การจัดสมดุลสายการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

นางสาวเอื้อมพร จันทร์แซม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
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.

MULTI-OBJECTIVE BALANCING ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES UNDER LEARNING EFFECT

Ms. Ueamporn Jansaem

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	การจัดสมดุลสายการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้
โดย	นางสาวเอื้อมพร จันทร์แซม
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 สมชาย พวงเพิกศึก)

เอื้อมพร จันทร์แซม : การจัดสมดุลสายการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้. (MULTI-OBJECTIVE BALANCING ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES UNDER LEARNING EFFECT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ปารเมศ ชุติมา, 510 หน้า.

สายการประกอบแบบสองด้านเป็นสายการประกอบที่สามารถทำการผลิตได้ทั้งด้านซ้าย (Left-Side) และด้านขวา (Right-Side) ขนานกันไปพร้อมๆ กัน ซึ่งใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ และมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่น รถยนต์ รถบรรทุก

การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ของการใช้งานสายการประกอบเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหา NP-hard ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับอัลกอริทึมอื่นที่ได้การยอมรับว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาแก้ปัญหาการจัดสมดุล ได้แก่ วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค วิธีการหาคาเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ โดยวัตถุประสงค์ที่พิจารณามี 4 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนคู่สถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ผลต่างของความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดี และเป็นที่ยอมรับได้

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2554

5270822621: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : BIOGEOGRAPHY-BASED OPTIMIZATION / LINE BALANCING / MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINE / MULTI-OBJECTIVE FUNCTIONS / LEARNING EFFECT

UEAMPORN JANSAEM: MULTI-OBJECTIVE BALANCING ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES UNDER LEARNING EFFECT. ADVISOR: ASSOC.PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 510 pp.

Two-sided assembly lines are typically use both sides (left and right) this type of assembly line are found in production of learg-sized products, such as automobile and trucks.

Solving mixed model two-side assembly lines under a learning effect problem to achieve multi-objective functions aims at highest effectiveness of assembly lines. This type of problem is known to be NP-hard. A Biogeography-based optimization (BBO) is applied as a method for solving this problem. Four objectives were considered including minimum number of Mated-station, minimum number of Workstations, minimum Work Relatedness and minimum Workload Balance between Workstation. The performance of BBO was compared with the well-known algorithms, namely Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO), and the Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge (PSONK). The result shows that BBO is good performance and acceptable.

Department: Industrial Engineering Student's Signature .

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .

Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการให้ข้อคิดและวิธีการในการแก้ปัญหาระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนประสบผลสำเร็จ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู เอาใจใส่และเป็นกำลังใจให้ในทุกครั้งที่มีปัญหา ตลอดจนญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำงาน ตลอดระยะเวลาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ภ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 4

1.3 ขั้นตอนในการวิจัย..... 4

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย..... 4

1.5 ลักษณะของปัญหา..... 6

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 8

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย..... 8

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย..... 10

2.1 ลักษณะของสายการประกอบ..... 10

2.2 ประเภทของสายการประกอบ..... 12

2.3 หลักการจัดสมดุลสายการประกอบ..... 15

2.4 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ..... 18

2.5 หลักการพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่สุด..... 21

2.6 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 23

2.7 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 25

2.8 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด..... 27

บทที่ หน้า

2.9 ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 30
2.10 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 35

3 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 44
3.1 เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GAs)..... 44
3.2 ขั้นตอนการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 46
3.3 ตัวอย่างการนำวิธี NSGA-II ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 49
3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี NSGAII 84
3.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)..... 86
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 87
3.7 สรุปท้ายบท..... 100

4 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 101
4.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)..... 101
4.2 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 102
4.3 ตัวอย่างการนำวิธี DPSO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 104
4.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี DPSO..... 142

บทที่ หน้า

4.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)…….…….. 144
4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง……..…….. 145
4.7 สรุปท้ายบท……..……... 154

5 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยใช้ความรู้เชิงลบ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้……..... 156
5.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK)……..... 156
5.2 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้……..… 157
5.3 ตัวอย่างการนำวิธี PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้……..…….. 160
5.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี PSONK……..… 211
5.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)……..….. 213
5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง……..…….. 214
5.7 สรุปท้ายบท……..……... 223

6 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้……..….. 225
6.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization; BBO)……..…….. 225
6.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้……..… 227

บทที่ หน้า

6.3 ตัวอย่างการนำวิธี BBO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 230
6.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO..... 266
6.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)..... 268
6.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 269
6.7 สรุปท้ายบท..... 277

7 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 279
7.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์รวมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography-Based Optimization with Local Search; BBO-LS)..... 279
7.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO-LS ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 282
7.3 ตัวอย่างการนำวิธี BBO-LS ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 285
7.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO-LS..... 313
7.5 สรุปท้ายบท..... 315

8 การเปรียบเทียบผลการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้..... 316
8.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... 316
8.2 การค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน..... 329
8.3 การค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน..... 335

บทที่			หน้า
	8.4	การค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน	343
	8.5	การค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน	351
	8.6	การค้นหาคำตอบของปัญหา 183 ขั้นงาน	358
	8.7	การทดสอบค่าการเรียนรู้ต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึม	362
	8.8	สรุปท้ายบท	364
9	บทสรุปและข้อเสนอแนะ		367
	9.1	สรุปงานวิจัย	367
		9.1.1 ลักษณะของปัญหา	369
		9.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้	370
		9.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ในการแก้ปัญหา	371
	9.2	ข้อเสนอแนะ	372
รายการอ้างอิง			374
ภาคผนวก			380
	ภาคผนวก ก รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง		381
	ภาคผนวก ข ผลการทดลอง		416
	ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์การทดลอง		459
	ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ		465
	ภาคผนวก จ การทดสอบโปรแกรม MATLAB		473
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์			510

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	รายละเอียดของปัญหาที่จะทำการศึกษาในงานวิจัย……	5
2.1	สัดส่วนการทำงานระหว่างคนงานและเครื่องจักรที่มีผลกระทบต่อค่าการเรียนรู้.....	33
3.1	เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน……..	50
3.2	Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์…….	50
3.3	สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานของประชากรเริ่มต้น……	52
3.4	ปรับปรุงตาราง Precedence Matrix……..	54
3.5	การถอดรหัสจากสตริงค่าสิทธิไปเป็นลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ 1…….	54
3.6	ลำดับขั้นงานของสตริคำตอบทั้ง 5 ตัว……...	55
3.7	การจัดสรรงานลงสถานีงานสำหรับลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ 1……	56
3.8	สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว……..	57
3.9	การคำนวณค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน…….	59
3.10	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว……	59
3.11	ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ……..	60
3.12	การเรียงลำดับค่าวัตถุประสงค์ที่ 3 ใน Front ที่ 1……..	61
3.13	ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ……...	61
3.14	การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)……...	62
3.15	การสร้างวงล้อรูเล็ต……	63
3.16	Binary Tournament Selection สำหรับการคัดเลือกสตริงคำตอบ……..	64
3.17	สตริงคำตอบที่ได้จากการคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection…….	64
3.18	สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการครอสโอเวอร์……...	65
3.19	สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการมิวเตชัน……..	68
3.20	สตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชัน……	69
3.21	สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกที่นำมารวมกัน……...	70
3.22	ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……...	70
3.23	สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……	71
3.24	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……..	71

ตารางที่ หน้า

3.25 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ…….. 72
3.26 การเรียงค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance…… 72
3.27 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป……... 73
3.28 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)…… 73
3.29 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)…… 73
3.30 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)…….. 73
3.31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)…… 74
3.32 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้นในรอบที่ 2…… 74
3.33 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2…… 74
3.34 สถานีงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2…….. 75
3.35 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบที่ 2…… 75
3.36 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ…….. 76
3.37 สตริงคำตอบที่ได้จากการคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection……. 76
3.38 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการครอสโอเวอร์……... 76
3.39 สตริงคำตอบหลังผ่านการครอสโอเวอร์…… 77
3.40 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการมิวเตชัน……..…… 77
3.41 สตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชัน…… 78
3.42 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกที่นำมารวมกัน……... 78
3.43 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……... 78
3.44 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารรวมกัน…….. 79
3.45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……... 79
3.46 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ…… 80
3.47 การเรียงค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance…… 81
3.48 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป……... 81
3.49 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่นำมารวมกัน…….. 81
3.50 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……... 82
3.51 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน…… 82
3.52 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน……... 82

ตารางที่ หน้า

3.53 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 83
3.54 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 83
3.55 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 84
3.56 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 84
3.57 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 84
3.58 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง..... 87
3.59 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ NSGAII ที่จะทำการทดสอบ..... 87
3.60 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII..... 90
3.61 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII..... 92
3.62 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII..... 95
3.63 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII..... 97
3.64 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII..... 100
3.65 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาในวิธี NSGAII..... 100
4.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 105
4.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์..... 105
4.3 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 106
4.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้น..... 107
4.5 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 อนุภาคที่ 1..... 107
4.6 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 108
4.7 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 108
4.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 109
4.9 ค่า Dummy Fitness ของตริงคำตอบ..... 110
4.10 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ..... 111
4.11 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (Lbest)..... 111
4.12 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)..... 112
4.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)..... 112
4.14 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 113
4.15 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 113

ตารางที่ หน้า

4.16 สถานีของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 113
4.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 113
4.18 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1 $P_{(i,j)} = Lbest1$..... 115
4.19 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1 $P_{(i,j)} = Lbest2$..... 115
4.20 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร $G_{(i,j)}$ ในรอบที่ 1..... 116
4.21 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1..... 117
4.22 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1..... 118
4.23 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1ในรอบที่ 1..... 119
4.24 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1..... 120
4.25 Sigmoid ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1..... 121
4.26 Sigmoid ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1..... 122
4.27 Sigmoid ของฝูงที่ 1 ที่ได้จากรอบก่อนหน้า..... 123
4.28 ตัวอย่างการสร้างวงล้อรูเล็ตตำแหน่งที่ 1 ของสตริงคำตอบ 11..... 123
4.29 Sigmoid ของฝูงที่ 1 เมื่อทำการปรับปรุงหลังจากวางงานตำแหน่งที่ 1..... 124
4.30 ตัวอย่างการสร้างวงล้อรูเล็ตตำแหน่งที่ 2 ของสตริงคำตอบ 11..... 125
4.31 Sigmoid ของฝูงที่ 1 เมื่อทำการปรับปรุงหลังจากวางงานตำแหน่งที่ 2..... 125
4.32 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 126
4.33 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 126
4.34 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 127
4.35 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 127
4.36 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ..... 128
4.37 การคัดเลือกสตริงที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (Lbest)..... 129
4.38 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)..... 130
4.39 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)..... 130
4.40 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 130
4.41 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 130
4.42 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 131
4.43 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 131

ตารางที่ หน้า

4.44 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 132
4.45 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 132
4.46 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 132
4.47 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 132
4.48 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 133
4.49 ทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ของรอบก่อนหน้า ($V_{(i-1,j)}$)..... 133
4.50 ทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ของรอบก่อนหน้า ($V_{(i-1,j)}$)..... 134
4.51 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1ของรอบก่อนหน้า ($X_{(i-1,j)}$)..... 134
4.52 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ของรอบก่อนหน้า ($X_{(i-1,j)}$)..... 135
4.53 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2 $P_{(i,j)} = Lbest1$..... 135
4.54 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2 $P_{(i,j)} = Lbest2$..... 136
4.55 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร $G_{(i,j)}$ ในรอบที่ 2..... 136
4.56 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 137
4.57 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2..... 138
4.58 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1ในรอบที่ 2..... 139
4.59 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2..... 140
4.60 Sigmoid ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 141
4.61 Sigmoid ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2..... 142
4.62 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง..... 144
4.63 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ DPSO ที่จะทำการทดสอบ..... 144
4.64 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน..... 146
4.65 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี DPSO..... 146
4.66 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน..... 148
4.67 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี DPSO..... 148
4.68 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี DPSO..... 150
4.69 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี DPSO..... 152
4.70 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 183 ขั้นงาน..... 154
4.71 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี DPSO..... 154

ตารางที่ หน้า

4.72 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาในวิธี DPSO..... 155
5.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 161
5.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์..... 161
5.3 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง..... 162
5.4 ความน่าจะเป็นร่วม เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง..... 163
5.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง..... 163
5.6 การสร้างวงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกงานแรก..... 164
5.7 การปรับปรุงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงาน หลังจากวางงานตำแหน่งที่ 1. 165
5.8 ความน่าจะเป็นร่วม เริ่มต้น..... 166
5.9 การสร้างวงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกงานในตำแหน่งที่ 2..... 166
5.10 การปรับปรุงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงาน หลังจากวางงานตำแหน่งที่ 2. 167
5.11 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 167
5.12 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 168
5.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 168
5.14 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1..... 169
5.15 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1..... 170
5.16 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1..... 170
5.17 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1..... 171
5.18 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2..... 171
5.19 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2..... 172
5.20 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1..... 172
5.21 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1..... 172
5.22 การรวมกันของสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง..... 173
5.23 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร..... 174
5.24 การรวมกันของสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง..... 174
5.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร..... 175
5.26 สตริงคำตอบที่ดีของประชากรในรอบที่ 1..... 175
5.27 สตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในรอบที่ 1..... 175

ตารางที่ หน้า

5.28 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 176
5.29 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 176
5.30 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 176
5.31 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1..... 179
5.32 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lbest,12*..... 180
5.33 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lworst,13*..... 181
5.34 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,12*..... 181
5.35 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,21*..... 181
5.36 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,22*..... 182
5.37 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gworst,23*..... 182
5.38 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 183
5.39 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst..... 183
5.40 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1..... 184
5.41 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lbest,12*..... 186
5.42 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lworst,13*..... 188
5.43 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,12*..... 188
5.44 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,21*..... 189
5.45 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,22*..... 190
5.46 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gworst,23*..... 190
5.47 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2..... 191
5.48 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst 192
5.49 ความน่าจะเป็นร่วม เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง ($X_{(i,-1j)}$)..... 192

ตารางที่ หน้า

5.50 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1..... 193
5.51 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2..... 194
5.52 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 194
5.53 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 195
5.54 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค..... 195
5.55 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1..... 196
5.56 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1..... 197
5.57 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 197
5.58 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 197
5.59 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2..... 198
5.60 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2..... 199
5.61 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2..... 199
5.62 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2..... 199
5.63 การรวมกันของสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง..... 200
5.64 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร..... 201
5.65 การรวมกันของสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง..... 201
5.66 การคัดเลือกสตริงที่แย่ของประชากร..... 202
5.67 สตริงคำตอบที่ดีของประชากรในรอบที่ 2..... 202
5.68 สตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในรอบที่ 2..... 202
5.69 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 203
5.70 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 203
5.71 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 203
5.72 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 204
5.73 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 204
5.74 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 205
5.75 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 205
5.76 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 205

ตารางที่ หน้า

5.77 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2..... 205
5.78 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst..... 206
5.79 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst..... 207
5.80 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst..... 208
5.81 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst..... 210
5.82 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1..... 210
5.83 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2..... 211
5.84 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง..... 213
5.85 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ PSONK ที่จะทำการทดสอบ..... 213
5.86 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน..... 216
5.87 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี PSONK..... 216
5.88 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน..... 218
5.89 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี PSONK..... 218
5.90 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน..... 220
5.91 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี PSONK..... 220
5.92 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน..... 222
5.93 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี PSONK..... 222
5.94 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี PSONK..... 223
5.95 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาในวิธี PSONK..... 224
6.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 231
6.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์..... 231
6.3 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบ..... 232
6.4 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบ..... 233

ตารางที่ หน้า

6.5 สถานีงานของสตริงคำตอบ..... 233
6.6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ..... 233
6.7 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 235
6.8 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ..... 235
6.9 ค่า Species Count ของสตริงคำตอบ..... 236
6.10 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear..... 239
6.11 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal..... 241
6.12 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวก่อนกระบวนการอพยพ..... 244
6.13 การอพยพเข้าและอพยพออกของสปีชี่ส์เคาท์ 3..... 245
6.14 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 3..... 245
6.15 การอพยพเข้าและอพยพออกของสปีชี่ส์เคาท์ 2..... 246
6.16 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 2..... 247
6.17 การอพยพเข้าและอพยพออกของสปีชี่ส์เคาท์ 1..... 248
6.18 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชี่ส์เคาท์ 1..... 249
6.19 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการการอพยพ..... 249
6.20 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ต..... 250
6.21 การสร้างเลขสุ่มให้กับบิทในสตริงคำตอบที่จะทำการมิวเตชัน..... 251
6.22 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน..... 251
6.23 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว..... 252
6.24 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 252
6.25 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 253
6.26 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 253
6.27 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ..... 254
6.28 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 255
6.29 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 255
6.30 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 255
6.31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 255
6.32 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป..... 256

ตารางที่ หน้า

6.33 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้นในรอบที่ 2..... 256
6.34 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2..... 256
6.35 สถานีงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2..... 257
6.36 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบที่ 2..... 257
6.37 ค่า Dummy Fitness ค่า Crowding Distance และค่า Species Count 258
6.38 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear..... 258
6.39 สตริงคำตอบหลังผ่านการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบในรอบที่ 2..... 259
6.40 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ต..... 259
6.41 สตริงคำตอบหลังจากผ่านการมิวเตชันในรอบที่ 2..... 260
6.42 การรวมกันสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราวในรอบที่ 2..... 260
6.43 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2..... 261
6.44 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2..... 261
6.45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2..... 262
6.46 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ..... 263
6.47 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 263
6.48 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 263
6.49 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 264
6.50 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 264
6.51 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 265
6.52 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของ (Elitist)..... 265
6.53 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 265
6.54 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 265
6.55 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 265
6.56 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป..... 266
6.57 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง..... 268
6.58 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ BBO ที่จะทำการทดสอบ..... 268
6.59 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน..... 270
6.60 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี BBO..... 270

ตารางที่ หน้า

6.61 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน..... 272
6.62 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี BBO..... 272
6.63 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน..... 273
6.64 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี BBO..... 274
6.65 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน..... 275
6.66 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี BBO..... 275
6.67 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน..... 277
6.68 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี BBO..... 277
7.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 286
7.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์..... 286
7.3 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว..... 287
7.4 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว..... 288
7.5 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว..... 288
7.6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว..... 289
7.7 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 290
7.8 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ..... 290
7.9 ค่า Species Count ของสตริงคำตอบ..... 291
7.10 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออก..... 291
7.11 สตริงคำตอบหลังผ่านกระบวนการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบ..... 292
7.12 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน..... 292
7.13 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว..... 293
7.14 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 294
7.15 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ทำการรวมกัน..... 294
7.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 295
7.17 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ..... 296
7.18 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 296
7.19 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 296
7.20 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 296

ตารางที่ หน้า

7.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 297
7.22 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป..... 297
7.23 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้นในรอบที่ 2..... 297
7.24 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2..... 298
7.25 สถานีงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2..... 298
7.26 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบที่ 2..... 298
7.27 ค่า Dummy Fitness ค่า Crowding Distance และค่า Species Count..... 299
7.28 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal..... 299
7.29 สตริงคำตอบหลังผ่านการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบในรอบที่ 2..... 300
7.30 สตริงคำตอบหลังจากผ่านการมิวเตชันในรอบที่ 2..... 300
7.31 การรวมกันสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราวในรอบที่ 2..... 300
7.32 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2..... 301
7.33 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2..... 301
7.34 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2..... 302
7.35 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ..... 303
7.36 สตริงคำตอบทีนำมารวมกัน..... 303
7.37 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 303
7.38 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 304
7.39 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 304
7.40 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 305
7.41 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของ (Elitist)..... 305
7.42 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 305
7.43 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 305
7.44 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)..... 306
7.45 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป..... 306
7.46 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)..... 307
7.47 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)..... 307
7.48 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)..... 307

ตารางที่ หน้า

7.49 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)..... 307
7.50 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการค้นหาเฉพาะที่..... 308
7.51 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 308
7.52 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 309
7.53 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 309
7.54 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 309
7.55 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ..... 310
7.56 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการค้นหาเฉพาะที่ในการวนซ้ำครั้งที่ 2..... 310
7.57 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 311
7.58 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 311
7.59 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 312
7.60 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน..... 312
7.61 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ..... 313
7.62 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป..... 313
8.1 รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย..... 316
8.2 จำนวนเจนเนอเรชันที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบต่างๆ ในแต่ละปัญหา..... 324
8.3 จำนวนเจนเนอเรชันที่เหมาะสมของแต่ละปัญหา..... 324
8.4 พารามิเตอร์สำหรับวิธี NSGAII..... 325
8.5 พารามิเตอร์สำหรับวิธี DPSO..... 326
8.6 พารามิเตอร์สำหรับวิธี PSONK..... 327
8.7 พารามิเตอร์สำหรับวิธี BBO 328
8.8 พารามิเตอร์สำหรับวิธี BBO-LS..... 329
8.9 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5..... 330
8.10 แสดงค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5..... 330
8.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5..... 331

ตารางที่ หน้า

8.12 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7..... 332
8.13 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7..... 333
8.14 แสดงค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7..... 333
8.15 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8..... 334
8.16 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8..... 335
8.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8..... 335
8.18 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326..... 336
8.19 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326..... 337
8.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326..... 337
8.21 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490..... 338
8.22 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490..... 339
8.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490..... 339
8.24 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544..... 340
8.25 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544..... 342
8.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544..... 342
8.27 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204..... 343
8.28 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204..... 344

ตารางที่ หน้า

8.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204..... 345
8.30 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306..... 345
8.31 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306..... 347
8.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306..... 347
8.33 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408..... 348
8.34 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408..... 350
8.35 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408..... 350
8.36 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888..... 351
8.37 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888..... 352
8.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888..... 352
8.39 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266..... 353
8.40 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266..... 354
8.41 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266..... 355
8.42 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454..... 355
8.43 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454..... 357
8.44 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454..... 357
8.45 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22..... 358

ตารางที่ หน้า

8.46 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22..... 359
8.47 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22..... 360
8.48 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม เมื่อค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80%..... 361
8.49 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม เมื่อค่าการเรียนรู้เท่ากับ 90%..... 363
8.50 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม เมื่อไม่มีผลกระทบจากการเรียนรู้ 364

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สายการประกอบแบบเส้นตรง	10
2.2	สายการประกอบแบบสองด้าน	11
2.3	สายการปรกอบผลิตภัณฑ์แบบต่างๆ	12
2.4	ผังแสดงการจำแนกปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ	16
2.5	ผังแสดงการจำแนกข้อจำกัดและความแตกต่างของวัตถุประสงค์	17
2.6	การจำแนกกลุ่มวัตถุประสงค์ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน	19
2.7	ลักษณะคำตอบวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์	20
2.8	การจำแนกกลุ่มและความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์	21
2.9	การค้นหาพื้นที่คำตอบในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์	24
2.10	วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting	26
2.11	Crowding Distance	27
2.12	กราฟแสดงเส้นโค้งการเรียนรู้ (a) และกราฟ Log Scale ของเส้นโค้งการเรียนรู้ (b)	31
2.13	แสดงผลกระทบจากการเรียนรู้ในระดับต่างๆ	32
2.14	ค่าการเรียนรู้ที่ระดับต่างๆ	33
3.1	ขั้นตอนพื้นฐานของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม	45
3.2	ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II	48
3.3	การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)	49
3.4	การสร้างค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้น	51
3.5	สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกขั้นงาน	52
3.6	การจัดสรรงานลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1	56
3.7	การจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานของผลิตภัณฑ์ A	58
3.8	การจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานของผลิตภัณฑ์ B	58
3.9	การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ	60
3.10	วงล้อรูเล็ต	63

ภาพที่		หน้า
3.11	การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 1.....	66
3.12	การสลับค่าน้ำหนักและทำการเปลี่ยนตำแหน่งภายในโครโมโซมของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 1.....	66
3.13	การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 2.....	67
3.14	การสลับค่าน้ำหนักและทำการเปลี่ยนตำแหน่งภายในโครโมโซมของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 2.....	67
3.15	การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation สตริงคำตอบที่ 2.....	68
3.16	การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation สตริงคำตอบที่ 3.....	68
3.17	การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ.....	72
3.18	การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ.....	75
3.19	การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ.....	80
3.20	การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด.....	83
3.21	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set.....	89
3.22	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set.....	90
3.23	กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set.....	91
3.24	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement.....	91
3.25	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution.....	92
3.26	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set.....	93
3.27	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement.....	93

ภาพที่ หน้า

3.28 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 94
3.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 94
3.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 95
3.31 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 96
3.32 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 96
3.33 กราฟแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 97
3.34 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 98
3.35 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 98
3.36 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 99
3.37 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 99
4.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO..... 103
4.2 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)..... 104
4.3 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1..... 110
4.4 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2..... 110

ภาพที่ หน้า

4.5 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากร..... 112
4.6 วงล้อรูเล็ต..... 124
4.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1..... 128
4.8 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2..... 128
4.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบของประชากร..... 129
4.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด..... 131
4.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 145
4.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 147
4.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 147
4.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 148
4.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 149
4.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 149
4.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 150
4.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 151
4.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 151
4.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 152
4.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 153

ภาพที่ หน้า

4.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 153
5.1 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK..... 159
5.2 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)..... 160
5.3 วงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกขั้นงาน..... 164
5.4 วงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกขั้นงาน..... 166
5.5 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 169
5.6 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 170
5.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 171
5.8 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 3 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6..... 172
5.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่ดี เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 173
5.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่แย่ เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 3 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6..... 175
5.11 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 196
5.12 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 197
5.13 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 198
5.14 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 4 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 7..... 199

ภาพที่ หน้า

5.15 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่ดี เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4..... 200
5.16 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่แย่ เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 4 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 7..... 202
5.17 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด..... 204
5.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 214
5.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 215
5.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 215
5.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 216
5.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 217
5.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 217
5.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 218
5.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 219
5.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 219
5.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 221
5.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 221

ภาพที่ หน้า

5.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 222
5.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 223
6.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO..... 229
6.2 แสดงการสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)..... 230
6.3 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 234
6.4 วงล้อรูเล็ตของค่า P_μ..... 239
6.5 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 3..... 251
6.6 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 254
6.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 258
6.8 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 3..... 259
6.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 262
6.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด..... 264
6.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 269
6.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 270
6.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 271
6.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 271
6.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 272
6.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 273

ภาพที่ หน้า

6.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 273
6.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 274
6.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 274
6.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 275
6.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set..... 276
6.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement..... 276
6.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution..... 277
7.1 การแลกเปลี่ยนตำแหน่งด้วยวิธี 2-Opt..... 280
7.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO-LS..... 284
7.3 แสดงการสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)..... 285
7.4 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 290
7.5 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 295
7.6 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 299
7.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 302
7.8 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด..... 304
7.9 การมิวเตชันด้วยวิธี 2-Opt สตริงคำตอบที่ 3..... 308
7.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 310
7.11 การมิวเตชันด้วยวิธี 2-Opt สตริงคำตอบที่ 2..... 311
7.12 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ..... 312
8.1 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 12 ขั้นงานของวิธี NSGAII..... 317

ภาพที่ หน้า

8.2 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 65 ขั้นงานของวิธี NSGAII..... 318
8.3 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 148 ขั้นงานของวิธี NSGAII..... 318
8.4 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 205 ขั้นงานของวิธี NSGAII..... 319
8.5 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 183 ขั้นงานของวิธี NSGAII..... 319
8.6 การทำ Pilot Run ของวิธี DPSO ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา..... 320
8.7 การทำ Pilot Run ของวิธี PSONK ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา..... 321
8.8 การทำ Pilot Run ของวิธี BBO ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา..... 322
8.9 การทำ Pilot Run ของวิธี BBO-LS ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา..... 323
8.10 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5..... 330
8.11 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7..... 332
8.12 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8..... 334
8.13 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326..... 337
8.14 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490..... 339
8.15 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544..... 341
8.16 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204..... 344
8.17 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 11..... 344
8.18 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306..... 346
8.19 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 8..... 347

ภาพที่ หน้า

8.20 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408..... 349
8.21 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6..... 350
8.22 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 205 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888..... 352
8.23 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266..... 354
8.24 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454..... 356
8.25 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22..... 359
8.26 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 183 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 20..... 359

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมรถยนต์ถือว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการแข่งขันสูง จึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการผลิตสูง สามารถผลิตได้ตามความต้องการของลูกค้า ในสายการประกอบหนึ่งควรจะสามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบผสมได้อย่างหลากหลาย

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน (Mixed-Model Two–sided Assembly Line) ได้ถูกคิดขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ในการจัดตารางการผลิต ให้เหมาะกับอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ และมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่น รถยนต์ รถบรรทุก เนื่องจากสายการประกอบแบบสองด้านสามารถทำการผลิตได้ทั้งด้านซ้าย (Left-Side) และด้านขวา (Right-Side) ขนานกันไปพร้อมๆ กัน ทำให้สายการประกอบสั้นกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง เป็นผลให้เวลาการผลิตลดลง ลดต้นทุนของเครื่องมือและอุปกรณ์เนื่องจากการใช้เครื่องมือร่วมกันได้ระหว่างคู่สถานีงาน (Mated-Station) และลดเวลาในการตั้งเครื่องจักร (Setup Time) (Lee et al., 2001) และในที่นี้ได้นำผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) เข้ามาพิจารณาด้วย ซึ่งผลกระทบจากการเรียนรู้นี้เกิดขึ้นในกรณีที่พนักงานต้องทำงานที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยหรือมีลักษณะใกล้เคียงกัน การทำงานหลังจากได้ทำงานอื่นมาแล้วจะทำให้พนักงานเกิดความชำนาญและเกิดการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เวลาในการทำงานลดลงซึ่งเป็นผลกระทบจากการเรียนรู้หรือ Learning Efffect (Biskup ,1999)

การจะนำสายการประกอบแบบสองด้านมาแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบให้มีประสิทธิภาพนั้น ต้องมีการพิจารณาองค์ประกอบและวัตถุประสงค์ต่างๆ ให้เหมาะสม เช่น การหาจำนวนสถานีทำงานน้อยที่สุด การหาจำนวนเวลาว่างงานน้อยที่สุด การหาผลต่างของความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด หรือการหาความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด เป็นต้น เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของลูกค้าและโรงงานในทุกๆ ด้าน โรงงานไม่ควรสนใจวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่งเพราะจะทำให้ได้คำตอบที่ดีเฉพาะวัตถุประสงค์ที่สนใจแต่อาจจะให้คำตอบที่ไม่ดีสำหรับวัตถุประสงค์อื่น แต่ควรจะพิจารณาหลายวัตถุประสงค์พร้อมกันเพื่อให้ได้คำตอบที่ยอมรับได้ และทำให้โรงงานสามารถแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตได้อย่างเหมาะสม

การพิจารณาวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมเป็นปัญหา Combinatorial Optimization แบบ NP-Hard โดยการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาประเภทนี้เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้นและให้คำตอบที่ค่อนข้างดีเป็นที่ยอมรับได้และบ่อยครั้งที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนั้นยังใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานมากอีกด้วย (ปารเมศ ชุติมา, 2551)

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านที่ผ่านมาพบว่า มีการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) (Kim et al., 2000), การประยุกต์ใช้วิธี Branch-and-Bound (Wu et al., 2008), และวิธี Ant Colony Heuristic (ACH) ภายใต้ข้อจำกัดการจัดสรรพื้นที่ และข้อจำกัดของตำแหน่ง (Baykasoglu and Dereli, 2008), แต่เป็นการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านภายใต้วัตถุประสงค์เดียวเท่านั้น จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านในกรณีที่มีหลายวัตถุประสงค์ขึ้น การประยุกต์ใช้ Goal Programming และ Fuzzy Goal Programming (Ozcan and Toklu, 2009a), การเสนอวิธีการหาคำตอบแบบ Tabu Search (TS) โดยมีตัววัดผล คือ Line Efficiency (LE) และ Smoothness Index (SI) จากผลการเปรียบเทียบคำตอบกับ GA, GAPR, EA และ ACO พบว่า GA ให้คำตอบที่ดีที่สุด (Ozcan and Toklu, 2009b), การเสนอรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่อาศัยหลักการของวิธีการ Simulated Annealing Algorithm : SA (Ozcan and Toklu ,2009c) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้จำนวนคู่สถานีงานน้อยที่สุด และเพื่อทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุดเมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 1 (Type I Problem) ซึ่งเป็นการจัดสรรงานลงในสถานีงานให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด เมื่อมีการกำหนดรอบเวลาการทำงาน โดยได้สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการ BBO (Biography Base Optimization : BBO) ซึ่งเป็นวิธีใหม่ ถูกพัฒนาขึ้นโดย Dan Simon (Dan Simon, 2008) ที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบการอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่อยู่อาศัย ซึ่งการอพยพการย้ายถิ่นฐานของสปีชี่ส์จากเกาะหนึ่งไปยังอีกเกาะหนึ่งจะทำให้เกิดสปีชี่ส์ใหม่ขึ้นหรืออาจทำให้สปีชี่ส์นั้นสูญพันธ์ได้ สปีชี่ส์จำนวนมากจะอยู่ในเกาะที่มีความเหมาะสมหรือมีความอุดมสมบูรณ์ ทำให้โอกาสที่สปีชี่ส์จากเกาะอื่นจะย้ายเข้ามาในเกาะนี้เป็นไปได้ยากเนื่องจากเหลือพื้นที่ให้อยู่อาศัย

น้อยทำให้อัตราการอพยพเข้าต่ำ และสปีชี่ส์ที่อยู่ในเกาะนี้เองก็พยายามที่จะย้ายออกไปจากเกาะอื่นเพื่อหาพื้นที่อยู่อาศัยใหม่ที่ไม่มีความแออัดทำให้อัตราการอพยพออกสูง ในทางตรงกันข้ามกับเกาะที่ไม่อุดมสมบูรณ์จะมีสปีชี่ส์อยู่น้อยและพร้อมที่จะรับสปีชี่ส์จากเกาะอื่นเข้ามาอยู่อาศัยทำให้อัตราการอพยพเข้าสูง และอัตราการอพยพออกจะต่ำเพราะสปีชี่ส์ที่อยู่ในเกาะนี้ไม่ต้องการย้ายออกไปเกาะอื่นที่แออัด การอพยพจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนที่อยู่อาศัยและมีการแบ่งปันความเหมาะสมไปยังเกาะต่างๆ ให้แก่กันนั่นเอง

วิธี BBO ถูกนำมาประยุกต์ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด โดยจะทำการเปรียบเทียบสตริงคำตอบกับเกาะ ความเหมาะสมหรือความอุดมสมบูรณ์ของเกาะเรียกว่าดัชนีความเหมาะสมของการอยู่อาศัย (Habitat Suitability Index; HSI) เปรียบได้กับค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ (Fitness) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เรียกว่าตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable; SIV) เช่น อุณหภูมิ พื้นที่อยู่อาศัย ซึ่งเปรียบได้กับลักษณะเฉพาะของสตริงคำตอบหรือยีนในวิธีเจนเนติกนั่นเอง สตริงคำตอบใดที่มีค่า HSI สูงแสดงว่ามีค่าสปีชี่ส์เคาท์ (Species Count) มากและเป็นสตริงคำตอบที่ดี สตริงคำตอบที่มีค่า HSI ต่ำก็จะมีสปีชี่ส์เคาท์อยู่น้อยหรือเป็นสตริงคำตอบที่แย่ หลังจากประเมินค่าสตริงคำตอบแล้วจะมีการปรับปรุงสตริงคำตอบให้ดีขึ้น ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงสตริงคำตอบนี้คือการอพยพ (Migration) และการมิวเตชัน (Mutation)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ จำนวนคู่สถานีงานที่น้อยที่สุด จำนวนสถานีทำงานน้อยที่สุด ผลต่างของความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ หรือ Learning Effect และได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ ได้แก่ วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) วิธีการหาคาเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK) และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization; BBO)

การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ที่จะนำวิธี BBO เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหา 2 ปัญหา คือ

1) วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค วิธีการหาคาเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิต

ตามภูมิศาสตร์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) วิธีใดให้คำตอบที่ดีที่สุดบนสายการประกอบแบบสองด้าน

2) ถ้าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบ BBO ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับวิธีการอื่น จะมีวิธีใดบ้างที่จะพัฒนาคำตอบให้ดีขึ้นกว่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการนำวิธีหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization; BBO) วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) และวิธีการหาคาเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

1.3 ขั้นตอนในการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB

1.3.3 สร้างอัลกอริทึม และเขียนโปรแกรม โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.3.4 ทดสอบและแก้ไขโปรแกรมที่เขียนขึ้นให้มีความถูกต้อง

1.3.5 ประเมินผลการแก้ปัญหาโดยโปรแกรมที่เขียนขึ้น

1.3.6 สรุปผลและวิเคราะห์ผล

1.3.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม และสายการประกอบแบบสองด้าน โดยกำหนดงานให้กับสถานีงานต่าง ๆ ในสายงานการประกอบเท่านั้น

1.4.2 ทำการศึกษาผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) ในรูปแบบผลกระทบจากการเรียนรู้ที่เกิดจากผลรวมของเวลาของงานที่ได้ทำก่อนหน้า (Sum of Processing Time Base Learning Effect) ซึ่งกำหนดให้ผลกระทบจากการเรียนรู้มีค่าเท่ากันในทุกกระบวนการ

1.4.3 ปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ทำการศึกษา เป็นการหาจำนวนสถานีงานที่เหมาะสมและเป็นการจัดกลุ่มให้แต่ละสถานีงานโดยมีวัตถุประสงค์ 4 ประการคือ

- เพื่อให้มีจำนวนคู่สถานีทำงานน้อยที่สุด
- เพื่อให้จำนวนสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด
- เพื่อให้ผลต่างของความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด
- เพื่อให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

1.4.4 การจัดสมดุลสายการประกอบจะนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization; BBO) เข้ามาประยุกต์ในการหาคำตอบ

1.4.5 ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการนำกรณีศึกษาของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของบริษัทธนบุรีประกอบรถยนต์จำกัด เข้ามาใช้ในการศึกษาร่วมกับปัญหาที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมา 5 ปัญหาของการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยรอบเวลาการทำงานของแต่ละปัญหาถูกกำหนดดังตารางที่ 1.1

ตาราง 1.1 รายละเอียดของปัญหาที่จะทำการศึกษาในงานวิจัย

กรณีศึกษาที่	ความสัมพันธ์ก่อนหลัง	จำนวนผลิตภัณฑ์ (ชนิด)	จำนวนงาน	รอบเวลาในการทำงาน (นาที)
1	Kim et al. (2000)	2	12	5, 7, 8
2	Lee et al. (2001)	3	65	326, 490, 544
3	Bartholdi (1993)	4	148	204, 306, 408
4	Lee et al. (2001)	4	205	1888, 2266, 2454
5	Case Study*	2	183	22

* หมายเหตุ กรณีศึกษาของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์บริษัทธนบุรีประกอบรถยนต์จำกัด

1.4.6 วิธีการประเมินประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบที่ได้จากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ของอัลกอริทึมต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะ 4 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวน

กลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (Computation Time to Solution)

1.4.7 คำตอบที่ได้จากกระบวนการค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมต่างๆ ไม่ได้ให้คำตอบที่ดีที่สุด แต่เป็นคำตอบที่สามารถยอมรับและใช้งานได้ดี

1.5 ลักษณะของปัญหา

1.5.1 ลักษณะของปัญหาเป็นการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน เพื่อกำหนดขั้นงาน (Task) ให้กับสถานีงาน โดยสายการประกอบนี้ยังไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องจักรใดๆ ในสถานีงาน ทำให้งานต่างๆ สามารถจัดลงสถานีงานใดก็ได้

1.5.2 ข้อมูลนำเข้า (Input) ได้แก่ ขั้นการทำงาน (Task) รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time) ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน (Precedence Relationships) ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงานของแต่ละขั้นงาน (Processing Time) ด้านที่งานแต่ละงานสามารถทำงานได้ และผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) ที่เกิดในกระบวนการผลิต

1.5.3 ทุกสถานีงานมีความสามารถในการทำงานเท่ากันทุกสถานี

1.5.4 ความสามารถหรือผลกระทบจากการเรียนรู้มีค่าเท่ากันทุกสถานีงาน

1.5.5 เวลาการทำงานของงานแต่ละงานไม่คงที่ โดยจะขึ้นอยู่กับการจัดลำดับขั้นงานของงานนั้นๆ

1.5.6 วัตถุประสงค์ของการจัดสมดุลสายการประกอบนี้จะทำเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่

1) เพื่อให้มีจำนวนคู่สถานีทำงานน้อยที่สุด

$$Minimum\ N_m$$

2) เพื่อให้จำนวนสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

$$Minimum\ N_w$$

3) เพื่อให้ผลต่างของความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

$$Minimum\ IWR = n - \frac{n}{\sum_{j=1}^{n} SN_j}$$

หรือ

$$Minimum\ B_w = n - \frac{n}{\sum_{j=1}^{n} SN_j}$$

เมื่อ n คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

j คือ สัญลักษณ์กำหนดสถานีงาน

SN_j คือ จำนวนการเชื่อมต่อการทำงานในสถานีงานที่ j

4) เพื่อให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

$$Minimum\ B_b = \frac{n}{n-1}\sum_{k=1}^{LL}\sum_{b=L}^{R}\left(\frac{S_{kb}}{WIT}-\frac{1}{n}\right)^2$$

เมื่อ n คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

k คือ สัญลักษณ์กำหนดคู่สถานีงาน

LL คือ จำนวนคู่สถานีงาน

b คือ สัญลักษณ์กำหนดด้านของสถานีงาน

L คือ สถานีงานด้านซ้าย

R คือ สถานีงานด้านขวา

S_{kb} คือ เวลาว่างงานเฉลี่ยบนคู่สถานีงาน k ด้าน b

WIT คือ เวลาว่างงานของสายการผลิตแบบถ่วงน้ำหนัก

1.5.7 ข้อกำหนดที่ต้องพิจารณาในการแก้ปัญหามีดังนี้

1) การกำหนดงานให้กับสถานีงานต้องไม่ขัดกับข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

2) ขั้นงานแต่ละขั้นงานจะถูกจัดลงสถานีงานได้เพียง 1 สถานีงานเท่านั้น

3) ในแต่ละสถานีงาน จะมีคนทำงานเพียง 1 คน

4) ในแต่ละสถานีงานสามารถทำงานได้หลายขั้นงาน แต่เวลารวมของการทำงานในสถานีงานนั้นๆ ต้องไม่เกินรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

5) ระยะเวลาในการข้ามไปทำงานในขั้นงานถัดไปกำหนดให้มีเวลาในการเดินเท่ากับ 0

6) เครื่องจักรทุกเครื่องมีความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์เท่ากัน

7) ไม่มีการผลิตเพื่อไปเก็บยังคลังสินค้า

8) ไม่ยอมให้มีการแทรกงานเกิดขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบสองด้านมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และลดระยะเวลาในการแก้ปัญหาให้น้อยลง เป็นอีกแนวทางในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน

1.6.2 เป็นอีกแนวทางในการตัดสินใจเพื่อใช้ในการจัดงานลงในสถานีงาน และจัดสถานีงานลงในสายการประกอบแบบสองด้าน

1.6.3 สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.6.4 สามารถนำผลจากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย

เนื้อหาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยทฤษฎีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยได้นำอัลกอริทึมต่างๆ เข้ามาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึม รวมทั้งการสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 2 เสนอทฤษฎีการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน วิธีการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ ผลกระทบจากการเรียนรู้ การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบ

บทที่ 3 อธิบายหลักการ ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGAII) สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4 อธิบายหลักการ ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 5 อธิบายหลักการ ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK) สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลาย

วัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 6 อธิบายหลักการ ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization; BBO) สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 7 นำเสนอหลักการและแนวทางในการแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึมใหม่ ที่เรียกว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based Optimization with Local Search; BBO-LS) สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 8 นำผลที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดที่ทำการทดลองมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อหาอัลกอริทึมที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

บทที่ 9 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะนำไปพัฒนาและเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

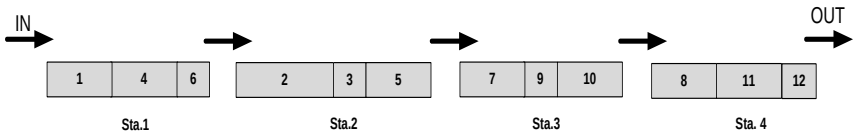
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งประกอบไปด้วยลักษณะของสายการประกอบ วิธีการหาค่าเหมาะสมของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ การวัดสมรรถนะของกลุ่มกลุ่มคำตอบ รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของสายการประกอบ

สายการประกอบ (Assembly Line) ในอุตสาหกรรมมีลักษณะที่แตกต่างกันหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด แต่โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ หน่วยการผลิตหรือสถานีงาน (Work Station) และขั้นงาน (Task) ที่นำมาจัดลงสถานีงานเหล่านั้น ในกระบวนการผลิตชิ้นงานจะเริ่มต้นประกอบที่สถานีงานแรกและเคลื่อนย้ายมาตามสายการประกอบในสถานีงานถัดไปเรื่อยๆ จนมาถึงสถานีงานสุดท้ายและได้เป็นสินค้าสำเร็จรูป ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงลักษณะของสายการประกอบแบบเส้นตรงซึ่งเป็นพื้นฐานของสายการประกอบ และสายการประกอบแบบสองด้านซึ่งได้นำมาศึกษาวิธีการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้

2.1.1 สายการประกอบแบบเส้นตรง (Straight Line)

สายการประกอบแบบเส้นตรง คือ สายการประกอบที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่เข้าและออกสถานีงานไปในทิศทางเดียวกันเสมอ ดังภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างภาพสายการประกอบแบบเส้นตรงที่มีขั้นงานทั้งหมด 12 ขั้นงาน ถูกจัดสรรลงในสถานีงาน 4 สถานีงานและการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์จากซ้ายไปขวา



ภาพที่ 2.1 สายการประกอบแบบเส้นตรง

2.1.2 **สายการประกอบแบบสองด้าน** (Two–sided Assembly Line)

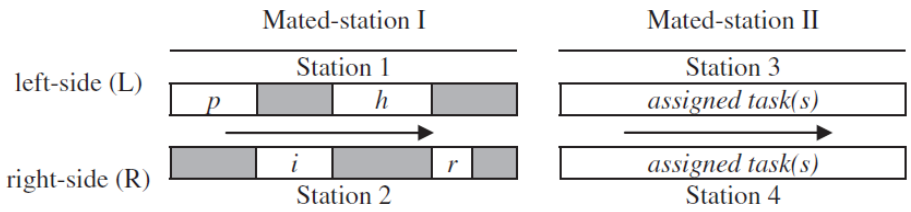
สายการประกอบแบบสองด้าน คือ สายการประกอบที่มีสถานีงานอยู่ทั้งด้านซ้าย (Left side) และด้านขวา (Right side) ของสายการประกอบ สายการประกอบประเภทนี้จะเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เช่น รถยนต์ รถบรรทุก และรถบัส เป็นต้น สถานีงานที่อยู่คู่กันในด้านซ้ายและด้านขวาจะถูกเรียกว่าคู่สถานีงาน (Mate-Station) จากภาพที่ 2.2 สถานีงานที่1 และ สถานีงานที่ 2 จะเป็นคู่สถานีงานคู่ที่ 1 (Mate-Station 1) การจัดวางสถานีงานลักษณะนี้ทำให้เกิดประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตดังนี้ (Ozcan และ Toklu, 2009)

- เนื่องจากสามารถทำงานได้ทั้งด้านซ้ายและขวา ทำให้สายการประกอบแบบสองด้านมีความยาวสั้นกว่าสายการประกอบแบบด้านเดียว

- ลดความสูญเปล่า เช่น เวลาปรับตั้งเครื่อง ลดระยะทางเคลื่อนที่ของพนักงาน และเวลาผลิตสั้นลง

- ลดต้นทุนจากการใช้เครื่องมือและของใช้ประจำที่สามารถใช้ร่วมกันได้ในคู่สถานีงาน

ในการจัดงานลงสายการประกอบแบบสองด้านนั้น จะจัดสรรงานลงตามด้านที่ขั้นงานนั้นสามารถทำการผลิตได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ งานที่สามารถจัดลงสถานีงานได้เพียงด้านเดียวเท่านั้น คือ ด้านซ้าย (L-type) หรือด้านขวา (R-type) และงานที่สามารถจัดลงสถานีงานด้านใดก็ได้ (E-type) ยกตัวอย่างอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ การประกอบพวงมาลัยรถยนต์ต้องทำการประกอบทางด้านขวาเท่านั้น หรือแบบ R-type และการประกอบหม้อกรองอากาศต้องประกอบฝั่งซ้าย หรือแบบ L-type ส่วนการประกอบกันชนรถยนต์จะประกอบฝั่งใดก็ได้ หรือ E-type เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 สายการประกอบแบบสองด้าน (Ozcan และ Toklu, 2009)

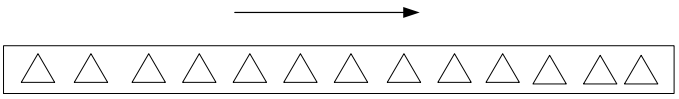
จากภาพที่ 2.2 จะเห็นพื้นที่แรเงา คือเวลาเดินเปล่า (Idle Time) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเงื่อนไขของลำดับการทำงานก่อนหลัง (Precedence Constraint) ซึ่งเป็นลักษณะของ

สายการประกอบแบบสองด้านที่แตกต่างจากสายการประกอบแบบเส้นตรง ในที่นี้งาน i จะเริ่มได้เมื่องาน p ต้องเสร็จก่อน งาน h จะเริ่มได้เมื่องาน i เสร็จแล้ว และงาน r จะเริ่มได้เมื่องาน h เสร็จแล้ว ซึ่งจะทำให้เกิดเวลาว่างขึ้นในช่วงที่ต้องรอให้งานก่อนหน้าเสร็จก่อน เวลาการทำงานจริงในแต่ละสถานีงานเกิดจากผลรวมของเวลาการดำเนินงานทุกขั้นงานในสถานีงานนั้นรวมกับเวลาเดินเปล่าที่เกิดขึ้นในสถานีงานนั้นๆ

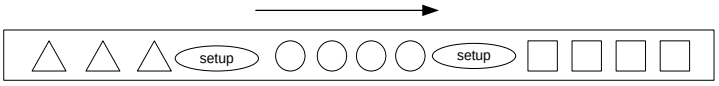
2.2 ประเภทของสายการประกอบ

สายการประกอบผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็นหลายประเภท โดยพิจารณาจากหลายองค์ประกอบดังนี้

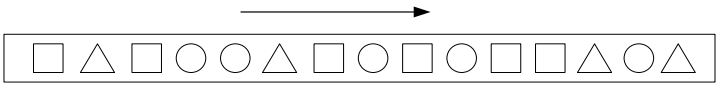
2.2.1 สายการประกอบที่แยกประเภทตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต มี 3 แบบ (Becker และ Scholl, 2006) ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2.3(a) สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว



ภาพที่ 2.3(b) สายการประกอบหลายผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2.3(c) สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

ภาพที่ 2.3 สายการปรกอบผลิตภัณฑ์แบบต่างๆ (Becker และ Scholl, 2006)

1) สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Line) เป็นสายงานการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียวเท่านั้น (ดูภาพที่ 2.3 (a))

2) สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Multi Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีรูปแบบและกระบวนการประกอบที่ใกล้เคียงกันและสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้ โดยจะทำการผลิตทีละชุดและในช่วงระหว่างการเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์จะต้องมีการปรับตั้งสาย

การประกอบใหม่ทุกครั้ง (ดูภาพที่ 2.3(b))

3) สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Line) เป็นงานการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่นเดียวกับสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ จะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกันโดยไม่มีการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นชุดและระหว่างการผลิตจะไม่มีการปรับตั้งสายการประกอบใหม่ (ดูภาพที่ 2.3(c))

จากภาพที่ 2.3(b) สายการประกอบหลายผลิตภัณฑ์ ถ้าหากเราปรับให้ขนาดของชุดผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่มาก สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ก็จะคล้ายกับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว แต่ถ้าเราปรับให้ขนาดของชุดผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กลงจนเหลือประมาณหนึ่ง สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ก็จะคล้ายกับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม

2.2.2 สายการประกอบที่แยกประเภทตามการเคลื่อนย้ายงานระหว่างสถานีงาน

มี 2 แบบ คือ

1) การเคลื่อนย้ายงานด้วยมือ (Manual Transfer) เป็นการเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่ได้ทำการประกอบแล้วไปยังสถานีงานถัดไปด้วยตัวของพนักงานเอง ลักษณะของการเคลื่อนย้ายงานประเภทนี้อาจทำให้เกิดปัญหา เช่น

- การไม่มีงานป้อน (Starving) คือ การที่พนักงานได้ทำงานเสร็จแล้วแต่ยังไม่สามารถเริ่มงานชิ้นต่อไปได้เนื่องจากต้องคอยงานจากพนักงานในสถานีงานก่อนหน้าที่ยังทำไม่เสร็จ
- การไม่มีที่ส่งงาน (Blocking) คือ เหตุการณ์ที่พนักงานไม่สามารถส่งงานไปยังสถานีงานถัดไปได้เนื่องจากพนักงานในสถานีงานถัดไปยังทำงานไม่เสร็จ ต้องรอให้พนักงานในสถานีงานถัดไปทำงานเสร็จก่อนจึงจะสามารถส่งงานของตนเองไปได้ก่อนที่จะเริ่มทำงานชิ้นใหม่

ปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบที่กล่าวมาทำให้การไหลของงานในระบบไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้รอบเวลาการผลิตไม่คงที่ กำลังการผลิตมีการเปลี่ยนแปลง การวางแผนการผลิตก็ทำได้ยากขึ้น วิธีแก้ไขปัญหาเหล่านี้ คือ การเพิ่มพื้นที่รองรับชิ้นงานระหว่างสถานีงาน (Buffer Storage) เพื่อช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นและทำให้สายการผลิตมีความสม่ำเสมอและต่อเนื่อง

2) การเคลื่อนย้ายงานด้วยสายพาน (Moving Conveyor) เป็นการเคลื่อนย้ายชิ้นงานไปยังสถานีงานถัดไปโดยผ่านสายพานลำเลียง โดยสายพานลำเลียงนี้มีทั้งแบบต่อเนื่อง

(Continue) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Intermittent) ลักษณะของการเคลื่อนย้ายงานประเภทนี้อาจทำให้เกิดปัญหา เช่น

- การไม่มีงานป้อน (Starving) คือ ไม่สามารถเริ่มงานชิ้นใหม่ได้เนื่องจากไม่มีงานส่งมาจากสถานีงานก่อนหน้า เช่นเดียวกับปัญหาที่เกิดขึ้นกับการเคลื่อนย้ายงานด้วยมือ
- การมีงานล้นมือ (Congestion) คือ พนักงานไม่สามารถทำงานชิ้นนั้นได้เสร็จทันเวลาที่กำหนด ทำให้ต้องปล่อยงานชิ้นนั้นซึ่งไม่สมบูรณ์ออกไปยังสถานีงานต่อไป

3) การป้อนผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบ (Model Launch Discipline) เป็นระยะเวลาระหว่างชิ้นงานแต่ละชิ้นที่ทำการป้อนในจุดเริ่มต้นของสายการประกอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- การป้อนแบบแปรผัน (Variable Rate Launching) คือ จะทำการป้อนชิ้นงานเข้าสู่สถานีงานแรกทันทีเมื่อสถานีงานแรกว่าง ทำให้เวลาการเข้าสู่สถานีงานแรกแปรผันตามเวลาการผลิตชิ้นงานที่ทำการผลิตก่อนหน้า
- การป้อนแบบคงที่ (Fixed Rate Launching) คือ จะทำการป้อนชิ้นงานเข้าสู่สถานีงานด้วยอัตราที่คงที่ ลักษณะของการป้อนงานเข้าสู่สถานีงานแบบนี้เหมาะกับอุตสาหกรรมที่ใช้สายพานลำเลียงในการเคลื่อนย้ายสินค้า ข้อเสียของการป้อนงานลักษณะนี้คือ บางสถานีงานอาจใช้เวลาน้อยกว่าช่วงของเวลาป้อนงาน ทำให้เกิดเวลาว่างงานของสถานีงานนั้นๆ ขึ้น หรือในทางตรงกันข้ามบางสถานีอาจใช้เวลามากกว่าช่วงเวลาป้อนงานทำให้เกิดการรอคิวหรือเกิดเป็นจุดคอขวด (Bottleneck) ขึ้น การแก้ไขปัญหาเหล่านี้คือการจัดลำดับงาน (Sequencing) ให้มีประสิทธิภาพ จะช่วยให้ภาระงานในสายการประกอบมีความสม่ำเสมอ

2.2.3 **สายการประกอบที่แยกประเภทตามลักษณะเวลาทำงานของสถานีงาน** มี 2 แบบ (Becker และ Scholl, 2006) คือ

1) สายการประกอบแบบก้าวเดิน (Paced Line) คือ สายการประกอบที่มีการกำหนดรอบเวลาการทำงานให้กับสถานีงานนั้นๆ ด้วยความยาวของสายพานลำเลียง ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ด้วยสายพานลำเลียงพร้อมกับการที่พนักงานทำงานเคลื่อนที่ไปกับชิ้นงาน ยกตัวอย่างเช่นในสายการประกอบรถยนต์ รถยนต์จะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ด้วยสายพานลำเลียง

อัตโนมัติ พนักงานจะเคลื่อนที่ตามและทำงานไปด้วย เมื่อสิ้นสุดสายพานลำเลียงก็เท่ากับสิ้นสุดเวลาการทำงานของสถานีงานนั้น แล้วรถยนต์จะเคลื่อนเข้าสู่สถานีงานถัดไป ข้อเสียที่อาจจะเกิดขึ้นสำหรับสายการประกอบแบบนี้คือ พนักงานอาจจะทำงานไม่เสร็จเมื่อครบรอบเวลาการทำงาน ทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่สมบูรณ์และอาจต้องนำหลับมาแก้ไขในสายการประกอบอีกครั้ง

2) สายการประกอบแบบไม่ก้าวเดิน (Unpaced Line) คือ สายการประกอบที่แต่ละสถานีงานจะทำงานไปเรื่อยๆ จนกว่าจะทำการผลิตชิ้นงานนั้นเสร็จแล้วส่งไปยังสถานีงานถัดไป โดยไม่มีการกำหนดรอบเวลาที่ชัดเจน ลักษณะของสายการประกอบแบบนี้ทำให้เวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานไม่เท่ากัน อาจมากกว่าหรือน้อยกว่ารอบเวลาการทำงานได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีพื้นที่รองรับชิ้นงาน (Buffer) ระหว่างสถานีงาน

2.2.4 **สายการประกอบที่แยกประเภทโดยพิจารณาลักษณะของสถานีงาน** มี 2 แบบ คือ

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

2) สถานีงานแบบเปิด (Open Station) คือสถานีงานที่ไม่แบ่งขอบเขตการทำงานออกจากกันอย่างชัดเจน ดังนั้นคนงานที่อยู่ต่างสถานีงานกันจึงสามารถเข้าไปทำงานในเขตสถานีงานอื่นได้ ซึ่งบางกรณีอาจมีข้อจำกัดในการทำงานร่วมกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนการทำงานซึ่งกันและกัน หรือในบางกรณีอาจไม่มีข้อจำกัดใดๆเลยก็ได้

2.3 หลักการจัดสมดุลสายการประกอบ

การจัดสมดุลสายการประกอบ เป็นการจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานต่างๆ ให้มีความสมดุลกัน โดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

2.3.1 ประเภทของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

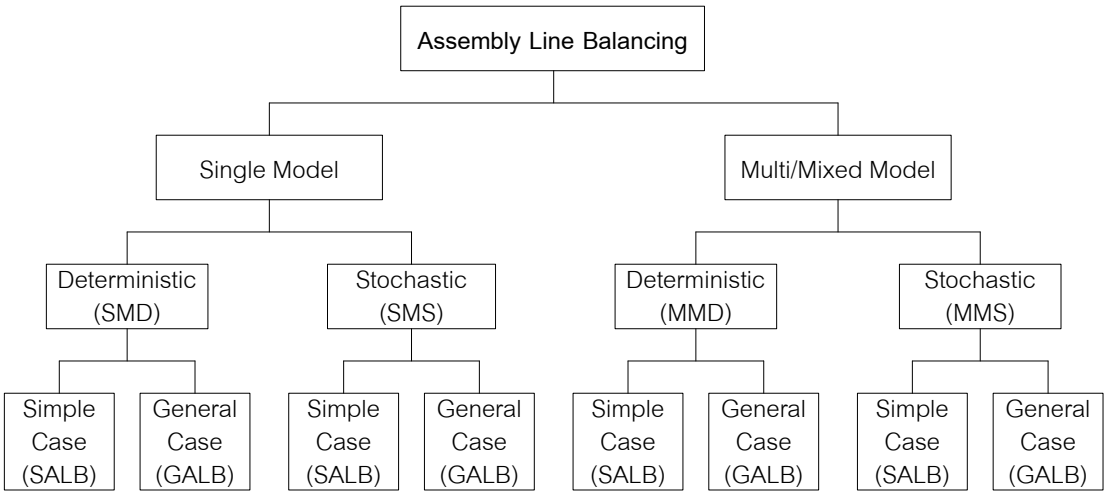
ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท (Ghosh and Gagnon, 1989) ดังนี้

1) Single Model Deterministic (SMD) เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ชนิดเดียว และมีการกำหนดเวลาการทำงานของแต่ละขั้นงานที่แน่นอน

2) Single Model Stochastic (SMS) เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว ที่เวลาการทำงานของแต่ละขั้นงานไม่คงที่ ซึ่งตรงกับความเป็นจริงในอุตสาหกรรมแบบ Manual ที่คนงานใช้เวลาในการทำงานไม่แน่นอน

3) Multi/Mixed Model Deterministic (MMD) เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และมีการกำหนดเวลาการทำงานของแต่ละขั้นงานที่แน่นอน ทำให้การจัดสรรงงานในสายการประกอบแบบนี้มักจะเหลือเพียงข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

4) Multi/Mixed Model Stochastic (MMS) เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่เวลาการทำงานของแต่ละขั้นงานไม่คงที่ จึงเป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อน



ภาพที่ 2.4 ผังแสดงการจำแนกปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

2.3.2 ประเภทของวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ สามารถแยกตามลักษณะของการพิจารณาข้อจำกัดและความแตกต่างของวัตถุประสงค์ ดังนี้

2.3.2.1 Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) ปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบอย่างง่าย คือปัญหาที่มีสายการประกอบแบบเส้นตรงและทำการผลิตผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียว (Becker and Scholl, 2006)

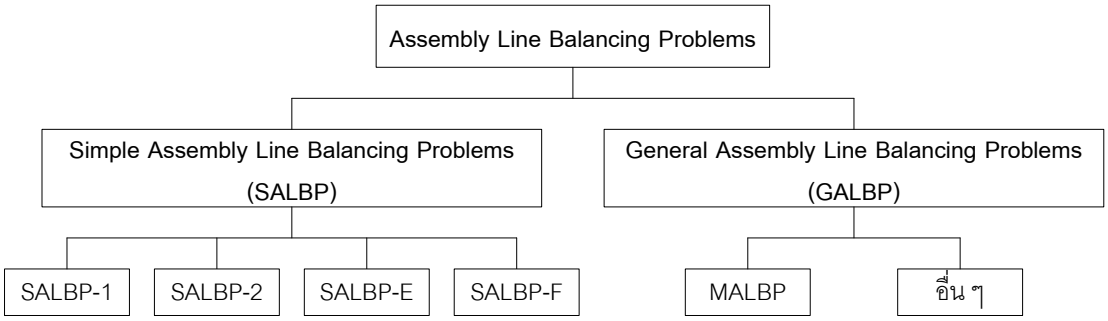
1) Type 1 (SALB-1) เป็นปัญหาการจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานเพื่อให้มีจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด โดยมีการกำหนดรอบเวลาการทำงานมาให้

2) Type 2 (SALB-2) เป็นปัญหาการจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานเพื่อให้มีรอบเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด โดยมีการกำหนดจำนวนสถานีงานมาให้

3) Type E (SALB-E) เป็นปัญหาการจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานเพื่อให้มีจำนวนสถานีงานและมีรอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด โดยพิจารณา Type 1 และ Type 2 รวมกัน

4) Type F (SALB-F) เป็นปัญหาที่มีความเป็นไปได้ (Feasibility) ในการจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานเมื่อมีการกำหนดจำนวนสถานีงานและรอบเวลาการทำงาน

2.3.2.2 General Assembly Line Balancing Problem (GALBP) เป็นปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบทั่วไป เป็นปัญหาที่มีข้อจำกัดในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้น (Becker and Scholl, 2006) เช่นข้อจำกัดเกี่ยวกับการรวมขั้นงาน (Zoning Restriction) ข้อจำกัดของสถานีงานรูปแบบต่างๆ เช่น สถานีงานแบบขนาน สถานีงานแบบสองด้าน หรือข้อจำกัดด้านพื้นที่หรือทรัพยากรต่างๆ เป็นต้น ซึ่งปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบทั่วไป ได้แก่ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem; MALBP) เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 ผังแสดงการจำแนกข้อจำกัดและความแตกต่างของวัตถุประสงค์

2.4 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบเป็นค่าที่เรากำหนดขึ้นมาเพื่อใช้วัดประสิทธิภาพของการจัดสรรงานลงในสถานีงาน ซึ่งวัตถุประสงค์นี้จะเป็นไปตามเป้าหมายที่เราต้องการ ในบางครั้งวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายที่เราต้องอาจมีมากกว่า 1 วัตถุประสงค์เพื่อให้การจัดสมดุลมีประสิทธิภาพและตอบสนองสิ่งที่ต้องการได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ขึ้น โดยสามารถจำแนกกลุ่มวัตถุประสงค์ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

2.4.1 ด้านประสิทธิภาพของสายการประกอบ (Line Efficiency)

- จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด (Minimum Workstation) เป็นวัตถุประสงค์สำคัญที่ช่วยลดต้นทุนที่เกิดจากการซื้อเครื่องมือเครื่องจักรและการจ้างคนงาน (Lee et al., 2001)

- รอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด (Minimum Cycle Time) เมื่อรอบเวลาการทำงานลดลงมีผลให้อัตราผลผลิตสูงสุด (Production Rate) (Kim et al., 2000)

- ประสิทธิภาพของสายการประกอบสูงที่สุด (Maximum Line Efficiency) เป็นตัววัดประสิทธิภาพของสายการประกอบ (Ozcan and Toklu, 2009b)

- เวลาสูญเปล่ารวมน้อยที่สุด (Minimum Total Idle Time) ทำให้คนและเครื่องจักรไม่เกิดการว่างงาน หรือเกิดความสูญเสียน้อยที่สุด จะส่งผลให้อัตราการผลิตสูงขึ้น (Simaria and Vilarinho, 2007)

- ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานน้อยที่สุด (Minimum Relatedness) เพื่อช่วยให้งานในสถานีงานมีความต่อเนื่องกันมากขึ้น (Lee et al., 2001)

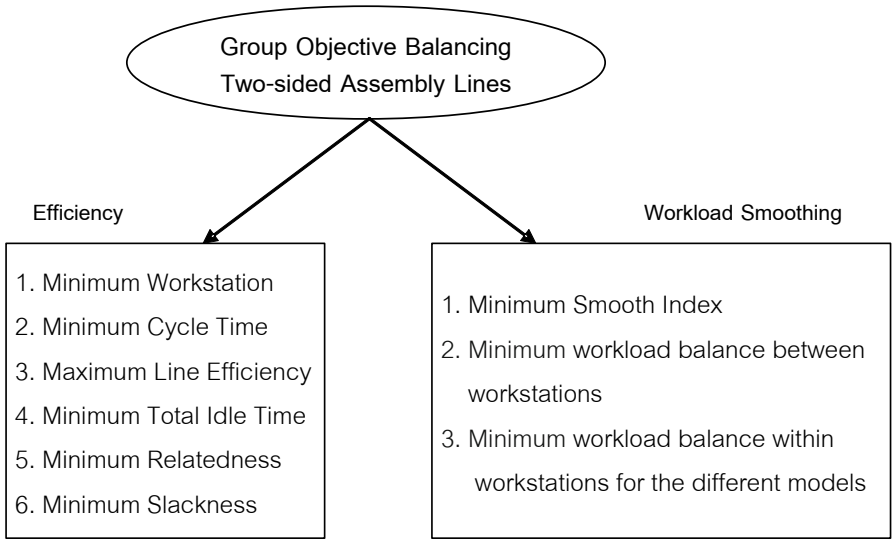
- ความหย่อนของงานในสถานีงานน้อยที่สุด (Minimum Slackness) เพื่อให้สถานีงานสามารถผลิตได้เต็มที่ (Lee et al., 2001)

2.4.2 ด้านสมดุลของภาระงาน (Workload Smoothing)

- การปรับเรียบของขั้นงานน้อยที่สุด (Minimum Smooth Index) เพื่อให้ขั้นงานในสถานีงานมีความสมดุลโดยมีเวลาในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน (Ozcan and Toklu, 2009b)

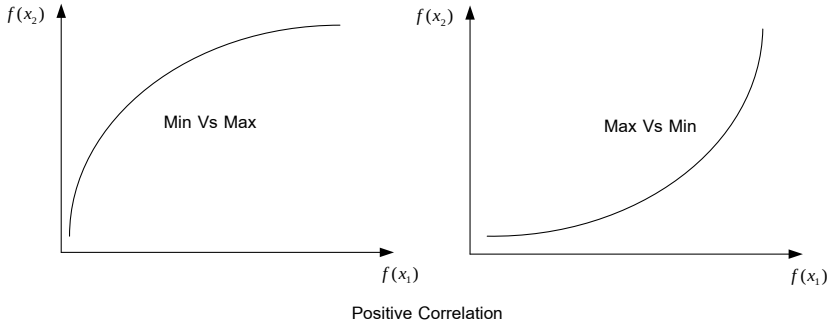
- ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Workload Balance between Workstations) เพื่อให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุล (Simaria and Vilarinho, 2007)

- ความแตกต่างของภาระงานระหว่างผลิตภัณฑ์ภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Workload Balance within Workstations for the Different Models) เพื่อให้ภาระงานภายในสถานีงานของแต่ละผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด (Simaria and Vilarinho, 2007)

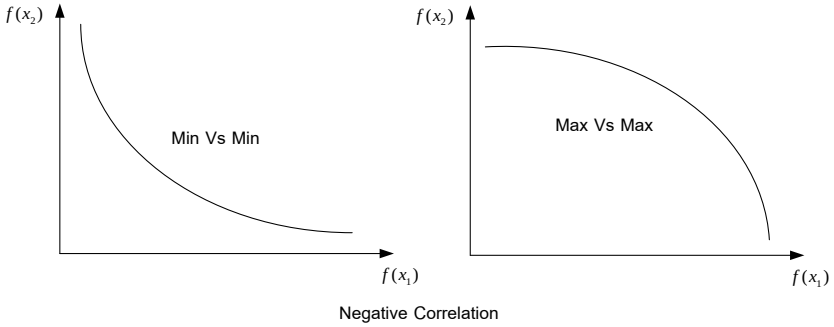


ภาพที่ 2.6 การจำแนกกลุ่มวัตถุประสงค์ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

วัตถุประสงค์ของสายการประกอบแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ที่ต้องทำการพิจารณาร่วมกันในบางครั้งอาจจะไม่ได้ให้คำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นเราจึงควรพิจารณาวัตถุประสงค์ให้เหมาะสมกับความเป็นจริง โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ว่ามีความสัมพันธ์กันแบบใด ไม่ว่าจะเป็นความสัมพันธ์ในเชิงบวกคือมีคำตอบไปในทิศทางเดียวกันเหมาะกับการหาค่าวัตถุประสงค์ที่ต้องการค่าวัตถุประสงค์หนึ่งต่ำที่สุด และอีกวัตถุประสงค์หนึ่งเป็นค่าสูงสุด (Minimum and Maximum) และวัตถุประสงค์ที่มีความสัมพันธ์ในเชิงลบคือมีคำตอบที่เป็นไปในทิศทางตรงกันข้าม โดยจะเหมาะกับปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด (Minimum and Minimum) หรือมากที่สุด (Maximum and Maximum) ดังภาพที่ 2.7



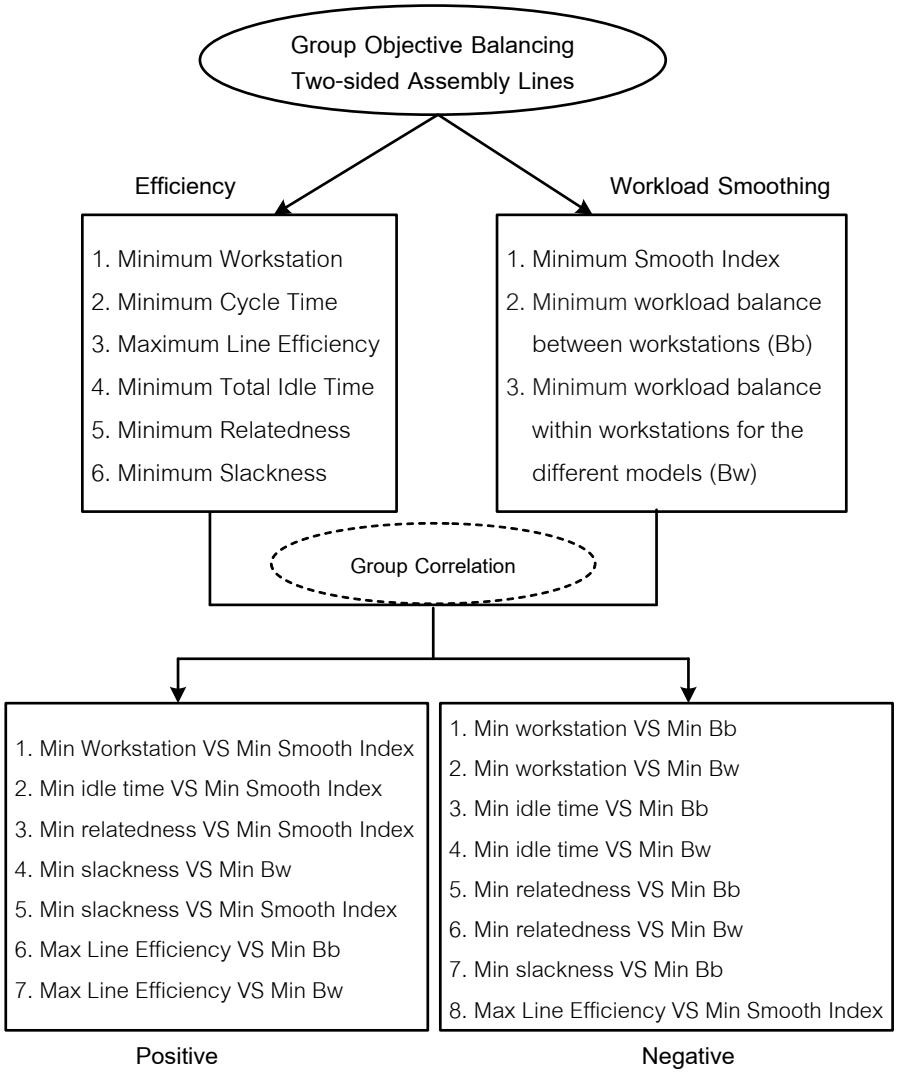
ก. วัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ที่เหมาะกับความสัมพันธ์เชิงบวก



ข. วัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ที่เหมาะกับความสัมพันธ์เชิงลบ

ภาพที่ 2.7 ลักษณะคำตอบวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

จากความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ที่ได้ศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าสามารถแบ่งกลุ่มความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน ได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การจำแนกกลุ่มและความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

2.5 หลักการพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่สุด

การหาค่าเหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Optimization Problem) และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problem) คือการหาค่าเหมาะสมโดยพิจารณาวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 2 วัตถุประสงค์ขึ้นไปพร้อมๆ กัน โดยการหาค่าเหมาะสมนี้ประกอบด้วย ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ข้อจำกัด (Constraints) และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions) (Coello Coello, Lamont and Van Veldhuizen, 2002) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 ตัวแปรตัดสินใจ

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) คือ ตัวแปรที่เราใช้ควบคุมเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งในปัญหาการหาค่าเหมาะสมจะมีตัวแปรตัดสินใจมากกว่า 1 ตัว ขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา ฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \ldots, x_n]^T \tag{2.1}$$

ตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ซึ่งแสดงค่าในรูปของ x_j โดยที่ $j = 1,2,\ldots,n$ และเวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ n ตัว ซึ่งฟังก์ชันของตัวแปรตัดสินใจสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ ฟังก์ชันกำหนด (Deterministic Function) คือ ฟังก์ชันที่มีแนวทางในการหาคำตอบที่กำหนดอย่างชัดเจน สามารถนิยามเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ และฟังก์ชันเฟ้นสุ่ม (Stochastic Function) คือ ฟังก์ชันที่มีแนวทางในการหาคำตอบที่ไม่สามารถกำหนดได้อย่างชัดเจน หรือไม่สามารถนิยามเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ เช่น ปัญหาการหาเส้นทางเดินที่ดีที่สุดของพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem: TSP) เป็นต้น

2.5.2 ข้อจำกัด

ในการหาคำตอบเราจะมีข้อจำกัดต่างๆ เช่น ข้อจำกัดด้านเวลา ข้อจำกัดด้านทรัพยากร เป็นต้น ดังนั้นการจะสร้างตัวแปรตัดสินใจจะต้องมีความสอดคล้องกับข้อจำกัดที่เรามีอยู่ โดยข้อจำกัดจะต้องอยู่ในความเป็นไปได้ของคำตอบที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปข้อจำกัดแบบอสมการ (Inequality Constraints) ได้ดังสมการที่ (2.2)

$$g_i(\vec{x}) \geq a_i, i = 1,2,\ldots,m \tag{2.2}$$

หรือข้อจำกัดแบบสมการ (Equality Constraints)

$$h_i(\vec{x}) = b_i, i = 1,2,\ldots,p \tag{2.3}$$

2.5.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นฟังก์ชันที่เราสร้างขึ้นมาเพื่อนำไปสู่การหาค่าเหมาะสมที่สุดตามเป้าหมายที่เราวางไว้ โดยมากแล้วฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเกี่ยวข้องกับการหาค่ามากที่สุด (Maximization) หรือน้อยที่สุด (Minimization) เช่น การหาจำนวน

สถานีงานที่น้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งการเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้จัดในการแก้ปัญหา

2.6 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

2.6.1 รูปแบบการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาเซตของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) ภายใต้พื้นที่ของตำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) โดยการหาค่าต่ำที่สุดหรือมากที่สุดตามวัตถุประสงค์ที่เราตั้งไว้ หรือการหาค่าต่ำที่สุดในบางวัตถุประสงค์และหาค่ามากที่สุดในบางวัตถุประสงค์ โดยจะทำการพิจารณาหลายวัตถุประสงค์พร้อมๆ กัน ดังสมการที่ (2.4)

$$f(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}),..., f_k(\vec{x})]^T \tag{2.4}$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถประสงค์จะเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ในรูปแบบของเวคเตอร์คำตอบ $\vec{x}^* = [\vec{x}_1^*, \vec{x}_2^*,...,\vec{x}_n^*]^T$ ภายใต้ m ข้อจำกัดแบบอสมการ ดังสมการที่ (2.5) หรือภายใต้ p ข้อจำกัดแบบสมการ ดังสมการที่ (2.6)

$$g_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1,2,...,m \tag{2.5}$$

$$h_i(\vec{x}) = 0, i = 1,2,...,p \tag{2.6}$$

2.6.2 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ที่ประกอบไปด้วย k วัตถุประสงค์ และ n ตัวแปรตัดสินใจ จะมีรูปแบบของปัญหาการหาค่ามากที่สุด หรือการหาค่าน้อยที่สุด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.7)

$$Minimize / Maximize \ \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}),..., f_k(\vec{x})\} \tag{2.7}$$

สำหรับรูปแบบการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด ซึ่งการค้นหาคำตอบจะถูกกำหนดจากเวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ ภายใต้ข้อจำกัดที่จะเป็นสิ่งที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตคำตอบที่น้อยที่สุด ดังสมการที่ (2.8)

$$Minimize \ \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}),...,f_k(\vec{x})\} \quad (2.8)$$

ข้อจำกัด $g_i(\vec{x}) \le 0$

โดยที่ $\vec{x}$ คือ เวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ

$f_i(\vec{x})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i

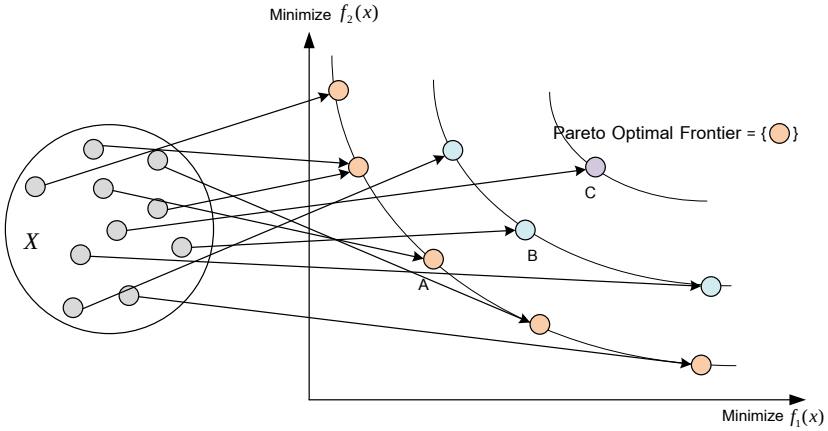
$g_i(\vec{x})$ คือ เวคเตอร์ข้อจำกัดที่ i

ถ้าเวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่า เวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ y แล้ว จะได้ว่า

$f_i(x) \le f_i(y)$ สำหรับทุกค่า $i \in \{1,2,...,k\}$ และ

$f_i(x) < f_i(y)$ มีอย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1,2,...,k\}$

ถ้าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดที่ดีกว่า หรือเด่นกว่าคำตอบอื่น จะถือว่าคำตอบที่ได้เป็น กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกสมาชิกคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) หรือเซตคำตอบที่เด่นกว่า (Non-dominated Set) ซึ่งเซตคำตอบนี้จะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ขอบเขตของคำตอบที่เรียกว่าขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่เด่นกว่าคำตอบอื่น (Non-dominated Frontier) ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การค้นหาพื้นที่คำตอบในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

จากภาพที่ 2.9 เป็นรูปแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมกัน โดยกำหนดให้ X เป็นพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยที่เวคเตอร์วัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (จุดสีส้ม) คือ เวคเตอร์

วัตถุประสงค์ที่ไม่มีคำตอบใดที่ดีกว่า หรือเรียกว่า เซตคำตอบที่เด่น (Non-dominated Set) และสมาชิกคำตอบที่เด่นกว่าเซตอื่นนี้จะได้เป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเวคเตอร์คำตอบที่อยู่ด้านในหรือคำตอบที่เป็นจุดสีส้ม เป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Non-dominated Optimal) ซึ่งจาก 3 เวคเตอร์คำตอบ A B และ C สามารถเขียนได้เป็น $A \succ B \succ C$ นั่นคือ A เด่นกว่า B และ B เด่นกว่า C (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

2.7 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการหาขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และมีลักษณะกระจายแบบสม่ำเสมอ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับเป้าหมาย 2 เป้าหมาย ได้แก่ การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด เพื่อใช้ในการค้นหาขอบเขตของกลุ่มคำตอบ และการกำหนดค่าความหนาแน่น เพื่อดูลักษณะการกระจายของเซตคำตอบบนขอบเขตของกลุ่มคำตอบให้มีความสม่ำเสมอตลอดขอบเขต ไม่เกาะกลุ่มอยู่ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง

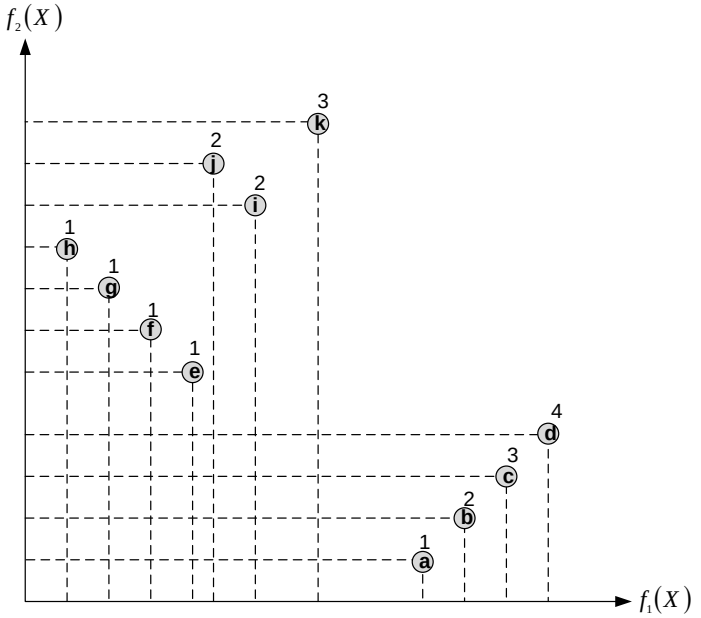
2.7.1 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรงให้แก่สมาชิกของกลุ่มประชากร ซึ่งการกำหนดค่าความแข็งแรงนี้มีหลายวิธี (Gen and Cheng, 2000) ได้แก่ วิธีคำนวณค่าแบบเวคเตอร์ (Vector Evaluation Approach), วิธีการรวมฟังก์ชันโดยอาศัยการให้น้ำหนัก (Weighted Sum Approach), วิธีคอมโพรไมส์ (Compromise Approach), วิธีโกล์โปรแกรมมิ่ง (Goal Programming Approach) และวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ซึ่งจะทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) ซึ่งสมาชิกที่มีอันดับเดียวกันจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มคำตอบเดียวกัน กลุ่มคำตอบใดที่ไม่มีคำตอบอื่นที่ดีกว่าจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด หรือเป็นกลุ่มคำตอบที่เด่นกว่าคำตอบอื่น โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีการจัดอันดับของ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting

การกำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบจะได้จากการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วนำไปจัดลำดับ โดยคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดดีกว่าจะถูกจัดอันดับ (Rank) ให้เป็น

อันดับที่หนึ่ง (Front 1) ซึ่งจะกลายเป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Frontier) จากนั้นจึงตัดเซตคำตอบนี้ออกจากการพิจารณา และพิจาณาเซตของสตริงคำตอบที่เหลือให้เป็นอันดับต่อมาจนกระทั่งคำตอบในประชากรทั้งหมดถูกจัดอันดับ กลุ่มคำตอบสุดท้ายที่ถูกจัดจะเป็นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่แย่ที่สุด ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting (นพพล คำพิรมย์, 2551)

2.7.2 การกำหนดค่าความหนาแน่น

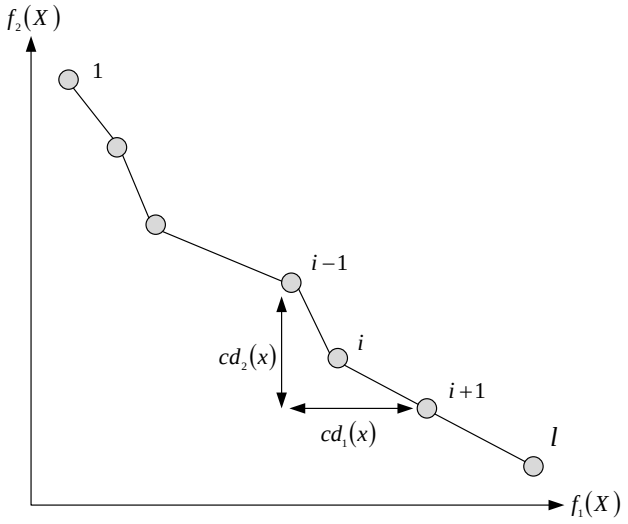
การกำหนดค่าความหนาแน่นนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เซตคำตอบมีลักษณะการกระจายสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่มอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องสร้างความหลากหลายให้กับประชากรคำตอบ (Diversity Population) หรือเรียกว่า การแบ่งปันค่าความแข็งแรง ซึ่งเป็นการลดค่าความแข็งแรงของคำตอบที่เกาะกลุ่มกันอยู่และป้องกันการเกาะกลุ่มกันของคำตอบที่อยู่ในอันดับเดียวกัน วิธีการหาค่าความหนาแน่นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาค่าความหนาแน่นแบบ Crowding Distance (Dep et al., 2002)

การแบ่งปันความแข็งแรงด้วยวิธี Crowding Distance เป็นการคำนวณหาระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ในอันดับเดียวกัน ถ้าค่า Crowding Distance ที่คำนวณได้มีค่าน้อยจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการเกาะกลุ่มกัน ส่วนค่า Crowding Distance ที่มากจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจาย ขั้นตอนการคำนวณค่า Crowding Distance มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้ l แทนจำนวนประชากรคำตอบทั้งหมดในอันดับที่ j และ $x_{[i,k]}$ แทนสมาชิกคำตอบที่ i ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ที่ได้รับการเรียงลำดับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก โดยสมาชิกสตริงคำตอบที่มีลำดับที่ 1 (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด) และลำดับสุดท้าย (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด) จะกำหนดให้มีค่า Crowding Distance เป็น Infinity นั่นคือ $cd_k\left(x_{[1,k]}\right)=\infty$ และ $cd_k\left(x_{[l,k]}\right)=\infty$ ส่วนสมาชิกสตริงคำตอบอื่นจะคำนวณค่า Crowding Distance ได้จากสมการที่ (2.9)

$$cd_k\left(x_{[i,k]}\right)=\frac{f_k\left(x_{[i+1,k]}\right)-f_k\left(x_{[i-1,k]}\right)}{f_k^{\max}-f_k^{\min}} \tag{2.9}$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณผลรวมของค่า Crowding Distance ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ตัว จะได้ว่า $cd(x)=\sum cd_k(x)$



ภาพที่ 2.11 Crowding Distance

2.8 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เป็นการวัดประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมต่างๆ ว่าอัลกอริทึมใดที่ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือกลุ่มคำตอบที่ได้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในงานวิจัย

นี้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะ 3 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ และอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง

2.8.1 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดหรือกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) (Kumar and Singh, 2007) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง และถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพสูง (นพพล คำพิรมย์, 2551) โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ (2.10-2.11)

$$Convergence = \frac{\sum_{i=1}^{|A^*|} d_i}{|A^*|} \tag{2.10}$$

เมื่อ $d_i = \min_{j=1}^{|A^*|} \sqrt{\sum_{k=1}^{2} \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2}$ (2.11)

โดยที่ $|A^*|$ คือ จำนวนคำตอบที่แท้จริง

d_i คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y

$f_k^{\max}$ และ $f_k^{\min}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

$f_k(x)$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่หาได้

$f_k(y)$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่แท้จริง

2.8.2 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

การวัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน (Li and Zheng, 2009) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นมีการกระจายอย่าง

สม่ำเสมอ และถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพสูง โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ (2.12-2.13)

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{|A|-1} \left| d_i - \bar{d} \right|}{d_f + d_l + \left(|A| - 1 \right) \bar{d}} \tag{2.12}$$

เมื่อ $$d_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{2} \left(\frac{f_k(x_i) - f_k(x_{i+1})}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \tag{2.13}$$

โดยที่ d_f และ d_l คือ ระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน (Extreme solution) ของเส้นของเขตของกลุ่มคำตอบที่หาได้

$\bar{d}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i คือ ระยะห่างของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในเซตคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อ $i = 1,2,\ldots,|A|-1$

$|A|$ คือ จำนวนคำตอบที่หาได้

2.8.3 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) เป็นการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบที่ได้ว่าอยู่บนเส้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) เป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (Gen and Lin, 2005) ถ้ากลุ่มคำตอบที่หาได้เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่แท้จริงค่าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้จะมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพสูง โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ (2.14)

$$Ratio = \frac{\left| S_j - \left\{ x \in S_j \mid \exists_y S : y \prec x \right\} \right|}{\left| S_j \right|} \tag{2.14}$$

โดยที่ S_j คือ เซตคำตอบที่ j เมื่อ $j = 1,2,\ldots,J$

S คือ การร่วมกันของ j เซตคำตอบ ซึ่ง $S = S_1 \cup S_2 .. \cup S_J$

x คือ เซตคำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y \prec x$ คือ คำตอบ x เด่นกว่าคำตอบ y

2.9 ผลกระทบจากการเรียนรู้

ทฤษฎีผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) ถูกนำมาประยุกย์ใช้ในงานวิจัยครั้งแรกโดย Wright (1936) ได้ประยุกต์ผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาในอุตสาหกรรมการประกอบเครื่องบิน เส้นการเรียนรู้หรือบางครั้งเราเรียกว่า เส้นประสบการณ์ (Experience Curves) มีพื้นฐานอยู่บนหลักฐานข้อมูลขององค์กรธุรกิจ เช่น คนขององค์กรจะทำได้ดีขึ้นถ้าเขามีความพยายามทำซ้ำแล้วทำซ้ำอีก เส้นการเรียนรู้ของแรงงานต่อชั่วโมงต่อหน่วย (Labor-Hours Per Unit) กับ จำนวนหน่วยผลผลิตที่ผลิตได้ โดยทั่วไปจะมีรูปแบบการกระจายแบบ Negative Exponential ดังภาพที่ 2.12 ถ้าหากว่ามีการเรียนรู้เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิต ผลกระทบจากการเรียนรู้จะมีผลต่อการวางแผนการผลิต และมีผลกระทบต่อการคำนวนต้นทุนการผลิต

การนำผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตนั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดช่องว่างของการจัดตารางตามทฤษฎี และเวลาการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำงานจริง การจัดตารางภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้นั้นจะเป็นการวางแผนการผลิตในระยะสั้น (Biskup, 2008) ทฤษฎีการเรียนรู้จะตั้งสมมติฐานว่าการผลิตจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.15

$$P_{[k]} = P_{[1]} k^{a} \tag{2.15}$$

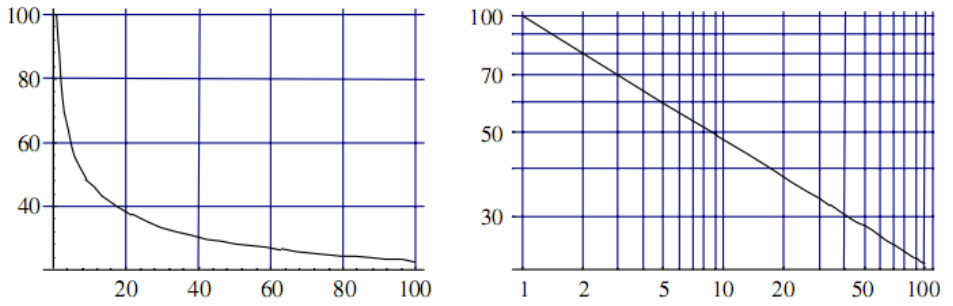
เมื่อ $P_{[k]}$ คือ เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ชิ้นที่ k เมื่อได้ทำการผลิตมาแล้วจำนวน k ชิ้น

$P_{[1]}$ คือ เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ชิ้นแรก

a คือ ค่า Learning Index ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของ Learning Rate (LR) ซึ่งค่าของ a สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$a = \frac{\log LR}{\log 2} = log_2 LR \tag{2.16}$$

ถ้ากำหนดให้ค่าผลกระทบจากการเรียนรู้เท่ากับ 80% จะได้ค่า $a = log_2 0.8 = -0.322$ ถ้าเวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ชิ้นแรกเท่ากับ 100 ดังนั้น จะได้ $P_{[k]} = 100k^{-0.322}$ ซึ่งเส้นโค้งการเรียนจะอธิบายได้ว่าเวลาการทำงานจะขึ้นอยู่กับจำนวนผลิตภัณฑ์สะสมที่ได้ทำการผลิตดังภาพที่ 2.12



The learning curve with a learning rate of 80% depicted in a normal and a double-logarithmic coordinate system.

