFEIHHFLHHFEAAAFEAFFEDDFEAHFBAAABBABBABDFHDHFGDBBHIIBBBBDHDHDGDDIBABBG
OJCECECGECGNDEGCGHFFHDDEABABGCHFBAEDCABFLHDDEAAABGCHFBAECAHDGABIHFMBGDIBABFBAECAHDGABIHFHBKGDIBABFEF
OKCCCCJCCCGCGGMGCGNEEEEECGGEEEGIIFFFHHDDFEDIBBFFHDHFHFBAAAAAALHDHFBAAABBABBHFBAAABBABDHDEDHDGDIBABBG
OJCKCCGMGGCGNFHFGCHFBCEALHDFEAHFBAAABBAEDHDEDFBABAHDFIHDFIBGCHFBACEEAHDDFEEBAECAHDGABIECGGDABBBIBABG
OKCCCJCCCCGCGGMGCGNEEEECGGEFEAFFEHFGBHDIIBBHDIBBABFFHDHFHFBAAAAAALHDDFEAHFBAAABBABBAEEDHDHDGDDIBABBG
OJGCGCGNGCGMGCCBLBGCBFIHDFIBABAHDFBGCHFBACEAHDDFEBAECAHDGABIHFHBACEEAHDDFEAHFBAAABBAEDHDEEKGDIBABFEF
OKCCCCCJGGCGGMGCGNFFDHFFIHDBBHDHFEEEEEAAABAHDFIHDFIBGCHFBACEALHDDFEAHFBAAABBAEDAHEECGGDBABBABDIBABBG
OCCCKCCCCJGCGGMGCGNEEEECGGEFEAFFEHFGBHDIIBBHDIBBABFFHDHFHFBAAAAAALHDDFEAHFBAAABBABBAEDHDEDHDGDIBABBG
OJCCCCCCCCCMKCCGGGGGGEEDDDNEEEEHEAFEHFGDIDFIHFBAAHDDFHFBAAAAAALHDHFBAAABBABBHBBAEFGBBHDIBBHFGDIBABGEF
OCKCCCCJGGCGGMGHDFCGNEBABFFHDHFBFIHDEAABAABAHDFIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBABBG
OJCGCGNEGCGMEGCECLDBFIHDBABAHDFIBGCEAAABGCABAHDFHDFBABAHDFBGCHFBAECEEAHDDFEBAECAHDGABIHFHBKGDIBABFEF
OJGNGCGMGCCLGCEABGCABADBABAHDFBGCHFBAECEEAHDDFBABAHDFIHDFIBGCHFBACEEAHDDFEEBAECAHDGABIHFHBKGDIBABFEF
OCKCCCCJGGCGGMGCGNFFHFFHDHDHFEEEEEAABAHDFIHDFIBGCHFBACEALHDDFEAHFBAAABBAEDAABBHDEECGGDIBABBABDIBABBG
OCKCCCCJGGCGGMGCGNEDFIHFEABAHDFIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBABBABDFHDHFHFBAAAEDHDEECGGDIBABBABBG
OJGNGCGMGCCLGCEABGCABADBABAHDFBGCHFBAECEEAHDDFBABAHDFIHDFIBGCHFBACEEAHDDFEEBAECAHDFFIHFBAHEGDIBABKBG
OJNCKCCCCGGCGGMGCGFFHFEFIHDBBHDHFEEEEAAAHDFHDFIGCHFBACEALHDDFEAHFBAAABBAEDAABBHDEECGGDIBABBABDIBABBG
OJMCCGGBABGCGNFFFIBABAHDFIBGCHFBACEALHDDCEAABGCHFHFBBAEEDHDDFEAHFBHDIEECGGAHFBAAABBAEDHDEECGDIBABKCG
COBKCCCCJCGCGGMGCGNEEEEECGGEEFFEFGDIIHDIBFFHDHFHFBAAABAHALHDDFEAHFBAAABBABBHFBAAACBBADHDEDHDGDIBABBG
OJCKCGCGMGCGNFHFGCHFBCEALHDFEAHFBAAABBAEDHDEDFBABAHDFIHDFIBGCHFBACEEAHDDFEEBAECAHDGABIECGGDABBBIBABG
OCCKCCCCJCGCGGMGCGNEEEEECGGEEFFEFGDIIHDIBFFHDHFHFBAAABAHALHDDFEAHFBAAABBABBHFBAAABBAEBDHDHDGDDIBABBG
OCKCCCCJGGCGGMGCGNEDFIHDEABAHDFIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBABBABFFHDHFHFBAAAEDHDEECGGDIBABBABBG
OHCCKCCCCJGCGGMGCGNEEEECGGEFEAFFEHFGBHDIIBBHDIBBABFFHDHFHFBAAAAAALHDDFEAHFBAAABBABBAEDDHDECGDDIBABBG
OCKCCCCJGGCGGMGFCGNEBABFFHDHFBFIHDEAABAHDABAHDFIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBABBG
OCKCCCCJGGCGGMGCGNFFFHDFIHDFIHDFIBGCHFBAECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGEAHFBAAABBABBAEDHDEHDIBABBABBG
OKCCCCCJGGCGGMGCGNFFHFFHDHDHFEEEEEAABAHDFIHDFIBGCHFBACEALHDDFEAHFBAAABBAEDAABBHDEECGGDIBABBABDIBABBG
AJGCGCGNGCGMGCCBLBGCBFIHDFIBABAHDFBGCHFBACEOHDDFEBAECAHDGABIHFHBACEEAHDDFEAHFBAAABBAEDHDEEKGDIBABFEF
OJCECECGECGNDEGCGMFFHDDEABABGCHFBAEDCABFLHDDEAAABGCHFBAECAHDGABIHFHBGDIBABFBAECAHDGABIHFHBKGDIBABFEF
OCCCKCCCCJGCGGMGCGNEEEEECGGEFEAFFEHFGDHIIBBHDIBBABFFHDHFHFBAAAAAALHDDFEAHFBAAABBABBAEBDHDHDGDDIBABBG
OCCKCCCCJCGCGGMGCGNEEEEECGGEEEGIIFFFHHDDFEDIBBFFHDHFHFBAAAAAALHDHFBAAABBABBHFBAAABBAEBDHDHDGDDIBABBG
OJMCCGGBABGCGNFFFIBABAHDFIBGCHFBACEALHDDCEAABGCHFHFBBAEEDHDDFEAHFCHDIEECGGAHFBAAABBAEDHDEECGDIBABKBG
OJCKCGCGCCCGGMGCGNFHHFFHDEABAABAHDBFIHDFIHDEDFBABAFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBABBG
OCKCCCCJGGCGGMGCGNFHHFFHDEABAABAHDBFIHDFIHDEDFBABAFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBABBG
OCKCCCCJGGCGGMGCGNEABFFHDHFBFHDEAABAABAHDBFIHDFIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBABBG
COBKCCCCJCGCGGMGCGNEEEEECGGEEFFEFGDIIHDIBFFHDHFHFBAAABAHALHDDFEAHFBAAABBABBHFBAAABBAEBDHDHDGDDIBACBG
JOCCKCGGCGMGCGNBABFHDFHDFIBGCHFBACEAHDDFEAHFBAAIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBAGBB
JOCKCGCGMGCGNFHFGCHFBCEALHDFEAHFBAAABBAEDHDEDFBABAHDFIHDFIBGCHFBACEEAHDDFEEBAECAHDGABIECGGDIBABBAGBB
OCKCCCCJGGCGGMGCGNFFFFIHHDHFEEEABBAEDHDEABAHDFIHDFIBGCHFBACEALHDDFEAHFBAAABBAEDAABBHDEECGGDIBABBABBG
JCCOCCKCGGGCGMGCGNEABFFHDHFBFHDEAABAABAHDBFIHDFIHDFIBGCHFBAEECEEALHDDFEAHFBAAABBAEDHDEECGGDIBABBAGBB
OCCCKCCCCJGCGGMGCGNEEEEECGGEFEFFEFGDHIIBAHDIBBFFHDHFHFBAAAAAALHDDFEAHFBAAABABBHBABBAEBDHDHDGDDIBABBG
OJNCKCCCCGGCGGMGCGFFHFFHDHDHFEEEEEAABAHDFIHDFIBGCHFBACEALHDDFEAHFBAAABBAEDAABBHDEECGGDIBABBABDIBABBG