ภาพที่ 2.12 กราฟแสดงเส้นโค้งการเรียนรู้ (a) และกราฟ Log Scale ของเส้นโค้งการเรียนรู้ (b)

ในสมการที่ (2.15) สมการจะเกี่ยวข้องกับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตสะสม และค่าผลกระทบจากการเรียนรู้เท่านั้น ดังนั้นการลดต้นทุนจะขึ้นอยู่กับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเป็นจำนวนมาก แต่สมการไม่ได้กล่าวถึงการจัดการและการเพิ่มประสิทธิภาพหรือผลกระทบด้านต้นทุน เงินลงทุน ค่าใช้จ่ายในการอบรมพนักงาน และการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมการทำงานด้านอื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อการเรียนรู้ด้วย ในกรณีที่ความต้องการคงที่ เวลาที่ลดลงเนื่องจากผลกระทบจากการเรียนรู้จะทำให้เกิดค่าเก็บรักษาสินค้าสูงขึ้น และเป็นผลให้ขนาดของรุ่นเล็กลง

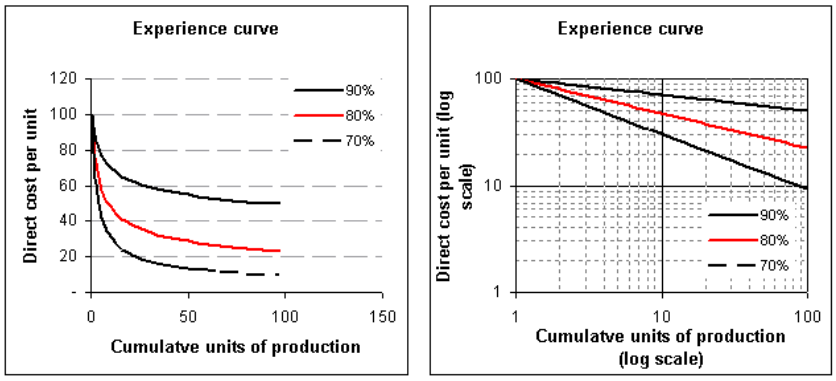
ปัญหาการจัดตารางการผลิตส่วนใหญ่มักจะเกิดจากงานที่ทำมีความแตกต่างกันลักษณะของสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิตที่ต้องใช้ความสามารถของพนักงานสูง เช่น

- การตั้งเครื่องจักร
- การทำความสะอาดเครื่องจักรหลังจากกระบวนการผลิตเสร็จสิ้น หรือครบรอบเวลาการทำงาน
- งานควบคุมเครื่องจักร
- การวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักร
- การซ่อมแซมเครื่องจักรที่ชำรุด
- การอ่าน ทำความเข้าใจ หรือตีความข้อมูลที่ได้จากเครื่องจักร
- งานที่มีลักษณะต้องใช้ฝีมือในการทำงาน

ผลกระทบจากการเรียนรู้จะมีความสำคัญเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต ยกตัวอย่างเช่น

- พนักงานใหม่
- การซื้อเครื่องจักรใหม่ หรือ การเปลี่ยนเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต
- กระบวนการทำงานเปลี่ยนไปซึ่งอาจจะเกิดจากความต้องการภายในหรือภายนอก
- การผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ซึ่งยังไม่เคยทำมาก่อน

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมเล็กน้อย เช่น การปรับปรุงซอฟแวร์ การออกแบบเอกสารแบบใหม่ การบริหารจัดการสินค้าคงคลัง ก็เป็นสาเหตุให้พนักงานเกิดการเรียนรู้ขึ้น การจะนำผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาใช้ในจัดตารางผลิตนั้น ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมในกระบวนการผลิต และค่าการเรียนรู้ที่น้อยๆ จะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ได้มากกว่าค่าการเรียนรู้ที่มาก แสดงดังภาพที่ 2.13

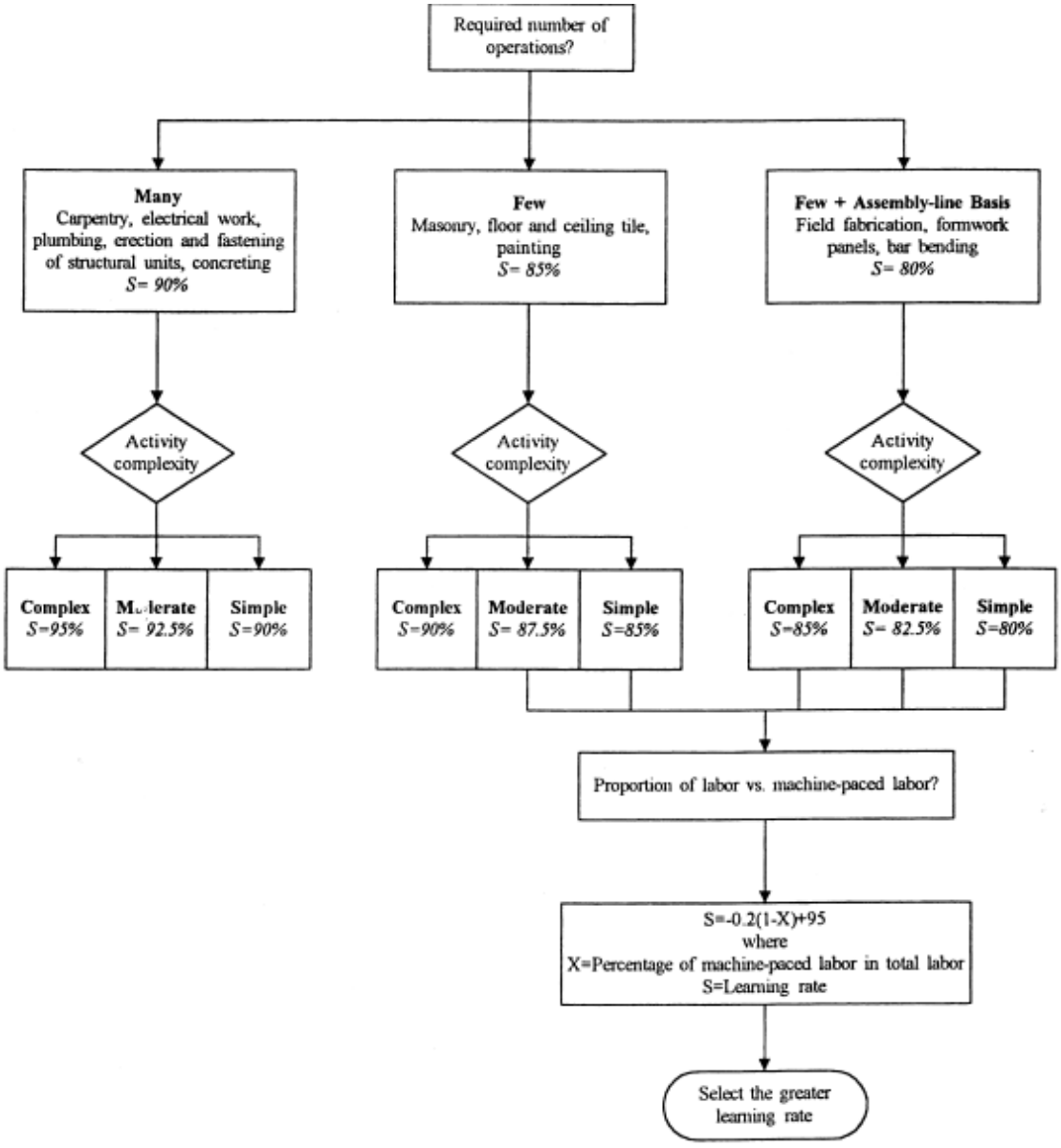


ภาพที่ 2.13 แสดงผลกระทบจากการเรียนรู้ในระดับต่างๆ

ค่าการเรียนรู้ที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะของงานที่ทำ และความสามารถของพนักงานแต่ละคนที่มีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งต้องพิจารณาว่างานนั้นมีความซับซ้อนมากน้อยเพียงใด งานนั้นมีความซับซ้อนมาก ปานกลางหรือเป็นงานอย่างง่าย งานที่มีความซับซ้อนมากจะมีค่าการเรียนรู้ที่ต่ำ ส่วนงานที่ไม่มีความซับซ้อนจะเกิดการเรียนรู้ได้มากกว่า ดังภาพที่ 2.14 สัดส่วนการทำงานระหว่างคนงานและเครื่องจักรเป็นเท่าใด ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าการเรียนรู้ (Arditi et al., 2001) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนการทำงานระหว่างคนงานและเครื่องจักรที่มีผลกระทบต่อค่าการเรียนรู้

ลักษณะของงาน	สัดส่วนของคนงานและเครื่องจักร		ค่าการเรียนรู้ (%)
	คนงาน (%)	เครื่องจักร (%)	
การประกอบแบบเน้นแรงงาน	75	25	80
การประกอบแบบเน้นทั้ง 2 ส่วน	50	50	85
การประกอบแบบเน้นเครื่องจักร	25	75	90



ภาพที่ 2.14 ค่าการเรียนรู้ที่ระดับต่างๆ

ผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) จะกล่าวถึงสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ ผลกระทบจากการเรียนรู้ที่ขึ้นกับตำแหน่งของการจัดลำดับหรือผลกระทบจากการเรียนรู้ที่เกิดจากการทำงานนั้นๆ มาแล้ว (Position Based Learning Effect) และ ผลกระทบจากการเรียนรู้ที่เกิดจากการผลรวมของเวลาการทำงานก่อนหน้าหรือเกิดจากประสบการณ์การทำงานของพนักงาน (Sum-Processing Time Based Learning Effect) ดังนี้

2.9.1 ผลกระทบจากการเรียนรู้แบบ Position-Based

ผลกระทบจากการเรียนรู้แบบ Position-Based มีสมมติฐานว่าการเรียนรู้เกิดจากเวลาการทำงานที่เป็นอิสระ เช่น การตั้งเครื่องจักร เวลาของการทำงานส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเครื่องจักรด้วยระบบอัตโนมัติและมีความเกี่ยวข้องกับคนน้อย เช่น การผลิต Memory Chips และ Circuit Boards หรือ Running Bottling Plants

2.9.2 ผลกระทบจากการเรียนรู้แบบ Sum-of-Processing-Time

ผลกระทบจากการเรียนรู้แบบ Sum-of-Processing-Time เป็นผลที่เกิดจากการรวมเวลาของการทำงานก่อนหน้าหรือเกิดจากประสบการณ์การทำงานของพนักงาน เช่น ในกรณี Offset Printing ผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนทำได้ยาก การผลิต High-end Electric Tools การซ่อมบำรุงของเครื่องบิน และ Pimping Car เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลกระทบจากการเรียนรู้แบบ Sum-of-Processing-Time Based Learning Effect ซึ่งโดยทั่วไปเวลาการทำงานจริงของงานจะไม่สามารถคำนวณได้หากไม่มีความรู้เรื่องเวลาการทำงานปกติหรือเวลาการทำงานจริงของงานที่ได้จัดไปแล้ว โดยได้ประยุกต์งานวิจัยของ Kuo and Yang (2006b) ที่ได้เสนอปัญหากลุ่มการจัดตารางบนเครื่องจักรเดี่ยว (Single Machine Group Scheduling Problem) ระหว่างงานสองงานที่ทำต่อเนื่องกันที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เมื่อเวลาตั้งเครื่องไม่มีความสำคัญ อย่างไรก็ตามเวลาตั้งเครื่องของแต่ละกลุ่ม (A Sequence-Independent Group Setup, Sg) จะมีความสำคัญสำหรับงานแรกของกลุ่ม g ที่สามารถเริ่มงานได้ ในแต่ละกลุ่มจะมีค่าดัชนีการเรียนรู้ (Learning Index, a_g) ค่าการเรียนรู้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.17)

$$P_{igr} = P_{ig}(1 + P_{[1]g} + P_{[2]g} + \cdots + P_{[r-1]g})^{a_g} \qquad (2.17)$$

เมื่อ P_{igr} คือเวลาการทำงานของงาน i ในกลุ่ม g เมื่อจัดตารางในตำแหน่งที่ r

P_{ig} และ $P_{[i]g}$ เป็นเวลาการทำงานปกติของงาน i และเป็นงานที่ i_{th} ของกลุ่ม g

งานวิจัยเรื่องผลกระทบจากการเรียนรู้ของ Kuo and Yang (2006a,b,c) จะมีจุดอ่อนที่เหมือนกันคือ สมมติฐานว่าเวลาการทำงานจริง เช่น งานในตำแหน่งที่ r_{th} จะขึ้นอยู่กับผลรวมของเวลาการทำงานปกติของงานที่เกิดขึ้นก่อนหน้า $r-1$ อย่างไรก็ตามยกเว้นงานแรก งานอื่นๆ จะต้องมีเวลาการทำงานน้อยกว่าเวลาการทำงานปกติ Yang and Kuo (in press) จึงแก้ไขจุดอ่อนนี้โดยเสนอ ให้ผลกระทบจากการเรียนรู้อาศัยผลรวมของเวลาการทำงานจริงดังสมการที่ (2.18)

$$P_{igr} = P_{ig}\left(1 + P^{A}_{[1]g} + P^{A}_{[2]g} + \cdots + P^{A}_{[r-1]g}\right)^{a_g} = P_i(1 + \textstyle\sum_{k=1}^{r-1} P^{A}_{[k]g}\,)^{a_g} \qquad (2.18)$$

เมื่อ P_{igr} คือ เวลาการทำงานเมื่อมีผลกระทบจากการเรียนรู้ของงาน i ในกลุ่ม g เมื่อจัดตารางในตำแหน่งที่ r

P_{ig} คือ เวลาการทำงานปกติของงาน i ในกลุ่ม g ตามลำดับ

$P^{A}_{[k]g}$ คือ เวลาการทำงานจริงของงานที่ได้ทำก่อนหน้าไปแล้ว (k คืองานที่ *1* ถึง $r-1$) ในกลุ่ม g (เมื่อ A คือ เวลาการทำงานจริงที่ไม่ใช่เวลาการทำงานปกติ ยกตัวอย่างเช่น $P^{A}_{ig} = P_{igr}$ ถ้างาน i ของกลุ่ม g ถูกจัดวางในตำแหน่ง r)

a_g คือ ค่าดัชนีการเรียนรู้ (Learning Index) ในแต่ละกลุ่ม g

2.10 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรง

- Becker และ Scholl (2006) ได้อธิบายลักษณะของสายการประกอบที่มีลักษณะต่างๆ ได้แก่ สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์และสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม อธิบายสายการประกอบที่แบ่งประเภทตามการเคลื่อนที่ของพนักงาน ซึ่งได้แก่ สายการประกอบแบบก้าวเดิน (Pace Line) กับสายการประกอบแบบไม่ก้าวเดิน (Unpace Line) และได้กลาวถึงรูปแบบของการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรง 4 ประเภท ได้แก่ การหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดเมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงาน (SALBP-1) การหาจำนวน

รอบเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด เมื่อกำหนดจำนวนสถานีงาน (SALBP-2) การหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดและรอบเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด (SALBP-E) และปัญหาที่กำหนดทั้งจำนวนสถานีงานและรอบเวลาการทำงานมาให้ (SALBP-F)

2.10.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน

- Bartholdi (1993) ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านสำหรับโรงงานผลิตรถยนต์ โดยโปรแกรมนี้มีความสามารถสูง สามารถใช้ได้จริง มีวัตถุประสงค์คือ หาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด และอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีของสายการประกอบแบบสองด้าน
- Kim, Kim and Kim (2000) ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน โดยการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เข้ามาใช้ในการเพื่อแก้ปัญหาการหารอบเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด เมื่อกำหนดจำนวนสถานีงาน ภายใต้ข้อจำกัดของตำแหน่ง (Position Constrains) จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างปัญหาต่างๆ พบว่าวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่ดี
- Lee, Kim and Kim (2001) ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน ซึ่งได้ประยุกต์มาจากการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดี่ยว (SALB) โดยพิจารณาจากค่าดัชนีความสัมพันธ์ของงาน (Index of Work Relatedness) และดัชนีความเลื่อมล้ำของงาน (Index of work Slackness) โดยการนำเสนอการจัดงานที่มีลักษณะคล้ายกันไว้ในกลุ่มเดียวกัน แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับวิธีฮิวริสติกอื่นๆ เพื่อวัดผลการจัดสมดุลสายการประกอบ พบว่าฮิวริสติกที่เสนอให้คำตอบที่ดี
- Simaria and Vilarinho (2007) ได้เสนอแนวทางการนำแอนท์โคโลนีออพติไมซ์เซชัน (Ant Colony Optimization) เข้ามาจัดสมดุลสายการผลิตแบบ

สองด้าน ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด รวมถึงเสนอวิธีทางคณิตศาสตร์ในการแก้ไขปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ และได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับ Lee et al. (2001) พบว่า แอนท์โคโลนีออพติไมซ์เซชันอัลกอริทึมนั้นให้ผลลัพธ์ที่ดี

- Wu et al. (2008) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับวิธีการแตกกิ่งและการกำหนดขอบเขต (Branch-and-Bound Algorithm) ในการแก้ไขปัญหาการจัดสมดุลการผลิตแบบสองด้าน โดยประยุกต์ใช้การเขียนโปรแกรม Visual C 6.0 ซึ่งจากการทดลองกับปัญหาขนาดต่างๆ พบว่า ขนาดของปัญหาเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะเมื่อจำนวนงานเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ของคำตอบกว้างขึ้น ทำให้ยากในการหาคำตอบที่ดีที่สุด
- Ozcan and Toklu (2009a) ได้เสนอรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ในการนำโปรแกรมเป้าหมาย (Gold Programming) และโปรแกรมเป้าหมายแห่งความคลุมเครือ (Fuzzy Gold Programming) เข้าใช้ในการตัดสินใจปัญหาการจัดสมดุลสายการผลิตแบบสองด้าน โดยมีหลายวัตถุประสงค์ วัตถุประสงค์หลักคือการหาจำนวนคู่สถานีงานที่น้อยที่สุด และวัตถุประสงค์รองคือการหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด เมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงานภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดการจัดสรรพื้นที่ (Zoning Constraints) จากการวิเคราะห์ผลพบว่าการนำโปรแกรมเป้าหมาย และโปรแกรมเป้าหมายแห่งความคลุมเครือ มาใช้ในการตัดสินใจนั้นมีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพสามารถใช้เป็นทางเลือกในการจัดสมดุลสายการผลิตในสภาวะแวดล้อมที่มีหลายปัจจัยได้

2.10.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม

- Kim, Kim and Kim (2000) ได้เสนอแนวทางการนำวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms : GAs) มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้าน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มี

จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับวิธี Integer Programming (IP) พบว่า วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า และสามารถให้คำตอบที่ดีภายในระยะเวลาที่น้อยกว่าวิธี Integer Programming เป็นอย่างมาก

- Mansouri (2005) ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ในกรณีที่มีหลายวัตถุประสงค์ ด้วยวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (MOGA) ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การหาค่าความผันแปรในการผลิตที่ต่ำที่สุด และการหาค่าในการปรับตั้งเครื่องที่ต่ำที่สุด ด้วยการค้นหาคำตอบแบบ Pareto-Optimal Frontier หรือ Locally Non-dominated Frontier และได้มีการอธิบายหลักการพื้นฐานของการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ และพื้นฐานของตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Operator) คือ การครอสโอเวอร์ (Crossover) การอินเวอร์ชัน (Inversion) และการมิวเตชัน (Mutation) ซึ่งช่วยให้กระบวนการค้นหาคำตอบสามารถให้คำตอบที่มีความหลากหลาย

2.10.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

- Coello Coello, Pulido and Lechuga (2004) ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธี Particle Swarm Optimization (PSO) โดยนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับ Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), Pareto Archived Evolution Strategy (PAES) และ Microgenetic Algorithm for Multiobjective Optimization (Micro-GA) โดยพิจารณาตัวชี้วัด 3 ตัว คือ Generational distance (GD), Spacing (SP) และ Error ratio (ER) จากการทดสอบพบว่า MOPSO ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ
- Rameshkumar, Suresh and Mohanasundaram (2005) ได้เสนออัลกอริทึม Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน โดยมีวัตถุประสงค์ คือ มีเวลาปิดงาน (Makespan) ที่น้อยที่สุด โดยทำการเปรียบเทียบกับ GA และ

Hybrid Genetic Algorithm (HGA) พบว่าในปัญหาขนาดเล็ก DPSO ให้คำตอบที่ได้กว่า GA และ HGA แต่เมื่อปัญหาขนาดใหญ่ HGA ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า จากนั้นจึงทำการปรับปรุงอัลกอริทึมโดยการนำการค้นหาเฉพาะที่มาช่วยในการหาคำตอบและพบว่าวิธีดังกล่าวให้ผลลัพธ์ที่ดี

- Liao, Tseng and Luarn (2007) ได้พัฒนาอัลกอริทึม Particle Swarm Optimization (PSO) ในการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน โดยอาศัยอนุภาค (particle) และทิศทางในการเคลื่อนที่ (Velocity) เพื่อไปหาคำตอบ และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม Continuous PSO และ GA พบว่าวิธี PSO ที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับตัวอื่นๆ นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ร่วมกับ PSO (PSO-LS) และนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับ ACO พบว่า PSO-LS ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในบางปัญหา
- Tseng and Liao (2008) ได้เสนอการนำอัลกอริทึม Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) มาใช้ร่วมกับอัลกอริทึม Net Benefit of Movement (NBM) ในการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน และทำการเปรียบเทียบกับ GA และ Hybrid Genetic Algorithm (HGA) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ Minimize the Total Weighted Earliness and Tardiness และพบว่า อัลกอริทึม DPSO ที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับตัวอื่นๆ นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ร่วมกับ DPSO (DPSO-LS) พบว่า DPSO-LS ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ
- ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ได้เสนอวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK) และ หาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ โดยมีวัตถุประสค์ 4 วัตถุประสงค์คือ จำนวนคู่สถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด เปรียบเทียบผลกับวิธี NSGAII, DPSO, COMSOAL พบว่าวิธีค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อปัญหามี

ขนาดใหญ่ รองลงมาคือวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ

2.10.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

- Simon (2008) ได้ทำการศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมใหม่ขึ้นมา โดยอาศัยแนวคิดในการอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ ที่เรียกว่า Biogeography Based Optimization : BBO เพื่อนำมาแก้ปัญหาหารหาค่าที่ดีที่สุด และได้ทำการวิเคราะห์ผลโดยการเปรียบเทียบผลกับอัลกอริทึมอื่นๆ ผลปรากฏว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization : BBO) สามารถแก้ปัญหาได้เช่นเดียวกับวิธี Genetic Algolithm (GA) และ Paticle Swarm Optimization (PSO) แต่ให้ผลที่ดีกว่า ทำให้สามารถใช้ BBO ได้กับหลายปัญหาที่มีลักษณะคล้ายกับปัญหาที่สามารถแก้ได้ด้วยวิธี GA หรือ PSO
- Abell and Du (2010) ได้ทำการวิจัยโดยนำ BBO มาประยุกต์ใช้ในปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้น หรือ Complex System Family ซึ่งจะแตกต่างปัญหาการค่าหลายวัตถุประสงค์แบบเดิม (Traditional Problem) เนื่องจากการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์แบบเดิมจะทำการกำหนดจำนวนวัตถุประสงค์อย่างชัดเจน และเป็นปัญหาที่เฉพาะเจาะจง แต่ปัญหาแบบ Complex System จะไม่มีการกำหนดวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน จะทำการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าทั้งวัตถุประสงค์และข้อจำกัดต่างๆ ซึ่งทำให้ปัญหานี้ใกล้เคียงกับปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ผู้วิจัยได้นำเสนอ BBO/mdo ขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ และผลที่ได้สรุปว่า BBO/mdo มีความสอดคล้องกับปัญหา และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหานี้
- Mo and Xu (2010) ได้ทำการวิจัยโดยนำ BBO เข้ามาใช้ในแก้ปัญหา Travelling Salesman โดยผลที่ได้จากการทดลองกับปัญหาตัวอย่าง

Oliver30, Eil50, Eil75 และ KroA100 ปรากฏว่า TSPBMA (Travelling Salesman Biogeography Migration Algorithm) ให้ผลที่ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าอัลกอริทึมอื่นๆที่นำเปรียบเทียบ ได้แก่ ACO, GA, PSO, IA และ Fish Swarm และได้เสนอว่า BBO เป็นแนวทางที่เหมาะในการนำมาแก้ปัญหานี้

- Kundra and Sood (2010) ได้ทำการประยุกต์โดยการนำ PSO มารวมกับ BBO เพื่อเส้นทางที่ดีที่สุด อาศัยหลักการของการเดินทางที่หลีกเลี่ยงเส้นทางที่มีความยุ่งยากซับซ้อน โดยนำ PSO มาใช้ในการหาเส้นทาง เก็บข้อมูลเส้นทางที่ยุ่งยากลำบาก และ BBO นำมาใช้ในการหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ยุ่งยากลำบากนั้น พบว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพที่ดี สามารถค้นหาเส้นทางที่ใกล้ รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพที่สุดในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน
- Ma (2010) ได้ทำการศึกษาการแก้ปัญหาด้วย BBO โดยได้ทำการแบ่งรูปแบบของการอพยพออกมา 6 รูปแบบ และศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบแต่ละรูปแบบ ได้แก่ จำนวนประชากร ขนาดของปัญหา อัตราการกลายพันธุ์ (Mutaion Rate) และอัตราการอพยพที่มากที่สุด (Migration Rate) โดยเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ ได้แก่ ACO, DE, ES, GA และ PSO สรุปได้ว่า BBO เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ และรูปแบบการอพยพแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Migration Models) มีค่าดีกว่ารูปแบบการอพยพแบบเส้นตรง (Linear Migration Models)

2.10.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากการเรียนรู้

- Arditi, Tokdemir and Shu (1998) ศึกษาผลของการลดเวลาการทำงานเมื่อเกิดการเรียนรู้ขึ้น (Learning effect) ภายใต้การจัดตารางเครื่องจักรเดี่ยว (Single Machine) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการทำงานและลดทรัพยากรที่ต้องการให้น้อยที่สุด โดยนำ Learning Rate มาใช้ในการพยากรณ์เพื่อคำนวณหาเวลาและการวางแผนกำลังคน

- Mosheiov (2001a) ทำการจัดงานตามกฎเวลาเวลาการส่งงานเร็วที่สุด (EDD) บนเครื่องจักรเดี่ยว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เวลาล่าช้าของงานมากที่สุดมีค่าน้อยที่สุด ใช้กฎ Weighted Shortest Processing Time (WSPT) เพื่อให้เวลาปิดงานของระบบแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าน้อยที่สุด และกฎของ Moore's Algorithm เพื่อทำให้จำนวนงานล่าช้ามีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐานของผลกระทบจากการเรียนรู้ และยังได้แสดงให้เห็นว่าปัญหาการหาค่าเวลาปิดงานของระบบที่น้อยที่สุดบนเครื่องจักรเดียวสามารถหาค่าที่ดีที่สุดได้จากกฎการจัดงานแบบ SPT
- Mosheiov and Sidney (2003) ได้เสนอว่าผลกระทบจากการเรียนรู้ที่เกิดขึ้นกับพนักงานนั้นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับงานนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าพนักงานเคยทำงานนั้นมาก่อนแล้วจะทำให้เกิดการเรียนรู้ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับงานที่ไม่เคยทำมาก่อนจะเกิดการเรียนรู้ได้มากกว่าในอนาคต และสามารถแก้ปัญหา $O(n^3)$ ได้ และยังได้พิจารณาปัญหาการหาค่า Flow-Time ที่น้อยที่สุดบนเครื่องจักรที่ไม่เกี่ยวข้องกัน เมื่อกำหนดจำนวนเครื่องจักร m ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการจัดสรรงานให้กับเครื่องจักรที่มีอยู่
- Biskup and Simons (2004) ได้พิจารณาเป้าหมายเพื่อให้ค่าปรับที่เกิดจากการส่งงานก่อนกำหนด ส่งงานช้ากว่ากำหนด และเงินลงทุนเกี่ยวกับการเรียนรู้น้อยที่สุด หลังจากทำการพิสูจน์พบว่าสามารถแก้ปัญหา $O(n^3)$ ได้ แต่อย่างไรก็ตามการรวมผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาในปัญหาการจัดตารางนั้นค่อนข้างลำบาก และปัญหาการจัดตารางส่วนใหญ่จะสนใจเป้าหมายเกี่ยวกับเวลา (Time-Based) มากกว่าเป้าหมายด้านเงินลงทุน (Cost-Based)
- Lee and Wu (2004) พิจารณาปัญหา Two-Machine Flowshop โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เวลาปิดงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด ภายใต้

สมมติฐานว่าผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้นในแต่ละเครื่องจักรแยกกัน สำหรับกรณีที่มีเครื่องจักรหลายเครื่อง มีรูปแบบ NP-Hard และได้พัฒนาโดยการใช้ Branch-and-Bound ทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ 35 งานในเวลาที่ยอมรับได้

- Kuo and Yang (2006b) ได้เสนอผลกระทบจากการเรียนรู้ที่เกิดจากการผลรวมของเวลาการทำงานก่อนหน้าหรือเกิดจากประสบการณ์การทำงานของพนักงาน (Sum-Processing Time Based Learning Effect) โดยเน้นที่ปัญหากลุ่มการจัดตารางบนเครื่องจักรเดี่ยว (Single Machine Group Scheduling Problem) ระหว่างงานสองงานที่ทำต่อเนื่องกันที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน
- Koulamas and Kyparisis (2007) เสนอผลกระทบจากการเรียนรู้ภายใต้สิ่งแวดล้อมแบบใหม่สำหรับการจัดตาราง และได้ทำการพิสูจน์ผลการทดลองในกรณีของปัญหา Two-Machine Flowshop ที่ขึ้นกับตำแหน่งการเรียนรู้ (Position-Based Learning) สามารถที่จะแก้ปัญหาได้ด้วยการจัดตารางตามกฎ SPT
- Toksari et al (2008) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเรียนรู้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบแบบทั่วไป และสายการประกอบแบบตัวยู (U-Line) เพื่อหาจำนวนสถานีงานน้อยที่สุดเมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time) สรุปว่าถ้าค่าของรอบเวลาการทำงานเพิ่มขึ้น ผลจากประสบการณ์ในการเรียนรู้มีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนขั้นงานในแต่ละสถานีงาน

บทที่ 3

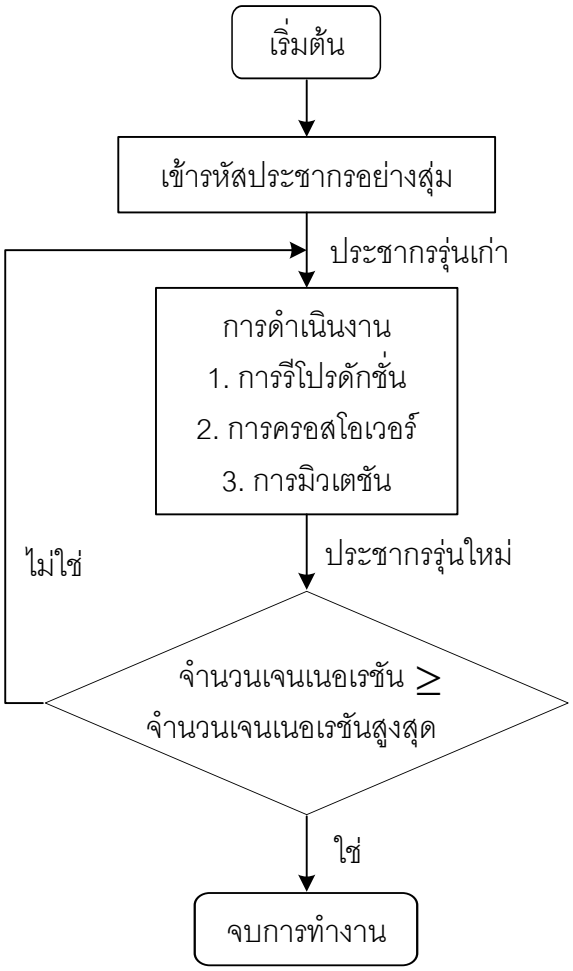
ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีเจนเนติกอัลกอรึทึม และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีเจนเนติกอัลกอรึทึม (Genetic Algorithm; GA) ขั้นตอนการทำงานและการนำวิธีเจนเนติกอัลกอรึทึมมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ และตัวอย่างการคำนวณ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยเจนเนติกอัลกอริทึมของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยที่แตกต่างกัน 5 ปัญหา

3.1 เจนเนติกอัลกอรึทึม (Genetic Algorithm : GAs)

เจนเนติกอัลกอรึทึมเป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมโดยวิธีฮิวริสติก เป็นวิธีที่ง่ายในการหาคำตอบของปัญหาต่างๆ เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนทำให้การแก้ปัญหาต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงได้ประยุกต์การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีฮิวริสติกเนื่องจากคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานมากนัก รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายไม่สูงอีกด้วย

การหาคำตอบในวิธีเจนเนติกอัลกอรึทึมอาศัยหลักการของกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural Selection) และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Natural Genetics) ว่าด้วยทฤษฎีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมไปสู่ลูกหลาน โดยทำการเปรียบเทียบสตริงคำตอบ (String) กับโครโมโซม (Chromosome) เปรียบเทียบคุณลักษณะของสตริงคำตอบ (Character) กับยีนส์ (Gene) เมื่อผ่านกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมต่างๆ แล้วจะทำให้เกิดคำตอบใหม่ที่มีความเหมาะสมที่สุด หรือมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด ขั้นตอนพื้นฐานของเจนเนติกอัลกอรึทึม มีรายละเอียดดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนพื้นฐานของวิธีเจนเนติกอัลกอรึทึม

3.1.1 การเข้ารหัสประชากรอย่างสุ่ม

การเข้ารหัสประชากรอย่างสุ่มคือการแปลงค่าพารามิเตอร์ให้อยู่ในรูปของสตริง เมื่อกำหนดการเข้ารหัสแล้วจึงสร้างประชากรเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่ม

3.1.2 การดำเนินการ

เมื่อมีการสร้างประชากรเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการการถ่ายทอดทางพันธุกรรม ซึ่งประกอบด้วยการดำเนินการ 3 ขั้นตอน คือ การรีโปรดักชัน (Reproduction) การครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเตชัน (Mutation) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การรีโปรดักชัน เป็นการหาค่าเหมาะสมของสตริงคำตอบโดยดูจากค่าฟังก์ชันเป้าหมายหรือค่าที่ต้องการหาค่าเหมาะสม (Fitness) ซึ่งอาจจะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุด สตริงที่มีมี

ความเหมาะสมสูงจะมีโอกาสในการถ่ายทอดความเหมาะสมนี้ไปสู่ลูกหลานสูงด้วยเช่นกัน โดยทฤษฎีนี้พัฒนามาจาก ชาร์ส ดาร์วิน ที่ว่าด้วยกระบวนคัดเลือกตามธรรมชาติ ตามทฤษฎีผู้อยู่รอดที่มีความเหมาะสม (Survival of Fittest) ผู้ที่แข็งแรงย่อมมีโอกาสที่จะอยู่รอดจากการถูกล่า โรคภัยและอุปสรรคอื่นๆ ทำให้สามารถสืบพันธุ์ต่อไปได้ วิธีการที่ง่ายในการรีโปรดักชันคือการสร้างวงล้อรูเล็ตตามสัดส่วนค่าความเหมาะสมของแต่ละสตริง แล้วทำการหมุนวงล้อรูเล็ตเพื่อเลือกสตริงที่จะเป็นตัวแทนในการสืบพันธุ์จนได้ครบจำนวนสตริงตามที่ต้องการ เพื่อใช้ในการดำเนินการขั้นถัดไป โดยสตริงที่มีความเหมาะสมมากก็จะมีโอกาสในการถูกเลือกสูงตามไปด้วย

- การครอสโอเวอร์ เป็นกระบวนการที่ทำหลังจากผ่านกระบวนการรีโปรดักชัน โดยจะทำการจับคู่กับสมาชิกตัวอื่นเพื่อทำการสลับ แลกเปลี่ยนค่าในส่วนของสตริงคำตอบ โดยตำแหน่งของสตริงที่ทำการแลกเปลี่ยนค่านี้จะได้มาอย่างสุ่ม

- การมิวเตชัน เป็นการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริง เพื่อให้สตริงเกิดการเปลี่ยนรูปเพื่อช่วยป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ไม่อาจเรียกคืนเช่นคำตอบอาจเข้าไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่หลังจากผ่านการรีโปรดักชันและการครอสโอเวอร์แล้ว

3.2 ขั้นตอนการทำงานของเจนเนติกอัลกอรึทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธี Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II; NSGA-II มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

กำหนดให้ t แทนรอบการทำงาน

Pt แทนประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่

Qt แทนประชากรคำตอบรุ่นลูกหรือประชากรคำตอบใหม่

Rt แทนการรวมกันของประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่และประชากรคำตอบรุ่นลูก

N แทนจำนวนประชากร

1. Data input : รับข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน และด้านที่สามารถทำงานได้ของแต่ละขั้นงาน

2. Representation & Initialization : นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรคำตอบเริ่มต้น N ตัว ด้วยกระบวนการใส่รหัสคำตอบ (Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น Pt (Initial Population)

3. Evaluation : คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ

4. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้แต่ละประชากรคำตอบโดยใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) ค่าอันดับที่ได้นี้เรียกว่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) กลุ่มที่ดีที่สุดจะถูกจัดอันดับไว้ต่ำที่สุด

5. Density Information : คำนวณค่าความหนาแน่นให้กับแต่ละประชากรด้วยวิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

6. Selection : ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection โดยพิจารณาจากค่าความความแข็งแรง และค่าความหนาแน่น คำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากและมีความหนาแน่นมากจะมีโอกาสในการถูกเลือกสูง

7. Crossover : จับคู่คำตอบที่อยู่ใน Mating Pool เพื่อทำการครอสโอเวอร์โดยการแลกเปลี่ยนตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่จะทำการแลกเปลี่ยนจะได้มาอย่างสุ่ม และความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์จะมีค่าเท่ากับ Pc

8. Mutation : ทำการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงด้วยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ Pm โดยตำแหน่งที่ทำการสลับนี้จะได้มาอย่างสุ่ม หลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชันแล้วจะทำให้เกิดประชากรใหม่ที่เรียกว่าประชากรคำตอบรุ่นลูก

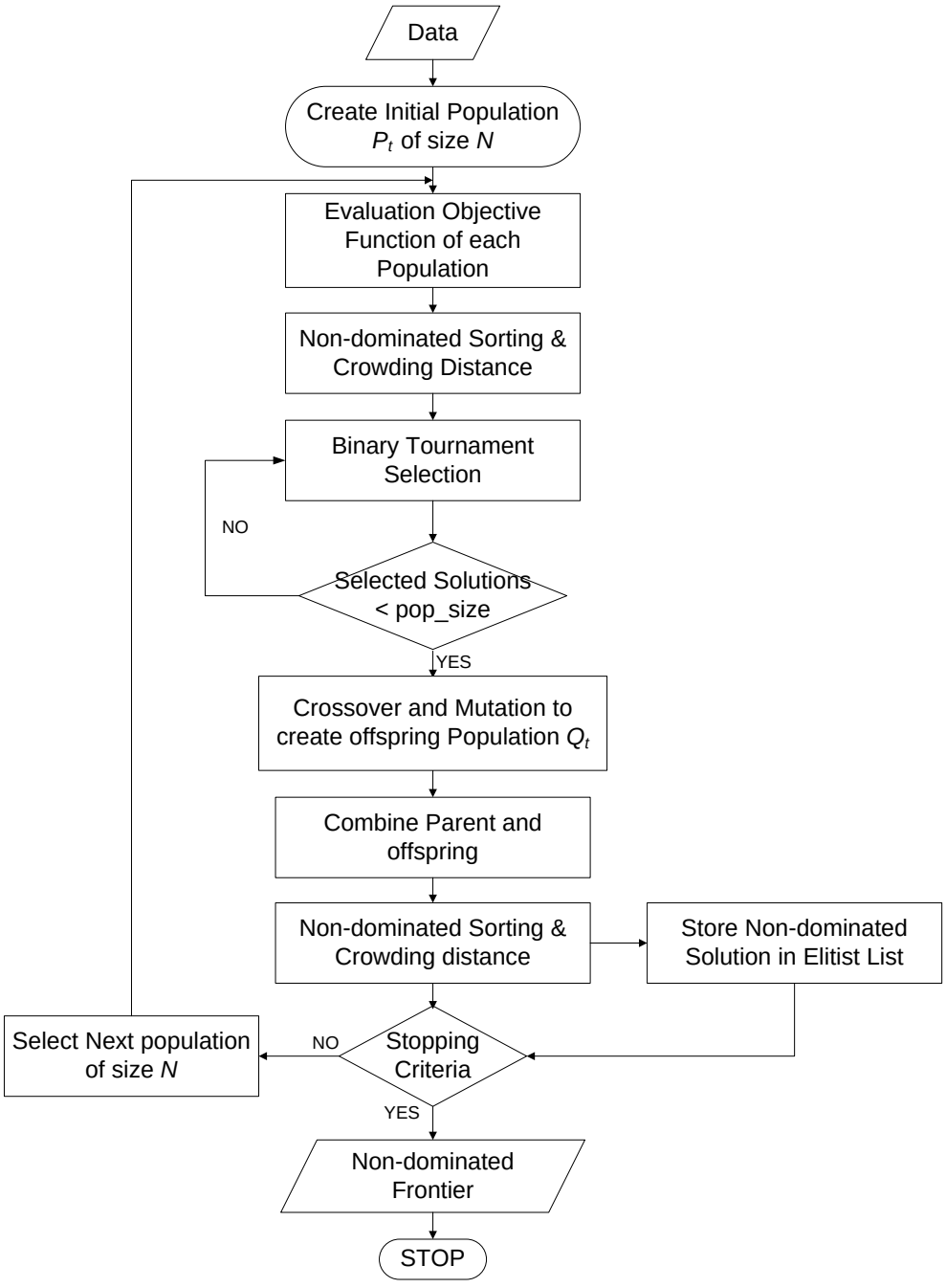
9. Combination Population : นำประชากรคำตอบเริ่มต้นมารวมกับประชากรคำตอบรุ่นลูก และเรียกประชากรคำตอบที่รวมกันนี้ว่าประชากรคำตอบ Rt

10. Selection Next Population : ทำการคัดเลือกประชากรคำตอบที่ดีที่สุดจากประชากรคำตอบ Rt โดยอาศัยหลักการ Non-dominated Sorting และ Crowding Distance (Dep et al., 2002) โดยจะพิจารณาสตริงที่อยู่ในลำดับที่ต่ำที่สุดก่อน (สตริงที่มีค่าเหมาะสมมากที่สุด) เท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น N ตัว เพื่อจะใช้เป็นประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชันถัดไป (ถ้าประชากรมีค่าอันดับที่เท่ากันจะคัดเลือกคำตอบโดยพิจารณาค่า Crowding Distance ที่มีค่ามากก่อน)

11. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : ทำการเก็บประชากรที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 ไว้เพื่อจะนำไปทำการปรับปรุง (Update) ในทุกๆเจนเนอเรชัน โดยจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากเจนเนอเรชันก่อนหน้าด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ได้ไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของรอบก่อนหน้าในการดำเนินการรอบถัดไป

12. Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันน้อยกว่าจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 11 ใหม่ ถ้าไม่ใช่ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

13. Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบและนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 11 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



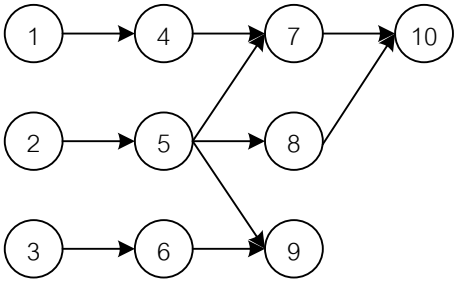
ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II

3.3 ตัวอย่างการนำวิธี NSGA-II ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

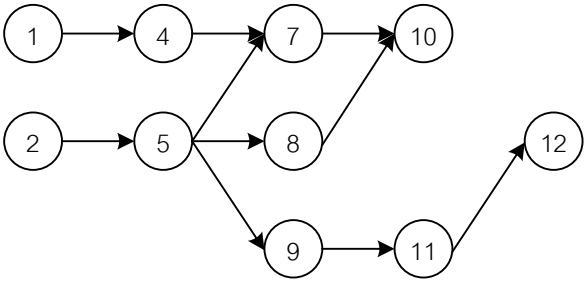
จากขั้นตอนของ NSGA-II ที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของปัญหา Kim et al., (2000) ที่ประกอบด้วย 12 ขั้นงาน และมี 2 ชนิดผลิตภัณฑ์ คือ A และ B เมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 ดังนี้

3.3.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

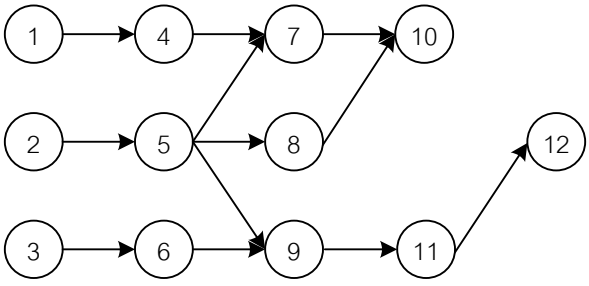
3.3.1.1 **สร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม** (Overall Precedence Diagram) แสดงดังภาพที่ 3.3



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A และ B

ภาพที่ 3.3 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)

3.3.1.2 **เวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน** แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Side	Model		
		A	B	Mean
1	L	2	3	2.5
2	R	3	3	3
3	E	2	0	1
4	L	3	2	2.5
5	E	1	2	1.5
6	L	1	0	0.5
7	E	3	2	2.5
8	R	3	1	2
9	E	2	1	1.5
10	E	2	3	2.5
11	E	0	2	1
12	R	0	1	0.5

3.3.1.3 **สร้าง** Precedence Matrix **จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม** ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์

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

3.3.1.4 พารามิเตอร์ที่เลือกใช้ของ NSGA-II

- จำนวนประชากรเบื้องต้น (N) 5 ตัว
- วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX)
- วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เท่ากับ 0.7
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.3
- ผลกระทบจากการเรียนรู้เป็นแบบ Sum of Processing Time Based Learning Effect
- ผลกระทบจากการเรียนรู้ที่เกิดขึ้น เท่ากับ 80%

3.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

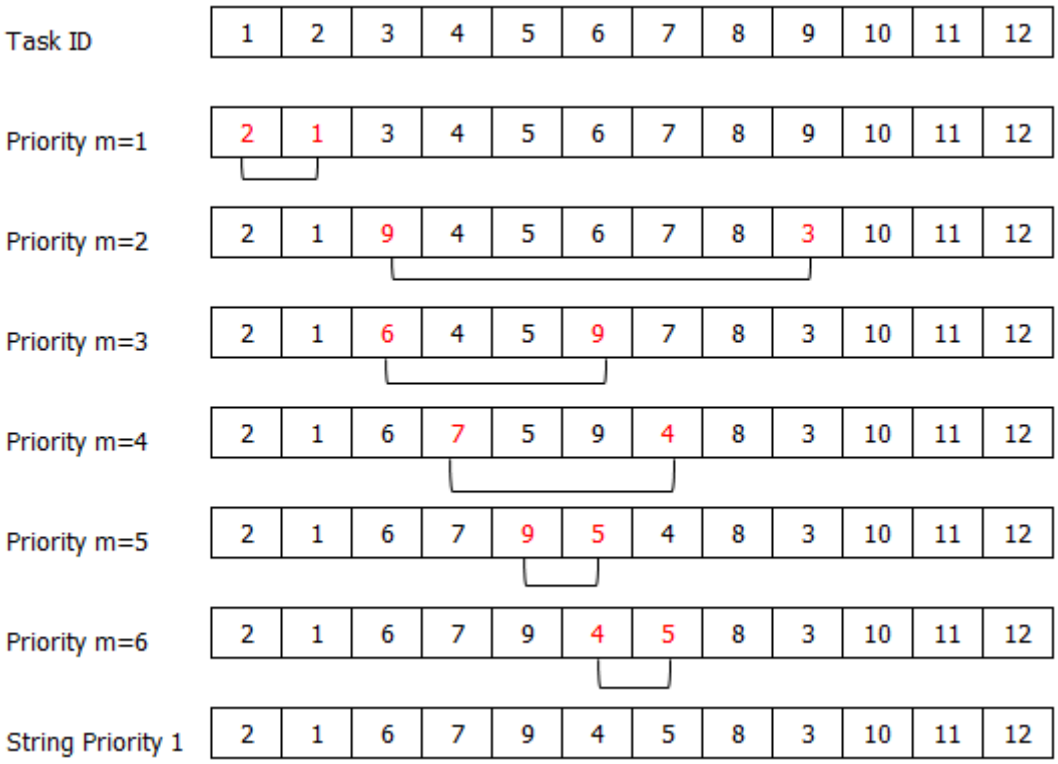
การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นของวิธี NSGAII เริ่มจากการสุ่มสตริงคำตอบโดยการกำหนดค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) เท่ากับจำนวนประชากรเบื้องต้น (Popsize = 5) โดยมีขั้นตอนวิธีการสุ่มดังนี้

1) สร้างค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority Number) เริ่มแรกให้มีค่าเท่ากับขั้นงาน ดังภาพที่ 3.4

Task ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Priority	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

ภาพที่ 3.4 การสร้างค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้น

2) สุ่มตำแหน่งมา 2 ตำแหน่งเพื่อทำการสลับค่า โดยจำนวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับครึ่งหน่งของจำนวนขั้นงานทั้งหมด หรือเท่ากับ $m/2 = 12/2 = 6$ ครั้ง เมื่อ m คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกขั้นงาน

ทำการสร้างสตริงคำตอบจนครบจะได้สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกขั้นงาน 5 สตริงคำตอบ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานของประชากรเริ่มต้น

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
2	[9 2 5 4 11 3 7 8 12 6 10 1]
3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
4	[6 3 11 2 7 1 5 4 9 10 8 12]
5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]

3.3.3 การถอดรหัสคำตอบ

3.3.3.1 การแปลงสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับขั้นงาน

จากสตริงคำตอบเบื้องต้น 5 ตัวนี้ จะต้องนำไปแปลงสตริงคำตอบจากค่าสิทธิในการเลือกงาน (String Priority) ไปเป็นลำดับขั้นงาน (Task Sequence) ก่อนจะนำไปจัดลงสถานีงาน โดยขั้นตอนการแปลงสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับงานมีดังนี้

1) พิจารณาตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงาน ว่างานใดสามารถจัดลงได้ก่อน โดยดูจากผลรวมในแต่ละคอลัมน์ของตาราง Precedence Matrix ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถจัดลงในตำแหน่งงานนั้นได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดของความสัมพันธ์ของงาน จากตาราง Precedence Matrix (ตารางที่ 3.2) พบว่างานที่สามารถเริ่มได้เลยมี 3 งาน คือ งาน 1,2 และ 3 ซึ่งเป็นขั้นงานที่ไม่มีงานก่อนหน้า

2) ถ้ามีงานมากกว่า 2 ที่สามารถจัดลงในตำแหน่งขั้นงานนั้นได้ ให้ทำการพิจารณาค่าสิทธิในการเลือกงานจากสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานตามตำแหน่งของงานที่สามารถจัดได้ งานที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานมากที่สุดจะถูกเลือกให้จัดลงในตำแหน่งนั้น จากสตริงคำตอบที่ 1 งานที่สามารถเริ่มได้เลยคือขั้นงานที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งมีค่าสิทธิในการเลือกงานเท่ากับ 2,1 และ 6 ตามลำดับ ดังนั้นงานที่มีค่าสิทธิมกที่สุดที่ถูกเลือกจัดลงในตำแหน่งที่ 1 คือขั้นงานที่ 3

3) งานที่ถูกเลือกจัดลงในตำแหน่งขั้นงานแล้วจะถูกตัดทิ้ง แล้วทำการปรับปรุงตาราง Precedence Matrix โดยการเปลี่ยนตัวเลขในแถวของงานนั้นเป็น 0 ทั้งหมด และเปลี่ยนตัวเลขในคอลัมน์ของงานนั้นเป็น 1 ทั้งหมด ดังตารางที่ 3.4

4) หาผลรวมในแต่ละคอลัมน์ใหม่อีกครั้ง และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั่งงานทุกงานถูกจัดลงในลำดับขั้นงาน (Task Sequence) จนหมด

ตารางที่ 3.4 ปรับปรุงตาราง Precedence Matrix

	1	2	***3***	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	***1***	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	***1***	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	***0***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
4	0	0	***1***	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	***1***	0	0	0	1	1	1	0	0	0
6	0	0	***1***	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	0	0	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0

จากสตริงคำตอบที่ 1 เมื่อทำการถอดรหัสจากสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับขั้นงาน (Task sequence) เพื่อจะนำไปจัดลงในสถานีงาน ได้ผลดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การถอดรหัสจากสตริงค่าสิทธิไปเป็นลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ 1

No.	งานที่สามารถเริ่มได้	ค่าสิทธิในการเลือกงาน	งานที่เลือก	Side
1	1 , 2 , 3	2 , 1 , 6	3	E
2	1 , 2 , 6	2 , 1 , 4	6	L
3	1 , 2	2 , 1	1	L
4	2 , 4	1 , 7	4	L
5	2	1	2	R
6	5	9	5	E
7	7 , 8 , 9	5 , 8 , 3	8	R
8	7 , 9	5 , 3	7	E
9	9 , 10	3 , 10	10	E
10	9	3	9	E
11	11	11	11	E
12	12	12	12	R

เมื่อทำการแปลงสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว จะได้ลำดับขั้นงาน 5 ตัว ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ลำดับขั้นงานของสตริคำตอบทั้ง 5 ตัว

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
2	[1 3 4 6 2 5 9 11 8 7 10 12]
3	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]
4	[3 1 2 5 8 4 7 10 6 9 11 12]
5	[1 4 2 5 8 7 10 3 6 9 11 12]

3.3.3.2 **การจัดสรรงานลงสถานีงาน**

เมื่อได้ลำดับขั้นงานแล้วจะทำการจัดลงสถานีงานเพื่อคำนวนหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่อไป โดยมีขั้นตอนของการจัดสรรงานลงสถานีงานดังนี้

1) จากลำดับขั้นงานที่จะทำการจัดสรรลงสถานีงาน พิจารณาด้านที่สามารถทำได้ คือ ถ้าด้านที่สามารถทำได้คือ L หรือ R จะทำการจัดงานลงสถานีงานด้าน ซ้าย และ ขวา ตามลำดับ ถ้าด้านที่สามารถทำได้คือ E จะสามารถจัดงานลงสถานีงานด้านใดก็ได้ โดยจะทำการจัดลงในด้านที่สามารถเริ่มงานได้ก่อน ถ้าสามารถเริ่มงานได้พร้อมกันทั้งสองด้านจะทำการจัดลงสถานีงานอย่างสุ่ม และการจัดงานลงสถานีงานต้องพิจารณา Precedence Diagram

2) คำนวณเวลาของแต่ละขั้นงานที่ทำการจัดลงสถานีงาน โดยงานที่มีข่ายงานเชื่อมต่อกันกับงานก่อนหน้าจะเกิดการเรียนรู้ขึ้นทำให้เวลาในการทำงานนั้นๆ ลดลง ตามสมการ $P_{igr} = P_{ig}\left(1 + P^{A}_{[1]g} + P^{A}_{[2]g} + \cdots + P^{A}_{[r-1]g}\right)^{a_g}$ ส่วนงานที่ไม่มีข่ายงานเชื่อมต่อกับงานก่อนหน้าจะมีเวลาในการทำงานเท่ากับเวลาการทำงานปกติของงานนั้นๆ

3) หลังจากคำนวณเวลาการทำงานของงานนั้นๆ แล้วจะทำการจัดสรรงานลงสถานีงาน เมื่อทำการจัดสรรงานลงสถานีงานแล้วเวลารวมในสถานีงานนั้นจะต้องไม่เกินรอบเวลาการทำงาน ถ้าการจัดสรรงานลงสถานีงานนั้นทำให้เวลารวมในสถานีงานนั้นเกินรอบเวลาการทำงานจะทำการย้ายงานนั้นไปสถานีงานถัดไปและคำนวณเวลาของขั้นงานนั้นใหม่

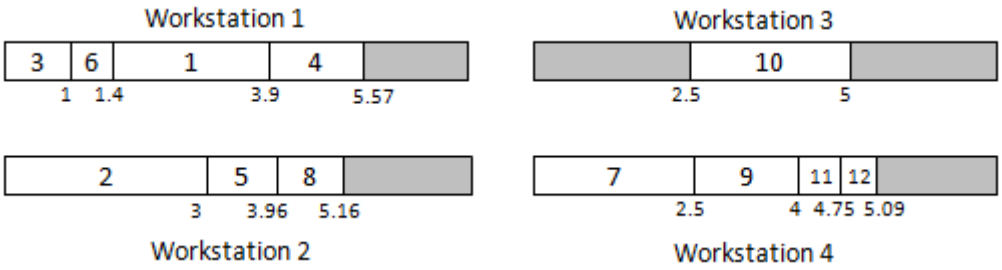
4) ทำการจัดสรรงานทีละงานตามขั้นตอนข้างต้นจนครบทุกขั้นงาน

ตัวอย่างการจัดสรรงานลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การจัดสรรงานลงสถานีงานสำหรับลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ 1

งาน (ด้าน)	งานก่อนหน้า	เวลาปกติ	ด้านที่จัด	เวลาเริ่มงาน	เวลาเมื่อเกิดการเรียนรู้	เวลารวมเมื่องานถูกจัดสรร	สถานีงาน
3(E)	-	1	L	0	1	1	1
6(L)	3	0.5	L	1	$P_{igr} = 1(1+0.5)^{-0.32} = 0.4$	1.4	1
1(L)	-	2.5	L	1.4	2.5	3.9	1
4(L)	1	2.5	L	3.9	$P_{igr} = 2.5(1+2.5)^{-0.32} = 1.67$	5.57	1
2(R)	-	3	R	0	3	3	2
5(E)	2	1.5	R	3	$P_{igr} = 1.5(1+3)^{-0.32} = 0.96$	3.96	2
8(R)	5	2	R	3.96	$P_{igr} = 2(1+3+0.96)^{-0.32} = 1.2$	5.16	2
7(E)	4,5	2.5	R	5.57	2.5	8.07>CT	-
				0	2.5	2.5	4
10(E)	7,8	2.5	L	2.5	2.5	5	3
9(E)	5,6	1.5	R	2.5	1.5	4	4
11(E)	9	1	R	4	$P_{igr} = 1(1+1.5)^{-0.32} = 0.75$	4.75	4
12(R)	11	0.5	R	4.75	$P_{igr} = 0.5(1+1.5+0.75)^{-0.32} = 0.34$	5.09	4

จากลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ 1 เมื่อจัดงานลงสถานีงานจะได้จำนวนสถานีงานทั้งหมด 4 สถานีงานดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 การจัดสรรงานลงสถานีงานของสตริงคำตอบที่ 1

จากลำดับขั้นงานทั้ง 5 ตัวสามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว

สตริงคำตอบที่	Workstation
1	[1 1 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]
2	[1 2 1 1 2 2 2 2 4 5 6 6]
3	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 3 4 3]
4	[2 1 2 2 2 1 1 4 1 3 3 4]
5	[1 1 2 2 2 1 3 2 3 3 4 4]

3.3.3.3 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อทำการจัดสรรงานลงสถานีงานเรียบร้อยแล้วจะทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าวัตถุประสงค์ 4 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนคู่สถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด จากสตริงคำตอบข้างต้นสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ 1

กำหนดให้ m คือ จำนวนคู่สถานีงาน

n คือ จำนวนสถานีงาน

SN_j คือ จำนวนการเชื่อมต่อการทำงานในสถานีงาน j

S_{kb} คือ เวลาว่างงานเฉลี่ยบนคู่สถานีงานที่ k ด้าน b

WIT คือ เวลาว่างงานของสายการผลิตแบบถ่วงน้ำหนัก

วัตถุประสงค์ที่ 1 : จำนวนคู่สถานีงานเท่ากับ 2 คู่สถานีงาน

$$f_1(X) = Minimun\ m = 2$$

วัตถุประสงค์ที่ 2 : จำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 สถานีงาน

$$f_2(X) = Minimum\ n = 4$$

วัตถุประสงค์ที่ 3 : ค่าผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานทั้ง 4 สถานีงาน คือ สถานีงาน 1 2 3 และ 4 โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

สถานีงาน 1 : มีข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีงาน คือ 3-6 , 1-4 มีค่าเท่ากับ 2

สถานีงาน 2 : มีข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีงาน คือ 2-5-8 มีค่าเท่ากับ 1

สถานีงาน 3 : มีข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีงาน คือ 10 มีค่าเท่ากับ 1

สถานีงาน 4 : มีข่ายงานที่เชื่อมต่อกันในสถานีงาน คือ 7 , 9-11 มีค่าเท่ากับ 2

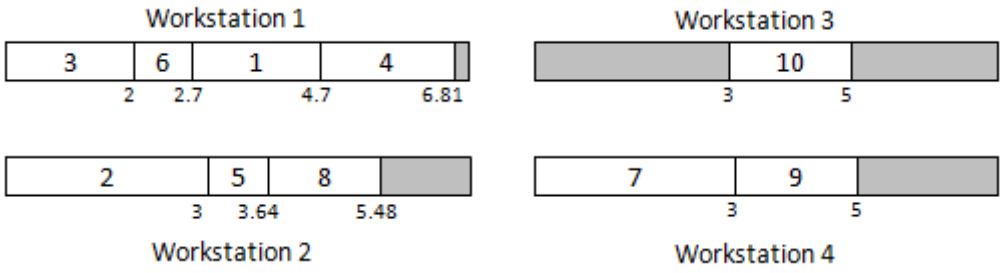
$$f_3(X) = MIWR = n - \frac{n}{\sum_{j=1}^{n} SN_j}$$

$$f_3(X) = MIWR = 4 - \frac{4}{2+1+1+2}$$

$$f_3(X) = MIWR = 3.3333$$

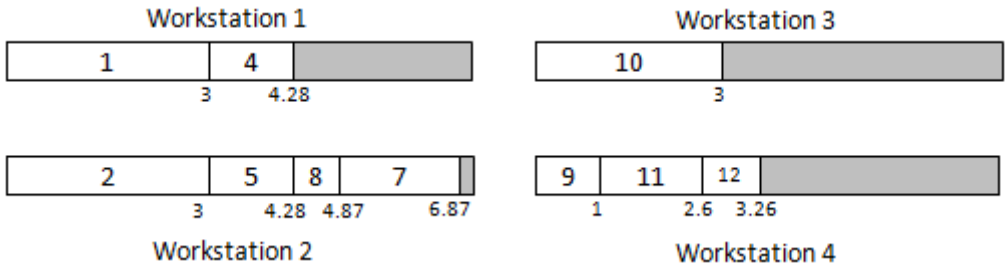
<u>วัตถุประสงค์ที่ 4</u> : ค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

จากลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ 1 (Task sequence 1) = [3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12] เมื่อใช้เวลาของผลิตภัณฑ์ A จัดงานลงสถานีงานจะได้สถานีงานทั้งหมด 4 สถานี คือ สถานีงาน 1 2 3 และ 4 ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานของผลิตภัณฑ์I A

เมื่อใช้เวลาของผลิตภัณฑ์ B จัดงานลงสถานีงานจะได้สถานีงานทั้งหมด 4 สถานี คือ สถานีงาน 1 2 3 และ 4 ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การจัดสรรขั้นงานลงในสถานีงานของผลิตภัณฑ์ B

เมื่อทำการจัดสรรงานลงสถานีงานแล้วจะหาเวลาทำงานรวมและเวลาว่างที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานีงาน เพื่อจะนำไปคำนวณหาค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน ได้ดังตารางที่ 3.9

ตาราง 3.9 การคำนวณค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน

สถานีงาน	เวลาทำงานรวมเมื่อมีการจัดงานลงสถานีงาน		เวลาว่างงานที่เกิดขึ้นในสถานีงาน		S_{kb}
	ใช้เวลาของผลิตภัณฑ์ A	ใช้เวลาของผลิตภัณฑ์ B	ใช้เวลาของผลิตภัณฑ์ A	ใช้เวลาของผลิตภัณฑ์ B	
1	6.81	4.28	0.19	2.72	1.46
2	5.48	6.87	1.52	0.13	0.83
3	2	3	5	4	4.5
4	5	3.26	2	3.74	2.87
		รวม	8.71	10.59	

$$WIT = (0.5 * 8.71) + (0.5 * 10.59) = 9.65$$

$$f_4(X) = Minimum\ B_b = \frac{n}{n-1}\sum_{k=1}^{LL}\sum_{b=L}^{R}\left(\frac{S_{kb}}{WIT} - \frac{1}{n}\right)^2$$

$$f_4(X) = B_b = \frac{4}{3}\left[(\frac{1.46}{9.65} - \frac{1}{4})^2 + (\frac{0.83}{9.65} - \frac{1}{4})^2 + (\frac{4.5}{9.65} - \frac{1}{4})^2 + (\frac{2.87}{9.65} - \frac{1}{4})^2\right]$$

$$f_4(X) = B_b = 0.1141$$

จากลำดับขั้นงานทั้ง 5 ตัวสามารถจัดงานลงสถานีงานและคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตารางที่ 3.10

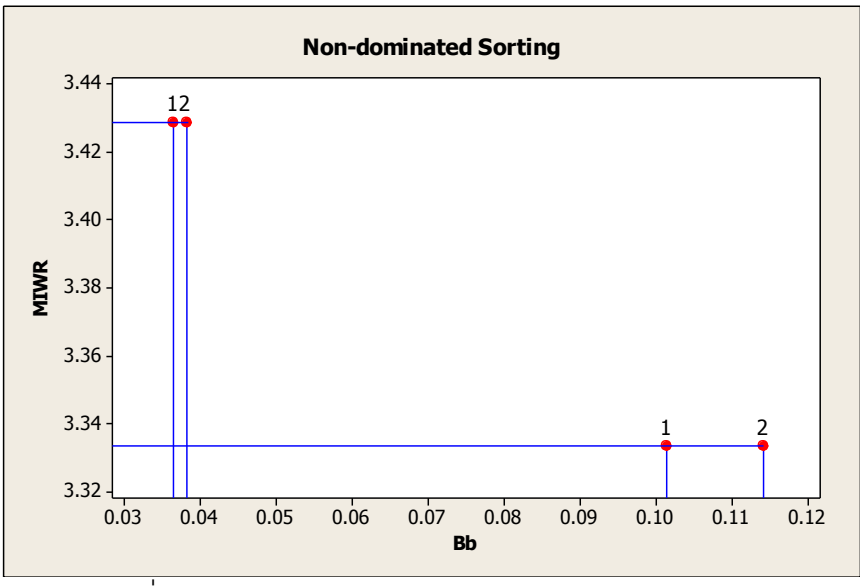
ตารางที่ 3.10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.1141
2	3	5	4.3750	0.1230
3	2	4	3.4286	0.0365
4	2	4	3.4286	0.0382
5	2	4	3.3333	0.1014

3.3.4 การประเมินค่า

การประเมินค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบจะใช้การจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting โดยค่าอันดับนี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy

Fitness Value) โดยพิจารณาเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ที่ดีที่สุดมาจัดอันดับ (เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็นวัตถุประสงค์หลัก) โดยทำการกรองและเลือกสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด แล้วจึงนำสตริงที่เลือกมานี้มาพิจารณาการค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 เพื่อจัดอันดับค่าความแข็งแรงโดยวิธี Non-dominated Sorting ในตัวอย่างนี้เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5 เป็นสตริงที่ดีที่สุด เนื่องจากมีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ ประกอบด้วย 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 จึงนำสตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5 มาจัดอันดับค่าความแข็งแรงได้ดังภาพที่ 3.9 และค่า Dummy Fitness แสดงดังตารางที่ 3.11



ภาพที่ 3.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.11 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness
1	3.3333	0.1141	2
3	3.4286	0.0365	1
4	3.4286	0.0382	2
5	3.3333	0.1014	1

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance

ทำการคำนวณค่า Crowding Distance (Dep et al., 2002) โดยพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 โดยจะทำการพิจารณาทีละ Front ซึ่งจะทำการพิจารณา Front ที่ 1 ก่อน แล้วจึงทำการพิจารณา Front ถัดๆ ไป

พิจารณาที่ Front ที่ 1 โดยทำการเรียงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 2 วัตถุประสงค์ที่มีค่าน้อยที่สุดไปหาค่ามากที่สุด ได้ดังตารางที่ 3.12

ตาราง 3.12 การเรียงลำดับค่าวัตถุประสงค์ที่ 3 ใน Front ที่ 1

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	i
5	3.3333	0.1014	1	1
3	3.4286	0.0365	1	2

จากตารางสตริงคำตอบที่ลำดับที่ 1 ($i = 1$) หรือมีค่าวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และสตริงคำตอบลำดับสุดท้ายหรือมีค่าวัตถุประสงค์มากที่สุด ($i = 2$) คำตอบเหล่านี้จะมีค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity) ส่วนลำดับที่เหลือจะทำการคำนวณตามสมการ $cd_k\left(x_{[i,k]}\right)=\frac{f_k\left(x_{[i+1,k]}\right)-f_k\left(x_{[i-1,k]}\right)}{f_k^{\max}-f_k^{\min}}$ แล้วนำค่า Crowding Distance ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ตัวมารวมกัน จะได้ว่า $cd(x)=\sum cd_k(x)$ ทำการหาค่า Crowding Distance ของ Front ที่เหลือเช่นเดียวกับการหาค่าใน Front ที่ 1 ของสตริงคำตอบทั้ง 4 ตัวได้ผลดังตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.1141	2	infinity
3	3.4286	0.0365	1	infinity
4	3.4286	0.0382	2	infinity
5	3.3333	0.1014	1	infinity

3.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยดูจากค่า Fitness (ค่า Fitness เป็นค่าที่แปลงมาจากค่า Dummy Fitness) ถ้าค่า Fitness มากแสดงว่าสตริงคำตอบนั้นมีความแข็งแรงและจะมีโอกาสในการถูกคัดเลือกมากกว่าตัวที่มีค่า Fitness น้อย โดยใช้วิธี Binary Tournament Selection ในการคัดเลือกคำตอบ ซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธี Roulette Wheel Selection โดยทำการคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool เท่ากับจำนวน Popsize ตัวตามที่เรากำหนด เพื่อรอที่จะทำการจับคู่และดำเนินการต่อไป

3.3.5.1 การสร้างวงล้อรูเล็ต

วงล้อรูเล็ต คือ วงกลมที่มีพื้นที่ขนาด 1 หน่วย ที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนๆ โดยพื้นที่แต่ละส่วนจะมีขนาดเท่ากับความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของสตริงคำตอบแต่ละตัว มีวิธีการสร้างดังนี้

หาค่า Fitness รวมของสตริงคำตอบทั้งหมด Popsize ตัว ดังสมการ

$$F = \sum_{i=1}^{popsize} f(x_i) \tag{3.1}$$

โดยที่ $f(x_i)$ คือ ค่า Fitness ของสตริงตัวที่ i

หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก (Probability of Selection) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว ตามสมการ

$$p_i = \frac{f(x_i)}{F} \qquad i = 1,2,\ldots,popsize \tag{3.2}$$

หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกสะสม (Cumulative Probability of Selection) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว ตามสมการ

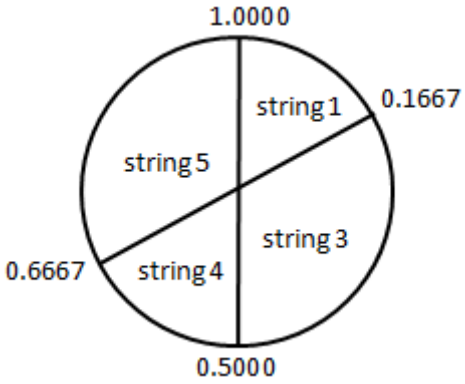
$$q_i = \sum_{j=1}^{i} p_j \tag{3.3}$$

ตารางที่ 3.14 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

สตริงคำตอบที่	MIWR	Bb	Dummy Fitness	แปลง Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.1141	2	1	infinity
3	3.4286	0.0365	1	2	infinity
4	3.4286	0.0382	2	1	infinity
5	3.3333	0.1014	1	2	infinity

ตารางที่ 3.15 การสร้างวงล้อรูเล็ต

สตริงคำตอบที่	แปลง Fitness	P_i	q_i
1	1	0.1667	0.1667
3	2	0.3333	0.5000
4	1	0.1667	0.6667
5	2	0.3333	1.0000
รวม	6	1	



ภาพที่ 3.10 วงล้อรูเล็ต

3.3.5.2 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

คัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะเริ่มจากการสุ่มสตริงคำตอบมา 2 สตริง แล้วพิจารณาดูว่าสตริงคำตอบใดมีค่า Fitness ที่ดีกว่าก็จะทำการเลือกสตริงคำตอบนั้นเพื่อเข้าสู่ Mating Pool ขั้นตอนการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection มีดังนี้

1) สร้างตัวเลขสุ่ม r ขึ้นมา 2 ตัว ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 คือ r_1 และ r_2

2) ถ้าค่า r_1 และ r_2 ที่สุ่มได้ตกอยู่ในช่วงของสตริงคำตอบใดก็ให้เลือกสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบตัวแรกและตัวที่ 2 ตามลำดับ (ถ้าค่า $r \leq q_1$ ให้เลือกสตริงคำตอบตัวแรก แต่ถ้า $q_{i-1} < r \leq q_i$ ให้เลือกสตริงคำตอบที่ i)

3) ทำการเปรียบเทียบค่า Fitness ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ตัว สตริงคำตอบที่มีค่า Fitness มากกว่าจะถูกเลือกเข้าสู่ Mating Pool ถ้าค่า Fitness ของทั้ง 2 สตริง

คำตอบมีค่าเท่ากันจะเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Crowding Distance มากกว่า ถ้าค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบทั้ง 2 มีค่าเท่ากันจะทำการเลือกสตริงคำตอบโดยการสุ่ม

4) ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จนกว่าจะได้สตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool เท่ากับ Popsize ตัว

ผลการคัดเลือกจะได้สตริงคำตอบทั้งหมด 5 ตัว คือ สตริงที่ 3 1 3 5 และ 5 ซึ่งจะกลายเป็นสตริงคำตอบที่ 1-5 ในขั้นต่อไป ดังตารางที่ 3.16 และ 3.17

ตารางที่ 3.16 Binary Tournament Selection สำหรับการคัดเลือกสตริงคำตอบ

No.	Population 1				Population 2				No. String Selection
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	
1	0.2988	0.5	3	2	0.5681	0.6667	4	1	3
2	0.1372	0.1667	1	1	0.6117	0.6667	4	1	1
3	0.9981	1	5	2	0.4256	0.5	3	2	3
4	0.1129	0.1667	1	1	0.7192	1	5	2	5
5	0.4230	0.5	3	2	0.6771	1	5	2	5

ตารางที่ 3.17 สตริงคำตอบที่ได้จากการคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection

สตริงคำตอบที่	String Priority
3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
1	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]

3.3.6 การครอสโอเวอร์

เมื่อได้สตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ครบแล้วต่อไปจะเป็นกระบวนการครอสโอเวอร์ โดยสตริงที่จะนำมาทำการครอสโอเวอร์นี้จะมีจำนวน (N_c) ตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_c) ส่วนสตริงคำตอบที่ไม่ได้ถูกเลือกจะยังคงสภาพเดิมและจะกลายเป็นประชากรในเจนเนอเรชันต่อไป การจับคู่สตริงคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

1) สุ่มตัวเลข r ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทุกตัวที่อยู่ใน Mating Pool สตริงคำตอบใดที่สุ่มค่า r ได้น้อยกว่าค่า P_c จะถูกนำไปจับคู่ในการครอสโอเวอร์ต่อไป

2) ถ้าไม่มีสตริงคำตอบตัวใดเลยที่ให้ค่าสุ่ม r น้อยกว่า P_c ให้ทำข้อ 1 ซ้ำอีกครั้ง

3) ถ้าจำนวน N_c ตัวที่ได้เป็นจำนวนคี่จะทำการปรับให้เป็นจำนวนคู่ก่อน โดยมีเงื่อนไขในการปรับดังนี้

- ถ้าจำนวน N_c มีค่าเท่ากับ 1 ตัวให้ทำการเพิ่มสตริงเข้าไปอีก 1 ตัว
- ถ้าจำนวน N_c เป็นจำนวนคี่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง Popsize ตัว ให้ทำการสุ่มตัวเลข 0 กับ 1 มา 1 ค่า ถ้าสุ่มได้ 1 ให้ทำการเพิ่มสตริงเข้าไปอีก 1 ตัว แต่ถ้าตัวเลขที่สุ่มได้คือ 0 จะทำการตัดสตริงตัวที่เลือกไว้ทิ้งไป 1 ตัว
- ถ้าจำนวน N_c มีค่าเท่ากับ Popsize ซึ่งเป็นจำนวนคี่จะทำการสุ่มตัดสตริงตัวที่เลือกไว้ทิ้งไป 1 ตัว

4) หลังจากได้สตริงจำนวน N_c ตัวแล้วจะนำมาจับคู่ตามลำดับเพื่อทำการครอสโอเวอร์ จะได้จำนวน $N_c/2$ คู่

สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการครอสโอเวอร์จะมาจากการสุ่มค่า r ที่น้อยกว่าค่า $P_c = 0.7$ หรือมีประมาณ 70% ดังนั้นจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาครอสโอเวอร์มีค่าประมาณ 0.7x5 = 3.5 หรือ 4 ตัว

ตารางที่ 3.18 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการครอสโอเวอร์

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]	0.8879	-
2	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]	0.4791	select
3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]	0.6425	select
4	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]	0.6750	select
5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]	0.1049	select

จากตารางที่ 3.18 สตริงคำตอบที่จะถูกเลือกไปทำการครอสโอเวอร์คือสตริงคำตอบที่ 2 3 4 และ 5 ซึ่งจะถูกจับคู่เป็น 2 คู่ คือ 2-3 และ 4-5 ซึ่งสตริงคำตอบนี้จะเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) จากนั้นทำการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบซึ่งกันและกัน หลังจากการครอสโอเวอร์จะทำให้เกิดสตริงคำตอบใหม่ซึ่งสตริงคำตอบเหล่านี้จะถูกเรียกว่าสตริงคำตอบ

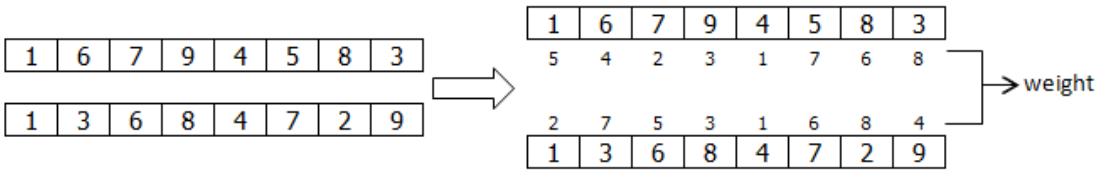
รุ่นลูก (Offspring) โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX)

นำสตริงคำตอบคู่แรกไปครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX) โดยการสุ่มเลือกตำแหน่งที่จะทำการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริง จากตัวอย่างสตริงคำตอบคู่แรกที่จะทำการครอสโอเวอร์สุ่มได้ตำแหน่ง 2 กับ 9

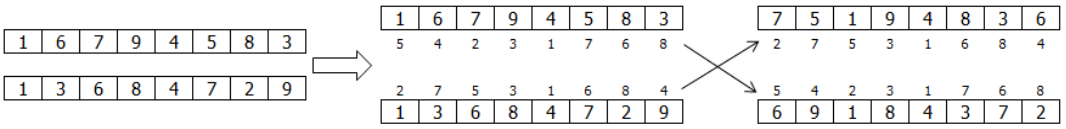
Parent 1 = [1 6 7 9 4 5 8 3]

Parent 2 = [1 3 6 8 4 7 2 9]

ทำการกำหนดค่าน้ำหนักในช่วง [2,9] ให้กับสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) และทำการครอสโอเวอร์ได้ดังภาพที่ 3.11 และ 3.12



ภาพที่ 3.11 การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 1



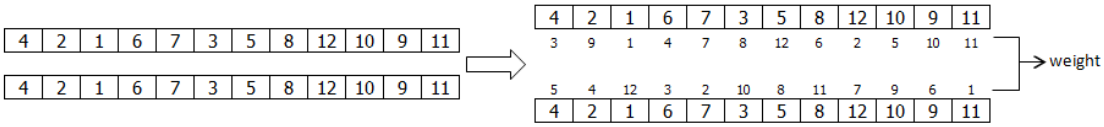
ภาพที่ 3.12 การสลับค่าน้ำหนักและทำการเปลี่ยนตำแหน่งภายในโครโมโซม ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 1

เมื่อทำการครอสโอเวอร์สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 1แล้วจะทำให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) คือ

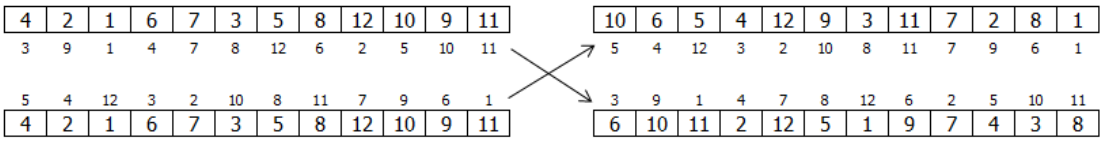
Offspring 2 = [2 7 5 1 9 4 8 3 6 10 11 12]

Offspring 3 = [5 6 9 1 8 4 3 7 2 10 11 12]

นำสตริงคู่ที่ 2 คือ สตริงคำตอบที่ 4 และ 5 มาทำการครอสโอเวอร์จากตัวอย่างสตริงคำตอบคู่ที่ 2 ที่จะทำการครอสโอเวอร์สุ่มได้ตำแหน่ง 1 กับ 12 ทำการกำหนดค่าน้ำหนักในช่วง [1,12] ให้กับสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) และทำการครอสโอเวอร์ได้ดังภาพที่ 3.13 และ 3.14



ภาพที่ 3.13 การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 2



ภาพที่ 3.14 การสลับค่าน้ำหนักและทำการเปลี่ยนตำแหน่งภายในโครโมโซม
ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 2

เมื่อทำการครอสโอเวอร์สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่คู่ที่ 2แล้วจะทำให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) คือ

Offspring 3 = [10 6 5 4 12 9 3 11 7 2 8 1]

Offspring 4 = [6 10 11 2 12 5 1 9 7 4 3 8]

สตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้ (Offspring) ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เป็นสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานดังนั้นจึงไม่ต้องมีการซ่อมแซมคำตอบ (ค่าสิทธิในการเลือกงานเป็นเพียงค่าที่จะนำไปแปลงเป็นลำดับขั้นงานเท่านั้น)

3.3.7 การมิวเตชัน

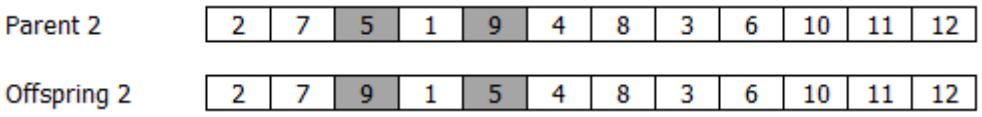
กระบวนการมิวเตชันเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงเพื่อให้เกิดสตริงคำตอบใหม่ขึ้น เป็นการป้องกันการสูญเสียคำตอบที่อาจจะไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ การมิวเตชันอาจช่วยให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมและทำให้คำตอบสามารถหลุดออกจากคำตอบเฉพาะที่และให้คำตอบที่ดี ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation โดยจะทำการสุ่มค่า r ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทุกตัวที่อยู่ใน Mating Pool สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการมิวเตชันจะมาจากสตริงคำตอบที่สุ่มค่า r ได้น้อยกว่าค่า $P_m = 0.3$ สตริงคำตอบที่จะทำการมิวเตชันจึงมีประมาณ 30% หรือมีค่าประมาณ 0.3x5 = 1.5 หรือ 2 ตัว

ตารางที่ 3.19 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการมิวเตชัน

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]	0.3981	-
2	[2 7 5 1 9 4 8 3 6 10 11 12]	0.1813	select
3	[5 6 9 1 8 4 3 7 2 10 11 12]	0.2149	select
4	[10 6 5 4 12 9 3 11 7 2 8 1]	0.4291	-
5	[6 10 11 2 12 5 1 9 7 4 3 8]	0.6564	-

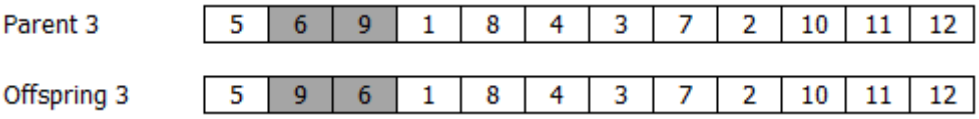
จากตารางที่ 3.19 สตริงคำตอบที่ 2 และ 3 ถูกเลือกให้ไปทำมิวเตชัน ซึ่งเป็นการสลับค่าตำแหน่ง 2 ตำแหน่งภายในสตริง โดยตำแหน่งที่จะทำการสลับ 2 ตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันนี้จะทำการสุ่มขึ้นมา

ทำการมิวเตชันสตริงคำตอบที่ 2 โดยสุ่มตำแหน่งที่จะทำการสลับได้ตำแหน่งที่ 3 และ 5 จากนั้นทำการสลับตำแหน่งของตัวเลขทั้งสอง ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation สตริงคำตอบที่ 2

ทำการมิวเตชันสตริงคำตอบที่ 3 โดยสุ่มตำแหน่งที่จะทำการสลับได้ตำแหน่งที่ 2 และ 3 จากนั้นทำการสลับตำแหน่งของตัวเลขทั้งสอง ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation สตริงคำตอบที่ 3

สตริงคำตอบรุ่นลูกหลังผ่านกระบวนการมิวเตชันแสดงดังตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 สตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชัน

String No.	String Priority
1	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
2	[2 7 9 1 5 4 8 3 6 10 11 12]
3	[5 9 6 1 8 4 3 7 2 10 11 12]
4	[10 6 5 4 12 9 3 11 7 2 8 1]
5	[6 10 11 2 12 5 1 9 7 4 3 8]

สตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้ (Offspring) ที่ได้จากมิวเตชันเป็นสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานดังนั้นจึงไม่ต้องมีการซ่อมแซมคำตอบ

3.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อสตริงคำตอบผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วจะมีการเก็บสตริงคำตอบที่ดีเอาไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีเหล่านั้น ซึ่งเทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดนี้คือการนำเอาสตริงคำตอบในรุ่นพ่อแม่รวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูก จากนั้นจะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธี Non-dominated Sorting ไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) และจะทำการปรับปรุง (Update) สถานที่รวมคำตอบ (Elitist) นี้ในทุกๆรอบ โดยการเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดทุกๆ รอบเข้าไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในสถานที่รวมคำตอบนี้และทำการ Non-dominated Sorting เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป

และสตริงที่ดีที่สุดจำนวน Popsize ตัวในแต่ละรอบจะถูกนำไปใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชันต่อไปด้วย ถ้าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดมีค่าน้อยกว่า Popsize ตัวจะทำการสร้างประชากรเบื้องต้นขึ้นมาเพิ่มให้ครบจำนวน Popsize ตัว

ตารางที่ 3.21 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
	2	[9 2 5 4 11 3 7 8 12 6 10 1]
	3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
	4	[6 3 11 2 7 1 5 4 9 10 8 12]
	5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[2 7 9 1 5 4 8 3 6 10 11 12]
	7	[5 9 6 1 8 4 3 7 2 10 11 12]
	8	[10 6 5 4 12 9 3 11 7 2 8 1]
	9	[6 10 11 2 12 5 1 9 7 4 3 8]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

ตารางที่ 3.22 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
	2	[1 3 4 6 2 5 9 11 8 7 10 12]
	3	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]
	4	[3 1 2 5 8 4 7 10 6 9 11 12]
	5	[1 4 2 5 8 7 10 3 6 9 11 12]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[3 2 5 6 9 11 12 8 1 4 7 10]
	7	[2 5 8 3 1 6 9 11 12 4 7 10]
	8	[1 2 5 8 3 6 9 11 4 7 10 12]
	9	[3 2 5 8 1 6 9 11 12 4 7 10]

จากลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบเมื่อนำมาจัดลงสถานีงานและนำมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 3.23 และ 3.24

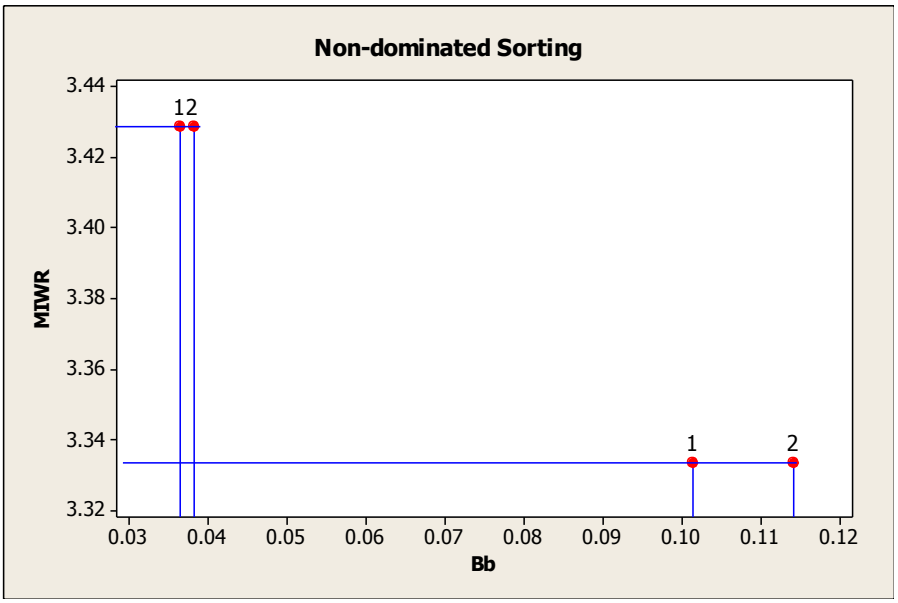
ตารางที่ 3.23 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[1 1 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]
	2	[1 2 1 1 2 2 2 2 4 5 6 6]
	3	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 3 4 3]
	4	[2 1 2 2 2 1 1 4 1 3 3 4]
	5	[1 1 2 2 2 1 3 2 3 3 4 4]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[2 2 1 1 3 4 4 4 3 3 5 6]
	7	[2 1 2 1 3 3 3 4 4 3 5 5]
	8	[1 2 1 2 1 1 3 4 3 3 6 6]
	9	[2 2 1 4 3 3 3 4 4 3 5 6]

ตารางที่ 3.24 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.1141
2	3	5	4.3750	0.1230
3	2	4	3.4286	0.0365
4	2	4	3.4286	0.0382
5	2	4	3.3333	0.1014
6	3	6	5.4000	0.0523
7	3	5	4.4444	0.0329
8	3	5	4.5000	0.0586
9	3	6	5.4000	0.0239

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 3.17 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ดังตารางที่ 3.25



ภาพที่ 3.17 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.25 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.1141	2	infinity
3	3.4286	0.0365	1	infinity
4	3.4286	0.0382	2	infinity
5	3.3333	0.1014	1	infinity

ทำการเรียงค่า Dummy Fitness จากน้อยไปมาก และภายใน Front เดียวกันจะเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย ถ้ามีค่า Crowding Distance เท่ากันให้ทำการเรียงตามค่าวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 จากน้อยไปมากตามลำดับ

ตารางที่ 3.26 การเรียงค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
5	3.3333	0.1014	1	infinity
3	3.4286	0.0365	1	infinity
1	3.3333	0.1141	2	infinity
4	3.4286	0.0382	2	infinity

เมื่อทำการเรียงค่าดังตารางข้างบนแล้วจะทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น 5 ตัว (Popsize) เพื่อจะใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบต่อไป ในตัวอย่างนี้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดมี 4 สตริงคำตอบซึ่งน้อยกว่าจำนวนประชากรเริ่มต้นที่ต้องการ ดังนั้นจะทำการสร้างประชากรเบื้องต้นขึ้นมาเพิ่มให้ครบตามจำนวน Popsize ตัว ได้ผลดังตารางที่ 3.27

ตารางที่ 3.27 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
1	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
4	[6 3 11 2 7 1 5 4 9 10 8 12]
Add	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]

ทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) โดยเลือกสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด ซึ่งจะทำการเก็บเฉพาะสตริงคำตอบที่อยู่ใน Front 1 เท่านั้น ได้ผลดังตารางที่ 3.28 – 3.31

ตารางที่ 3.28 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
1	3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]

ตารางที่ 3.29 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	5	[1 4 2 5 8 7 10 3 6 9 11 12]
1	3	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]

ตารางที่ 3.30 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	5	[1 1 2 2 2 1 3 2 3 3 4 4]
1	3	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 3 4 3]

ตารางที่ 3.31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	5	2	4	3.3333	0.1014
1	3	2	4	3.4286	0.0365

3.3.9 การแก้ปัญหาในรอบถัดไป

การแก้ปัญหาในรอบที่ 2 จะทำการแก้ปัญหาเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาในรอบที่ 1 โดยนำสตริงคำตอบที่ได้จากรอบก่อนหน้ามาเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น ดังตารางที่ 3.32

ตารางที่ 3.32 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้นในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
2	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
4	[6 3 11 2 7 1 5 4 9 10 8 12]
5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 3.33

ตารางที่ 3.33 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[1 4 2 5 8 7 10 3 6 9 11 12]
2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]
3	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
4	[3 1 2 5 8 4 7 10 6 9 11 12]
5	[3 1 4 6 2 5 8 9 11 12 7 10]

จากลำดับขั้นงานข้างบนเมื่อนำไปจัดลงในสถานีงานและนำไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ได้ดังตารางที่ 3.34 และ 3.35

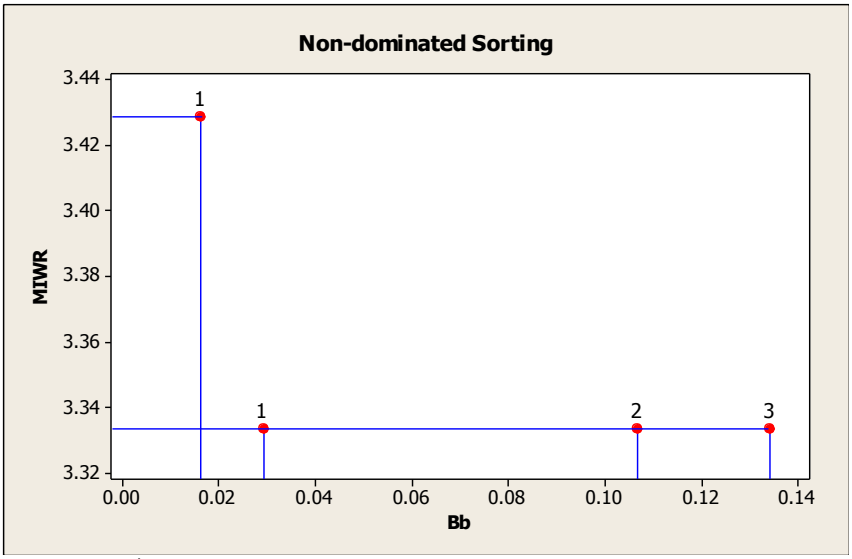
ตารางที่ 3.34 สถานีงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Workstation
1	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 3 4 4]
2	[1 1 2 2 2 1 3 2 3 3 3 4]
3	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
4	[2 1 2 1 4 3 3 4 3 3 4 6]
5	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 4]

ตารางที่ 3.35 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

ตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.1342
2	2	4	3.3333	0.1067
3	2	4	3.3333	0.0292
4	3	5	4.4444	0.0078
5	2	4	3.4286	0.0162

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 3.18 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ดังตารางที่ 3.36



ภาพที่ 3.18 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.36 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.1342	3	infinity
2	3.3333	0.1067	2	infinity
3	3.3333	0.0292	1	infinity
5	3.4286	0.0162	1	infinity

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection เหมือนการแก้ปัญหาในรอบที่ 1 ผลจากการคัดเลือกได้ผลสตริงคำตอบที่เข้าสู่ Mating Pool คือสตริงที่ 5 5 3 5 และ 3 ดังตารางที่ 3.37

ตารางที่ 3.37 สตริงคำตอบที่ได้จากการคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection

สตริงคำตอบที่	String Priority
5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]

เมื่อได้สตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ครบแล้วก็ทำการครอสโอเวอร์สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเหมือนการแก้ปัญหาในรอบที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 3.38

ตารางที่ 3.38 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการครอสโอเวอร์

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]	0.3079	select
2	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]	0.8511	-
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]	0.3455	select
4	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]	0.6900	select
5	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]	0.6349	select

จากตารางที่ 3.38 สตริงคำตอบที่จะถูกเลือกไปทำการครอสโอเวอร์คือสตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5 ซึ่งจะถูกจับคู่เป็น 2 คู่ คือ 1-3 และ 4-5 นำสตริงคำตอบทั้งสองคู่ไปทำการครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX) โดยการสุ่มเลือกตำแหน่งที่จะทำการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงได้ผลดังตารางที่ 3.39

ตารางที่ 3.39 สตริงคำตอบหลังผ่านการครอสโอเวอร์

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
2	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
4	[9 3 5 2 7 6 11 10 1 4 12 8]
5	[9 7 11 5 6 10 3 8 2 4 12 1]

นำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการครอสโอเวอร์แล้วไปทำการมิวเตชันต่อไป โดยการสุ่มเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการมิวเตชัน จากนั้นทำการสุ่มเลือกตำแหน่งภายในสตริงที่จะทำการสลับตำแหน่ง โดยกระบวนการมิวเตชันเหมือนกับการแก้ปัญหาในรอบที่ 1 จะได้ผลดังตารางที่ 3.40 และ 3.41

ตารางที่ 3.40 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการมิวเตชัน

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]	0.4581	-
2	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]	0.2113	select
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]	0.5512	-
4	[9 3 5 2 7 6 11 10 1 4 12 8]	0.1091	select
5	[9 7 11 5 6 10 3 8 2 4 12 1]	0.7504	-

ตารางที่ 3.41 สตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชัน

String No.	String Priority
1	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
2	[7 2 12 11 5 1 4 10 9 6 8 3]
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
4	[7 3 5 2 9 6 11 10 1 4 12 8]
5	[9 7 11 5 6 10 3 8 2 4 12 1]

จากสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P) และสตริงคำตอบรุ่นลูก (Q) จะนำมารวมกันได้ผลดังตารางที่ 3.42 – 3.45

ตารางที่ 3.42 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
	2	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
	3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
	4	[6 3 11 2 7 1 5 4 9 10 8 12]
	5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[7 2 12 11 5 1 4 10 9 6 8 3]
	7	[7 3 5 2 9 6 11 10 1 4 12 8]
	8	[9 7 11 5 6 10 3 8 2 4 12 1]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานซ้ำกันออก

ตารางที่ 3.43 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[1 4 2 5 8 7 10 3 6 9 11 12]
	2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]
	3	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
	4	[3 1 2 5 8 4 7 10 6 9 11 12]
	5	[3 1 4 6 2 5 8 9 11 12 7 10]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[3 1 4 2 5 8 7 10 6 9 11 12]
	7	[1 3 6 2 5 8 4 7 10 9 11 12]
	8	[3 6 1 2 5 8 4 7 10 9 11 12]

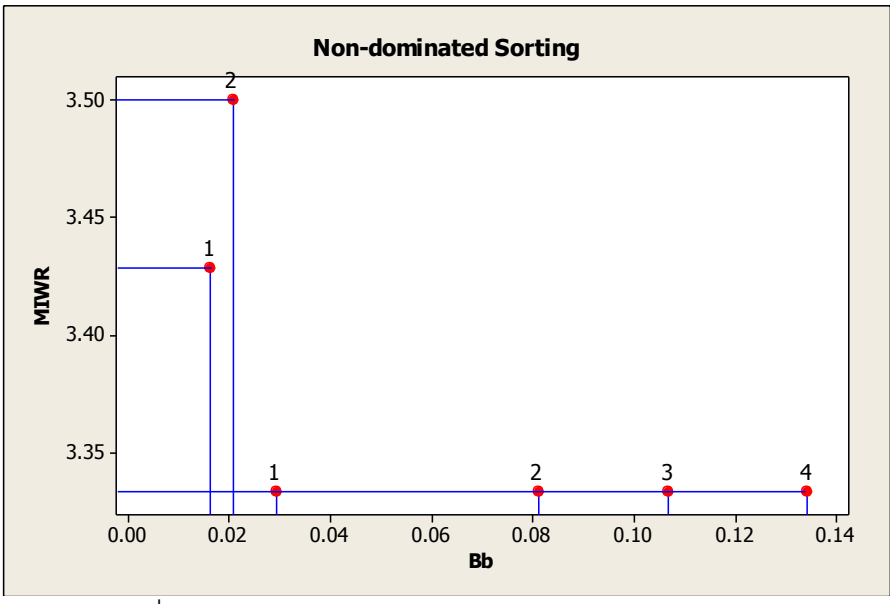
ตารางที่ 3.44 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 3 4 4]
	2	[1 1 2 2 2 1 3 2 3 3 3 4]
	3	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
	4	[2 1 2 1 4 3 3 4 3 3 4 6]
	5	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 4]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[1 1 1 2 2 2 1 3 3 3 3 4]
	7	[1 2 1 2 1 4 3 3 3 4 4 4]
	8	[2 1 1 2 1 4 3 4 5 4 6 6]

ตารางที่ 3.45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.1342
2	2	4	3.3333	0.1067
3	2	4	3.3333	0.0292
4	3	5	4.4444	0.0078
5	2	4	3.4286	0.0162
6	2	4	3.3333	0.0810
7	2	4	3.5000	0.0207
8	3	6	5.4545	0.0300

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ดังภาพที่ 3.19 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ดังตารางที่ 3.46



ภาพที่ 3.19 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.46 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.1342	4	infinity
2	3.3333	0.1067	3	infinity
3	3.3333	0.0292	1	infinity
5	3.4286	0.0162	1	infinity
6	3.3333	0.0810	2	infinity
7	3.5000	0.0207	2	infinity

ทำการเรียงค่า Dummy Fitness จากน้อยไปมาก และภายใน Front เดียวกันจะเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย ถ้ามีค่า Crowding Distance เท่ากันให้ทำการเรียงตามค่าวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 จากน้อยไปมากตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 3.47

ตารางที่ 3.47 การเรียงค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
3	3.3333	0.0292	1	infinity
5	3.4286	0.0162	1	infinity
6	3.3333	0.0810	2	infinity
7	3.5000	0.0207	2	infinity
2	3.3333	0.1067	3	infinity
1	3.3333	0.1342	4	infinity

เมื่อทำการเรียงค่าดังตารางข้างบนแล้วจะทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น 5 ตัว (Popsize) เพื่อจะใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบต่อไป ได้ผลดังตารางที่ 3.48

ตารางที่ 3.48 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]
6	[7 2 12 11 5 1 4 10 9 6 8 3]
7	[7 3 5 2 9 6 11 10 1 4 12 8]
2	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]

ทำการเก็บสตริงที่ดีที่สุดในรอบการทำงานปัจจุบันไปไว้ในสถานที่รวมคำตอบ ซึ่งจะทำการเก็บเฉพาะสตริงคำตอบที่อยู่ใน Front 1 เท่านั้นเข้าไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในรอบก่อนหน้า ได้ดังตารางที่ 3.49 – 3.52

ตารางที่ 3.49 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	5	[4 2 1 6 7 3 5 8 12 10 9 11]
1	3	[5 1 3 6 8 4 7 2 9 10 11 12]
2	3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
2	5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานซ้ำกันออก

ตารางที่ 3.50 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	5	[1 4 2 5 8 7 10 3 6 9 11 12]
1	3	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]
2	3	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
2	5	[3 1 4 6 2 5 8 9 11 12 7 10]

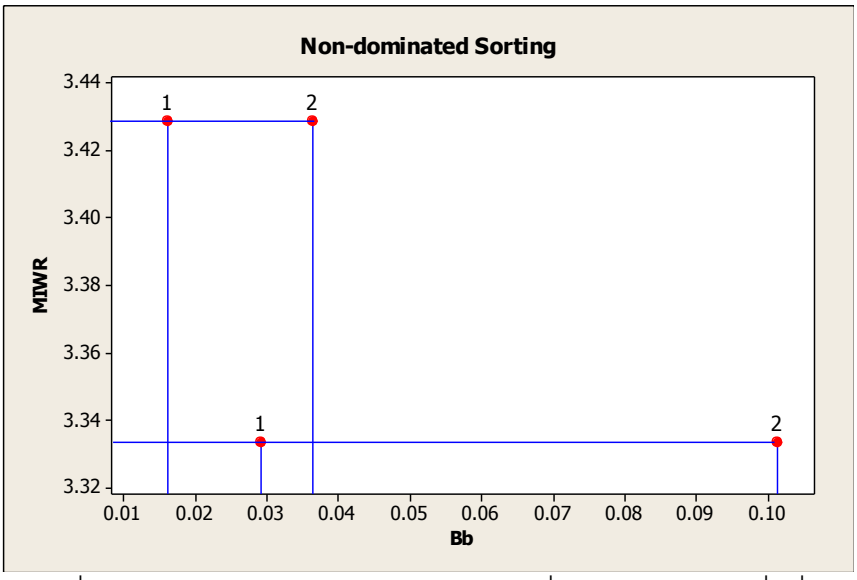
ตารางที่ 3.51 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	5	[1 1 2 2 2 1 3 2 3 3 4 4]
1	3	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 3 4 3]
2	3	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
2	5	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 4]

ตารางที่ 3.52 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	5	2	4	3.3333	0.1014
1	3	2	4	3.4286	0.0365
2	3	2	4	3.3333	0.0292
2	5	2	4	3.4286	0.0162

เมื่อได้สตริงคำตอบที่นำมารวมกันไว้ในสถานที่รวมคำตอบแล้ว จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting หาค่า Dummy Fitness เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ดังภาพที่ 3.20 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 3.53



ภาพที่ 3.20 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3.53 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	5	3.3333	0.1014	2	infinity	
1	3	3.4286	0.0365	2	infinity	
2	3	3.3333	0.0292	1	infinity	Elitist
2	5	3.4286	0.0162	1	infinity	Elitist

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting และ Crowding Distance จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดดังตารางที่ 3.54 – 3.57

ตารางที่ 3.54 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
2	3	[2 1 6 7 9 4 5 8 3 10 11 12]
2	5	[7 2 12 11 5 4 1 10 9 6 8 3]

ตารางที่ 3.55 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
2	3	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
2	5	[3 1 4 6 2 5 8 9 11 12 7 10]

ตารางที่ 3.56 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
2	3	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
2	5	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 4]

ตารางที่ 3.57 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	3	2	4	3.3333	0.0292
2	5	2	4	3.4286	0.0162

3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี NSGAII

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสม ที่จะทำให้ผลการทดลองที่ได้เข้าใกล้คำตอบที่ดีมากที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ของวิธี NSGAII มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวดังนี้

3.4.1 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนประชากรเบื้องต้น หมายถึง จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน จำนวนประชากรที่มากเกินไปอาจทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมาก แต่ถ้าจำนวนประชากรน้อยเกินไปคำตอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม การกำหนดจำนวนประชากรที่เหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จำนวนประชากรเบื้องต้นเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang and Katayama, 2008)

3.4.2 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto Based Approach) เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting (Goldberg,1989)

3.4.3 วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกของประชากรคำตอบที่อยู่ในลำดับเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

3.4.4 วิธีการคัดเลือกสตริงคำตอบ

วิธีการคัดเลือกสตริงคำตอบ (Selection Method) เป็นวิธีที่ใช้ในการคัดเลือกสตริงคำตอบจำนวนหนึ่ง เพื่อที่จะนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

3.4.5 การครอสโอเวอร์

การครอสโอเวอร์ (Crossover Method) เป็นการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบเพื่อให้เกิดความหลากหลายมากขึ้นโดยหวังว่าจะทำให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX) (Hwang, Katayama and Gen, 2008) โดยความน่าจะเป็นควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6-0.9 (De Jong and Spears, 1990) และในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 4 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 มีค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.6
- ระดับที่ 2 มีค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7
- ระดับที่ 3 มีค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.8
- ระดับที่ 4 มีค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9

3.4.6 การมิวเตชัน

การมิวเตชัน (Mutation Method) เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดสตริงคำตอบใหม่ขึ้น เป็นการป้องกันการสูญเสียคำตอบที่อาจจะไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ การมิวเตชันอาจช่วยให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมและทำให้คำตอบสามารถหลุดออกจากคำตอบเฉพาะที่และให้คำตอบที่ดี ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation (Hwang, Katayama and Gen, 2008) โดยความน่าจะเป็นควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.4 (De Jong and Spears, 1990) และในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 4 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 มีค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.1
- ระดับที่ 2 มีค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.2
- ระดับที่ 3 มีค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.3
- ระดับที่ 4 มีค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.4

3.4.7 ผลกระทบจากการเรียนรู้

ผลกระทบจาการเรียนรู้ (Learning Effect) เป็นทฤษฎีที่ตั้งสมมติฐานว่าการผลิตจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลง โดยได้นำเข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตเพื่อลดช่องว่างของการจัดตารางตามทฤษฎีและเวลาการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบ Sum-Processing Time Based Learning Effect (Kuo and Yang ,2006a,b,c) และกำหนดค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80% (Arditi et al., 2001)

3.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลองของวิธี NSGAII จะทำการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ (Replication) เท่ากับ 2 ครั้ง ซึ่งมีรายละเอียดของปัญหาการทดลองทั้งหมด 5 ปัญหาดังตารางที่ 3.58

ตารางที่ 3.58 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาการทดลอง	รอบเวลาการทำงาน	จำนวนเจนเนอเรชัน
ปัญหา 12 ขั้นงาน	7	100
ปัญหา 65 ขั้นงาน	490	400
ปัญหา 148 ขั้นงาน	408	800
ปัญหา 205 ขั้นงาน	2454	800
ปัญหา 183 ขั้นงาน	22	400

พารามิเตอร์ที่ต้องทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 3.59

ตารางที่ 3.59 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ NSGAII ที่จะทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	ระดับที่ 1 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.6
	ระดับที่ 2 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.7
	ระดับที่ 3 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.8
	ระดับที่ 4 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.9
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	ระดับที่ 1 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.1
	ระดับที่ 2 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2
	ระดับที่ 3 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.3
	ระดับที่ 4 : ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.4

จะได้การทดลองในวิธี NSGAII ที่มีปัจจัย 2 ปัจจัยปัจจัยละ 4 ระดับ และมีการทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีจำนวนทรีตเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองเท่ากับ 4x4x2 = 32 การทดลอง

3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่

แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computation Time to Solution) เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยมีขั้นตอนดังนี้ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

ขั้นตอนที่ 1 : ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่จริงเป็นตัวแปรตอบสนองในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ถ้าสามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดมีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 ซึ่งแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นใกล้คียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ก็จะทำการระบุระดับของปัจจัยนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าไม่สามารถระบุได้หรือมีปัจจัยมากกว่า 2 ระดับที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด จะทำการพิจารณาตัวแปรตอบสนองตัวอื่นในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 2 : ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เป็นตัวแปรตอบสนองในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ถ้าสามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดมีค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เข้าใกล้ 0 ซึ่งแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีการกระจายสม่ำเสมอ ก็จะทำการระบุระดับของปัจจัยนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าไม่สามารถระบุได้หรือมีปัจจัยมากกว่า 2 ระดับที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด จะทำการพิจารณาตัวแปรตอบสนองตัวอื่นในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 : ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนองในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ถ้าสามารถระบุได้ว่าปัจจัยใดมีค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ก็จะทำการระบุระดับของปัจจัยนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้าไม่สามารถระบุได้หรือมีปัจจัยมากกว่า 2 ระดับที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด จะทำการพิจารณาตัวแปรตอบสนองตัวอื่นในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 4 : ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบเป็นตัวแปรตอบสนองในการพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ระดับของปัจจัยใดที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ก็จะทำการระบุระดับของปัจจัยนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากตัวชี้วัดสมรรถนะในขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 จะทำการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทางวิธีทางสถิติเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หากระดับปัจจัยใดมีผลต่อตัวแปรตอบสนองจะนำปัจจัยนั้นไปวิเคราะห์ต่อ เพื่อหาคู่ลำดับที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองและแตกต่างไปจากระดับปัจจัยอื่นที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ปารเมศ ชุติมา, 2545) ส่วนตัวชี้วัดสมรรถนะในขั้นตอนที่ 4 คือเวลาที่ใช้ในเรค้นหาคำตอบ จะเลือกระดับของปัจจัยที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

3.6.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 3.21

General Linear Model: Convergence versus Pc, Pm

```
Factor  Type   Levels  Values
Pc      fixed       4  0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Pm      fixed       4  0.1, 0.2, 0.3, 0.4


Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF     Seq SS     Adj SS     Adj MS   F  P
Pc       3  0.0000000  0.0000000  0.0000000  **
Pm       3  0.0000000  0.0000000  0.0000000  **
Pc*Pm    9  0.0000000  0.0000000  0.0000000  **
Error   16  0.0000000  0.0000000  0.0000000
Total   31  0.0000000

** Denominator of F-test is zero or undefined.


S = 0   R-Sq = *%   R-Sq(adj) = *%
```

ภาพที่ 3.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากกลุ่มคำตอบที่ได้จากระดับปัจจัยต่างๆ มีค่าเท่ากัน ค่าของกลุ่มคำตอบที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9 และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.2 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยทั้ง 2 ค่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII ดังตารางที่ 3.60

ตารางที่ 3.60 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.9
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.2

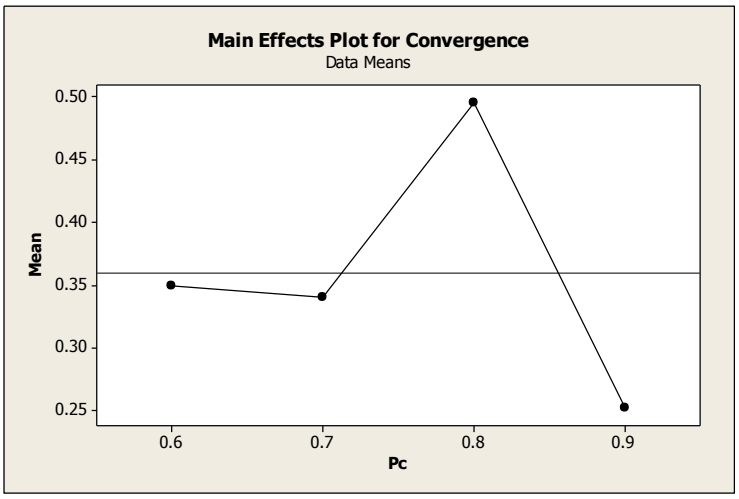
3.6.2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 3.22

General Linear Model: Convergence versus Pc, Pm

```
Factor  Type   Levels  Values
Pc      fixed       4  0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Pm      fixed       4  0.1, 0.2, 0.3, 0.4


Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
Pc       3  0.27146  0.27146  0.09049  7.32  0.003
Pm       3  0.10347  0.10347  0.03449  2.79  0.074
Pc*Pm    9  0.14684  0.14684  0.01632  1.32  0.301
Error   16  0.19791  0.19791  0.01237
Total   31  0.71969


S = 0.111219   R-Sq = 72.50%   R-Sq(adj) = 46.72%
```

ภาพที่ 3.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set



ภาพที่ 3.23 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และจากภาพที่ 3.23 ระดับปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9 มีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นคือกลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับปัจจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ส่วนปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันยังไม่สามารถสรุปได้จึงทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

ทำการวิเคราะห์ปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 3.24

One-way ANOVA: Spread versus Pm

Source	DF	SS	MS	F	P
Pm	3	0.04945	0.01648	2.98	0.159
Error	4	0.02211	0.00553		
Total	7	0.07156			

S = 0.07434 R-Sq = 69.11% R-Sq(adj) = 45.94%

ภาพที่ 3.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของ

จำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง เป็นตัวแปรตอบสนองในการทดสอบได้ผลดังภาพที่ 3.25

One-way ANOVA: Ratio versus Pm

```
Source  DF         SS         MS  F  P
Pm       3  0.3437500  0.1145833  *  *
Error    4  0.0000000  0.0000000
Total    7  0.3437500

S = 0   R-Sq = 100.00%   R-Sq(adj) = 100.00%


                                Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev    +---------+---------+---------+---------
0.1    2  0.000000  0.000000    *
0.2    2  0.250000  0.000000                  *
0.3    2  0.000000  0.000000    *
0.4    2  0.500000  0.000000                                    *
                                +---------+---------+---------+---------
                              0.00      0.15      0.30      0.45

Pooled StDev = 0.000000
```

ภาพที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยที่ระดับปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.4 มีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือกลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับปัจจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ดังนั้นจึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII ดังตารางที่ 3.61

ตารางที่ 3.61 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.9
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.4

3.6.3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 3.26

General Linear Model: Convergence versus Pc, Pm

```
Factor  Type   Levels  Values
Pc      fixed       4  0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Pm      fixed       4  0.1, 0.2, 0.3, 0.4


Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
Pc       3  0.00236  0.00236  0.00079  0.02  0.997
Pm       3  0.20156  0.20156  0.06719  1.39  0.281
Pc*Pm    9  0.57245  0.57245  0.06361  1.32  0.301
Error   16  0.77176  0.77176  0.04823
Total   31  1.54813


S = 0.219625   R-Sq = 50.15%   R-Sq(adj) = 3.41%
```

ภาพที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

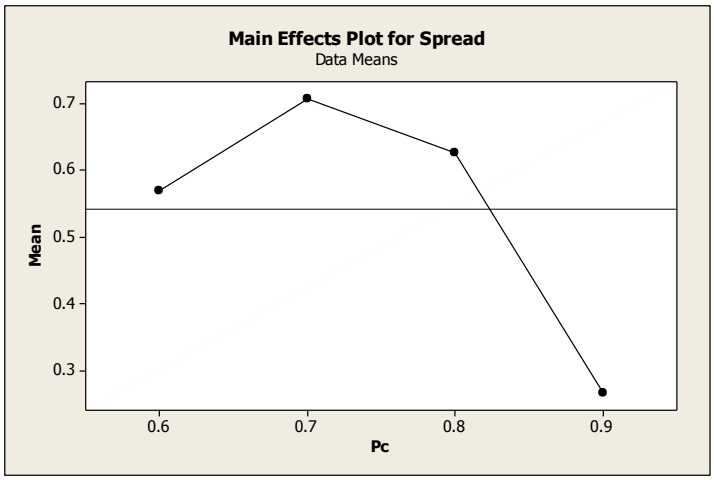
จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าไม่มีปัจจัยใดเลยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 3.27

General Linear Model: Spread versus Pc, Pm

```
Factor  Type   Levels  Values
Pc      fixed       4  0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Pm      fixed       4  0.1, 0.2, 0.3, 0.4


Analysis of Variance for Spread, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
Pc       3  0.88232  0.88232  0.29411  7.65  0.002
Pm       3  0.02537  0.02537  0.00846  0.22  0.881
Pc*Pm    9  0.07525  0.07525  0.00836  0.22  0.987
Error   16  0.61533  0.61533  0.03846
Total   31  1.59827


S = 0.196108   R-Sq = 61.50%   R-Sq(adj) = 25.41%
```

ภาพที่ 3.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement



ภาพที่ 3.28 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และจากภาพที่ 3.28 ระดับปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9 มีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นคือกลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับปัจจัยนี้มีการกระจายสม่ำเสมอ ส่วนปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันยังไม่สามารถสรุปได้จึงทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

ทำการวิเคราะห์ปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 3.29

One-way ANOVA: Ratio versus Pm

Source	DF	SS	MS	F	P
Pm	3	0.375	0.125	1.00	0.479
Error	4	0.500	0.125		
Total	7	0.875			

S = 0.3536 R-Sq = 42.86% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 3.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากภาพพบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการ

ค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII คือ ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.9 และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.1 ดังตารางที่ 3.62

ตารางที่ 3.62 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.9
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1

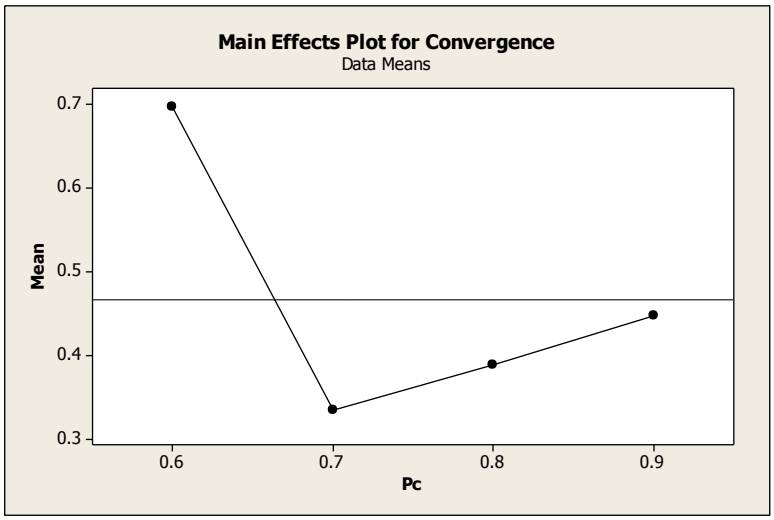
3.6.4 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 3.30

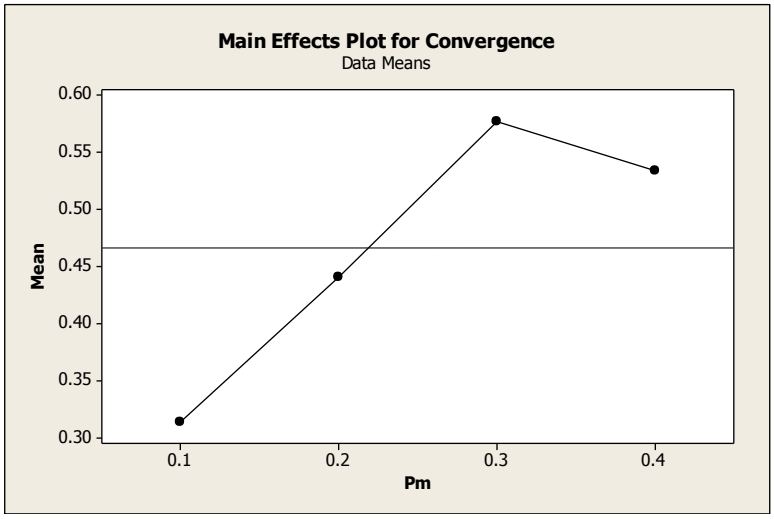
General Linear Model: Convergence versus Pc, Pm

```
Factor  Type   Levels  Values
Pc      fixed       4  0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Pm      fixed       4  0.1, 0.2, 0.3, 0.4


Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF    Seq SS    Adj SS    Adj MS      F      P
Pc       3  0.617886  0.617886  0.205962  29.65  0.000
Pm       3  0.327719  0.327719  0.109240  15.73  0.000
Pc*Pm    9  0.263409  0.263409  0.029268   4.21  0.006
Error   16  0.111130  0.111130  0.006946
Total   31  1.320144


S = 0.0833404   R-Sq = 91.58%   R-Sq(adj) = 83.69%
```

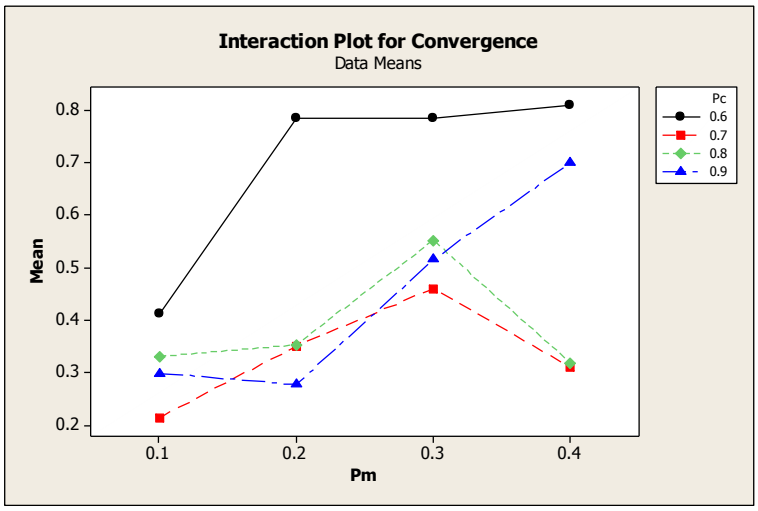
ภาพที่ 3.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set



ภาพที่ 3.31 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set



ภาพที่ 3.32 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set



ภาพที่ 3.33 กราฟแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และจากภาพที่ 3.31-3.33 ระดับปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7 และระดับปัจจัยในการมิวเตชันเท่ากับ 0.1 มีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นคือกลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับปัจจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ดังนั้นจึงกำหนดระดับของปัจจัยทั้ง 2 ค่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII ดังตารางที่ 3.63

ตารางที่ 3.63 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.7
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1

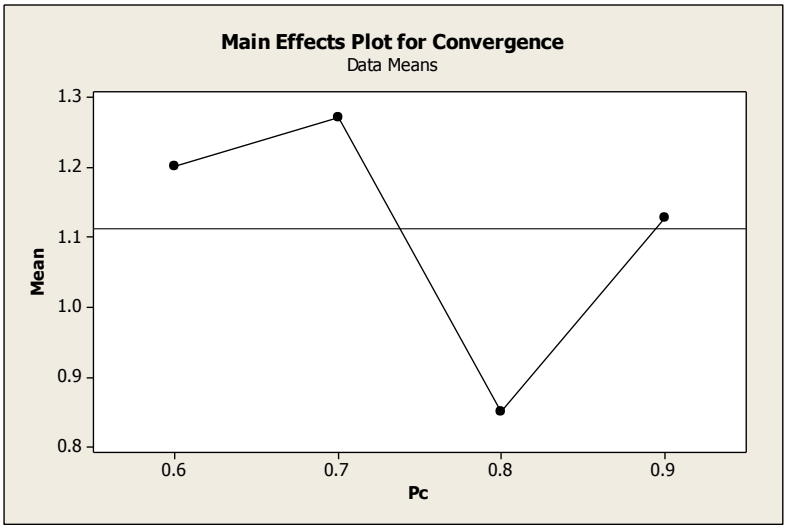
3.6.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 3.34

General Linear Model: Convergence versus Pc, Pm

```
Factor  Type   Levels  Values
Pc      fixed       4  0.6, 0.7, 0.8, 0.9
Pm      fixed       4  0.1, 0.2, 0.3, 0.4


Analysis of Variance for Convergence, using Adjusted SS for Tests

Source  DF   Seq SS   Adj SS   Adj MS     F      P
Pc       3  0.81425  0.81425  0.27142  8.97  0.001
Pm       3  0.25344  0.25344  0.08448  2.79  0.074
Pc*Pm    9  0.41592  0.41592  0.04621  1.53  0.220
Error   16  0.48422  0.48422  0.03026
Total   31  1.96783


S = 0.173964   R-Sq = 75.39%   R-Sq(adj) = 52.32%
```

ภาพที่ 3.34 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set



ภาพที่ 3.35 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และจากภาพที่ 3.35 ระดับปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.8 มีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นคือ

กลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับปัจจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ส่วนปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันยังไม่สามารถสรุปได้จึงทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

ทำการวิเคราะห์ปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 3.36

One-way ANOVA: Spread versus Pm

Source	DF	SS	MS	F	P
Pm	3	0.001	0.000	0.00	1.000
Error	4	0.852	0.213		
Total	7	0.853			

S = 0.4615 R-Sq = 0.15% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 3.36 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากภาพพบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง เป็นตัวแปรตอบสนองในการทดสอบ ได้ผลดังภาพที่ 3.37

One-way ANOVA: Ratio versus Pm

Source	DF	SS	MS	F	P
Pm	3	0.1528	0.0509	3.67	0.121
Error	4	0.0556	0.0139		
Total	7	0.2083			

S = 0.1179 R-Sq = 73.33% R-Sq(adj) = 53.33%

ภาพที่ 3.37 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เมื่อกำหนดปัจจัยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากภาพพบว่าปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชันไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII คือ ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.8 และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.2 ดังตารางที่ 3.64

ตารางที่ 3.64 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี NSGAII

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.8
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.2

3.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและแนวคิดของวิธีเจนเนติก (Genetic Algorithm; GAs) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแบบฮิวริสติกที่มีแนวคิดมาจากหลักการของกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural Selection) และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Natural Genetics) ว่าด้วยทฤษฎีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมไปสู่ลูกหลาน โดยทำการเปรียบเทียบสตริงคำตอบ (String) กับโครโมโซม (Chromosome) เปรียบเทียบคุณลักษณะของสตริงคำตอบ (Character) กับยีนส์ (Gene) เมื่อผ่านกระบวนการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมต่างๆ ได้แก่ การครอสโอเวอร์ และการมิวเตชันซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสตริงคำตอบแล้วจะทำให้เกิดคำตอบใหม่ที่มีความเหมาะสมที่สุด หรือมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด จึงนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งคำตอบที่ได้สามารถยอมรับได้ แต่วิธีเจนเนติกใช้เวลาในการค้นหาคำตอบค่อนข้างนาน ในบทนี้ได้มีการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีเจนเนติกคือ ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน โดยจากผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาทั้งหมด 5 ปัญหาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 3.65

ตารางที่ 3.65 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาในวิธี NSGAII

ปัจจัย	ขนาดปัญหา				
	12 ขั้นงาน	65 ขั้นงาน	148 ขั้นงาน	205 ขั้นงาน	183 ขั้นงาน
ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.9	0.9	0.9	0.7	0.8
ความน่าจะป็นในการมิวเตชัน	0.2	0.4	0.1	0.1	0.2

บทที่ 4

ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm optimization; PSO) ขั้นตอนการทำงานและการนำวิธี PSO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ และตัวอย่างการคำนวณ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี PSO ของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยที่แตกต่างกัน 5 ปัญหา

4.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO)

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เป็นฮิวริสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Kennedy and Eberhart (1995) โดยมีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการบินหาอาหารของฝูงนก เมื่อนกออกหาอาหารจะทำการจดจำเส้นทางของตัวเองและของฝูง มีการจดจำเส้นทางที่ดีที่สุดของฝูงเพื่อใช้ในการหาอาหารในครั้งต่อไป ซึ่งเปรียบได้กับการปรับปรุงคำตอบของปัญหาด้วยการเลือกเส้นทางที่ดี เพื่อให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้น โดยนกแต่ละตัวจะแทนด้วยอนุภาค (Particle) และจะทำการเคลื่อนที่ (Velocity) ไปในทิศทางต่างๆ โดยนกจะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยๆ เรียกว่า ฝูง (Swarm) เส้นทางที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงย่อยเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมเฉพาะที่ (Local Best Solution; Lbest) และเส้นทางที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution; Gbest) นอกจากนี้ได้มีคนพัฒนาการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization; DPSO) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางระบบผลิต (Liao et al., 2007)

4.2 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ขั้นตอนการทำงานของ DPSO ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. Data input : รับข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน และด้านที่สามารถทำงานได้ของแต่ละขั้นงาน และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

2. Representation & Initialization : นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนฝูง (Swarm) ฝูงละอนุภาค (Particle) ตัว ด้วยกระบวนการใส่รหัสคำตอบ (Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น (Initial Population)

3. Evaluation : คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ

4. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้แต่ละประชากรคำตอบโดยใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) ค่าอันดับที่ได้นี้เรียกว่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) กลุ่มที่ดีที่สุดจะถูกจัดอันดับไว้ต่ำที่สุด ในวิธี DPSO จะทำการหาค่าความแข็งแรงทั้งภายในแต่ละฝูงและค่าความแข็งแรงของประชากรทั้งหมด

5. Density Information : คำนวณค่าความหนาแน่นให้กับแต่ละประชากรด้วยวิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

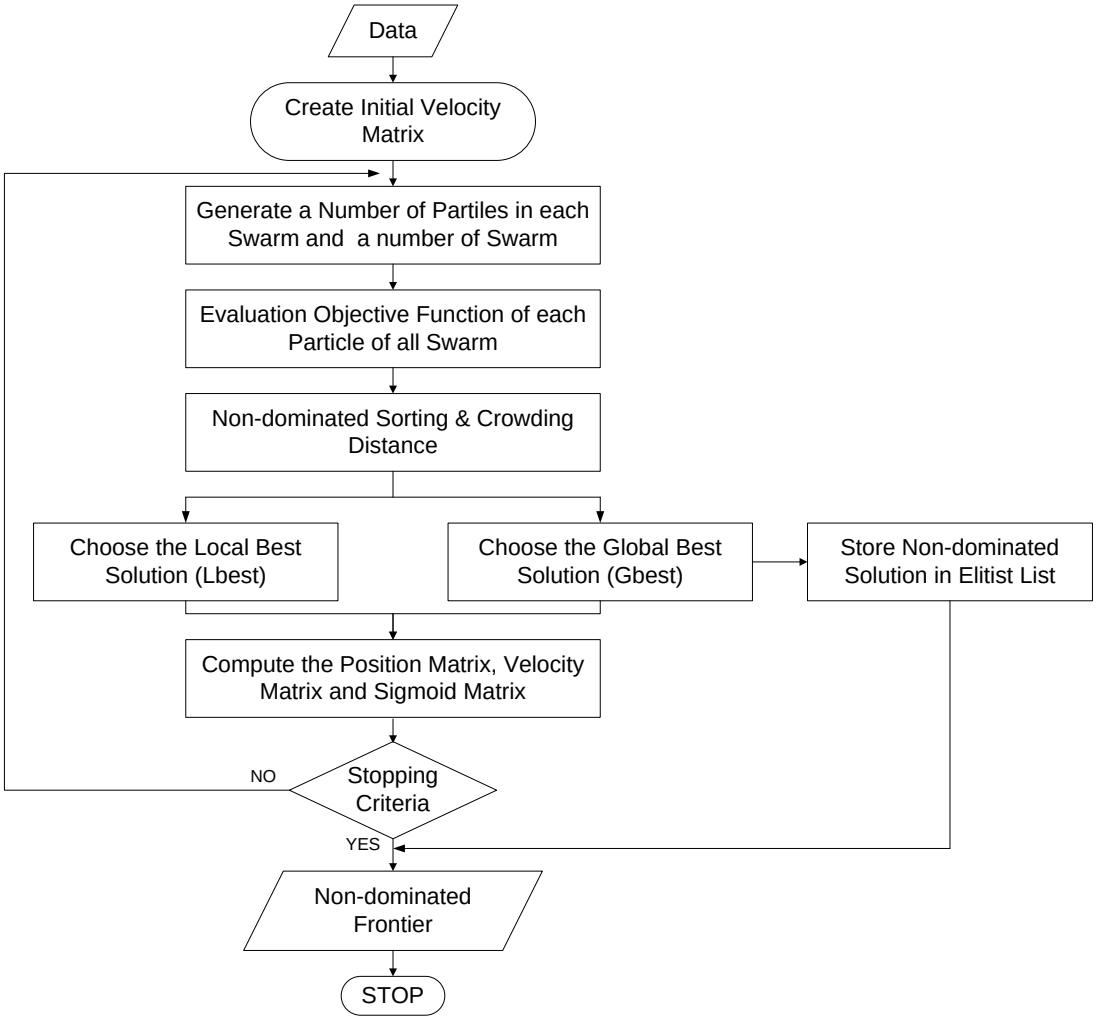
6. Selection : ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงมาเป็น Lbest และคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมดมาเป็น Gbest

7. Update Matrix : ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จากค่า Lbest และ Gbest จากนั้นใช้ Sigmoid Function ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้เป็นค่าความน่าจะเป็นเพื่อจะใช้ในการสร้างสตริงคำตอบในรอบถัดไป และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ใหม่นี้จะเป็นตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรอบก่อนหน้า เมื่อทำการพิจารณาในรอบถัดไป

8. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : ทำการเก็บประชากรที่ดีที่สุดในรอบนี้ (Gbest) ไปรวมกับประชากรที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจะทำการคัดเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominate Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ได้ไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของรอบก่อนหน้าในการดำเนินการรอบถัดไป

9. Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันน้อยกว่าจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ใหม่ ถ้าไม่ใช่ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

10. Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบและนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 8 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



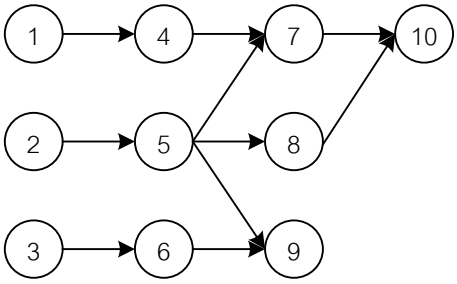
ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO

4.3 ตัวอย่างการนำวิธี DPSO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

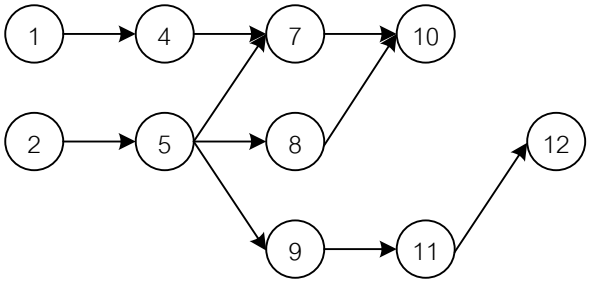
จากขั้นตอนของ DPSO ที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของปัญหา Kim et al., (2000) ที่ประกอบด้วย 12 ขั้นงาน และมี 2 ชนิดผลิตภัณฑ์ คือ A และ B เมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 ดังนี้

4.3.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

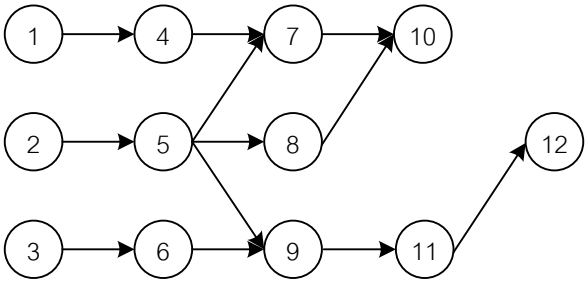
4.3.1.1 สร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) แสดงดังภาพที่ 4.2



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A และ B

ภาพที่ 4.2 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)

4.3.1.2 **เวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน** แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Side	Model		
		A	B	Mean
1	L	2	3	2.5
2	R	3	3	3
3	E	2	0	1
4	L	3	2	2.5
5	E	1	2	1.5
6	L	1	0	0.5
7	E	3	2	2.5
8	R	3	1	2
9	E	2	1	1.5
10	E	2	3	2.5
11	E	0	2	1
12	R	0	1	0.5

4.3.1.3 **สร้าง** Precedence Matrix **จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม** ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์

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

4.3.1.4 พารามิเตอร์ที่เลือกใช้ของ DPSO

- จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Particles) $P = 3$
- จำนวนฝูง (Swarms) $S = 2$
- น้ำหนักหารหน่วง (Inertia Weight : w) เท่ากับ 1
- ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor : c_1, c_2) เท่ากับ 0.1
- ผลกระทบจากการเรียนรู้เป็นแบบ Sum of Processing Time Based Learning Effect
- ผลกระทบที่เกิดจากการเรียนรู้ เท่ากับ 80%

4.3.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

การสร้างประชากรเริ่มต้นเริ่มจากการสร้างประชากรอย่างสุ่มเช่นเดียวกับวิธีการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยสร้างประชากรขึ้นมาจำนวน 2 ฝูง ฝูงละ 3 ตัว จากนั้นทำการสร้างตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) โดยตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของของอนุภาคเริ่มต้นจะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ขนาด $n\ x\ n$ เมื่อ n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด โดยตารางตำแหน่งของอนุภาคจะมีค่าเริ่มต้นตามค่าสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานดังแสดงในตัวอย่างด้านล่าง

ตารางที่ 4.3 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	1	[6 12 3 4 5 11 7 2 9 10 1 8]
	2	[2 1 10 12 9 8 7 6 3 5 11 4]
	3	[1 4 8 11 5 2 6 3 7 10 9 12]
2	1	[6 1 3 4 10 8 2 7 9 12 11 5]
	2	[1 6 7 4 2 3 10 9 8 5 11 12]
	3	[5 2 11 3 1 6 10 7 9 4 8 12]

ตารางที่ 4.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้น

	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

จากสตริงคำตอบ 11 (สตริงคำตอบของฝูงที่ 1 อนุภาคที่ 1) การสร้างตารางตำแหน่งของอนุภาค จะกำหนดให้แถวแทนเส้นทาง และคอลัมน์แทนตำแหน่ง จากตารางด้านล่างจะเห็นว่าในแถวที่ 6 ในคอลัมน์ที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่างานที่ 6 ถูกจัดในตำแหน่งที่ 1, แถวที่ 12 ของคอลัมน์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่างานที่ 12 ถูกจัดในตำแหน่งที่ 2 เป็นต้น จากสตริงคำตอบ 11 จะสามารถสร้างตารางตำแหน่งของอนุภาคได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 อนุภาคที่ 1

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

4.3.3 การถอดรหัสคำตอบ

จากสตริงคำตอบเบื้องต้น 6 ตัวนี้ จะต้องนำไปแปลงสตริงคำตอบจากค่าสิทธิในการเลือกงาน (String Priority) ไปเป็นลำดับขั้นงาน (Task Sequence) ก่อนจะนำไปจัดลงสถานีงาน โดยขั้นตอนการแปลงสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับขั้นงานมีวิธีเช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว เมื่อทำการแปลงสตริงคำตอบทั้ง 6 ตัว จะได้ลำดับขั้นงาน 6 ตัว ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[2 1 5 4 7 3 6 9 8 10 11 12]
	2	[3 6 1 4 2 5 7 8 10 9 11 12]
	3	[3 2 5 8 6 9 11 12 1 4 7 10]
2	1	[1 4 3 6 2 5 9 11 8 12 7 10]
	2	[3 2 6 5 8 9 11 12 1 4 7 10]
	3	[3 6 1 4 2 5 7 9 11 12 8 10]

จากลำดับขั้นงานทั้ง 6 ตัวข้างบนจะทำการจัดลงสถานีงานเพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยมีรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 โดยมีวิธีการจัดสรรงานลงสถานีงานและการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว จากลำดับงานทั้ง 6 ตัวนี้สามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 4.7 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 6 ตัวได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

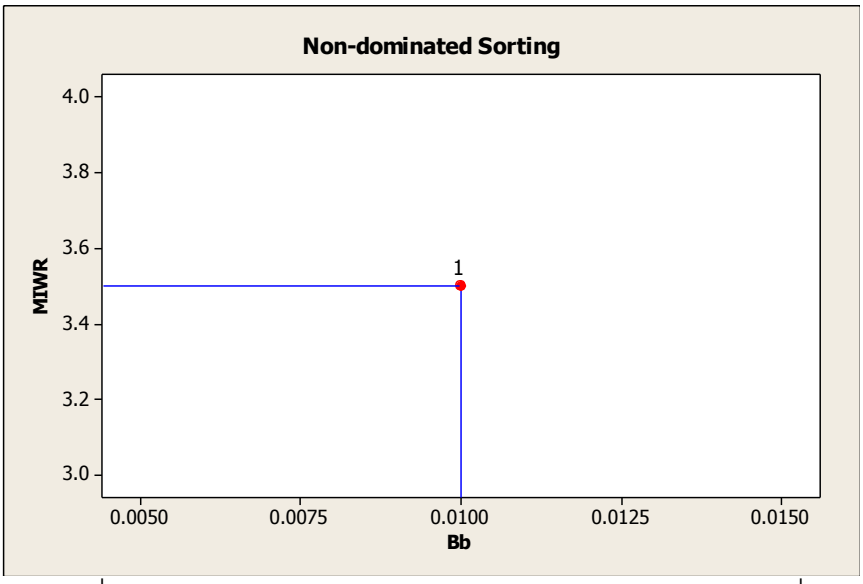
ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[2 1 1 3 4 3 3 3 6 5 6 6]
	2	[2 1 1 1 2 2 3 2 4 3 3 4]
	3	[2 2 1 4 1 3 3 4 3 3 5 5]
2	1	[1 1 2 1 2 2 1 1 2 4 3 3]
	2	[1 2 1 2 2 1 1 2 3 3 3 5]
	3	[1 1 1 1 2 2 3 2 2 2 4 3]

ตารางที่ 4.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

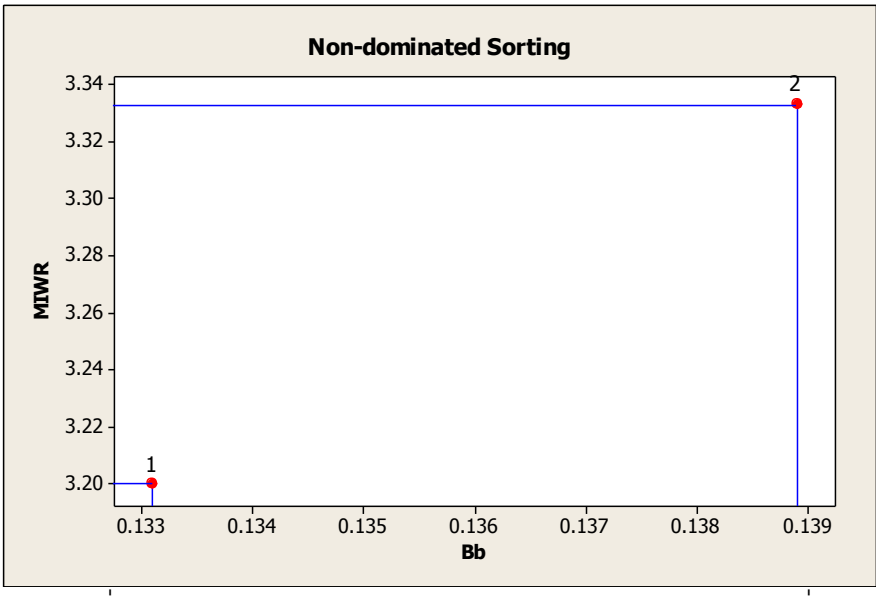
ฝูง	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	3	6	5.3333	0.0050
	2	2	4	3.5000	0.0100
	3	3	5	4.4444	0.0735
2	1	2	4	3.3333	0.1389
	2	3	4	3.2000	0.0212
	3	2	4	3.2000	0.1331

4.3.4 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

การประเมินค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบจะใช้การจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting โดยค่าอันดับนี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) โดยพิจารณาเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ที่ดีที่สุดมาจัดอันดับ (เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็นวัตถุประสงค์หลัก) โดยทำการกรองและเลือกสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด แล้วจึงนำสตริงที่เลือกมานี้มาพิจารณาการค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 เพื่อจัดอันดับค่าความแข็งแรงโดยวิธี Non-dominated Sorting ในตัวอย่างนี้เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 พบว่าในฝูงที่ 1 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดคือสตริงคำตอบที่ 2, ในฝูงที่ 2 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดคือสตริงคำตอบที่ 1 และ 3 เนื่องจากมีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด เมื่อนำมาจัดอันดับค่าความแข็งแรงในแต่ละฝูงแล้วจะได้ดังภาพที่ 4.3 และ 4.4 และคำนวณค่า Dummy Fitness ได้ดังตารางที่ 4.9



ภาพที่ 4.3 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1



ภาพที่ 4.4 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2

ตารางที่ 4.9 ค่า Dummy Fitness ของตริงคำตอบ

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness
1	2	3.5000	0.0100	1
2	1	3.3333	0.1389	2
	3	3.2000	0.1331	1

คำนวณหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance โดยพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 โดยจะทำการพิจารณาทีละ Front ซึ่งจะทำการพิจารณา Front ที่ 1 ก่อน แล้วจึงทำการพิจารณา Front ถัดๆ ไป โดยมีวิธีการคำนวณหาค่า Crowding Distance เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบมีค่าดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	2	3.5000	0.0100	1	infinity
2	1	3.3333	0.1389	2	infinity
	3	3.2000	0.1331	1	infinity

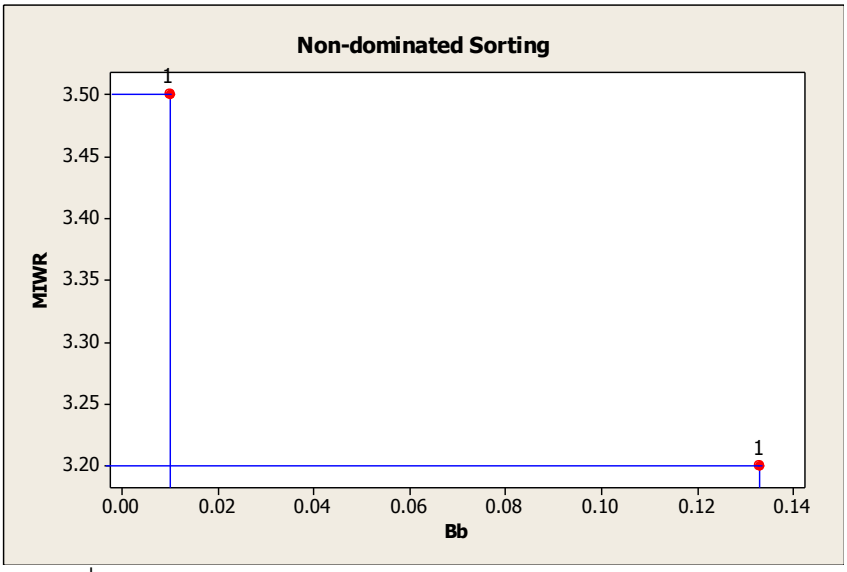
เมื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบแล้ว จะพิจารณาสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 มาเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest) ถ้ามีสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มากกว่า 1 สตริงคำตอบจะทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นที่มีค่ามากที่สุดเป็นลำดับถัดไป ถ้าค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากันจะทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากันมาฝูงละหนึ่งสตริงคำตอบ ซึ่งในที่นี้ฝูงที่ 1 มีสตริงคำตอบเพียง 1 สตริงคำตอบเท่านั้นจึงทำให้สตริงคำตอบนี้เป็น Lbest ของฝูงที่ 1 ส่วนฝูงที่ 2 มีสตริงคำตอบที่ดีที่สุด 1 สตริงคำตอบจึงทำให้สตริงคำตอบนี้เป็น Lbest ของฝูงที่ 2 ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (Lbest)

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	2	3.5000	0.0100	1	infinity	Lbest
2	3	3.2000	0.1331	1	infinity	Lbest

เมื่อได้สตริงที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงแล้ว (Lbest) จะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงมารวมกันเพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-

dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ดังภาพที่ 4.5 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 4.12



ภาพที่ 4.5 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากร

ตารางที่ 4.12 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	2	3.5000	0.0100	1	infinity	Gbest
2	3	3.2000	0.1331	1	infinity	Gbest

จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) คือสตริงคำตอบของฝูงที่ 1 อนุภาคที่ 2 และสตริงคำตอบของฝูงที่ 2 อนุภาคที่ 3 ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	String Priority
Gbest	12	[2 1 10 12 9 8 7 6 3 5 11 4]
	23	[5 2 11 3 1 6 10 7 9 4 8 12]

4.3.5 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคที่ใช้ในการเก็บค่าที่ดีที่สุด คือ การนำเอาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ของรอบการทำงานปัจจุบันไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) และจะทำการปรับปรุง (Update) สถานที่รวมคำตอบ (Elitist) นี้ในทุกๆรอบ ด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป ได้ผลดังตารางที่ 4.14 – 4.17

ตารางที่ 4.14 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	String Priority
1	12	[2 1 10 12 9 8 7 6 3 5 11 4]
1	23	[5 2 11 3 1 6 10 7 9 4 8 12]

ตารางที่ 4.15 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
1	12	[3 6 1 4 2 5 7 8 10 9 11 12]
1	23	[3 6 1 4 2 5 7 9 11 12 8 10]

ตารางที่ 4.16 สถานีของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Workstation
1	12	[2 1 1 1 2 2 3 2 4 3 3 4]
1	23	[1 1 1 1 2 2 3 2 2 2 4 3]

ตารางที่ 4.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	12	2	4	3.5000	0.0100
1	23	2	4	3.2000	0.1331

4.3.6 การปรับปรุงค่าในตาราง

การปรับปรุงค่าในตารางเป็นการปรับปรุงเพื่อให้โอกาสของสตริงคำตอบที่ดีมีโอกาสในการค้นหาคำตอบในรอบถัดไปมากขึ้น ซึ่งมีความสำคัญมากเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น โดยจะทำการปรับค่าตารางตำแหน่งของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Position Matrix) จากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงและประชากร คือ Lbest และ Gbest และปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็นจาก Sigmoid Function ตามสมการด้านล่าง

4.3.6.1 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ได้จากการจดจำเส้นทางที่ดีที่ผ่านมาในการหาอาหาร โดยจะทำการปรับปรุงเส้นทางการเคลื่อนที่ในทุกๆ รอบเพื่อจะนำใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้ดังสมการด้านล่าง จะได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 ดังนี้

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1\left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2\left(G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) \qquad (4.1)$$

เมื่อ $V_{(i,j)}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i

$X_{(i-1,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคในฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i-1

$P_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของฝูง (Lbest)

$G_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)

r_1 และ r_2 คือ ตัวเลขสุ่มในช่วง [0,1]

c_1 และ c_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor)

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

จากสมการ $V_{(i,j)}$ จะเห็นว่าการปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะทำการปรับปรุงจากทิศทางการเคลื่อนที่ของรอบก่อนหน้า $V_{(i-1,j)}$, และความแตกต่างของค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูง $P_{(i,j)}$ และค่าตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร $G_{(i,j)}$ เทียบกับตำแหน่งของอนุภาค

ในสมการการหาค่า $V_{(i,j)}$ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 2 เรียกว่า “Cognition” และในส่วนที่ 3 เรียกว่า “Social” ตัวแปร c_1 และ c_2 ใช้ในการกำหนดน้ำหนักให้กับ

สมการในส่วนของ Social และ Cognition ส่วนตัวแปร w เป็นค่าน้ำหนักที่ใช้ในการหน่วงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Shi and Eberhart, 1998)

ในตัวอย่างนี้กำหนดให้ w เท่ากับ 1 และ c_1 , c_2 เท่ากับ 0.1 ทำการสุ่มค่า r_1, r_2 ที่มีค่าระหว่าง [0,1] ของฝูงที่ 1 ได้เท่ากับ 0.4868 และ 0.4359 ตามลำดับ และสุ่มค่า r_1, r_2 ที่มีค่าระหว่าง [0,1] ของฝูงที่ 2 ได้เท่ากับ 0.4468 และ 0.3063 ตามลำดับ ในที่นี้ตารางตำแหน่งในรอบก่อนหน้า $X_{(i-1,j)}$ กำหนดให้เท่ากับตำแหน่งเริ่มต้น (ตารางตำแหน่งของ Lbest ของแต่ละฝูง) จากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละฝูงได้ดังนี้

ตารางที่ 4.18 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1 $P_{(i,j)} = Lbest1$

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

ตารางที่ 4.19 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1 $P_{(i,j)} = Lbest2$

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

เนื่องจากสตริงที่ดีที่สุดของประชากรที่ได้ในรอบที่ 1 มี 2 สตริงคำตอบซึ่งมีความแข็งแรงเท่ากับ 1 จะพิจารณาสตริงคำตอบที่มีค่าความหนาแน่นค่ามากที่สุดเป็นลำดับถัดไป เนื่องจากสตริงคำตอบทั้ง 2 ตัวมีค่าความหนาแน่นเท่ากันจึงทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากันมา 1 สตริงคำตอบ ซึ่งในที่นี้สุ่มได้สตริงคำตอบ 23 (สตริงคำตอบของฝูงที่ 2 อนุภาคที่ 3) ซึ่งตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากรแสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร $G_{(i,j)}$ ในรอบที่ 1

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

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1r_1\left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2r_2(G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.4868)(0 - 0) + (0.1 * 0.4359)(0 - 0)$$
$$V_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1r_1\left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2r_2(G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.4868)(1 - 1) + (0.1 * 0.4359)(0 - 1)$$
$$V_{(i,j)} = -0.04359$$

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0436	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0
2	-0.0436	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	-0.0436	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0436	0	-0.0436
5	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.0436	0	0
6	0	0	0	0	0	0.0436	0	-0.0436	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-0.0436	0.0436	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	-0.0436	0	0	0	0	0.0436	0
9	0	0	0	0	-0.0436	0	0	0	0.0436	0	0	0
10	0	0	-0.0436	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	0
11	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	-0.0436	0
12	0	0	0	-0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0.0436

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 (G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.4468)(0 - 0) + (0.1 * 0.3063)(0 - 0)$$
$$V_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 (G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.4468)(0 - 0) + (0.1 * 0.3063)(0 - 0)$$
$$V_{(i,j)} = 0$$

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทุกตำแหน่ง ตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1

	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

4.3.6.2 **การปรับปรุงตารางทิศทางการตำแหน่งของอนุภาค** (Position Matrix)

การปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคเพื่อใช้ในรอบถัดไป สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง โดยจะได้ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \quad (4.2)$$

เมื่อ $X_{(i,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคในฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i

$X_{(i-1,j)}$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคในฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i-1

$V_{(i,j)}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0 + 0$$
$$X_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 1 - 0.0436$$
$$X_{(i,j)} = 0.9564$$

ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1ในรอบที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.9564	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0
2	0.9564	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	0.9564	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0436	0	0.9564
5	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9564	0	0
6	0	0	0	0	0	0.0436	0	0.9564	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.9564	0.0436	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0.9564	0	0	0	0	0.0436	0
9	0	0	0	0	0.9564	0	0	0	0.0436	0	0	0
10	0	0	0.9564	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	0
11	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0.9564	0
12	0	0	0	0.9564	0	0	0	0	0	0	0	0.0436

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0 + 0$$
$$X_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0 + 0$$
$$X_{(i,j)} = 0$$

ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1

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

4.3.6.3 **การปรับปรุงตาราง** Sigmoid Function

การสร้างตาราง Sigmoid Function เป็นการแปลงค่าจากตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปเป็นค่าความน่าจะเป็นเพื่อใช้ในการสุ่มสร้างประชากรในรอบถัดไป ดังสมการด้านล่าง โดยจะได้ตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(-V_{(i,j)})} \tag{4.3}$$

เมื่อ $S(V_{(i,j)})$ คือ ค่า Sigmoid Function ที่ได้จากการแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฝูงที่ j รอบที่ i

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(-V_{(i,j)})}$$
$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(-0)}$$
$$S(V_{(i,j)}) = 0.5$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(-V_{(i,j)})}$$
$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(0.0436)}$$
$$S(V_{(i,j)}) = 0.4891$$

ทำการปรับปรุงตารา Sigmoid ในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 Sigmoid ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.4891	0.5109	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	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	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	0.5109	0.5	0.4891
5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [1,1]

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

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(-0)}$$

$$S(V_{(i,j)}) = 0.5$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [2,1]

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

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(-0)}$$

$$S(V_{(i,j)}) = 0.5$$

ทำการปรับปรุงตารา Sigmoid ในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.26

ตารางที่ 4.26 Sigmoid ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1

	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

4.3.7 การแก้ปัญหาในรอบถัดไป

ในการแก้ปัญหารอบที่ 2 มีขั้นตอนเหมือนการแก้ในรอบที่ 1 แต่สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะได้จากการสุ่มโดยใช้ค่าความน่าจะเป็นจากตาราง Sigmoid ของแต่ละฝูงในรอบการทำงานก่อนหน้า โดยสร้างให้ครบทุกอนุภาคในแต่ละฝูง ตามขั้นตอนดังนี้

- เริ่มจากการสร้างวงล้อรูเล็ต คือ วงกลมที่มีพื้นที่ขนาด 1 หน่วย โดยได้แบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนๆ ตามจำนวนงาน พื้นที่แต่ละส่วนจะมีขนาดเท่ากับความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละงาน มีวิธีการสร้างดังนี้

หาค่าความน่าจะเป็นรวมของงานทั้งหมด n ตัว ดังสมการ

$$F = \sum_{i=1}^{n} f(x_i) \tag{4.4}$$

โดยที่ $f(x_i)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงาน i

หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก (Probability of Selection) ของแต่ละงาน ตามสมการ

$$p_i = \frac{f(x_i)}{F} \quad \text{เมื่อ } i = 1,2,\dots,n \tag{4.5}$$

หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกสะสม (Cumulative Probability of Selection) ของแต่ละงาน ตามสมการ

$$q_i = \sum_{j=1}^{i} p_j \tag{4.6}$$

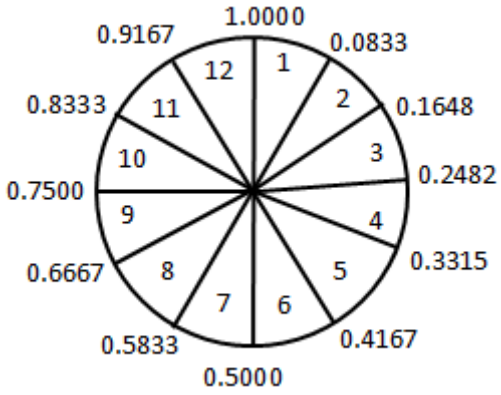
ทำการสร้างวงล้อรูเล็ตในการสร้างสตริงคำตอบที่ 1 ในตำแหน่งที่ 1 ของฝูงที่ 1 โดยการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานจากตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 1 ในคอลัมน์ที่ 1 ในตารางที่ 4.27 แล้วใช้ในการสร้างวงล้อรูเล็ตดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.27 Sigmoid ของฝูงที่ 1 ที่ได้จากรอบก่อนหน้า

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.4891	0.5109	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	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	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	0.5109	0.5	0.4891
5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109

ตารางที่ 4.28 ตัวอย่างการสร้างวงล้อรูเล็ตตำแหน่งที่ 1 ของสตริงคำตอบ 11

ขั้นงาน	ความน่าจะเป็นในการเลือกงาน	p_i	q_i
1	0.5	0.0833	0.0833
2	0.4891	0.0815	0.1648
3	0.5	0.0833	0.2482
4	0.5	0.0833	0.3315
5	0.5109	0.0852	0.4167
6	0.5	0.0833	0.5000
7	0.5	0.0833	0.5833
8	0.5	0.0833	0.6666
9	0.5	0.0833	0.7500
10	0.5	0.0833	0.8333
11	0.5	0.0833	0.9166
12	0.5	0.0833	1.0000
รวม	6	1	



ภาพที่ 4.6 วงล้อรูเล็ต

- เมื่อทำการสร้างวงล้อรูเล็ตดังภาพที่ 4.6 แล้วจะทำการสุ่มค่า r ที่มีค่าระหว่าง [0,1] ขึ้นมาเพื่อจะเลือกงานให้กับตำแหน่งที่ 1 ของสตริงคำตอบที่ 1 ฝูงที่ 1 สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.5367 งานที่ถูกเลือกก็คืองาน 7

- เมื่องานที่ถูกเลือกจัดลงในตำแหน่งงานแล้วจะถูกตัดทิ้ง แล้วทำการปรับปรุงตาราง Sigmoid โดยการเปลี่ยนตัวเลขในแถวของงานนั้นเป็น 0 ทั้งหมด ดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 Sigmoid ของฝูงที่ 1 เมื่อทำการปรับปรุงหลังจากวางงานตำแหน่งที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.4891	0.5109	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	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	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	0.5109	0.5	0.4891
5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109

เมื่อทำการปรับปรุงตาราง Sigmoid แล้วจะหาค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแต่ละงาน และค่าความน่าจะเป็นสะสมในการเลือกงาน ในตำแหน่งที่ 2 ของสตริงคำตอบที่ 1 ฝูงที่ 1 ใหม่ โดยการพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานจากตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 1 ในคอลัมน์ที่ 2 ในตารางที่ 4.29 แล้วใช้ในการสร้างวงล้อรูเล็ตดังตารางที่ 4.30

ตารางที่ 4.30 ตัวอย่างการสร้างวงล้อรูเล็ตตำแหน่งที่ 2 ของสตริงคำตอบ 11

ขั้นงาน	ความน่าจะเป็นในการเลือกงาน	p_i	q_i
1	0.5	0.0909	0.0909
2	0.4891	0.0889	0.1798
3	0.5	0.0909	0.2707
4	0.5	0.0909	0.3616
5	0.5109	0.0929	0.4545
6	0.5	0.0909	0.5454
7	0	-	-
8	0.5	0.0909	0.6364
9	0.5	0.0909	0.7273
10	0.5	0.0909	0.8182
11	0.5	0.0909	0.9091
12	0.5	0.0909	1.0000
รวม	5.5	1	

- ทำการสุ่มค่า r ที่มีค่าระหว่าง [0,1] ขึ้นมาเพื่อจะเลือกงานให้กับตำแหน่งที่ 2 ของสตริงคำตอบที่ 1 ของฝูงที่ 1 สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.4927 งานที่ถูกเลือกก็คืองาน 6

- งานที่ถูกเลือกจัดลงในตำแหน่งงานแล้วจะถูกตัดทิ้ง แล้วทำการปรับปรุงตาราง Sigmoid โดยการเปลี่ยนตัวเลขในแถวของงานนั้นเป็น 0 ทั้งหมด ดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 Sigmoid ของฝูงที่ 1 เมื่อทำการปรับปรุงหลังจากวางงานตำแหน่งที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2	0.4891	0.5109	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	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	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	0.5109	0.5	0.4891
5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5
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	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5109	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.4891	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5109

- ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั่งงานทุกงานถูกจัดลงในสตริงคำตอบ จะได้สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานของฝูงที่ 1 อนุภาคที่ 1

- ในการสร้างสตริงคำตอบที่ 2 ของฝูงที่ 1 ก็จะกลับไปใช้ตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 1 เริ่มต้นที่ได้จากรอบก่อนหน้าอีกครั้ง แล้วทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั่งงานทุกงานถูกจัดลงในสตริงคำตอบ

- ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั่งสร้างสตริงคำตอบของฝูงที่ 1ครบทุกอนุภาค

ในการสร้างสตริงคำตอบของฝูงที่ 2 ก็ทำเช่นเดียวกับการสร้างสตริงคำตอบของฝูงที่ 1 เพียงแต่เปลี่ยนไปใช้ตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 2

เมื่อจัดจนครบทุกงานแล้วจะได้สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงาน 6 สตริงคำตอบ ดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	1	[7 6 11 10 8 3 9 4 2 12 5 1]
	2	[8 7 3 4 6 2 12 1 5 9 10 11]
	3	[4 12 6 2 11 10 5 1 7 8 9 3]
2	1	[8 9 3 2 5 6 7 10 1 4 12 11]
	2	[12 9 5 7 2 6 11 4 8 1 3 10]
	3	[9 5 4 12 1 11 10 7 2 3 6 8]

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 4.33

ตารางที่ 4.33 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[3 1 4 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
	2	[1 2 5 4 7 3 6 9 11 12 8 10]
	3	[2 5 3 6 9 11 1 12 4 7 8 10]
2	1	[2 1 5 8 3 6 4 7 10 9 11 12]
	2	[1 2 4 3 6 5 7 9 8 11 12 10]
	3	[1 4 2 3 6 5 7 8 10 9 11 12]

จากลำดับขั้นงานทั้ง 6 ตัวข้างบนจะสามารถจัดงานลงสถานีงานและคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 6 ตัวได้ดังตารางที่ 4.34 และ 4.35

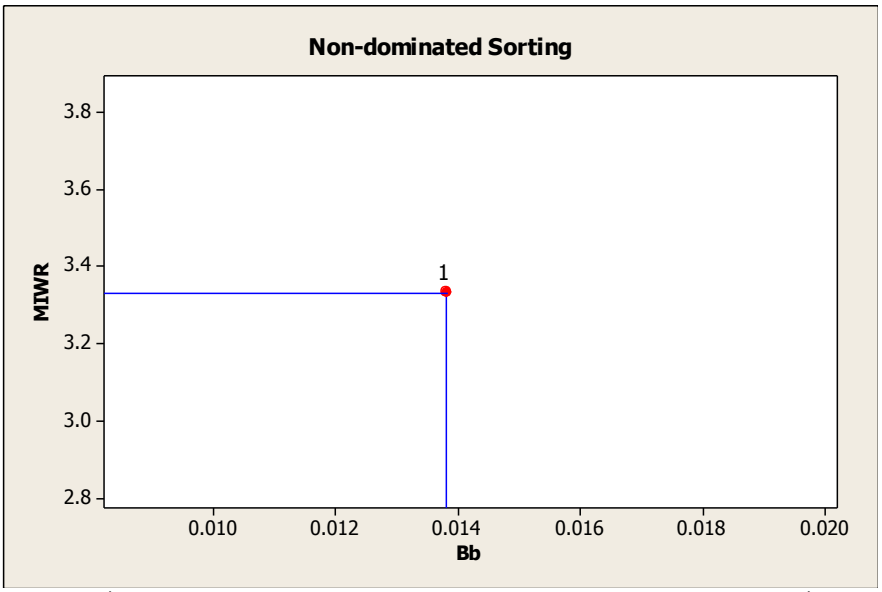
ตารางที่ 4.34 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[1 1 1 2 2 1 2 3 3 3 4 4]
	2	[1 2 2 1 1 2 1 4 4 4 4 5]
	3	[2 2 1 1 1 2 3 2 3 4 6 6]
2	1	[2 1 2 2 1 1 1 4 3 4 4 4]
	2	[1 2 1 2 1 2 3 2 4 4 4 3]
	3	[1 1 2 2 1 2 4 4 5 4 4 6]