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

1.8688 3.3169
1.8772 3.3118
1.9338 3.3034
1.9871 3.2992

1.9884 3.2973
2.0299 3.2922
2.0631 3.2917
2.0722 3.2887
2.1041 3.2877
2.1060 3.2871
2.1164 3.2840
2.1808 3.2830
2.1866 3.2821
2.2639 3.2813
2.2796 3.2805
2.2809 3.2778
2.3010 3.2739
2.3056 3.2735
2.3173 3.2733
2.3491 3.2721
2.3549 3.2679
2.4037 3.2668
2.5096 3.2666
2.5187 3.2657
2.5337 3.2650
2.5558 3.2638
2.5656 3.2636
2.5740 3.2623
2.5824 3.2617
2.5916 3.2598
2.6195 3.2592
2.7592 3.2582
2.7703 3.2578
2.8093 3.2559
2.9126 3.2539
2.9413 3.2529
2.9458 3.2487
3.0264 3.2476
3.1044 3.2462
3.3117 3.2460
3.3553 3.2460

Set_Alg =

5.1000 3.0000

Sequence =

EEDHCHGAHAFGHFAKEEEDGGBBDHHEFEICCBFBGDDDGAFAGGGEIIDCBBAACHBOFJCAFAAAABACBDFBBBHIHELGFBBBFCCCNAADDMHE
AABBDGFCAAHCHHHDGCBGBAEFCBAFBFCEIHGGEAHEEFEHFELBDAIACCCCGDEFHFCAEBBGMAEBHDDGBBIGBBAODNHABGFDDIDFKJAA
BBADDGCHFIEDDHFBAHDICDCBAADAHHFEEBAHBAFFFFEAABCECGGFCEDDBFBIEEBBIGMHNHAACAAAABGGDGFGGHECJKGLBHBOCCEB
HAEDBIBGFCAFFGCHMGAJBHBBBIHGDHCEEFFDDEAHFFBBCCGBAGHACCIGGCFACAAEEBGGLBBHAIDDHEABAEEOBNFEDADKFCAADBHD
IIGGHMFEEFEEEHAFLCEHHNBIDDKCIBBBDEAHDBCEDDFABHAECGBGCHDFGAFFBBGBACFCGBACGBBAABAADOHAFDEABHAJHDGFCACG
ECBIFCAEBDFFCBDGHACABADEFIBHCGEGFCAADGOHGGKBABDBHDHDIBAABNHJDHFECLIABAFEABBEGHDDFFCGGBEEAMCGBHAACHEF
DHAAHIBCHGDGAAABAGABBAFGABGNEJICGBBCGEDDLOBABCECFFEDBAHHEKHFBCFIFCIBAFHHDFCGDDEEDBGGMHABAECEAEBFFHDC

DGFGGEAEEDICCLHDABFGIFHIGODBGEFGHDFCEBAFBABFAACBBAJBNBHHBKEAMCEHEAHDFCAEBACBFIFHCCAADBDCAHDHEDGBABGG
AMBDAHGCGHGBEDDBFEIGEEFNGHIBABHAIBFODHGFFBGCEBAAAABALABIEBHFAAHGCCACECGEJEDBDFBHFCKHFCABBDHFGCDCDAED
DABGEIHBBEDFGDDHEAHCFIBGFAAEJDIDFEFGDACADIDGCGBAOBAMEDHFBGBFAECGAABHBGEBFHBFHAHCCGCCEAHBAFBACCBNKLHE
DLAHCAEHHCFHEEFDAAFHFGEECADFHDGEDHBMEDBKCOBHBBIDGAHDIBEBIBBENDHCACABGABBCGJBIGFFBFAFGCFAEAACCBAGGADG
NFGBFABBOBEDBDBABGCGCKEHDFMAHFBHDGEAEIFFGEACHGABBBAHHFLBAADCCEGCDACHDIBCAAHCHBIDAFEAEFEAEHJBDDGIGGFC
AFBIDDABBDMDCGFEDFGBCAFBBAGHBAABEAGEDBAAGAEDCLBCAHCHACBHFGEEENEDIHHOFCJHKGFCGIDEEBFGFBABFDHAHCIBGCAH
CCHFBBGDCIHHFHJBHOBFADCCGCCFGCBIDENMGEFBADHFEAEBAHEDGBBAABLGEABABIFADGBFEACBFEKEGADBAHFGHDHDCIAEAADG
IFICGHABDECHACCAFCICLBFIACMHDAGEDGBHGDEFBAHBGECHAEDAAFFOBAFBABEFNHABKBAAEHDBAHDHGCEBDFBEDDJCGGGBFGEB
FGFEDHAHCEAHBADFCGIEFBHCOAEBDCEAHDBADHAABFABGEADHCGDAABMBABAKAEIEDGCLBGEFCGBGFCNBJGHFEBHBICGDICFDFBH
AEDHABCBIGFABDFGHEAHDFAFBBIHBIGAFBACABFAEECGBCBADEGMEFHCADBAGACEABHFHCGDHEFGDKBGBDFBCIHCALDOCGNDEJHE

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

2.7807 3.3274
2.8093 3.3031
2.8594 3.2953
2.9894 3.2940
2.9978 3.2900
3.1298 3.2869
3.1570 3.2860
3.2195 3.2851
3.2552 3.2850
3.2591 3.2845
3.2734 3.2829
3.2793 3.2816
3.3026 3.2803
3.3091 3.2784
3.4366 3.2754
3.5360 3.2751
3.5444 3.2695

Set_Alg =

5.1000 4.0000

Sequence =

ALBAAJHFEAAHEEEABNEAAAAHFEFFIDHDHFGCCOBKCGEDDHEDHAAHDIBIBAHFMEDDIBBBABGCGGCGEFFFFCCCCGCGBABBDGGBDHBB
ABGCGGGNFCCIIBGGEEEDHFJAAABIBMEDDHFEEFEFHHAHDDHFFFCBBABDIHDHOBKCCAABBAALBBAAFFECCCGCGGGDHDBAAHDBABEE
ALBAADOHFCCEEDFBIBAAABMEEAHFEECGGGGGCAAEABIBGFBAHFGGBBIBAABDFCCCCCGEDJHDHDDIHDHFBBAHFFBDHFGNEEDHBKCA
IHFEEAHDIBAAAFFBIBAABAHFBALBABGCCGECCCCGGCCBBMEEECCKBIBGGEFEDDHDDHAAHDHDBABBGGEDHFFFEABAAHDJHFGNFGDO
AGCCCGGCGEFFBABBANDFFEEEDHDMBBIBBAHDDDDBGCHFGFFGGCOBIGBLBAAAAABAHFEEFEEFCKCGCCAAHDHHDJHDHEABIBABIHEA
AAHFFEECGGCCAHCEDHFBBBAABNCGCGBAAMAFBAAAABABIBIBAHFEDIBKEEDDHDHDJHFEALBBDIGCOFFFEFGGCGECCGGDBBHHDHDE
ALBAEEDGABMCCEEDHDHEEEFBNEEDDHFBJBAGGCKEDGFHDOBACGCABBAFBAAFCGGCCCGBAAHFFFBIBBABIHDDHFFCGGBIHDIHHAAA
AABIBAAABAJBKCAAHDHDHFFGNEEFGCCGBODFFFBACLBAHEDHDHFGGFBIHDGEDDHHDHEEBIBDBAMCCCGGEEEAAEFFBIBACCGCGBBA
LBAIGFFEABABABKCGFBIBAAAHFBDGCGCCHHDGEGCCGEEEDHDDBBDHFIBABAJHFFGBAHEFFCCGNHDDHDOBIBMCGDHEEEFECAAABAA
AHDDHFFFGEEEAMBKBBBIBABBAAAJBIBIBAAAHDDCCCECEAAHCGGNEDHFHFEHDHDGCCGGCOBAHDHDGECCGFLBABABIBDFFEAFGGFE
ABALBAEEFCGBIBBMBIHFGECGGCHBABBABAHFFFEEDOHDDJHFGNEGGECCCAHDDHFGCCGCKBIHDDHFBAAAAEDHDDGEAAABIBAFFECB