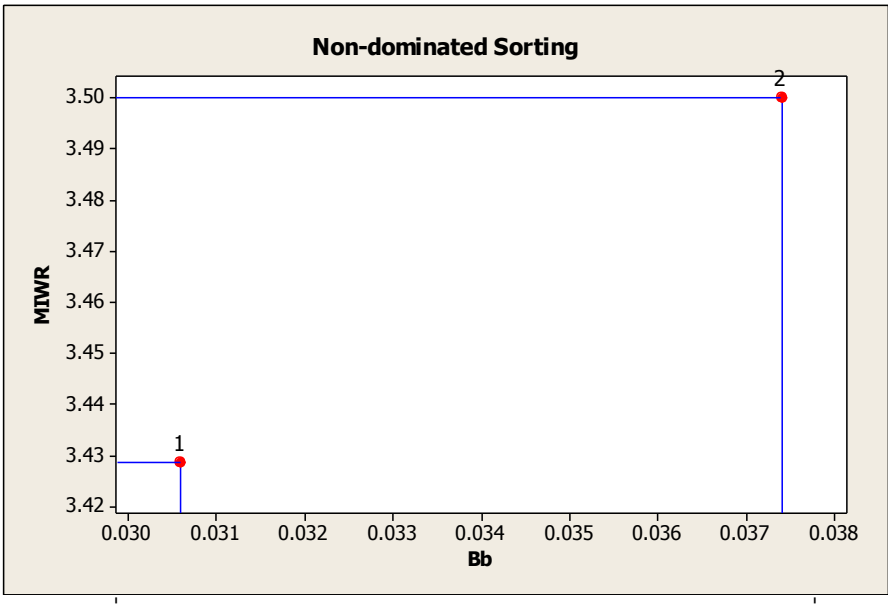
ตารางที่ 4.35 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูง	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	2	4	3.3333	0.0138
	2	3	4	3.4286	0.0813
	3	3	5	4.1667	0.0006
2	1	2	4	3.4286	0.0306
	2	2	4	3.5000	0.0374
	3	3	5	4.5000	0.0171

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของแต่ละฝูงดังภาพที่ 4.7 และ 4.8 และคำนวณค่า Crowding Distance ของแต่ละฝูงได้ดังตารางที่ 4.36



ภาพที่ 4.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1



ภาพที่ 4.8 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2

ตารางที่ 4.36 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

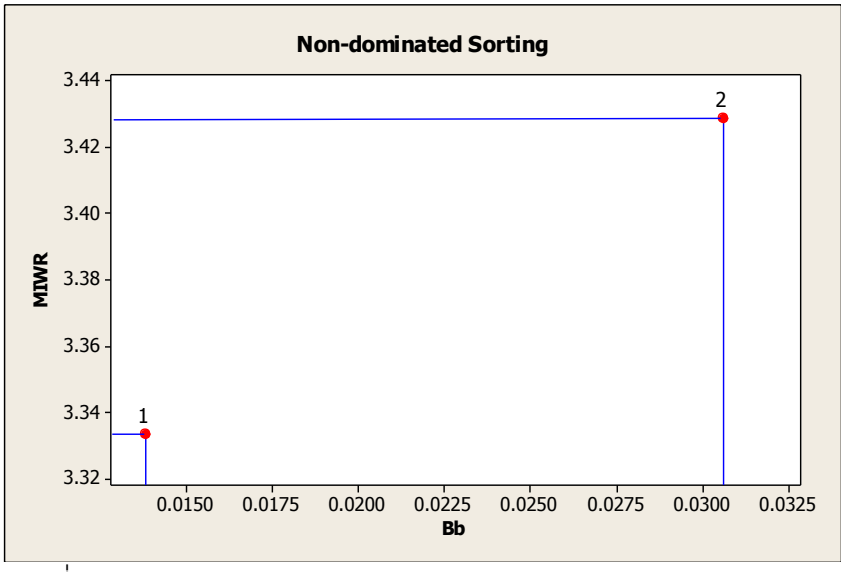
ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	1	3.3333	0.0138	1	infinity
2	1	3.4286	0.0306	1	infinity
	2	3.5000	0.0374	2	infinity

เมื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบแล้ว จะพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) เหมือนการเลือกในรอบที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.37 การคัดเลือกสตริงที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (Lbest)

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.3333	0.0138	1	infinity	Lbest
2	1	3.4286	0.0306	1	infinity	Lbest
	2	3.5000	0.0374	2	infinity	

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงแล้ว (Lbest) จะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงมารวมกันเพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ดังภาพที่ 4.9 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 4.38



ภาพที่ 4.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบของประชากร

ตารางที่ 4.38 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.3333	0.0138	1	infinity	Gbest
2	1	3.4286	0.0306	2	infinity	

จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) คือสตริงคำตอบของฝูงที่ 1 อนุภาคที่ 1 ดังตารางที่ 4.39

ตารางที่ 4.39 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	String Priority
Gbest	11	[7 6 11 10 8 3 9 4 2 12 5 1]

เมื่อได้สตริงคำตอบ Gbest จะนำไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในสถานที่รวมคำตอบ ดังตารางที่ 4.40 – 4.43

ตารางที่ 4.40 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	12	[2 1 10 12 9 8 7 6 3 5 11 4]
1	23	[5 2 11 3 1 6 10 7 9 4 8 12]
2	11	[7 6 11 10 8 3 9 4 2 12 5 1]

ตารางที่ 4.41 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	12	[3 6 1 4 2 5 7 8 10 9 11 12]
1	23	[3 6 1 4 2 5 7 9 11 12 8 10]
2	11	[3 1 4 2 5 7 8 10 6 9 11 12]

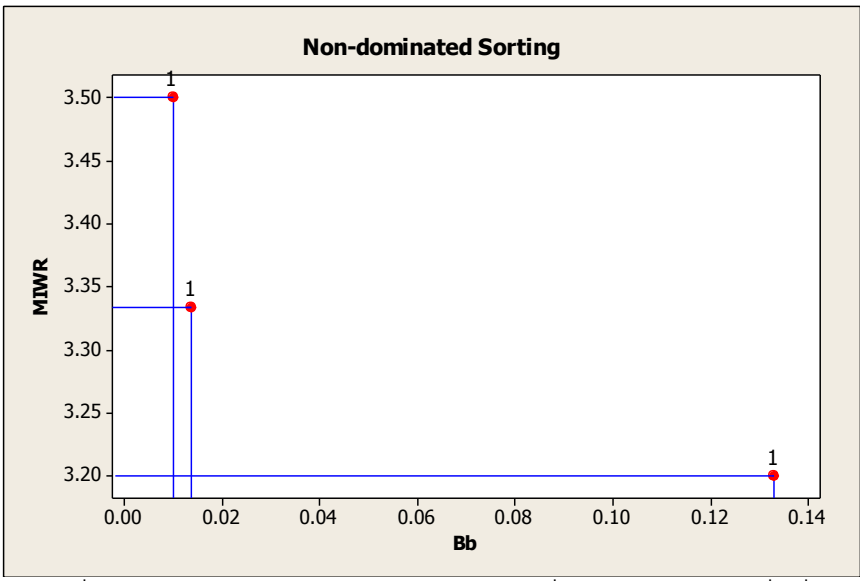
ตารางที่ 4.42 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	12	[2 1 1 1 2 2 3 2 4 3 3 4]
1	23	[1 1 1 1 2 2 3 2 2 2 4 3]
2	11	[1 1 1 2 2 1 2 3 3 3 4 4]

ตารางที่ 4.43 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	12	2	4	3.5000	0.0100
1	23	2	4	3.2000	0.1331
2	11	2	4	3.3333	0.0138

เมื่อได้สตริงคำตอบที่นำมารวมกันไว้ในสถานที่รวมคำตอบแล้ว จะเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป โดยใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ดังภาพที่ 4.10 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 4.44



ภาพที่ 4.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4.44 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	12	3.5000	0.0100	1	infinity	Elitist
1	23	3.2000	0.1331	1	infinity	Elitist
2	11	3.3333	0.0138	1	2.0000	Elitist

สตริงคำตอบที่ดีที่สุด Elitist ที่ได้หลังจากการคัดเลือกในรอบที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.45 – 4.48

ตารางที่ 4.45 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	12	[2 1 10 12 9 8 7 6 3 5 11 4]
1	23	[5 2 11 3 1 6 10 7 9 4 8 12]
2	11	[7 6 11 10 8 3 9 4 2 12 5 1]

ตารางที่ 4.46 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	12	[3 6 1 4 2 5 7 8 10 9 11 12]
1	23	[3 6 1 4 2 5 7 9 11 12 8 10]
2	11	[3 1 4 2 5 7 8 10 6 9 11 12]

ตารางที่ 4.47 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	12	[2 1 1 1 2 2 3 2 4 3 3 4]
1	23	[1 1 1 1 2 2 3 2 2 2 4 3]
2	11	[1 1 1 2 2 1 2 3 3 3 4 4]

ตารางที่ 4.48 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	12	2	4	3.5000	0.0100
1	23	2	4	3.2000	0.1331
2	11	2	4	3.3333	0.0138

ทำการปรับปรุงตารางตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของฝูงและของประชากร คือ Lbest และ Gbest และปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น Sigmoid

ตารางที่ 4.49 ทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ของรอบก่อนหน้า ($V_{(i-1,j)}$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0436	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0
2	-0.0436	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	-0.0436	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0436	0	-0.0436
5	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.0436	0	0
6	0	0	0	0	0	0.0436	0	-0.0436	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	-0.0436	0.0436	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	-0.0436	0	0	0	0	0.0436	0
9	0	0	0	0	-0.0436	0	0	0	0.0436	0	0	0
10	0	0	-0.0436	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	0
11	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	-0.0436	0
12	0	0	0	-0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0.0436

ตารางที่ 4.50 ทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ของรอบก่อนหน้า ($V_{(i-1,j)}$)

	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 4.51 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1ของรอบก่อนหน้า ($X_{(i-1,j)}$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.9564	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0
2	0.9564	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	0.9564	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0436	0	0.9564
5	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9564	0	0
6	0	0	0	0	0	0.0436	0	0.9564	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0.9564	0.0436	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0.9564	0	0	0	0	0.0436	0
9	0	0	0	0	0.9564	0	0	0	0.0436	0	0	0
10	0	0	0.9564	0	0	0	0.0436	0	0	0	0	0
11	0	0	0.0436	0	0	0	0	0	0	0	0.9564	0
12	0	0	0	0.9564	0	0	0	0	0	0	0	0.0436

ตารางที่ 4.52 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ของรอบก่อนหน้า ($X_{(i-1,j)}$)

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

ตารางที่ 4.53 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2 $P_{(i,j)} = Lbest1$

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

ตารางที่ 4.54 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2 $P_{(i,j)} = Lbest2$

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

ตารางที่ 4.55 ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร $G_{(i,j)}$ ในรอบที่ 2

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

ตัวอย่างในรอบนี้กำหนดให้ w เท่ากับ 1 และ $\mathbf{c_1}, c_2$ เท่ากับ 0.1 ทำการสุ่มค่า r_1, r_2 ที่มีค่าระหว่าง [0,1] ของฝูงที่ 1 ได้เท่ากับ 0.6490 และ 0.8003 ตามลำดับ และสุ่มค่า r_1, r_2 ที่มีค่าระหว่าง [0,1] ของฝูงที่ 2 ได้เท่ากับ 0.4538 และ 0.4324 ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงแล้วจะได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ตารางตำแหน่งของอนุภาค และตาราง Sigmoid ของการทำงานในรอบที่ 2 เพื่อจะนำไปใช้ในรอบการทำงานถัดไปดังตารางที่ 4.56 - 4.61

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [1,1]

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

$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.6490)(0 - 0) + (0.1 * 0.8003)(0 - 0)$$
$$V_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 (G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * -0.0436) + (0.1 * 0.6490)(0 - 0.9564) + (0.1 * 0.8003)(0 - 0.9564)$$
$$V_{(i,j)} = -0.1822$$

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.56

ตารางที่ 4.56 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.1822	0	0	0.0373	0	0	0	0	0	0	0.1449
2	-0.1822	0.0373	0	0	0	0	0	0	0.1449	0	0	0
3	0	0	0	0.0373	0	0.1449	0	0	-0.1822	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0.1449	0	0.0373	0	-0.1822
5	0.0373	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1822	0.1449	0
6	0	0.1449	0	0	0	0.0373	0	-0.1822	0	0	0	0
7	0.1449	0	0	0	0	0	-0.1822	0.0373	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0.1449	-0.1822	0	0	0	0	0.0373	0
9	0	0	0	0	-0.1822	0	0.1449	0	0.0373	0	0	0
10	0	0	-0.1822	0.1449	0	0	0.0373	0	0	0	0	0
11	0	0	0.1822	0	0	0	0	0	0	0	-0.1822	0
12	0	0	0	-0.1822	0	0	0	0	0	0.1449	0	0.0373

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 (G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.4538)(0 - 0) + (0.1 * 0.4324)(0 - 0)$$
$$V_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}\right) + c_2 r_2 (G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$
$$V_{(i,j)} = (1 * 0) + (0.1 * 0.4538)(0 - 0) + (0.1 * 0.4324)(0 - 0)$$
$$V_{(i,j)} = 0$$

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.57

ตารางที่ 4.57 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	-0.0886	0	0	0	0.0454	0	0	0.0432
2	0	-0.0886	0	0.0454	0	0	0	0	0.0432	0	0	0
3	0	0	0.0454	-0.0886	0	0.0432	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0.0432	0	-0.0432	0	0
5	-0.0886	0	0	0	0.0454	0	0	0	0	0	0.0432	0
6	0	0.0432	0	0	0	-0.0432	0	0	0	0	0	0
7	0.0432	0	0	0	0	0	0.0454	-0.0886	0	0	0	0
8	0.0454	0	0	0	0.0432	0	0	0	0	0	-0.0886	0
9	0	0.0454	0	0	0	0	0.0432	0	-0.0886	0	0	0
10	0	0	0	0.0432	0	0	-0.0886	0.0454	0	0	0	0
11	0	0	-0.0454	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0454
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0432	0.0454	-0.0886

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0 + 0$$
$$X_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0.9564 - 0.1822$$
$$X_{(i,j)} = 0.7742$$

ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.58

ตารางที่ 4.58 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1ในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0.7742	0	0	0.0809	0	0	0	0	0	0	0.1449
2	0.7742	0.0809	0	0	0	0	0	0	0.1449	0	0	0
3	0	0	0	0.0809	0	0.1449	0	0	0.7742	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0.1449	0	0.0809	0	0.7742
5	0.0809	0	0	0	0	0	0	0	0	0.7742	0.1449	0
6	0	0.1449	0	0	0	0.0809	0	0.7742	0	0	0	0
7	0.1449	0	0	0	0	0	0.7742	0.0809	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0.1449	0.7742	0	0	0	0	0.0809	0
9	0	0	0	0	0.7742	0	0.1449	0	0.0809	0	0	0
10	0	0	0.7742	0.1449	0	0	0.0809	0	0	0	0	0
11	0	0	0.2258	0	0	0	0	0	0	0	0.7742	0
12	0	0	0	0.7742	0	0	0	0	0	0.1449	0	0.0809

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [1,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0 + 0$$
$$X_{(i,j)} = 0$$

ตัวอย่างการคำนวณตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [2,1]

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(i,j)} = 0 + 0$$
$$X_{(i,j)} = 0$$

ทำการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตาราง 4.59

ตารางที่ 4.59 ตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0.9114	0	0	0	0.0454	0	0	0.0432
2	0	0.9114	0	0.0454	0	0	0	0	0.0432	0	0	0
3	0	0	0.0454	0.9114	0	0.0432	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0.0432	0	0.9568	0	0
5	0.9114	0	0	0	0.0454	0	0	0	0	0	0.0432	0
6	0	0.0432	0	0	0	0.9568	0	0	0	0	0	0
7	0.0432	0	0	0	0	0	0.0454	0.9114	0	0	0	0
8	0.0454	0	0	0	0.0432	0	0	0	0	0	0.9114	0
9	0	0.0454	0	0	0	0	0.0432	0	0.9114	0	0	0
10	0	0	0	0.0432	0	0	0.9114	0.0454	0	0	0	0
11	0	0	0.9546	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0454
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0432	0.0454	0.9114

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [1,1]

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

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(-0)}$$

$$S(V_{(i,j)}) = 0.5$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 1 ที่ตำแหน่ง [2,1]

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

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(0.1822)}$$

$$S(V_{(i,j)}) = 0.4546$$

ทำการปรับปรุงตาราง Sigmoid ในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.60

ตารางที่ 4.60 Sigmoid ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.4546	0.5	0.5	0.5093	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5362
2	0.4546	0.5093	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5362	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5	0.5093	0.5	0.5362	0.5	0.5	0.4546	0.5	0.5	0.5
4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5362	0.5	0.5093	0.5	0.4546
5	0.5093	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4546	0.5362	0.5
6	0.5	0.5362	0.5	0.5	0.5	0.5093	0.5	0.4546	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5362	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4546	0.5093	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5362	0.4546	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5093	0.5
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4546	0.5	0.5362	0.5	0.5093	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.4546	0.5362	0.5	0.5	0.5093	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.5454	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4546	0.5
12	0.5	0.5	0.5	0.4546	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5362	0.5	0.5093

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [1,1]

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

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(-0)}$$

$$S(V_{(i,j)}) = 0.5$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า Sigmoid ของฝูงที่ 2 ที่ตำแหน่ง [2,1]

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

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(-0)}$$

$$S(V_{(i,j)}) = 0.5$$

ทำการปรับปรุงตาราง Sigmoid ในทุกตำแหน่งตามตัวอย่างข้างต้น จะได้ผลดังตารางที่ 4.61

ตารางที่ 4.61 Sigmoid ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4779	0.5	0.5	0.5	0.5113	0.5	0.5	0.5108
2	0.5	0.4779	0.5	0.5113	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5108	0.5	0.5	0.5
3	0.5	0.5	0.5113	0.4779	0.5	0.5108	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	0.5108	0.5	0.4892	0.5	0.5
5	0.4779	0.5	0.5	0.5	0.5113	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5108	0.5
6	0.5	0.5108	0.5	0.5	0.5	0.4892	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0.5108	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5113	0.4779	0.5	0.5	0.5	0.5
8	0.5113	0.5	0.5	0.5	0.5108	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4779	0.5
9	0.5	0.5113	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5108	0.5	0.4779	0.5	0.5	0.5
10	0.5	0.5	0.5	0.5108	0.5	0.5	0.4779	0.5113	0.5	0.5	0.5	0.5
11	0.5	0.5	0.4887	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5113
12	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5108	0.5113	0.4779

4.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี DPSO

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสม ที่จะทำให้ผลการทดลองที่ได้เข้าใกล้คำตอบที่ดีมากที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ของวิธี DPSO มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวดังนี้

4.4.1 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนประชากรเบื้องต้น หมายถึง จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน จำนวนประชากรที่มากเกินไปอาจทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมาก แต่ถ้าจำนวนประชากรน้อยเกินไปคำตอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม การกำหนดจำนวนประชากรที่เหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จำนวนประชากรเบื้องต้นเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang and Katayama, 2008) ซึ่งในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคจะแบ่งประชากรเบื้องต้นออกเป็น 2 กลุ่ม คือ จำนวนฝูง (Number of Swarms) เป็นจำนวนของฝูงซึ่งเป็นกลุ่มของอนุภาคหรือกลุ่มของสตริงคำตอบ และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarm) เป็นจำนวนของอนุภาคในแต่ละฝูงหรือจำนวนสตริงคำตอบในแต่ละฝูง

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้จำนวนประชากรเท่ากับ 100 ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 จำนวนฝูงเท่ากับ 4 และจำนวนอนุภาคที่อยู่ในแต่ละฝูงเท่ากับ 25
- ระดับที่ 2 จำนวนฝูงเท่ากับ 5 และจำนวนอนุภาคที่อยู่ในแต่ละฝูงเท่ากับ 20
- ระดับที่ 3 จำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคที่อยู่ในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

4.4.2 น้ำหนักการหน่วง

น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight) เป็นค่าน้ำหนักที่ใช้ในการจดจำคำตอบจากประสบการณ์ที่ผ่านมา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เท่ากับ 1 (Liao et al.,2007 ; Tseng and Liao, 2008)

4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor) เป็นค่าที่ใช้กำหนดน้ำหนักให้กับการจดจำคำตอบจากประสบการณ์ที่ผ่านมาของฝูง และประสบการณ์ที่ผ่านมาของอนุภาคทั้งหมด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการปรับปรุงตารางมีหน้าที่เหมือนค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้

4.4.4 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto Based Approach) เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting (Goldberg,1989)

4.4.5 วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกของประชากรคำตอบที่อยู่ในลำดับเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

4.4.6 ผลกระทบจากการเรียนรู้

ผลกระทบจาการเรียนรู้ (Learning Effect) เป็นทฤษฎีที่ตั้งสมมติฐานว่าการผลิตจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลง โดยได้นำเข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตเพื่อลดช่องว่างของการจัดตารางตามทฤษฎี

และเวลาการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบ Sum-Processing Time Based Learning Effect (Kuo and Yang ,2006a,b,c) และกำหนดค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80% (Arditi et al., 2001)

4.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลองของวิธี DPSO จะทำการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ (Replication) เท่ากับ 2 ครั้ง ซึ่งมีรายละเอียดของปัญหาการทดลองทั้งหมด 5 ปัญหาดังตารางที่ 4.62

ตารางที่ 4.62 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาการทดลอง	รอบเวลาการทำงาน	จำนวนเจนเนอเรชัน
ปัญหา 12 ขั้นงาน	7	100
ปัญหา 65 ขั้นงาน	490	400
ปัญหา 148 ขั้นงาน	408	800
ปัญหา 205 ขั้นงาน	2454	800
ปัญหา 183 ขั้นงาน	22	400

พารามิเตอร์ที่ต้องทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม ดังตารางที่ 4.63

ตารางที่ 4.63 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ DPSO ที่จะทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	ระดับที่ 1 : จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25
	ระดับที่ 2 : จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20
	ระดับที่ 3 : จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10

จะได้การทดลองใน DPSO ที่มีปัจจัย 1 ปัจจัย คือ ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงมี 3 ระดับ และมีการทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีจำนวนทรีตเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองเท่ากับ 3x2 = 6 การทดลอง

4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computation Time to Solution) เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยมีขั้นตอนในการวิคราะห์ผลเช่นเดียวกับขั้นตอนในบทที่ 3

4.6.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.11

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0000000	0.0000000	*	*
Error	3	0.0000000	0.0000000		
Total	5	0.0000000			

S = 0 R-Sq = *% R-Sq(adj) = *%

Level	N	Mean	StDev
10/10	2	0.000000000	0.000000000
4/25	2	0.000000000	0.000000000
5/20	2	0.000000000	0.000000000

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

```
Level    +---------+---------+---------+---------
10/10    *
4/25     *
5/20     *
         +---------+---------+---------+---------
       0.000000  0.000010  0.000020  0.000030
```

Pooled StDev = 0.000000000

ภาพที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากกลุ่มคำตอบที่ได้จากระดับปัจจัยต่างๆ มีค่าเท่ากัน ค่าของกลุ่มคำตอบที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.64

ตารางที่ 4.64 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	56	55	55.5
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	61	83	72
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	71	58	64.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 4 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 25 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี DPSO ดังตารางที่ 4.65

ตารางที่ 4.65 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี DPSO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 25

4.6.2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.12

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0059	0.0030	0.21	0.825
Error	3	0.0433	0.0144		
Total	5	0.0492			

S = 0.1201 R-Sq = 12.04% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 4.13

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.00416	0.00208	0.32	0.746
Error	3	0.01929	0.00643		
Total	5	0.02344			

S = 0.08018 R-Sq = 17.73% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.14

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0278	0.0139	0.21	0.818
Error	3	0.1944	0.0648		
Total	5	0.2222			

S = 0.2546 R-Sq = 12.50% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.66

ตารางที่ 4.66 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	489	797	643
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	1737	1418	1577.5
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	1863	2895	2379

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 4 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 25 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี DPSO ดังตารางที่ 4.67

ตารางที่ 4.67 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี DPSO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 25

4.6.3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.15

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.001868	0.000934	1.68	0.323
Error	3	0.001664	0.000555		
Total	5	0.003532			

S = 0.02355 R-Sq = 52.88% R-Sq(adj) = 21.46%

ภาพที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 4.16

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0112	0.0056	0.45	0.676
Error	3	0.0377	0.0126		
Total	5	0.0489			

S = 0.1121 R-Sq = 22.95% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.17

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

```
Source          DF       SS       MS      F      P
Swarm/Particle   2  0.08844  0.04422  13.00  0.033
Error            3  0.01020  0.00340
Total            5  0.09864

S = 0.05832   R-Sq = 89.66%   R-Sq(adj) = 82.76%

                              Individual 95% CIs For Mean Based on
                              Pooled StDev
Level  N     Mean    StDev  ---------+---------+---------+---------+
10/10  2  0.00000  0.00000  (--------*--------)
4/25   2  0.21429  0.10102           (-------*--------)
5/20   2  0.28571  0.00000                  (--------*--------)
                            ---------+---------+---------+---------+
                                   0.00      0.15      0.30      0.45

Pooled StDev = 0.05832
```

ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือมีค่าเข้าใกล้ 1 ที่ระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 5 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 20 จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี DPSO ดังตารางที่ 4.68

ตารางที่ 4.68 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี DPSO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 20

4.6.4 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.18

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.09036	0.04518	8.59	0.057
Error	3	0.01578	0.00526		
Total	5	0.10615			

S = 0.07253 R-Sq = 85.13% R-Sq(adj) = 75.22%

ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 4.19

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.43459	0.21729	49.21	0.005
Error	3	0.01325	0.00442		
Total	5	0.44783			

S = 0.06645 R-Sq = 97.04% R-Sq(adj) = 95.07%

Level	N	Mean	StDev
10/10	2	0.00000	0.00000
4/25	2	0.56427	0.11506
5/20	2	0.57733	0.00288

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

```
------+---------+---------+---------+---
(-----*-----)
                      (-----*-----)
                      (-----*-----)
------+---------+---------+---------+---
    0.00      0.25      0.50      0.75
```

Pooled StDev = 0.06645

ภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่ระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10 จึงกำหนด

ระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี DPSO ดังตารางที่ 4.69

ตารางที่ 4.69 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี DPSO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.6.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.20

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0917	0.0458	1.24	0.405
Error	3	0.1108	0.0369		
Total	5	0.2025			

S = 0.1922 R-Sq = 45.27% R-Sq(adj) = 8.78%

ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 4.21

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

```
Source          DF         SS         MS  F  P
Swarm/Particle   2  0.0000000  0.0000000  *  *
Error            3  0.0000000  0.0000000
Total            5  0.0000000

S = 0   R-Sq = *%   R-Sq(adj) = *%


Level  N         Mean        StDev
10/10  2  0.000000000  0.000000000
4/25   2  0.000000000  0.000000000
5/20   2  0.000000000  0.000000000

       Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level    +---------+---------+---------+---------
10/10    *
4/25     *
5/20     *
         +---------+---------+---------+---------
       0.000000  0.000010  0.000020  0.000030

Pooled StDev = 0.000000000
```

ภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากกลุ่มคำตอบที่ได้จากระดับปัจจัยต่างๆ มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 4.22

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

```
Source          DF      SS      MS     F      P
Swarm/Particle   2  0.0833  0.0417  0.50  0.650
Error            3  0.2500  0.0833
Total            5  0.3333

S = 0.2887   R-Sq = 25.00%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.70

ตารางที่ 4.70 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 183 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	1912	2498	2205
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	4451	4382	4416.5
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	2725	4609	3667

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 4 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 25 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี DPSO ดังตารางที่ 4.71

ตารางที่ 4.71 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี DPSO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 25

4.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแบบฮิวริสติกที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการบินหาอาหารของฝูงนก ที่จะทำการจดจำเส้นทางจากประสบการณ์ที่ผ่านมา เพื่อนำไปสู่เส้นทางที่ดี โดยนกแต่ละตัวแทนด้วยอนุภาค (Particle) และอนุภาคทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยๆ เรียกว่า ฝูง (Swarm) การบินหาอาหารจะใช้หลักการการเคลื่อนที่ (Velocity) ไปในจุดหมายและทิศทางต่างๆ และทำการจดจำคำตอบที่ได้พบ โดยตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution; Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง

(Global Best Solution; Gbest) ซึ่งเปรียบได้กับการปรับปรุงคำตอบของปัญหาด้วยการจดจำคำตอบที่ดีเพื่อจะได้เดินทางไปในทิศทางนั้น โดยหวังว่าจะได้คำตอบที่ดีขึ้น จึงนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งคำตอบที่ได้สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน ในบทนี้ได้มีการกำหนดและทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคคือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง ซึ่งมีพื้นฐานมาจากจำนวนประชากรเบื้องต้นที่ใช้ในอัลกอริทึมอื่นๆ เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยจากผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงของปัญหาทั้งหมด 5 ปัญหาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.72

ตารางที่ 4.72 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาในวิธี DPSO

ปัจจัย	ขนาดปัญหา				
	12 ขั้นงาน	65 ขั้นงาน	148 ขั้นงาน	205 ขั้นงาน	183 ขั้นงาน
จำนวนฝูง	4	4	5	10	4
จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง	25	25	20	10	25

บทที่ 5

ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยใช้ความรู้เชิงลบ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm optimization with Negative Knowledge; PSONK) ขั้นตอนการทำงาน และการนำวิธี PSONK มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ และตัวอย่างการคำนวณ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี PSONK ของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยที่แตกต่างกัน 5 ปัญหา

5.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK)

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : PSONK) เป็นฮิวริสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) โดยอาศัยพื้นฐานของวิธี PSO แต่มีแนวคิดเอาความรู้เชิงลบเข้ามาประยุกต์เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการนำไปสู่คำตอบที่แย่ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ (Velocity) ในการจดจำเส้นทางเช่นเดียวกับวิธี PSO ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 4 แต่วิธี PSONK นี้จะทำการจดจำทั้งคำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ของแต่ละฝูง รวมถึงตำแหน่งที่ดีที่สุดและตำแหน่งที่แย่ที่สุดของประชากร ซึ่งเรียกตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution; Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่แย่ที่สุดของแต่ละฝูงว่า ค่าที่ไม่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Worst Solution; Lworst) ส่วนตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากรเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution; Gbest) และตำแหน่งที่แย่ที่สุดของประชากรเรียกว่า ค่าที่ไม่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Worst Solution; Gworst) (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

5.2 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. Data input : รับข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน และด้านที่สามารถทำงานได้ของแต่ละขั้นงาน ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

2. Representation & Initialization : นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนฝูง (Swarm) ฝูงละอนุภาค (Particle) ตัว ด้วยกระบวนการใส่รหัสคำตอบ (Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น (Initial Population) โดยสุ่มเลือกงานแรกจากตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก และลำดับงานอื่นๆ จากตารางความน่าจะเป็นร่วม

3. Evaluation : คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ

4. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้แต่ละประชากรคำตอบโดยใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) ค่าอันดับที่ได้นี้เรียกว่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) กลุ่มที่ดีที่สุดจะถูกจัดอันดับไว้ต่ำที่สุด ในวิธี PSONK จะทำการหาค่าความแข็งแรงทั้งภายในแต่ละฝูงและค่าความแข็งแรงของประชากรทั้งหมด

5. Density Information : คำนวณค่าความหนาแน่นให้กับแต่ละประชากรด้วยวิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

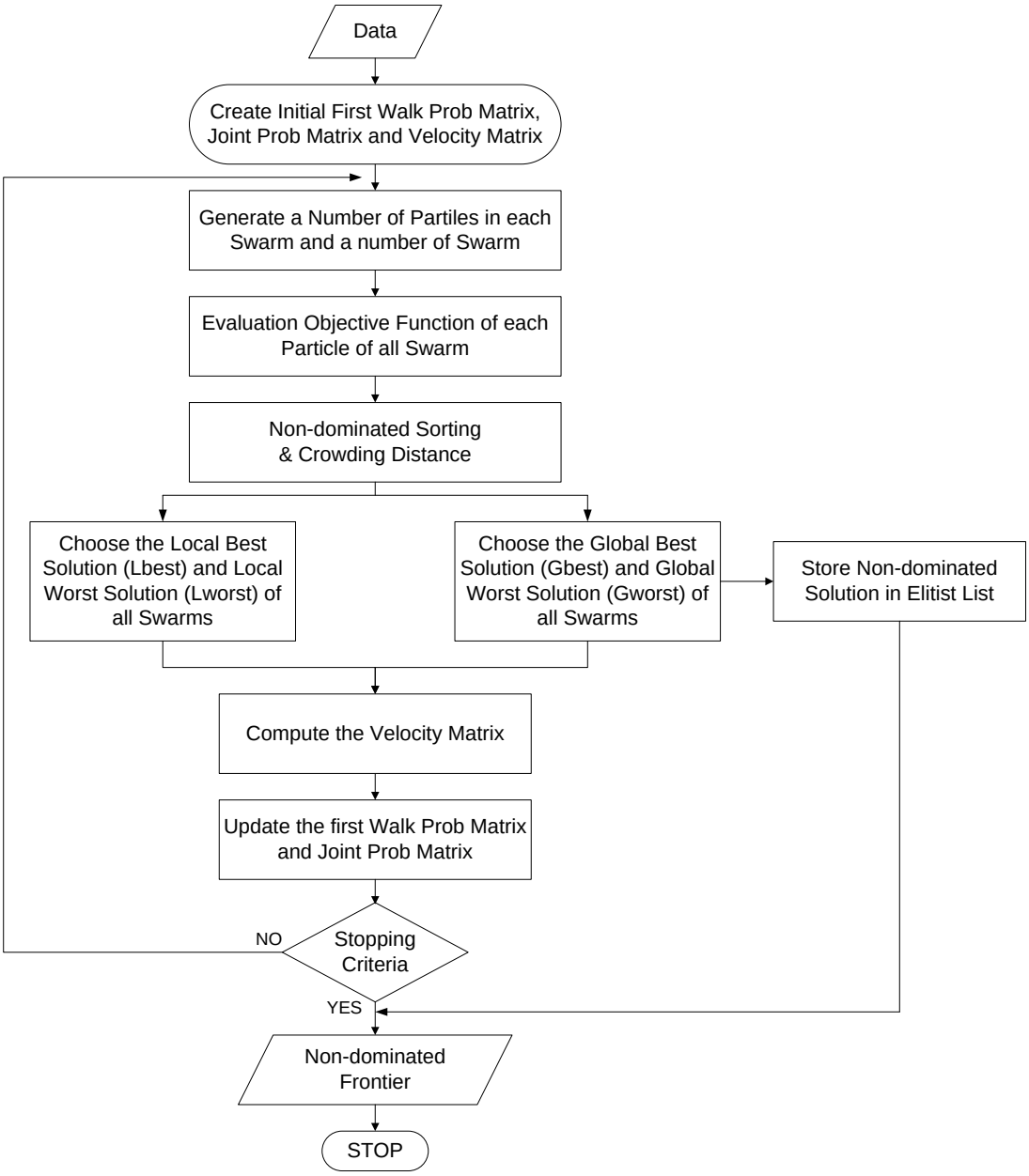
6. Selection : ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง (มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงในลำดับต่ำสุดในฝูง) มาเป็น Lbest (Local Best Solution), คำตอบที่แย่ที่สุด (มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงในลำดับสูงสุดในฝูง) มาเป็น Lworst (Local Worst Solution), คำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมดมาเป็น Gbest (Global Best Solution) และคำตอบที่แย่ที่สุดของประชากรมาเป็น Gworst (Global Worst Solution) และจะทำการเก็บ Gbest ไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด

7. Update Matrix : ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จากค่า Lbest , Lworst , Gbest และ Gworst โดยการเพิ่มค่าให้กับสตริงคำตอบที่ดี และลดค่าให้กับสตริงคำตอบที่แย่ จากนั้นทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เพื่อใช้ในการสุ่มสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นในรอบถัดไป

8. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : ทำการเก็บประชากรที่ดีที่สุดในรอบนี้ (Gbest) ไปรวมกับประชากรที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า จากนั้นจะทำการคัดเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominate Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ได้ไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของรอบก่อนหน้าในการดำเนินการรอบถัดไป

9. Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันน้อยกว่าจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 8 ใหม่ ถ้าไม่ใช่ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

10. Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบและนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 8 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK

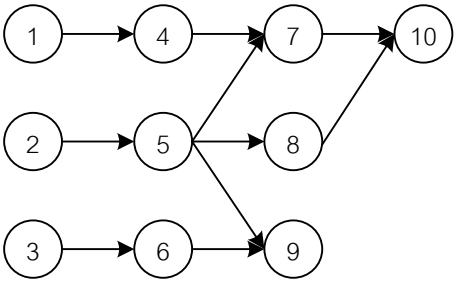
5.3 ตัวอย่างการนำวิธี PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

จากขั้นตอนของ PSONK ที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของปัญหา Kim et al., (2000) ที่ประกอบด้วย 12 ขั้นงาน และมี 2 ชนิดผลิตภัณฑ์ คือ A และ B เมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 ดังนี้

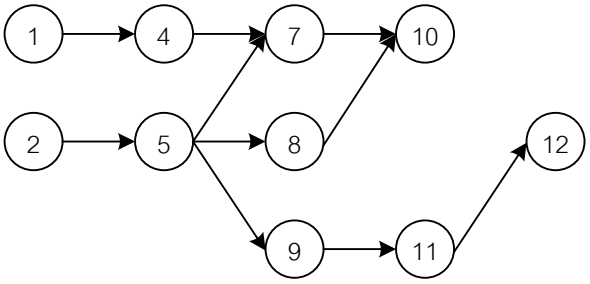
5.3.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

5.3.1.1 สร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram)

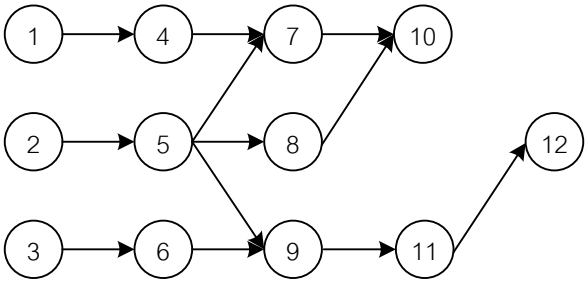
แสดงดังภาพที่ 5.2



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A และ B

ภาพที่ 5.2 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)

5.3.1.2 **เวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน** แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Side	Model		
		A	B	Mean
1	L	2	3	2.5
2	R	3	3	3
3	E	2	0	1
4	L	3	2	2.5
5	E	1	2	1.5
6	L	1	0	0.5
7	E	3	2	2.5
8	R	3	1	2
9	E	2	1	1.5
10	E	2	3	2.5
11	E	0	2	1
12	R	0	1	0.5

5.3.1.3 **สร้าง** Precedence Matrix **จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม** ได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์

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

5.3.1.4 พารามิเตอร์ที่เลือกใช้ของ PSONK

- จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Particles) $P = 3$
- จำนวนฝูง (Swarms) $S = 2$
- น้ำหนักหารหน่วง (Inertia Weight : w) เท่ากับ 1
- ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor : c_1, c_2) เท่ากับ 0.1
- ผลกระทบจากการเรียนรู้เป็นแบบ Sum of Processing Time Based Learning Effect
- ผลกระทบที่เกิดจากการเรียนรู้ เท่ากับ 80%

5.3.2 การสร้างตัวดำเนินการเริ่มแรก

ในการสร้างตัวดำเนินการเริ่มแรกจะเริ่มจากการสร้างตารางความน่าจะเป็นการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ขนาด 1 x n, ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ขนาด n x n เมื่อ n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด ซึ่งตารางความน่าจะเป็นในการเริ่มงานแรกเริ่มต้นนี้จะมีค่าเท่ากันทั้งหมดคือ 1/n = 1/12 = 0.0833 ดังตารางที่ 5.3 ตารางความน่าจะเป็นร่วมจะมีค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นเท่ากับ 1/(n-1) = 1/(12-1) = 0.0909 ยกเว้นในแนวทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 ดังตารางที่ 5.4 และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้นจะมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด (Zero Matrix) โดยตารางเริ่มต้นเหล่านี้จะมีค่าเท่ากันทั้งฝูงที่ 1 และ 2 ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.3 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง

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 5.4 ความน่าจะเป็นร่วม เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	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	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
3	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
4	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
5	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
6	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
7	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
8	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
9	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909
10	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909
12	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-

ตารางที่ 5.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง

	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

5.3.3 **การสร้างประชากรเริ่มต้น**

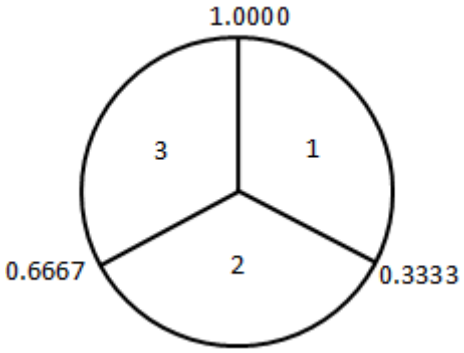
การสร้างประชากรเริ่มต้นเริ่มจะใช้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หางานลำดับแรก จากนั้นใช้ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกงานลำดับถัดไป โดยสร้างให้ครบทุกอนุภาคในแต่ละฝูง ซึ่งสตริงคำตอบที่ได้จะต้องไม่ขัดกับความสัมพันธ์ก่อนหลังของภาระงาน วิธีการสร้างลำดับงานที่ 1 มีขั้นตอนดังนี้

- พิจารณางานที่สามารถจัดลงในตำแหน่งแรกได้โดยดูจากผลรวมในแต่ละคอลัมน์ของ Precedence Matrix หากผลรวมในแนวคอลัมน์ของงานใดเท่ากับ 0 แสดงว่างานนั้นสามารถเริ่มได้เลย ซึ่งในที่นี้งานที่สามารถเริ่มได้เลยมี 3 งานคือ งาน 1,2 และ 3 ซึ่งเป็นขั้นงานที่ไม่มีงานก่อนหน้า

- มีงานมากกว่า 1 งานที่สามารถเริ่มได้ ดังนั้นเราจะต้องทำการสุ่มเลือกงานมา 1 งานเพื่อจัดลงในตำแหน่งแรก โดยเราจะทำการสุ่มจากค่าความน่าจะเป็นในเลือกงานแรกด้วยวิธี Roulette Wheel Selection จากตารางที่ 5.3 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก พบว่างาน 1,2 และ 3 มีค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากันคือ 0.0833 ทำการแปลงค่าไปเป็นวงล้อรูเล็ต และหมุนวงล้อเพื่อเลือกงาน ในที่นี้สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.1793 ดังนั้นขั้นงานที่ได้คือ ขั้นงานที่ 1 จึงนำขั้นงานที่ 1 มาจัดลำดับเป็นขั้นงานแรก

ตารางที่ 5.6 การสร้างวงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกงานแรก

ขั้นงานที่	ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงาน	ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
1	0.0833	0.3333	0.3333
2	0.0833	0.3333	0.6667
3	0.0833	0.3333	1
รวม	0.2499	1	



ภาพที่ 5.3 วงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกขั้นงาน

- ตัดขั้นงานที่ 1 ซึ่งถูกเลือกจัดลงในตำแหน่งขั้นงานแรก แล้วทำการปรับปรุงตาราง Precedence Matrix โดยการเปลี่ยนตัวเลขในแถวของขั้นงานที่ 1 นั้นเป็น 0 ทั้งหมด และเปลี่ยนตัวเลขในคอลัมน์ของงานนั้นเป็น 1 ทั้งหมด ได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 การปรับปรุงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงาน หลังจากวางงานตำแหน่งที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
2	***1***	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	***1***	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	***1***	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	***1***	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
6	***1***	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
9	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	***1***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- หาผลรวมในแต่ละคอลัมน์ของ Precedence Matrix ใหม่อีกครั้ง เพื่อหาขั้นงานที่สามารถเริ่มได้ในตำแหน่งถัดไป จากตารางพบว่าขั้นงานที่สามารถเริ่มได้ในตำแหน่งที่ 2 ได้คือ งาน 2,3 และ 4 เนื่องจากมีค่าผลรวมในแต่ละคอลัมน์ของ Precedence Matrix เท่ากับ 0

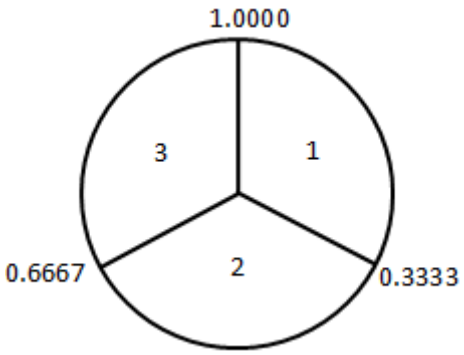
- จะเห็นว่ามีงานมากกว่า 1 งานที่สามารถเริ่มในตำแหน่งที่ 2 ได้ ดังนั้นจะทำการสุ่มเลือกงานมา 1 งานเพื่อจัดลงในตำแหน่งที่ 2 โดยเราจะทำการสุ่มจากตารางที่ 5.8 ค่าความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) โดยการพิจารณาในแถวที่ 1 ซึ่งเป็นงานที่ถูกจัดไว้ในลำดับก่อนหน้า ด้วยวิธี Roulette Wheel Selection โดยพิจารณาในคอลัมน์ที่ 2,3 และ 4 พบว่ามีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.0909, 0.0909 และ 0.0909 ตามลำดับ ทำการแปลงค่าไปเป็นวงล้อรูเล็ต และหมุนวงล้อเพื่อเลือกงาน ในที่นี้สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.8971 ดังนั้นขั้นงานที่ได้คือ ขั้นงานที่ 4 จึงนำขั้นงานที่ 4 มาจัดลำดับเป็นขั้นงานในตำแหน่งที่ 2

ตารางที่ 5.8 ความน่าจะเป็นร่วม เริ่มต้น

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	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	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
3	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
4	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
5	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
6	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
7	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
8	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
9	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909
10	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909
12	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-

ตารางที่ 5.9 การสร้างวงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกงานในตำแหน่งที่ 2

ขั้นงานที่	ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงาน	ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
1	0.0909	0.3333	0.3333
2	0.0909	0.3333	0.6667
6	0.0909	0.3333	1
รวม	0.2727	1	



ภาพที่ 5.4 วงล้อรูเล็ตในการสุ่มเลือกขั้นงาน

- ตัดขั้นงานที่ 4 ซึ่งถูกเลือกจัดลงในตำแหน่งที่ 2 ทิ้ง แล้วทำการปรับปรุงตาราง Precedence Matrix โดยการเปลี่ยนตัวเลขในแถวของขั้นงานที่ 4 นั้นเป็น 0 ทั้งหมด และเปลี่ยนตัวเลขในคอลัมน์ของงานนั้นเป็น 1 ทั้งหมด ได้ดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 การปรับปรุงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงาน หลังจากวางงานตำแหน่งที่ 2

	1	2	3	*4*	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	*1*	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	*1*	0	1	0	0	0	0	0	0
4	***0***	***0***	***0***	***1***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***	***0***
5	1	0	0	*1*	0	0	1	1	1	0	0	0
6	1	0	0	*1*	0	0	0	0	1	0	0	0
7	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	1	0	0
8	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	1	0	0
9	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	0	1	0
10	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	0	0	1
12	1	0	0	*1*	0	0	0	0	0	0	0	0

- หาผลรวมในแต่ละคอลัมน์ของ Precedence Matrix ใหม่อีกครั้ง เพื่อหางานที่มีผลรวมในคอลัมน์เท่ากับ 0 ซึ่งในที่นี้คือ ขั้นงานที่ 2 และ 3 จากนั้นทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั่งงานทุกงานถูกจัดลงในสตริงคำตอบของลำดับขั้นงาน (Task Sequence) จนหมด

จากขั้นตอนข้างต้นจะทำการสร้างสตริงคำตอบของลำดับขั้นงานทั้งหมด 6 ตัว ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]
	2	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
	3	[1 4 2 5 3 7 8 6 10 9 11 12]
2	1	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
	2	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
	3	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

5.3.4 การประเมินค่าประชากร

จากลำดับขั้นงานทั้ง 6 ตัวข้างบนจะทำการจัดลงสถานีงานเพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยมีรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 โดยมีวิธีการจัดงานลงสถานีงานและคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว จากลำดับงานทั้ง 6

ตัวนี้สามารถจัดลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 5.12 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 6 ตัวได้ดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.12 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[1 1 2 2 1 2 3 2 3 3 3 4]
	2	[2 2 2 1 1 1 3 2 3 4 4 4]
	3	[1 1 2 2 2 1 2 1 4 3 3 4]
2	1	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 3 3 4]
	2	[1 1 2 2 1 2 1 2 3 4 4 4]
	3	[2 1 3 2 3 4 3 3 4 5 5 6]

ตารางที่ 5.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

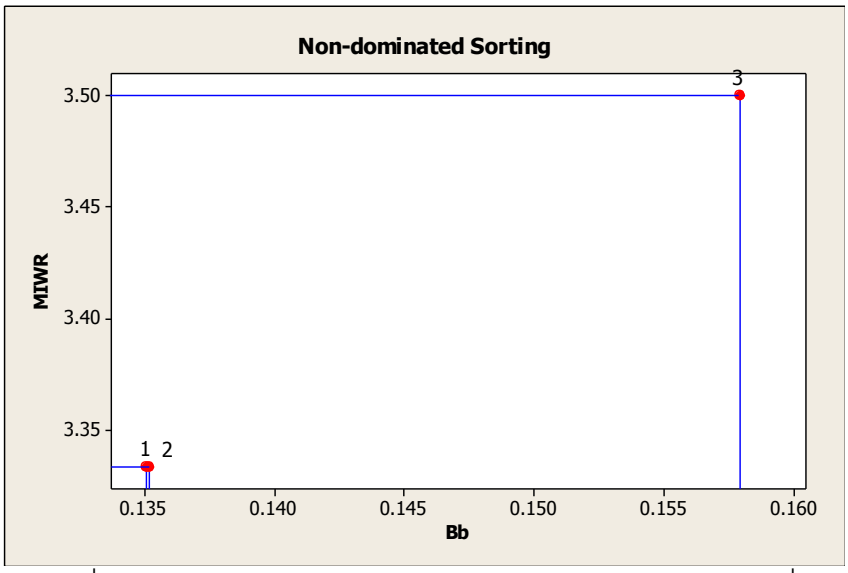
ฝูง	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	2	4	3.3333	0.1352
	2	2	4	3.3333	0.1351
	3	2	4	3.5000	0.1579
2	1	2	4	3.5556	0.1155
	2	2	4	3.4286	0.1240
	3	3	6	5.3333	0.0196

5.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ทำการประเมินค่าความแข็งแรงสตริงคำตอบที่ได้ด้วยวิธี Non-dominate Sorting และ Crowding Distance เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว จากนั้นคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Local Best Solution; Lbest) และสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Local Worst Solution; Lworst) โดยจะพิจารณาที่จำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดและมากที่สุดเป็นลำดับแรก (เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็นวัตถุประสงค์หลัก) โดยทำการกรองและเลือกสตริงคำตอบแล้วจึงพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 คือ ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานและผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน

ทำการหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Global Best Solution : Gbest) จากสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงที่นำมารวมกัน และหาสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Global Worst Solution : Gworst) จากสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูงที่นำมาด้วยวิธี Non-dominate Sorting และคำนวณค่า Crowding Distance โดยทำเช่นเดียวกับการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ในแต่ละฝูง และทำการเก็บค่า Gbest ที่ได้ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบนั้น

Lbest ของฝูงที่ 1 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือสตริงคำตอบ 1,2 และ 3 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 (Lbest) ได้ผลดังภาพที่ 5.5 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.14

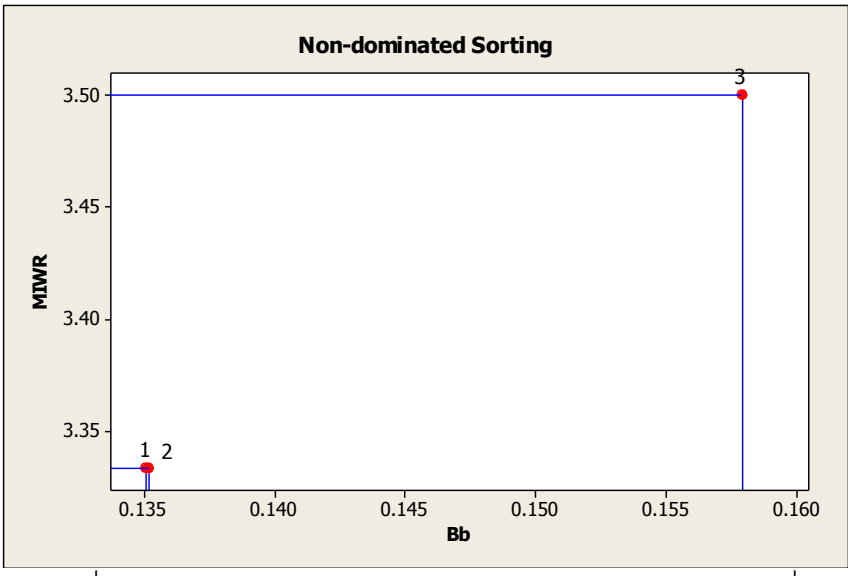


ภาพที่ 5.5 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.14 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.3333	0.1352	2	infinity	
	2	3.3333	0.1351	1	infinity	Lbest
	3	3.5000	0.1579	3	infinity	

Lworst ของฝูงที่ 1 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานมากที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือสตริงคำตอบ 1,2 และ 3 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 (Lworst) ได้ผลดังภาพที่ 5.6 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.15



ภาพที่ 5.6 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.15 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.3333	0.1352	2	infinity	
	2	3.3333	0.1351	1	infinity	
	3	3.5000	0.1579	3	infinity	Lworst

จะได้ค่า Lbest และ Lworst ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ดังตารางที่ 5.16 และ 5.17

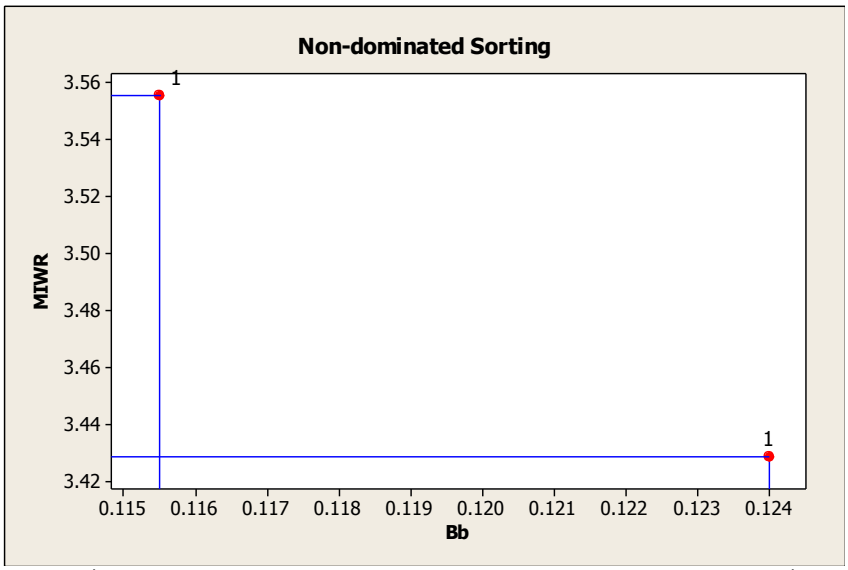
ตารางที่ 5.16 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
1	2	Lbest	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]

ตารางที่ 5.17 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
1	3	Lworst	[1 4 2 5 3 7 8 6 10 9 11 12]

Lbest ของฝูงที่ 2 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือสตริงคำตอบ 1 และ 2 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 (Lbest) ได้ผลดังภาพที่ 5.7 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.18



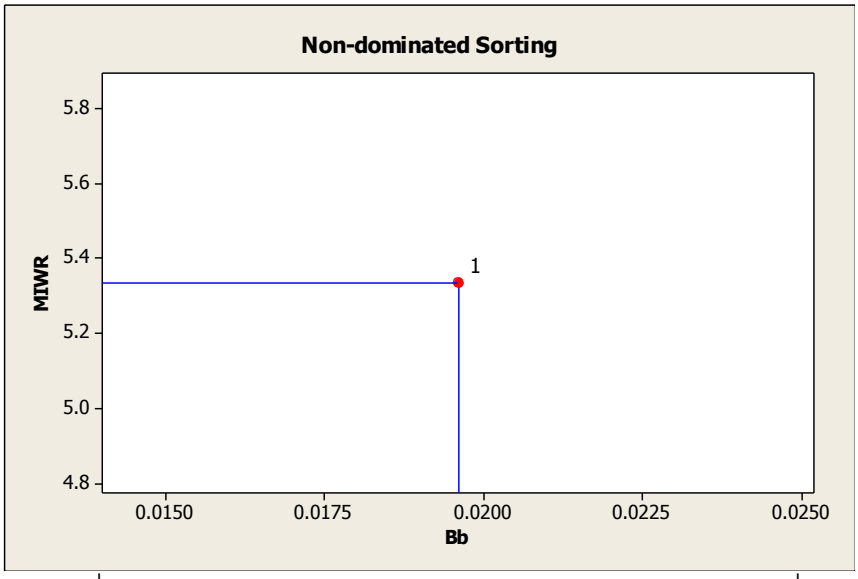
ภาพที่ 5.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.18 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
2	1	3.5556	0.1155	1	infinity	Lbest
	2	3.4286	0.1240	1	infinity	Lbest

Lworst ของฝูงที่ 2 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานมากที่สุด คือ 3 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ

6 คือสตริงคำตอบที่ 3 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 (Lworst) ได้ผลดังภาพที่ 5.8 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.19



ภาพที่ 5.8 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 3 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6

ตารางที่ 5.19 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
2	3	5.3333	0.0196	1	infinity	Lworst

จะได้ค่า Lbest และ Lworst ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 ดังตารางที่ 5.20 และ 5.21

ตารางที่ 5.20 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
2	1	Lbest	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
	2	Lbest	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]

ตารางที่ 5.21 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 1

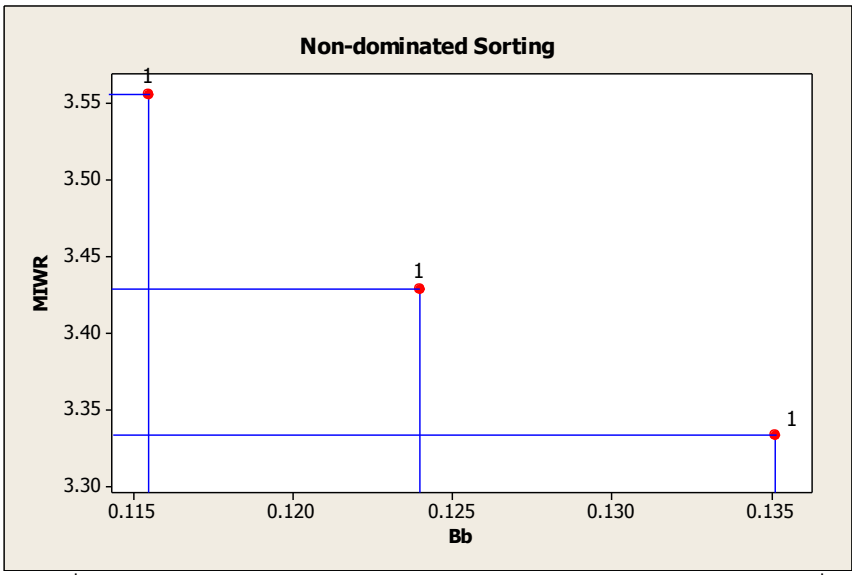
ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
2	3	Lworst	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

นำสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูงมารวมกันและทำการหา Non-dominate Sorting และ Crowding Distance อีกครั้งเพื่อจะคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ได้ผลดังตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 การรวมกันของสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง

Lbest ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	12	2	4	3.3333	0.1351
2	21	2	4	3.5556	0.1155
	22	2	4	3.4286	0.1240

Gbest : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบของประชากรพบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือ สตริงคำตอบที่ 2 ของฝูงที่ 1 และสตริงคำตอบที่ 1,2 ของฝูงที่ 2 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ได้ผลดังภาพที่ 5.9 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.23



ภาพที่ 5.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่ดี เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.23 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร

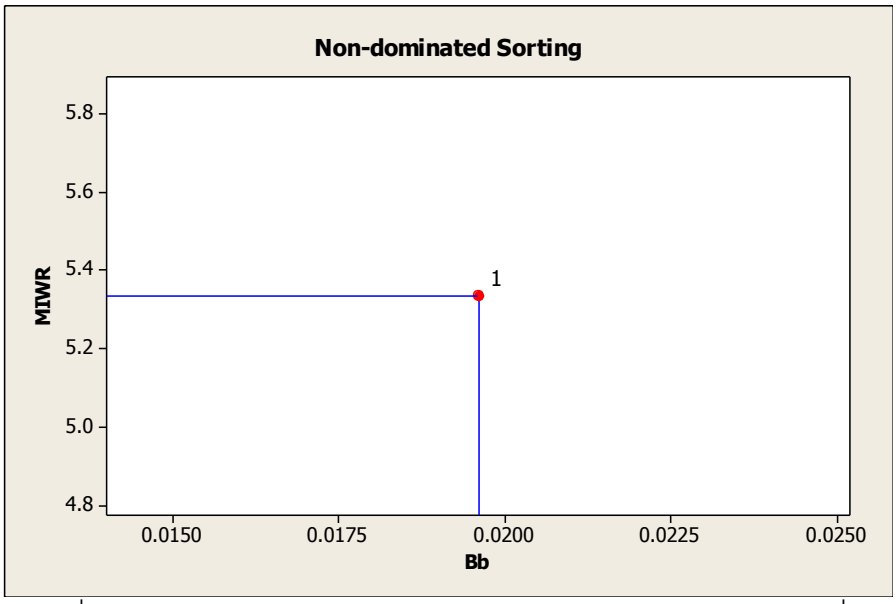
Lbest ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	12	3.3333	0.1351	1	infinity	Gbest
2	21	3.5556	0.1155	1	infinity	Gbest
	22	3.4286	0.1240	1	infinity	Gbest

นำสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูงมารวมกันและทำการหา Non-dominate Sorting และ Crowding Distance อีกครั้งเพื่อจะคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร ได้ผลดังตารางที่ 5.24

ตารางที่ 5.24 การรวมกันของสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง

Lworst ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	13	2	4	3.5000	0.1579
2	23	3	6	5.3333	0.0196

Gworst : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบของประชากรพบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานมากที่สุด คือ 3 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6 คือ สตริงคำตอบ 3 ของฝูงที่ 2 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) ได้ผลดังภาพที่ 5.10 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.25



ภาพที่ 5.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่แย่เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 3 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6

ตารางที่ 5.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร

Lworst ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
2	23	5.3333	0.0196	1	infinity	Gworst

จะได้ค่า Gbest และ Gworst ของสตริงคำตอบของประชากร ดังตารางที่ 5.26 และ 5.27

ตารางที่ 5.26 สตริงคำตอบที่ดีของประชากรในรอบที่ 1

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Gbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Gbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Gbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]

ตารางที่ 5.27 สตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในรอบที่ 1

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Gworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

5.3.6 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคที่ใช้ในการเก็บค่าที่ดีที่สุด คือ การนำเอาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ของรอบการทำงานปัจจุบันไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) และจะทำการปรับปรุง (Update) สถานที่รวมคำตอบ (Elitist) นี้ในทุกๆรอบ ด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป ได้ผลดังตารางที่ 5.28 – 5.30

ตารางที่ 5.28 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Elitist	12 (จากรอบที่ 1)	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
	21 (จากรอบที่ 1)	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
	22 (จากรอบที่ 1)	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]

ตารางที่ 5.29 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Workstation
Elitist	12 (จากรอบที่ 1)	[2 2 2 1 1 1 3 2 3 4 4 4]
	21 (จากรอบที่ 1)	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 3 3 4]
	22 (จากรอบที่ 1)	[1 1 2 2 1 2 1 2 3 4 4 4]

ตารางที่ 5.30 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
Elitist	12 (จากรอบที่ 1)	2	4	3.3333	0.1351
	21 (จากรอบที่ 1)	2	4	3.5556	0.1155
	22 (จากรอบที่ 1)	2	4	3.4286	0.1240

5.3.7 การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเนื่องจากจะทำให้เพิ่มโอกาสในการไปสู่คำตอบที่ดี และเป็นการลดโอกาสในการไปสู่คำตอบที่แย่ โดยจะทำการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตาราง

ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) โดยสตริงคำตอบที่ดีจะถูกเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกในรอบถัดไป และสตริงคำตอบที่แย่จะถูกลดความน่าจะเป็นในการเลือกในรอบถัดไป โดยมีหลักการดังนี้ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553)

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1c_2D_1 + c_2r_2D_2 \quad (5.1)$$

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \quad (5.2)$$

เมื่อ $V_{(i,j)}$ คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฝูงที่ j รอบที่ i

$X_{(i,j)}$ คือ ค่าความน่าจะเป็นร่วมของเส้นทางการเดินทางของอนุภาคในฝูงที่ j รอบที่ i

r_1 และ r_2 คือ ค่าสุ่มในช่วง (0, 1)

c_1 และ c_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor)

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

D_1และ D_2 คือ การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นโดยใช้คำตอบในส่วนของ Local และ Global ตามลำดับ โดยกระบวนการในการปรับปรุงตาราง จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การปรับปรุงในส่วนของสตริงคำตอบที่ดีและการปรับปรุงในส่วนของสตริงคำตอบที่แย่ ดังต่อไปนี้

<u>กรณีการปรับปรุงสติงคำตอบที่ดี</u> โดยนำสตริงคำตอบที่ดีที่ได้จากการคัดเลือกมาพิจารณาทีละคู่ลำดับ เมื่อกำหนดให้คู่ลำดับของสตริงที่พิจารณาคือ x_c, x_r โดยจะเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่ง $x_{c,r}$ ในตารางความน่าจะเป็น เท่ากับ $\frac{cr}{n-2}$ และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในคู่ลำดับ $x_{c,j}$ เมื่อ $j = 1,2,\ldots,n$ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)^2}$ ดังสมการด้านล่าง

$$x_{c,r}(t+1) = x_{c,r}(t) + \frac{cr}{(n-2)}(r_{c,r}(t+1)) + \frac{cr}{(n-2)^2}\left(\sum_{j=1}^{n} r_{c,j}(t+1)\right) \quad (5.3)$$

เมื่อ $x_{c,r}(t+1)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับ x_c, x_r เพื่อนำไปใช้ในเจนเนอเรชันถัดไป

$x_{c,r}(t)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับ x_c, x_r ในเจนเนอเรชันที่กำลังพิจารณา

$r_{c,r}$ คือ จำนวนนับทั้งหมดที่จะทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับ x_c, x_r เป็นคำตอบที่ดี

$r_{c,j}$ คือ จำนวนนับทั้งหมดที่จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับทั้งหมดคือคู่ลำดับ x_c, x_j เมื่อ $j = 1,2,\ldots,n$

<u>กรณีการการปรับปรุงสตริงคำตอบที่แย่</u> โดยการนำสตริงคำตอบที่แย่ที่ได้จากการคัดเลือกมาพิจารณาทีละคู่ลำดับ เมื่อกำหนดให้คู่ลำดับของสตริงที่พิจารณาคือ x_c, x_p โดยจะลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่ง $x_{c,p}$ ในตารางความน่าจะเป็น เท่ากับ $\frac{cr}{n-2}$ และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในคู่ลำดับ $x_{c,j}$ เมื่อ $j = 1,2,\ldots,n$ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)^2}$ ดังสมการด้านล่าง

$$x_{c,p}(t+1) = x_{c,p}(t) + \frac{cr}{(n-2)}(p_{c,p}(t+1)) + \frac{cr}{(n-2)^2}\left(\sum_{j=1}^{n} p_{c,j}(t+1)\right) \quad (5.4)$$

เมื่อ $x_{c,p}(t+1)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับ x_c, x_p เพื่อนำไปใช้ในเจนเนอเรชันถัดไป

$x_{c,p}(t)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับ x_c, x_p ในเจนเนอเรชันที่กำลังพิจารณา

$p_{c,p}$ คือ จำนวนนับทั้งหมดที่จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับ x_c, x_p เป็นคำตอบที่แย่

$p_{c,j}$ คือ จำนวนนับทั้งหมดที่จะทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเมื่อพิจารณาคู่ลำดับทั้งหมดคือคู่ลำดับ x_c, x_j เมื่อ $j = 1,2,\ldots,n$

และเมื่อทำการรวมค่าที่ได้จากการเพิ่มค่าและการลดค่า จะได้ค่าความน่าจะเป็นร่วม x_{c_1,c_2} ดังสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} x_{c_1,c_2}(t+1) = x_{c_1,c_2}(t) &+ \frac{cr}{(n-2)}\left(r_{c_1,c_2}(t+1) - p_{c_1,c_2}(t+1)\right) \\ &+ \frac{cr}{(n-2)^2}\left(\sum_{j=1}^{n} p_{c_1,j}(t+1) - \sum_{j=1}^{n} r_{c_1,j}(t+1)\right) \end{aligned} \quad (5.5)$$

จากตัวอย่างข้างต้นจะทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค และตารางความน่าจะเป็นร่วมได้ดังนี้

5.3.7.1 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix)

<u>การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1</u> : ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.4507$, $r_2 = 0.2255$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการ

ปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.4507}{(12-1)} = 0.0041$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.4507}{(12-1)^2} = 0.0004$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1 (Lbest,1) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.2255}{(12-1)} = 0.0021$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.2255}{(12-1)^2} = 0.0002$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.4507}{(12-1)} = 0.0041$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.4507}{(12-1)^2} = 0.0004$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1 (Lworst,1) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.2255}{(12-1)} = 0.0021$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.2255}{(12-1)^2} = 0.0002$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) ได้ผลดังตารางที่ 5.31

ตารางที่ 5.31 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Lbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Lworst	13	[1 4 2 5 3 7 8 6 10 9 11 12]
Gbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Gbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Gbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
Gworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

ปรับปรุงด้วย Lbest ของฝูงที่ 1 : ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 12 (*Lbest,12*) ซึ่งงานในลำดับแรกคือ งาน 2 โดยจะทำการเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตำแหน่งที่ 2 เท่ากับ 0.0041 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0004 ดังนี้

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบ *Lbest,12* :

ตำแหน่งที่ (2) มีค่าเท่ากับ 0.0833 + 0.0041 = 0.0874

การลดค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ *Lbest,12* :

ตำแหน่งที่ (1) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (3) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (4) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (5) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (6) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (7) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (8) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (9) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (10) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (11) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตำแหน่งที่ (12) มีค่าเท่ากับ 0.0833 – 0.0004 = 0.0829

ตารางที่ 5.32 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lbest,12*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0829	0.0874	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829

<u>ปรับปรุงด้วย Lworst ของฝูงที่ 1</u> : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 13 (*Lworst,13*) ซึ่งงานในลำดับแรกคือ งาน 1 โดยจะทำการลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.0041 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0004 ดังนี้

การลดค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบ *Lworst,13* :

ตำแหน่งที่ (1) มีค่าเท่ากับ 0.0829 - 0.0041 = 0.0788

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบ *Lworst,13* :

ตำแหน่งที่ (2) มีค่าเท่ากับ 0.0874 + 0.0004 = 0.0878

ตำแหน่งที่ (3) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (4) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (5) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (6) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (7) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (8) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (9) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (10) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (11) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตำแหน่งที่ (12) มีค่าเท่ากับ 0.0829 + 0.0004 = 0.0833

ตารางที่ 5.33 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lworst,13*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0788	0.0878	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833

ปรับปรุงด้วย Gbest ตัวที่ 1 : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 12 (*Gbest,12*) ซึ่งงานในลำดับแรกคือ งาน 2 โดยจะทำการเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตำแหน่งที่ 2 เท่ากับ 0.0021 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0002 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.34

ตารางที่ 5.34 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,12*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0786	0.0899	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831

ปรับปรุงด้วย Gbest ตัวที่ 2 : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 21 (*Gbest,21*) ซึ่งงานในลำดับแรกคือ งาน 3 โดยจะทำการเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.0021 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0002 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.35

ตารางที่ 5.35 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,21*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0784	0.0897	0.0852	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829

ปรับปรุงด้วย Gbest ตัวที่ 3 : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 22 (*Gbest,22*) ซึ่งงานในลำดับแรกคือ งาน 1 โดยจะทำการเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.0021 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0002 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.36

ตารางที่ 5.36 *ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก Gbest,22*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0805	0.0895	0.0850	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827

ปรับปรุงด้วย Gworst : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 23 (*Gworst,23*) ซึ่งงานในลำดับแรกคือ งาน 2 โดยจะทำการลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตำแหน่งที่ 2 เท่ากับ 0.0021 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0002 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.37

ตารางที่ 5.37 *ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก Gworst,23*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0807	0.0874	0.0852	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 : ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.2450\,, r_2 = 0.6064$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1\times0.2450}{(12-1)} = 0.0022$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times0.2450}{(12-1)^2} = 0.0002$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2 (Lbest,2) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1\times0.6064}{(12-1)} = 0.0055$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times0.6064}{(12-1)^2} = 0.0005$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ

$\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.2450}{(12-1)} = 0.0022$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.2450}{(12-1)^2} = 0.0002$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2 (Lworst,2) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.6064}{(12-1)} = 0.0055$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.6064}{(12-1)^2} = 0.0005$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) ได้ผลดังตารางที่ 5.38

ตารางที่ 5.38 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Lbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Lbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
Lworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]
Gbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Gbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Gbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
Gworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

- ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบที่ 21 *(Lbest,21)* และ 22 *(Lbest,22)*, สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบ 23 *(Lworst,23)*, สตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 12 *(Gbest,12)* , 21*(Gbest,21)* และ 22 *(Gbest,22)* , และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบ 23 *(Gworst,23)* เช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง 1 ได้ผลดังตาราง 5.39

ตารางที่ 5.39 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest,Lworst, Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0906	0.0797	0.0906	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821

5.3.7.2 **การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่** (Velocity Matrix)

<u>การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1</u> : ในตัวอย่างนี้กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.9568$, $r_2 = 0.9670$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุง ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.9568}{(12-2)} = 0.0096$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.9568}{(12-2)^2} = 0.0010$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1 (Lbest,1) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.9670}{(12-2)} = 0.0097$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.9670}{(12-2)^2} = 0.0010$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุง ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.9568}{(12-2)} = 0.0096$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.9568}{(12-2)^2} = 0.0010$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1 (Lworst,1) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.9670}{(12-2)} = 0.0097$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.9670}{(12-2)^2} = 0.0010$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gbest) ได้ผลดังตารางที่ 5.40

ตารางที่ 5.40 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Lbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Lworst	13	[1 4 2 5 3 7 8 6 10 9 11 12]
Gbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Gbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Gbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
Gworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

<u>*ปรับปรุงด้วย Lbest ของฝูงที่ 1*</u> : ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 12 (*Lbest,12*) ซึ่ง

จะพิจารณาเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับที่อยู่ติดกัน คือ (2,5) , (5,8) , (8,1) ,..., (9,11) , (11,12) เท่ากับ 0.0096 และลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0010 ดังนี้

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับ (2,5) จากสตริงคำตอบ *Lbest,12* :

ตำแหน่งที่ (2,5) มีค่าเท่ากับ 0 + 0.0096 = 0.0096

การลดค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับอื่นๆ จากสตริงคำตอบ *Lbest,12* :

ตำแหน่งที่ (2,1) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,2) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (2,3) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,4) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,6) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,7) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,8) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,9) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,10) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,11) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (2,12) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับ (5,8) จากสตริงคำตอบ *Lbest,12* :

ตำแหน่งที่ (5,8) มีค่าเท่ากับ 0 + 0.0096 = 0.0096

การลดค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับอื่นๆ จากสตริงคำตอบ *Lbest,12* :

ตำแหน่งที่ (5,1) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,2) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,3) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,4) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,5) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (5,6) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,7) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,9) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,10) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,11) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ตำแหน่งที่ (5,12) มีค่าเท่ากับ 0 - 0.001 = -0.001

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ของสตริงคำตอบที่ดี 12 *(Lbest,12)* จนครบทุกคู่ลำดับจะได้ดังตารางที่ 5.41

ตารางที่ 5.41 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lbest,12*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
2	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
3	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
4	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
5	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
6	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001	-0.001
7	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0096	-0.001	-0.001
8	0.0096	-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	-0.001	-0.001	0	-0.001	0.0096	-0.001
10	-0.001	-0.001	0.0096	-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	-0.001	-0.001	0	0.0096
12	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0

<u>ปรับปรุงด้วย Lworst ของฝูงที่ 1</u> : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 13 (*Lworst,13*) ซึ่งจะพิจารณาลดความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับที่อยู่ติดกัน คือ (1,4) , (4,2) , (2,5) ,..., (9,11) , (11,12) เท่ากับ 0.0096 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0010 ดังนี้

การลดค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับ (1,4) จากสตริงคำตอบ *Lworst,13* :

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.0096 - 0.0096 = 0

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับอื่นๆ จากสตริงคำตอบ *Lworst,13* :

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,8) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,9) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,10) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,11) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (1,12) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

การลดค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับ (4,2) จากสตริงคำตอบ *Lworst,13* :

ตำแหน่งที่ (4,2) มีค่าเท่ากับ -0.001 - 0.0096 = -0.0106

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่คู่ลำดับอื่นๆ จากสตริงคำตอบ *Lworst,13* :

ตำแหน่งที่ (4,1) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,3) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,4) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (4,5) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,6) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,7) มีค่าเท่ากับ 0.0096 + 0.001 = 0.0106

ตำแหน่งที่ (4,8) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,9) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,10) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,11) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ตำแหน่งที่ (4,12) มีค่าเท่ากับ -0.001 + 0.001 = 0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ของสตริงคำตอบที่แย่ 13 *(Lworst,13)* จนครบทุกคู่ลำดับจะได้ดังตารางที่ 5.42

ตารางที่ 5.42 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Lworst,13*

	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	0.0106	-0.0106	0	0	0	0	0
4	0	-0.0106	0	0	0	0	0.0106	0	0	0	0	0
5	0	0	-0.0106	0	0	0	0	0.0106	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0106	-0.0106	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	-0.0106	0	0.0106	0	0
8	0.0106	0	0	0	0	-0.0106	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0.0106	0	0	0	0	0	-0.0106	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

ปรับปรุงด้วย Gbest ตัวที่ 1 : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 12 (*Gbest,12*) ซึ่งจะพิจารณาเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับที่อยู่ติดกัน เท่ากับ 0.0097 และลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ 0.001 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.43

ตารางที่ 5.43 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,12*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.001	-0.001	0.0097	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
2	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0097	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
3	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0202	-0.0115	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
4	-0.001	-0.0115	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0202	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
5	-0.001	-0.001	-0.0115	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0202	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
6	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	-0.001	0.0202	-0.0115	-0.001	-0.001
7	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.0115	-0.001	0.0202	-0.001	-0.001
8	0.0202	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.0115	-0.001	0	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
9	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	-0.001	0.0097	-0.001
10	-0.001	-0.001	0.0202	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.0115	0	-0.001	-0.001
11	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0	0.0097
12	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0

ปรับปรุงด้วย Gbest ตัวที่ 2 : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 21 (*Gbest,21*) ซึ่งจะพิจารณาเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับที่อยู่ติดกัน เท่ากับ 0.0097 และลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ 0.001 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.44

ตารางที่ 5.44 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,21*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	0.0087	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
2	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0193	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
3	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0125	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
4	-0.0019	-0.0018	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
5	-0.0019	-0.0019	-0.0125	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0299	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
6	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0125	-0.0019	-0.0019
7	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0	-0.0125	-0.0019	0.0192	0.0087	-0.0019
8	0.0192	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0125	-0.0019	0	0.0087	-0.0019	-0.0019	-0.0019
9	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	0.0087	-0.0019
10	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0125	0	-0.0019	0.0087
11	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	0	0.0087
12	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0

ปรับปรุงด้วย Gbest ตัวที่ 3 : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 22 (*Gbest,22*) ซึ่งจะพิจารณาเพิ่มความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับที่อยู่ติดกัน เท่ากับ 0.0097 และลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ 0.001 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.45

ตารางที่ 5.45 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gbest,22*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0029	-0.0029	0.0184	-0.0029	0.0077	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029
2	-0.0029	0	-0.0029	-0.0029	0.029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029
3	0.0077	-0.0029	0	-0.0029	-0.0029	0.0289	-0.0134	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029
4	-0.0029	0.0078	-0.0029	0	-0.0029	-0.0029	0.0183	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029
5	-0.0029	-0.0029	-0.0134	-0.0029	0	-0.0029	0.0077	0.0289	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029
6	-0.0029	-0.0029	-0.0029	0.0077	-0.0029	0	-0.0029	0.0077	0.0183	-0.0134	-0.0029	-0.0029
7	-0.0029	-0.0029	0.0077	-0.0029	-0.0029	-0.0029	0	-0.0134	-0.0029	0.0183	0.0077	-0.0029
8	0.0183	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0134	-0.0029	0	0.0077	0.0077	-0.0029	-0.0029
9	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	0.0077	-0.0029	0	-0.0029	0.0184	-0.0029
10	-0.0029	-0.0029	0.0183	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0028	0	-0.0029	0.0077
11	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	0.0077	0	0.0184
12	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	-0.0029	0

ปรับปรุงด้วย Gworst : จากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ด้วยสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 23 (*Gworst,23*) ซึ่งจะพิจารณาลดความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับที่อยู่ติดกัน เท่ากับ 0.0097 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ 0.001 ซึ่งมีวิธีเช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง ได้ผลดังตารางที่ 5.46

ตารางที่ 5.46 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก *Gworst,23*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0019	-0.0126	0.0193	-0.0019	0.0087	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
2	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0193	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
3	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0125	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
4	-0.0019	0.0088	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0086	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
5	-0.0126	-0.0019	-0.0125	-0.0019	0	-0.0019	0.0087	0.0299	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
6	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0125	-0.0019	-0.0019
7	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0	-0.0125	-0.0019	0.0086	0.0087	-0.0019
8	0.0192	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0125	-0.0019	0	-0.0019	0.0087	-0.0019	-0.0019
9	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	0.0087	-0.0019
10	-0.0019	-0.0019	0.0192	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0018	0	-0.0019	0.0087
11	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	0	0.0087
12	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0126	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0

<u>การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2</u> : ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.6308, r_2 = 0.1496$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุง ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.6308}{(12-2)} = 0.0063$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.6308}{(12-2)^2} = 0.0006$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2 (Lbest,2) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.1496}{(12-2)} = 0.0015$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.1496}{(12-2)^2} = 0.0001$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุง ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.6308}{(12-2)} = 0.0063$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.6308}{(12-2)^2} = 0.0006$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2 (Lworst,2) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.1496}{(12-2)} = 0.0015$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.1496}{(12-2)^2} = 0.0001$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gbest) ได้ผลดังตารางที่ 5.47

ตารางที่ 5.47 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Lbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Lbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
Lworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]
Gbest	12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
Gbest	21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
Gbest	22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
Gworst	23	[2 5 1 3 6 8 9 11 12 4 7 10]

- ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบที่ 21 *(Lbest,21)* และ 22 *(Lbest,22)*, สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบ 23 *(Lworst,23)*, สตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริง

คำตอบที่ 12 *(Gbest,12)* , *21(Gbest,21)* และ 22 *(Gbest,22)* , และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบ 23 *(Gworst,23)* เช่นเดียวกับการปรับปรุงจากสตริงคำที่ดีและแย่ของฝูง 1 ได้ผลดังตารางที่ 5.48

ตารางที่ 5.48 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0009	-0.0095	0.0093	-0.0009	0.0077	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
2	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	0.0093	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
3	0.0077	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	0.0007	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
4	-0.0009	0.0162	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	-0.0079	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
5	-0.0095	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0	-0.0009	0.0077	0.0093	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
6	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	0.0007	-0.0009	-0.0009	-0.0009
7	-0.0009	-0.0009	0.0077	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	-0.0079	0.0077	-0.0009
8	0.0007	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0	-0.0009	0.0077	-0.0009	-0.0009
9	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	-0.0009	0	-0.0009	0.0007	-0.0009
10	-0.0009	-0.0009	0.0007	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	0	-0.0009	0.0077
11	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	0	0.0007
12	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0095	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0

5.3.7.3 **การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม** (Joint Probability Matrix)

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

ตารางที่ 5.49 ความน่าจะเป็นร่วม เริ่มต้นของทั้ง 2 ฝูง ($X_{(i,-1j)}$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	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	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
3	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
4	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
5	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
6	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
7	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
8	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909
9	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909	0.0909
10	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909	0.0909
11	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-	0.0909
12	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	0.0909	-

ตัวอย่างการคำนวณการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในตำแหน่ง (1,2)

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(1,1)}(1,2) = 0.0909 - 0.0019$$
$$X_{(1,1)}(1,2) = 0.0890$$

ตัวอย่างการคำนวณการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในตำแหน่ง (1,3)

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(1,1)}(1,3) = 0.0909 - 0.0126$$
$$X_{(1,1)}(1,3) = 0.0783$$

เมื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมในทุกตำแหน่งแล้ว จะได้ผลดังตารางที่ 5.50

ตารางที่ 5.50 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	0.089	0.0783	0.1102	0.089	0.0996	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
2	0.089	-	0.089	0.089	0.1102	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
3	0.0996	0.089	-	0.089	0.089	0.1101	0.0785	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
4	0.089	0.0997	0.089	-	0.089	0.089	0.0995	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
5	0.0783	0.089	0.0785	0.089	-	0.089	0.0996	0.1208	0.089	0.089	0.089	0.089
6	0.089	0.089	0.089	0.0996	0.089	-	0.089	0.089	0.1101	0.0785	0.089	0.089
7	0.089	0.089	0.0996	0.089	0.089	0.089	-	0.0785	0.089	0.0995	0.0996	0.089
8	0.1101	0.089	0.089	0.089	0.089	0.0785	0.089	-	0.089	0.0996	0.089	0.089
9	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.0996	0.089	-	0.089	0.0996	0.089
10	0.089	0.089	0.1101	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.0891	-	0.089	0.0996
11	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.0996	-	0.0996
12	0.089	0.089	0.089	0.0783	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	-

ตัวอย่างการคำนวณการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในตำแหน่ง (1,2)

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(1,2)}(1,2) = 0.0909 - 0.0009$$
$$X_{(1,2)}(1,2) = 0.0900$$

ตัวอย่างการคำนวณการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในตำแหน่ง (1,3)

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)}$$
$$X_{(1,2)}(1,3) = 0.0909 - 0.0095$$
$$X_{(1,2)}(1,3) = 0.0814$$

เมื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมในทุกตำแหน่งแล้ว จะได้ผลดังตารางที่ 5.51

ตารางที่ 5.51 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	0.09	0.0814	0.1002	0.09	0.0986	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
2	0.09	-	0.09	0.09	0.1002	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
3	0.0986	0.09	-	0.09	0.09	0.0916	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
4	0.09	0.1071	0.09	-	0.09	0.09	0.083	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
5	0.0814	0.09	0.09	0.09	-	0.09	0.0986	0.1002	0.09	0.09	0.09	0.09
6	0.09	0.09	0.09	0.0986	0.09	-	0.09	0.09	0.0916	0.09	0.09	0.09
7	0.09	0.09	0.0986	0.09	0.09	0.09	-	0.09	0.09	0.083	0.0986	0.09
8	0.0916	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	-	0.09	0.0986	0.09	0.09
9	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.0986	0.09	-	0.09	0.0916	0.09
10	0.09	0.09	0.0916	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.0986	-	0.09	0.0986
11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.0986	-	0.0916
12	0.09	0.09	0.09	0.0814	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	-

5.3.7 การแก้ปัญหาในรอบถัดไป

สร้างสตริงคำตอบโดยใช้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก และตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ในรอบก่อนหน้าในการสร้างสตริงคำตอบลำดับขั้นงานในแต่ละฝูง โดยมีวิธีการสร้างสตริงคำตอบเหมือนในรอบที่ 1 ซึ่งสตริงคำตอบทั้งหมด 6 อนุภาคดังตารางที่ 5.52

ตารางที่ 5.52 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[3 1 4 6 2 5 9 11 8 12 7 10]
	2	[3 6 1 2 5 9 4 8 11 12 7 10]
	3	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]
2	1	[2 1 4 5 3 7 8 10 6 9 11 12]
	2	[2 1 5 4 7 8 10 3 6 9 11 12]
	3	[2 3 6 5 8 9 1 4 11 7 12 10]

จากลำดับขั้นงานทั้ง 6 ตัวข้างบนจะสามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 5.53 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 6 ตัวได้ดังตารางที่ 5.54

ตารางที่ 5.53 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 3]
	2	[1 1 1 2 2 2 1 2 1 4 3 3]
	3	[1 1 2 2 1 2 3 2 3 3 3 4]
2	1	[2 1 1 2 2 1 2 4 1 3 3 4]
	2	[2 1 1 3 4 6 5 6 5 5 8 8]
	3	[2 1 1 1 2 1 3 3 4 4 6 7]

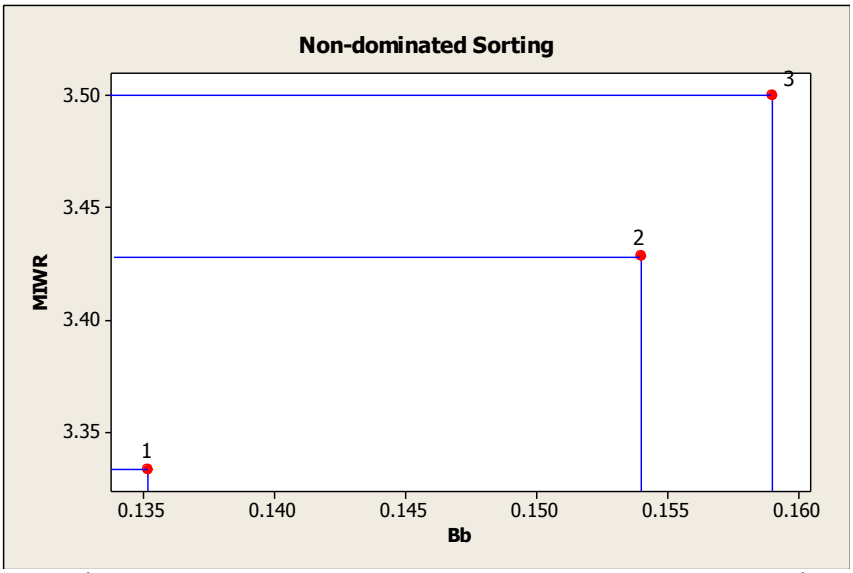
ตารางที่ 5.54 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 2 ฝูง 6 อนุภาค

ฝูง	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	2	4	3.5000	0.1590
	2	2	4	3.4286	0.1540
	3	2	4	3.3333	0.1352
2	1	2	4	3.5000	0.1579
	2	4	7	6.3000	0.0055
	3	4	6	5.3333	0.0130

ทำการประเมินค่าความแข็งแรงสตริงคำตอบที่ได้ด้วยวิธี Non-dominate Sorting และ Crowding Distance ในแต่ละฝูง จากนั้นคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Local Best Solution : Lbest) และสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Local Worst Solution : Lworst) โดยจะพิจารณาที่จำนวนคู่สถานีงานและสถานีงานที่น้อยที่สุดและมากที่สุดเป็นลำดับแรก (เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็นวัตถุประสงค์หลัก) โดยทำการกรองและเลือกสตริงคำตอบแล้วจึงพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 คือ ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานและผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน

จากนั้นนำสตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงมารวมกันเพื่อจะทำการหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Global Best Solution : Gbest) และนำสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูงมารวมกันเพื่อจะทำการหาสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Global Worst Solution; Gworst) ด้วยวิธี Non-dominate Sorting และ Crowding Distance โดยทำเช่นเดียวกับการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่ในแต่ละฝูง และทำการเก็บค่า Gbest ที่ได้

Lbest ของฝูงที่ 1 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือสตริงคำตอบ 1,2 และ 3 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 (Lbest) ได้ผลดังภาพที่ 5.11 และและคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.55

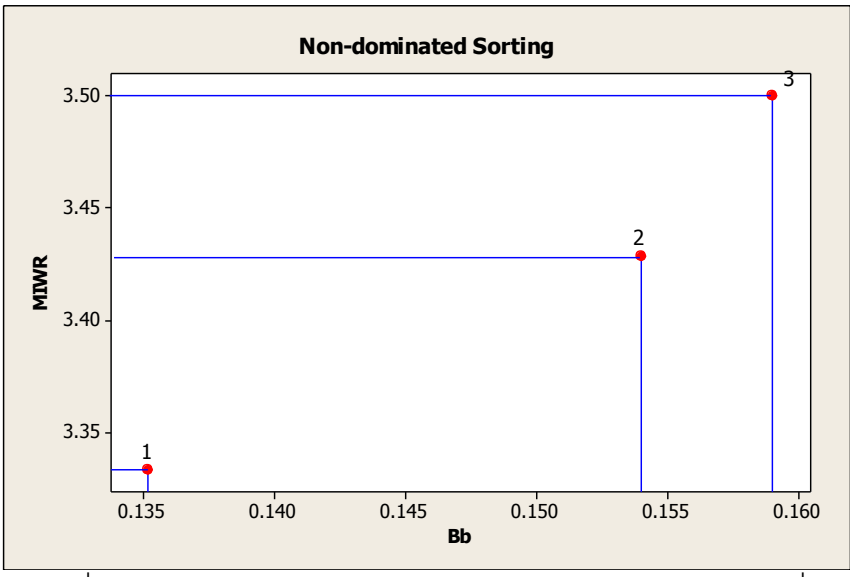


ภาพที่ 5.11 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.55 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.5000	0.1590	3	infinity	
	2	3.4286	0.1540	2	infinity	
	3	3.3333	0.1352	1	infinity	Lbest

Lworst ของฝูงที่ 1 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานมากที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือสตริงคำตอบ 1,2 และ 3 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 (Lworst) ได้ผลดังภาพที่ 5.12 และและคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.56



ภาพที่ 5.12 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.56 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.5000	0.1590	3	infinity	Lworst
	2	3.4286	0.1540	2	infinity	
	3	3.3333	0.1352	1	infinity	

จะได้ค่า Lbest และ Lworst ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ดังตารางที่ 5.57 และ 5.58

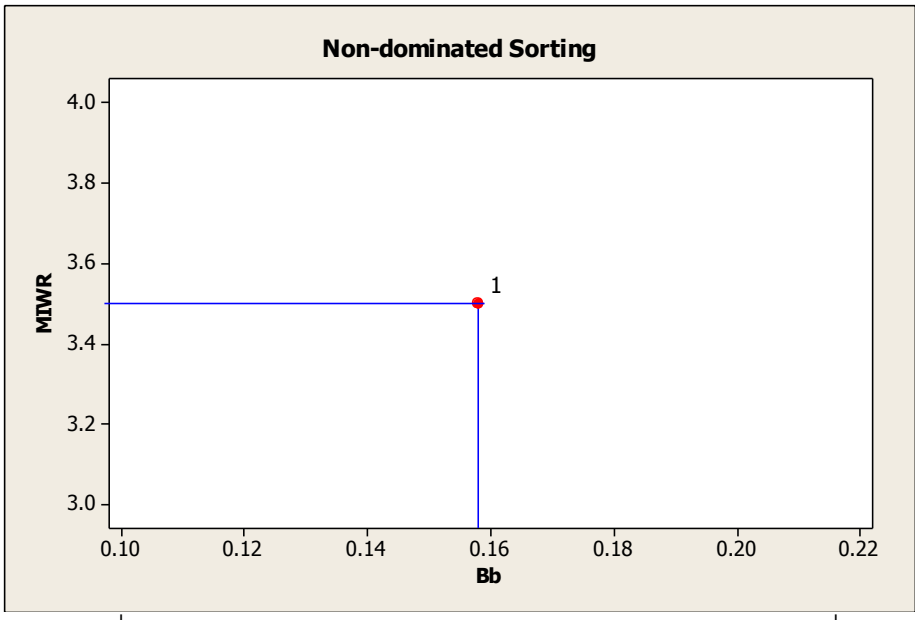
ตารางที่ 5.57 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
1	3	Lbest	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]

ตารางที่ 5.58 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
1	1	Lworst	[3 1 4 6 2 5 9 11 8 12 7 10]

Lbest ของฝูงที่ 2 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือสตริงคำตอบ 1 เพียงสตริงคำตอบเดียว ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 (Lbest) ได้ผลดังภาพที่ 5.13 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.59

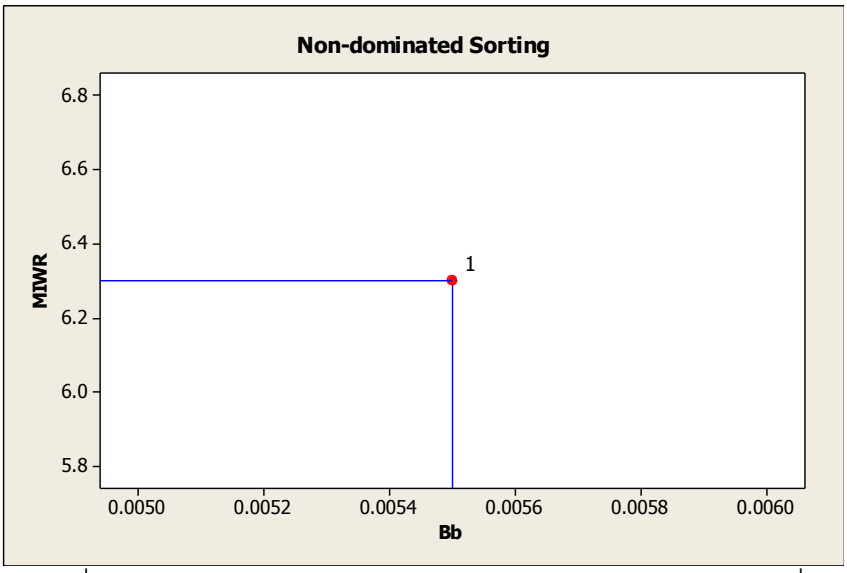


ภาพที่ 5.13 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.59 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
2	1	3.5000	0.1579	1	infinity	Lbest

Lworst ของฝูงที่ 2 : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานมากที่สุด คือ 4 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 7 คือสตริงคำตอบ 2 เพียงสตริงคำตอบเดียว ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 (Lworst) ได้ผลดังภาพที่ 5.14 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.60



ภาพที่ 5.14 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 4 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 7

ตารางที่ 5.60 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2

ฝูงที่	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
2	2	6.3000	0.0055	1	infinity	Lworst

จะได้ค่า Lbest และ Lworst ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 2 ดังตารางที่ 5.61 และ 5.62

ตารางที่ 5.61 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2

ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
2	1	Lbest	[2 1 4 5 3 7 8 10 6 9 11 12]

ตารางที่ 5.62 สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2

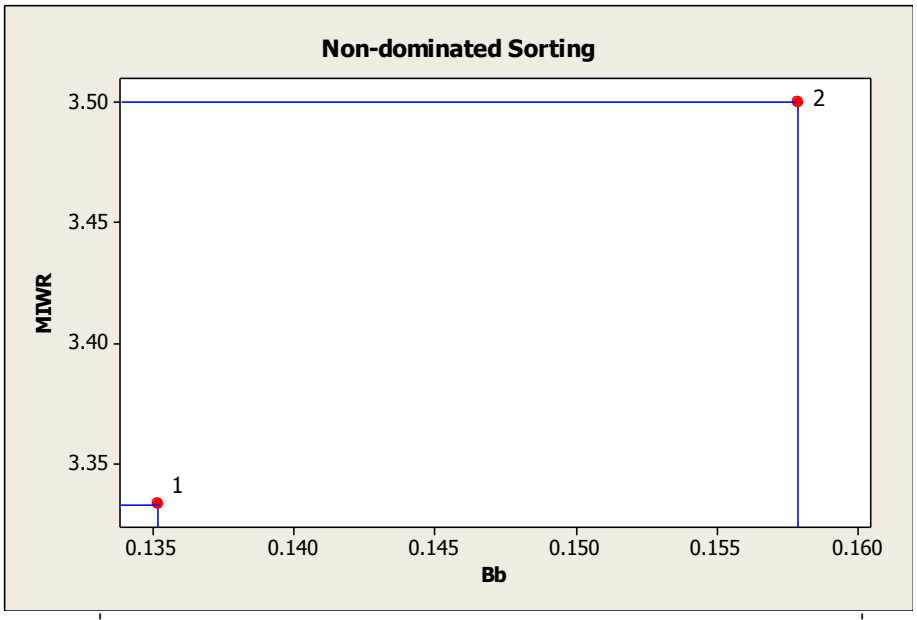
ฝูงที	สตริงคำตอบที่	Selection	Task Sequence
2	2	Lworst	[2 1 5 4 7 8 10 3 6 9 11 12]

นำสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูงมารวมกันและทำการหา Non-dominate Sorting และ Crowding Distance อีกครั้งเพื่อจะคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ได้ผลดังตารางที่ 5.63

ตารางที่ 5.63 การรวมกันของสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง

Lbest ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	13	2	4	3.3333	0.1352
2	21	2	4	3.5000	0.1579

Gbest : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบของประชากรพบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 คือ สตริงคำตอบที่ 3 ของฝูงที่ 1 และสตริงคำตอบที่ 1 ของฝูงที่ 2 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ได้ผลดังภาพที่ 5.15 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.64



ภาพที่ 5.15 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่ดีเมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 2 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4

ตารางที่ 5.64 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากร

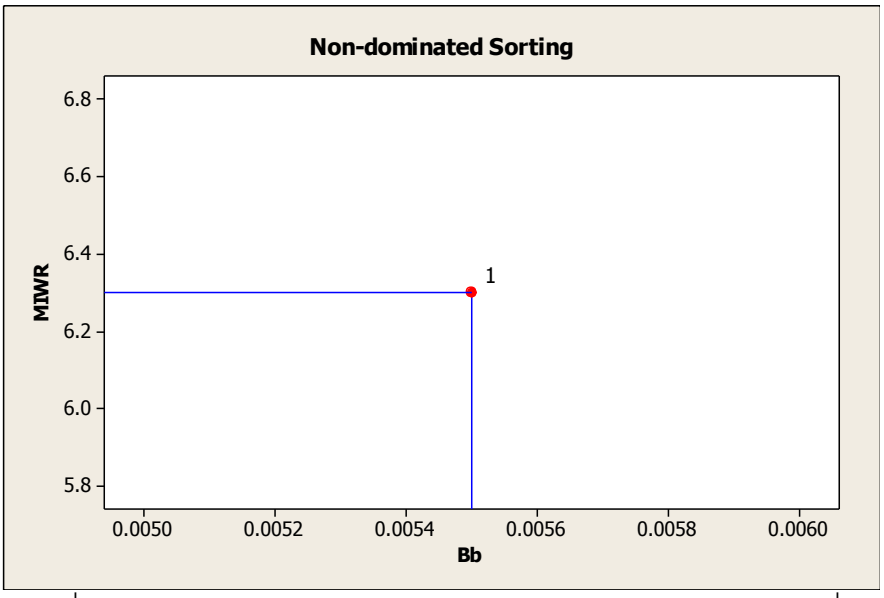
Lbest ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	13	3.3333	0.1352	1	infinity	Gbest
2	21	3.5000	0.1579	2	infinity	

นำสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูงมารวมกันและทำการหา Non-dominate Sorting และ Crowding Distance อีกครั้งเพื่อจะคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร ได้ผลดังตารางที่ 5.65

ตารางที่ 5.65 การรวมกันของสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง

Lworst ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	11	2	4	3.5000	0.1590
2	22	4	7	6.3000	0.0055

Gworst : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบของประชากรพบว่าสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานมากที่สุด คือ 4 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 7 คือ สตริงคำตอบที่ 2 ของฝูงที่ 2 เพียงสตริงคำตอบเดียว ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) ได้ผลดังภาพที่ 5.16 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.66



ภาพที่ 5.16 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบประชากรที่แย่เมื่อพิจารณาเฉพาะคู่สถานีงานเท่ากับ 4 และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 7

ตารางที่ 5.66 การคัดเลือกสตริงที่แย่ของประชากร

Lworst ฝูงที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
2	22	6.3000	0.0055	1	infinity	Gworst

จะได้ค่า Gbest และ Gworst ของสตริงคำตอบของประชากร ดังตารางที่ 5.67 และ 5.68

ตารางที่ 5.67 สตริงคำตอบที่ดีของประชากรในรอบที่ 2

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Gbest	13	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]

ตารางที่ 5.68 สตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในรอบที่ 2

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Gworst	22	[2 1 5 4 7 8 10 3 6 9 11 12]

เมื่อได้ค่า Gbest จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันไว้ในสถานที่รวมคำตอบ เข้าไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในรอบก่อนหน้า และทำการ Non-dominated Sorting เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไปได้ดังตารางที่ 5.69 – 5.71

ตารางที่ 5.69 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
1	Gbest, 12	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
	Gbest, 21	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
	Gbest, 22	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]
2	Gbest, 13	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]

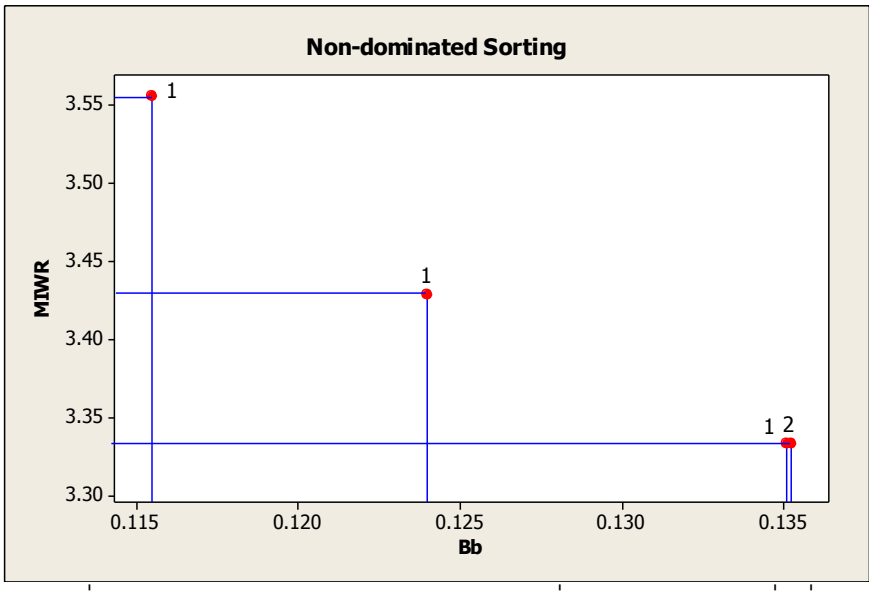
ตารางที่ 5.70 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Workstation
1	Gbest, 12	[2 2 2 1 1 1 3 2 3 4 4 4]
	Gbest, 21	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 3 3 4]
	Gbest, 22	[1 1 2 2 1 2 1 2 3 4 4 4]
2	Gbest, 13	[1 1 2 2 1 2 3 2 3 3 3 4]

ตารางที่ 5.71 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	Gbest, 12	2	4	3.3333	0.1351
	Gbest, 21	2	4	3.5556	0.1155
	Gbest, 22	2	4	3.4286	0.1240
2	Gbest, 13	2	4	3.3333	0.1352

Elitist : เมื่อพิจารณาสตริงคำตอบของประชากรพบว่าทุกสตริงคำตอบมีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 ซึ่งนำมาหาค่าความแข็งแรงเพื่อจะหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ได้ผลดังภาพที่ 5.17 คำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 5.72



ภาพที่ 5.17 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5.72 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบที่	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	12	3.3333	0.1351	1	infinity	Elitist
	21	3.5556	0.1155	1	infinity	Elitist
	22	3.4286	0.1240	1	2.0000	Elitist
2	13	3.3333	0.1352	2	infinity	

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบทั้ง 4 ตัวข้างบน จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ โดยพิจารณาสตริงคำตอบที่มีค่า Dummy Fitness ต่ำสุด เพื่อเก็บไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อดำเนินการในรอบถัดไป ดังตารางที่ 5.73 – 5.75

ตารางที่ 5.73 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Elitist	12 (จากรอบที่ 1)	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
	21 (จากรอบที่ 1)	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 11 10 12]
	22 (จากรอบที่ 1)	[1 4 2 5 7 3 6 8 10 9 11 12]

ตารางที่ 5.74 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Workstation
Elitist	12 (จากรอบที่ 1)	[2 2 2 1 1 1 3 2 3 4 4 4]
	21 (จากรอบที่ 1)	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 3 3 4]
	22 (จากรอบที่ 1)	[1 1 2 2 1 2 1 2 3 4 4 4]

ตารางที่ 5.75 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
Elitist	12 (จากรอบที่ 1)	2	4	3.3333	0.1351
	21 (จากรอบที่ 1)	2	4	3.5556	0.1155
	22 (จากรอบที่ 1)	2	4	3.4286	0.1240

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ของแต่ละฝูงในรอบที่ 2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 5.76 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Lbest	13	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]
Lworst	11	[3 1 4 6 2 5 9 11 8 12 7 10]
Gbest	13	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]
Gworst	22	[2 1 5 4 7 8 10 3 6 9 11 12]

ตารางที่ 5.77 สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของฝูงที่ 2 ในรอบที่ 2

Selection	สตริงคำตอบที่ (ฝูง,อนุภาค)	Task Sequence
Lbest	21	[2 1 4 5 3 7 8 10 6 9 11 12]
Lworst	22	[2 1 5 4 7 8 10 3 6 9 11 12]
Gbest	13	[1 4 2 5 7 8 10 3 6 9 11 12]
Gworst	22	[2 1 5 4 7 8 10 3 6 9 11 12]

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 : ในรอบที่ 2 กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.9881$, $r_2 = 0.3845$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.9881}{(12-1)} = 0.0090$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.9881}{(12-1)^2} = 0.0008$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1 (Lbest,1) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.3845}{(12-1)} = 0.0035$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.3845}{(12-1)^2} = 0.0003$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.9881}{(12-1)} = 0.0090$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.9881}{(12-1)^2} = 0.0008$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1 (Lworst,1) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.3845}{(12-1)} = 0.0035$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.3845}{(12-1)^2} = 0.0003$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst)

เมื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 13 *(Lbest,13)* สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบ 11 *(Lworst,11)*, สตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 13 *(Gbest,13)* และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบ 22 *(Gworst,22)* เช่นเดียวกับการปรับปรุงในรอบที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 5.78

ตารางที่ 5.78 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0943	0.0836	0.0754	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 : ในรอบที่ 2 กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.8519$, $r_2 = 0.7338$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุง

ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.8519}{(12-1)} = 0.0077$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.8519}{(12-1)^2} = 0.0007$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2 (Lbest,2) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.7338}{(12-1)} = 0.0067$ และลดความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.7338}{(12-1)^2} = 0.0006$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.8519}{(12-1)} = 0.0077$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.8519}{(12-1)^2} = 0.0007$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2 (Lworst,2) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 0.7338}{(12-1)} = 0.0067$ และเพิ่มความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกให้กับงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_2 r_2}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 0.7338}{(12-1)^2} = 0.0006$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst)

เมื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบที่ 21 *(Lbest,21)* สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบ 22 *(Lworst,22)*, สตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 13 *(Gbest,13)* และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบ 22 *(Gworst,22)* เช่นเดียวกับการปรับปรุงในรอบที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 5.79

ตารางที่ 5.79 ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.0978	0.0724	0.0906	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821

<u>การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1</u> : ในรอบที่ 2 กำหนดให้สุ่มค่าได้ $r_1 = 0.4098, r_2 = 0.1762$ และ $c_1, c_2 = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุง ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.4098}{(12-2)} = 0.0041$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.4098}{(12-2)^2} = 0.0004$ ในส่วนของ Local โดยดู

จากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 1 (Lbest,1) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.1762}{(12-2)} = 0.0018$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.1762}{(12-2)^2} = 0.0002$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุง ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.4098}{(12-2)} = 0.0041$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.4098}{(12-2)^2} = 0.0004$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1 (Lworst,1) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 0.1762}{(12-2)} = 0.0018$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 0.1762}{(12-2)^2} = 0.0002$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gbest)

เมื่อทำการปรับปรุงตารางตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบที่ 13 *(Lbest,13)* สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 คือ สตริงคำตอบ 11 *(Lworst,11)*, สตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 13 *(Gbest,13)* และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบ 22 *(Gworst,22)* เช่นเดียวกับการปรับปรุงในรอบที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 5.80

ตารางที่ 5.80 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0019	-0.0126	0.0213	-0.0039	0.0087	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
2	-0.0039	0	-0.0019	-0.0019	0.0213	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
3	0.0042	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0237	-0.0125	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
4	-0.0019	0.0153	-0.0019	0	-0.0019	-0.0064	0.0067	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019
5	-0.0126	-0.0019	-0.0125	-0.0039	0	-0.0019	0.0151	0.0299	-0.0064	-0.0019	-0.0019	-0.0019
6	-0.0019	-0.0064	-0.0019	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	-0.0019	0.0237	-0.0125	-0.0019	-0.0019
7	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0	-0.008	-0.0019	0.0041	0.0087	-0.0019
8	0.0192	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0125	-0.0019	0	-0.0019	0.0132	-0.0019	-0.0064
9	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0.0087	-0.0019	0	-0.0019	0.0087	-0.0019
10	-0.0019	-0.0019	0.0237	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0018	0	-0.0019	0.0087
11	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0064	-0.0019	0.0087	0	0.0132
12	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0126	-0.0019	-0.0019	-0.0064	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	0

<u>การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2</u> : ในรอบที่ 2 กำหนดให้สุ่มค่าได้ $\mathrm{r_1} = 0.6090$, $\mathrm{r_2} = 0.4806$ และ $\mathrm{c_1}, \mathrm{c_2} = 0.1$ สำหรับทำการปรับปรุง ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{\mathrm{c_1 r_1}}{(\mathrm{n}-2)} = \frac{0.1\times0.6090}{(12-2)} = 0.0055$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1\times0.6090}{(12-2)^2} = 0.0005$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีในฝูงที่ 2 (Lbest,2) และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{\mathrm{c_1 r_1}}{(\mathrm{n}-2)} = \frac{0.1\times0.4806}{(12-2)} = 0.0048$ และลดความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1\times0.4806}{(12-2)^2} = 0.0005$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest)

จากนั้นพิจารณาสตริงคำตอบที่แย่แล้วทำการปรับปรุง ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{\mathrm{c_1 r_1}}{(\mathrm{n}-2)} = \frac{0.1\times0.6090}{(12-2)} = 0.0055$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1\times0.6090}{(12-2)^2} = 0.0005$ ในส่วนของ Local โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 2 (Lworst,2) และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่ลำดับที่อยู่ติดกันเท่ากับ $\frac{\mathrm{c_1 r_1}}{(\mathrm{n}-2)} = \frac{0.1\times0.4806}{(12-2)} = 0.0048$ และเพิ่มความน่าจะเป็นกับคู่ลำดับอื่นๆ เท่ากับ $\frac{c_1 r_1}{(n-2)^2} = \frac{0.1\times0.4806}{(12-2)^2} = 0.0005$ ในส่วนของ Global โดยดูจากงานคู่ลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gbest)

เมื่อทำการปรับปรุงตารางตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบที่ 21 *(Lbest,21)* สตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 2 คือ สตริงคำตอบ 22 *(Lworst,22)*, สตริงคำตอบที่ดีของประชากร คือ สตริงคำตอบที่ 13 *(Gbest,13)* และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร คือ สตริงคำตอบ 22 *(Gworst,22)* เช่นเดียวกับการปรับปรุงในรอบที่ 1 ได้ผลดังตารางที่ 5.81

ตารางที่ 5.81 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงจาก Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	-0.0009	-0.0095	0.0213	-0.0129	0.0077	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
2	-0.0062	0	-0.0009	-0.0009	0.0146	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
3	0.0077	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	-0.006	0.0058	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
4	-0.0009	0.0215	-0.0009	0	0.0058	-0.0009	-0.0199	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
5	-0.0095	-0.0009	0.0058	-0.0129	0	-0.0009	0.0129	0.0093	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009
6	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	0.0007	-0.0009	-0.0009	-0.0009
7	-0.0009	-0.0009	0.0077	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0	-0.0009	-0.0009	-0.0079	0.0077	-0.0009
8	0.0007	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0	-0.0009	0.0077	-0.0009	-0.0009
9	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	-0.0009	0	-0.0009	0.0007	-0.0009
10	-0.0009	-0.0009	-0.006	-0.0009	-0.0009	0.0058	-0.0009	-0.0009	0.0077	0	-0.0009	0.0077
11	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0.0077	0	0.0007
12	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0095	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	-0.0009	0

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 เช่นเดียวกับวิธีการปรับปรุงในรอบที่ 1ได้ผลดังตารางที่ 5.82 และ 5.83

ตารางที่ 5.82 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	0.087	0.0658	0.1315	0.0851	0.1083	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087
2	0.0851	-	0.087	0.087	0.1315	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087
3	0.1038	0.087	-	0.087	0.087	0.1339	0.066	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087
4	0.087	0.115	0.087	-	0.087	0.0825	0.1062	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087
5	0.0658	0.087	0.066	0.0851	-	0.087	0.1148	0.1506	0.0825	0.087	0.087	0.087
6	0.087	0.0825	0.087	0.1083	0.087	-	0.087	0.087	0.1339	0.066	0.087	0.087
7	0.087	0.087	0.1083	0.087	0.087	0.087	-	0.0705	0.087	0.1036	0.1083	0.087
8	0.1294	0.087	0.087	0.087	0.087	0.066	0.087	-	0.087	0.1128	0.087	0.0825
9	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.1083	0.087	-	0.087	0.1083	0.087
10	0.087	0.087	0.1339	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.0873	-	0.087	0.1083
11	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.0825	0.087	0.1083	-	0.1128
12	0.087	0.087	0.087	0.0658	0.087	0.087	0.0825	0.087	0.087	0.087	0.087	-

ตารางที่ 5.83 ความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	0.089	0.0719	0.1215	0.0771	0.1062	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
2	0.0838	-	0.089	0.089	0.1148	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
3	0.1062	0.089	-	0.089	0.089	0.0856	0.0957	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
4	0.089	0.1287	0.089	-	0.0957	0.089	0.0632	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089
5	0.0719	0.089	0.0957	0.0771	-	0.089	0.1115	0.1095	0.089	0.089	0.089	0.089
6	0.089	0.089	0.089	0.1062	0.089	-	0.089	0.089	0.0923	0.089	0.089	0.089
7	0.089	0.089	0.1062	0.089	0.089	0.089	-	0.089	0.089	0.0752	0.1062	0.089
8	0.0923	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	-	0.089	0.1062	0.089	0.089
9	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.1062	0.089	-	0.089	0.0923	0.089
10	0.089	0.089	0.0856	0.089	0.089	0.0957	0.089	0.089	0.1062	-	0.089	0.1062
11	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.1062	-	0.0923
12	0.089	0.089	0.089	0.0719	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	-

5.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี PSONK

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสม ที่จะทำให้ผลการทดลองที่ได้เข้าใกล้คำตอบที่ดีมากที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ของวิธี PSONK มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวดังนี้

5.4.1 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนประชากรเบื้องต้น หมายถึง จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน จำนวนประชากรที่มากเกินไปอาจทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมาก แต่ถ้าจำนวนประชากรน้อยเกินไปคำตอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม การกำหนดจำนวนประชากรที่เหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จำนวนประชากรเบื้องต้นเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang and Katayama, 2008) ซึ่งในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคจะแบ่งประชากรเบื้องต้นออกเป็น 2 กลุ่ม คือ จำนวนฝูง (Number of Swarms) เป็นจำนวนของฝูงซึ่งเป็นกลุ่มของอนุภาคหรือกลุ่มของสตริงคำตอบ และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarm) เป็นจำนวนของอนุภาคในแต่ละฝูงหรือจำนวนสตริงคำตอบในแต่ละฝูง

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้จำนวนประชากรเท่ากับ 100 ดังนั้นจึงทำการพิจารณาเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลองได้ 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 จำนวนฝูงเท่ากับ 4 และจำนวนอนุภาคที่อยู่ในแต่ละฝูงเท่ากับ 25
- ระดับที่ 2 จำนวนฝูงเท่ากับ 5 และจำนวนอนุภาคที่อยู่ในแต่ละฝูงเท่ากับ 20
- ระดับที่ 3 จำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคที่อยู่ในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.4.2 น้ำหนักการหน่วง

น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight) เป็นค่าน้ำหนักที่ใช้ในการจดจำคำตอบจากประสบการณ์ที่ผ่านมา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เท่ากับ 1 (Liao et al.,2007 ; Tseng and Liao, 2008)

5.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor) เป็นค่าที่ใช้กำหนดน้ำหนักให้กับการจดจำคำตอบจากประสบการณ์ที่ผ่านมาของฝูง และประสบการณ์ที่ผ่านมาของอนุภาคทั้งหมด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการปรับปรุงตารางมีหน้าที่เหมือนค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้

5.4.4 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto Based Approach) เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting (Goldberg,1989)

5.4.5 วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกของประชากรคำตอบที่อยู่ในลำดับเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

5.4.6 ผลกระทบจากการเรียนรู้

ผลกระทบจาการเรียนรู้ (Learning Effect) เป็นทฤษฎีที่ตั้งสมมติฐานว่าการผลิตจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลง โดยได้นำเข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตเพื่อลดช่องว่างของการจัดตารางตามทฤษฎีและเวลาการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบ Sum-Processing Time Based Learning Effect (Kuo and Yang ,2006a,b,c) และกำหนดค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80% (Arditi et al., 2001)

5.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลองของวิธี PSONK จะทำการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ (Replication) เท่ากับ 2 ครั้ง ซึ่งมีรายละเอียดของปัญหาการทดลองทั้งหมด 5 ปัญหาดังตารางที่ 5.84

ตารางที่ 5.84 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาการทดลอง	รอบเวลาการทำงาน	จำนวนเจนเนอเรชัน
ปัญหา 12 ขั้นงาน	7	100
ปัญหา 65 ขั้นงาน	490	400
ปัญหา 148 ขั้นงาน	408	800
ปัญหา 205 ขั้นงาน	2454	800
ปัญหา 183 ขั้นงาน	22	400

พารามิเตอร์ที่ต้องทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม ดังตารางที่ 5.85

ตารางที่ 5.85 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ PSONK ที่จะทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	ระดับที่ 1 : จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25
	ระดับที่ 2 : จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20
	ระดับที่ 3 : จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10

จะได้การทดลองในวิธี PSONK ที่มีปัจจัย 1 ปัจจัย คือ ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมี 3 ระดับ และมีการทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีจำนวนทรีตเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองเท่ากับ 3x2 = 6 การทดลอง

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computation Time to Solution) เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยมีขั้นตอนในการวิคราะห์ผลเช่นเดียวกับขั้นตอนในบทที่ 3

5.6.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.18

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0829	0.0414	1.00	0.465
Error	3	0.1243	0.0414		
Total	5	0.2071			

S = 0.2035 R-Sq = 40.00% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 5.19

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

```
Source          DF         SS         MS  F  P
Swarm/Particle   2  0.0000000  0.0000000  *  *
Error            3  0.0000000  0.0000000
Total            5  0.0000000

S = 0   R-Sq = *%   R-Sq(adj) = *%

                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level  N      Mean     StDev  --+---------+---------+---------+-------
10/10  2  0.666667  0.000000  *
4/25   2  0.666667  0.000000  *
5/20   2  0.666667  0.000000  *
                                --+---------+---------+---------+-------
                                0.666680  0.666750  0.666820  0.666890
```

ภาพที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากกลุ่มคำตอบที่ได้จากระดับปัจจัยต่างๆ มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.20

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

```
Source          DF      SS      MS     F      P
Swarm/Particle   2  0.0833  0.0417  1.00  0.465
Error            3  0.1250  0.0417
Total            5  0.2083

S = 0.2041   R-Sq = 40.00%   R-Sq(adj) = 0.00%
```

ภาพที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่

แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 5.86

ตารางที่ 5.86 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	142	138	140
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	140	130	135
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	77	62	69.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี PSONK ดังตารางที่ 5.87

ตารางที่ 5.87 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี PSONK

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.6.2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.21

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0423	0.0211	1.60	0.336
Error	3	0.0396	0.0132		
Total	5	0.0818			

S = 0.1149 R-Sq = 51.65% R-Sq(adj) = 19.41%

ภาพที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 5.22

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.00294	0.00147	0.38	0.712
Error	3	0.01161	0.00387		
Total	5	0.01455			

S = 0.06221 R-Sq = 20.23% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.23

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0208	0.0104	0.17	0.854
Error	3	0.1875	0.0625		
Total	5	0.2083			

S = 0.25 R-Sq = 10.00% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 5.88

ตารางที่ 5.88 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	2005	2158	2081.5
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	1829	1723	1776
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	1799	1656	1727.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี PSONK ดังตารางที่ 5.89

ตารางที่ 5.89 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี PSONK

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.6.3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.24

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.501	0.251	0.74	0.548
Error	3	1.015	0.338		
Total	5	1.516			

S = 0.5817 R-Sq = 33.05% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 5.25

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.4961311	0.2480655	12721.39	0.000
Error	3	0.0000585	0.0000195		
Total	5	0.4961896			

S = 0.004416 R-Sq = 99.99% R-Sq(adj) = 99.98%

Level	N	Mean	StDev
10/10	2	0.00000	0.00000
4/25	2	0.61000	0.00765
5/20	2	0.00000	0.00000

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

```
-+---------+---------+---------+--------
 (*)
                                       *)
 (*)
-+---------+---------+---------+--------
0.00      0.16      0.32      0.48
```

ภาพที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่เนื่องจากมีปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองหลายระดับ และยังไม่สามารถระบุระดับปัจจัยว่าเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.26

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.333	0.167	1.00	0.465
Error	3	0.500	0.167		
Total	5	0.833			

S = 0.4082 R-Sq = 40.00% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 5.90

ตารางที่ 5.90 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	8798	9604	9201
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	10117	3355	6736
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	2036	8380	5208

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี PSONK ดังตารางที่ 5.91

ตารางที่ 5.91 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี PSONK

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.6.4 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.27

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.00387	0.00193	0.57	0.616
Error	3	0.01015	0.00338		
Total	5	0.01402			

S = 0.05817 R-Sq = 27.60% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 5.28

One-way ANOVA: Spread versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0229	0.0115	0.52	0.639
Error	3	0.0660	0.0220		
Total	5	0.0889			

S = 0.1483 R-Sq = 25.78% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.29

One-way ANOVA: Ratio versus Swarm/Particle

Source	DF	SS	MS	F	P
Swarm/Particle	2	0.0052	0.0026	0.10	0.908
Error	3	0.0781	0.0260		
Total	5	0.0833			

S = 0.1614 R-Sq = 6.25% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 5.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 5.92

ตารางที่ 5.92 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	จำนวนฝูงเท่ากับ 4 จำนวนอนุภาคเทากับ 25	12781	9632	11206.5
2	จำนวนฝูงเท่ากับ 5 จำนวนอนุภาคเทากับ 20	12057	10302	11179.5
3	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคเทากับ 10	5338	11846	8592

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10 ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี PSONK ดังตารางที่ 5.93

ตารางที่ 5.93 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี PSONK

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.6.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 5.30

One-way ANOVA: Convergence versus Swarm/Particle

```
Source          DF      SS      MS      F      P
Swarm/Particle   2  0.6768  0.3384  16.65  0.024
Error            3  0.0610  0.0203
Total            5  0.7378

S = 0.1426   R-Sq = 91.74%   R-Sq(adj) = 86.23%

                          Individual 95% CIs For Mean Based on
                          Pooled StDev
Level  N    Mean   StDev  ---------+---------+---------+---------+
10/10  2  0.3685  0.0439  (-------*-------)
4/25   2  1.1596  0.0096                    (-------*-------)
5/20   2  0.9595  0.2428                (-------*-------)
                          ---------+---------+---------+---------+
                                 0.40      0.80      1.20      1.60

Pooled StDev = 0.1426
```

ภาพที่ 5.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่ระดับปัจจัยจำนวนฝูงเท่ากับ 10 และจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10 จึงกำหนดระดับของปัจจัยนี้เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี PSONK ดังตารางที่ 5.94

ตารางที่ 5.94 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี PSONK

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูง	จำนวนฝูงเท่ากับ 10 จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงเท่ากับ 10

5.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge; PSONK) ซึ่งได้

พัฒนามาจากวิธี PSO ร่วมกับความรู้เชิงลบ เป็นวิธีการหาคำตอบแบบฮิวริสติกที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการบินหาอาหารของฝูงนกเช่นเดียวกับวิธี PSO แต่การไปในจุดหมายและทิศทางต่างๆ และทำการจดจำคำตอบที่ได้พบทั้งตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดของแต่ละฝูง รวมถึงการหาตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดของประชากร ซึ่งเรียกตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution; Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่แย่ที่สุดของแต่ละฝูงเรียกว่า ค่าที่ไม่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Worst Solution; Lworst) รวมถึงตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution; Gbest) และตำแหน่งของคำตอบที่แย่ที่สุดของประชากรจะเรียกว่า ค่าที่ไม่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Worst Solution; Gworst) ซึ่งเปรียบได้กับการปรับปรุงคำตอบของปัญหาด้วยการจดจำคำตอบที่ดีเพื่อจะได้เดินทางไปในทิศทางที่ดี และจดจำคำตอบที่แย่เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเดินทางไปในทิศทางนั้น โดยหวังว่าจะได้คำตอบที่ดีขึ้น จึงนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งคำตอบที่ได้สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน ในบทนี้ได้มีการกำหนดและทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคคือ จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง ซึ่งมีพื้นฐานมาจากจำนวนประชากรเบื้องต้นที่ใช้ในอัลกอริทึมอื่นๆ เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยจากผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในแต่ละฝูงของปัญหาทั้งหมด 5 ปัญหาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.95

ตารางที่ 5.95 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาในวิธี PSONK

ปัจจัย	ขนาดปัญหา				
	12 ขั้นงาน	65 ขั้นงาน	148 ขั้นงาน	205 ขั้นงาน	183 ขั้นงาน
จำนวนฝูง	10	10	10	10	10
จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง	10	10	10	10	10

บทที่ 6

ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization; BBO) ขั้นตอนการทำงานและการนำวิธี BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ และตัวอย่างการคำนวณ รวมถึงการทดสอบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO ของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยที่แตกต่างกัน 5 ปัญหา

6.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization : BBO)

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biography Base Optimization; BBO) เป็นวิธีการหาคำตอบแบบใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Dan Simon (2008) ที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบการอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่อยู่อาศัย ซึ่งการอพยพการย้ายถิ่นฐานของสปีชี่ส์จากเกาะหนึ่งไปยังอีกเกาะหนึ่งจะทำให้เกิดสปีชี่ส์ใหม่ขึ้นหรืออาจทำให้สปีชี่ส์นั้นสูญพันธ์ได้ ซึ่งเปรียบได้กับการปรับปรุงคำตอบของปัญหาด้วยการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบที่ดีให้แก่กัน เพื่อให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้น

แนวคิดการอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่ 4 ตัว ได้แก่

1) Habitat Suitability Index (HSI) คือ ดัชนีความเหมาะสมของการอยู่อาศัย เป็นค่าที่บอกความเหมาะสมหรือความอุดมสมบูรณ์ของเกาะ เปรียบได้กับค่า Fitness ที่ใช้วัดว่าคำตอบของประชากรเป็นคำตอบที่ดีหรือคำตอบที่แย่ โดยดูจากจำนวนของสิ่งมีชีวิต หรือสปีชี่ส์เคาท์ (Species Count) เกาะใดที่มีความเหมาะสมมากหรือมีค่า HSI มากก็จะมีค่าสปีชี่ส์เคาท์มาก และในทางตรงกันข้ามเกาะใดมีค่า HSI น้อยก็จะมีค่าค่าสปีชี่ส์เคาท์น้อย แสดงว่าสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่แย่

2) Suitability Index Variable (SIV) คือ ตัวแปรดัชนีความเหมาะสม เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เช่น ปริมาณน้ำฝน ขนาดพื้นที่อยู่อาศัย และอุณหภูมิ เป็นต้น เป็นค่าลักษณะ (Feature) ของคำตอบแต่ละตัวของประชากรในเกาะ เปรียบเทียบได้กับยีน (Gene) หรือบิท (Bit) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสตริงคำตอบในเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms; GAs)

3) Immigration Rate คือ อัตราการอพยพเข้าของสิ่งมีชีวิตมายังเกาะ เกาะที่มีค่า HSI สูงหรือมีความเหมาะสมมากจะมีจำนวนสิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์เคาท์อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้โอกาสที่สิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์จากเกาะอื่นจะอพยพย้ายเข้ามายังเกาะนี้ต่ำเนื่องจากเหลือพื้นที่รองรับสปีชี่ส์ใหม่ที่จะอพยพเข้ามาน้อย ตรงกันข้ามกับเกาะที่มีค่า HSI ต่ำจะมีโอกาสในการอพยพเข้าสูงเนื่องจากมีพื้นที่มากเพื่อให้สิ่งมีชีวิตอื่นเข้าอาศัยได้

4) Emigration Rate คือ อัตราการอพยพออกของสิ่งมีชีวิตในเกาะ เกาะที่มีค่า HSI สูงหรือมีความเหมาะสมมากอัตราการอพยพออกจะสูงเนื่องจากสิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์ต้องการหาเกาะใหม่ที่มีพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความแออัด ตรงกันข้ามกับเกาะที่มีค่า HSI ต่ำจะมีโอกาสในการอพยพออกต่ำเนื่องจากต้องการอยู่ในที่ที่ไม่แออัด

วิธี BBO ถูกนำมาประยุกต์ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุด โดยจะทำการเปรียบเทียบสตริงคำตอบกับเกาะ ความเหมาะสมหรือความอุดมสมบูรณ์ของเกาะเรียกว่าดัชนีความเหมาะสมของการอยู่อาศัย (Habitat Suitability Index; HSI) เปรียบได้กับค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ (Fitness) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า HSI เรียกว่าตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variable; SIV) เช่น อุณหภูมิ พื้นที่อยู่อาศัย ซึ่งเปรียบได้กับลักษณะเฉพาะของสตริงคำตอบหรือยีนในวิธีเจนเนติกนั่นเอง สตริงคำตอบใดที่มีค่า HSI สูงแสดงว่ามีค่าสปีชี่ส์เคาท์ (Species Count) มากและเป็นสตริงคำตอบที่ดี สตริงคำตอบที่มีค่า HSI ต่ำก็จะมีสปีชี่ส์เคาท์อยู่น้อยและเป็นสตริงคำตอบที่แย่ หลังจากประเมินค่าสตริงคำตอบแล้วจะมีการปรับปรุงสตริงคำตอบให้ดีขึ้นและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงสตริงคำตอบนี้คือการอพยพ (Migration) และการมิวเตชัน (Mutation)

การอพยพเป็นกระบวนการปรับปรุงสตริงคำตอบโดยการแบ่งปันคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ โดยการอพยพจะพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) ที่ได้มาจากอัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate : λ) และอัตราการอพยพออก (Emigration Rate : μ) ของแต่ละสตริงคำตอบ โดยสตริงคำตอบที่ดีจะมีค่า P_λ ต่ำ และค่า P_μ สูงเนื่องจากสตริงคำตอบที่ดีมีโอกาสน้อยที่จะรับ

คุณลักษณะของสตริงคำตอบอื่น แต่จะมีโอกาสในการถ่ายทอดคุณลักษณะที่ดีให้แก่สตริงคำตอบอื่นมาก ส่วนสตริงคำตอบที่แย่จะมีค่า P_λ สูงและมีค่า P_μ ต่ำเนื่องจากสตริงคำตอบที่แย่มีโอกาสที่จะรับคุณลักษณะที่ดีจากสตริงคำตอบอื่นมาก แต่จะมีโอกาสในการถ่ายทอดคุณลักษณะที่แย่ให้แก่สตริงคำตอบอื่นน้อย การอพยพจะทำการพิจารณาในทีละบิทในทุกๆ สตริงคำตอบ โดยใช้ค่า P_λ ตัดสินใจว่าจะทำการอพยพเข้าหรือไม่ ถ้าตัดสินใจที่จะทำการอพยพเข้า (รับคุณลักษณะ) ก็จะทำการเลือกสตริงที่จะทำการอพยพออกด้วยค่า P_μ โดยใช้วงล้อรูเล็ตที่สร้างขึ้นจากค่า P_μ จากนั้นก็จะทำการแบ่งปันคุณลักษณะให้แก่กันในบิทที่กำลังพิจารณานั้น (Ma, 2010)

การมิวเตชันเป็นกระบวนการที่จะทำการเปลี่ยนแปลงส่วนของสตริงคำตอบ เพื่อทำให้คุณลักษณะของสตริงคำตอบนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีความหลากหลายมากขึ้น โดยหวังว่าการมิวเตชันจะช่วยให้คำตอบที่แย่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้นและคำตอบที่ดีอยู่แล้วดีขึ้นกว่าเดิม (Simon, 2008)

6.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ขั้นตอนการทำงานของ BBO ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. Data input : รับข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน และด้านที่สามารถทำงานได้ของแต่ละขั้นงาน

2. Representation & Initialization : นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้น (Y) โดยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรคำตอบเริ่มต้น N ตัว ด้วยกระบวนการใส่รหัสคำตอบ (Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น Pt (Initial Population) และทำการคัดลอกสตริงคำตอบเริ่มต้นลงในสตริงคำตอบชั่วคราว (Z)

3. Evaluation : คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ

4. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้แต่ละประชากรคำตอบโดยใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) ค่าอันดับที่ได้นี้เรียกว่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) กลุ่มที่ดีที่สุดจะถูกจัดอันดับไว้ต่ำที่สุด และทำการแปลงเป็นค่าสปีชี่ส์เคาท์ให้แต่ละสตริงคำตอบ

5. Migration Rate : กำหนดรูปแบบการอพยพ (Migration Model) และคำนวณหาอัตราการอพยพเข้า ($\boldsymbol{\lambda}$) และอัตราการอพยพออก (μ) ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ (P_K)

6. Migration : การอพยพจะทำการพิจารณาทีละบิทในทุกๆ สตริงคำตอบ เริ่มจากสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์มากที่สุดไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์น้อยที่สุด โดยใช้ค่า P_λ ตัดสินใจว่าจะทำการอพยพเข้า (รับคุณลักษณะ) หรือไม่ ถ้าตัดสินใจที่จะทำการอพยพเข้าก็จะทำการเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยโดยใช้วงล้อรูเล็ตค่า P_μ จากนั้นก็จะทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่ถูกเลือก และให้ทำซ้ำทุกบิทของทุกๆ สตริงคำตอบ

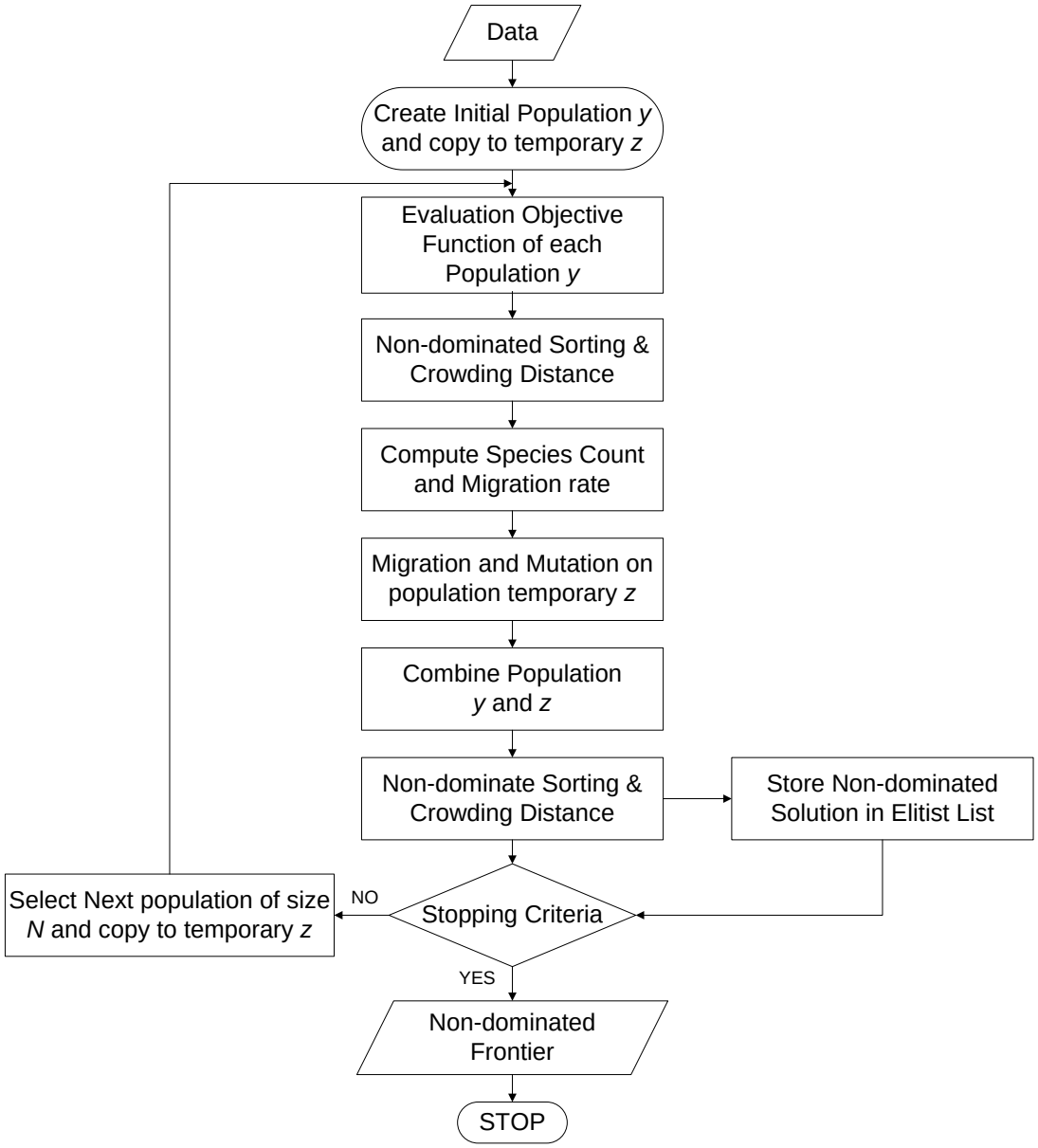
7. Mutation : สตริงคำตอบ Z หลังจากผ่านกระบวนการอพยพแล้วบางส่วนจะถูกเลือกโดยใช้วงล้อรูเล็ตของค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ k $(P_{K,k})$ ไปเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน จากนั้นจึงใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) เป็นตัวกำหนดจำนวนบิทที่จะถูกมิวเตชัน

8. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : ทำการเก็บประชากรที่ดีที่สุดที่ได้จากการรวมกันระหว่างสตริงคำตอบเริ่มต้นกับสตริงคำตอบที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว (ผ่านกระบวนการอพยพและการมิวเตชัน) โดยอาศัยหลักการ Non-dominated Sorting และ Crowding Distance (Dep et al., 2002) ไว้เพื่อจะนำไปทำการปรับปรุง (Update) ในทุกๆเจนเนอเรชัน โดยจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากเจนเนอเรชันก่อนหน้าด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ได้ไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของรอบก่อนหน้าในการดำเนินการรอบถัดไป

9. Selection Next Population : นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 8 เท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น N ตัวเพื่อนำไปใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป (ถ้าประชากรมีค่าอันดับที่เท่ากันจะคัดเลือกคำตอบโดยพิจารณาค่า Crowding Distance ที่มีค่ามากก่อน)

10. Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันน้อยกว่าจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 9 ใหม่ ถ้าไม่ใช่ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

11. Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบและนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO

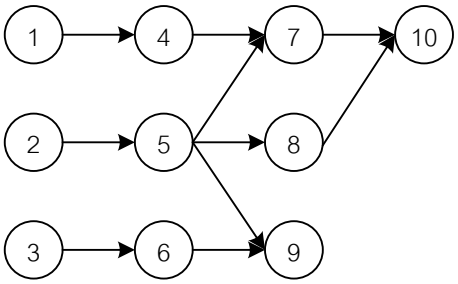
6.3 ตัวอย่างการนำวิธี BBO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

จากขั้นตอนของ BBO ที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของปัญหา Kim et al., (2000) ที่ประกอบด้วย 12 ขั้นงานและมี 2 ชนิดผลิตภัณฑ์ คือ A และ B เมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 ดังนี้

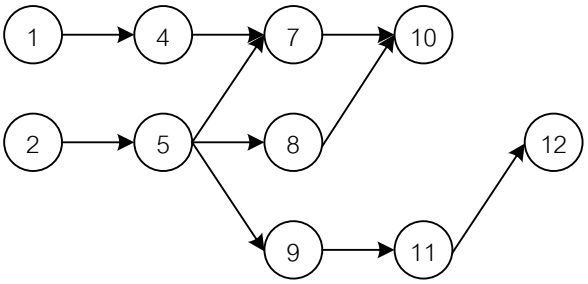
6.3.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

6.3.1.1 สร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram)

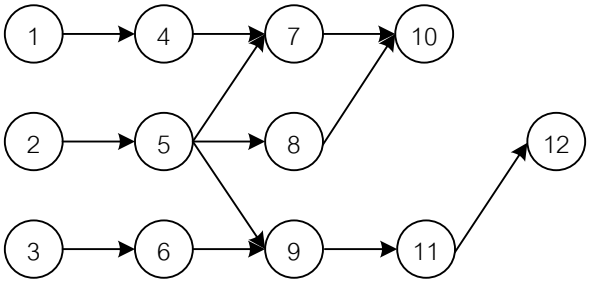
แสดงดังภาพที่ 6.2



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A และ B

ภาพที่ 6.2 แสดงการสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)

6.3.1.2 **เวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน** แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Side	Model		
		A	B	Mean
1	L	2	3	2.5
2	R	3	3	3
3	E	2	0	1
4	L	3	2	2.5
5	E	1	2	1.5
6	L	1	0	0.5
7	E	3	2	2.5
8	R	3	1	2
9	E	2	1	1.5
10	E	2	3	2.5
11	E	0	2	1
12	R	0	1	0.5

6.3.1.3 **สร้าง** Precedence Matrix **จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม** ได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์

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

6.3.1.4 พารามิเตอร์ที่เลือกใช้ของ BBO

- จำนวนประชากรเบื้องต้น (N) 5 ตัว
- รูปแบบการอพยพใช้แบบ Linear
- วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.01 ($P_m = 0.01$)
- ผลกระทบจากการเรียนรู้เป็นแบบ Sum of Processing Time Based Learning Effect
- ผลกระทบที่เกิดจากการเรียนรู้ เท่ากับ 80%

6.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นของวิธี BBO จะเหมือนกับวิธีการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยเริ่มจากการสุ่มสตริงคำตอบโดยการกำหนดค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) เท่ากับจำนวนประชากรเบื้องต้น (Popsize = 5) จากนั้นสุ่มตำแหน่งมา 2 ตำแหน่งเพื่อทำการสลับค่า โดยจำนวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนขั้นงานทั้งหมด หรือเท่ากับ m/2 = 12/2 =6 ครั้ง เมื่อ m คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด จะได้สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกขั้นงาน 5 สตริงคำตอบ ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
2	[1 6 3 9 5 8 10 4 2 7 12 11]
3	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]
4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
5	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]

6.3.3 การถอดรหัสคำตอบ

จากสตริงคำตอบเบื้องต้น 5 ตัวนี้ จะต้องนำไปแปลงสตริงคำตอบจากค่าสิทธิในการเลือกงาน (String Priority) ไปเป็นลำดับขั้นงาน (Task Sequence) ก่อนจะนำไปจัดลงสถานีงาน โดยขั้นตอนการแปลงสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับขั้นงานมีวิธีเช่นเดียวกับวิธีใน

บทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว เมื่อทำการแปลงสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว จะได้ลำดับขั้นงาน 5 ตัว ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
2	[2 5 8 3 6 9 11 12 1 4 7 10]
3	[1 4 3 6 2 5 8 9 11 12 7 10]
4	[1 4 3 6 2 5 7 9 11 12 8 10]
5	[3 1 6 4 2 5 9 7 11 12 8 10]

จากลำดับขั้นงานทั้ง 5 ตัวข้างบนจะทำการจัดลงสถานีงานเพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยมีรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 โดยมีวิธีการจัดสรรงานลงสถานีงานและการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว จากลำดับงานทั้ง 5 ตัวนี้สามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 6.5 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวได้ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.5 สถานีงานของสตริงคำตอบ

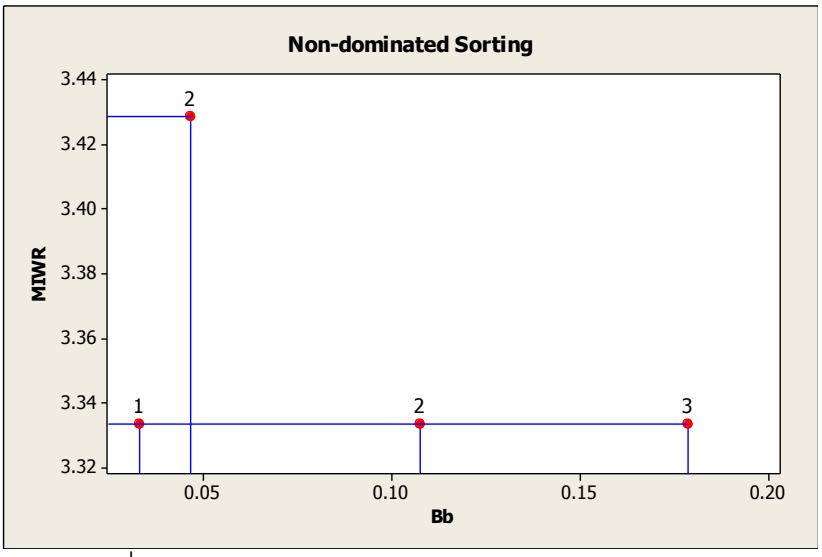
สตริงคำตอบที่	Workstation
1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 4 4 4]
2	[2 2 2 1 1 1 1 2 3 3 4 5]
3	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 3 3]
4	[1 1 2 1 2 2 3 2 2 2 4 4]
5	[1 1 1 1 2 2 2 3 2 2 4 4]

ตารางที่ 6.6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.0332
2	3	5	4.1667	0.0209
3	2	4	3.3333	0.1786
4	2	4	3.3333	0.1076
5	2	4	3.4286	0.0468

6.3.4 การประเมินค่า

การประเมินค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบจะใช้การจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting โดยค่าอันดับนี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) โดยพิจารณาเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ที่ดีที่สุดมาจัดอันดับ (เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็นวัตถุประสงค์หลัก) โดยทำการกรองและเลือกสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด แล้วจึงนำสตริงคำตอบที่เลือกมานี้มาพิจารณาการค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 เพื่อจัดอันดับค่าความแข็งแรงโดยวิธี Non-dominated Sorting ในตัวอย่างนี้เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่ 1, 3, 4 และ 5 เป็นสตริงที่ดีที่สุด เนื่องจากมีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ ประกอบด้วย 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 สถานีงาน เมื่อนำมาจัดอันดับค่าความแข็งแรง จะได้ดังภาพที่ 6.3 และคำนวณค่า Dummy Fitness ได้ดังตารางที่ 6.7



ภาพที่ 6.3 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 6.7 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness
1	3.3333	0.0332	1
3	3.3333	0.1786	3
4	3.3333	0.1076	2
5	3.4286	0.0468	2

คำนวณหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance โดยพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 โดยจะทำการพิจารณาทีละ Front ซึ่งจะทำการพิจารณา Front ที่ 1 ก่อน แล้วจึงทำการพิจารณา Front ถัดๆ ไป โดยมีวิธีการคำนวณหาค่า Crowding Distance เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบมีค่าดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.3333	0.0332	1	infinity
3	3.3333	0.1786	3	infinity
4	3.3333	0.1076	2	infinity
5	3.4286	0.0468	2	infinity

การกำหนดค่าสปีซีส์เคาท์ เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีซี่ส์เคาท์โดยการพิจารณาค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด (เท่ากับ 1) ค่าสปีซีส์เคาท์จะมีค่าสูงที่สุดแล้วเรียงลำดับไปจนถึงค่าความแข็งแรงที่น้อยที่สุดค่าสปีซี่ส์เคาท์จะมีค่าต่ำที่สุด ดังตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 ค่า Species Count ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
1	3.3333	0.0332	1	infinity	3
3	3.3333	0.1786	3	infinity	1
4	3.3333	0.1076	2	infinity	2
5	3.4286	0.0468	2	infinity	2

6.3.5 การหาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์

รูปแบบของการอพยพแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การอพยพเชิงเส้นตรงและไม่เป็นเชิงเส้นตรง รูปแบบการอพยพแต่ละแบบจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ BBO (Ma, 2010) ซึ่งการอพยพจะมี 2 ส่วน คือ การอพยพเข้า (immigration : λ) และการอพยพออก (Emigration : μ) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบของการอพยพ 2 กลุ่มนี้ โดยกลุ่มของการอพยพเชิงเส้นตรงจะทำการศึกษาการอพยพแบบ Linear และกลุ่มของการอพยพไม่เป็นเชิงเส้นตรงจะทำการศึกษาการอพยพแบบ Sinusoidal ซึ่งทั้งสองรูปแบบจะมีอัตราการอพยพและค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์แตกต่างกันดังนี้

6.3.5.1 การอพยพแบบ Linear

ค่า Immigration Rate (λ_k) มีสมการดังนี้

$$\lambda_k = I\left(1-\frac{k}{n}\right); n = K+1 \tag{6.1}$$

ค่า Emigration Rate (μ_k) มีสมการดังนี้

$$\mu_k = E\left(\frac{k}{n}\right); n = K+1 \tag{6.2}$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k $(P_{K,k})$ มีสมการดังนี้

$$P_{K,k} = \frac{\left(\frac{I}{E}\right)^k\left(\frac{n!}{k!(n-k)!}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{I}{E}\right)^i\left(\frac{n!}{i!(n-i)!}\right)} \tag{6.3}$$

เมื่อ λ_k คือ อัตราการอพยพเข้าของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์ k

μ_k คือ อัตราการอพยพออกของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์ k

$P_{K,k}$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k

I คือ อัตราการอพยพเข้าสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

E คือ อัตราการอพยพออกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

K คือ ค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงสุด

ตัวอย่างการคำนวณค่า Immigration Rate (λ_k) ของสตริงคำตอบที่ 1 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

$$\lambda_k = I\left(1 - \frac{k}{n}\right); \quad n = K + 1$$
$$\lambda_k = 1\left(1 - \frac{3}{4}\right); \quad n = 3 + 1$$
$$\lambda_k = 0.25$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า Emigration Rate (μ_k) ของสตริงคำตอบที่ 1 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

$$\mu_k = E\left(\frac{k}{n}\right); \quad n = K + 1$$
$$\mu_k = 1\left(\frac{3}{4}\right); \quad n = 3 + 1$$
$$\mu_k = 0.75$$

ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k $(P_{K,k})$ ของสตริงคำตอบที่ 1 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

$$P_{K,k} = \frac{\left(\frac{I}{E}\right)^k \left(\frac{n!}{k!\,(n-k)!}\right)}{1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{I}{E}\right)^i \left(\frac{n!}{i!\,(n-i)!}\right)}$$
$$P_{K,k} = \frac{\left(\frac{1}{1}\right)^3 \left(\frac{4!}{3!\,(4-3)!}\right)}{1 + \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{1}\right)^i \left(\frac{4!}{i!\,(4-i)!}\right)}$$
$$P_{K,k} = \frac{4}{1 + (4 + 6 + 4 + 1)}$$
$$P_{K,k} = 0.25$$

เมื่อคำนวณค่า Immigration Rate และค่า Emigration Rate ทั้งหมดเรียบร้อยแล้วจะทำการแปลงค่าทั้ง 2 ค่านี้ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ตามสมการดังนี้

หาค่า λ_k รวม และค่า λ_k รวมของสตริงคำตอบทั้งหมด k ตัว ดังสมการ

$$F_\lambda = \sum_{k=1}^{K} \lambda_k \quad (6.4)$$

$$F_\mu = \sum_{k=1}^{K} \mu_k \quad (6.5)$$

เมื่อ λ_k คือ อัตราการอพยพเข้าของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์ k

μ_k คือ อัตราการอพยพออกของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์ k

หาค่าความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า (Probability of Immigration ; P_λ) และค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (Probability of Emigration ; P_μ) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว ตามสมการ

$$P_\lambda = \frac{\lambda_k}{F_\lambda} \quad \text{เมื่อ } k = 1,2,\dots,k \quad (6.6)$$

$$P_\mu = \frac{\mu_k}{F_\mu} \quad \text{เมื่อ } k = 1,2,\dots,k \quad (6.7)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าผลรวมของ λ_k ของสตริงคำตอบทั้งหมด (F_λ) เท่ากับ

$$F_\lambda = \sum_{k=1}^{K} \lambda_k$$
$$F_\lambda = (0.25 + 0.50 + 0.75)$$
$$F_\lambda = 1.50$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการอพยพเข้า (Probability of Immigration ; P_λ) ของสตริงคำตอบที่ 1 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

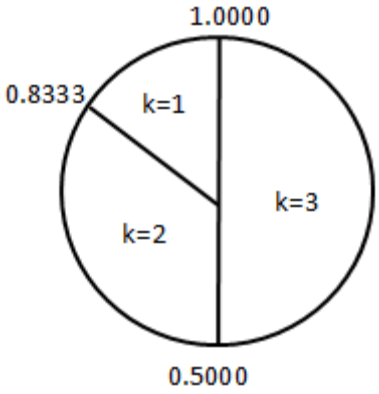
$$P_\lambda = \frac{\lambda_k}{F_\lambda}$$

$$P_\lambda = \frac{0.25}{1.5}$$
$$P_\lambda = 0.1667$$

คำนวณอัตราการอพยพและค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ของแต่ละสปีชี่ส์เคาท์จนครบทุกสปีชี่ส์เคาท์ ได้ผลดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]		ค่าความน่าจะเป็นสะสมในการอพยพออก	ความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่เคาท์ $P_{K,k}$
					P_λ	P_μ		
3	1	1	0.2500	0.7500	0.1667	0.5000	0.5000	0.2500
2	1	4	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.8333	0.3750
	2	5						
1	1	3	0.7500	0.2500	0.5000	0.1667	1.0000	0.2500



ภาพที่ 6.4 วงล้อรูเล็ตของค่า P_μ

6.3.5.2 การอพยพแบบ Sinusoidal

ค่า Immigration Rate (λ_k) มีสมการดังนี้

$$\lambda_k = \frac{I}{2}\left(cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right); n = K+1 \quad (6.8)$$

ค่า Emigration Rate (μ_k) มีสมการดังนี้

$$\mu_k = \frac{E}{2}\left(-cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right); n = K+1 \quad (6.9)$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k $(P_{K,k})$ มีสมการดังนี้

$$P_{K,k} = \frac{\prod_{j=1}^{k}\left(\frac{I}{E}\right)^k\left(\frac{sin^2\left(\frac{n+j+1}{2n}\pi\right)}{sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{i}\left(\frac{I}{E}\right)^i\left(\frac{sin^2\left(\frac{n+j+1}{2n}\pi\right)}{sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \quad (6.10)$$

เมื่อ λ_k คือ อัตราการอพยพเข้าของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์ k

μ_k คือ อัตราการอพยพออกของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์ k

$P_{K,k}$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k

I คือ อัตราการอพยพเข้าสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

E คือ อัตราการอพยพออกสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

K คือ ค่าสปีชี่ส์เคาท์สูงสุด

ตัวอย่างการคำนวณค่า Immigration Rate (λ_k) ของสตริงคำตอบที่ 1 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

$$\lambda_k = \frac{I}{2}\left(cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right); n = K+1$$
$$\lambda_k = \frac{1}{2}\left(cos\left(\frac{3\pi}{4}\right)+1\right) \;;\; n = 3+1$$
$$\lambda_k = 0.1464$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า Emigration Rate (μ_k) ของสตริงคำตอบที่ 1 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

$$\mu_k = \frac{E}{2}\left(-cos\left(\frac{k\pi}{n}\right)+1\right); n = K+1$$
$$\mu_k = \frac{1}{2}\left(-cos\left(\frac{3\pi}{4}\right)+1\right) \;;\; n = 3+1$$
$$\mu_k = 0.8536$$

ตัวอย่างการคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k $(P_{K,k})$ ของสตริงคำตอบที่ 2 และ 3 ที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

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

$$P_{K,k} = \frac{\prod_{j=1}^{k}\left(\frac{1}{1}\right)^{k}\left(\frac{sin^2\left(\frac{4+j+1}{2(4)}\pi\right)}{sin^2\left(\frac{j}{2(4)}\pi\right)}\right)}{1+\sum_{i=1}^{n}\prod_{j=1}^{i}\left(\frac{1}{1}\right)^{i}\left(\frac{sin^2\left(\frac{4+j+1}{2(4)}\pi\right)}{sin^2\left(\frac{j}{2(4)}\pi\right)}\right)}$$

$$P_{K,k} = 0.2500$$

ตารางที่ 6.11 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]		ค่าความน่าจะเป็นสะสมในการอพยพออก	ความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่เคาท์ $P_{K,k}$
					P_λ	P_μ		
3	1	1	0.1464	0.8536	0.0976	0.5690	0.5690	0.2500
2	1	4	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.9023	0.4268
	2	5						
1	1	3	0.8536	0.1464	0.5690	0.0976	1.0000	0.2500

จากการคำนวณการอพยพ 2 รูปแบบ คือ Linear และ Sinusoidal อัตราการอพยพเข้า อัตราการอพยพออก และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ ในแต่ละรูปแบบจะมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างในบทนี้จะใช้วิธีการอพยพแบบ Linear ในการแสดงขั้นตอนการทำงานของกระบวนการต่างๆ

6.3.6 การอพยพ

การอพยพเป็นการแบ่งปันคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงสตริงคำตอบ โดยพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) และค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว โดยสตริงคำตอบที่ดีจะมีค่า P_λ ต่ำ และมีค่า P_μ ที่สูงเนื่องจากสตริงคำตอบที่ดีมีโอกาสน้อยที่จะรับคุณลักษณะของสตริงคำตอบอื่น แต่จะมีโอกาสในการถ่ายทอดคุณลักษณะที่ดีให้แก่สตริงคำตอบอื่นมาก ส่วนสตริงคำตอบที่แย่จะมีค่า P_λ สูงและมีค่า P_μ ต่ำเนื่องจากสตริงคำตอบที่แย่มีโอกาสที่จะรับคุณลักษณะที่ดีจากสตริงคำตอบอื่นมาก แต่จะมีโอกาสในการถ่ายทอดคุณลักษณะที่แย่ให้แก่สตริงคำตอบอื่นน้อย การอพยพจะ

ทำการพิจารณาทีละบิทในทุกๆ สตริงคำตอบ โดยใช้ค่า P_λ ตัดสินใจว่าจะทำการอพยพเข้าหรือไม่ ถ้าตัดสินใจที่จะทำการอพยพเข้า (รับคุณลักษณะ) ก็จะทำการเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยค่า P_μ โดยใช้วงล้อรูเล็ตที่สร้างขึ้นจากค่า P_μ จากนั้นก็จะทำการแบ่งปันคุณลักษณะให้แก่กันในบิทที่กำลังพิจารณาอยู่ ซึ่งรายละเอียดของการอพยพในงานวิจัยนี้มีดังนี้

1) ทำการคัดลอกประชากรคำตอบเริ่มต้น (Y) ไปไว้ในประชากรคำตอบชั่วคราว (Z), y_k คือ ประชากรคำตอบเริ่มต้นในสปีชี่ส์เคาท์ k, y_{k,n_k} คือประชากรคำตอบเริ่มต้นในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k, z_k คือประชากรคำตอบชั่วคราวในสปีชี่ส์เคาท์ k, z_{k,n_k} คือประชากรคำตอบชั่วคราวในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k, เมื่อ $k = 1,2,\dots,K$ และ $n_k = 1,2,\dots,N_k$ ตัวอย่างเช่น

$y_{3,1}$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

$z_{3,1}$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

2) กำหนดเลขดัชนี (b) เมื่อ $b = 1,2,\dots,B$ ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด โดยกำหนดให้บิทซ้ายมือสุดของสตริงคำตอบมีเลขดัชนีเท่ากับ 1 และมีค่ามากขึ้นไปตามลำดับจนกระทั่งถึงบิทขวาสุดของสตริงคำตอบซึ่งจะมีเลขดัชนีสูงสุดเท่ากับ B ตัวอย่างการกำหนดค่าดัชนี ตัวอย่างเช่น

$z_{3,1}$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

$z_{3,1}(1) = 7, z_{3,1}(2) = 2, z_{3,1}(3) = 5, z_{3,1}(4) = 6, z_{3,1}(5) = 8, z_{3,1}(6) = 1,$
$z_{3,1}(7) = 11, z_{3,1}(8) = 3, z_{3,1}(9) = 9, z_{3,1}(10) = 10, z_{3,1}(11) = 4, z_{3,1}(12) = 12$

3) สร้างเลขสุ่ม (r) ให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k บิทที่ b $(z_{k,n_k}(b))$ ถ้าค่า $r < P_{\lambda,k}$ จะทำการอพยพค่าเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$ โดยทำตามวิธีในขั้นตอนถัดไป แต่ถ้าค่า $r \geq P_{\lambda,k}$ ให้ไปทำในขั้นตอนที่ 6 ตัวอย่างเช่น

ที่ตำแหน่ง $z_{3,1}(1) = 7$ มีค่า $P_{\lambda,3} = 0.1667$ สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.2378 เนื่องจากค่า $r \geq P_{\lambda,k}$ จะไม่ทำการอพยพและคงค่าไว้เหมือนเดิม

ที่ตำแหน่ง $z_{3,1}(2) = 2$ มีค่า $P_{\lambda,3} = 0.1667$ สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.4002 เนื่องจากค่า $r \geq P_{\lambda,k}$ จะไม่ทำการอพยพและคงค่าไว้เหมือนเดิม

:

:

ที่ตำแหน่ง $z_{3,1}(6) = 1$ มีค่า $P_{\lambda,3} = 0.1667$ สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.0559 เนื่องจากค่า $r < P_{\lambda,k}$ แสดงว่าจะทำการอพยพเข้าตามวิธีในขั้นตอนถัดไป เป็นต้น

4) เมื่อได้ตำแหน่ง $z_{k,n_k}(b)$ ที่จะทำการอพยพออกแล้ว เราจะพิจารณาการอพยพเข้าโดยเริ่มจากการสุ่มค่าที่ P_μ ซึ่งมีค่าระหว่าง [0,1] แล้วดูว่าค่าที่สุ่มได้นี้ตกอยู่ในช่วงของค่าความน่าจะเป็นการอพยพออก (P_μ) ของสปีชี่ส์เคาท์ใด ถ้าสปีชี่ส์เคาท์ที่สุ่มได้มีสมาชิกสตริงคำตอบเพียง 1 ตัว ให้นำค่า $y_{k,n_k}(b)$ (สตริงคำตอบอพยพออกในสปีชี่ส์เคาท์ k ตัวที่ n_k เมื่อ $k = 1,2,\dots,K$ และ $n_k = \{1,2,\dots,N_k\}$) อพยพเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$ แต่ถ้าในสปีชี่ส์เคาท์ที่สุ่มได้มีจำนวนสมาชิกมากกว่า 1 ตัว ให้ทำการสุ่มสตริงคำตอบมา 1 สตริง จากนั้นจึงนำค่า $y_{k,n_k}(b)$ อพยพเข้าสู่ $z_{k,n_k}(b)$ โดยมีตัวอย่างการอพยพดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 : ที่ตำแหน่ง $z_{3,1}(6) = 1$ สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.0559 ซึ่งค่า $r < P_{\lambda,3}$ จะทำการอพยพเข้า ดังนั้นจะใช้วงล้อรูเล็ตในการสุ่มค่า P_μ ซึ่งมีค่าระหว่าง [0,1] ขึ้นมาเพื่อเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่จะทำการอพยพเข้า สมมติสุ่มค่า $P_\mu = 0.2130$ ซึ่งไปตกอยู่ในสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3 ซึ่งมีสมาชิกเพียง 1 ตัวคือสตริงคำตอบที่ 1 (ซึ่งเป็นสตริงคำตอบเดียวกันกับสตริงที่ทำการอพยพออก) ดังนั้นจึงเหลือสตริงคำตอบที่พิจารณาการอพยพเข้าเพียงสตริงคำตอบเดียวคือสตริงคำตอบที่ 1 จึงนำสตริงคำตอบที่ 1 ตรงตำแหน่งที่ $y_{3,1}(6)$ ไปแทนที่ในตำแหน่ง $z_{3,1}(6)$

$y_{3,1}(6)$ = [7 2 5 6 8 **1** 11 3 9 10 4 12]

$z_{3,1}(6)$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

เมื่อทำการอพยพแล้วจะได้เป็น

$z_{3,1}(6)$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

ตัวอย่างที่ 2 : ที่ตำแหน่ง $z_{3,1}(6) = 1$ สมมติสุ่มค่า r ได้ 0.0559 ซึ่งค่า $r < P_{\lambda,3}$ จะทำการอพยพเข้า ดังนั้นจะใช้วงล้อรูเล็ตในการสุ่มค่า P_μ ซึ่งมีค่าระหว่าง [0,1] ขึ้นมาเพื่อเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่จะทำการอพยพเข้า สมมติสุ่มค่า $P_\mu = 0.9302$ ซึ่งไปตกอยู่ในสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 1 ซึ่งมีสมาชิกเพียง 1 ตัวคือสตริงคำตอบที่ 3 ดังนั้นจึงนำสตริงคำตอบที่ 3 ตรงตำแหน่งที่ $y_{1,1}(6)$ ไปแทนที่ในตำแหน่ง $z_{3,1}(6)$

$y_{1,1}(6)$ = [7 2 3 4 5 **6** 1 9 8 10 11 12]

$z_{3,1}(6)$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

เมื่อทำการอพยพแล้วจะได้เป็น

$z_{3,1}(6)$ = [7 2 5 6 8 6 11 3 9 10 4 12]

5) ทำการซ่อมแซมคำตอบ โดยนำค่า $y_{k,n_k}(b)$ ไปแทนที่ในบิทของสตริงคำตอบ z_{k,n_k} ที่มีค่าเท่ากับ $y_{k,n_k}(b)$ ตัวอย่างเช่น

$z_{3,1}$ = [7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]-->เริ่มต้น

$z_{3,1}$ = [7 2 5 6 8 6 11 3 9 10 4 12]-->ปรับปรุง

เมื่อทำการซ่อมแซมคำตอบแล้วจะได้เป็น

$z_{3,1}$ = [7 2 5 1 8 6 11 3 9 10 4 12]-->ซ่อมแซม

6) ถ้า $b < B$ ให้กลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $b = B$ ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

7) ถ้า $n_k < N_k$ ให้กลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $n_k = N_k$ ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

8) ถ้า $k > 1$ ให้กลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 แต่ถ้า $k = 1$ ให้หยุดกระบวนการอพยพ

ตารางที่ 6.12 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวก่อนกระบวนการอพยพ

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
2	[1 6 3 9 5 8 10 4 2 7 12 11]
3	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]
4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
5	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]

ในตัวอย่างนี้ใช้การอพยพแบบ Linear สตริงคำตอบที่มีค่าสปีซี่ส์เคาท์สูงสุดจะได้รับการพิจารณาก่อน ทำตามขั้นตอนการอพยพข้างต้น โดยใช้ค่า P_λ P_μ และ $P_{\lambda,k}$ ของการอพยพแบบ Linear ในการพิจารณาเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้า อพยพออก จากนั้นจึงทำการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ ดังแสดงในตารางที่ 6.13 – 6.18

ตารางที่ 6.13 การอพยพเข้าและอพยพออกของสปีชี่ส์เคาท์ 3

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
1	1	0.9149					
	2	0.4566					
	3	0.9047					
	4	0.2919					
	5	0.7822					
	6	0.0559	adjusted	3	{1}	{1}	1
	7	0.7765					
	8	0.6968					
	9	0.9079					
	10	0.6089					
	11	0.5446					
	12	0.7531					

ตารางที่ 6.14 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	6	1	1	เริ่มต้น	7	2	5	6	8	1	11	3	9	10	4	12
				ปรับปรุง	7	2	5	6	8	1	11	3	9	10	4	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	6	8	1	11	3	9	10	4	12

ตารางที่ 6.15 การอพยพเข้าและอพยพออกของสปีชี่ส์เคาท์ 2

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
4	1	0.8558					
	2	0.6832					
	3	0.4076					
	4	0.0479	adjusted	3	{1}	{1}	6
	5	0.0140	adjusted	3	{1}	{1}	8
	6	0.9071					
	7	0.3036	adjusted	1	{3}	{3}	1
	8	0.1472	adjusted	3	{1}	{1}	3
	9	0.4182					
	10	0.2102	adjusted	2	{4,5}	{4}	10
	11	0.2975	adjusted	3	{1}	{1}	4
	12	0.7241					
5	1	0.9568					
	2	0.9015					
	3	0.7006					
	4	0.8135					
	5	0.8664					
	6	0.8882					
	7	0.2305	adjusted	2	{4,5}	{4}	8
	8	0.7828					
	9	0.7158					
	10	0.2446	adjusted	2	{4,5}	{5}	10
	11	0.9715					
	12	0.1429	adjusted	1	{3}	{3}	12

ตารางที่ 6.16 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
4	4	6	7	เริ่มต้น	4	2	3	7	9	6	8	1	5	10	11	12
				ปรับปรุง	4	2	3	6	9	6	8	1	5	10	11	12
				ซ่อมแซม	4	2	3	6	9	7	8	1	5	10	11	12
	5	8	9	เริ่มต้น	4	2	3	6	9	7	8	1	5	10	11	12
				ปรับปรุง	4	2	3	6	8	7	8	1	5	10	11	12
				ซ่อมแซม	4	2	3	6	8	7	9	1	5	10	11	12
	7	1	9	เริ่มต้น	4	2	3	6	8	7	9	1	5	10	11	12
				ปรับปรุง	4	2	3	6	8	7	1	1	5	10	11	12
				ซ่อมแซม	4	2	3	6	8	7	1	9	5	10	11	12
	8	3	9	เริ่มต้น	4	2	3	6	8	7	1	9	5	10	11	12
				ปรับปรุง	4	2	3	6	8	7	1	3	5	10	11	12
				ซ่อมแซม	4	2	9	6	8	7	1	3	5	10	11	12
	10	10	10	เริ่มต้น	4	2	9	6	8	7	1	3	5	10	11	12
				ปรับปรุง	4	2	9	6	8	7	1	3	5	10	11	12
				ซ่อมแซม	4	2	9	6	8	7	1	3	5	10	11	12
	11	4	11	เริ่มต้น	4	2	9	6	8	7	1	3	5	10	11	12
				ปรับปรุง	4	2	9	6	8	7	1	3	5	10	4	12
				ซ่อมแซม	11	2	9	6	8	7	1	3	5	10	4	12
5	7	8	8	เริ่มต้น	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
				ปรับปรุง	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
				ซ่อมแซม	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
	10	10	10	เริ่มต้น	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
				ปรับปรุง	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
				ซ่อมแซม	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
	12	12	12	เริ่มต้น	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
				ปรับปรุง	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12
				ซ่อมแซม	7	3	11	4	5	6	8	1	9	10	2	12

ตารางที่ 6.17 การอพยพเข้าและอพยพออกของสปีชี่ส์เคาท์ 1

Immigration				Emigration			
สตริงคำตอบ	บิท	เลขสุ่ม r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือกสปีชี่ส์เคาท์ด้วย P_{μ}	สตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k	สตริงคำตอบที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
5	1	0.7621					
	2	0.7603					
	3	0.4594	adjusted	3	{1}	{1}	5
	4	0.1074	adjusted	3	{1}	{1}	6
	5	0.1472	adjusted	3	{1}	{1}	8
	6	0.3804	adjusted	1	{3}	{3}	6
	7	0.1935	adjusted	2	{4,5}	{5}	8
	8	0.0317	adjusted	2	{4,5}	{4}	1
	9	0.5906					
	10	0.2964	adjusted	2	{4,5}	{5}	10
	11	0.8152					
	12	0.5551					

ตารางที่ 6.18 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
3	3	5	3	เริ่มต้น	7	2	3	4	5	6	1	9	8	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	4	5	6	1	9	8	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	4	3	6	1	9	8	10	11	12
	4	6	4	เริ่มต้น	7	2	5	4	3	6	1	9	8	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	6	3	6	1	9	8	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	6	3	4	1	9	8	10	11	12
	5	8	3	เริ่มต้น	7	2	5	6	3	4	1	9	8	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	6	8	4	1	9	8	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	6	8	4	1	9	3	10	11	12
	6	6	4	เริ่มต้น	7	2	5	6	8	4	1	9	3	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	6	8	6	1	9	3	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	4	8	6	1	9	3	10	11	12
	7	8	1	เริ่มต้น	7	2	5	4	8	6	1	9	3	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	4	8	6	8	9	3	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	4	1	6	8	9	3	10	11	12
	8	1	9	เริ่มต้น	7	2	5	4	1	6	8	9	3	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	4	1	6	8	1	3	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	4	9	6	8	1	3	10	11	12
	10	10	10	เริ่มต้น	7	2	5	4	9	6	8	1	3	10	11	12
				ปรับปรุง	7	2	5	4	9	6	8	1	3	10	11	12
				ซ่อมแซม	7	2	5	4	9	6	8	1	3	10	11	12

เมื่อทำการอพยพจนครบทุกสปีชี่ส์เคาท์แล้ว จะได้สตริงคำตอบหลังผ่านกระบวนการอพยพดังตารางที่ 6.19

ตารางที่ 6.19 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการการอพยพ

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
3	[7 2 5 4 9 6 8 1 3 10 11 12]
4	[11 2 9 6 8 7 1 3 5 10 4 12]
5	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]

6.3.7 การมิวเตชัน

การมิวเตชันเป็นการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในของสตริงคำตอบเพื่อให้สตริงคำตอบที่ผ่านการอพยพมาแล้วให้มีความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1) สร้างวงล้อรูเล็ต (q_{k}) ให้กับทุกสปีชี่ส์เคาท์ด้วยค่า $m(k)$ ตามสมการ (6.11) จากนั้นทำการสุ่มค่า r ที่มีค่าระหว่าง 0 และ 1 มาเพื่อเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่มีค่า $q_{k-1} \leq r < q_k\,;\ q_0 = 0$ ที่จะเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน

$$m(k) = \frac{1-P_{K,k}}{\sum_{k=1}^{K}(1-P_{K,k})} \tag{6.11}$$

เมื่อ $m(k)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเลือกสปีชีส์เคาท์ k

$P_{K,k}$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k

ตัวอย่างการคำนวณค่า $m(k)$ ของสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากับ 3

$$m(k) = \frac{1-0.2500}{\sum_{k=1}^{K}(1-P_{K,k})}$$

$$m(k) = \frac{1-0.2500}{(0.75+0.625+0.75)}$$

$$m(k) = 0.3529$$

ตารางที่ 6.20 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ต

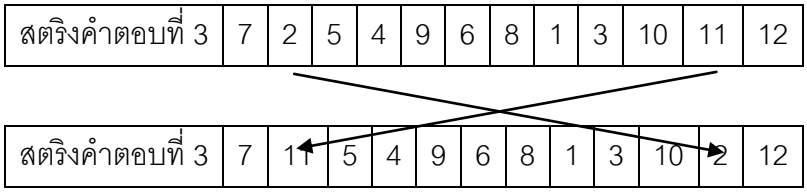
Species Count	$P_{K,k}$	$1-P_{K,k}$	$m(k)$	q_k	$r = 0.8146$
3	0.2500	0.7500	0.3529	0.3529	
2	0.3750	0.6250	0.2941	0.6471	
1	0.2500	0.7500	0.3529	1.0000	selected

2) ทำการมิวเตชันสตริงที่เป็นสมาชิกในสปีชี่ส์เคาท์ที่ถูกเลือก โดยใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน $(P_{\mathrm{m}} = 0.01)$ เป็นตัวกำหนดจำนวนบิทที่คาดว่าจะถูกมิวเตชัน ในตัวอย่างนี้สุ่มเลือกได้ค่าสปีชี่เคาท์ 1 ซึ่งมีสมาชิกเพียงสตริงคำตอบเดียว คือ สตริงคำตอบที่ 3 มีจำนวนบิทที่อยู่ในสปีชี่ส์เคาท์นี้ทั้งหมด 12 บิท ดังนั้นจำนวนบิทที่คาดว่าจะถูกมิวเตชันเท่ากับ 0.01x12 = 0.12 บิท หรือประมาณ 1 บิท จากนั้นสร้างเลขสุ่มที่มีค่าระหว่าง [0,1] ให้กับทุกบิทในสตริงคำตอบที่ 3 และจะทำการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange กับบิทที่สุ่มได้ค่าน้อยกว่าค่า P_{m} ดังตารางที่ 6.21

ตารางที่ 6.21 การสร้างเลขสุ่มให้กับบิทในสตริงคำตอบที่จะทำการมิวเตชัน

String3	7	2	5	4	9	6	8	1	3	10	11	12
ค่าสุ่ม	0.128	0.227	0.786	0.112	0.872	0.023	0.897	0.011	0.037	0.900	0.002	0.135

ในตัวอย่างนี้บิทที่มีค่าสุ่มน้อยกว่า P_{m} คือ บิทที่ 11 จากนั้นสุ่มบิทที่ไม่ซ้ำกันมาอีกหนึ่งบิท สมมติสุ่มได้บิทที่ 2 ก็จะทำการสลับค่าในบิทที่ 11 และ 2 ได้ผลดังภาพที่ 6.5 และสตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชันได้ผลดังตารางที่ 6.22



ภาพที่ 6.5 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 3

ตารางที่ 6.22 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบที่	String Priority
3	[7 11 5 4 9 6 8 1 3 10 2 12]

6.3.8 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อสตริงคำตอบผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วจะมีการเก็บสตริงคำตอบที่ดีเอาไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีเหล่านั้น ซึ่งเทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดนี้คือการนำเอาสตริงคำตอบในเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบชั่วคราวคือสตริงที่ผ่านการอพยพและสตริงหลังผ่านการมิวเตชัน จากนั้นจะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธี Non-dominated Sorting ไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) และจะทำการปรับปรุง (Update) สถานที่รวมคำตอบ (Elitist) นี้ในทุกๆรอบ โดยการเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดทุกๆ รอบเข้าไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในสถานที่รวมคำตอบนี้และทำการ Non-dominated Sorting เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป

และสตริงที่ดีที่สุดจำนวน Popsize ตัวในแต่ละรอบจะถูกนำไปใช้เป็นประชากรเริ่มต้นในเจนเนอเรชันต่อไปด้วย

ตารางที่ 6.23 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
	2	[1 6 3 9 5 8 10 4 2 7 12 11]
	3	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]
	4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
	5	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[7 2 5 4 9 6 8 1 3 10 11 12]
	7	[11 2 9 6 8 7 1 3 5 10 4 12]
	8	[7 11 5 4 9 6 8 1 3 10 2 12]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 6.24

ตารางที่ 6.24 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
	2	[2 5 8 3 6 9 11 12 1 4 7 10]
	3	[1 4 3 6 2 5 8 9 11 12 7 10]
	4	[1 4 3 6 2 5 7 9 11 12 8 10]
	5	[3 1 6 4 2 5 9 7 11 12 8 10]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 3 6 4 2 5 7 9 11 12 8 10]
	7	[1 3 6 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
	8	[2 5 1 3 6 4 7 9 11 12 8 10]

จากลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบ นำมาจัดลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 6.25 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 6.26

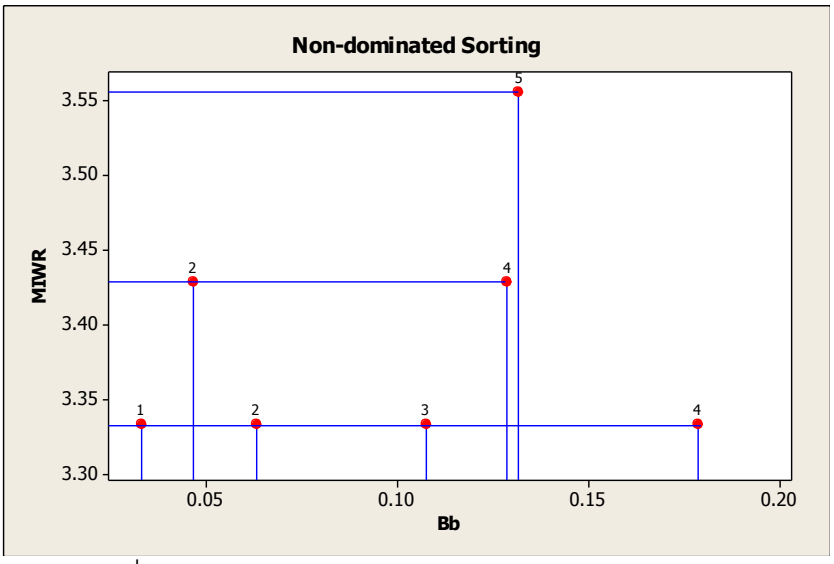
ตารางที่ 6.25 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 4 4 4]
	2	[2 2 2 1 1 1 1 2 3 3 4 5]
	3	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 3 3]
	4	[1 1 2 1 2 2 3 2 2 2 4 4]
	5	[1 1 1 1 2 2 2 3 2 2 4 4]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 2 1 1 2 2 3 2 2 2 4 4]
	7	[1 2 1 1 2 2 2 1 4 4 3 3]
	8	[2 2 1 1 1 1 3 2 2 2 4 3]

ตารางที่ 6.26 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.0332
2	3	5	4.1667	0.0209
3	2	4	3.3333	0.1786
4	2	4	3.3333	0.1076
5	2	4	3.4286	0.0468
6	2	4	3.4286	0.1287
7	2	4	3.5556	0.1317
8	2	4	3.3333	0.0630

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 6.6



ภาพที่ 6.6 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการแปลงเป็นค่าสปีชี่ส์เคาท์ จากนั้นจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์จากมากไปน้อยและถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากันให้เรียงคำตอบตามค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย ถ้าค่า Crowding Distance มีค่าเท่ากัน ให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 จากน้อยไปมากตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 6.27

ตารางที่ 6.27 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
1	3.3333	0.0332	1	infinity	5
8	3.3333	0.0630	2	infinity	4
5	3.4286	0.0468	2	infinity	4
4	3.3333	0.1076	3	infinity	3
3	3.3333	0.1786	4	infinity	2
6	3.4286	0.1287	4	infinity	2
7	3.5556	0.1317	5	infinity	1

ทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) โดยเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเท่านั้น ได้ผลดังตารางที่ 6.28 – 6.31

ตารางที่ 6.28 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]

ตารางที่ 6.29 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]

ตารางที่ 6.30 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 4 4 4]

ตารางที่ 6.31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	2	4	3.3333	0.0332

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น 5 ตัว (Popsize) เพื่อจะใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบต่อไป โดยจะทำการเลือกจากสตริงคำตอบทที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) ถ้าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใน Elitist น้อยกว่า Popsize ที่ต้องการ จะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากการเรียงกันของสตริงคำตอบในขั้นตอนก่อนการหา Elitist (ตารางที่ 6.27) ที่ไม่ซ้ำกันให้ครบจำนวน Popsize ตัว ได้ผลดังตารางที่ 6.32

ตารางที่ 6.32 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
8	[7 11 5 4 9 6 8 1 3 10 2 12]
5	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]
4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
3	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]

6.3.9 การแก้ปัญหาในรอบถัดไป

การแก้ปัญหาในรอบที่ 2 จะทำการแก้ปัญหาเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาในรอบที่ 1 โดยนำสตริงคำตอบที่ได้จากรอบก่อนหน้ามาเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นดังตารางที่ 6.33

ตารางที่ 6.33 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้นในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
2	[7 11 5 4 9 6 8 1 3 10 2 12]
3	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]
4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
5	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 6.34

ตารางที่ 6.34 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
2	[2 5 1 3 6 4 7 9 11 12 8 10]
3	[3 1 6 4 2 5 9 7 11 12 8 10]
4	[1 4 3 6 2 5 7 9 11 12 8 10]
5	[1 4 3 6 2 5 8 9 11 12 7 10]

จากลำดับขั้นงานข้างบนนำไปจัดลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 6.35 และนำไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ได้ดังตารางที่ 6.36

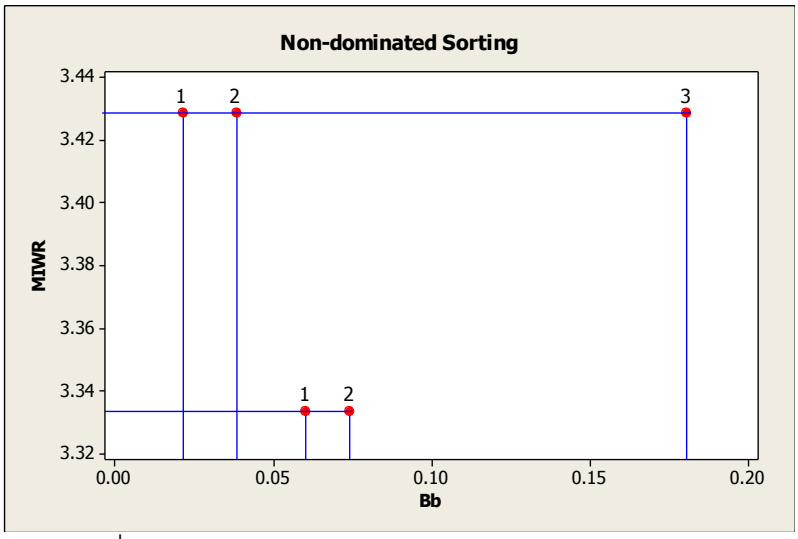
ตารางที่ 6.35 สถานีงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Workstation
1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 3 4 4]
2	[2 2 1 1 1 1 3 2 2 2 4 4]
3	[2 1 1 1 2 2 2 3 2 2 4 3]
4	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 4 3]
5	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 3 4]

ตารางที่ 6.36 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.0604
2	2	4	3.3333	0.0743
3	2	4	3.4286	0.1807
4	2	4	3.4286	0.0214
5	2	4	3.4286	0.0384

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 6.7 คำนวณค่า Crowding Distance และค่าสปีซี่ส์เคาท์ได้ดังตารางที่ 6.37



ภาพที่ 6.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 6.37 ค่า Dummy Fitness ค่า Crowding Distance และค่า Species Count

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
1	3.3333	0.0604	1	infinity	3
2	3.3333	0.0743	2	infinity	2
3	3.4286	0.1807	3	infinity	1
4	3.4286	0.0214	1	infinity	3
5	3.4286	0.0384	2	infinity	2

ทำการหาค่าอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ได้ผลดังตารางที่ 6.38

ตารางที่ 6.38 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]		ความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่เคาท์ $P_{K,k}$
					P_λ	P_μ	
3	1	1	0.2500	0.7500	0.1667	0.5000	0.2500
	2	4					
2	1	2	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.3750
	2	5					
1	1	3	0.7500	0.2500	0.5000	0.1667	0.2500

ทำการอพยพสตริงคำตอบและทำการซ่อมแซมคำตอบให้สมบูรณ์ได้ผลดังตารางที่ 6.39

ตารางที่ 6.39 สตริงคำตอบหลังผ่านการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบในรอบที่ 2

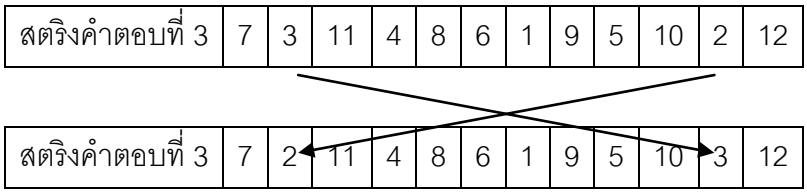
สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
2	[7 2 5 4 9 6 8 1 3 10 11 12]
3	[7 3 11 4 8 6 1 9 5 10 2 12]
4	[4 2 3 7 5 6 8 1 9 10 11 12]
5	[7 2 11 4 5 6 1 9 8 10 3 12]

สตริงที่ผ่านกระบวนการอพยพแล้วจะเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เพื่อให้สตริงมีความหลากหลายมากขึ้นโดยเริ่มจากการคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่จะทำการมิวเตชันได้ผลดังตารางที่ 6.40

ตารางที่ 6.40 การคัดเลือกสปีชี่ส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ต

Species Count	$P_{K,k}$	$1 - P_{K,k}$	$m(k)$	q_k	$r = 0.8083$
3	0.2500	0.7500	0.3529	0.3529	
2	0.3750	0.6250	0.2941	0.6471	
1	0.2500	0.7500	0.3529	1.000	selected

ทำการมิวเตชันสตริงคำตอบที่เป็นสมาชิกในสปีชี่ส์เคาท์ 1 ซึ่งก็คือสตริงคำตอบที่ 3 เมื่อสร้างเลขสุ่มให้กับสตริงคำตอบที่ 3 แล้วพบว่าบิทที่ 2 มีค่าสุ่มน้อยกว่า $P_m = 0.01$ สุ่มบิทที่ไม่ซ้ำกันมาอีกหนึ่งบิทเพื่อทำการสลับค่าได้บิทที่ 11 ทำการสลับค่าในบิทที่ 2 และ 11 ได้ผลดังภาพที่ 6.8 สตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชันได้ผลดังตารางที่ 6.41



ภาพที่ 6.8 การมิวเตชันของสตริงคำตอบที่ 3

ตารางที่ 6.41 สตริงคำตอบหลังจากผ่านการมิวเตชันในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	String Priority
3	[7 2 11 4 8 6 1 9 5 10 3 12]

นำประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น และประชากรคำตอบชั่วคราว ซึ่งเป็นสตริงคำตอบที่ได้ผ่านกระบวนการอพยพและผ่านกระบวนการมิวเตชันแล้วมารวมกันได้ผลดังตารางที่ 6.42

ตารางที่ 6.42 การรวมกันสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราวในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
	2	[7 11 5 4 9 6 8 1 3 10 2 12]
	3	[7 3 11 4 5 6 8 1 9 10 2 12]
	4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
	5	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[7 2 5 4 9 6 8 1 3 10 11 12]
	7	[7 3 11 4 8 6 1 9 5 10 2 12]
	8	[4 2 3 7 5 6 8 1 9 10 11 12]
	9	[7 2 11 4 5 6 1 9 8 10 3 12]
	10	[7 2 11 4 8 6 1 9 5 10 3 12]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 6.43

ตารางที่ 6.43 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
	2	[2 5 1 3 6 4 7 9 11 12 8 10]
	3	[3 1 6 4 2 5 9 7 11 12 8 10]
	4	[1 4 3 6 2 5 7 9 11 12 8 10]
	5	[1 4 3 6 2 5 8 9 11 12 7 10]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 3 6 4 2 5 7 9 11 12 8 10]
	7	[3 1 6 4 2 5 8 9 11 12 7 10]
	8	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 7 8 10]
	9	[3 1 6 4 2 5 8 9 11 12 7 10]
	10	[3 1 6 4 2 5 8 9 11 12 7 10]

จากลำดับขั้นงานข้างบนจะสามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 6.44 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบได้ดังตารางที่ 6.45

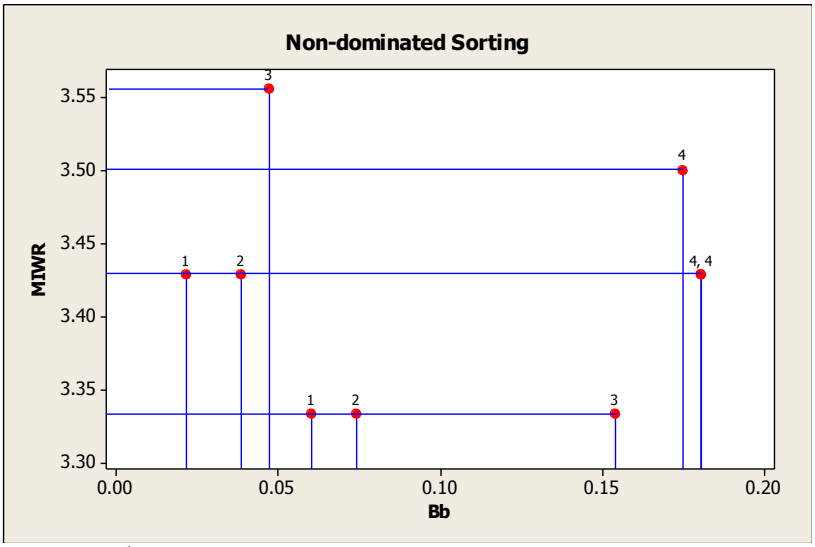
ตารางที่ 6.44 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 3 4 4]
	2	[2 2 1 1 1 1 3 2 2 2 4 4]
	3	[2 1 1 1 2 2 2 3 2 2 4 3]
	4	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 4 3]
	5	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 3 4]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 2 1 1 2 2 3 2 2 2 4 3]
	7	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 3 3]
	8	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 3 4 3]
	9	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 4 3 4]
	10	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 3 6]

ตารางที่ 6.45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.0604
2	2	4	3.3333	0.0743
3	2	4	3.4286	0.1807
4	2	4	3.4286	0.0214
5	2	4	3.4286	0.0384
6	2	4	3.4286	0.1807
7	2	4	3.5000	0.1750
8	2	4	3.3333	0.1540
9	2	4	3.5556	0.0474
10	3	5	4.4444	0.0894

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 6.9



ภาพที่ 6.9 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการแปลงเป็นค่าสปีชี่ส์เคาท์ จากนั้นจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์จากมากไปน้อยและถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากันให้เรียงคำตอบตามค่า Crowding Distance

จากมากไปน้อย ถ้าค่า Crowding Distance มีค่าเท่ากัน ให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 จากน้อยไปมากตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 6.46

ตารางที่ 6.46 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
1	3.3333	0.0604	1	infinity	4
4	3.4286	0.0214	1	infinity	4
2	3.3333	0.0743	2	infinity	3
5	3.4286	0.0384	2	infinity	3
8	3.3333	0.1540	3	infinity	2
9	3.5556	0.0474	3	infinity	2
3	3.4286	0.1807	4	infinity	1
6	3.4286	0.1807	4	infinity	1
7	3.5000	0.1750	4	infinity	1

ทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) โดยเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเท่านั้น ไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในรอบก่อนหน้า ได้ผลดังตารางที่ 6.47 – 6.50

ตารางที่ 6.47 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
2	4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

ตารางที่ 6.48 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
2	4	[1 4 3 6 2 5 7 9 11 12 8 10]

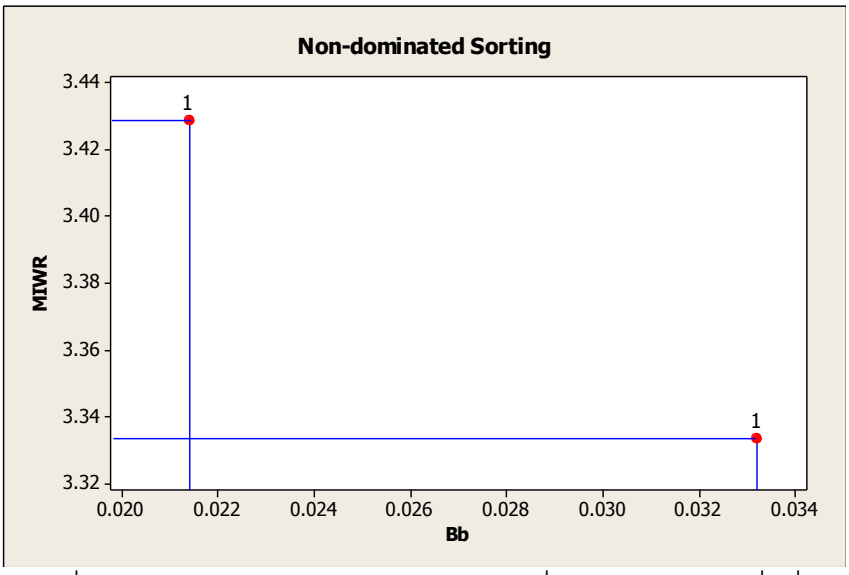
ตารางที่ 6.49 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 4 4 4]
2	4	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 4 3]

ตารางที่ 6.50 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	2	4	3.3333	0.0332
2	4	2	4	3.4286	0.0214

เมื่อได้สตริงคำตอบที่นำมารวมกันไว้ในสถานที่รวมคำตอบแล้ว จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting หาค่า Dummy Fitness เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ได้ดังภาพที่ 6.10 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 6.51



ภาพที่ 6.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 6.51 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	1	3.3333	0.0332	1	infinity	Elitist
2	4	3.4286	0.0214	1	infinity	Elitist

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting และ Crowding Distance จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไปดังตารางที่ 6.52 – 6.55

ตารางที่ 6.52 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของ (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
2	4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]

ตารางที่ 6.53 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[1 4 3 2 5 7 8 10 6 9 11 12]
2	4	[1 4 3 6 2 5 7 9 11 12 8 10]

ตารางที่ 6.54 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	1	[1 1 2 2 2 1 2 3 3 4 4 4]
2	4	[1 1 2 1 2 2 2 1 1 4 4 3]

ตารางที่ 6.55 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	1	2	4	3.3333	0.0332
2	4	2	4	3.4286	0.0214

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น 5 ตัว (Popsize) เพื่อจะใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบต่อไป โดยจะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) ถ้าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใน Elitist น้อยกว่า Popsize ที่ต้องการ จะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากการเรียงกันของสตริงคำตอบในขั้นตอนก่อนการหา Elitist (ตารางที่ 6.46) ที่ไม่ซ้ำกันให้ครบจำนวน Popsize ตัว ได้ผลดังตารางที่ 6.56

ตารางที่ 6.56 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 2 5 6 8 1 11 3 9 10 4 12]
4	[4 2 3 7 9 6 8 1 5 10 11 12]
2	[7 11 5 4 9 6 8 1 3 10 2 12]
5	[7 2 3 4 5 6 1 9 8 10 11 12]
8	[4 2 3 7 5 6 8 1 9 10 11 12]

6.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสม ที่จะทำให้ผลการทดลองที่ได้เข้าใกล้คำตอบที่ดีมากที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ของวิธี BBO มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวดังนี้

6.4.1 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนประชากรเบื้องต้น หมายถึง จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน จำนวนประชากรที่มากเกินไปอาจทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมาก แต่ถ้าจำนวนประชากรน้อยเกินไปคำตอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม การกำหนดจำนวนประชากรที่เหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จำนวนประชากรเบื้องต้นเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang and Katayama, 2008)

6.4.2 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto Based Approach) เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting (Goldberg,1989)

6.4.3 วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกของประชากรคำตอบที่อยู่ในลำดับเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

6.4.4 การมิวเตชัน

การมิวเตชัน (Mutation Method) เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดสตริงคำตอบใหม่ขึ้น เป็นการป้องกันการสูญเสียคำตอบที่อาจจะไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ การมิวเตชันอาจช่วยให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมและทำให้คำตอบสามารถหลุดออกจากคำตอบเฉพาะที่และให้คำตอบที่ดี ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation (Hwang, Katayama and Gen, 2008) และใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.01 (Ma, 2010)

6.4.5 รูปแบบการอพยพ

การอพยพ (Migration) เป็นการแบ่งปันคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงสตริงคำตอบ ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณารูปแบบการอพยพเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีระดับของปัจจัยทั้งหมด 2 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 การอพยพแบบ Linear
- ระดับที่ 2 การอพยพแบบ Sinusoidal

6.4.6 ผลกระทบจากการเรียนรู้

ผลกระทบจาการเรียนรู้ (Learning Effect) เป็นทฤษฎีที่ตั้งสมมติฐานว่าการผลิตจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลง โดยได้นำเข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตเพื่อลดช่องว่างของการจัดตารางตามทฤษฎี

และเวลาการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบ Sum-Processing Time Based Learning Effect (Kuo and Yang ,2006a,b,c) และกำหนดค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80% (Arditi et al., 2001)

6.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

การออกแบบการทดลองของวิธี BBO จะทำการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยในแต่ละการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ (Replication) เท่ากับ 2 ครั้ง ซึ่งมีรายละเอียดของปัญหาการทดลองทั้งหมด 5 ปัญหาดังตารางที่ 6.57

ตารางที่ 6.57 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาการทดลอง	รอบเวลาการทำงาน	จำนวนเจนเนอเรชัน
ปัญหา 12 ขั้นงาน	7	100
ปัญหา 65 ขั้นงาน	490	400
ปัญหา 148 ขั้นงาน	408	800
ปัญหา 205 ขั้นงาน	2454	800
ปัญหา 183 ขั้นงาน	22	400

พารามิเตอร์ที่ต้องทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสม ดังตารางที่ 6.58

ตารางที่ 6.58 รายละเอียดพารามิเตอร์ของ BBO ที่จะทำการทดสอบ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย
รูปแบบการอพยพ	ระดับที่ 1 : การอพยพแบบ Linear
	ระดับที่ 2 : การอพยพแบบ Sinusoidal

จะได้การทดลองในวิธี BBO ที่มีปัจจัย 1 ปัจจัย คือ รูปแบบการอพยพมี 2 ระดับ และมีการทำซ้ำเท่ากับ 2 ครั้ง ดังนั้นจะมีจำนวนทรีตเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองเท่ากับ 2x2 = 4 การทดลอง

6.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองเป็นการนำผลการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computation Time to Solution) เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยมีขั้นตอนในการวิคราะห์ผลเช่นเดียวกับขั้นตอนในบทที่ 3

6.6.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.11

One-way ANOVA: Convergence versus Migration