BAMEEAAFEDDHFBIBGCGGCGCGGAAABGBKCGBIBAHFFFBIHFBAHDBALBAHFEEEDHFEDJHHDIBAAGGCAHDDHFCOBABACCCCEEDBNEDF
AABIBIHFGNEDBAABAEFGBIBBGEDGCAAAHFECGCCGFFBBAHFCGCGGFJHDHFMEDDOHDHDHDDGCKBAALBIHFEEEDBAEECCCABBABAHF
ABIBABIHFGEEDDHDGCABMEFBABBAJHEEFFFBABAHHFEDIBNHHHFECCCGGGCABGDDDHDDOBAAFGCGFFEEABAAHCCLBAAEDIBKGCGC
AAHDHDHEDIBALBIBACCKBABAHFEDEFCGGNHDDHEEEFFJHDGCGEEEFBABAAABAFFGCCGCGCIBABMBAGGCGCAABBBIBDHFFFOHDHDE
ABABIBIBABHDOHFFCCKGCGBLBAAFEAHHFFJHDDDDHDFGCECCGGNEDMEEEEFIHFFGGGCCGEEDHDHFEABAHDBIBABABABAABGBAACC
ABAHEEDBIBAABABABAFGCCCCGFBAMEAJHFFBAFFFGCGCGEDBLBIHDHDIHDGCEDHFGGCCCKEEEDOBIBABAABAHFGEHEDGDHDNBHFBAA
LGCEFBAHFEFCCAAAHDHDHFGCGGCGFEEDDHDBAAEDHFFBBABMEEEDBAAAHDHFCCGNEDOBIBABABIBABKGBIGCBAAHDIHCGEFJFCGB
AJHFGCGCEDDHFBAAAHDFHFFBAABAAALBMEGCGCEEDBGGGBIBIHFBKBDHDHDHEEDHAABABIBACECGCIBAFFEFFECOBABNDHEDGCGC
OBAHFCGBAHCGEJBAFFGCCCGHDHEDDFHDHDDHFEDBABBABIBIBAABAAHFFGCCGCGCIBIHABKEDGAMEAABNEEEFEDGCGEDBLHFFBAA
ABAHFBIBABDGEEEEIBAJHFGCGBABIBABMDHDGCCGCCGCOBABAHFGCCKEEDBABAHHFFGEEDHFCLBAAHDDHFGDDHFEDIBAEFFGCAAN
AAHEDGCCGDIBIBMEFBKGEDHFGAAHFBABNECGGFFEDIBOBALBABAADHDHFEFCGCCGCGGCABAHBIBAHFEDHFCJHDDBABABDHAFEECE
DHFGGCGFBAHDHCABABKBABIBIBIBAHDDNCGGCGCCEEABAAABABABAABIDFBLEEEDHFCCGCHFEFEDOHDHFFEAJHFFCAMGBDHDGEEG
AHFGCDHFEDGCAFGGEDHDHFBAHEDBDHFGCGFEEAABABABKCGEDHDHAFEFIIBIBIBMCAJHCGEABBALBABABNDHDFBABGCOCEFECAGC
AABABAABDDHCGEEDBAEFEFEFECCGGCGCKBIHHDHFGBIBACGCABABABMEALHEDDBIHDDBIBABABAFFGCEDHFHFFGEFGCODGCHJHNA
AHDDGBAECGFMGCCGGEDHDIFFEDGEDHFGCCKBABABABABAABAHCIBNHCAAFBABIBBIJHFGCODHFEDGEECGFEHDHDHFBAABABLECEF
ALBGCGJBIBIHDDHFECCGABAEFCHFBABAHFEDHDFGGNEFEGCABGEDHFBMEABAADOCAHDHFEDHCBAABAHCGCCGEDIBKBIBABAFGFED

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

1.8519	3.2867
1.9442	3.2859
1.9598	3.2772
1.9753	3.2753
2.0599	3.2731
2.0839	3.2731
2.0884	3.2706
2.1340	3.2692
2.1424	3.2690
2.1645	3.2672
2.1671	3.2671
2.1736	3.2643
2.2106	3.2630
2.2139	3.2601
2.2360	3.2597
2.2581	3.2595
2.2731	3.2593
2.3309	3.2568
2.3874	3.2564
2.3979	3.2560
2.4160	3.2509
2.4908	3.2498
2.4947	3.2489
2.6390	3.2489
2.6585	3.2463
2.7254	3.2441
2.7540	3.2414

Set_Alg =

5.1000 6.0000

Sequence =

FIBBBBBHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAIJEDIBBDBBNHFGCGEAAAABACCGCCABIGCHDHCKGFOAAAHDHFFEEEDHD
FIBBBAAHDGEDFFGEEAFEDGGGCGALBBBMBAEDHFCAHFHAAIJEDIBBDOBNHFGCGEAAAABACCCCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABBBHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBAAAHDHFFEEEDED
FIBBBBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAIJHDIBBDOBNHFGCGEAAAABACCGCCABIGCHDHCKGFBBAAHDHFFEEEDED
FIBBBAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAIJEDIBBDOBNHFGCGEAAAABACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABBBHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBAAAHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBAAHDHFFEEEDED
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAABHDGEDFFGGEAFEFGGGCEALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBBBABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAABHDGEDFFGGEAFEFGGGCEALBBBABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDED
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAABHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBAAHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBAMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEAAIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBBAABAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGGEAFEFGGGCEALBAAABAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBAAABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAAHDHFFEEEDED
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAAHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBAABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBAAMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBAAMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBBBABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGGEAFEFGGGCEALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCCCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDED
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABABAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAMHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGCEAFEFGGGCEALBABMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBAHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABABAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGCEAFEFGGGCEALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBBMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEDGGGCGBLBBAMBAEDHFCAHFBAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCCCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABABAEDHFCAHFBAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAMHDHFFEEEDED
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEDGGGCGBLBAAMBAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCCCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABBAHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABABAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAMHDHFFEEEDHD
FIBABBAHDGEDFFGCEAFEFGGGCEALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBBAMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABMBAEDHFCAHDHAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDED
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCCBLBABMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABAAHDGEDFFGEEAFEFGGGCGBLBABMBAEDHFCAHDBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCCCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEENFEFGGGCCALBABMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBAHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABMBAEDHFCAHFBAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDED
FIBABABHDGEDFFGEENFEFGGGCCALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBAHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD

FIBABABHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABMBAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEFGGGCEALBABMBAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABABAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEFGGGCEALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEFGGGCCALBABABAEDHFCAHDHACAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABMBAEDHFCAHFBAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDED
FIBABABHDGEDFFGCENFEFGGGCEALBABABAEDHFCAHDHAAAJEDIBBDOBAHFGCGEABIBBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABMBAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABABAEDHFCAHFBAAAJHDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDED
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABABAEDHFCAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGEEAFEDGGGCCALBABABAEDHFCAHFBACAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEFGGGCEALBABABAEDHFCAHDHACAJEDIBBDOBNHFGCGEABIBBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABMBAEDHECAHFBAAAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBACCGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEFEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABMBAEDHFCAHFBACAJHDIBBDOBNHFGCGEABIHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDED
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABMBAEDHFCAHFBACAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABAHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABABAEDHFCAHFBACAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEEEDHD
FIBABABHDGEDFFGCEAFEDGGGCEALBABABAEDHECAHFBACAJEDIBBDOBNHFGCGEABIHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEFEDHD
FIBABABHDGEDFFGCENFEFGGGCEALBABABAEDHECAHDBACAJHDIBBDOBAHFGCGEABIHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEFEDED
FIBABABHDGEDFFGCENFEFGGGCEALBABABAEDHECAHDBACIJEDIBBDOBAHFGCGEABAHBAACGCCABIGCHDHCKGFBABMHDHFFEFEDHD

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

1.9077 3.2961
1.9357 3.2881
1.9396 3.2867
1.9448 3.2859
1.9539 3.2850
1.9741 3.2840
1.9747 3.2828
1.9838 3.2818
1.9909 3.2817
1.9955 3.2808
2.0026 3.2807
2.0091 3.2801
2.0182 3.2791
2.0299 3.2781
2.0462 3.2769
2.0572 3.2766
2.0579 3.2759
2.0651 3.2758
2.0670 3.2749
2.0806 3.2742
2.0897 3.2732
2.1014 3.2722
2.1196 3.2717
2.1287 3.2707
2.1404 3.2700
2.1606 3.2691
2.1677 3.2690
2.1742 3.2683

2.1834 3.2673
2.1951 3.2663
2.2249 3.2651
2.2341 3.2641
2.2607 3.2638
2.2626 3.2633
2.2724 3.2629
2.2886 3.2627
2.2926 3.2621
2.2977 3.2617
2.3016 3.2611
2.3114 3.2607
2.3264 3.2605
2.3316 3.2605
2.3354 3.2595
2.3471 3.2585
2.3751 3.2584
2.3861 3.2578
2.3939 3.2574
2.3979 3.2569
2.4031 3.2565
2.4128 3.2560
2.4147 3.2555
2.4245 3.2550
2.4583 3.2546
2.4713 3.2540
2.4752 3.2537
2.4804 3.2530
2.4830 3.2530
2.4921 3.2520
2.5259 3.2516
2.5356 3.2511
2.5506 3.2508
2.5824 3.2500
2.5916 3.2491
2.6032 3.2481
2.6734 3.2459
2.7378 3.2457
2.7723 3.2447

Set_Alg =

5.2000 1.0000

Sequence =

JAICKGAMBILDCKDHNFHHMMJOEAHGGCMFEKAMBGHGGIJFBNCLABOANDODDIILLKEDGAFOODCLJHEKCEIHEEJJBOBLKFNFBNFNMICJ
EFILAFNJJBDMIBLMDDJDOGIHHCKGGFNGBNMCCOAMONDCEOEJEALCBMGHEEKGCILHFNHFBOHDBKDFFIOLEJANAIIBMKLJJACKHGAK
EAJCJJHODFIJHNMDNELLGEGGKDACHKJAMEMBNCHAELAEIDIBKCGHFKNLMGAAJEOHBIHCGOOMCBIIFGDOBDKJFFCOIFBKNDMBNLLF
BOABIJEDAHKBHDAAILBGLGCICGDMJHDGFECKOIKBNLMLJJAHIHCDABIDEKBMEJJCKFJFCIMLAOFHNNCGGEFNMNMLGNFEOHEODOFK
GJAFNBKOOEFGHALDJBGMAFOBECIMEFJJBCIIGCHINIEHALBKCKDNNFHKIJAAMGBLCGNDEMEDHJNOLFGKALFDOEDJMMOBHKCIDHCL

OAEGAALHLFFFMBOOMNKAFCGECKBCNEADAFJLAMJIHNCGBDGIHGDHIDLFGFDCJEKNELEOJENBIGMJDKCKCLBIHMJBIHONOHIBKJDM
AGJFKAIBKANLBOEFGIHLCKHCGFCGIHKECEKJHJIJDMJLDDAOINNDGBCFOOEFDNCIOMFBONMGAJGBKADMFHLEAEHBMCLBLDIJNHME
MMGEOCJEIJAEAOCLDKFBNNNGHJHFGNKJOJBLBHJECCLNCHFGIHLDABKBIFAOBIMFGKIDEANLCIBLGFAHFHICOMAKDMDGDMOJEEDK

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

2.7534 2.8305
2.7677 2.8233
2.8373 2.8201
2.9822 2.8155
3.0193 2.8145
3.1492 2.8134
3.3936 2.8131
3.4320 2.8116

Set_Alg =

5.2000 2.0000

Sequence =

BKGFKGNFFFBKGGNEMKGNEFBMMHJAJAHFOALBDODOHAMDJHDMKGNEHENEDJJHEDJJMKGNECCCCIIIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
BBNFKGFKGFFFBMKGGNECIMKGNEFOALBOOHAMMHDAHDDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
IBNFGNEFFEKGNEFMKGNECIHDJJMKGNEAHFOALBDODOHAMDJJJMHDMKCGGNEHDJJMKAFOALHECGILCIBDAHFOALCIIBICLBOBLCKB
BBNFKGFKGFFFBMKGGNECIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
KGFGDFNFKGNECIMKGNEFFBMGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHEDJJHEDJJMKGNECFIIICOAHCOALCIIBALLBLBOBLCKB
IGGFFFGNEFBKNENEFBJHDMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGMKNEDMKCGNECIAOALJHJECGILCIDJHFOALCIIBICLBOBLCKB
IBNFGNHFBKKGMGGNEFFEFEHDJJMKGNEAHFOALBDODOHAMDJAJMHDMKNEDMKCGNECIAOALJHJECGILCIDJHFOALCIIBICLBOBLCKB
KGFFBKGGNCKGNEFBIJJFIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHFBAMDJHDMGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCKB
BKNFKGNFFFBKGGNECIMKGNEFBMMHJAJAHFOALBDODOHAMDJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGGECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
KGFIBGNFFFBKGGNECIMKGNEFBKMMHJAJAHFOALBDODOHAMDJHDMKGNECHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
KFBKGGNMKGNFBMGNEFMKGNEFBDOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJFOALECGILCIDAHFOAICOHFOALALCIIBICLBOBLCKB
IGNFBGNFFEFEKGNEFBJHDMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGMKNEDMKCGNECIAOALJHJECGILCIDJHFOALCIIBICLBOBLCKB
BKGBNFFKGFFFBMKGGNECIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
KDGFFFKGNFBNEFMKGNECIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAGBIJBJHMGCIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCKB
FKGNMKFFBKGGNCIMKGNEFBMGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJFOALECGILCIDAHFOALCIIBICLBOBLCKB
GDGFFFKGNFBNEFMKGNECIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHEDJJHEDJJMKGNECFIIICOAHCOALCIIBALLBLBOBLCKB
GFFKGFBNFKGNECIMKGNEFBMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMGNECIHEDJJHEDJJCKGNEMCIIICOAHFOALCIIBALLBLBDOLCKB
GNFFFGNEFBKGNEFBDJECIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHHDMKGMKNEDMKGNECIAOALJHJECGILCIDJHFOALCIIBICLBOBLCKB
KGFIBGNFFFBKGGNECIMKGNEFBMMHJAJAHFOALBDODOHAMDJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCKB
BKGFKGNFFFBKGGNECIMKGNEFBMMHJAJAHFOALBDODOHAMDJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCIB
NNEFKGFKGFFFBMKGGNECIMKGBNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMGNECIHEDJJHEDJJCKGNEMCIIICOAHFOALCIIBALLBLBDOLCKB
FGFBNFKGNEFFBMKGGNECIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHEDJJHEDJJMKGNECCIIICOAHFOALCIIBALLBLBDOLCKB
DIFKGFFFBKGGNCIMKGNEFBMGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBOBLCKB
KFFBKGGNCMKGNFBMGNEFIMKGNEAHFOALBODOHAMDMHDJAJJHDMKGNECIHENEDJJHEDJJFOALECGILCIDAHFOALCIIBICLBOBLCKB
BKGFKGNFFFBKGGNECIMKGNEFBIMMHJAJAHFOALBDODOHAMDJHDMGNECIHENEDJJHEDJJMKGNECCIICOHFOALALCIIBALLBDOLCKB