```
Source     DF         SS         MS  F  P
Migration   1  0.0000000  0.0000000  *  *
Error       2  0.0000000  0.0000000
Total       3  0.0000000

S = 0   R-Sq = *%   R-Sq(adj) = *%


Level       N         Mean        StDev
Linear      2  0.000000000  0.000000000
Sinusoidal  2  0.000000000  0.000000000

            Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level         +---------+---------+---------+---------
Linear        *
Sinusoidal    *
              +---------+---------+---------+---------
            0.000000  0.000010  0.000020  0.000030

Pooled StDev = 0.000000000
```

ภาพที่ 6.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เนื่องจากกลุ่มคำตอบที่ได้

จากระดับปัจจัยต่างๆ มีค่าเท่ากัน ค่าของกลุ่มคำตอบที่ได้ไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 6.59

ตารางที่ 6.59 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	รูปแบบการอพยพแบบ Linear	67	67	67
2	รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal	74	69	71.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยการอพยพแบบ Linear ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี BBO คือ รูปแบบการอพยพแบบ Linear ดังตารางที่ 6.60

ตารางที่ 6.60 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 12 ขั้นงาน ในวิธี BBO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	การอพยพแบบ Linear

6.6.2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.12

One-way ANOVA: Convergence versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.0696	0.0696	1.18	0.391
Error	2	0.1179	0.0590		
Total	3	0.1876			

S = 0.2428 R-Sq = 37.13% R-Sq(adj) = 5.70%

ภาพที่ 6.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 6.13

One-way ANOVA: Spread versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.008632	0.008632	10.49	0.084
Error	2	0.001646	0.000823		
Total	3	0.010278			

S = 0.02868 R-Sq = 83.99% R-Sq(adj) = 75.98%

ภาพที่ 6.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.14

One-way ANOVA: Ratio versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.250	0.250	1.00	0.423
Error	2	0.500	0.250		
Total	3	0.750			

S = 0.5 R-Sq = 33.33% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตาราง 6.61

ตารางที่ 6.61 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	รูปแบบการอพยพแบบ Linear	488	554	521
2	รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal	2267	3040	2653.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยการอพยพแบบ Linear ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี BBO คือ รูปแบบการอพยพแบบ Linear ดังตารางที่ 6.62

ตารางที่ 6.62 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 65 ขั้นงาน ในวิธี BBO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	การอพยพแบบ Linear

6.6.3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.15

One-way ANOVA: Convergence versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.000941	0.000941	1.90	0.302
Error	2	0.000991	0.000495		
Total	3	0.001931			

S = 0.02225 R-Sq = 48.71% R-Sq(adj) = 23.07%

ภาพที่ 6.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 6.16

One-way ANOVA: Spread versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.0004	0.0004	0.03	0.875
Error	2	0.0279	0.0140		
Total	3	0.0284			

S = 0.1182 R-Sq = 1.56% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.17

One-way ANOVA: Ratio versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.0156	0.0156	1.00	0.423
Error	2	0.0313	0.0156		
Total	3	0.0469			

S = 0.125 R-Sq = 33.33% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 6.63

ตารางที่ 6.63 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	รูปแบบการอพยพแบบ Linear	4108	7899	6003.5
2	รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal	6040	16218	11129

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยการอพยพแบบ Linear ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี BBO คือ รูปแบบการอพยพแบบ Linear ดังตารางที่ 6.64

ตารางที่ 6.64 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 148 ขั้นงาน ในวิธี BBO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	การอพยพแบบ Linear

6.6.4 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.18

One-way ANOVA: Convergence versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.0006	0.0006	0.01	0.927
Error	2	0.1219	0.0610		
Total	3	0.1226			

S = 0.2469 R-Sq = 0.53% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 6.19

One-way ANOVA: Spread versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.0153	0.0153	0.79	0.467
Error	2	0.0386	0.0193		
Total	3	0.0539			

S = 0.1389 R-Sq = 28.43% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.20

One-way ANOVA: Ratio versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.063	0.063	0.40	0.592
Error	2	0.313	0.156		
Total	3	0.375			

S = 0.3953 R-Sq = 16.67% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 6.65

ตารางที่ 6.65 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	รูปแบบการอพยพแบบ Linear	10951	11539	11245
2	รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal	12629	21874	17251.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยการอพยพแบบ Linear ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี BBO คือ รูปแบบการอพยพแบบ Linear ดังตารางที่ 6.66

ตารางที่ 6.66 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 205 ขั้นงาน ในวิธี BBO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	การอพยพแบบ Linear

6.6.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.21

One-way ANOVA: Convergence versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.1915	0.1915	2.75	0.239
Error	2	0.1394	0.0697		
Total	3	0.3308			

S = 0.2640 R-Sq = 57.88% R-Sq(adj) = 36.81%

ภาพที่ 6.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Convergence to the Pareto-optimal Set

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ได้ผลดังภาพที่ 6.22

One-way ANOVA: Spread versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.000	0.000	0.00	1.000
Error	2	0.444	0.222		
Total	3	0.444			

S = 0.4714 R-Sq = 0.00% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Spread Measurement

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป

ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ได้ผลดังภาพที่ 6.23

One-way ANOVA: Ratio versus Migration

Source	DF	SS	MS	F	P
Migration	1	0.028	0.028	0.20	0.698
Error	2	0.278	0.139		
Total	3	0.306			

S = 0.3727 R-Sq = 9.09% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 6.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนอง คือ Ratio of Non-dominated Solution

จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่าปัจจัยรูปแบบการอพยพไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรตอบสนองลำดับถัดไป คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุดซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 6.67

ตารางที่ 6.67 เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน

ระดับปัจจัย	ปัจจัย	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ		
		การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2	เวลาเฉลี่ย
1	รูปแบบการอพยพแบบ Linear	599	729	664
2	รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal	2773	1802	2287.5

จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยการอพยพแบบ Linear ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี BBO คือ รูปแบบการอพยพแบบ Linear ดังตารางที่ 6.68

ตารางที่ 6.68 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 183 ขั้นงาน ในวิธี BBO

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	การอพยพแบบ Linear

6.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization; BBO) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแบบฮิวริสติกที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบการอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์ (Species)

ตามภูมิศาสตร์ที่อยู่อาศัย ซึ่งการอพยพย้ายถิ่นฐานของสปีชี่ส์นี้เป็นผลให้เกิดการเกิดสปีชี่ส์ใหม่และการสูญพันธ์ของสปีชี่ส์ ซึ่งเปรียบได้กับการปรับปรุงคำตอบของปัญหาด้วยการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบที่ดีให้แก่กัน เพื่อให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้น จึงนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งคำตอบที่ได้สามารถยอมรับได้ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน ในบทนี้ได้มีการกำหนดและทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO คือ รูปแบบของการอพยพ โดยจากผลการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของรูปแบบการอพยพของปัญหาทั้งหมด 5 ปัญหาสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่ารูปแบบการอพยพทั้ง 2 รูปแบบให้คำตอบที่ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของรูปแบบการอพยพแบบ Linear จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อยกว่า

บทที่ 7

ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

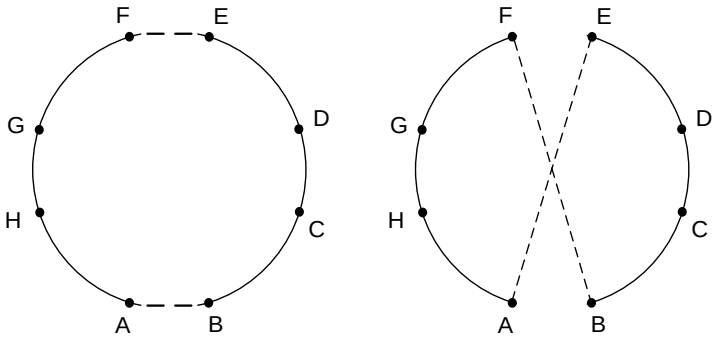
ในบทนี้จะนำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่เรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based Optimization with Local Search; BBO-LS) ซึ่งได้พัฒนามาจากวิธี BBO ร่วมกับการเพิ่มการค้นหาเฉพาะที่เข้าไปหลังจากกระบวนค้นหาที่ดีที่สุดในทุกๆ รอบที่กำหนด โดยการเพิ่มการค้นหาเฉพาะที่เข้าไปนี้เป็นการปรับปรุงคำตอบให้มีความหลากหลาย และหวังว่าจะสามารถค้นหาคำตอบที่ดีขึ้น ขั้นตอนการทำงานและการนำวิธี BBO-LS มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ และตัวอย่างการคำนวณ รวมถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO-LS ของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยที่แตกต่างกัน 5 ปัญหา

7.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography-Based Optimization with Local Search : BBO-LS)

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biography Base Optimization Local Search; BBO-LS) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่พัฒนามาจากวิธี BBO ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 โดยวิธี BBO-LS นี้ได้นำความรู้ด้านการค้นหาเฉพาะที่มาประยุกต์ใช้ เพื่อทำให้กระบวนการค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพและนำไปสู่คำตอบที่ดีขึ้น โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อสตริงคำตอบผ่านกระบวนการค้นหาคำตอบมาแล้ว คำตอบที่ได้นั้นอาจจะยังไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด การค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงคำตอบเหล่านั้นอาจทำให้เจอคำตอบที่ดีขึ้น

7.1.1 การค้นหาเฉพาะที่

การค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) เป็นฮิวริสติกที่คิดขึ้นมาเพื่อช่วยในการปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มความหลากหลายให้กับคำตอบ โดยอาศัยหลักการการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อช่วยในการหาคำตอบบริเวณที่ใกล้เคียงคำตอบเฉพาะที่นั้นๆ โดยหวังว่าคำตอบที่ใกล้เคียงบริเวณเหล่านั้นจะนำไปสู่คำตอบที่ดียิ่งขึ้น การค้นหาเฉพาะที่นี้จะทำการวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนครบจำนวนครั้งในการวนซ้ำหรือคำตอบที่ได้นั้นไม่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อีก ซึ่งการค้นหาเฉพาะที่มีหลายรูปแบบ ในงานวิจัยนี้จะใช้การค้นหาเฉพาะที่แบบ 2-opt ซึ่งเป็นวิธีการเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเชื่อมต่อของคำตอบโดยการลบเส้นทางการเชื่อมต่อออกไป 2 เส้นทาง จากนั้นนำเส้นทางนี้ไปเชื่อมต่อกับเส้นทางอื่นแทน จากภาพที่ 7.1 เส้นทางก่อนทำการเปลี่ยนแปลงคือ A-B-C-D-E-F-G-H (เดินทางในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา) หลังจากทำการเปลี่ยนแปลงเส้นทางด้วยวิธี 2-Opt แล้วจะได้เส้นทาง คือ A-E-D-C-B-F-G-H จะเห็นว่าเส้นทางในตำแหน่งที่เหลือจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย



(ก) ก่อนทำวิธี 2-Opt (ข) หลังทำวิธี 2-Opt

ภาพที่ 7.1 การแลกเปลี่ยนตำแหน่งด้วยวิธี 2-Opt

7.1.2 ปัจจัยที่สำคัญในการค้นหาเฉพาะที่

การปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นโดยอาศัยการค้นหาเฉพาะที่ทำให้เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้น ดังนั้นการประยุกต์การค้นหาเฉพาะที่ให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดปัจจัยต่างๆ ให้มีความเหมาะสม (Hart, 1994) ดังนี้

7.1.2.1 **ความถี่ในการประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่**

ความถี่ในการประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ คือ รอบที่เราจะทำการค้นหาเฉพาะที่ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เช่น จะทำการประยุกต์การค้นหาเฉพาะที่นี้ในทุกๆ 10 รอบ $(T = 10)$ เมื่อ T คือระยะห่างของเจนเนอเรชันที่เราจะทำการค้นหาเฉพาะที่ ดังนั้นจะมีการค้นหาเฉพาะที่ในเจนเนอเรชันที่ 10, 20, 30,...,N เมื่อ N คือจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดของการทดลอง

7.1.2.2 **จำนวนคำตอบที่เลือกไปทำการค้นหาเฉพาะที่**

จำนวนคำตอบที่เลือกไปทำการค้นหาเฉพาะที่จะขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่ (P_{LS}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นมา เพื่อจะนำไปเลือกสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงไม่แท้จริงน้อยที่สุดมาจำนวนหนึ่งเพื่อมาทำการค้นหาเฉพาะที่

7.1.2.3 **จำนวนการทำซ้ำในแต่ละรอบ**

ในการค้นหาเฉพาที่ในแต่ละครั้งจะทำการวนซ้ำซึ่งจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่เรากำหนด (k) ถ้าการวนซ้ำครบจำนวน k ครั้งติดกันแล้วไม่สามารถปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นได้ก็จะทำการหยุดการการค้นหาเฉพาะที่ในครั้งนั้นๆ

7.1.2.4 **ลักษณะการค้นหาเฉพาะที่**

ในงานวิจัยนี้จะทำการค้นหาแบบปรับปรุงดีที่สุด (Best Improvement) โดยจะนำสตริงคำตอบที่ดีที่ได้ในเจนเนอเรชันนั้นๆ มาทำการปรับปรุงคำตอบจนไม่สามารถปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นได้อีก จึงหยุดกระบวนการค้นหาเฉพาะที่

7.1.2.5 **หลักการยอมรับคำตอบที่ดี**

ในงานวิจัยนี้จะตัดสินใจยอมรับคำตอบที่ดีหลังจากการค้นหาเฉพาะที่เมื่อคำตอบที่ได้หลังจากการค้นหาเฉพาะที่เป็นคำตอบที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับคำตอบก่อนที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบด้วยวิธี Non-dominated Sorting

7.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO-LS ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ขั้นตอนการทำงานของ BBO-LS ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. Data input : รับข้อมูลต่างๆ ได้แก่ จำนวนผลิตภัณฑ์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน และด้านที่สามารถทำงานได้ของแต่ละขั้นงาน

2. Representation & Initialization : นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้น (Y) โดยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรคำตอบเริ่มต้น N ตัว ด้วยกระบวนการใส่รหัสคำตอบ (Representation) และการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้น Pt (Initial Population) และทำการคัดลอกสตริงคำตอบเริ่มต้นลงในสตริงคำตอบชั่วคราว (Z)

3. Evaluation : คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ

4. Pareto Based Approach : กำหนดค่าความแข็งแรงให้แต่ละประชากรคำตอบโดยใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) ค่าอันดับที่ได้นี้เรียกว่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) กลุ่มที่ดีที่สุดจะถูกจัดอันดับไว้ต่ำที่สุด และทำการแปลงเป็นค่าสปีชี่ส์เคาท์ให้แต่ละสตริงคำตอบ

5. Migration Rate : กำหนดรูปแบบการอพยพ (Migration Model) และคำนวณหาอัตราการอพยพเข้า ($\boldsymbol{\lambda}$) และอัตราการอพยพออก (μ) ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_{λ}) ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_{μ}) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ (P_K)

6. Migration : การอพยพจะทำการพิจารณาทีละบิทในทุกๆ สตริงคำตอบ เริ่มจากสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชี่ส์เคาท์มากที่สุดไปจนถึงสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์น้อยที่สุด โดยใช้ค่า P_{λ} ตัดสินใจว่าจะทำการอพยพเข้า (รับคุณลักษณะ) หรือไม่ ถ้าตัดสินใจที่จะทำการอพยพเข้าก็จะทำการเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยโดยใช้วงล้อรูเล็ตค่า P_{μ} จากนั้นก็จะทำการอพยพค่าในบิทระหว่างสตริงคำตอบที่ถูกเลือก และให้ทำซ้ำทุกบิทของทุกๆ สตริงคำตอบ

7. Mutation : สตริงคำตอบ Z หลังจากผ่านกระบวนการอพยพแล้วบางส่วนจะถูกเลือกโดยใช้วงล้อรูเล็ตของค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ k $(P_{K,k})$ ไปเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน จากนั้นจึงใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) เป็นตัวกำหนดจำนวนบิทที่จะถูกมิวเตชัน

8. Local Search Heuristic : ทำการคัดเลือกประชากรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากการรวมกันระหว่างสตริงคำตอบเริ่มต้นกับสตริงคำตอบที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว (ผ่านกระบวนการอพยพและการมิวเตชัน) โดยอาศัยหลักการ Non-dominated Sorting และ Crowding Distance

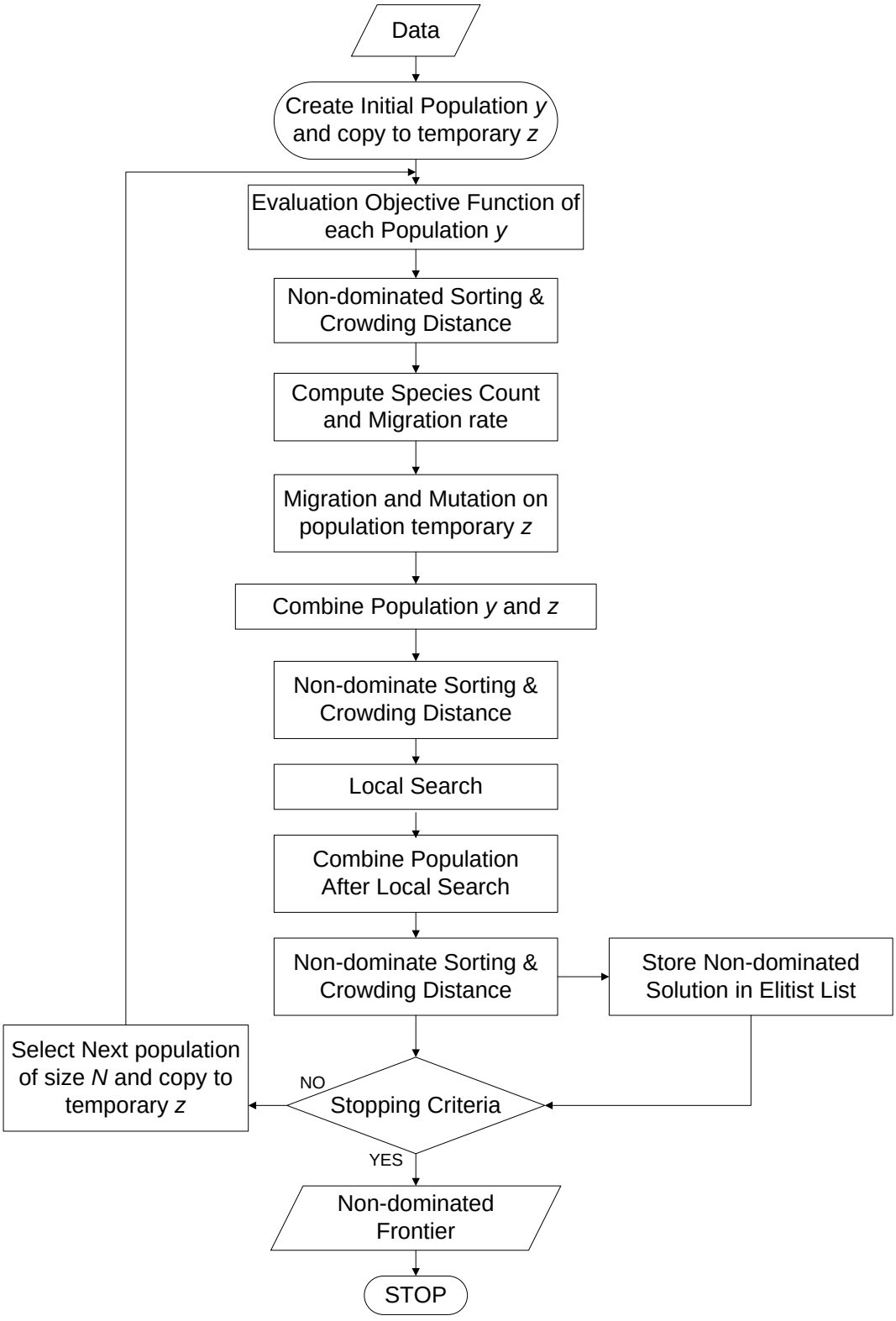
(Dep et al., 2002) จากนั้นทำการปรับปรุงคำตอบที่ได้ โดยทำการค้นหาเฉพาะที่ด้วยการนำสตริงคำตอบมาทำการมิวเตชันเพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับสตริงคำตอบในรอบถัดไปด้วยวิธีการมิวเตชันแบบ 2-Opt ด้วยความถี่และค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่ที่กำหนด

9. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population : ทำการเก็บประชากรที่ดีที่สุดที่ได้จากการรวมกันระหว่างสตริงคำตอบเริ่มต้น (สตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการอพยพและการมิวเตชัน) และสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (สตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการ Local Search) โดยอาศัยหลักการ Non-dominated Sorting และ Crowding Distance (Dep et al., 2002) ไว้เพื่อจะนำไปทำการปรับปรุง (Update) ในทุกๆเจนเนอเรชัน โดยจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากเจนเนอเรชันก่อนหน้าด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ได้ไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของรอบก่อนหน้าในการดำเนินการรอบถัดไป

10. Selection Next Population : นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 เท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น N ตัวเพื่อนำไปใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป (ถ้าประชากรมีค่าอันดับที่เท่ากันจะคัดเลือกคำตอบโดยพิจารณาค่า Crowding Distance ที่มีค่ามากก่อน)

11. Stopping Criteria : ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันน้อยกว่าจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้จะทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึงขั้นตอนที่ 9 ใหม่ ถ้าไม่ใช่ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป

12. Stop : หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบและนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 7.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO-LS

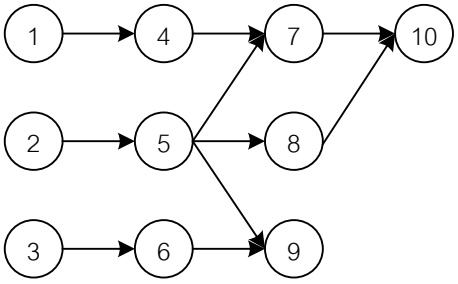
7.3 ตัวอย่างการนำวิธี BBO-LS ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

จากขั้นตอนของ BBO-LS ที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่างซึ่งเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมของปัญหา Kim et al., (2000) ที่ประกอบด้วย 12 ขั้นงาน และมี 2 ชนิดผลิตภัณฑ์ คือ A และ B เมื่อกำหนดรอบเวลาการทำงานในแต่ละสถานีงานเท่ากับ 7 ดังนี้

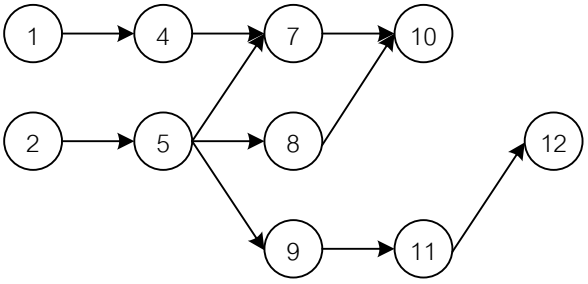
7.3.1 การเตรียมข้อมูล (Data Input)

7.3.1.1 สร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram)

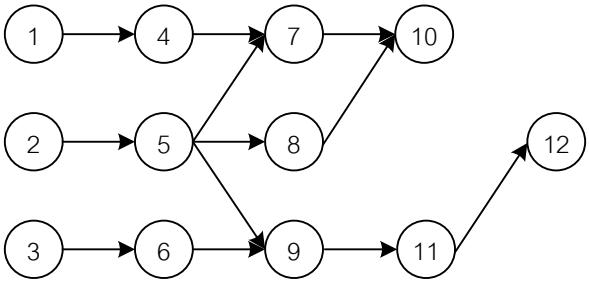
แสดงดังภาพที่ 7.3



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A และ B

ภาพที่ 7.3 แสดงการสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram) ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นงาน Kim et al. (2000)

7.3.1.2 เวลาการทำงานเฉลี่ยในแต่ละขั้นงาน แสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 เวลาการทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Side	Model		
		A	B	Mean
1	L	2	3	2.5
2	R	3	3	3
3	E	2	0	1
4	L	3	2	2.5
5	E	1	2	1.5
6	L	1	0	0.5
7	E	3	2	2.5
8	R	3	1	2
9	E	2	1	1.5
10	E	2	3	2.5
11	E	0	2	1
12	R	0	1	0.5

7.3.1.3 สร้าง Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์รวม ได้ดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 Precedence Matrix จากแผนภาพความสัมพันธ์

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

7.3.1.4 พารามิเตอร์ที่เลือกใช้ของ BBO-LS

- จำนวนประชากรเบื้องต้น (N) 5 ตัว
- รูปแบบการอพยพใช้แบบ Sinusoidal
- วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.01
- ความถี่ในการค้นหาเฉพาะที่ทุกๆ 5 รอบ
- วิธีการค้นหาเฉพาะที่แบบ 2-Opt
- ค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ในการค้นหาเฉพาะที่เท่ากับ 0.3
- ผลกระทบจากการเรียนรู้เป็นแบบ Sum of Processing Time Based Learning Effect
- ผลกระทบที่เกิดจากการเรียนรู้ เท่ากับ 80%

7.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นของวิธี BBO-LS จะเหมือนกับวิธีการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยเริ่มจากการสุ่มสตริงคำตอบโดยการกำหนดค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) เท่ากับจำนวนประชากรเบื้องต้น (Popsize = 5) จากนั้นสุ่มตำแหน่งมา 2 ตำแหน่งเพื่อทำการสลับค่า โดยจำนวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของจำนวนขั้นงานทั้งหมด หรือเท่ากับ m/2 = 12/2 =6 ครั้ง เมื่อ m คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด จะได้สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกขั้นงาน 5 สตริงคำตอบ ดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ค่าสิทธิในการเลือกงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[1 2 10 12 5 11 9 8 6 4 7 3]
2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]
3	[9 1 11 4 5 6 7 10 8 3 2 12]
4	[1 12 9 4 5 2 11 8 7 10 6 3]
5	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]

7.3.3 การถอดรหัสคำตอบ

จากสตริงคำตอบเบื้องต้น 5 ตัวนี้ จะต้องนำไปแปลงสตริงคำตอบจากค่าสิทธิในการเลือกงาน (String Priority) ไปเป็นลำดับขั้นงาน (Task Sequence) ก่อนจะนำไปจัดลงสถานีงาน โดยขั้นตอนการแปลงสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับขั้นงานมีวิธีเช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว เมื่อทำการแปลงสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว จะได้ลำดับขั้นงาน 5 ตัว ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[3 6 2 5 8 9 11 12 1 4 7 10]
2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
3	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 10 11 12]
4	[2 3 5 8 6 9 11 12 1 4 7 10]
5	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]

จากลำดับขั้นงานทั้ง 5 ตัวข้างบนจะทำการจัดลงสถานีงานเพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยมีรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 โดยมีวิธีการจัดสรรงานลงสถานีงานและการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว จากลำดับงานทั้ง 5 ตัวนี้สามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 7.5 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวได้ดังตารางที่ 7.6

ตารางที่ 7.5 สถานีงานของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว

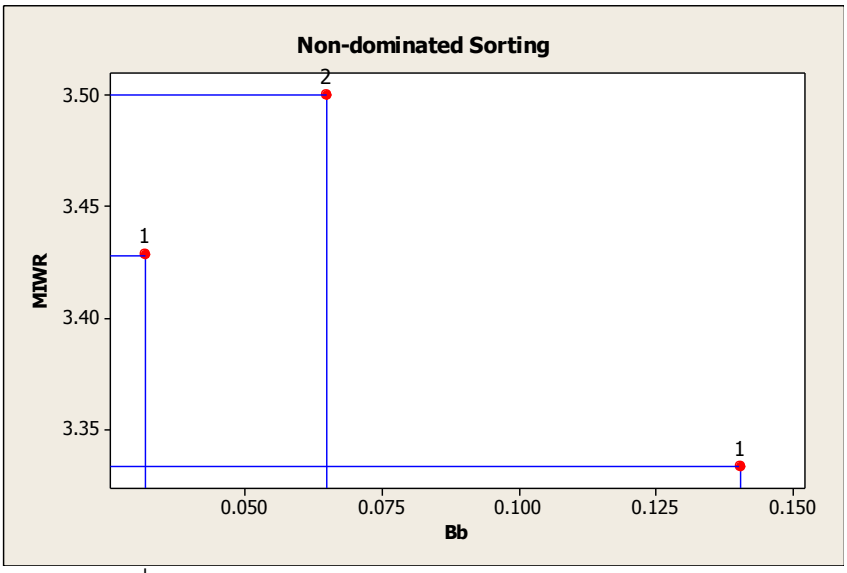
สตริงคำตอบที่	Workstation
1	[2 1 2 1 4 1 3 4 3 3 6 6]
2	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 4 3 4]
3	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 4 3 4]
4	[2 1 1 2 1 1 3 4 3 3 3 5]
5	[2 2 2 1 1 1 4 1 3 3 3 4]

ตารางที่ 7.6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	3	5	4.4444	0.0590
2	2	4	3.4286	0.0319
3	2	4	3.5000	0.0650
4	3	5	4.4444	0.0932
5	2	4	3.3333	0.1405

7.3.4 การประเมินค่า

การประเมินค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบจะใช้การจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting โดยค่าอันดับนี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) โดยพิจารณาเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ที่ดีที่สุดมาจัดอันดับ (เนื่องจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 เป็นวัตถุประสงค์หลัก) โดยทำการกรองและเลือกสตริงคำตอบที่มีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด แล้วจึงนำสตริงที่เลือกมานี้มาพิจารณาการค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 เพื่อจัดอันดับค่าความแข็งแรงโดยวิธี Non-dominated Sorting ในตัวอย่างนี้เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่ 2,3 และ 5 เป็นสตริงที่ดีที่สุด เนื่องจากมีจำนวนคู่สถานีงานและจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด คือ ประกอบด้วย 2 คู่สถานีงาน และจำนวนสถานีงานเท่ากับ 4 สถานีงาน เมื่อนำมาจัดอันดับค่าความแข็งแรง จะได้ดังภาพที่ 7.4 และคำนวณค่า Dummy Fitness ได้ดังตารางที่ 7.7



ภาพที่ 7.4 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 7.7 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness
2	3.4286	0.0319	1
3	3.5000	0.0650	2
5	3.3333	0.1405	1

คำนวณหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance โดยพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 โดยจะทำการพิจารณาทีละ Front ซึ่งจะทำการพิจารณา Front ที่ 1 ก่อน แล้วจึงทำการพิจารณา Front ถัดๆ ไป โดยมีวิธีการคำนวณหาค่า Crowding Distance เช่นเดียวกับวิธีในบทที่ 3 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบมีค่าดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
2	3.4286	0.0319	1	infinity
3	3.5000	0.0650	2	infinity
5	3.3333	0.1405	1	infinity

การกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์โดยการพิจารณาค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด (เท่ากับ 1) ค่าสปีชีส์เคาท์จะมีค่าสูงที่สุดแล้วเรียงลำดับไปจนถึงค่าความแข็งแรงที่น้อยที่สุดค่าสปีชี่ส์เคาท์จะมีค่าต่ำที่สุด ดังตารางที่ 7.9

ตารางที่ 7.9 ค่า Species Count ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
2	3.4286	0.0319	1	infinity	2
3	3.5000	0.0650	2	infinity	1
5	3.3333	0.1405	1	infinity	2

7.3.5 การหาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์

การอพยพของสตริงคำตอบจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การอพยพเข้า (immigration : λ) และการอพยพออก (Emigration : μ) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การอพยพแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Sinusoidal) ซึ่งวิธีการคำนวณค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและอพยพออกและการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์จะเหมือนกับวิธีการคำนวณของวิธี BBO ในบทที่ 6 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว เมื่อทำการคำนวณจะได้ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพและค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ของสตริงคำตอบดังตารางที่ 7.10

ตารางที่ 7.10 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออก

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]		ค่าความน่าจะเป็นสะสมในการอพยพออก	ความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่เคาท์ $P_{K,k}$
					P_λ	P_μ		
2	2	1	0.2500	0.7500	0.2500	0.7500	0.2500	0.4000
	5	4						
1	3	3	0.7500	0.2500	0.7500	0.2500	1.0000	0.4000

7.3.6 การอพยพ

การอพยพเป็นการแบ่งปันคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงสตริงคำตอบ โดยพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ) และค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว เมื่อทำการอพยพแล้วจะต้องมีการซ่อมแซมสตริงคำตอบเพื่อให้ได้สตริงคำตอบที่เป็นไปตามเงื่อนไข ซึ่งวิธีการอพยพและการซ่อมแซมสตริงคำตอบในวิธี BBO-LS จะเหมือนกับขั้นตอนของวิธี BBO ในบทที่ 6 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว เมื่อทำการอพยพและซ่อมแซมสตตริงคำตอบให้สมบูรณ์แล้วจะได้สตริงคำตอบดังตารางที่ 7.11

ตารางที่ 7.11 สตริงคำตอบหลังผ่านกระบวนการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบ

สตริงคำตอบที่	String Priority
2	[7 2 3 4 5 6 1 8 9 10 11 12]
3	[7 9 11 3 12 6 1 4 8 5 2 10]
5	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]

7.3.7 การมิวเตชัน

การมิวเตชันเป็นการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในของสตริงคำตอบเพื่อให้สตริงคำตอบที่ผ่านการอพยพมาแล้วให้มีความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งขั้นตอนของการมิวเตชันในวิธี BBO-LS จะเหมือนกับขั้นตอนของวิธี BBO ในบทที่ 6 ที่ได้นำเสนอมาแล้ว โดยค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเริ่มต้นเท่ากับ 0.01 ดังนั้น ดังนั้นจำนวนบิทที่คาดว่าจะถูกมิวเตชันเท่ากับ 0.01x36 = 0.36 บิท หรือประมาณ 1 บิทเมื่อทำการมิวเตชันแล้วจะได้สตริงคำตอบดังตารางที่ 7.12

ตารางที่ 7.12 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการมิวเตชัน

สตริงคำตอบที่	String Priority
3	[10 9 11 3 12 6 1 4 8 5 2 7]

7.3.8 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อสตริงคำตอบผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วจะมีการเก็บสตริงคำตอบที่ดีเอาไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีเหล่านั้น ซึ่งเทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดนี้คือการนำเอาสตริงคำตอบในเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบชั่วคราวหลังจากผ่านกระบวนการอพยพและกระบวนการมิว

เตชันแล้ว จากนั้นจะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธี Non-dominated Sorting ไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) และจะทำการปรับปรุง (Update) สถานที่รวมคำตอบ (Elitist) นี้ในทุกๆรอบ โดยการเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดทุกๆ รอบเข้าไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในสถานที่รวมคำตอบนี้และทำการ Non-dominated Sorting เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป

และสตริงที่ดีที่สุดจำนวน Popsize ตัวจะถูกนำไปใช้เป็นประชากรเริ่มต้นในเจนเนอเรชันต่อไปด้วย ถ้าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใน Elitist น้อยกว่า Popsize ที่ต้องการ จะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากการเรียงกันของสตริงคำตอบในขั้นตอนก่อนการหา Elitist ที่ไม่ซ้ำกันให้ครบจำนวน Popsize ตัว

ตารางที่ 7.13 การรวมกันของสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราว

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[1 2 10 12 5 11 9 8 6 4 7 3]
	2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]
	3	[9 1 11 4 5 6 7 10 8 3 2 12]
	4	[1 12 9 4 5 2 11 8 7 10 6 3]
	5	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[7 2 3 4 5 6 1 8 9 10 11 12]
	7	[7 9 11 3 12 6 1 4 8 5 2 10]
	8	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
	9	[10 9 11 3 12 6 1 4 8 5 2 7]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 7.14

ตารางที่ 7.14 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[3 6 2 5 8 9 11 12 1 4 7 10]
	2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
	3	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 10 11 12]
	4	[2 3 5 8 6 9 11 12 1 4 7 10]
	5	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
	7	[3 2 5 1 6 9 8 4 11 12 7 10]
	8	[3 6 1 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
	9	[3 1 2 5 6 9 8 4 11 12 7 10]

จากลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบ นำมาจัดลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 7.15 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 7.16

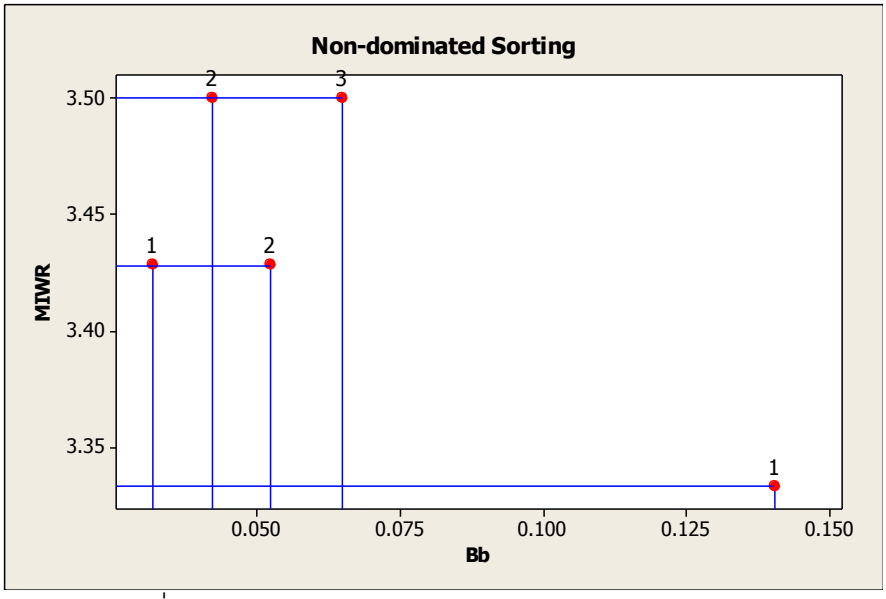
ตารางที่ 7.15 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[2 1 2 1 4 1 3 4 3 3 6 6]
	2	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 4 3 4]
	3	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 4 3 4]
	4	[2 1 1 2 1 1 3 4 3 3 3 5]
	5	[2 2 2 1 1 1 4 1 3 3 3 4]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 1 2 1 2 2 1 1 4 4 3 4]
	7	[2 2 2 1 1 1 2 3 6 6 3 3]
	8	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 4]
	9	[1 1 2 2 1 1 2 3 4 4 4 5]

ตารางที่ 7.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	3	5	4.4444	0.0590
2	2	4	3.4286	0.0319
3	2	4	3.5000	0.0650
4	3	5	4.4444	0.0932
5	2	4	3.3333	0.1405
6	2	4	3.4286	0.0524
7	3	4	3.3333	0.0271
8	2	4	3.5000	0.0422
9	3	5	4.3750	0.0330

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 7.5



ภาพที่ 7.5 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการแปลงเป็นค่าสปีซี่ส์เคาท์ จากนั้นจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีซี่ส์เคาท์จากมากไปน้อยและถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าสปีซี่ส์เคาท์เท่ากันให้เรียงคำตอบตามค่า Crowding Distance

จากมากไปน้อย ถ้าค่า Crowding Distance มีค่าเท่ากัน ให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 จากน้อยไปมากตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 7.17

ตารางที่ 7.17 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
5	3.3333	0.1405	1	infinity	3
2	3.4286	0.0319	1	infinity	3
6	3.4286	0.0524	2	infinity	2
8	3.5000	0.0422	2	infinity	2
3	3.5000	0.0650	3	infinity	1

ทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) โดยเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเท่านั้น ได้ผลดังตารางที่ 7.18 – 7.21

ตารางที่ 7.18 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	5	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
1	2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]

ตารางที่ 7.19 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	5	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
1	2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]

ตารางที่ 7.20 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	5	[2 2 2 1 1 1 4 1 3 3 3 4]
1	2	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 4 3 4]

ตารางที่ 7.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	5	2	4	3.3333	0.1405
1	2	2	4	3.4286	0.0319

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น 5 ตัว (Popsize) เพื่อจะใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบต่อไป โดยจะทำการเลือกจากสตริงคำตอบทที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) ถ้าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใน Elitist น้อยกว่า Popsize ที่ต้องการ จะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากการเรียงกันของสตริงคำตอบในขั้นตอนก่อนการหา Elitist (ตารางที่ 7.17) ที่ไม่ซ้ำกันให้ครบจำนวน Popsize ตัว ได้ผลดังตารางที่ 7.22

ตารางที่ 7.22 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
5	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]
6	[7 2 3 4 5 6 1 8 9 10 11 12]
8	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
3	[9 1 11 4 5 6 7 10 8 3 2 12]

7.3.9 การแก้ปัญหาในรอบถัดไป

การแก้ปัญหาในรอบที่ 2 จะทำการแก้ปัญหาเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาในรอบที่ 1 โดยนำสตริงคำตอบที่ได้จากรอบก่อนหน้ามาเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น ดังตารางที่ 7.23

ตารางที่ 7.23 สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้นในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]
3	[7 2 3 4 5 6 1 8 9 10 11 12]
4	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
5	[9 1 11 4 5 6 7 10 8 3 2 12]

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 7.24

ตารางที่ 7.24 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
3	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
4	[3 6 1 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
5	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 10 11 12]

จากลำดับขั้นงานข้างบนนำไปจัดลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 7.25 และนำไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ได้ดังตารางที่ 7.26

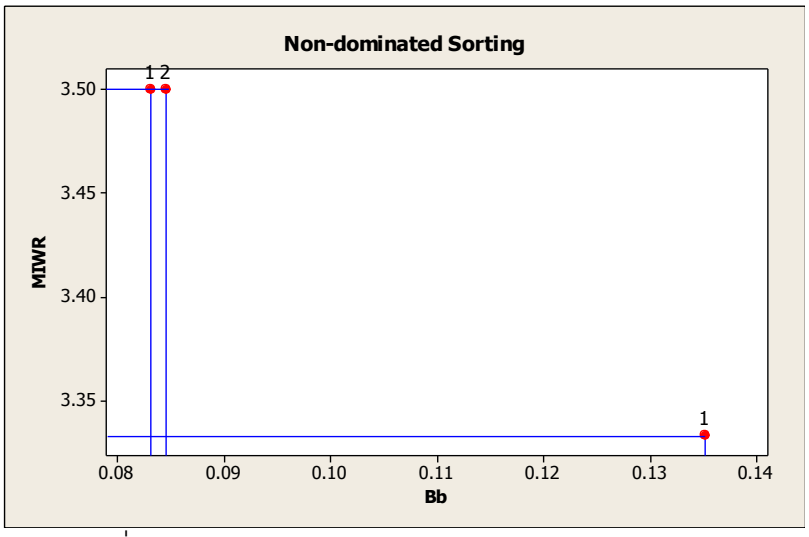
ตารางที่ 7.25 สถานีงานของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Workstation
1	[2 2 2 1 1 1 3 2 3 3 3 4]
2	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 4 5 6]
3	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 4 5 6]
4	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 3]
5	[1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 4 4]

ตารางที่ 7.26 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.1352
2	3	5	4.2857	0.1076
3	3	5	4.2857	0.1076
4	2	4	3.5000	0.0846
5	2	4	3.5000	0.0832

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 7.6 และคำนวณค่า Crowding Distance และค่า Species Count ได้ดังตารางที่ 7.27



ภาพที่ 7.6 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 7.27 ค่า Dummy Fitness ค่า Crowding Distance และค่า Species Count

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
1	3.3333	0.1352	1	infinity	2
4	3.5000	0.0846	2	infinity	1
5	3.5000	0.0832	1	infinity	2

ทำการหาค่าอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่ส์เคาท์ได้ผลดังตารางที่ 7.28

ตารางที่ 7.28 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

Species Count	No.	สตริงคำตอบ	λ_k	μ_k	แปลงค่าให้อยู่ในช่วง [0,1]		ความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชี่เคาท์ $P_{K,k}$
					P_λ	P_μ	
2	1	1	0.2500	0.7500	0.2500	0.7500	0.4000
	2	5					
1	1	4	0.7500	0.2500	0.7500	0.2500	0.4000

ทำการอพยพสตริงคำตอบและทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบให้สมบูรณ์ ได้ผลดังตารางที่ 7.29

ตารางที่ 7.29 สตริงคำตอบหลังผ่านการอพยพและการซ่อมแซมคำตอบในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]
4	[1 9 11 4 12 6 7 8 3 5 2 10]
5	[2 1 11 8 5 6 7 10 4 3 9 12]

สตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการอพยพแล้วจะเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน เพื่อให้สตริงมีความหลากหลายมากขึ้น สตริงคำตอบหลังผ่านการมิวเตชันได้ผลดังตารางที่ 7.30

ตารางที่ 7.30 สตริงคำตอบหลังจากผ่านการมิวเตชันในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	String Priority
4	[1 9 11 4 12 6 10 8 3 5 2 7]

นำประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น และประชากรคำตอบชั่วคราว ซึ่งเป็นสตริงคำตอบที่ได้ผ่านกระบวนการอพยพและกระบวนการมิวเตชันแล้วมารวมกันได้ผลดังตารางที่ 7.31

ตารางที่ 7.31 การรวมกันสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราวในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
	2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]
	3	[7 2 3 4 5 6 1 8 9 10 11 12]
	4	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
	5	[9 1 11 4 5 6 7 10 8 3 2 12]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]
	7	[1 9 11 4 12 6 7 8 3 5 2 10]
	8	[2 1 11 8 5 6 7 10 4 3 9 12]
	9	[1 9 11 4 12 6 10 8 3 5 2 7]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

จากสตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานข้างบนจะทำการแปลงเป็นลำดับขั้นงานได้ดังตารางที่ 7.32

ตารางที่ 7.32 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
	2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
	3	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
	4	[3 6 1 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
	5	[3 1 6 4 2 5 8 9 7 10 11 12]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12]
	7	[3 2 5 8 6 9 11 12 1 4 7 10]
	8	[3 6 1 4 2 5 8 7 9 11 12 10]
	9	[3 2 5 8 6 9 11 12 1 4 7 10]

จากลำดับขั้นงานข้างบนจะสามารถจัดงานลงสถานีงานได้ดังตารางที่ 7.33 และคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบได้ดังตารางที่ 7.34

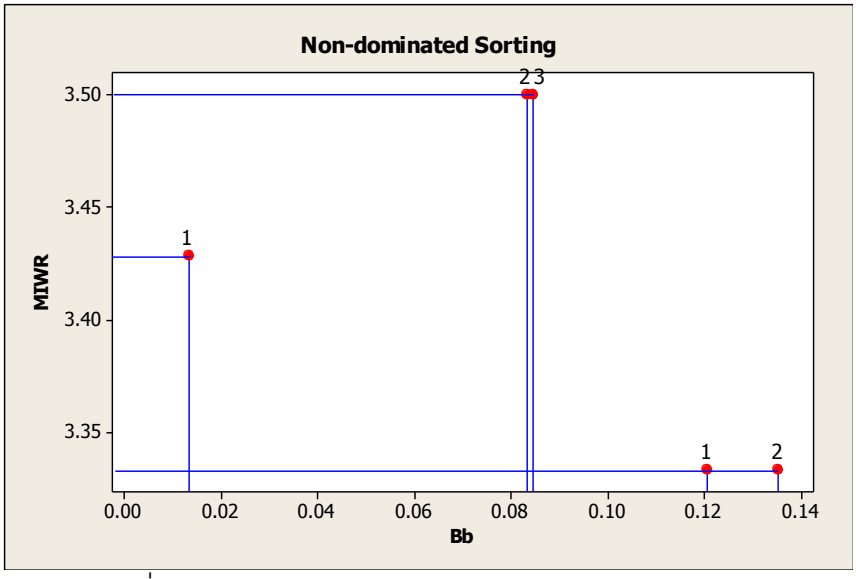
ตารางที่ 7.33 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	[2 2 2 1 1 1 3 2 3 3 3 4]
	2	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 4 5 6]
	3	[1 1 2 1 2 2 2 2 2 4 5 6]
	4	[2 1 1 1 2 2 2 1 4 4 3 3]
	5	[1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 4 4]
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]
	7	[1 2 2 2 1 1 1 2 3 3 4 5]
	8	[1 1 1 1 2 2 2 3 2 4 4 3]
	9	[1 2 1 2 1 1 3 4 3 3 6 6]

ตารางที่ 7.34 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกันในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.3333	0.1352
2	3	5	4.2857	0.1076
3	3	5	4.2857	0.1076
4	2	4	3.5000	0.0846
5	2	4	3.5000	0.0832
6	2	4	3.4286	0.0133
7	3	5	4.1667	0.0209
8	2	4	3.3333	0.1205
9	3	5	4.4444	0.0273

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ผลดังภาพที่ 7.7



ภาพที่ 7.7 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการแปลงเป็นค่าสปีชี่ส์เคาท์ จากนั้นจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชี่ส์เคาท์จากมากไปน้อยและถ้าสตริงคำตอบใดมีค่าสปีชี่ส์เคาท์เท่ากันให้เรียงคำตอบตามค่า Crowding Distance

จากมากไปน้อย ถ้าค่า Crowding Distance มีค่าเท่ากัน ให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 และ 4 จากน้อยไปมากตามลำดับ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 7.35

ตารางที่ 7.35 ค่า Species Count และลำดับของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Species Count
8	3.3333	0.1205	1	infinity	3
6	3.4286	0.0133	1	infinity	3
1	3.3333	0.1352	2	infinity	2
5	3.5000	0.0832	2	infinity	2
4	3.5000	0.0846	3	infinity	1

ทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบันไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) โดยเลือกเฉพาะสตริงคำตอบที่มีสปีชี่ส์เคาท์สูงสุดเท่านั้น ไปรวมกับสตริงคำตอบตัวเดิมในรอบก่อนหน้า ได้ผลดังตารางที่ 7.36 – 7.39

ตารางที่ 7.36 สตริงคำตอบทีนำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
1	5	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
1	2	[7 2 3 4 5 6 1 8 11 10 9 12]
2	8	[2 1 11 8 5 6 7 10 4 3 9 12]
2	6	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]

หมายเหตุ : ทำการตัดสตริงคำตอบที่มีค่าสิทธิในการเลือกงานที่ซ้ำกันออก

ตารางที่ 7.37 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	5	[2 5 8 1 4 7 10 3 6 9 11 12]
1	2	[1 4 3 6 2 5 9 11 12 8 7 10]
2	8	[3 6 1 4 2 5 8 7 9 11 12 10]
2	6	[1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12]

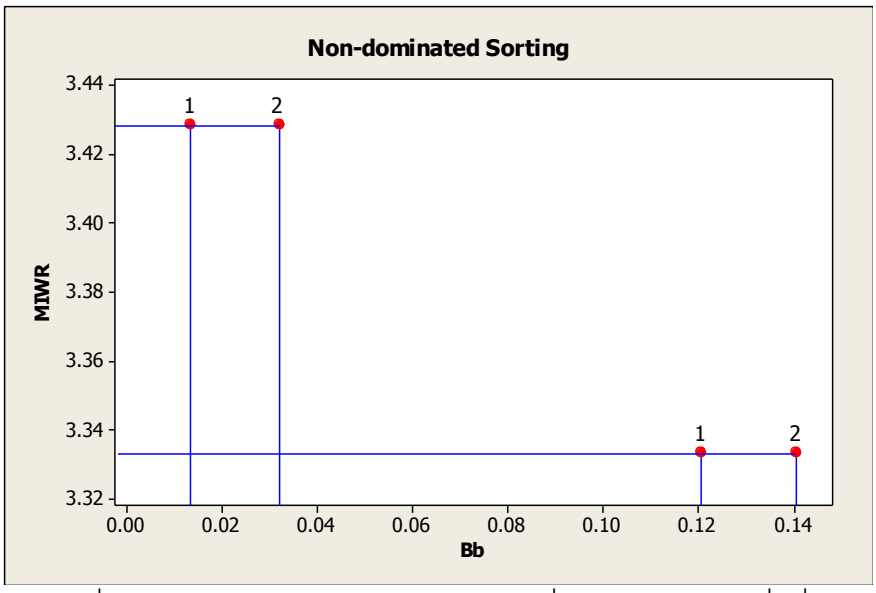
ตารางที่ 7.38 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
1	5	[2 2 2 1 1 1 4 1 3 3 3 4]
1	2	[1 1 2 1 2 2 1 4 4 4 3 4]
2	8	[1 1 1 1 2 2 2 3 2 4 4 3]
2	6	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]

ตารางที่ 7.39 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	5	2	4	3.3333	0.1405
1	2	2	4	3.4286	0.0319
2	8	2	4	3.3333	0.1205
2	6	2	4	3.4286	0.0133

เมื่อได้สตริงคำตอบที่นำมารวมกันไว้ในสถานที่รวมคำตอบแล้ว จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting หาค่า Dummy Fitness เพื่อปรับปรุงและเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ได้ดังภาพที่ 7.8 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ผลดังตารางที่ 7.40



ภาพที่ 7.8 การกำหนดค่า Dummy Fitness เพื่อหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 7.40 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance	Selection
1	5	3.3333	0.1405	2	infinity	
1	2	3.4286	0.0319	2	infinity	
2	8	3.3333	0.1205	1	infinity	Elitist
2	6	3.4286	0.0133	1	infinity	Elitist

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting และ Crowding Distance จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อไปเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไปดังตารางที่ 7.41 – 7.44

ตารางที่ 7.41 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของ (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
2	8	[2 1 11 8 5 6 7 10 4 3 9 12]
2	6	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]

ตารางที่ 7.42 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
2	8	[3 6 1 4 2 5 8 7 9 11 12 10]
2	6	[1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12]

ตารางที่ 7.43 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
2	8	[1 1 1 1 2 2 2 3 2 4 4 3]
2	6	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]

ตารางที่ 7.44 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	8	2	4	3.3333	0.1205
2	6	2	4	3.4286	0.0133

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น 5 ตัว (Popsize) เพื่อจะใช้เป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบต่อไป โดยจะทำการเลือกจากสตริงคำตอบทที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ในสถานที่รวมคำตอบ (Elitist) ถ้าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ใน Elitist น้อยกว่า Popsize ที่ต้องการ จะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากการเรียงกันของสตริงคำตอบในขั้นตอนก่อนการหา Elitist (ตารางที่ 7.35) ที่ไม่ซ้ำกันให้ครบจำนวน Popsize ตัว ได้ผลดังตารางที่ 7.45

ตารางที่ 7.45 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
8	[2 1 11 8 5 6 7 10 4 3 9 12]
6	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]
1	[2 9 1 8 12 6 7 4 3 5 11 10]
5	[9 1 11 4 5 6 7 10 8 3 2 12]
4	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]

7.3.10 การค้นหาเฉพาะที่

การค้นหาเฉพาะที่ของสตริงคำตอบที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ เป็นการปรับปรุงคำตอบให้มีความหลากหลายมากขึ้น เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีไปหรือยังไม่เจอคำตอบที่ดี การค้นหาคำตอบเฉพาะที่จะช่วยหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงที่ดียิ่งขึ้น โดยจำนวนของสตริงคำตอบที่จะนำมาทำการค้นหาเฉพาะที่จะขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่ (P_{LS}) ดังนั้นจำนวนของสตริงคำตอบที่นำมาทำการค้นหาเฉพาะที่ (N_{LS}) จะมีจำนวน Popsizes x P_{LS} ตัว ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้วิธี 2-Opt ในการทำการค้นหาเฉพาะที่ และความถี่ที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่ทุกๆ 5 รอบ หากคำตอบที่ได้หลังจากการค้นหาเฉพาะที่ไม่ดีขึ้นก็จะทำการค้นหาเฉพาะที่วนซ้ำอีกครั้ง จนกระทั่งการวนซ้ำครบจำนวน 5 ครั้งติดกันแล้วไม่สามารถปรับปรุงคำตอบให้ดีขึ้นได้ก็จะทำการหยุดการการค้นหาเฉพาะที่ในครั้งนั้นๆ

ทำการแก้ปัญหาในรอบถัดไปเช่นเดียวกับการแก้ปัญหาในรอบก่อนหน้า และทำการ Update และเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในทุกๆ รอบ (Elitist) จนถึงรอบที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่ ซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดว่าจะทำการค้นหาเฉพาะที่ทุกๆ 5 รอบ จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่จะไปทำการคัดเลือกไปเข้าสู่การค้นหาเฉพาะที่ในรอบที่ 5 แสดงดังตารางที่ 7.46 – 7.49

ตารางที่ 7.46 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	String Priority
5	1	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
5	2	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 5 9 10]
5	3	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]

ตารางที่ 7.47 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
5	1	[3 6 1 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
5	2	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
5	3	[1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12]

ตารางที่ 7.48 สถานีงานของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Workstation
5	1	[1 1 1 1 2 2 2 2 2 4 3 3]
5	2	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
5	3	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]

ตารางที่ 7.49 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 5 (Elitist)

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
5	1	2	4	3.2000	0.1331
5	2	2	4	3.3333	0.0293
5	3	2	4	3.4286	0.0133

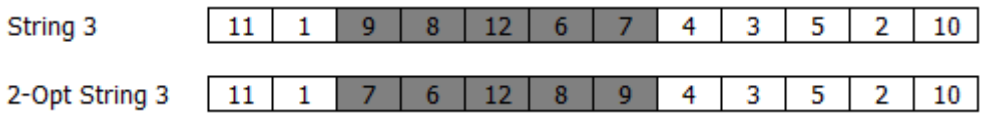
ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่ โดยจะทำการสุ่มค่า r ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทุกตัว สตริงคำตอบที่จะนำมาทำการค้นหาเฉพาะที่จะมาจากสตริงคำตอบที่สุ่มค่า r ได้น้อยกว่าค่า $P_{LS} = 0.3$ สตริงคำตอบที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่จึงมีประมาณ 30% หรือมีค่าประมาณ 0.3x3 = 0.9 หรือ 1 ตัว

ตารางที่ 7.50 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการค้นหาเฉพาะที่

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]	0.3981	-
2	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 5 9 10]	0.4813	-
3	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]	0.2149	select

จากตารางที่ 7.50 สตริงคำตอบที่ 3 ถูกเลือกให้ทำการค้นหาเฉพาะที่เพื่อเปลี่ยนแปลงเส้นทางการเชื่อมต่อของคำตอบโดยการลบเส้นทางการเชื่อมต่อออกไป 2 เส้นทาง จากนั้นนำเส้นทางนี้ไปเชื่อมต่อกับเส้นทางอื่นแทน

ทำการค้นหาเฉพาะที่สตริงคำตอบที่ 3 โดยสุ่มตำแหน่งที่จะทำการสลับได้ตำแหน่งที่ 3 และ 7 จากนั้นทำการเปลี่ยนเส้นทางของการเชื่อมต่อของตัวเลขทั้ง 2 นี้ ดังภาพที่ 7.9



ภาพที่ 7.9 การมิวเตชันด้วยวิธี 2-Opt สตริงคำตอบที่ 3

นำสตริงคำตอบก่อนการค้นหาเฉพาะที่รวมกับสตริงคำตอบที่ได้จากหลังจากการค้นหาเฉพาะที่ ได้ผลดังตารางที่ 7.51

ตารางที่ 7.51 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
	2	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 5 9 10]
	3	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]
สตริงคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่	4	[11 1 7 6 12 8 9 4 3 5 2 10]

ทำการแปลงค่าจากสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานเป็นลำดับขั้นงาน จากนั้นนำมาจัดลงสถานีงานและนำมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 7.52 - 7.54

ตารางที่ 7.52 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[3 6 1 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
	2	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
	3	[1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12]
สตริงคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่	4	[1 3 6 4 2 5 7 8 10 9 11 12]

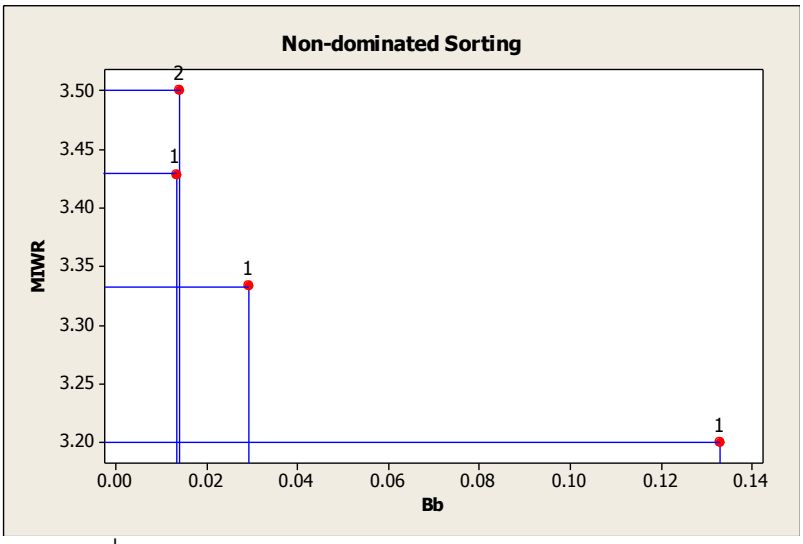
ตารางที่ 7.53 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[1 1 1 1 2 2 2 2 2 4 3 3]
	2	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
	3	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]
สตริงคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่	4	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]

ตารางที่ 7.54 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.2000	0.1331
2	2	4	3.3333	0.0293
3	2	4	3.4286	0.0133
4	2	4	3.5000	0.0142

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 7.10 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ดังตารางที่ 7.55



ภาพที่ 7.10 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 7.55 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.2000	0.1331	1	infinity
2	3.3333	0.0293	1	2
3	3.4286	0.0133	1	infinity
4	3.5000	0.0142	2	infinity

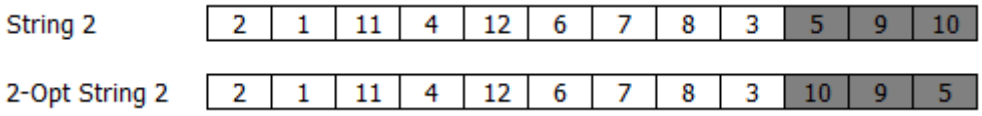
จากการค้นหาเฉพาะที่ในการวนซ้ำครั้งที่ 1 พบว่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าความแข็งที่ไม่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 1) คือสตริงคำตอบที่ 1, 2 และ 3 ซึ่งเป็นสตริงคำตอบเดิมก่อนจะทำการค้นหาเฉพาะที่ เนื่องจากคำตอบที่ดีที่สุดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราจะทำการค้นหาเฉพาะที่วนซ้ำครั้งที่ 2 ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกับการวนซ้ำในครั้งที่ 1

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่ในการวนซ้ำครั้งที่ 2 ได้ผลดังตารางที่ 7.56

ตารางที่ 7.56 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อจะนำไปทำการค้นหาเฉพาะที่ในการวนซ้ำครั้งที่ 2

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]	0.7861	-
2	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 5 9 10]	0.2013	select
3	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]	0.9011	-

จากตารางที่ 7.56 สตริงคำตอบที่ 2 ถูกเลือกให้ทำการค้นหาเฉพาะที่ ทำการสุ่มตำแหน่งที่จะทำการสลับได้ตำแหน่งที่ 10 และ 12 จากนั้นทำการเปลี่ยนเส้นทางของการเชื่อมต่อของตัวเลขทั้ง 2 นี้ ดังภาพที่ 7.11



ภาพที่ 7.11 การมิวเตชันด้วยวิธี 2-Opt สตริงคำตอบที่ 2

นำสตริงคำตอบก่อนการค้นหาเฉพาะที่รวมกับสตริงคำตอบที่ได้จากหลังจากการค้นหาเฉพาะที่ ได้ผลดังตารางที่ 7.57

ตารางที่ 7.57 สตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น	1	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
	2	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 5 9 10]
	3	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]
สตริงคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่	4	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 10 9 5]

ทำการแปลงค่าจากสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานเป็นลำดับขั้นงาน จากนั้นนำมาจัดลงสถานีงานและนำมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 7.58 – 7.60

ตารางที่ 7.58 ลำดับขั้นงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Task Sequence
สตริงคำตอบเริ่มต้น	1	[3 6 1 4 2 5 9 11 12 8 7 10]
	2	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]
	3	[1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12]
สตริงคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่	4	[3 6 1 4 2 5 8 7 10 9 11 12]

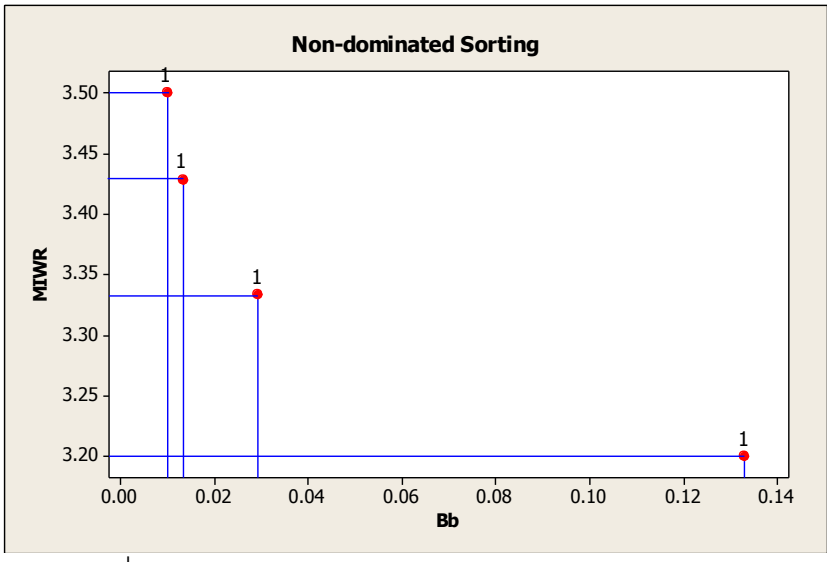
ตารางที่ 7.59 สถานีงานของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	Workstation
สตริงคำตอบเริ่มต้น	1	[1 1 1 1 2 2 2 2 2 4 3 3]
	2	[2 1 1 1 2 2 2 3 3 4 4 4]
	3	[1 2 1 1 2 2 2 4 3 4 4 4]
สตริงคำตอบหลังทำการค้นหาเฉพาะที่	4	[2 1 1 1 2 2 2 3 4 3 3 4]

ตารางที่ 7.60 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่นำมารวมกัน

สตริงคำตอบที่	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
1	2	4	3.2000	0.1331
2	2	4	3.3333	0.0293
3	2	4	3.4286	0.0133
4	2	4	3.5000	0.0100

ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting เพื่อหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ได้ดังภาพที่ 7.12 และคำนวณค่า Crowding Distance ได้ดังตารางที่ 7.61



ภาพที่ 7.12 การกำหนดค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบ

ตารางที่ 7.61 ค่า Dummy Fitness และค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	3.2000	0.1331	1	infinity
2	3.3333	0.0293	1	1.7352
3	3.4286	0.0133	1	0.7124
4	3.5000	0.0100	1	infinity

จากการค้นหาเฉพาะที่ในการวนซ้ำครั้งที่ 2 พบว่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าความแข็งที่ไม่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 1) คือสตริงคำตอบที่ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งสตริงคำตอบที่ผ่านการค้นหาเฉพาะที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่เพิ่มเข้ามา เมื่อคำตอบที่ได้จากการค้นหาเฉพาะที่ในการวนซ้ำครั้งที่ 2 ได้คำตอบที่ดีขึ้น เราจะหยุดการค้นหาเฉพาะที่และนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากรอบนี้จำนวน 5 ตัว (Popsize) ไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในเจนเนอเรชันถัดไป ในรอบนี้สตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) มี 4 สตริงคำตอบซึ่งน้อยกว่า Popsize ที่ต้องการ ดังนั้นจะทำการเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากการเรียงกันของสตริงคำตอบในขั้นตอนก่อนกระบวนการค้นหาเฉพาะที่ที่ไม่ซ้ำกันให้ครบจำนวน Popsize ตัว ได้ผลดังตารางที่ 7.62

ตารางที่ 7.62 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[2 1 3 4 12 6 7 8 11 5 9 10]
2	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 5 9 10]
3	[11 1 9 8 12 6 7 4 3 5 2 10]
4	[2 1 11 4 12 6 7 8 3 10 9 5]
5	[2 1 3 12 4 6 7 11 8 5 9 10]

7.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธี BBO-LS

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสม ที่จะทำให้ผลการทดลองที่ได้เข้าใกล้คำตอบที่ดีมากที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ของวิธี BBO-LS มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัวดังนี้

7.4.1 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนประชากรเบื้องต้น หมายถึง จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน จำนวนประชากรที่มากเกินไปอาจทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบมาก แต่ถ้าจำนวนประชากรน้อยเกินไปคำตอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม การกำหนดจำนวนประชากรที่เหมาะสมจะช่วยให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้จำนวนประชากรเบื้องต้นเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang and Katayama, 2008)

7.4.2 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto Based Approach) เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Non-dominated Sorting (Goldberg,1989)

7.4.3 วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกของประชากรคำตอบที่อยู่ในลำดับเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Crowding Distance (Dep et al., 2002)

7.4.4 การมิวเตชัน

การมิวเตชัน (Mutation Method) เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดสตริงคำตอบใหม่ขึ้น เป็นการป้องกันการสูญเสียคำตอบที่อาจจะไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ การมิวเตชันอาจช่วยให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมและทำให้คำตอบสามารถหลุดออกจากคำตอบเฉพาะที่และให้คำตอบที่ดี ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation (Hwang, Katayama and Gen, 2008) และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันที่เท่ากับ 0.1

7.4.5 วิธีการและค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่

การค้นหาเฉพาะที่ในงานวิจัยนี้จะทำการค้นหาแบบปรับปรุงดีที่สุด (Best Improvement) โดยจะนำสตริงคำตอบที่ดีที่ได้ในเจนเนอเรชันนั้นๆ มาทำการค้นหาเฉพาะที่ด้วยวิธี 2-Opt ในการค้นหาเฉพาะที่ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพ (Kumar and

Singh, 2007) ความถี่ที่จะทำการค้นหาเฉพาะที่ทุกๆ 5 รอบ และค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่เท่ากับ 0.3

7.4.6 รูปแบบการอพยพ

การอพยพ (Migration) เป็นการแบ่งปันคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อให้เกิดการปรับปรุงสตริงคำตอบ ในงานวิจัยนี้จะทำใช้รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

7.4.7 ผลกระทบจากการเรียนรู้