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

1.6666 2.8228
1.7374 2.8189
1.7719 2.8153
1.7738 2.8139
1.7771 2.8125
1.7947 2.8107
1.7966 2.8101
1.8089 2.8085
1.8642 2.8080
1.8883 2.8079
1.9026 2.8074
1.9104 2.8054
1.9168 2.8049
1.9448 2.8039
2.0026 2.8039
2.0274 2.8027
2.0624 2.8009
2.1911 2.8003
2.2159 2.7985
2.2321 2.7985
2.2626 2.7975
2.2958 2.7958
2.3406 2.7956
2.3484 2.7932
2.3731 2.7912

Set_Alg =

5.2000 3.0000

Sequence =

FGDJJIDFCNKHEKLHDCCNEFOLMHAIGAEOOHCJJJMMAABBMGEOOIDJAFGEBLDGIGKMICONNEDFKFCDNEGCNLLAAHHLMBBKBFBIHJIK
NHOJJDMHEDLFBDIBNOCCJAKGDCAMBLFCCBMKODJJBNAIGEKMKHLAOCNIIGGBOOHDGNHKACFMMAHELLIFGEFILJHEKGBNIEDAFFEJ
DCODIDIGGCEFKGBBBOIMOJMIEAAMHEAFCCJIGGCKANEHMNGMDIOHKDOLDEGJFFJBKALLLLHCHANNDCNHJJABIELBJFFFMHNOBKEK
FKIAHDJJCGEBONMDCBGMMHFCNDHOJJNFIIEDOMBIHDOAHKBEKMGLLOOFCKCFAEJALEFCMBKKGNLIHFEDBHIINLGGACBLAJADJGNE
BKCJHDMDDAEEFDGHDJFEJALJCIDAOAOGGNECKABMBGCBNNEKCFLKJEAHCONCOJIMMOHBFIHHFIBLBKINKGIEMODFILAMHLGNJGFL
JCOLEKGMMIICOALAAKDEKHDMBDBCIJMECDFNDCKKMEAGCHOLLLJHEFMGNJHJIFBOFOCHFGJBDHFGNBJAGAAILEFHIBNNEOIGDNBK
IBKIABHFODICEFIGBKKALMOCGFEBKANLHKAGNMFGBINLGDKEGDCLECAGCIMLJOONHJFJBEMOJFAHJHDFNLBJDIHANMCCDOHEMEJD
KIDICHALNHDFGNJKHOBJOHDHIEDJENEEAEMCCMIBLGJBIIDMLJFBJAOKMCALIADGENKAHMECCGOBKFCGAGNFGDKFMNLOBJHFOLFB
MIAOOFHCHEDFKDJHDDMALANDIBDBNHDLNAECFIJFOCJKECLEAHMEBLBKAKFGNCGAGOONHCHGJLMKCGMIJJGOBIIEKGIMNBLEFFBJ
IDKAOLIEDBMKHCFIEFMIHELFBLALJLOCHMGCKCKNGCNDAAKHJDEBMOJEJIHDGIIANJFENJDBOAFGGCGLBKHOHCMGNMNBAFOEDJBF
NLOCGALCJHCKKJNLBOFMAJBKODDEAFOFGGIBKHDGLMEAKBLBDHNEIMMCIOFENJCHHMHBFICKAAEIJDGNJGICIJBNOGDFHALFDEEM
OEJJBGIHDFIGFHNCBKEICKELFKBKBFLCMGMANLMOADNHGCKCMFFKDAEOMGBIAGHJJDOLDJOLEFCNHMBCAAENAHDIOGDILEJBJNHI
KDEIBGIAJJDHNAIGAOCJNLIFENAFDHOBNGNMGMCLLBMENBKJCKHCGKDLIKLECODCBGJHJFOBMHKJBIHFDFMODFEACEIOGFALHAEM

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

2.6182 2.8382
2.6475 2.8379
2.6520 2.8272
2.6923 2.8244
2.8041 2.8229
2.8087 2.8159
2.9614 2.8154
2.9880 2.8137
3.0960 2.8133
3.2494 2.8122
3.2546 2.8119
3.2897 2.8110
3.3963 2.8092

Set_Alg =

5.2000 4.0000

Sequence =

KNNEFFIGAMEDOBMECOMGMCGNCCLLALLFKGNDJJHAMCOHFKCGGEDJJEDNNHLALAIIBKHDDFGJJJHFIBMEDOBKAAIBIBIBKCOFHOHE
OBIJJHFGCOALOMMGNEEAFMHDBKDFEALBMHALFIIIIHFEDODJJHALBNHFKCKCKCOOHFINNDJJJDIGNEDMCKGCGGEEALBKALCGNBMB
MMCGCKCIBIBKEALBMGMMEAMEGNDIBIHFFKEDJJJALCOFFGCKCKEALBIHDOODONEDHFEOHDOALGNHHJALIBKBNFJJJALCGGNNHDIF
IIGCIHALALALBIJJHDOHDOFFEDJIBKEDHAMONFEDFMCKMENEALBMCKGNEJAJHFBKCKCNMGCOHFGNEDODOBKCGNLBMIIHALBGFGJJ
IMEDIBMGNHNHJJJHFIBKCGNNNEAALLCCIMEALAALALCGFFFFFGCKCKEDOHDMLBNDHDJJHJBKCKEAIHFJGGMMEDOBIDOBKBIEOOOG
KBMMCODOBKCKIDIGMEEJJJJHFFGNEALALCGOHDDOAHFFJALBIJEALGFFIBIHDHDOBKCGNNCGMEALJAIBKEDMHFCKNECGNNHOBIML
IHDOMKNEDOJALBMCKCGNEALCIBJJALLALGNHFIBIMGCOHJALJHFJHDMEDNFGFEAHDOBMGCKCGGNNEJAIHDOBIDOFFKEFEKBMIBKC
IDOBIBMBKCKALCKCGMEFFFJJJALALALNFEJHFJAIIMEDMEDOHALDOHDHJDOHFGNNNEGCIBNEALBIBKGGCODOBIHFKGMECKGMCJHN
IBMHNEALALAIBIBNHFFJHAEDMGCKCOODJHDJHOCGMEDOHFFKEDOFFGMEKBKECGNEALCIJJBKCGNMLALBINNLAIBKDGCODMHFGJJI
IJJHDIMGCKCIHALAOHFHALLBKCKGNHDODOBKBMGNEALFFFLAIBIBKEDONENNEDOMEJDOBMHFFIGNCKCGFJHAIBMGCGMEJJJEDALC
KALEALGNNHALBKCGCKEDFJIHDOJJJJALBIBIBIBIHFMEAGGDOHFMEALBIHDMECGNNOJHAMEDOBKMEONCJGFMGNCKCKCIHDDOFFFL

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

1.6198 2.8068
1.6386 2.8046
1.6400 2.7940
1.7037 2.7938
1.7394 2.7932
1.7472 2.7899
1.7719 2.7883
1.7875 2.7881
1.8252 2.7869
1.8466 2.7854

1.9071 2.7852

Set_Alg =

5.2000 6.0000

Sequence =

KKALBIMDOJHDOBKGGCONECIBMHAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMCCLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KKALBIMDOJHDOBKGGCONHCIBMEAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMCCLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KKALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBMEAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAJHFJJAMCCLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KEALAIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHDJJBMCCLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KEALAIMDOJHDOBIGGCONHCKBMEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHDJJBMCCLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KEALBIMDOJHDOBIGGCONCCKBMEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMHCLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KEALBIJDOJHDOBIGGCONECKBMHAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIMHDJJAMCCLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJAMCCLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KEALBIMDOJHDOBIGGCONCCKBMHAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEE
KKALAIJDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAMHDJJBMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KKALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KKALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBMEAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KKALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLEEDODFFGMGCLJJAAJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALAIJDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAMHDJJBMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONHCKBMEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAMHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBMEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBMEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBMHAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONECKBMHAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIMHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBMEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONHCKBMEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIMHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFKGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONHCKBKEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAMHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAAJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIMHDJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONECKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIMHDJJAMHCLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNHFFEEC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAIIHAIHDMLKEDODFFGMGCEJJAAJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCEJJAIJHDJJAMHCLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCEJJAIJHFJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAMHDMLKEDODFFGMGCEJJAIJHFJJAIHCLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNEFFELC
KEALBIJDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCEJJAIMHFJJAMHCLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNEFFELC
KEALBIJDOJHDOBIGCGONECKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCEJJAIMHDJJAMHCLJHFCOBIBNNDOBIFFMGNMGCKEALLBKGNNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCEJJAIJHAJJAMECLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAFIHAMHDMLKEDODFFGMGCEJJAIJHAJJAIHCLJHFCOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALLBKGNNEFFELC
KEALBIMDOJHDOCGGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJAMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALBKBINNHFFELC
KEALBIJDOJHDOCGGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIMHFJJAMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALBKBINNHFFELC
KEALAIMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJBMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBGNNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGGCONECKBKEAFIHAMHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJAIHCLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBGNNHFFELC

KEALBIMDOJHDOCGGGCONHCKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJAMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALBKBINNHFFELC
KEALAGMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAAIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJBMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBINNHFFELC
KEALBIMDOJHDOBIGCGONHCKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJAMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBGNNHFFELC
KEALAGMDOJHDOBIGGCONECKBKEAAIHAMHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHFJJBIHCLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBINNHFFELC
KEALBIMDOJHDOCGGCGONECKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJAMHCLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALBKBINNHFFELC
KEALAGMDOJHDOBIGGCONHCKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJBMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBINNHFFELC
KEALAGMDOJHDOBIGGCONECKBKEAFIHAMHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJBIHCLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBINNHFFELC
KEALAGMDOJHDOBIGCGONHCKBKEAFIHAIHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJBMECLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBINNHFFELC
KEALAGMDOJHDOBIGCGONECKBKEAFIHAMHDMLKEDODFFGMGCLJJAIJHAJJBIHCLJHFEOBIBNNDOBIDFMGNMGCKEALCKBINNHFFELC

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

1.6484 2.8011
1.6549 2.8011
1.6647 2.8010
1.6724 2.7996
1.6789 2.7996
1.6887 2.7985
1.6907 2.7982
1.7056 2.7981
1.7108 2.7974
1.7179 2.7970
1.7225 2.7957
1.7290 2.7957
1.7387 2.7956
1.7433 2.7950
1.7446 2.7945
1.7478 2.7938
1.7543 2.7937
1.7641 2.7937
1.7699 2.7928
1.7764 2.7928
1.7862 2.7927
1.7875 2.7927
1.7927 2.7927
1.7940 2.7927
1.7972 2.7919
1.8070 2.7912
1.8232 2.7907
1.8291 2.7902
1.8304 2.7902
1.8402 2.7902
1.8453 2.7897
1.8661 2.7893
1.8817 2.7888
1.8882 2.7883
1.9207 2.7883
1.9221 2.7883
1.9233 2.7882
1.9272 2.7873

```
    1.9597    2.7873
    1.9643    2.7872
    1.9656    2.7872
    1.9981    2.7870
    2.0026    2.7865
    2.0033    2.7862
    2.0215    2.7861
    2.0332    2.7859
    2.0481    2.7856
    2.0534    2.7853
    2.0605    2.7852
    2.0871    2.7847
    2.1008    2.7846
    2.1274    2.7841


Set_Alg =

     6     1


Sequence =

BBBAAAAAAAABBAABBAAAABBBBBABBB
BBBAABBBAAAABBBBBAABAAABBAAAAB
BAABBBAAABBAABBAAABBAAABBBBAAB
BAABAABBAABAAABBBBBBBAABAABAAB
BBAAABBAABAABABABBAABBAABBAABB
BBABAABBAABABBAABBAABBAABAABAB
BAABABABBABBBABABBAABAABAABAAB
BAABBAABAABBABABABAABABABBABAB


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+004 *

    1.0541    0.0345
    1.3176    0.0335
    1.5811    0.0330
    1.8446    0.0325
    2.1082    0.0322
    2.3717    0.0318
    2.6352    0.0316
    2.8987    0.0314


Set_Alg =

     6     2


Sequence =
```

BBBBBBAAAAAAAAAAABABBBBBBBBAAA
BBBBBBAAAABAAABBBAAAABBBAAAABB
BBAAAABBBAAABBAAABBBAAABBBAABB
BBAABBAABBBAAABAABAAAABBBAABBB
BBBBAABAABBAAABBAABAABBAABBAAB
BBBAABAABAABBBBABAABAABAABBAAB
BBABABAABAABBAABBAABAABAABBBAB
BBAABABABBABBABAABBABAABAABAAB
BABABABABAABABBAABBAABBABABAAB
BABABBABAABABABAABBABABABABAAB

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

0.7906 0.0356
1.0541 0.0341
1.3176 0.0335
1.5811 0.0330
1.8446 0.0324
2.1082 0.0321
2.3717 0.0318
2.6352 0.0316
2.8987 0.0314
3.1622 0.0311

Set_Alg =

6 3

Sequence =

BBBBBBBAAAAABAAAAAAABBAAABBBBB
BBBBBBAABBAAABAAAAABBBBAAAAABB
BAAAABBAABAAABBBBBAAABBBBBAAAB
BBBBBAABAABAAABBAABBAAABAAABBB
BBAAABBAAABBBBAABBABAABAABBAAB
BAABBBAABAABBBAABABAABAABBAABB
BABAABBAABAABBABAABBBAABAABBAB
BBABABBABBABAABAABAABBABAABAAB
BBAABABAABBABBABABABAABABABAAB
BABABABAABABABABABAABBABBABABA