ผลกระทบจาการเรียนรู้ (Learning Effect) เป็นทฤษฎีที่ตั้งสมมติฐานว่าการผลิตจำนวนมากจะทำให้เกิดผลกระทบจากการเรียนรู้ขึ้น ซึ่งทำให้เวลาการทำงานของพนักงานลดลง โดยได้นำเข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิตเพื่อลดช่องว่างของการจัดตารางตามทฤษฎีและเวลาการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเรียนรู้แบบ Sum-Processing Time Based Learning Effect (Kuo and Yang ,2006a,b,c) และกำหนดค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80% (Arditi et al., 2001)

7.5 สรุปท้ายบท

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based Optimization with Local Search; BBO-LS) ซึ่งเป็นการค้นหาคำตอบแบบฮิวริสติกที่ได้พัฒนามาจากวิธี BBO มีหลักการการค้นหาคำตอบเช่นเดียวกับวิธี BBO แต่มีการเพิ่มการค้นหาเฉพาะที่เข้าไปหลังจากกระบวนค้นหาที่ดีที่สุดในทุกๆ รอบที่กำหนด โดยการเพิ่มการค้นหาเฉพาะที่เข้าไปนี้เป็นการปรับปรุงคำตอบให้มีความหลากหลายมากขึ้น โดยจะทำการค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียง โดยหวังว่าการค้นหาเฉพาะที่อาจช่วยให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมและทำให้คำตอบที่ดีขึ้น จึงนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งคำตอบที่ได้สามารถยอมรับได้ แต่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบอาจจะเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 8

การเปรียบเทียบผลการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

ในบทนี้จะนำเสนอผลของการเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้ทดลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้แก่ วิธิเจนเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ เพื่อให้ทราบว่าอัลกอริทึมใดให้ผลการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

8.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการค้นหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมจำเป็นจะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ ให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้เข้าใกล้คำตอบที่ดีมากที่สุด ซึ่งได้กล่าวถึงมาแล้วในบทก่อนหน้า ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมจะทำการทดลองด้วยปัญหา และจำนวนเจนเนเรชันที่เหมือนกันดังนี้

8.1.1 ปัญหาในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปัญหาที่แตกต่างกัน 5 ปัญหาเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) ซึ่งปัญหาที่ 5 เป็นกรณีศึกษาจริงจากโรงงานธนบุรีประกอบรถยนต์จำกัด ดังตารางที่ 8.1

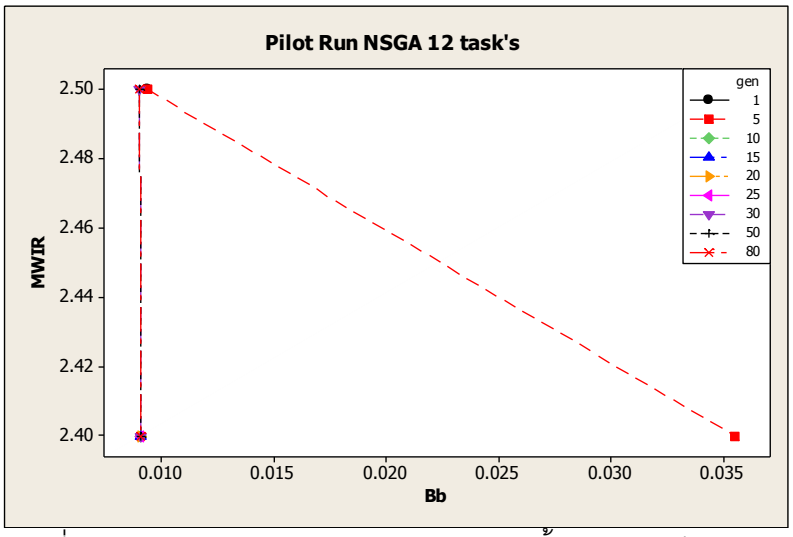
ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

ปัญหา	ความสัมพันธ์ก่อน-หลัง	จำนวนผลิตภัณฑ์ (ชนิด)	จำนวนงาน	รอบเวลาการทำงาน (นาที)
1	Kim et al. (2000)	2	12	5, 7, 8
2	Lee et al. (2001)	3	65	326, 490, 544
3	Bartholdi (1993)	4	148	204, 306, 408
4	Lee et al. (2001)	4	205	1888, 2266, 2454
5	Case Study	2	183	22

8.1.2 จำนวนเจนเนอเรชัน

จำนวนเจนเนอเรชัน คือ จำนวนรอบของการค้นหาคำตอบตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนสิ้นสุดกระบวนการ การกำหนดจำนวนเจนเนเรชันที่มากเกินไปอาจทำให้เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบนานเกินไปโดยไม่จำเป็น แต่ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันน้อยเกินไปคำตอบที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาจำนวนเจนเนอเรชันที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบของแต่ละปัญหา โดยได้กำหนดให้มีจำนวนรอบในการทดลองเท่ากับ 1000 รอบ เพื่อทำการหาค่าเหมาะสมของวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ จำนวนคู่สถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ที่ทำให้ได้คำตอบซ้ำเดิมจำนวน 100 รอบ ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาจำนวนเจนเนอเรชันจะได้มาอย่างสุ่ม ผลการทดลองในการหาจำนวนเจนเนอเรชันของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา ได้ผลดังนี้

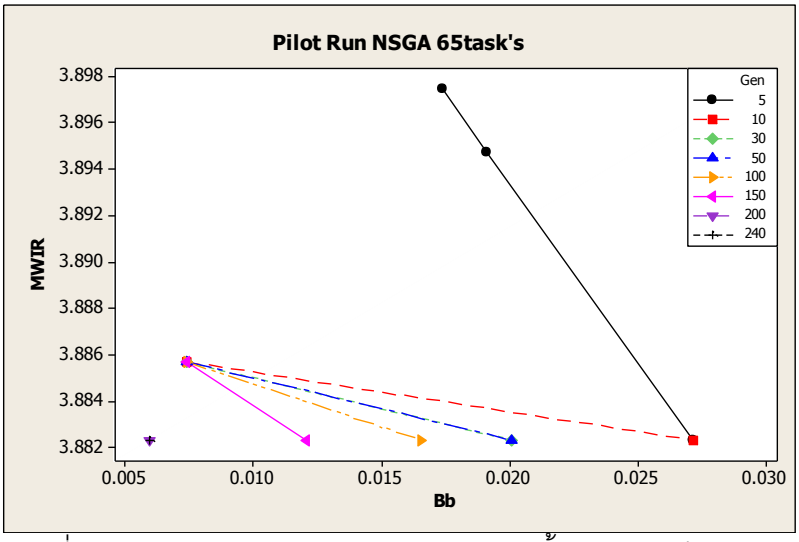
ปัญหา 12 ขั้นงาน (Kim et al. 2000) :



ภาพที่ 8.1 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 12 ขั้นงานของวิธี NSGAII

จากภาพที่ 8.1 พบว่าในปัญหา 12 ขั้นงาน เริ่มเกิดการซ้ำเดิมของคำตอบที่เจนเนอเรชันที่ 30

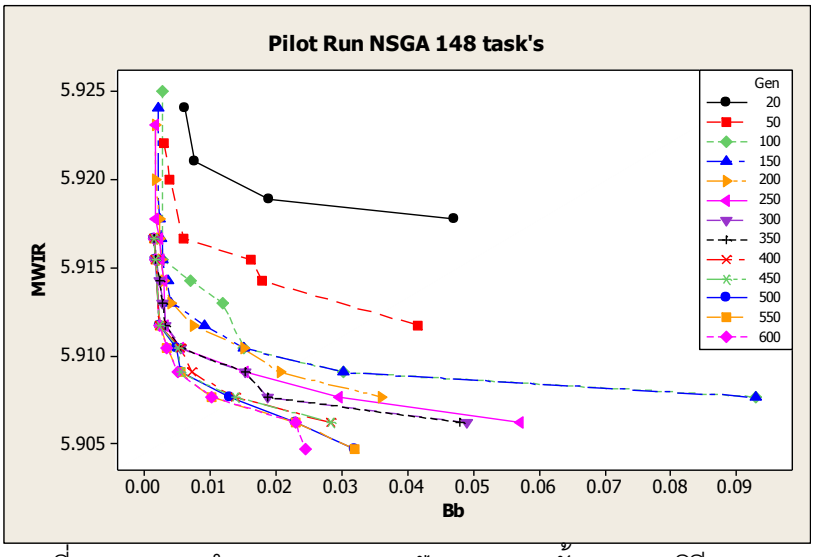
ปัญหา 65 ขั้นงาน (Lee et al. 2001) :



ภาพที่ 8.2 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 65 ขั้นงานของวิธี NSGAII

จากภาพที่ 8.2 พบว่าในปัญหา 65 ขั้นงาน เริ่มเกิดการซ้ำเดิมของคำตอบที่เจนเนอเรชันที่ 195

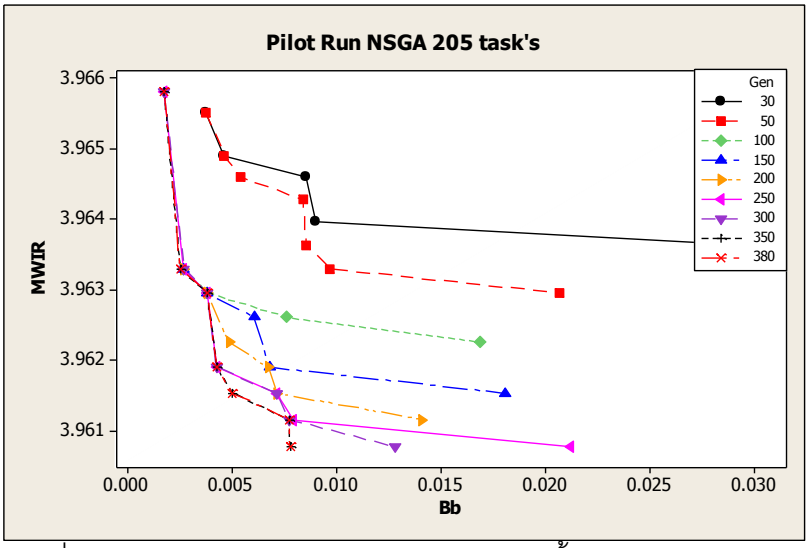
ปัญหา 148 ขั้นงาน (Bartholdi 1993) :



ภาพที่ 8.3 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 148 ขั้นงานของวิธี NSGAII

จากภาพที่ 8.3 พบว่าในปัญหา 148 ขั้นงาน เริ่มเกิดการซ้ำเดิมของคำตอบที่เจนเนอเรชันที่ 563

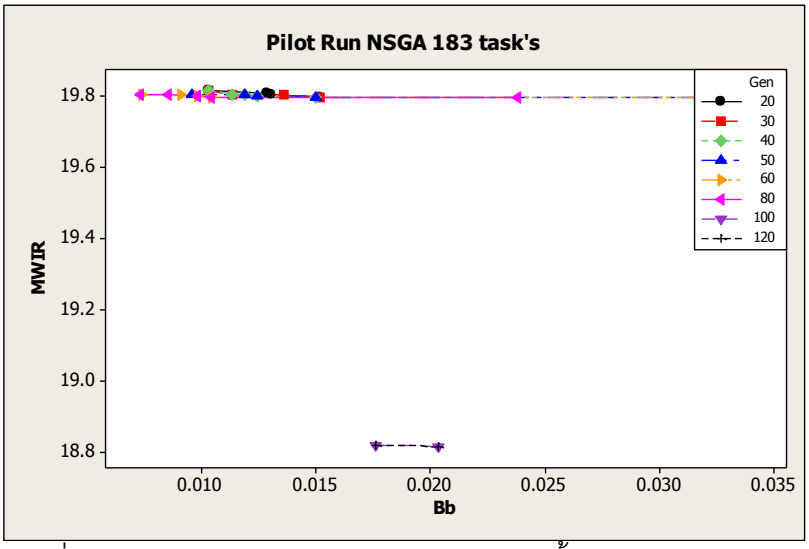
ปัญหา 205 ขั้นงาน (Bartholdi 1993) :



ภาพที่ 8.4 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 205 ขั้นงานของวิธี NSGAII

จากภาพที่ 8.4 พบว่าในปัญหา 205 ขั้นงาน เริ่มเกิดการซ้ำเดิมของคำตอบที่เจนเนอเรชันที่ 332

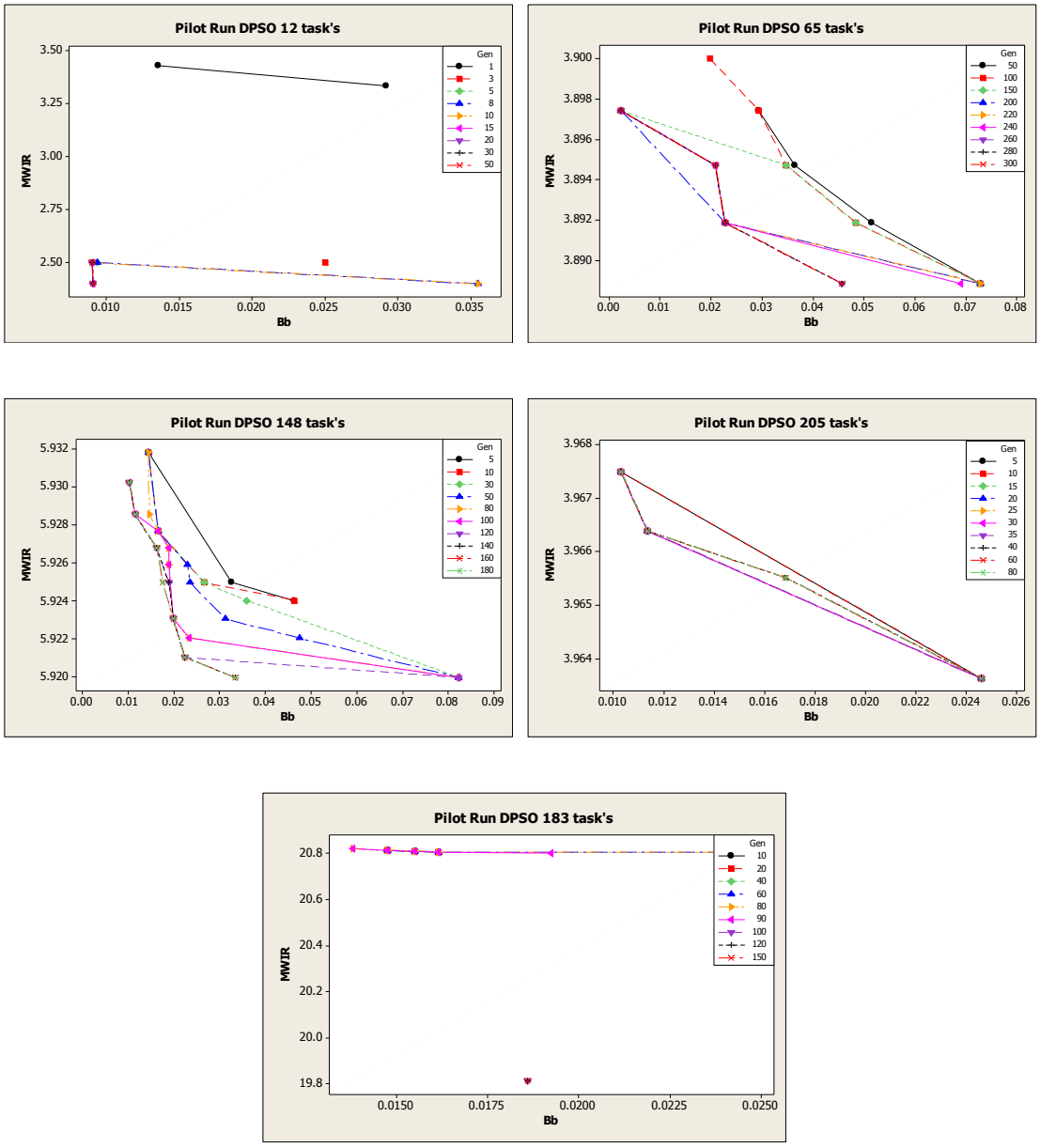
ปัญหา 183 ขั้นงาน (Bartholdi 1993) :



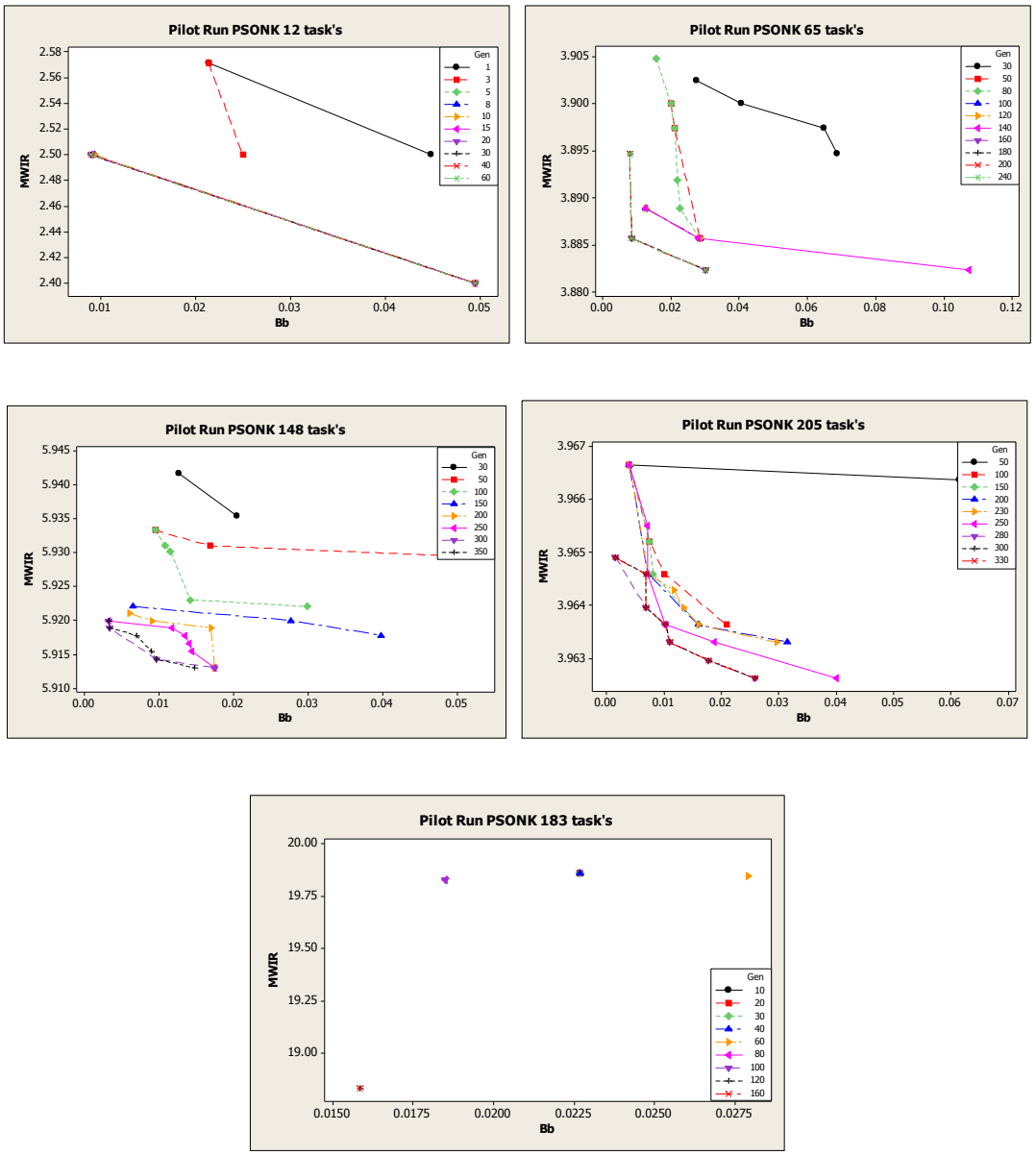
ภาพที่ 8.5 ผลการทำ Pilot Run ของปัญหา 183 ขั้นงานของวิธี NSGAII

จากภาพที่ 8.5 พบว่าในปัญหา 183 ขั้นงาน เริ่มเกิดการซ้ำเดิมของคำตอบที่เจนเนอเรชันที่ 92

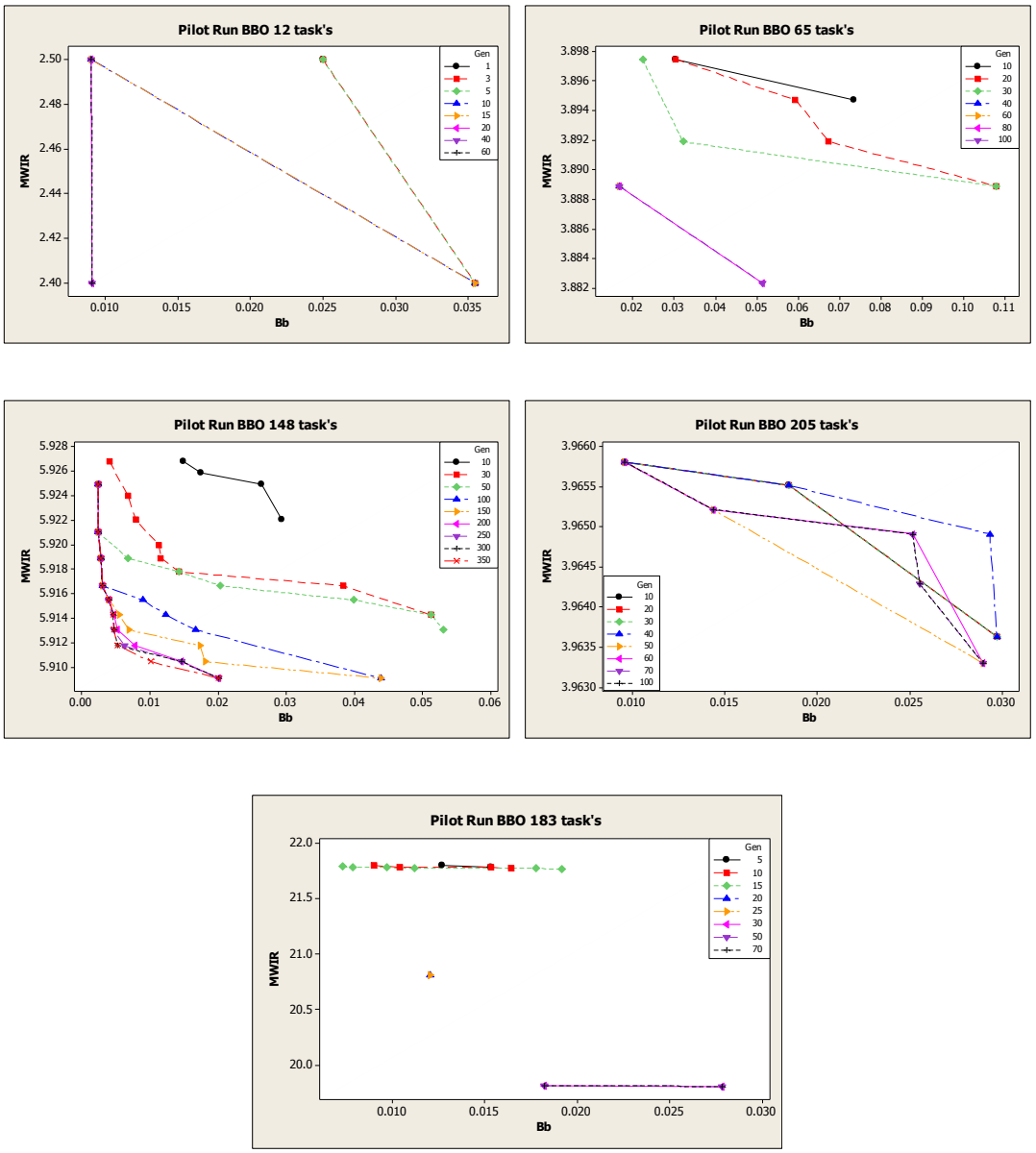
ทำการทดลองเพื่อหาจำนวนเจนเนอเรชันของแต่ละอัลกอริทึมได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 8.6 – 8.9



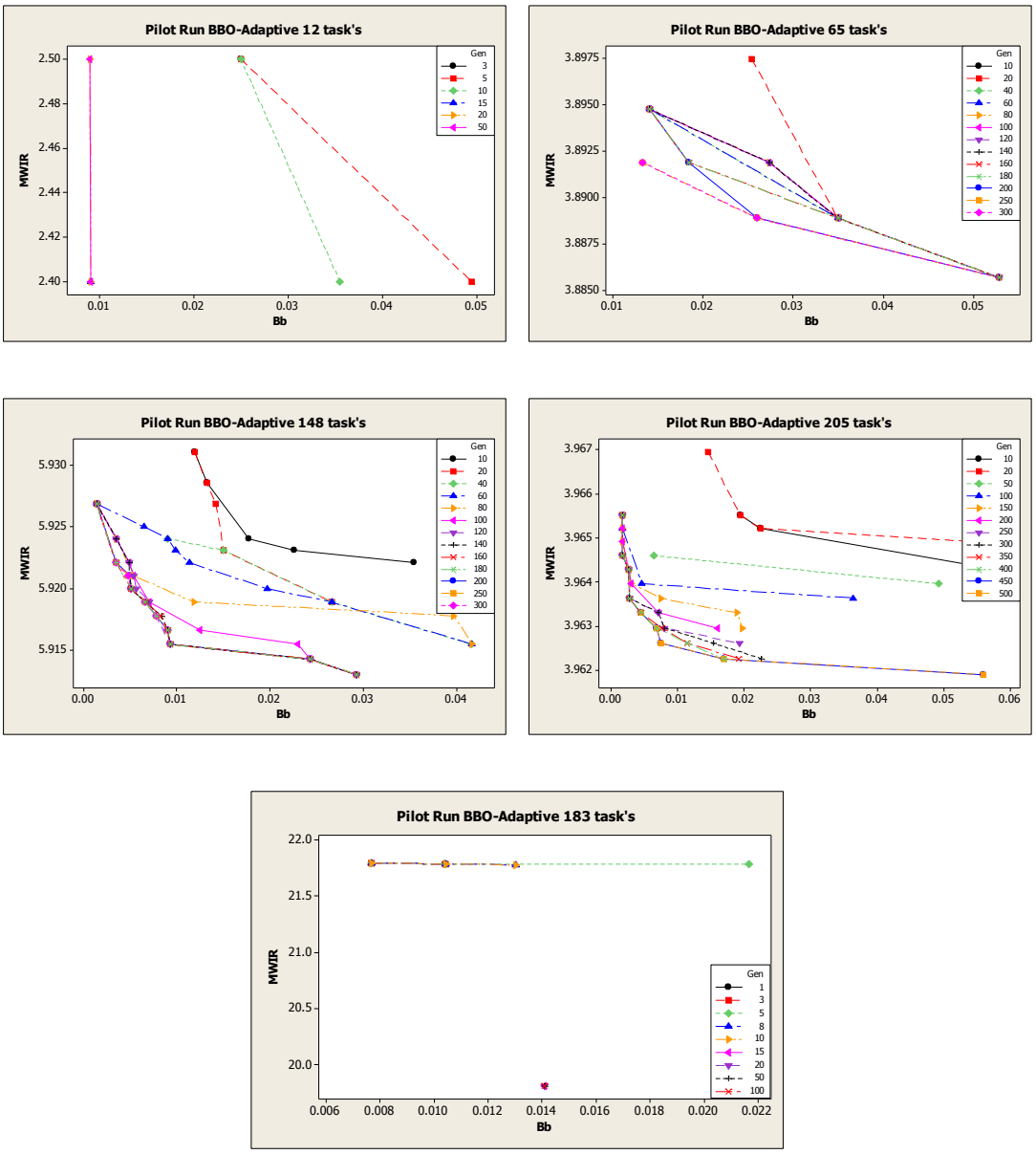
ภาพที่ 8.6 การทำ Pilot Run ของวิธี DPSO ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา



ภาพที่ 8.7 การทำ Pilot Run ของวิธี PSONK ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา



ภาพที่ 8.8 การทำ Pilot Run ของวิธี BBO ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา



ภาพที่ 8.9 การทำ Pilot Run ของวิธี BBO-LS ของปัญหาทั้ง 5 ปัญหา

จากการทดลองจะได้จำนวนเจอเนอเรชันที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปัญหา ดังตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 จำนวนเจนเนอเรชันที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบต่างๆ ในแต่ละปัญหา

ปัญหา	ความสัมพันธ์ก่อน-หลัง	จำนวนผลิตภัณฑ์ (ชนิด)	จำนวนงาน	จำนวนเจนเนอเรชัน				
				NSGAII	DPSO	PSONK	BBO	BBO-A
1	Kim et al. (2000)	2	12	30	11	11	18	18
2	Lee et al. (2001)	3	65	195	56	193	67	213
3	Bartholdi (1993)	4	148	563	149	400	301	260
4	Lee et al. (2001)	4	205	332	36	293	63	429
5	Case Study	2	183	92	100	114	29	14

จากตารางแสดงจำนวนเจนเนอเรชันที่เหมาะสมของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบต่างๆ เราจะใช้จำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่ได้ในแต่ละปัญหาเป็นตัวแทนของเจนเนอเรชันที่จะใช้ในการทดลองและรวมกับค่าเผื่อ เพื่อให้มีค่าเจนเนอเรชันที่เหมาะสม ดังตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 จำนวนเจนเนอเรชันที่เหมาะสมของแต่ละปัญหา

ปัญหา	ความสัมพันธ์ก่อน-หลัง	จำนวนผลิตภัณฑ์ (ชนิด)	จำนวนงาน	จำนวนเจนเนอเรชัน
1	Kim et al. (2000)	2	12	100
2	Lee et al. (2001)	3	65	400
3	Bartholdi (1993)	4	148	800
4	Lee et al. (2001)	4	205	800
5	Case Study	2	183	400

8.1.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึม

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวไว้ในบทก่อนหน้าของแต่ละอัลกอริทึม สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8.4 – 8.8

ตารางที่ 8.4 พารามิเตอร์สำหรับวิธี NSGAII

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Hwang and Katayama (2008)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Pareto Based Approach	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
วิธีการคัดเลือกสตริงคำตอบ	Binary Tournament Selection	ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553)
วิธีการครอสโอเวอร์	Weight Mapping Crossover (WMX)	Hwang and Katayama (2008)
ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	Pc = 0.9 สำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	Pc = 0.9 สำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	Pc = 0.9 สำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	Pc = 0.7 สำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	Pc = 0.8 สำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Hwang and Katayama (2008)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	Pm = 0.2 สำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	Pm = 0.4 สำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	Pm = 0.1 สำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	Pm = 0.1 สำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	Pm = 0.2 สำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	
ผลกระทบจากการเรียนรู้	LR = 80%	Arditi et al. (2001)
จำนวนรอบการทำงาน	100 รอบสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	400 รอบสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	400 รอบสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	

ตารางที่ 8.5 พารามิเตอร์สำหรับวิธี DPSO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Hwang and Katayama (2008)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Pareto Based Approach	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาค	4 ฝูง 25 อนุภาค สำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	4 ฝูง 25 อนุภาค สำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	5 ฝูง 20 อนุภาค สำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	10 ฝูง 10 อนุภาค สำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	4 ฝูง 25 อนุภาค สำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	
น้ำหนักการหน่วง (inertia Weight)	W = 1	Liao et al. (2007) ; Tseng and Liao (2008)
Cognitive Component	C_1 = 0.1	Wattanapornprom et al. (2009)
Social Component	C_2 = 0.1	Wattanapornprom et al. (2009)
ผลกระทบจากการเรียนรู้	LR = 80%	Arditi et al. (2001)
จำนวนรอบการทำงาน	100 รอบสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	400 รอบสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	400 รอบสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	

ตารางที่ 8.6 พารามิเตอร์สำหรับวิธี PSONK

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Hwang and Katayama (2008)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Pareto Based Approach	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาค	10 ฝูง 10 อนุภาค สำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	10 ฝูง 10 อนุภาค สำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	10 ฝูง 10 อนุภาค สำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	10 ฝูง 10 อนุภาค สำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	10 ฝูง 10 อนุภาค สำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	
น้ำหนักการหน่วง (inertia Weight)	W = 1	Liao et al. (2007) ; Tseng and Liao (2008)
Cognitive Component	C_1 = 0.1	Wattanapornprom et al. (2009)
Social Component	C_2 = 0.1	Wattanapornprom et al. (2009)
ผลกระทบจากการเรียนรู้	LR = 80%	Arditi et al. (2001)
จำนวนรอบการทำงาน	100 รอบสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	400 รอบสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	400 รอบสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	

ตารางที่ 8.7 พารามิเตอร์สำหรับวิธี BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Hwang and Katayama (2008)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Pareto Based Approach	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่นของสตรงคำตอบ	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
รูปแบบการอพยพ	Linear สำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	Linear สำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	Linear สำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	Linear สำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	Linear สำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Hwang and Katayama (2008)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	Pm = 0.01	Ma (2010)
ผลกระทบจากการเรียนรู้	LR = 80%	Arditi et al. (2001)
จำนวนรอบการทำงาน	100 รอบสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	400 รอบสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	400 รอบสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	

ตารางที่ 8.8 พารามิเตอร์สำหรับวิธี BBO-LS

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	แหล่งอ้างอิง
จำนวนประชากร	100	Hwang and Katayama (2008)
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด	Pareto Based Approach	Goldberg (1989)
วิธีกำหนดค่าความหนาแน่นของสตรงคำตอบ	Crowding Distance	Dep et al. (2002)
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	กรรณ จิตเมตตา (2554)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Hwang and Katayama (2008)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1	การทดลอง
ความถี่ในการค้นหาคำตอบเฉพาะที่	5 รอบ	การทดลอง
วิธีที่ใช้ในการค้นหาเฉพาะที่	2-Opt	Kumar and Singh, 2007
ผลกระทบจากการเรียนรู้	LR = 80%	Arditi et al. (2001)
จำนวนรอบการทำงาน	100 รอบสำหรับปัญหา 12 ขั้นงาน	การทดลอง
	400 รอบสำหรับปัญหา 65 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 148 ขั้นงาน	
	800 รอบสำหรับปัญหา 205 ขั้นงาน	
	400 รอบสำหรับปัญหา 183 ขั้นงาน	

8.2 การค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน

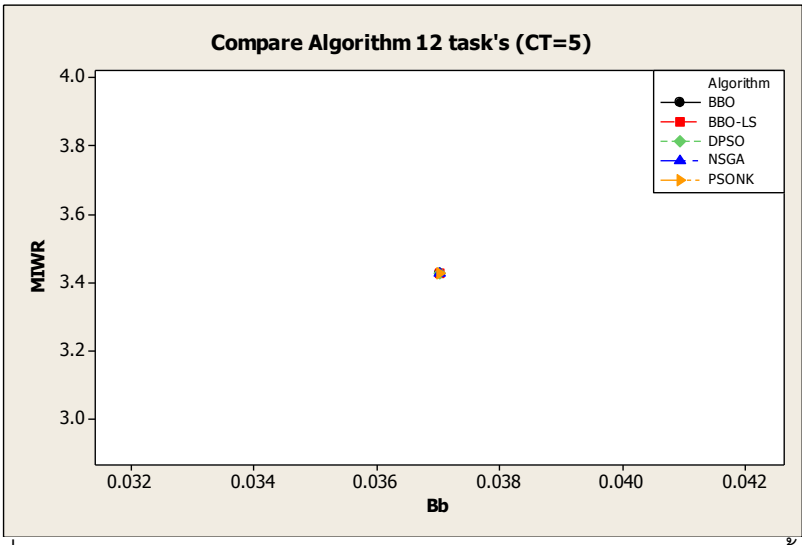
8.2.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 12 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5 แสดงดังตารางที่ 8.9

ตารางที่ 8.9 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	4	3.428571	0.037014
DPSO	2	4	3.428571	0.037014
PSONK	2	4	3.428571	0.037014
BBO	2	4	3.428571	0.037014
BBO-LS	2	4	3.428571	0.037014

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.10 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.10



ภาพที่ 8.10 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5

ตารางที่ 8.10 แสดงค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	4	3.428571	0.037014

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computation Time to Solution) ได้ผลดังตารางที่ 8.11

ตารางที่ 8.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0	N/A	1	162
DPSO	0	N/A	1	148
PSONK	0	N/A	1	184
BBO	0	N/A	1	132
BBO - LS	0	N/A	1	142

หมายเหตุ : N/A มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าอัลกอริทึมทั้งหมดให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงเท่ากัน เนื่องจากเป็นปัญหาขนาดเล็ก จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมใดที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อพิจารณาด้านเวลาในการค้นหาคำตอบพบว่าวิธี BBO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

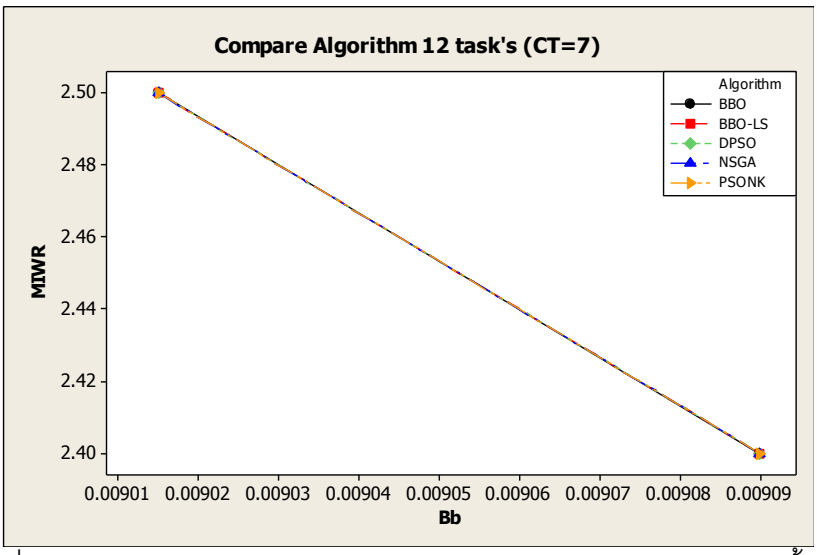
8.2.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 12 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 แสดงดังตารางที่ 8.12

ตารางที่ 8.12 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	3	2.4	0.00909
	2	3	2.5	0.009015
DPSO	2	3	2.4	0.00909
	2	3	2.5	0.009015
PSONK	2	3	2.4	0.00909
	2	3	2.5	0.009015
BBO	2	3	2.5	0.009015
	2	3	2.4	0.00909
BBO-LS	2	3	2.4	0.00909
	2	3	2.5	0.009015

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.11 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.13



ภาพที่ 8.11 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7

ตารางที่ 8.13 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	3	2.4	0.00909
2	3	2.5	0.009015

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.14

ตารางที่ 8.14 แสดงค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0	0.6667	1	213
DPSO	0	0.6667	1	56
PSONK	0	0.6667	1	77
BBO	0	0.6667	1	67
BBO - LS	0	0.6667	1	185

จากตารางพบว่าอัลกอริทึมทั้งหมดให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงเท่ากัน เนื่องจากเป็นปัญหาขนาดเล็ก จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมใดที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อพิจารณาด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบพบว่าวิธี DPSO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

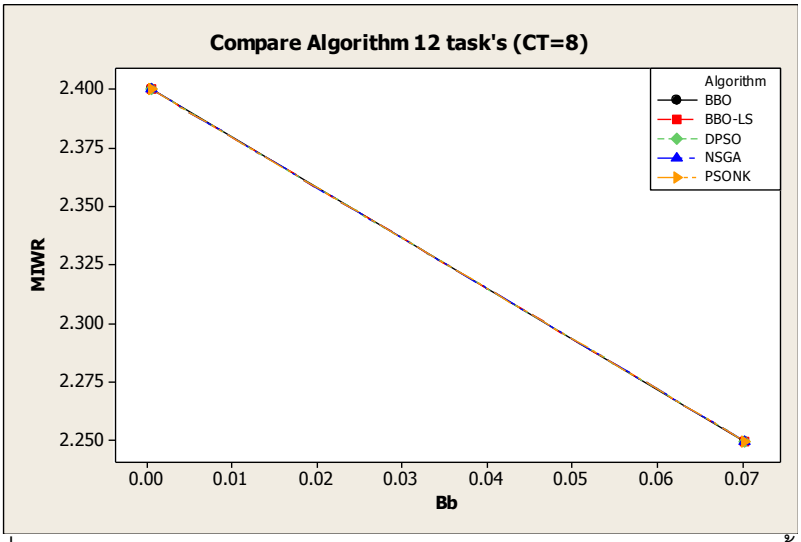
8.2.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 12 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8 แสดงดังตารางที่ 8.15

ตารางที่ 8.15 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	3	2.25	0.070204
	2	3	2.4	0.000447
DPSO	2	3	2.4	0.000447
	2	3	2.25	0.070204
PSONK	2	3	2.25	0.070204
	2	3	2.4	0.000447
BBO	2	3	2.25	0.070204
	2	3	2.4	0.000447
BBO-LS	2	3	2.25	0.070204
	2	3	2.4	0.000447

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.12 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.16



ภาพที่ 8.12 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

ตารางที่ 8.16 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	3	2.25	0.070204
2	3	2.4	0.000447

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.17

ตารางที่ 8.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0	0.6667	1	191
DPSO	0	0.6667	1	142
PSONK	0	0.6667	1	163
BBO	0	0.6667	1	164
BBO - LS	0	0.6667	1	193

จากตารางพบว่าอัลกอริทึมทั้งหมดให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงเท่ากัน เนื่องจากเป็นปัญหาขนาดเล็ก จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าอัลกอริทึมใดที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อพิจารณาด้านเวลาในการค้นหาคำตอบพบว่าวิธี DPSO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

8.3 การค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน

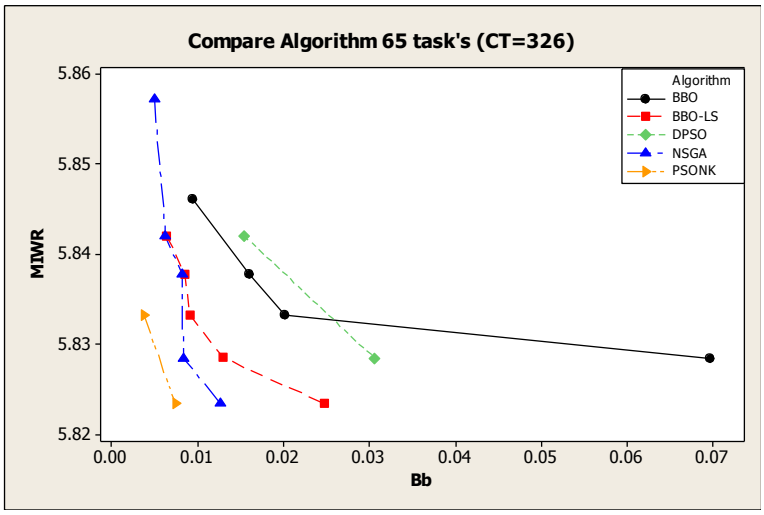
8.3.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 65 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326 แสดงดังตารางที่ 8.18

ตารางที่ 8.18 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	3	6	5.8421	0.0063
	3	6	5.8571	0.0049
	3	6	5.8378	0.0081
	3	6	5.8235	0.0126
	3	6	5.8286	0.0083
DPSO	3	6	5.8286	0.0305
	3	6	5.8421	0.0153
PSONK	3	6	5.8235	0.0074
	3	6	5.8333	0.0037
BBO	3	6	5.8378	0.0160
	3	6	5.8286	0.0696
	3	6	5.8333	0.0201
	3	6	5.8462	0.0094
BBO-LS	3	6	5.8235	0.0247
	3	6	5.8286	0.0129
	3	6	5.8333	0.0091
	3	6	5.8378	0.0085
	3	6	5.8421	0.0064

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.13 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.19



ภาพที่ 8.13 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

ตารางที่ 8.19 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
3	6	5.8235	0.0074
3	6	5.8333	0.0037
3	6	5.8235	0.0247

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.20

ตารางที่ 8.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0.3274	0.5872	0	9578
DPSO	0.6315	0.6667	0	900
PSONK	0.2755	0.6667	0.6667	2124
BBO	0.3876	0.6753	0	720
BBO - LS	0.2122	0.6409	0.33330	1854

จากตารางพบว่าวิธี PSONK และ BBO-LS ให้คำตอบที่ดีที่สุดทั้งด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง วิธี NSGAII ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ และวิธี BBO ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว สรุปได้ว่าวิธี PSONK และ BBO-LS ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานมากนัก รองลงมาคือ NSGAII, BBO และ DPSO ตามลำดับ

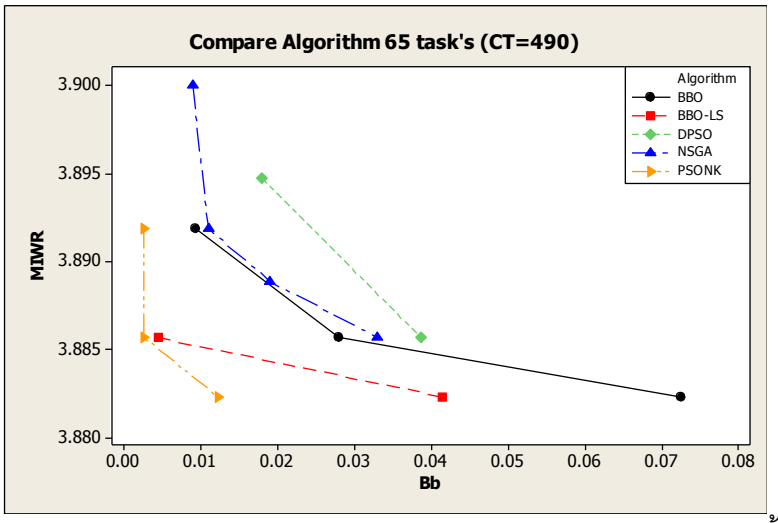
8.3.2 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 65 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490 แสดงดังตารางที่ 8.21

ตารางที่ 8.21 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	4	3.888889	0.018939
	2	4	3.891892	0.010869
	2	4	3.9	0.008805
	2	4	3.885714	0.032936
DPSO	2	4	3.894737	0.017857
	2	4	3.885714	0.038573
PSONK	2	4	3.891892	0.002516
	2	4	3.882353	0.012144
	2	4	3.885714	0.002548
BBO	2	4	3.885714	0.027838
	2	4	3.891892	0.009275
	2	4	3.882353	0.072493
BBO-LS	2	4	3.882353	0.041372
	2	4	3.885714	0.004302

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.14 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.22



ภาพที่ 8.14 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490

ตารางที่ 8.22 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	4	3.8919	0.0025
2	4	3.8824	0.0121
2	4	3.8857	0.0025

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.23

ตารางที่ 8.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0.3838	0.5261	0	10907
DPSO	0.7028	0.6667	0	489
PSONK	0	0.6201	1	1799
BBO	0.2919	0.5261	0	488
BBO - LS	0.3668	0.6667	0	1446

จากตารางพบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบที่ดีที่สุดทั้งด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง วิธี NSGAII และ BBO ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ และวิธี BBO และ DPSO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว สรุปได้ว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานมากนัก รองลงมาคือ วิธี BBO, BBO-LS , NSGAII และ DPSO ตามลำดับ

8.3.3 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 65 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544 แสดงดังตารางที่ 8.24

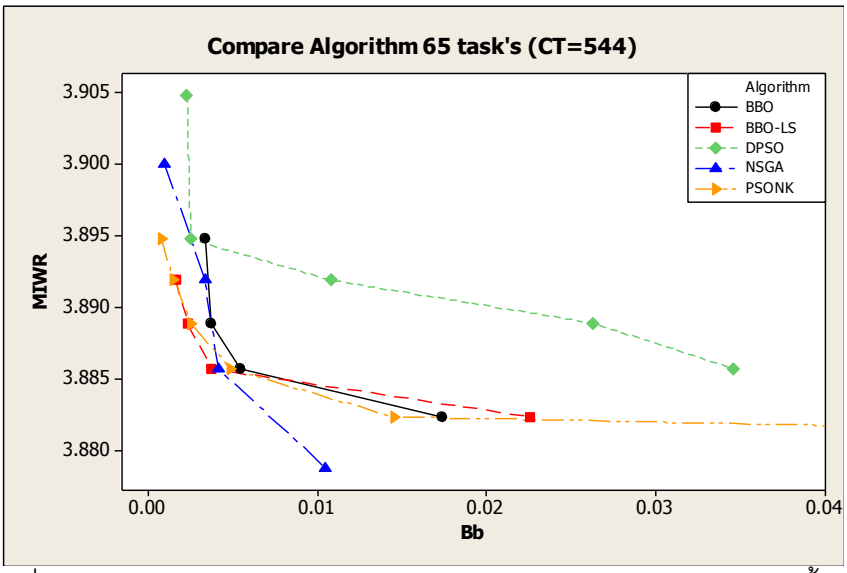
ตารางที่ 8.24 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	4	3.885714	0.00408
	2	4	3.891892	0.00327
	2	4	3.9	0.000915
	2	4	3.878788	0.010411
DPSO	2	4	3.904762	0.002209
	2	4	3.885714	0.034567
	2	4	3.888889	0.026252
	2	4	3.894737	0.002433
	2	4	3.891892	0.010751
PSONK	2	4	3.885714	0.004791
	2	4	3.894737	0.000723
	2	4	3.882353	0.014432
	2	4	3.891892	0.001434
	2	4	3.878788	0.166837
	2	4	3.888889	0.00245
BBO	2	4	3.882353	0.017287
	2	4	3.894737	0.003271
	2	4	3.885714	0.00534

ตารางที่ 8.24 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
BBO	2	4	3.888889	0.003643
BBO-LS	2	4	3.888889	0.002241
	2	4	3.882353	0.022504
	2	4	3.885714	0.003653
	2	4	3.891892	0.001534

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.15 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.25



ภาพที่ 8.15 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

ตารางที่ 8.25 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	4	3.8788	0.0104
2	4	3.8947	0.0007
2	4	3.8919	0.0014
2	4	3.8889	0.0022
2	4	3.8857	0.0037

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.26

ตารางที่ 8.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0.1319	0.6230	0.2000	12014
DPSO	0.2422	0.5106	0	2402
PSONK	0.0466	0.8133	0.4000	1868
BBO	0.2044	0.6811	0	2037
BBO - LS	0.1441	0.7342	0.4000	2060

จากตารางพบว่าวิธี PSONK ให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุดและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด วิธี DPSO ให้ผลลัพธ์ด้านกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ดีที่สุด และวิธี PSONK และ BBO-LS ให้ผลลัพธ์ด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวสรุปได้ว่าวิธี PSONK และ BBO-LS ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานี้และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานมากนัก รองลงมาคือ NSGAII, BBO และ DPSO ตามลำดับ

8.4 การค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน

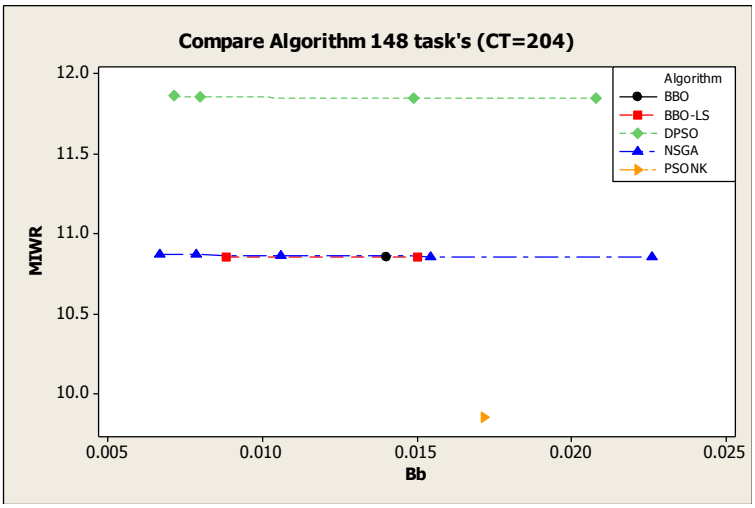
8.4.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 148 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204 แสดงดังตารางที่ 8.27

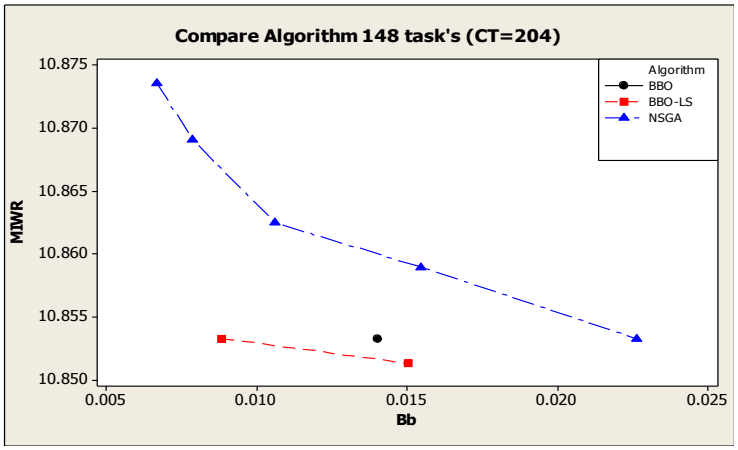
ตารางที่ 8.27 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	6	11	10.85333	0.022639
	6	11	10.85897	0.015434
	6	11	10.86905	0.007848
	6	11	10.87356	0.006655
	6	11	10.8625	0.010596
DPSO	6	12	11.84211	0.020814
	6	12	11.85882	0.007121
	6	12	11.84416	0.014876
	6	12	11.85185	0.007963
PSONK	5	10	9.855072	0.017182
BBO	6	11	10.85333	0.014003
BBO-LS	6	11	10.85135	0.015022
	6	11	10.85333	0.008836

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.16 และ 8.17 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.28



ภาพที่ 8.16 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204



ภาพที่ 8.17 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 11

ตารางที่ 8.28 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
5	10	9.855072	0.017182

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.29

ตารางที่ 8.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	N/A*	N/A*	N/A*	38012
DPSO	N/A*	N/A*	N/A*	5459
PSONK	0	N/A**	1	11711
BBO	N/A*	N/A*	N/A*	3223
BBO - LS	N/A*	N/A*	N/A*	3354

หมายเหตุ : N/A* คำตอบนี้ถูกตัดออกไปเพราะไม่ผ่านเงื่อนไขของวัตถุประสงค์ที่ 1 หรือ 2

N/A** มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี PSONK สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานคือจาก 11 สถานีงานเป็น 10 สถานีงาน ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวสรุปได้ว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานี้ และเมื่อพิจารณาอัลกอริทึมที่เหลือ 4 ตัว จากภาพที่ 8.19 พบว่าวิธี BBO-LS ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสม รองลงมาคือวิธี BBO และ NSGAII ส่วน DPSO ให้คำตอบที่แย่ที่สุดเนื่องจากคำตอบที่ได้ทำให้เกิดจำนวนวสถานีงานมากกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ

8.4.2 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 148 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 แสดงดังตารางที่ 8.30

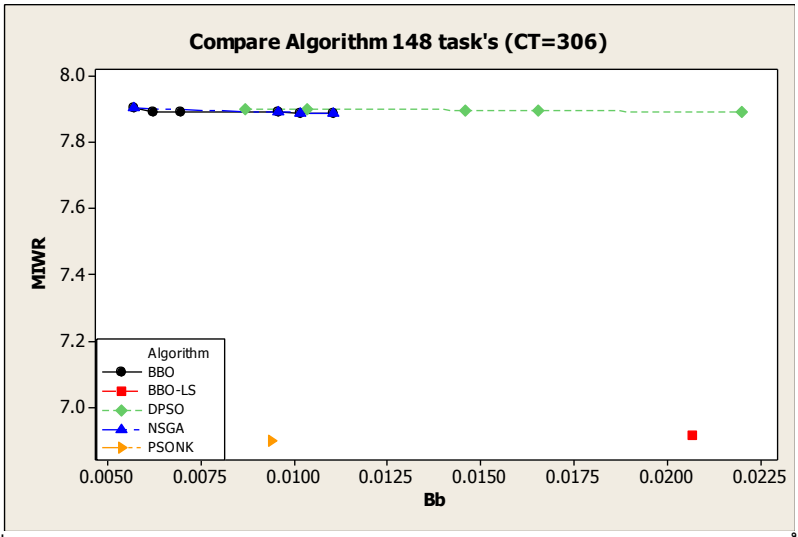
ตารางที่ 8.30 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	4	8	7.903614	0.005715
	4	8	7.888889	0.010151
	4	8	7.890411	0.009553
	4	8	7.887324	0.011045
DPSO	4	8	7.891892	0.021942
	4	8	7.894737	0.016511
	4	8	7.9	0.010336

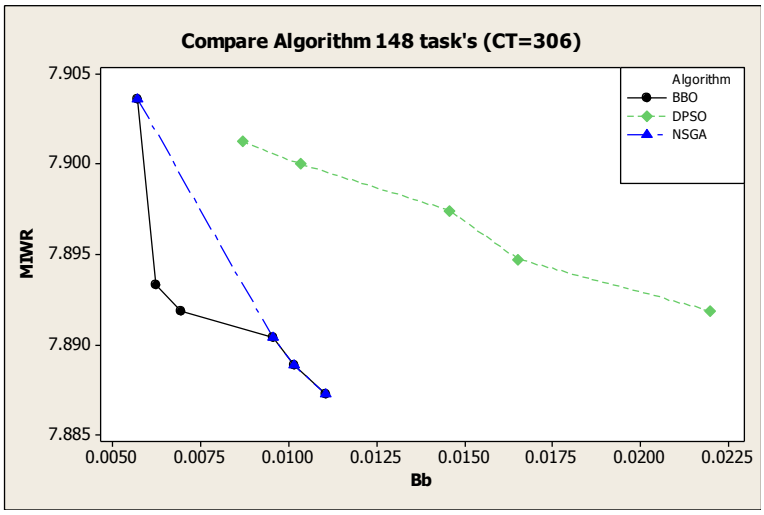
ตารางที่ 8.30 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
DPSO	4	8	7.901235	0.008697
	4	8	7.897436	0.014557
PSONK	4	7	6.902778	0.009387
BBO	4	8	7.891892	0.00695
	4	8	7.903614	0.005715
	4	8	7.888889	0.010151
	4	8	7.890411	0.009553
	4	8	7.887324	0.011045
	4	8	7.893333	0.006226
BBO-LS	4	7	6.917647	0.020653

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.18 และ 8.19 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.31



ภาพที่ 8.18 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306



ภาพที่ 8.19 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 8

ตารางที่ 8.31 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
4	7	6.902778	0.009387

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.32

ตารางที่ 8.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	N/A*	N/A*	N/A*	40991
DPSO	N/A*	N/A*	N/A*	4969
PSONK	0	N/A**	1	4413
BBO	N/A*	N/A*	N/A*	9963
BBO - LS	1.4142	N/A**	0	3985

หมายเหตุ : N/A* คำตอบนี้ถูกตัดออกไปเพราะไม่ผ่านเงื่อนไขของวัตถุประสงค์ที่ 1 หรือ 2

N/A** มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี PSONK และ BBO-LS สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานคือจาก 8 สถานีงานเป็น 7 สถานีงาน ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวสรุปได้ว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด รองลงมาคือ BBO-LS และเมื่อพิจารณาอัลกอริทึมที่เหลือ 3 ตัว จากภาพที่ 8.19 พบว่าวิธี BBO ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสม รองลงมาคือวิธี NSGAII และ DPSO ตามลำดับ

8.4.3 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 148 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 แสดงดังตารางที่ 8.33

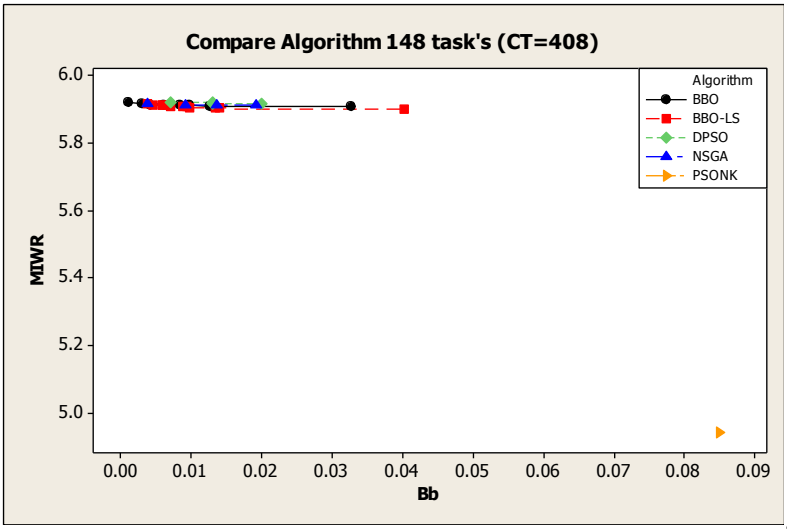
ตารางที่ 8.33 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	3	6	5.915493	0.013661
	3	6	5.916667	0.009221
	3	6	5.917808	0.003692
	3	6	5.913043	0.019259
DPSO	3	6	5.923077	0.012972
	3	6	5.92	0.013014
	3	6	5.924051	0.007099
	3	6	5.917808	0.019967
PSONK	3	5	4.940476	0.084878
BBO	3	6	5.910448	0.032584
	3	6	5.913043	0.009709
	3	6	5.916667	0.00405
	3	6	5.914286	0.008352
	3	6	5.922078	0.001068
	3	6	5.915493	0.006141
	3	6	5.911765	0.01256
	3	6	5.917808	0.002982
BBO-LS	3	6	5.92	0.00378
	3	6	5.911765	0.007019

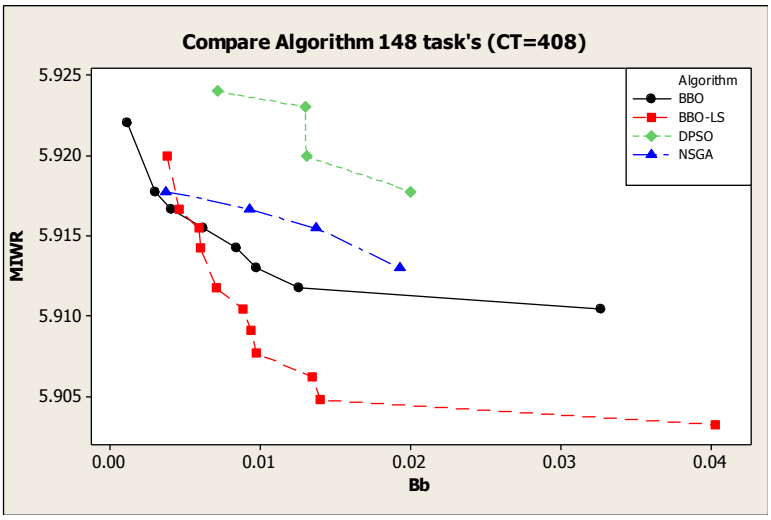
ตารางที่ 8.33 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
BBO-LS	3	6	5.915493	0.0059
	3	6	5.916667	0.004524
	3	6	5.914286	0.005955
	3	6	5.910448	0.008837
	3	6	5.903226	0.040256
	3	6	5.90625	0.01339
	3	6	5.907692	0.009674
	3	6	5.909091	0.009357
	3	6	5.904762	0.013919

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.20 และ 8.21 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.34



ภาพที่ 8.20 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408



ภาพที่ 8.21 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 6

ตารางที่ 8.34 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
3	5	4.940476	0.084878

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.35

ตารางที่ 8.35 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	N/A*	N/A*	N/A*	48013
DPSO	N/A*	N/A*	N/A*	5968
PSONK	0	N/A**	1	2036
BBO	N/A*	N/A*	N/A*	4108
BBO - LS	N/A*	N/A*	N/A*	17375

หมายเหตุ : N/A* คำตอบนี้ถูกตัดออกไปเพราะไม่ผ่านเงื่อนไขของวัตถุประสงค์ที่ 1 หรือ 2

N/A** มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี PSONK สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานคือจาก 6 สถานีงานเป็น 5 สถานีงาน ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวสรุปได้ว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานี้ และเมื่อพิจารณาอัลกอริทึมที่เหลือ 4 ตัว จากภาพที่ 8.21 พบว่าวิธี BBO-LS ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสม รองลงมาคือวิธี BBO, NSGAII และ DPSO ตามลำดับ

8.5 การค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน

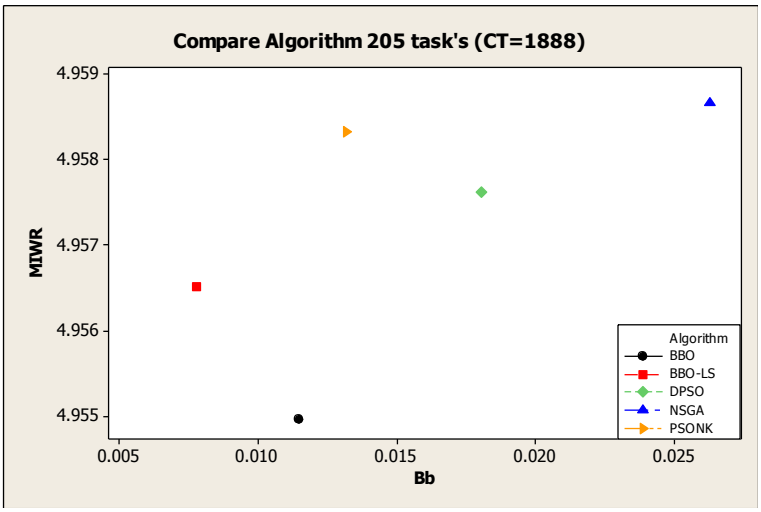
8.5.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 205 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888 แสดงดังตารางที่ 8.36

ตารางที่ 8.36 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	3	5	4.958678	0.026289
DPSO	3	5	4.957627	0.018042
PSONK	3	5	4.958333	0.01315
BBO	3	5	4.954955	0.011432
BBO-LS	3	5	4.956522	0.007734

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.22 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.37



ภาพที่ 8.22 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888

ตารางที่ 8.37 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
3	5	4.9550	0.0114
3	5	4.9565	0.0077

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.38

ตารางที่ 8.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	1.2183	N/A*	0	87054
DPSO	1.1350	N/A*	0	3566
PSONK	1.0919	N/A*	0	3635
BBO	0.7071	N/A*	0.5	24315
BBO - LS	0.7071	N/A*	0.5	4829

หมายเหตุ : N/A* มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี BBO และ BBO-LS ให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด วิธี DPSO ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวสรุปได้ว่าวิธี BBO และ BBO-LS ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานี้และ BBO-LS ยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่น้อย รองลงมาคือ วิธี PSONK, DPSO และ NSGAII ตามลำดับ

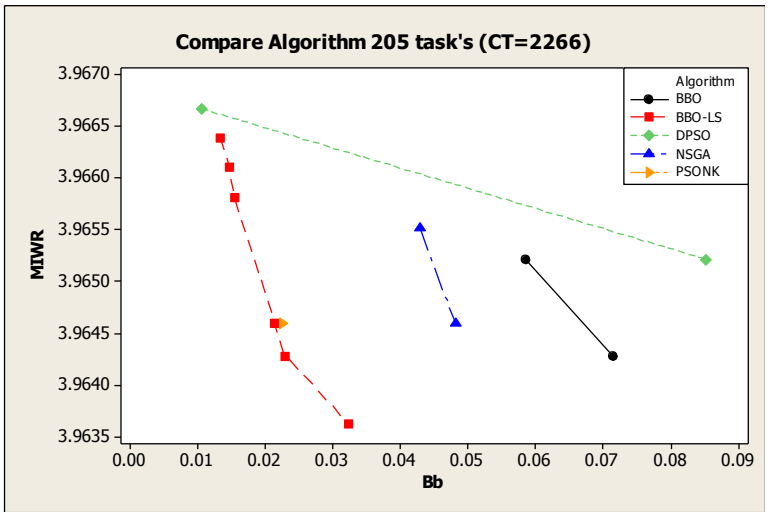
8.5.2 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 205 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266 แสดงดังตารางที่ 8.39

ตารางที่ 8.39 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	4	3.964602	0.048094
	2	4	3.965517	0.042841
DPSO	2	4	3.965217	0.085307
	2	4	3.966667	0.010427
PSONK	2	4	3.964602	0.022397
BBO	2	4	3.964286	0.07145
	2	4	3.965217	0.058542
BBO-LS	2	4	3.966387	0.013151
	2	4	3.963636	0.032191
	2	4	3.965812	0.015385
	2	4	3.964602	0.021264
	2	4	3.964286	0.022865
	2	4	3.966102	0.014576

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.23 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.40



ภาพที่ 8.23 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266

ตารางที่ 8.40 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	4	3.9667	0.0104
2	4	3.9664	0.0132
2	4	3.9636	0.0322
2	4	3.9658	0.0154
2	4	3.9646	0.0213
2	4	3.9643	0.0229
2	4	3.9661	0.0146

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.41

ตารางที่ 8.41 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0.7334	0.6667	0	88013
DPSO	0.4233	0.6667	0.1429	10454
PSONK	0.4909	N/A*	0	2918
BBO	0.7504	0.6667	0	4075
BBO - LS	0.0222	0.7779	0.8571	13582

หมายเหตุ : N/A* มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี BBO-LS ให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด วิธี PSONK ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวพบว่าวิธี BBO-LS เป็นวิธีการที่ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานี้และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานมาก รองลงมาคือ วิธี DPSO, PSONK, NSGAII และ BBO ตามลำดับ

8.5.3 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 205 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 แสดงดังตารางที่ 8.42

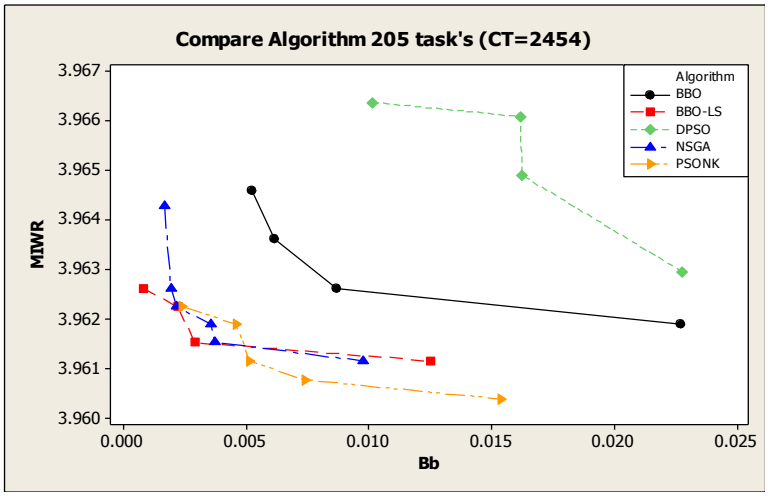
ตารางที่ 8.42 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	2	4	3.964286	0.001646
	2	4	3.962617	0.001908
	2	4	3.962264	0.002154
	2	4	3.961905	0.003538
	2	4	3.961538	0.003718
	2	4	3.961165	0.009743
DPSO	2	4	3.962963	0.022756
	2	4	3.964912	0.016229
	2	4	3.966102	0.016139

ตารางที่ 8.42 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
DPSO	2	4	3.966387	0.010113
PSONK	2	4	3.962264	0.002375
	2	4	3.961905	0.004564
	2	4	3.961165	0.005129
	2	4	3.960784	0.007354
	2	4	3.960396	0.015372
BBO	2	4	3.964602	0.005237
	2	4	3.963636	0.006155
	2	4	3.961905	0.022712
	2	4	3.962617	0.008654
BBO-LS	2	4	3.962264	0.002191
	2	4	3.962617	0.000813
	2	4	3.961165	0.012512
	2	4	3.961538	0.002887

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.24 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.43



ภาพที่ 8.24 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454

ตารางที่ 8.43 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
2	4	3.9623	0.0022
2	4	3.9612	0.0051
2	4	3.9608	0.0074
2	4	3.9604	0.0154
2	4	3.9626	0.0008
2	4	3.9615	0.0029

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.44

ตารางที่ 8.44 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	0.1490	0.8216	0.1667	75659
DPSO	0.7509	0.6040	0	7171
PSONK	0.0681	0.5788	0.5000	6743
BBO	0.3886	0.6475	0	10951
BBO - LS	0.1704	0.6379	0.3333	16992

หมายเหตุ : N/A* มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี PSONK ให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ อัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวสรุปได้ว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดกับปัญหานี้ รองลงมาคือวิธี BBO-LS และ NSGAII ที่ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมกับปัญหานี้ แต่วิธี NSGAII ใช้เวลาในการหาคำตอบนานกว่าวิธี BBO-LS มาก

8.6 การค้นหาคำตอบของปัญหา 183 ขั้นงาน

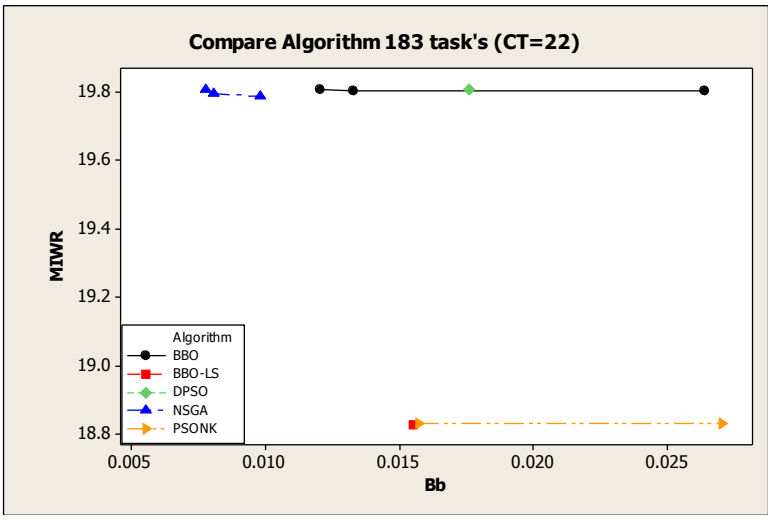
8.6.1 เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22

การค้นหาคำตอบของวิธีการหาค่าเหมาะสมวิธีต่างๆ ของปัญหา 183 ขั้นงานเมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22 แสดงดังตารางที่ 8.45

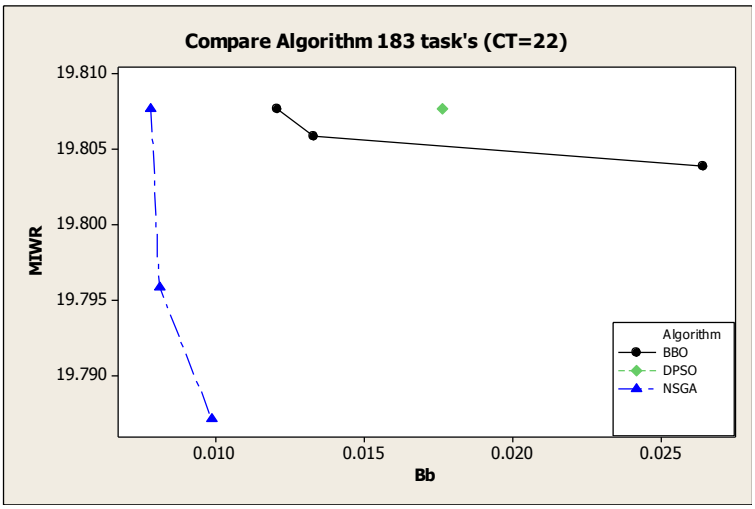
ตารางที่ 8.45 กลุ่มคำตอบที่ได้ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22

วิธีการหาค่าเหมาะสม	จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
NSGAII	10	20	19.79592	0.008076
	10	20	19.78723	0.009838
	10	20	19.80769	0.007807
DPSO	10	20	19.8077	0.0176
PSONK	10	19	18.82883	0.02698
	10	19	18.83036	0.015723
BBO	10	20	19.80583	0.013261
	10	20	19.80392	0.026359
	10	20	19.80769	0.012032
BBO-LS	10	19	18.82727	0.015528

กลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลแสดงดังภาพที่ 8.25 และ 8.26 และผลของค่า True-Pareto Optimal Frontier ดังแสดงในตารางที่ 8.46



ภาพที่ 8.25 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22



ภาพที่ 8.26 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึม 4 อัลกอริทึม ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22 ที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากับ 20

ตารางที่ 8.46 ค่า True-Pareto Optimal Frontier ของปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22

จำนวนคู่สถานีงาน	จำนวนสถานีงาน	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน
10	19	18.82727	0.015528

ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมทั้งหมดโดยการเปรียบเทียบจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 8.47

ตารางที่ 8.47 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวของแต่ละอัลกอริทึมในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
NSGAII	N/A*	N/A*	N/A*	30521
DPSO	N/A*	N/A*	N/A*	7039
PSONK	1.0001	0.6667	0	4193
BBO	N/A*	N/A*	N/A*	599
BBO - LS	0	N/A**	1	1340

หมายเหตุ : N/A* คำตอบนี้ถูกตัดออกไปเพราะไม่ผ่านเงื่อนไขของวัตถุประสงค์ที่ 1 หรือ 2

N/A** มีคำตอบเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาคำนวณค่า spread ได้

จากตารางพบว่าวิธี BBO-LS และ PSONK สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานคือจาก 20 สถานีงานเป็น 19 สถานีงาน ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัวพบว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาอัลกอริทึมที่เหลือ 3 ตัว จากภาพที่ 8.26 พบว่าวิธี NSGAII ให้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมรองลงมาคือวิธี BBO และ DPSO ตามลำดับ

ผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 8.48 และพบว่าในปัญหา 12 ขั้นงานซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก ทุกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบได้เหมือนกัน ดังนั้นแต่ละอัลกอริทึมจึงมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบไม่ความแตกต่างกัน ในปัญหา 65 ขั้นงานซึ่งเป็นปัญหาขนาดกลางพบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 มากที่สุด และให้ค่าอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490 และ 544 วิธี BBO-LS ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

ในปัญหาขนาดใหญ่ คือปัญหา 148 ขั้นงานและ 205 ขั้นงาน พบว่าในปัญหา 148 ขั้นงานวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากให้จำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ โดยลดจำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงานได้ในทุกรอบเวลาการทำงาน รองลงมาคือวิธี BBO-LS ที่สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306

ในปัญหาถัดมาคือปัญหา 205 ขั้นงาน ในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888 และ 2266 พบว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 มากที่สุด และให้ค่าอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ส่วนรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 พบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 มากที่สุด และให้ค่าอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ

ตารางที่ 8.48 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม เมื่อค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80%

Problem		12			65			148			205			183
Cycle Time		5	7	8	326	490	544	204	306	408	1888	2266	2454	22
NO. Workstations (NO. Mated-Station)	NSGAII	4(2)	3(2)	3(2)	6(3)	4(2)	4(2)	11(6)	8(4)	6(3)	5(3)	4(2)	4(2)	20(10)
	DPSO	4(2)	3(2)	3(2)	6(3)	4(2)	4(2)	12(6)	8(4)	6(3)	5(3)	4(2)	4(2)	20(10)
	PSONK	4(2)	3(2)	3(2)	6(3)	4(2)	4(2)	**10(5)**	**7(4)**	**5(3)**	5(3)	4(2)	4(2)	**19(10)**
	BBO	4(2)	3(2)	3(2)	6(3)	4(2)	4(2)	11(6)	8(4)	6(3)	5(3)	4(2)	4(2)	20(10)
	BBO-LS	4(2)	3(2)	3(2)	6(3)	4(2)	4(2)	11(6)	**7(4)**	6(3)	5(3)	4(2)	4(2)	**19(10)**
Convergence	NSGAII	0	0	0	0.3274	0.3838	0.1319	N/A	N/A	N/A	1.2183	0.7334	0.1490	N/A
	DPSO	0	0	0	0.6315	0.7028	0.2422	N/A	N/A	N/A	1.1350	0.4233	0.7509	N/A
	PSONK	0	0	0	0.2755	**0**	**0.0466**	**0**	**0**	**0**	1.0919	0.4909	**0.0681**	1.0001
	BBO	0	0	0	0.3876	0.2919	0.2044	N/A	N/A	N/A	**0.7071**	0.7504	0.3886	N/A
	BBO-LS	0	0	0	**0.2122**	0.3668	0.1441	N/A	1.4142	N/A	**0.7071**	**0.0222**	0.1704	**0**
Spread	NSGAII	N/A	0.6667	0.6667	**0.5872**	**0.5261**	0.6230	N/A	N/A	N/A	N/A	0.6667	0.8216	N/A
	DPSO	N/A	0.6667	0.6667	0.6667	0.6667	**0.5106**	N/A	N/A	N/A	N/A	0.6667	0.6040	N/A
	PSONK	N/A	0.6667	0.6667	0.6667	0.6201	0.8133	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	**0.5788**	0.6667
	BBO	N/A	0.6667	0.6667	0.6753	**0.5261**	0.6811	N/A	N/A	N/A	N/A	0.6667	0.6475	N/A
	BBO-LS	N/A	0.6667	0.6667	0.6412	0.6667	0.7342	N/A	N/A	N/A	N/A	0.7779	0.6379	N/A
Ratio	NSGAII	1	1	1	0	0	0.2	N/A	N/A	N/A	0	0	0.1667	N/A
	DPSO	1	1	1	0	0	0	N/A	N/A	N/A	0	0.1429	0	N/A
	PSONK	1	1	1	**0.6667**	**1**	**0.4**	**1**	**1**	**1**	0	0.	**0.5**	0
	BBO	1	1	1	0	0	0	N/A	N/A	N/A	**0.5**	0	0	N/A
	BBO-LS	1	1	1	0.3333	0	**0.4**	N/A	0	N/A	**0.5**	**0.8571**	0.3333	**1**
Time (s.)	NSGAII	162	213	191	9578	10970	12014	38012	40991	48013	87054	88013	75659	30521
	DPSO	148	56	142	900	489	2402	5459	4969	5968	3566	10454	7171	7039
	PSONK	184	77	163	2124	1799	1868	11711	4413	2036	3635	2918	6743	4193
	BBO	132	67	164	720	488	2037	3223	9963	4108	24315	4075	10951	599
	BBO-LS	142	185	193	1854	1446	2060	3354	3985	17375	4829	13582	16992	1340

ผลของอัลกอริทึมที่ได้เมื่อนำไปทดลองกับปัญหา 183 ขั้นงาน ซึ่งเป็นปัญหาจากกรณีศึกษาจริงของโรงงานธนบุรีประกอบรถยนต์ พบว่า วิธี PSONK และ วิธี BBO-LS สามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงานเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่เหลือ โดยวิธี BBO-LS ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า

8.7 การทดสอบค่าการเรียนรู้ต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

การทดสอบค่าการเรียนรู้ต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึม เป็นการตรวจสอบว่าระดับของค่าการเรียนรู้มีผลต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึมหรือไม่ เนื่องจากลักษณะของงานที่แตกต่างกันจะมีค่าการเรียนรู้ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการทดสอบนี้จะช่วยในการเลือกใช้อัลกอริทึมต่างๆ ให้มีความเหมาะสมกับลักษณะงานที่มีค่าการเรียนรู้ในระดับต่างๆ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ปัญหาการทดลอง พารามิเตอร์และตัวชี้วัดสมรรถนะเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อก่อนหน้าแต่จะทำการทดลองที่ค่าการเรียนรู้ที่ระดับ 90% ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

จากตารางที่ 8.49 พบว่าในปัญหา 12 ขั้นงานซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก จะเห็นว่าในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 และ 8 ทุกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบได้เหมือนกัน ส่วนในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5 ทุกอัลกอริทึมสามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นแต่ละอัลกอริทึมจึงมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบไม่ความแตกต่างกัน ในปัญหา 65 ขั้นงานซึ่งเป็นปัญหาขนาดกลาง พบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 มากที่สุด และให้ค่าอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326 วิธี BBO-LS ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490 และวิธี NSGAII ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและค่าอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุดในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

ในปัญหาขนาดใหญ่ คือปัญหา 148 ขั้นงานและ 205 ขั้นงาน พบว่าในปัญหา 148 ขั้นงานวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากให้จำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ โดยลดจำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงานได้ในทุกรอบเวลาการทำงาน รองลงมาคือวิธี BBO-LS ที่สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544 และในรอบเวลาการทำงานนี้วิธี BBO-LS ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด ในปัญหาถัดมาคือปัญหา 205 ขั้นงาน ในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888 พบว่าวิธี NSGAII และ PSONK ให้คำตอบที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถลด

จำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงานเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ โดยวิธี NSGAII ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่าในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266 พบว่าวิธี BBO ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด และในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 พบว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดีที่สุดโดยสามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ

ตารางที่ 8.49 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม เมื่อค่าการเรียนรู้เท่ากับ 90%

Problem		12			65			148			205			183
Cycle Time		5	7	8	326	490	544	204	306	408	1888	2266	2454	22
NO. Workstations (NO. Mated-Station)	NSGAII	5(3)	3(2)	3(2)	7(4)	5(3)	4(2)	12(7)	9(5)	7(4)	**5(3)**	5(3)	6(3)	**20(11)**
	DPSO	5(3)	3(2)	3(2)	7(4)	5(3)	4(2)	13(7)	9(5)	7(4)	6(3)	5(3)	6(3)	22(11)
	PSONK	5(3)	3(2)	3(2)	7(4)	5(3)	4(2)	**12(6)**	**8(4)**	**6(3)**	**5(3)**	5(3)	6(3)	**20(11)**
	BBO	5(3)	3(2)	3(2)	7(4)	5(3)	4(2)	13(7)	9(5)	7(4)	6(3)	5(3)	6(3)	22(11)
	BBO-LS	5(3)	3(2)	3(2)	7(4)	5(3)	4(2)	13(7)	9(5)	**6(3)**	6(3)	5(3)	5(3)	22(11)
Convergence	NSGAII	0.1125	**0**	**0**	0.7788	0.4710	**0.1327**	N/A	N/A	N/A	**0**	1.4142	N/A	**0.2908**
	DPSO	0.1683	**0**	**0**	0.3208	0.2286	0.3613	N/A	N/A	N/A	N/A	1.4142	N/A	N/A
	PSONK	**0.0113**	**0**	**0**	**0.0175**	0.2021	0.1344	**0**	**0**	0.9766	1.4142	1.4142	N/A	0.7622
	BBO	0.1125	**0**	**0**	0.1997	0.2565	0.3739	N/A	N/A	N/A	N/A	**0**	N/A	N/A
	BBO-LS	0.1034	**0**	**0**	0.3479	**0.1973**	0.3960	N/A	N/A	**0**	N/A	1.0662	**0**	N/A
Spread	NSGAII	0.4920	N/A	0.6426	N/A	0.6667	0.5918	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.6667
	DPSO	**0.4276**	N/A	0.6426	0.6667	0.6801	0.5359	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	PSONK	0.4771	N/A	0.6426	0.6207	**0.5951**	0.5802	**0.6667**	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BBO	0.4920	N/A	0.6426	**0.5089**	0.6667	**0.4256**	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	BBO-LS	0.4399	N/A	0.6426	0.5753	0.7771	0.6667	N/A	N/A	0.5974	N/A	0.6667	0.6667	N/A
Ratio	NSGAII	0.6	**1**	**1**	0	0	**0.6**	N/A	N/A	N/A	**1**	0	N/A	**0.6667**
	DPSO	0.4	**1**	**1**	0	0	0	N/A	N/A	N/A	N/A	0	N/A	N/A
	PSONK	**0.8**	**1**	**1**	**0.8333**	**0.3333**	0.4	**1**	**1**	0	0	0	N/A	0.3333
	BBO	0.6	**1**	**1**	0	**0.3333**	0	N/A	N/A	N/A	N/A	**1**	N/A	N/A
	BBO-LS	**0.8**	**1**	**1**	0.1667	**0.3333**	0	N/A	N/A	**1**	N/A	0	**1**	N/A
Time (s.)	NSGAII	251	198	1904	8553	8866	8487	122168	72781	99353	93610	75112	144837	121931
	DPSO	133	48	441	751	1459	3026	7636	2864	1501	14365	8023	8832	2057
	PSONK	170	40	267	2123	943	2164	3888	1917	3814	3018	3247	9707	1288
	BBO	314	65	287	1200	1218	2173	11872	2040	1340	13431	11673	14175	1393
	BBO-LS	3120	218	791	2128	2804	1058	6997	2780	8487	3447	6928	16576	4292

ผลของอัลกอริทึมที่ได้เมื่อนำไปทดลองกับปัญหา 183 ขั้นงาน ซึ่งเป็นปัญหาจากกรณีศึกษาจริงของโรงงานธนบุรีประกอบรถยนต์ พบว่า วิธี NSGAII และ วิธี PSONK สามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้ 2 สถานีงานเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่เหลือ โดยวิธี NSGAII ให้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า

ทำการทดลองเมื่อไม่มีการเรียนรู้เกิดขึ้น เพื่อใช้เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลเมื่อมีการเรียนรู้เกิดขึ้น ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการเรียนรู้เกิดขึ้นจำนวนสถานีงานในการจัดสมดุลสายการประกอบจะลดลง ดังแสดงในตารางที่ 8.50

ตารางที่ 8.50 การเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม เมื่อไม่มีผลกระทบจากการเรียนรู้

Problem		12			65			148			205			183
Cycle Time		5	7	8	326	490	544	204	306	408	1888	2266	2454	22
NO. Workstations (NO. Mated-Station)	NSGAII	6(4)	4(2)	3(2)	8(5)	6(3)	5(3)	15(8)	9(5)	7(4)	7(4)	5(3)	5(3)	23(12)
	DPSO	6(4)	4(2)	3(2)	9(5)	5(3)	5(3)	15(8)	9(5)	8(4)	7(4)	5(3)	5(3)	23(12)
	PSONK	6(4)	4(2)	3(2)	8(5)	5(3)	5(3)	14(8)	9(5)	7(4)	7(4)	5(3)	5(3)	23(12)
	BBO	6(4)	4(2)	3(2)	8(5)	5(3)	5(3)	15(8)	9(5)	7(4)	7(4)	5(3)	6(3)	23(12)
	BBO-LS	6(4)	4(2)	3(2)	8(5)	5(3)	5(3)	14(8)	9(5)	7(4)	7(4)	5(3)	5(3)	23(12)

8.8 **สรุปท้ายบท**

การเปรียบเทียบอัลกอริทึมทั้ง 5 ตัวจากตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computation Time to Solution) โดยอัลกอริทึมที่ดีจะมีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เข้าใกล้ 0 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 1 และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อย จากตารางที่ 8.48 -8.50 พบว่า

เมื่อนำผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ พบว่าผลกระทบที่เกิดจากการเรียนรู้ทำให้จำนวนสถานีงานในแต่ละปัญหาลดลงไป ซึ่งการลดลงของสถานีงานจะเป็นผลให้เกิดการประหยัดต้นทุนไม่ว่าจะเป็นการใช้พื้นที่ การใช้ทรัพยากรด้านคนงาน หรือเครื่องจักรที่สามารถใช้ร่วมกันได้

ซึ่งผลกระทบจากการเรียนรู้ที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้จะเกิดจากประสบการณ์ของคนงานที่ได้ทำงานก่อนหน้ามาก่อน การจัดตารางการผลิตโดยให้งานในแต่ละสถานีงานมีการเชื่อมต่อของข่ายงานมากที่สุดจะช่วยให้การจัดตารางภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้มีประสิทธิภาพ

ค่าของการเรียนรู้ที่ระดับต่างๆ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึม เมื่อดูจากผลการทดลองที่ได้จากค่าการเรียนรู้ที่ระดับต่างๆ โดยภาพรวมพบว่า วิธี PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดซึ่งให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดในเกือบทุกปัญหา และในหลายๆ ปัญหาพบว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้

ในปัญหาขนาดเล็กที่ทำการทดลองพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึมไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นสามารถที่จะเลือกใช้อัลกอริทึมใดในการหาคำตอบก็ได้ เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึมไม่มีความแตกต่างกัน และในปัญหาขนาดกลางคือปัญหา 65 ขั้นงานโดยภาพรวมพบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบที่ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี BBO-LS

ในปัญหาขนาดใหญ่ คือปัญหา 148 ขั้นงานและ 205 ขั้นงาน พบว่าในปัญหา 148 ขั้นงานวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากให้จำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ โดยลดจำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงานได้ในทุกรอบเวลาการทำงาน รองลงมาคือวิธี BBO-LS ที่สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานในบางรอบเวลาการทำงาน ในปัญหาถัดมาคือปัญหา 205 ขั้นงาน โดยภาพรวมพบว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดีที่สุด คือ มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 และมีอัตราส่วนคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุด รองลงมาคือวิธี PSONK วิธี NSGAII และวิธี BBO ซึ่งให้คำตอบที่ดีในบางรอบเวลาการทำงาน

ในปัญหาของกรณีศึกษาจากโรงงานธนบุรีประกอบรถยนต์ พบว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้เมื่อเปรียบเทียบกัลอัลกอริทึมอื่นๆโดยที่ BBO-LS และ NSGAII ก็สามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้เช่นกัน

โดยรวมวิธี BBO และวิธี NSGAII เป็นวิธีการหาคำตอบที่ให้ประสิทธิภาพรองลงมาจากวิธี PSONK โดยวิธี BBO และ NSGAII ให้คำตอบที่ใกล้คียงกันแต่ว่าวิธี NSGAII ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่ามากเมื่อเทียบกับวิธี BBO ดังนั้นเราจึงพยายามที่จะพัฒนาวิธี BBO เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการนำการค้นหาเฉพาะที่เข้ามาประยุกต์ เรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based-Optimization with Local Search; BBO-LS) ซึ่งผลปรากฏว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดี

และมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี BBO อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของวิธี BBO-LS ไม่มาก วิธี DPSO เป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ แต่ผลลัพธ์ได้จากวิธีนี้ให้คำตอบที่แย่กว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ในบางปัญหาจะเห็นว่าคำตอบของวิธี DPSO ทำให้เกิดจำนวนสถานีงานมากกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ

สรุปได้ว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถแก้ปัญหาทุกปัญหาเป็นที่ยอมรับได้ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่มาก รองลงมาคือวิธี BBO-LS ที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่มากและสามารถแก้ปัญหาทุกปัญหาเป็นที่ยอมรับได้เช่นกัน วิธี NSGAII ให้คำตอบที่ดีใกล้เคียงกับวิธี BBO แต่ว่าใช้เวลาในการค้นคำตอบนานกว่ามาก ทำให้ไม่เหมาะในการนำมาใช้แก้ปัญหา

บทที่ 9

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปงานวิจัย ซึ่งกล่าวถึงการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบระหว่างอัลกอริทึม รวมถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

9.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีทางฮิวริสติกที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบสองด้านนี้เหมาะกับอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ และมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เช่น สายการประกอบรถยนต์ รถบรรทุก เป็นต้น ซึ่งปัญหาลักษณะนี้เป็นปัญหา NP-hard คือเมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้นเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบก็จะมากขึ้นแบบเอ็กซ์โปแนนเชียล ทำให้การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเป็นไปได้ยาก วิธีการทางฮิวริสติกจึงถูกนำเข้ามาเพื่อแก้ปัญหาลักษณะนี้โดยคำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แต่เชื่อว่าเป็นคำตอบที่ดีและยอมรับได้

ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบนี้มีการนำผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาใช้เพื่อลดช่องว่างระหว่างทฤษฎี ซึ่งค่าการเรียนรู้ที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นงานนั้นจะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากงานแต่ละงานนั้นจะมียากง่ายหรือความซับซ้อนต่างกัน งานที่มีความซับซ้อนมากจะมีค่าการเรียนรู้ที่มากกล่าวคือผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากการเรียนรู้นั้นจะน้อยหรือเกิดการเรียนรู้ได้น้อย ส่วนงานที่ง่ายหรือไม่มีความซับซ้อนจะเกิดการเรียนรู้ได้มาก ทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นมีมาก ในอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์งานแต่ละงานในสายการประกอบก็มีความยากง่ายและซับซ้อนแตกต่างกัน ขั้นตอนต่างๆ ในสายการประกอบ เช่น การประกอบตัวถังรถยนต์ แชสซีส์และช่วงล่าง เครื่องยนต์และระบบส่งกำลัง อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ภายใน เป็นต้น ในกระบวนการประกอบการเชื่อมตัวถังพนักงานจะต้องมีความชำนาญในการเชื่อมรอยต่อให้มีความสมบูรณ์สวยงาม หรือในการประกอบเครื่องยนต์ที่ต้องมีการใส่อุปกรณ์ต่างๆ และระบบสายไฟให้ถูกต้อง งานลักษณะนี้เป็นงานที่ยากและมีความซับซ้อนทำให้เกิดการเรียนรู้ได้น้อย ส่วนขั้นตอน เช่น การล้างและเตรียม

ผิวเหล็กก่อนการพ่นสีเป็นงานที่ง่ายและไม่มีความซับซ้อน ทำให้งานลักษณะนี้เกิดการเรียนรู้ได้มาก เป็นต้น

ในการนำค่าการเรียนรู้เข้ามาประยุกต์ในการจัดสมดุลสายการประกอบนั้นต้องศึกษาว่าขั้นงานใดมีค่าการเรียนรู้เท่าใด เพื่อจะทำให้การจัดสมดุลสายการประกอบนั้นมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น กรณีศึกษาที่เรานำมาทดลองในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดด้านข้อมูลที่นำมาศึกษา โดยเราตั้งสมมติฐานให้ค่าการเรียนรู้มีค่าเท่ากันทุกขั้นงาน ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับความเป็นจริงในอุตสาหกรรม แต่สามารถใช้ข้อมูลนี้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ผลของอัลกอริทึมที่มีต่อประสิทธิภาพในการจัดสมดุลสายการประกอบได้

จากผลการทดลองพบว่าในปัญหาขนาดเล็กที่ทำการทดลองพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึมไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นสามารถที่จะเลือกใช้อัลกอริทึมใดในการหาคำตอบก็ได้ เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึมไม่มีความแตกต่างกัน และในปัญหาขนาดกลางคือปัญหา 65 ขั้นงานโดยภาพรวมพบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบที่ดีที่สุด รองลงมาคือวิธี BBO-LS

ในปัญหาขนาดใหญ่ คือปัญหา 148 ขั้นงานและ 205 ขั้นงาน พบว่าในปัญหา 148 ขั้นงานวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากให้จำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ โดยลดจำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงานได้ในทุกรอบเวลาการทำงาน รองลงมาคือวิธี BBO-LS ที่สามารถลดจำนวนสถานีงานได้ 1 สถานีงานในบางรอบเวลาการทำงาน ในปัญหาถัดมาคือปัญหา 205 ขั้นงาน โดยภาพรวมพบว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดีที่สุด คือ มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 และมีอัตราส่วนคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุด รองลงมาคือวิธี PSONK วิธี NSGAII และวิธี BBO ซึ่งให้คำตอบที่ดีในบางรอบเวลาการทำงาน

ปัญหาของกรณีศึกษาจากโรงงานธนบุรีประกอบรถยนต์ พบว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้เมื่อเปรียบเทียบกัลอัลกอริทึมอื่นๆโดยที่ BBO-LS และ NSGAII ก็สามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้เช่นกัน

โดยรวมวิธี BBO และวิธี NSGAII เป็นวิธีการหาคำตอบที่ให้ประสิทธิภาพรองลงมาจากวิธี PSONK โดยวิธี BBO และ NSGAII ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกันแต่ว่าวิธี NSGAII ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่ามากเมื่อเทียบกับวิธี BBO ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาดังนั้นเราจึงพยายามที่จะพัฒนาวิธี BBO เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการนำการค้นหาเฉพาะที่เข้ามาประยุกต์ เรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based-Optimization with Local Search; BBO-LS) ซึ่งผล

ปรากฏว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี BBO อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของวิธี BBO-LS ไม่มาก วิธี DPSO เป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีนี้ให้คำตอบที่แย่กว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ในบางปัญหาจะเห็นว่าคำตอบของวิธี DPSO ทำให้เกิดจำนวนสถานีงานมากกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ

ในการจัดสมดุลสายการประกอบเดิมนั้นสายการประกอบไม่มีความซับซ้อนมากนักและขั้นงานต่างๆ ยังไม่มาก ทำการจัดสมดุลหรือการคำนวณนั้นอาจไม่ต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรืออัลกอริทึมที่มีความซับซ้อนเข้ามาช่วยในการจัดสมดุลก็สามารถค้นหาคำตอบที่ดีได้ การจัดสมดุลเดิมจะใช้ประสบการณ์ของพนักงานในการจัด ทำให้การทำงานไม่มีระบบที่แน่นอน ผลลัพธ์ที่ได้จึงอาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการนำอัลกอริทึมเข้ามาช่วยในการจัดสมดุลซึ่งมีความน่าเชื่อถือและความถูกต้องมากกว่า

แต่ในปัจจุบันการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าประยุกต์ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบนี้มีความจำเป็นมากขึ้นเนื่องจากในอุตสาหกรรมมีระบบการผลิตที่ซับซ้อนมากขึ้น ปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น การคำนวณหรือการจัดสมดุลแบบเดิมนั้นไม่สามารถตอบสนองหรือมีประสิทธิภาพอีกต่อไป การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจัดสมดุลจะทำให้สามารถตอบสนองความต้องการและเกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้นั้นต้องพิจารณาเลือกใช้กับอัลกอริทึมที่เหมาะสมและพนักงานต้องมีความรู้ในการใช้อัลกอริทึมในการจัดสมดุลสายการประกอบและมีความรู้ในเรื่องการใช้โปรแรมจึงจะเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด

การจัดสมดุลในสายการประกอบต้องมีการพิจารณาหรือคำนึงถึงเงื่อนไข และข้อจำกัดต่างๆ ในอุตสาหกรรมจริง ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้มีมากกว่าเงื่อนไขที่เราใช้ในงานวิจัย เป็นข้อจำกัดที่ยุ่งยากในการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับใช้งานจริง หากสามารถลดข้อสมมติฐานต่างๆ ให้น้อยลงและเพิ่มเงื่อนไขจริงในอุตสาหกรรมเข้าไป เราก็จะสามารถสร้างและนำโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ไปประยุกต์กับอุตสาหกรรมจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

9.1.1 ลักษณะของปัญหา

ปัญหาที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ที่มีชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต 2 ชนิดผลิตภัณฑ์ขึ้นไป เข้าสู่สายการผลิตแบบปะปนกัน โดยปัญหาที่นำมาทดลองเป็นปัญหามาตรฐานขนาด 12, 65, 148 และ 205 ขั้นงาน และปัญหา 183 ขั้นงานจากกรณีศึกษาของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 วัตถุประสงค์

ได้แก่ การหาจำนวนคู่สถานีงานที่น้อยที่สุด การหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานน้อยที่สุด และเพื่อให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

9.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

วิธี BBO เป็นฮิวริสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Dan Simon (2008) โดยมีแนวคิดมาจากการเลียนแบบการอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตหรือสปีชี่ส์ (Species) ตามภูมิศาสตร์ที่อยู่อาศัย ซึ่งการอพยพย้ายถิ่นฐานของสปีชี่ส์นี้เป็นผลให้ทำให้เกิดสปีชี่ส์ใหม่ขึ้นหรืออาจทำให้สปีชี่ส์นั้นสูญพันธ์ได้ ซึ่งเปรียบได้กับการปรับปรุงคำตอบของปัญหาด้วยการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบที่ดีให้แก่กัน ด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือ การอพยพและการมิวเตชัน การแบ่งปันข้อมูลระหว่างสตริงคำตอบนี้หวังว่าสตริงคำตอบจะมีความหลากหลายและเกิดคำตอบที่ดีขึ้น

วิธีการาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based Optimization with Local Search; BBO-LS) เป็นวิธีการที่พัฒนาต่อจากวิธี BBO โดยนำการค้นหาเฉพาะที่เข้ามาประยุกต์ร่วมในการค้นหาคำตอบ เพื่อทำให้กระบวนการค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพและนำไปสู่คำตอบที่ดีขึ้น โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อสตริงคำตอบผ่านกระบวนการค้นหาคำตอบมาแล้วคำตอบนั้นอาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แต่อาจจะมีคำตอบในบริเวณใกล้เคียงที่ดีกว่า จึงต้องมีการปรับปรุงคำตอบและหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงเพื่อให้นำไปสู่คำตอบที่ดียิ่งขึ้น

จากคำถามในบทที่ 1 สามารตอบคำถามได้ดังนี้

1) วิธี BBO เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ คำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีสามารถยอมรับได้และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน โดยผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับวิธี NSGAII แต่วิธี NSGAII ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่ามาก และเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี DPSO พบว่าวิธี BBO ให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าอย่างชัดเจน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PSONK พบว่า BBO มีประสิทธิภาพด้อยกว่า PSONK

2) วิธี BBO ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับวิธี NSGAII ดังนั้นเราจึงพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography-Based Optimization with LocalSearch; BBO-LS) เพื่อทำให้กระบวนการ

ค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพและนำไปสู่คำตอบที่ดีขึ้น โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อสตริงคำตอบผ่านกระบวนการค้นหาคำตอบมาแล้วคำตอบนั้นอาจจะไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แต่อาจจะมีคำตอบในบริเวณใกล้เคียงที่ดีกว่า จึงต้องมีการปรับปรุงคำตอบและหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงเพื่อให้นำไปสู่คำตอบที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของวิธี BBO-LS มีขั้นตอนดังนี้

- การสร้างกลุ่มประชากรเบื้องต้น เป็นการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่ม ซึ่งสตริงคำตอบที่ได้จะเป็นสตริงค่าสิทธิในการเลือกงาน

- การประเมินค่า สตริงคำตอบที่ได้จะเป็นสตริงลำดับขั้นงานจึงต้องนำไปแปลงเป็นลำดับขั้นงาน แล้วจัดลงสถานีงานเพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนคู่สถานีงานที่น้อยที่สุด จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงานน้อยที่สุด และความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

- วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ทำการประเมินค่าความเหมาะสมของสตริงคำตอบแต่ละตัวจากค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

- การปรับปรุงสตริงคำตอบ ทำการอพยพ การมิวเตชันและการซ่อมแซมคำตอบเพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบที่ดีให้แก่กัน

- การค้นหาเฉพาะที่ เป็นการปรับปรุงคำตอบให้ดียิ่งขึ้น จะทำการค้นหาเฉพาะที่สตริงคำตอบด้วยวิธี 2-Opt เพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับสตริงคำตอบ จนกว่าจะไม่สามารถปรับปรุงสตริงคำตอบให้ดีขึ้นได้อีก ด้วยความถี่และค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่ที่กำหนด

- เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่กำลังพิจารณารวมกับสตริงที่ดีในรอบก่อนหน้า เพื่อทำการเปรียบเทียบและทำการเก็บประชากรที่ดีที่สุด ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting ซึ่งสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบนี้จะกลายเป็นสตริงคำตอบที่ดีในรอบก่อนหน้าของการดำเนินงานในรอบถัดไป

9.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ในการแก้ปัญหา

จากผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการค้นหาคำตอบโดยวิธี NSGAII, DPSO, PSONK, BBO และ BBO-LS โดยอาศัยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง พบว่า ในปัญหา 12 ขั้นงานทุกวิธีให้คำตอบเดียวกัน ในปัญหา 65 ขั้นงานวิธี PSONK ให้คำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงดี

ที่สุด ในปัญหา 148 ขั้นงานและปัญหา 183 ขั้นงาน พบว่าวิธี PSONK ให้คำตอบที่ดีที่สุดโดยสามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้ 1 สถานีงาน และในปัญหา 205 ขั้นงานพบว่าวิธี BBO-LS และ PSONK ให้ผลลัพธ์ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด รองลงมาคือ NSGAII, BBO และ DPSO ตามลำดับ

จากการศึกษาทุกปัญหาสามารถสรุปได้ว่าวิธี PSONK สามารถให้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริง และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่มาก คือ มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 มากที่สุดในเกือบทุกปัญหาการทดลอง และมีค่าอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ในหลายๆ ปัญหาพบว่าวิธี PSONK ให้กลุ่มคำตอบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสามารถลดจำนวนสถานีงานลงได้

วิธี BBO และวิธี NSGAII เป็นวิธีการหาคำตอบที่ให้ประสิทธิภาพรองลงมาจากวิธี PSONK โดยวิธี BBO และ NSGAII ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกันแต่ว่าวิธี NSGAII ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานกว่ามากเมื่อเทียบกับวิธี BBO ดังนั้นเราจึงพยายามที่จะพัฒนาวิธี BBO เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการนำการค้นหาเฉพาะที่เข้ามาประยุกต์ เรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ (Biogeography Based-Optimization with Local Search; BBO-LS) ซึ่งผลปรากฏว่าวิธี BBO-LS ให้คำตอบที่ดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี BBO อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของวิธี BBO-LS ไม่มาก วิธี DPSO เป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ แต่ผลลัพธ์ได้จากวิธีนี้ให้คำตอบที่แย่กว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ในบางปัญหาจะเห็นว่าคำตอบของวิธี DPSO ทำให้เกิดจำนวนสถานีงานมากกว่าอัลกอริทึมอื่น

9.2 ข้อเสนอแนะ

1. วิธี BBO ที่นำเสนอเป็นวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ แต่อาจจะไม่ใช่วิธีการที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี PSONK ที่นำความรู้เชิงลบเข้ามาประยุกต์ ดังนั้นอาจจะมีวิธีอื่นที่จะนำมาพัฒนารวมกับวิธี BBO เพื่อให้คำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การหาจำนวนคู่สถานีงานที่น้อยที่สุด การหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานี

งานน้อยที่สุด และความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วยังมีวัตถุประสงค์อื่นๆ ที่ต้องพิจารณาในการจัดสมดุลเพื่อตอบสนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุด

3. ผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน สามารถนำไปทำการวิจัยเพิ่มในการจัดลำดับการผลิต

4. สามารถนำวิธีการคำนวณในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านไปใช้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

5. งานวิจัยนี้เน้นเรื่องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม เพื่อหาอัลกอริทึมที่มีปะสิทธิภาพที่ดี โดยปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีข้อสมมติฐานและข้อจำกัดที่อาจไม่ตรงกับความเป็นจริงในอุตสากรรม ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตสามารถนำอัลกอริทึมไปต่อยอด โดยการลดข้อสมมติฐาน ลดข้อจำกัดให้น้อยลงและเพิ่มเงื่อนไขจริงในอุตสาหกรรม เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถนำไปประยุกต์กับอุตสาหกรรมจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรรณ จิตเมตตา. การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสาหรับปัญหาการจัดลาดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

นพพล คำภิรมย์. การประยุกต์ใช้วิธีการบรรจวบร่วมกับเมมเมติกอัลกอริทึมสาหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรม อุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สานักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

ปารเมศ ชุติมา. การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ปาลิดา ฉิมคล้าย. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสาหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

เพ็ญพักตร์ ปิ่นกุมภีร์. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Abell, J. and Du, D. A framework for Multi-objective, Biogeography Based-Optimization of Complex System Families. AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimisation Conference. 2010.

Arditi, D., Tokdemir, O. B., Suh, K. Effect of learning on line-of-balance scheduling. International Journal of Project Management. 19 (2001) : 265-277.

Bartholdi, J. J. Balancing two-sided assembly lines: a case study. International Journal of Production Research 31 (1993) : 2447-2461.

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 (2006) : 694-715.

Biskup, D. A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. European Journal of Operational Research 188 (2008) : 315-329.

Biskup, D. Single-machine scheduling with learning considerations. European Journal of Operational Research 115 (1999) : 173-178.

Biskup, D., Simons, D., Common due date scheduling with autonomous and induced learning. European Journal of Operational Research 159 (2004) : 606–616.

Coello Coello, C. A., Pulido, G. T. and Lechuga, M. S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. IEEE Transations on Evolutionary Computation 8 (2004) : 256-279.

Coello Coello, C. A., Lamont, G. B. and Van Veldhuizen, D. A. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems: Kluwer Academic Publishers, 2002.

De Jong, K. A. and Spears, W. M. An analysis of the interacting roles of population size and crossover in genetic algorithms. Parallel Problem Solving from Nature (1990) : 38–47.

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

Eberhart, R. and Kennedy, J. A new optimizer using particle swarm theory. IEEE Micro Machine and Human Science (1995) : 39-43.

Gen, M. and Cheng, R. Genetic algorithms and engineering optimization: John Wiley & Sons, Inc., 2000.

Ghosh, S and Gagnon, R. J. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly system. International Journal of Production Research 27 (1989) : 637-670.

Goldberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, NY, Addison-Wesley (1989).

Hart, W. E. Adaptive global optimization with local search. University of California at San Diego, La Jolla, CA, 1994.

Hwang, R. K., Katayama, H. and Gen, M. U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. International Journal of Production Research 46 (2008) : 4637–4649.

Kennedy, J. and Eberhart, R. Particle swarm optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ (1995) : 1942-1948.

Kim, Y. K., Hyun, C. J. and Kim, Y. Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach. Computers & Operations Research 23 (1996) : 1131-1145.

Kim, Y. K., Kim, Y. H. and Kim, Y. J. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. Production Planning & Control 11 (2000) : 44 –53.

Kim, Y. K., Kim, Y. J. and Kim, Y. H. Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives. Computers & Industrial Engineering 30 (1996) : 397-409.

Koulamas, C. and Kyparisis, G. J. Single-machine and two-machine flowshop scheduling with general learning functions. European Journal of Operational Research 178 (2007) : 402-407.

Kumar R. and Singh P. K. Pareto evolutionary algorithm hybridized with local search for bi-objective TSP. Studies in Computational Intelligence 75 (2007) : 361-398.

Kundra, H. and Sood, M. Cross-Contry Path Finding using Hybrid approach of PSO and BBO. International Journal of Computer Applications. 7 (2010).

Kuo, W. H. and Yang, D. L. Single-machine group scheduling with a time-dependent learning effect. Computers & Operations Research 33 (2006) : 2099-2112.

Kuo, W. H. and Yang, D. L. Single machine scheduling with past-sequence-dependenct setup times and learning effects. Information Processing Letters 102 (2007) : 22-26.

Lee, T. O., Kim, Y. H. and Kim, Y. K. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. Computers & Industrial Engineering 40 (2001) : 273-292.

Liao, C. J., Tseng, C. T. and Luarn, P. A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems. Computers & Operations Research 34 (2007) : 3099 – 3111.

Lee, W.-C., Wu, C.-C., Minimizing total completion time in a two-machine flowshop with a learning effect. International Journal of Production Economics 88 (2004) : 85–93.

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

Mansouri, S. A. A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. European Journal of Operational Research 167 (2005) : 696–716.

Mo, H. and Xu, L. Biogeography Migration Algorithm for Traveling Saleman Problem. International Conference on Swarm Intelligence. 2010

Mosheiov, G. Scheduling problems with a learning effect. European Journal of Operational Research 132 (2001) : 687-693.

Mosheiov, G., Sidney, J.B., Scheduling with general job-dependent learning curves. European Journal of Operational Research 147 (2003.) : 665-670.

Ozcan, U. and Toklu, B. Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models. Computers & Operations Research (2009a) : 1955-1965.

Ozcan, U. and Toklu, B. A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2009b) : 822-829.

Ozcan, U. and Toklu, B. Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. Computers & Industrial Engineering (2009c) : 217-227.

Parames Chutima and Penpak Pinkoompee. Multi-objective sequencing problems of mixed-model assembly systems using memetic algorithms. ScienceAsia 35 (2009) : 295-305.

Rameshkumar, K., Suresh, R. K. and Mohanasundaram, K. M. Discrete particle swarm optimization (DPSO) algorithm for permutation flowshop scheduling to minimize makespan. Lecture Notes in Computer Science 3612 (2005) : 572-581.

Shi, Y. and Eberhart, R. C. A modified particle swarm optimizer. Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation (1998) : 69–173.

Simaria, A. S. and Vilarinho, P. M. 2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines. Computers & Industrial Engineering (2007) : 489-506.

Simon, D. Biogeography-based optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 12(6) (2008): 702-713.

Toksari, M. D., Isleyen, S. K., Guner, E. and Baykoc, O. F. Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. Applied Methematical Modelling 32 (2008) : 2954-2961.

Tseng, C. T. and Liao, C. J. A discrete particle swarm optimization for lot-streaming flowshop scheduling problem. European Journal of Operational Research 191 (2008) : 360-373.

Wang, J. B., Huang, X., Wang, X. Y., Yin, N. and Wang, L. Y. Learning effect and deteriorating jobs in the single machine scheduling problems. Applied Methematical Modelling 33 (2009) : 3848-3853.

Wang, J. B., Ng, C. T., Cheng, T. C. E. and Liu, L. L. Single-machine scheduling with a time-dependent learning effect. Int. J. Production Economics 111 (2008) : 802-811.

Warin Wattanapornprom, Panuwat Olanviwitchai, Parames Chutima and Prabhas Chongstitvatana. Multi-objective combinatorial optimisation with coincidence algorithm. IEEE Congress on Evolutionary Computation (2009) : 1675-1682.

Wu, C. C. and Lee, W. C. Single-machine scheduling problems with a learning effect. Applied Methematical Modelling 32 (2008) : 1191-1197.

Wu, E. F., Jin, Y., Bao, J. S. and Hu, X. F. A branch-and-bound algorithm for two-sided assembly line balancing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2008) : 1009-1015.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง

1. รายละเอียดปัญหาการทดลอง

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ปัญหา	ความสัมพันธ์ก่อน - หลัง	จำนวนผลิตภัณฑ์ (ชนิด)	จำนวนงาน	รอบเวลาในการทำงาน (นาที)
1	Kim et al. (2000)	2	12	5, 7, 8
2	Lee et al. (2001)	3	65	326, 490, 544
3	Bartholdi (1993)	4	148	204, 306, 408
4	Lee et al. (2001)	4	205	1888, 2266, 2454
5	Case Study*	2	183	22

2. เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของสายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 12 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.2 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 12 ขั้นงาน

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
1	L	-
2	R	-
3	E	-
4	L	1
5	E	2
6	L	3
7	E	4, 5
8	R	5
9	E	5, 6
10	E	7, 8
11	E	9
12	R	11

2.2 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 65 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.3 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 65 ขั้นงาน

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
1	E	-
2	E	-
3	E	1, 2
4	E	3
5	E	4
6	E	4
7	R	4
8	R	7
9	L	4
10	L	9
11	E	4
12	E	4
13	E	-
14	E	5, 6, 8, 10, 11, 12, 13
15	E	14
16	L	15
17	L	16
18	R	14
19	R	18
20	E	14
21	E	19, 20
22	E	14
23	E	3
24	E	23
25	L	4
26	R	4
27	R	4
28	R	27
29	L	-
30	L	-
31	E	17, 21, 22, 24, 25, 26
32	E	31
33	E	32
34	E	33
35	R	34
36	E	31
37	E	36

ตารางที่ ก.3 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 65 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
38	E	37
39	L	38
40	R	38
41	E	4
42	E	41
43	E	42
44	R	-
45	L	4
46	E	44, 45
47	L	46
48	L	47
49	E	4
50	E	28, 29, 30, 35, 39, 40, 48, 49
51	R	31
52	E	31
53	L	31
54	E	31
55	R	31
56	E	31
57	E	56
58	L	31
59	R	31
60	E	31
61	R	31
62	E	31
63	L	62
64	L	63
65	E	50, 51, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 64

2.3 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 148 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.4 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 148 ขั้นงาน

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
1	E	-
2	E	-
3	E	2
4	E	3
5	E	1, 3

ตารางที่ ก.4 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
6	E	1, 3
7	E	1, 3
8	E	1, 4
9	E	6
10	E	8
11	E	-
12	E	11
13	E	12
14	E	5, 7, 9, 10
15	L	14
16	R	14
17	E	15, 16
18	L	17
19	R	17
20	E	18, 19
21	R	20
22	L	20
23	L	20
24	R	20
25	R	21, 22, 23, 24
26	R	21, 22, 23, 24
27	L	21, 22, 23, 24
28	L	21, 22, 23, 24
29	E	25, 26, 27, 28
30	R	-
31	E	29
32	L	-
33	R	-
34	L	32
35	R	33
36	R	31, 34, 35
37	R	36
38	R	37
39	R	38
40	R	39
41	R	40
42	L	-
43	L	42
44	L	43

ตารางที่ ก.4 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
45	L	37
46	L	45
47	L	46
48	E	40, 47
49	L	47
50	E	-
51	L	50
52	L	-
53	L	51, 52
54	L	55
55	R	40, 47
56	E	-
57	L	-
58	L	-
59	E	-
60	E	-
61	E	-
62	E	61
63	E	62
64	R	-
65	E	64
66	E	65
67	E	63, 66
68	E	67
69	R	51
70	R	-
71	R	64, 70
72	R	55, 64
73	E	56
74	E	-
75	E	59, 74
76	E	55
77	E	76
78	E	77
79	E	57, 78, 90
80	E	79
81	E	80
82	E	69
83	E	82

ตารางที่ ก.4 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
84	E	58, 73
85	E	84
86	E	58, 73
87	E	55, 59, 73
88	E	55, 73, 75
89	E	82
90	E	89
91	E	-
92	E	-
93	L	-
94	E	-
95	E	68
96	E	73
97	E	75
98	E	68
99	E	65
100	E	99
101	E	95, 98, 100
102	E	101
103	E	101
104	E	96
105	E	91
106	E	81
107	E	106
108	E	107
109	E	108
110	E	109
111	E	88
112	L	111
113	L	112
114	E	113
115	E	114
116	E	113
117	E	116
118	E	117
119	E	105
120	E	113
121	E	120
122	E	121

ตารางที่ ก.4 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
123	E	113
124	E	123
125	E	115, 124
126	E	118, 122
127	E	102, 103
128	L	113
129	L	128
130	L	129
131	L	130
132	E	-
133	L	53
134	R	72
135	E	92, 132, 133, 134
136	E	135
137	L	130
138	E	-
139	E	138
140	E	139
141	L	-
142	R	141
143	L	82, 142
144	L	-
145	R	144
146	R	82, 142
147	L	142, 145
148	R	142, 145

2.4 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
1	E	-
2	E	-
3	R	2
4	L	2
5	E	3, 4
6	E	-

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
7	R	5
8	R	7
9	R	8
10	R	9
11	R	10
12	R	11
13	L	5
14	L	13
15	L	14
16	L	15
17	L	16
18	L	17
19	E	-
20	E	-
21	E	-
22	E	20, 21
23	E	22
24	E	23
25	R	-
26	L	24
27	R	24
28	R	24, 25
29	R	28
30	R	29
31	R	30
32	R	30
33	R	29
34	L	23
35	E	26, 27, 31, 32, 33, 34
36	E	1, 6, 12, 18, 19, 35
37	L	36
38	L	37
39	L	38
40	E	36
41	E	36
42	E	36
43	L	40, 42
44	L	43
45	L	39, 44

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
46	L	45
47	L	46
48	L	45
49	L	48
50	L	49
51	L	45
52	L	51
53	L	45
54	R	40, 42
55	R	54
56	R	55
57	R	56
58	R	57
59	R	55
60	R	59
61	R	55
62	E	36
63	E	62
64	E	63
65	E	64
66	E	65
67	E	66
68	E	64
69	E	36
70	E	69
71	E	70
72	E	36
73	E	71, 72
74	E	73
75	E	36
76	E	74
77	E	76
78	L	76
79	R	76
80	E	67, 68, 77, 78, 79
81	E	80
82	E	77
83	E	36
84	E	81

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
85	E	84
86	E	85
87	E	86
88	E	85
89	E	88
90	R	85
91	R	90
92	R	41, 47, 50, 52, 53, 58, 60, 61, 75, 82, 83, 87, 89, 91
93	R	92
94	E	92
95	R	92
96	E	92
97	E	92
98	E	92
99	E	92
100	E	97, 98, 99
101	E	100
102	E	101
103	E	100
104	R	103
105	L	100
106	L	105
107	E	105
108	L	106, 107
109	E	100
110	R	36
111	L	36
112	R	36
113	E	95, 96, 102, 104, 108, 109, 110, 111, 112
114	L	113
115	E	113
116	R	113
117	E	113
118	E	113
119	E	113
120	E	113
121	E	113
122	E	113
123	E	113

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
124	E	113
125	E	124
126	R	118, 119, 120, 121, 122, 123, 125
127	E	126
128	E	126
129	E	126
130	R	100
131	E	100
132	R	131
133	R	132
134	R	100
135	L	93, 94, 127, 128, 129
136	L	130, 135
137	E	135
138	E	135
139	E	135
140	L	135
141	L	135
142	L	135
143	L	140, 141, 142
144	E	135
145	E	135
146	L	145
147	L	135
148	R	135
149	R	135
150	R	135
151	E	135
152	L	135
153	L	135
154	E	153
155	E	154
156	E	155
157	E	156
158	R	135
159	R	158
160	E	114,115, 116, 117, 137, 138, 139, 143, 144, 146, 147, 148,
161	R	113
162	R	113

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
163	R	113
164	R	160, 163
165	R	162, 164
166	R	165
167	R	161, 166
168	R	167
169	L	113
170	L	160, 169
171	L	113
172	L	170, 171
173	L	172
174	L	113
175	L	173, 174
176	L	175
177	E	168, 176
178	E	160
179	L	160
180	L	178, 179
181	L	180
182	L	181
183	L	180
184	L	160
185	E	177
186	R	177
187	R	177
188	L	177
189	E	133, 134, 136, 157, 159, 185, 186, 187, 188
190	E	189
191	R	189
192	E	191
193	R	189
194	E	177
195	L	177
196	R	195
197	R	194, 196
198	R	197
199	R	197
200	R	199
201	L	-

ตารางที่ ก.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
202	L	197, 201
203	L	113
204	E	113
205	E	113

2.5 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 183 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.6 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 183 ขั้นงาน

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
1	L	-
2	R	-
3	L	-
4	R	-
5	L	1
6	R	2
7	L	3
8	R	4
9	R	6
10	L	-
11	R	-
12	L	5
13	R	6
14	E	10
15	L	5
16	R	6
17	L	5
18	R	6
19	L	7
20	R	8
21	E	10, 11
22	E	-
23	R	-
24	L	-
25	R	-
26	L	-
27	E	-
28	L	5
29	R	6, 9

ตารางที่ ก.6 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
30	L	7
31	R	8
32	E	-
33	L	-
34	R	-
35	E	-
36	E	5, 6, 7, 8
37	L	15
38	R	16
39	L	17
40	R	18
41	L	19
42	R	20
43	L	12, 21
44	R	13, 21
45	L	28
46	R	29
47	L	30
48	R	31
49	E	22, 27, 30, 31, 32, 35
50	E	22, 27, 28, 29, 30, 31
51	L	26
52	R	25
53	E	36
54	E	30, 31, 32, 35, 50
55	E	28, 29
56	E	13, 14
57	L	33, 49
58	R	34, 49
59	E	35, 54
60	E	59
61	E	59, 60
62	E	60, 61
63	L	60, 61
64	R	60, 61
65	E	63, 64
66	E	60, 65
67	E	60, 62, 66
68	E	60, 67

ตารางที่ ก.6 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
69	E	68
70	E	57, 58, 69
71	L	50
72	R	50
73	R	43, 44
74	E	50
75	L	74
76	L	49, 73
77	L	56
78	R	56
79	E	56
80	E	69
81	E	49, 80
82	E	69, 81
83	L	47, 48, 49, 69
84	L	45, 46, 79
85	R	45, 46, 78, 83
86	R	45, 46, 84, 85
87	R	45, 46, 84, 85, 86
88	R	47, 48, 49, 83, 87
89	E	47, 48, 49, 83
90	R	84, 85, 86
91	L	55, 83, 84, 87
92	L	43, 90, 91
93	E	84, 87, 90
94	L	83, 87, 89
95	E	83, 88, 89
96	L	88, 89
97	E	83, 88, 90, 91
98	R	85, 87, 91
99	E	53
100	E	99
101	E	99
102	E	88, 98
103	R	102
104	E	102, 103
105	R	102, 103, 104
106	E	102, 104, 105
107	R	102, 104, 105, 106

ตารางที่ ก.6 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
108	E	102, 104, 105, 106
109	R	102, 105, 106
110	E	107, 108
111	L	92
112	L	111
113	R	110, 112
114	E	99
115	L	39, 114
116	R	40, 115
117	E	108
118	E	103
119	E	106
120	E	118, 119
121	L	119, 120
122	R	119, 120
123	E	119, 120
124	L	37
125	R	38
126	L	39
127	R	40, 116
128	L	41
129	R	42
130	R	85
131	R	105
132	L	115
133	R	116
134	L	41
135	R	42
136	L	133
137	R	134
138	L	135
139	R	137
140	L	124, 133
141	R	125, 132, 133
142	L	128, 132, 134, 135
143	R	129, 135
144	E	128, 140, 141, 142, 143
145	E	140, 141, 142, 143, 144
146	E	140, 141, 142, 143, 145

ตารางที่ ก.6 เงื่อนไขการจัดสรรขั้นงานของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	ด้าน	ขั้นงานก่อนหน้า
147	E	140, 141, 142, 143, 146
148	L	84, 140, 141, 142, 143
149	L	99, 100
150	R	99, 100
151	L	99, 100
152	R	99, 100
153	L	99, 101
154	R	99, 101
155	L	51, 52
156	R	52
157	E	99, 120
158	L	155, 157
159	R	157, 158
160	E	99, 120
161	L	160
162	R	160
163	E	117
164	L	121
165	R	122, 164
166	E	123, 165
167	E	166
168	E	166,167
169	L	168
170	R	-
171	L	169, 170
172	R	169, 170, 171
173	R	169, 170, 171, 172
174	L	169, 170, 171, 172, 173
175	R	174
176	L	174, 175
177	R	174, 175, 176
178	L	174, 175, 176, 177
179	R	171, 175
180	R	176, 177
181	R	173, 177
182	L	174, 178
183	L	182

3. เวลาดำเนินงานของปัญหา

3.1 เวลาดำเนินงานของปัญหา 12 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.7 เวลาดำเนินการของปัญหา 12 ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน		เวลาเฉลี่ย
	A	B	
1	2	3	2.5
2	3	3	3
3	2	0	1
4	3	2	2.5
5	1	2	1.5
6	1	0	0.5
7	3	2	2.5
8	3	1	2
9	2	1	1.5
10	2	3	2.5
11	0	2	1
12	0	1	0.5

3.2 เวลาดำเนินงานของปัญหา 65 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.8 เวลาดำเนินการของปัญหา 65 ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน			เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	
1	35	26	28	29.67
2	14	15	38	22.33
3	1	54	58	37.67
4	18	1	11	10.00
5	36	33	16	28.33
6	29	26	2	19.00
7	159	61	88	102.67
8	70	5	54	43.00
9	24	16	32	24.00
10	99	40	43	60.67
11	56	56	40	50.67
12	51	47	12	36.67
13	94	132	33	86.33
14	29	6	54	29.67

ตารางที่ ก.8 เวลาดำเนินการของปัญหา 65 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน			เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	
15	39	1	33	24.33
16	15	16	121	50.67
17	11	2	12	8.33
18	74	58	184	105.33
19	34	14	10	19.33
20	19	19	77	38.33
21	14	14	24	17.33
22	12	24	8	14.67
23	19	61	8	29.33
24	38	76	22	45.33
25	89	43	33	55.00
26	66	45	45	52.00
27	27	6	35	22.67
28	189	249	227	221.67
29	2	48	82	44.00
30	21	33	25	26.33
31	6	5	4	5.00
32	18	12	3	11.00
33	13	53	3	23.00
34	41	39	52	44.00
35	21	63	34	39.33
36	33	28	8	23.00
37	147	103	79	109.67
38	43	12	85	46.67
39	15	24	19	19.33
40	27	1	7	11.67
41	4	5	17	8.67
42	25	80	104	69.67
43	22	18	28	22.67
44	3	7	23	11.00
45	44	35	15	31.33
46	26	34	20	26.67
47	2	19	10	10.33
48	41	44	18	34.33
49	9	3	16	9.33
50	8	46	5	19.67
51	20	13	40	24.33
52	35	13	31	26.33

ตารางที่ ก.8 เวลาดำเนินการของปัญหา 65 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน			เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	
54	38	93	35	55.33
55	11	23	12	15.33
56	56	7	79	47.33
57	23	98	67	62.67
58	52	64	23	46.33
59	16	2	19	12.33
60	10	24	3	12.33
61	98	66	37	67.00
62	3	11	5	6.33
63	117	15	3	45.00
64	54	85	143	94.00
65	35	26	55	38.67

3.3 เวลาดำเนินงานของปัญหา 148 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินการของปัญหา 148 ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
1	12	10	10	6	9.5
2	10	24	1	24	14.75
3	7	6	1	4	4.5
4	42	38	19	46	36.25
5	26	3	29	12	17.5
6	5	7	1	6	4.75
7	19	13	25	26	20.75
8	11	11	32	32	21.5
9	20	33	30	8	22.75
10	21	29	8	16	18.5
11	3	18	12	1	8.5
12	7	2	2	10	5.25
13	10	2	10	13	8.75
14	6	15	16	7	11
15	16	10	10	35	17.75
16	23	23	39	18	25.75
17	6	3	2	6	4.25
18	3	12	23	7	11.25

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินการของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
19	20	10	8	23	15.25
20	6	6	4	2	4.5
21	5	6	7	7	6.25
22	1	5	8	4	4.5
23	10	8	8	7	8.25
24	6	6	5	2	4.75
25	3	11	2	5	5.25
26	10	13	5	13	10.25
27	4	8	7	3	5.5
28	24	17	14	11	16.5
29	2	10	6	9	6.75
30	18	25	2	7	13
31	3	4	9	4	5
32	1	6	8	6	5.25
33	13	2	4	11	7.5
34	20	16	7	30	18.25
35	40	23	5	33	25.25
36	20	23	24	11	19.5
37	3	2	5	2	3
38	75	9	37	23	36
39	7	6	3	6	5.5
40	12	5	2	14	8.25
41	38	15	12	24	22.25
42	5	6	2	9	5.5
43	8	29	20	25	20.5
44	62	23	37	6	32
45	52	34	78	10	43.5
46	7	5	3	2	4.25
47	21	10	42	6	19.75
48	1	5	8	13	6.75
49	26	20	41	40	31.75
50	23	25	34	12	23.5
51	18	15	25	7	16.25
52	6	7	10	7	7.5
53	51	61	28	74	53.5
54	13	18	23	10	16
55	3	3	2	5	3.25
56	7	17	11	26	15.25

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินการของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
57	7	3	9	10	7.25
58	33	42	9	43	31.75
59	4	14	2	2	5.5
60	3	2	2	1	2
61	1	2	1	3	1.75
62	5	5	3	5	4.5
63	13	13	7	15	12
64	26	4	22	25	19.25
65	1	4	4	3	3
66	19	15	14	9	14.25
67	8	4	5	5	5.5
68	14	3	10	6	8.25
69	4	6	3	13	6.5
70	12	7	6	12	9.25
71	27	46	48	34	38.75
72	14	4	14	25	14.25
73	23	37	27	19	26.5
74	29	4	31	29	23.25
75	51	17	24	34	31.5
76	5	1	4	5	3.75
77	23	10	28	24	21.25
78	6	8	8	4	6.5
79	15	107	90	78	72.5
80	4	1	2	2	2.25
81	14	12	4	8	9.5
82	7	9	6	3	6.25
83	20	9	8	17	13.5
84	7	13	7	24	12.75
85	13	8	9	18	12
86	13	21	12	8	13.5
87	42	13	13	9	19.25
88	9	1	18	20	12
89	5	10	6	12	8.25
90	15	9	2	9	8.75
91	40	83	37	93	63.25
92	6	22	34	10	18
93	25	4	27	17	18.25
94	29	43	27	12	27.75

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินการของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
95	18	2	10	16	11.5
96	9	13	13	17	13
97	6	12	5	2	6.25
98	31	5	23	32	22.75
99	13	49	44	24	32.5
100	20	31	34	16	25.25
101	7	11	13	6	9.25
102	17	4	6	19	11.5
103	8	3	14	7	8
104	1	20	14	35	17.5
105	53	49	11	7	30
106	1	5	12	6	6
107	9	8	6	7	7.5
108	7	12	2	37	14.5
109	32	33	14	19	24.5
110	20	28	20	8	19
111	6	9	14	9	9.5
112	87	70	94	9	65
113	7	3	12	11	8.25
114	20	17	9	16	15.5
115	15	5	3	11	8.5
116	2	12	22	4	10
117	5	10	14	19	12
118	9	9	22	9	12.25
119	22	23	47	24	29
120	23	21	14	30	22
121	22	18	8	20	17
122	20	13	25	8	16.5
123	14	18	6	8	11.5
124	1	5	15	12	8.25
125	12	13	6	11	10.5
126	39	42	5	27	28.25
127	24	5	26	39	23.5
128	5	4	9	9	6.75
129	8	7	8	2	6.25
130	6	9	2	5	5.5
131	9	11	11	15	11.5
132	3	16	3	12	8.5

ตารางที่ ก.9 เวลาดำเนินการของปัญหา 148 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
133	15	13	15	9	13
134	19	16	13	10	14.5
135	35	8	4	12	14.75
136	50	62	23	45	45
137	18	2	18	12	12.5
138	4	10	15	15	11
139	23	1	24	34	20.5
140	1	22	3	7	8.25
141	89	123	7	9	57
142	85	48	62	76	67.75
143	48	30	22	6	26.5
144	70	98	131	100	99.75
145	90	112	58	110	92.5
146	47	45	48	13	38.25
147	61	6	20	75	40.5
148	65	18	15	19	29.25

3.4 เวลาดำเนินงานของปัญหา 205 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินการของปัญหา 205 ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
1	153	283	92	460	247
2	19	21	34	7	20.25
3	157	219	218	172	191.5
4	68	42	103	18	57.75
5	3	116	132	68	79.75
6	87	5	41	10	35.75
7	46	51	0	3	25
8	38	57	16	22	33.25
9	16	6	12	15	12.25
10	106	102	70	26	76
11	19	1	29	24	18.25
12	0	7	24	12	10.75
13	1	24	22	31	19.5
14	52	23	20	17	28
15	20	8	19	25	18

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินการของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
16	98	22	36	39	48.75
17	2	31	0	31	16
18	40	37	15	22	28.5
19	38	13	32	17	25
20	64	33	8	42	36.75
21	28	34	69	11	35.5
22	37	35	33	11	29
23	3	2	6	12	5.75
24	3	31	70	61	41.25
25	10	66	45	82	50.75
26	10	9	0	10	7.25
27	17	28	13	37	23.75
28	23	19	41	34	29.25
29	5	38	41	30	28.5
30	45	14	58	64	45.25
31	42	23	2	19	21.5
32	15	5	6	7	8.25
33	11	8	13	8	10
34	10	5	6	9	7.5
35	46	9	22	85	40.5
36	33	59	14	37	35.75
37	13	20	0	4	9.25
38	9	10	1	9	7.25
39	8	6	5	0	4.75
40	37	12	29	62	35
41	5	190	91	46	83
42	44	54	69	70	59.25
43	10	16	34	15	18.75
44	14	40	24	78	39
45	18	15	3	17	13.25
46	5	4	5	1	3.75
47	28	13	26	14	20.25
48	2	9	22	34	16.75
49	10	9	9	0	7
50	7	9	10	43	17.25
51	138	215	62	194	152.25
52	63	64	8	3	34.5
53	14	14	6	30	16

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินการของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
54	41	5	34	2	20.5
55	8	84	64	12	42
56	3	22	34	32	22.75
57	3	2	11	2	4.5
58	10	15	30	31	21.5
59	115	196	208	215	183.5
60	44	72	25	23	41
61	42	12	82	62	49.5
62	3	2	23	16	11
63	26	8	35	6	18.75
64	13	30	19	29	22.75
65	86	103	77	45	77.75
66	135	77	95	92	99.75
67	6	10	23	13	13
68	22	4	14	0	10
69	21	49	34	10	28.5
70	77	58	40	55	57.5
71	10	6	9	14	9.75
72	140	55	127	127	112.25
73	142	309	200	4	163.75
74	63	72	79	2	54
75	324	290	222	356	298
76	83	54	96	82	78.75
77	111	132	160	86	122.25
78	35	42	30	65	43
79	31	51	37	58	44.25
80	40	4	103	93	60
81	24	26	39	10	24.75
82	77	88	16	2	45.75
83	296	261	194	34	196.25
84	9	86	8	33	34
85	25	118	109	97	87.25
86	40	84	9	86	54.75
87	19	9	50	59	34.25
88	48	33	85	52	54.5
89	34	19	13	13	19.75
90	26	88	74	58	61.5
91	11	55	32	77	43.75

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินการของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
92	5	72	49	89	53.75
93	177	69	137	143	131.5
94	162	83	39	415	174.75
95	46	28	39	44	39.25
96	140	86	189	201	154
97	7	7	16	5	8.75
98	36	45	43	49	43.25
99	47	23	47	49	41.5
100	19	1	70	17	26.75
101	30	33	38	43	36
102	4	3	10	8	6.25
103	29	18	10	40	24.25
104	12	11	10	31	16
105	125	67	215	89	124
106	83	58	77	45	65.75
107	66	36	6	14	30.5
108	7	21	21	24	18.25
109	93	14	83	31	55.25
110	240	151	236	95	180.5
111	6	33	39	43	30.25
112	274	30	227	77	152
113	30	8	30	29	24.25
114	16	52	107	95	67.5
115	36	34	0	10	20
116	22	67	19	155	65.75
117	23	40	25	13	25.25
118	203	132	157	177	167.25
119	56	5	46	56	40.75
120	14	59	30	37	35
121	44	1	33	31	27.25
122	57	49	27	31	41
123	19	0	22	12	13.25
124	197	165	3	74	109.75
125	6	5	25	9	11.25
126	135	264	134	109	160.5
127	20	29	9	13	17.75
128	18	47	10	39	28.5
129	2	38	50	24	28.5

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินการของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
130	5	2	11	36	13.5
131	79	164	926	877	511.5
132	268	139	188	54	162.25
133	556	219	228	355	339.5
134	229	334	219	365	286.75
135	16	64	58	38	44
136	1	34	34	38	26.75
137	39	35	29	16	29.75
138	26	20	40	44	32.5
139	12	36	232	55	83.75
140	4	13	92	48	39.25
141	77	100	142	2	80.25
142	109	13	82	19	55.75
143	49	41	47	23	40
144	118	187	318	33	164
145	196	150	130	104	145
146	77	76	63	54	67.5
147	35	18	38	28	29.75
148	27	37	44	18	31.5
149	38	43	22	53	39
150	41	43	45	20	37.25
151	58	82	57	93	72.5
152	29	7	30	6	18
153	19	16	8	16	14.75
154	6	0	8	55	17.25
155	82	99	180	179	135
156	201	98	96	167	140.5
157	4	14	33	48	24.75
158	34	10	10	2	14
159	13	34	12	9	17
160	17	30	18	6	17.75
161	30	17	39	40	31.5
162	8	63	17	52	35
163	25	3	20	13	15.25
164	16	46	67	96	56.25
165	13	61	55	1	32.5
166	67	97	40	28	58
167	65	87	49	58	64.75

ตารางที่ ก.10 เวลาดำเนินการของปัญหา 205 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	D	
168	52	20	28	72	43
169	56	12	58	48	43.5
170	73	16	77	59	56.25
171	36	48	25	51	40
172	94	0	79	59	58
173	13	90	70	75	62
174	40	50	64	5	39.75
175	75	69	8	64	54
176	46	101	84	29	65
177	0	8	10	7	6.25
178	49	158	177	79	115.75
179	16	78	15	36	36.25
180	41	54	33	7	33.75
181	18	18	5	15	14
182	33	16	47	10	26.5
183	79	48	134	75	84
184	11	25	53	22	27.75
185	71	134	109	194	127
186	3	2	2	11	4.5
187	70	12	2	47	32.75
188	5	3	66	2	19
189	89	124	73	20	76.5
190	42	92	55	96	71.25
191	5	70	186	149	102.5
192	149	153	45	21	92
193	17	1	20	1	9.75
194	5	19	6	112	35.5
195	83	17	32	22	38.5
196	40	24	50	21	33.75
197	25	8	29	9	17.75
198	241	281	238	82	210.5
199	12	6	8	8	8.5
200	24	20	12	8	16
201	117	42	108	143	102.5
202	53	2	85	20	40
203	9	28	91	12	35
204	39	6	66	31	35.5
205	144	6	131	73	88.5

3.5 เวลาดำเนินงานของปัญหา 183 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินการของปัญหา 183 ขั้นงาน

ขั้นงาน	เวลาดำเนินการ		เวลาเฉลี่ย
	A	B	
1	0.51	0.59	0.55
2	0.57	0.63	0.6
3	1.38	1.54	1.46
4	3.28	3.02	3.15
5	2.01	2.02	2.015
6	1.5	2.32	1.91
7	1.24	1.12	1.18
8	1.44	2.14	1.79
9	5.08	6.32	5.7
10	0.4	0.34	0.37
11	0.4	0.46	0.43
12	2.06	3.34	2.7
13	2.06	3.16	2.61
14	1	2.28	1.64
15	1.28	2.23	1.755
16	2.44	3.01	2.725
17	3.18	4.56	3.87
18	4.55	5.25	4.9
19	3.26	2.87	3.065
20	3.42	3.29	3.355
21	1.24	1.39	1.315
22	1.14	1.29	1.215
23	3.41	0.2	1.805
24	0.2	0.2	0.2
25	0.21	0.2	0.205
26	0.2	0.21	0.205
27	0.22	0.21	0.215
28	0.2	0.21	0.205
29	0.2	0.21	0.205
30	0.2	0.2	0.2
31	1.26	1.1	1.18
32	0.19	0.2	0.195
33	0.22	0.2	0.21
34	0.2	0.2	0.2
35	0.21	0.2	0.205
36	1.04	0.21	0.625

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินการของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินการ		เวลาเฉลี่ย
	A	B	
37	0.44	0.21	0.325
38	0.44	0.2	0.32
39	0.44	0.21	0.325
40	0.44	0.21	0.325
41	1.04	0.21	0.625
42	1.04	0.21	0.625
43	0.22	0.2	0.21
44	0.22	0.22	0.22
45	0.22	0.22	0.22
46	0.22	0.22	0.22
47	0.44	0.4	0.42
48	1.28	1.14	1.21
49	1.38	1.58	1.48
50	1.57	2.19	1.88
51	2.06	2.16	2.11
52	2.32	2.06	2.19
53	2.28	3.13	2.705
54	2.3	2.4	2.35
55	2.05	2.05	2.05
56	1.14	1.25	1.195
57	0.22	2.08	1.15
58	0.44	0.41	0.425
59	0.44	0.41	0.425
60	1.22	1.22	1.22
61	1.04	1.01	1.025
62	0.54	0.55	0.545
63	1.04	1.01	1.025
64	1.24	1.21	1.225
65	8.1	7.02	7.56
66	1.35	1.35	1.35
67	1	0.56	0.78
68	1.56	2.02	1.79
69	0.34	0.31	0.325
70	0.34	0.31	0.325
71	1.34	1.31	1.325
72	1.34	1.31	1.325
73	0.58	0.55	0.565
74	1.43	1.55	1.49

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินการของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินการ		เวลาเฉลี่ย
	A	B	
75	2.06	2.06	2.06
76	2.02	2.22	2.12
77	4.23	5.03	4.63
78	6.32	6.12	6.22
79	1.04	1.02	1.03
80	7.22	7.22	7.22
81	2.22	2.28	2.25
82	4.17	4.05	4.11
83	1.06	1.26	1.16
84	1.52	1.42	1.47
85	1.52	1.42	1.47
86	1.54	2.32	1.93
87	1.52	1.42	1.47
88	1.52	1.42	1.47
89	11.7	13.22	12.46
90	0.44	1.05	0.745
91	1.76	2.2	1.98
92	8.42	6.02	7.22
93	1.04	1.24	1.14
94	0.64	0.54	0.59
95	0.54	0.84	0.69
96	6.02	5.22	5.62
97	3.08	2.28	2.68
98	2.15	2.25	2.2
99	1.86	1.66	1.76
100	1.38	1.02	1.2
101	1.38	1.02	1.2
102	1.06	1.14	1.1
103	2.01	2.41	2.21
104	7.02	6.02	6.52
105	6.18	5.52	5.85
106	5.35	5.09	5.22
107	1.26	1.2	1.23
108	1.04	2.02	1.53
109	3.03	3.03	3.03
110	5.22	5.32	5.27
111	4.01	4.21	4.11
112	1.18	1.28	1.23

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินการของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินการ		เวลาเฉลี่ย
	A	B	
113	1.18	1.28	1.23
114	0.44	0.58	0.51
115	0.44	1	0.72
116	0.58	1.08	0.83
117	0.58	1.08	0.83
118	1.14	0.44	0.79
119	3.21	3.01	3.11
120	3.21	3.01	3.11
121	4.08	6.28	5.18
122	7.35	4.25	5.8
123	2.36	3.16	2.76
124	2.22	3.22	2.72
125	2.33	3.23	2.78
126	2.14	2.52	2.33
127	1.14	1.15	1.145
128	1.04	1.05	1.045
129	0.54	1.05	0.795
130	0.44	0.52	0.48
131	1.06	1.25	1.155
132	0.58	1.15	0.865
133	1.24	1.45	1.345
134	1.14	1.55	1.345
135	0.44	1.05	0.745
136	1.14	1.25	1.195
137	1.48	2.08	1.78
138	1.14	2.09	1.615
139	1.48	2.27	1.875
140	2.22	2.27	2.245
141	1.1	1.25	1.175
142	0.5	1.15	0.825
143	0.2	0.22	0.21
144	0.2	0.22	0.21
145	0.22	0.22	0.22
146	0.2	0.22	0.21
147	1.26	1.06	1.16
148	1.22	1.05	1.135
149	10.29	10.29	10.29
150	1.43	1.05	1.24

ตารางที่ ก.11 เวลาดำเนินการของปัญหา 183 ขั้นงาน (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาดำเนินการ		เวลาเฉลี่ย
	A	B	
151	1.14	1.05	1.095
152	10.39	10.39	10.39
153	1.1	1.28	1.19
154	1.11	1.25	1.18
155	1.56	3.06	2.31
156	5.5	3.06	4.28
157	7.13	7.05	7.09
158	6.32	8.32	7.32
159	1.28	1.29	1.285
160	1.54	2.13	1.835
161	5.48	6.28	5.88
162	7.25	6.05	6.65
163	4.06	4.06	4.06
164	1.3	1.3	1.3
165	1.24	1.25	1.245
166	2.28	2.28	2.28
167	1.24	1.25	1.245
168	2.28	2.28	2.28
169	2.21	2.25	2.23
170	2.06	2.26	2.16
171	2.02	3.02	2.52
172	7.23	7.03	7.13
173	4.32	5.22	4.77
174	5.01	5.21	5.11
175	7.02	8.22	7.62
176	0.56	1.05	0.805
177	0.54	1.15	0.845
178	1.1	0.56	0.83
179	2.26	2.06	2.16
180	0.54	1.05	0.795
181	5.03	4.43	4.73
182	5.12	5.12	5.12
183	4.01	4.41	4.21

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

จากผลการทดลองโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGAII) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (DPSO) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ (PSONK) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์แบบปรับตัวได้ (BBO-Adaptive) มีลำดับขั้นงานและการจัดสรรงานลงสถานีงานดังนี้

1. การค้นหาคำตอบของปัญหา 12 ขั้นงาน

ตาราง ข.1 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 5

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	1 3 4 6 2 5 7 8 10 9 11 12	1 2 1 1 2 2 3 4 3 4 4 4
DPSO	1 4 3 6 2 5 7 8 10 9 11 12	1 1 2 1 2 2 3 4 3 4 4 4
PSONK	1 3 4 6 2 5 7 8 9 10 11 12	1 2 1 1 2 2 3 4 4 3 4 4
BBO	1 4 3 6 2 5 7 8 10 9 11 12	1 1 2 1 2 2 3 4 3 4 4 4
BBO-LS	1 4 3 6 2 5 7 8 10 9 11 12	1 1 2 1 2 2 3 4 3 4 4 4

ตาราง ข.2 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	2 5 8 1 3 6 9 4 7 10 11 12	2 2 2 1 1 1 1 3 3 3 2 2
	2 5 3 1 8 6 9 11 12 4 7 10	2 2 1 1 2 1 1 2 2 3 3 3
DPSO	1 2 3 6 5 8 9 4 7 10 11 12	1 2 1 1 2 2 1 3 3 3 2 2
	3 1 2 5 8 6 9 11 12 4 7 10	1 1 2 2 2 1 1 2 2 3 3 3
PSONK	1 2 3 6 5 8 9 4 7 10 11 12	1 2 1 1 2 2 1 3 3 3 2 2
	3 2 1 5 8 6 9 11 12 4 7 10	1 2 1 2 2 1 1 2 2 3 3 3
BBO	3 1 2 5 8 6 9 11 12 4 7 10	1 1 2 2 2 1 1 2 2 3 3 3
	1 2 3 6 5 9 8 4 7 11 12 10	1 2 1 1 2 1 2 3 3 2 2 3
BBO-LS	3 2 5 8 1 6 9 11 12 4 7 10	1 2 2 2 1 1 1 2 2 3 3 3
	1 2 5 8 3 6 9 4 7 10 11 12	1 2 2 2 1 1 1 3 3 3 2 2

ตาราง ข.3 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 12 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	2 5 8 3 6 9 11 12 1 4 7 10	2 2 2 1 1 1 1 2 3 3 3 3
	1 2 3 6 5 8 9 11 12 4 7 10	1 2 1 1 2 2 1 1 2 3 3 3
DPSO	1 2 5 8 3 6 9 11 12 4 7 10	1 2 2 2 1 1 1 1 2 3 3 3
	2 5 8 3 6 9 11 12 1 4 7 10	2 2 2 1 1 1 1 2 3 3 3 3
PSONK	2 3 5 6 8 9 11 12 1 4 7 10	2 1 2 1 2 1 1 2 3 3 3 3
	1 2 3 6 5 9 8 11 12 4 7 10	1 2 1 1 2 1 2 1 2 3 3 3
BBO	3 6 2 5 8 9 11 12 1 4 7 10	1 1 2 2 2 1 1 2 3 3 3 3
	2 5 8 1 3 6 9 11 12 4 7 10	2 2 2 1 1 1 1 1 2 3 3 3
BBO-LS	2 5 8 3 6 9 11 12 1 4 7 10	2 2 2 1 1 1 1 2 3 3 3 3
	2 1 3 6 5 8 9 11 12 4 7 10	2 1 1 1 2 2 1 1 2 3 3 3

2. การค้นหาคำตอบของปัญหา 65 ขั้นงาน

ตาราง ข.4 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	29 44 2 13 30 1 3 23 24 4 5 26 45 27 28 6 7 41 42 43 12 11 46 47 48 25 8 9 10 14 15 16 17 18 19 22 20 21 31 52 55 54 56 57 61 51 36 59 37 38 40 39 58 60 53 32 33 34 35 62 63 64 49 50 65	1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 4 1 1 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 3 6 6 6 6 5 6 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 6 5 5 5 6 6 5
	29 44 2 13 30 1 3 4 26 25 5 41 27 28 42 6 45 11 49 46 47 48 7 8 12 23 43 9 10 14 18 19 15 16 17 22 20 21 24 31 55 52 54 56 57 62 59 53 36 61 37 38 40 39 32 33 58 34 35 63 60 51 64 50 65	1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 6 5 5 6 6 5 5 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 6 5
	29 30 44 1 13 2 3 23 24 4 25 27 28 11 12 7 41 42 43 8 49 45 46 47 48 6 26 5 9 10 14 20 18 22 15 16 17 19 21 31 55 52 54 56 57 61 53 36 37 38 39 58 32 33 34 35 60 40 59 51 62 63 64 50 65	1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 1 2 4 1 1 1 4 1 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 6 5 5 6 5 5 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 6 6
	44 29 2 13 30 1 3 23 24 4 25 5 27 28 6 7 41 42 43 12 11 45 46 47 48 9 10 8 26 14 20 18 15 16 17 22 19 21 31 55 52 54 56 57 61 53 36 37 38 39 58 32 33 34 35 60 59 51 40 62 63 64 49 50 65	2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 4 1 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 6 5 5 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 6 6
	29 30 44 2 13 1 3 4 25 5 27 28 6 41 42 43 7 49 45 46 47 48 12 11 23 24 8 26 9 10 14 18 15 20 16 17 22 19 21 31 55 52 54 56 57 61 53 36 37 38 39 58 32 33 34 35 60 51 59 40 62 63 64 50 65	1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1 1 3 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 4 3 5 6 6 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 6 5

ตาราง ข.4 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	2 13 30 44 29 1 3 23 24 4 9 10 12 45 46 47 48 41 42 43 26 49 5 11 25 7 8 6 14 18 22 15 16 17 19 20 21 31 51 54 58 52 60 55 56 57 53 59 32 33 34 35 61 62 63 64 27 28 36 37 38 39 40 50 65	2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 3 4 4 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 6 6 5 5 5 5 6 6 5 5
	2 13 44 30 29 1 3 23 24 4 6 9 11 7 8 41 42 43 25 12 5 26 10 14 18 19 22 27 28 49 20 21 45 46 47 48 15 16 17 31 60 51 61 54 58 53 32 59 55 33 34 35 36 37 38 39 40 50 62 63 64 56 57 52 65	2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 4 3 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 6 3 3 5 5 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 6
PSONK	30 2 44 13 1 3 23 24 4 27 28 25 49 5 9 10 11 45 46 47 48 29 6 7 8 26 12 14 18 19 15 16 17 22 20 21 31 58 32 33 34 35 59 55 53 60 61 36 37 38 39 40 50 54 52 51 56 57 41 42 43 62 63 64 65	1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 3 2 4 4 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 4 4 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 6 5 5 5 5 5 5
	2 44 1 3 23 24 4 27 28 12 6 5 49 45 46 47 48 29 41 42 43 26 11 7 8 9 10 25 13 30 14 18 19 15 16 17 20 21 22 31 51 56 57 54 53 59 58 55 62 63 64 32 33 34 35 36 37 38 40 39 50 61 60 52 65	2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2 2 3 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 6 3 6 5 6 5 5 5 6 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 5 5 5
BBO	29 1 13 44 30 2 3 23 24 4 26 5 45 41 42 7 27 28 46 47 48 25 9 6 10 11 49 8 12 14 20 22 18 19 15 16 17 21 31 59 58 55 54 53 61 36 37 38 39 56 57 51 32 33 34 35 60 52 43 62 63 64 40 50 65	1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 4 4 1 1 1 1 1 3 3 4 4 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 4 4 4 5 6 6 5 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 6 6 5 5 6 6 5
	29 2 44 1 3 23 24 30 4 26 45 46 47 48 41 12 25 49 27 28 11 9 10 7 6 5 8 13 14 22 20 18 19 21 15 16 17 31 58 55 61 60 56 57 54 36 37 53 38 40 32 33 34 35 51 52 39 50 59 42 43 62 63 64 65	1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 1 4 1 3 4 3 4 4 3 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 3 5 5 6 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5
	13 44 2 30 29 1 3 23 24 4 7 8 11 41 42 6 9 10 12 26 25 45 46 47 48 49 27 28 5 14 20 22 18 19 21 15 16 17 31 52 51 58 60 59 53 61 32 33 34 35 56 55 57 54 36 37 38 39 40 50 43 62 63 64 65	2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 4 3 3 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 4 6 5 6 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 5 6 5 6 6 5 5 5
	44 30 2 13 1 3 23 24 4 49 45 46 47 48 26 27 28 25 41 42 43 11 12 9 7 8 10 6 5 14 18 15 19 16 17 20 21 22 31 54 61 58 56 62 63 64 55 51 36 37 38 40 60 32 33 34 35 57 39 52 59 53 29 50 65	2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 3 4 3 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 3 6 3 3 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 5 5 6 6 6 5 5 5 5
BBO-LS	29 13 30 1 2 44 3 23 24 4 25 26 41 42 7 8 49 27 28 6 5 12 11 9 10 14 18 20 15 16 17 22 45 46 47 48 19 21 31 61 58 56 52 53 57 51 59 60 32 33 34 35 55 54 43 62 63 64 36 37 38 40 39 50 65	1 2 1 1 2 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 4 4 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 6 3 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 5 6 6
	29 13 30 44 2 1 3 4 25 26 41 42 7 8 49 23 24 27 28 6 5 12 11 9 10 14 18 20 15 16 17 22 45 46 47 48 19 21 31 61 58 56 52 53 57 51 59 60 32 33 34 35 55 54 43 62 63 64 36 37 38 40 39 50 65	1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 4 4 1 1 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 5 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 5 5 6

ตาราง ข.4 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 326 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	29 30 1 13 44 2 3 23 24 4 25 26 41 42 7 8 49 27 28 5 6 12 11 9 10 14 18 20 15 16 17 22 45 46 47 48 19 21 31 61 58 56 52 53 57 51 59 60 32 33 34 35 55 54 43 62 63 64 36 37 38 40 39 50 65	1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 4 4 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 6 3 5 5 5 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 5 5 6
	29 30 1 13 44 2 3 23 24 4 25 26 41 42 7 8 49 27 28 5 6 12 11 9 10 14 18 20 15 16 17 22 45 46 47 48 19 21 31 61 58 56 52 53 57 51 59 60 32 33 34 35 55 54 43 62 63 64 36 37 38 40 39 50 65	1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 4 4 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 6 3 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 5 5 6
	29 30 13 1 44 2 3 23 24 4 25 26 41 42 7 8 49 27 28 6 5 12 11 9 10 14 18 20 15 16 17 22 45 46 47 48 19 21 31 61 58 56 54 53 57 51 59 60 32 33 34 35 55 52 43 62 63 64 36 37 38 40 39 50 65	1 1 2 1 2 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 4 4 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 5 5 4 4 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 5 6 6

ตาราง ข.5 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	1 44 29 2 13 30 3 23 24 4 26 41 42 43 49 7 5 25 8 12 6 27 28 11 9 10 14 22 15 20 18 19 21 16 17 31 52 61 56 57 54 53 51 62 63 64 36 37 38 39 58 59 60 45 46 47 48 40 55 32 33 34 35 50 65	2 2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 4 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4
	1 13 44 2 30 29 3 23 24 4 26 49 41 42 43 25 7 8 5 6 27 28 12 11 9 10 14 22 18 19 15 16 17 45 46 47 48 20 21 31 58 61 54 55 36 37 38 39 53 32 33 34 35 59 51 60 62 63 64 40 50 56 57 52 65	1 2 2 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 4 4 1 1 1 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 3
	1 44 29 2 30 13 3 23 24 4 7 8 27 28 26 49 6 45 46 47 48 41 42 12 25 5 9 10 43 11 14 18 19 15 22 20 21 16 17 31 55 61 54 56 51 58 62 63 64 36 37 38 32 53 33 34 35 40 59 60 39 50 57 52 65	1 2 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 4 4 1 3 3 4 3 3 4 4 4 3 3 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3
	1 13 44 29 2 30 3 23 24 4 26 25 41 42 43 49 7 8 5 6 27 28 12 11 9 10 14 22 18 19 15 16 17 45 46 47 48 20 21 31 55 56 54 61 51 57 62 63 64 36 37 38 39 53 32 33 34 35 58 60 40 50 59 52 65	2 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 4 4 1 1 1 1 1 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3
DPSO	1 44 2 3 4 25 45 26 49 27 28 5 23 24 7 8 9 10 12 13 11 6 14 22 20 15 16 17 30 41 42 43 46 47 48 18 19 21 31 58 60 54 55 61 36 37 38 53 56 57 51 62 63 64 39 59 32 33 34 35 29 40 50 52 65	1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 3 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4

ตาราง ข.5 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 490 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	13 44 2 29 30 1 3 23 24 4 25 12 11 45 26 6 7 8 46 47 48 5 27 28 49 9 10 14 20 15 16 17 22 18 19 21 31 36 59 52 37 54 51 38 39 61 56 57 58 60 53 40 55 41 42 32 33 34 35 50 43 62 63 64 65	1 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 3 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3
PSONK	44 2 1 3 4 7 8 5 49 6 11 45 46 47 48 9 10 41 42 43 25 27 28 12 26 29 30 13 14 18 19 20 21 23 24 22 15 16 17 31 54 56 57 58 59 55 60 52 36 37 38 40 39 32 33 34 35 53 51 62 63 64 50 61 65	2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 2 1 1 2 1 4 4 1 4 3 3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 3 4 4
	44 1 13 2 3 23 24 4 26 45 46 47 48 25 11 49 7 8 6 30 12 9 10 5 14 18 19 15 16 17 22 20 21 31 54 61 53 59 52 56 57 58 51 27 28 41 42 43 62 63 64 36 37 38 40 39 32 33 34 35 55 60 29 50 65	2 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 3 2 3 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3
	29 2 30 44 1 13 3 23 24 4 26 27 28 6 12 45 46 47 48 41 42 43 11 5 49 7 8 9 10 14 18 19 15 16 17 20 21 25 22 31 54 56 57 58 55 36 37 38 40 39 32 33 34 35 50 60 51 59 61 62 63 64 52 53 65	1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 4 4 1 1 1 3 4 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3
BBO	29 44 2 13 1 3 23 24 4 11 49 41 42 43 5 26 12 9 10 27 28 45 46 47 48 7 8 