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

0.7906 0.0349

```
    1.0541    0.0341
    1.3176    0.0336
    1.5811    0.0330
    1.8446    0.0326
    2.1082    0.0321
    2.3717    0.0318
    2.6352    0.0316
    2.8987    0.0313
    3.4258    0.0311


Set_Alg =

     6     4


Sequence =

BBBBBAAAABBBBBBAAAAAAAAABBBAAB
BBAAAABBAAAABBBBBBBBAAAABBAAAB
BBAABABAABBABBABABABAABAABBAAB
BBAABBBBBAAABBBBAAABAAAABBAAAB
BBBBAABAAABBBAAABAAABBAABBBAAB
BBAABBAABBAABBBBAAABAABAABBAAB
BBAABBAABBAABBAABABAABAABBBAAB
BBABBABBAABABAABBAABAABAABBAAB
BBABABABABABAABABAABABABABABAB
BBAABABABBAABABAABAABABABBABAB
BBABABABAABABAABABABABAABBABAB


SetupCost_UtilityWork =

  1.0e+004 *

    0.7906    0.0350
    1.0541    0.0341
    1.3176    0.0335
    1.5811    0.0330
    1.8446    0.0324
    2.1082    0.0321
    2.3717    0.0318
    2.6352    0.0316
    2.8987    0.0313
    3.1622    0.0311
    3.4258    0.0309


Set_Alg =

     6     6
```

Sequence =

BBAAAAAAAAABBBBBBBBBBAAAAAABB
BBAAAABAAAAABBBBBBBBBBAAAAAABB
BBBAAAABBBBBAAAAABAAABBBBBBAAAB
BBAAABBAABBAAABBBBAAABBBAAAABB
BBBBAAABBAABBAABBAAABBAABBAAAB
BBBBAABAAABBAABBAABAABAABBAABB
BBAABAABBAABBBAABAABABBAABAABB
BBAABAABBAABAABBAABBAABABABBAB
BBAABBAABABBAABBAABABABABAABAB
BBABABAABABBABABBABAABABAABAAB
BAABABABBABABABBAABABABAABABAB

SetupCost_UtilityWork =

1.0e+004 *

0.5270	0.0357
0.7906	0.0348
1.0541	0.0341
1.3176	0.0335
1.5811	0.0329
1.8446	0.0325
2.1082	0.0321
2.3717	0.0318
2.6352	0.0316
2.8987	0.0313
3.1622	0.0311

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองจากโปรแกรมสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองจากโปรแกรมสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ในภาคผนวกนี้จะแสดงผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการรันโปรแกรมของอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม คือ DPSO PSONK และ BBO โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ DPSO

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con.	Spread	Ratio.
1	1.1	1	4-25	0.0361	0.4414	0.5714
2	1.1	1	5-20	0.0326	0.7180	0.7500
3	1.1	1	10-10	0.0200	0.6813	0.7333
4	1.1	2	4-25	0.0375	0.5984	0.4000
5	1.1	2	5-20	0.0222	0.5447	0.4667
6	1.1	2	10-10	0.0183	0.6244	0.5714
7	1.2	1	4-25	0.0103	0.4520	0.7895
8	1.2	1	5-20	0.0357	0.5710	0.5556
9	1.2	1	10-10	0.0486	0.5139	0.5000
10	1.2	2	4-25	0.0400	0.7171	0.5333
11	1.2	2	5-20	0.0314	0.4098	0.4375
12	1.2	2	10-10	0.0248	0.5051	0.3750
13	2.1	1	4-25	0.0146	0.4522	0.6667
14	2.1	1	5-20	0.0118	0.5784	0.8889
15	2.1	1	10-10	0.0313	0.5283	0.5294
16	2.1	2	4-25	0.0365	0.6439	0.3684
17	2.1	2	5-20	0.0225	0.5379	0.5909
18	2.1	2	10-10	0.0245	0.5302	0.6190
19	2.2	1	4-25	0.0307	0.4785	0.4091
20	2.2	1	5-20	0.0231	0.4990	0.7059
21	2.2	1	10-10	0.0649	0.6327	0.5000
22	2.2	2	4-25	0.0324	0.6586	0.4500

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ DPSO (ต่อ)

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con.	Spread	Ratio.
23	2.2	2	5-20	0.0325	0.5037	0.4783
24	2.2	2	10-10	0.0135	0.6142	0.6667
25	3.1	1	4-25	0.0802	0.6849	0.2941
26	3.1	1	5-20	0.0320	0.5705	0.3500
27	3.1	1	10-10	0.0145	0.6320	0.7727
28	3.1	2	4-25	0.0416	0.6814	0.2000
29	3.1	2	5-20	0.0538	0.6752	0.4667
30	3.1	2	10-10	0.0154	0.6364	0.3810
31	3.2	1	4-25	0.0207	0.5208	0.3182
32	3.2	1	5-20	0.0382	0.5168	0.5500
33	3.2	1	10-10	0.0308	0.6126	0.4400
34	3.2	2	4-25	0.0343	0.4593	0.3333
35	3.2	2	5-20	0.0335	0.6723	0.5882
36	3.2	2	10-10	0.0194	0.6635	0.2500
37	4.1	1	4-25	0.0131	0.6814	0.6774
38	4.1	1	5-20	0.0416	0.4618	0.5000
39	4.1	1	10-10	0.0417	0.5341	0.0645
40	4.1	2	4-25	0.0224	0.6564	0.4242
41	4.1	2	5-20	0.0228	0.5960	0.2703
42	4.1	2	10-10	0.0173	0.5435	0.5938
43	4.2	1	4-25	0.0280	0.7834	0.2963
44	4.2	1	5-20	0.0334	0.6084	0.8095
45	4.2	1	10-10	0.0409	0.6308	0.2857
46	4.2	2	4-25	0.0152	0.6013	0.9200
47	4.2	2	5-20	0.0383	0.4622	0.4444
48	4.2	2	10-10	0.0677	0.5967	0.0000
49	5.1	1	4-25	0.0280	0.7067	0.5217

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ DPSO (ต่อ)

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con.	Spread	Ratio.
50	5.1	1	5-20	0.0364	0.6244	0.2692
51	5.1	1	10-10	0.0167	0.6246	0.5000
52	5.1	2	4-25	0.0582	0.7289	0.6000
53	5.1	2	5-20	0.0587	0.6659	0.0667
54	5.1	2	10-10	0.0396	0.6806	0.4667
55	5.2	1	4-25	0.0434	0.6045	0.2143
56	5.2	1	5-20	0.0857	0.5461	0.0000
57	5.2	1	10-10	0.0302	0.5518	0.6364
58	5.2	2	4-25	0.0295	0.6559	0.4667
59	5.2	2	5-20	0.0582	0.8010	0.3125
60	5.2	2	10-10	0.0607	0.7504	0.2222
61	Case Study	1	4-25	0.0486	0.5104	0.4000
62	Case Study	1	5-20	0.0460	0.5830	0.4444
63	Case Study	1	10-10	0.0268	0.5235	0.2000
64	Case Study	2	4-25	0.0261	0.4802	0.2222
65	Case Study	2	5-20	0.0404	0.4894	0.5000
66	Case Study	2	10-10	0.0348	0.4440	0.3750

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con	Spread	Ratio
1	1.1	1	4-25	0.0117	0.6320	0.8333
2	1.1	1	5-20	0.0620	0.5092	0.6667
3	1.1	1	10-10	0.0358	0.7683	0.3750
4	1.1	2	4-25	0.0254	0.8771	0.6000
5	1.1	2	5-20	0.0422	0.7050	0.3636
6	1.1	2	10-10	0.0266	0.6180	0.3750
7	1.2	1	4-25	0.0328	0.3952	0.6111
8	1.2	1	5-20	0.0401	0.5102	0.4118

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK (ต่อ)

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con	Spread	Ratio
9	1.2	1	10-10	0.0276	0.5472	0.5625
10	1.2	2	4-25	0.0284	0.5612	0.7857
11	1.2	2	5-20	0.1335	0.5194	0.4167
12	1.2	2	10-10	0.0171	0.6094	0.8462
13	2.1	1	4-25	0.0121	0.6492	0.9333
14	2.1	1	5-20	0.1114	0.6881	0.2727
15	2.1	1	10-10	0.0302	0.6592	0.5333
16	2.1	2	4-25	0.0266	0.4915	0.8125
17	2.1	2	5-20	0.0444	0.6762	0.6154
18	2.1	2	10-10	0.0248	0.6730	0.3182
19	2.2	1	4-25	0.0297	0.5531	0.5882
20	2.2	1	5-20	0.0327	0.5836	0.3333
21	2.2	1	10-10	0.0321	0.5755	0.3889
22	2.2	2	4-25	0.0158	0.4707	0.6190
23	2.2	2	5-20	0.0358	0.5358	0.2941
24	2.2	2	10-10	0.0211	0.5388	0.3529
25	3.1	1	4-25	0.0176	0.6084	0.4412
26	3.1	1	5-20	0.0511	0.6539	0.3333
27	3.1	1	10-10	0.0482	0.6753	0.1818
28	3.1	2	4-25	0.0057	0.5409	0.8571
29	3.1	2	5-20	0.0463	0.4585	0.4286
30	3.1	2	10-10	0.0535	0.6314	0.1579
31	3.2	1	4-25	0.0116	0.5943	0.8400
32	3.2	1	5-20	0.0241	0.5551	0.2800
33	3.2	1	10-10	0.0500	0.5263	0.0476
34	3.2	2	4-25	0.0094	0.5397	0.8000
35	3.2	2	5-20	0.0402	0.6805	0.1667

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK (ต่อ)

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con	Spread	Ratio
36	3.2	2	10-10	0.0356	0.5054	0.1429
37	4.1	1	4-25	0.0129	0.7073	0.6538
38	4.1	1	5-20	0.0205	0.5538	0.4167
39	4.1	1	10-10	0.0521	0.8045	0.1429
40	4.1	2	4-25	0.0065	0.7331	0.8462
41	4.1	2	5-20	0.0512	0.6059	0.0000
42	4.1	2	10-10	0.0291	0.5577	0.2593
43	4.2	1	4-25	0.0306	0.5725	0.5556
44	4.2	1	5-20	0.0296	0.5496	0.3636
45	4.2	1	10-10	0.0545	0.4789	0.2667
46	4.2	2	4-25	0.0166	0.6931	0.5600
47	4.2	2	5-20	0.0472	0.4265	0.3125
48	4.2	2	10-10	0.0573	0.5477	0.2273
49	5.1	1	4-25	0.0289	0.5632	0.7895
50	5.1	1	5-20	0.0140	0.5153	0.5556
51	5.1	1	10-10	0.0490	0.4941	0.1429
52	5.1	2	4-25	0.0147	0.4226	0.6000
53	5.1	2	5-20	0.0515	0.4570	0.2941
54	5.1	2	10-10	0.0420	0.6095	0.2500
55	5.2	1	4-25	0.0314	0.6402	0.8333
56	5.2	1	5-20	0.0529	0.7309	0.2941
57	5.2	1	10-10	0.0588	0.6283	0.1765
58	5.2	2	4-25	0.0464	0.4920	0.3529
59	5.2	2	5-20	0.0324	0.6197	0.5000
60	5.2	2	10-10	0.0427	0.5197	0.3750
61	Case Study	1	4-25	0.0288	0.6080	0.4000
62	Case Study	1	5-20	0.0349	0.4600	0.3333

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ PSONK (ต่อ)

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con	Spread	Ratio
63	Case Study	1	10-10	0.0478	0.5200	0.3333
64	Case Study	2	4-25	0.0088	0.5688	0.4000
65	Case Study	2	5-20	0.0871	0.4311	0.2857
66	Case Study	2	10-10	0.0672	0.4503	0.3333

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con	Spread	Ratio
1	1.1	1	Linear	0.0180	0.5519	0.8462
2	1.1	1	Sinusoidal	0.0303	0.6264	0.3500
3	1.1	2	Linear	0.0165	0.4135	0.4667
4	1.1	2	Sinusoidal	0.0290	0.4967	0.5625
5	1.2	1	Linear	0.0601	0.5041	0.2857
6	1.2	1	Sinusoidal	0.0080	0.4787	0.8235
7	1.2	2	Linear	0.0514	0.5567	0.2857
8	1.2	2	Sinusoidal	0.0096	0.5448	1.0000
9	2.1	1	Linear	0.0151	0.5050	0.8333
10	2.1	1	Sinusoidal	0.0412	0.6879	0.3333
11	2.1	2	Linear	0.0158	0.5709	0.6842
12	2.1	2	Sinusoidal	0.0467	0.6841	0.2941
13	2.2	1	Linear	0.0628	0.5587	0.1250
14	2.2	1	Sinusoidal	0.0030	0.4952	0.8462
15	2.2	2	Linear	0.0322	0.6089	0.2609
16	2.2	2	Sinusoidal	0.0151	0.5350	0.7273
17	3.1	1	Linear	0.0133	0.5916	0.6316
18	3.1	1	Sinusoidal	0.0135	0.4952	0.5152
19	3.1	2	Linear	0.0119	0.4997	0.6333
20	3.1	2	Sinusoidal	0.0291	0.7686	0.4815
21	3.2	1	Linear	0.0133	0.4421	0.4516

ตารางที่ ง.3 ผลการทดลองสำหรับการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO (ต่อ)

No.	ปัญหา	การทำซ้ำ	พารามิเตอร์	Con	Spread	Ratio
22	3.2	1	Sinusoidal	0.0134	0.6195	0.7037
23	3.2	2	Linear	0.0162	0.3951	0.6538
24	3.2	2	Sinusoidal	0.0178	0.6423	0.4412
25	4.1	1	Linear	0.0493	0.5465	0.0909
26	4.1	1	Sinusoidal	0.0123	0.5024	0.9259
27	4.1	2	Linear	0.0623	0.5372	0.0000
28	4.1	2	Sinusoidal	0.0000	0.4872	1.0000
29	4.2	1	Linear	0.0621	0.5605	0.2941
30	4.2	1	Sinusoidal	0.0129	0.6185	0.7826
31	4.2	2	Linear	0.0645	0.6729	0.1500
32	4.2	2	Sinusoidal	0.0046	0.6504	0.8621
33	5.1	1	Linear	0.1887	0.5660	0.0204
34	5.1	1	Sinusoidal	0.0073	0.5786	1.0000
35	5.1	2	Linear	0.1967	0.6620	0.0714
36	5.1	2	Sinusoidal	0.0700	0.3756	1.0000
37	5.2	1	Linear	0.2002	0.7112	0.0417
38	5.2	1	Sinusoidal	0.0014	0.5358	0.9787
39	5.2	2	Linear	0.0579	0.4840	0.1333
40	5.2	2	Sinusoidal	0.0079	0.4909	0.9701
41	Case Study	1	Linear	0.0261	0.5006	0.6667
42	Case Study	1	Sinusoidal	0.0159	0.5810	0.4000
43	Case Study	2	Linear	0.0134	0.5149	0.5000
44	Case Study	2	Sinusoidal	0.0387	0.5992	0.5556

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกรรณ จิตเมตตา เกิดเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ.2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี 2552 และในปีเดียวกันนี้ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย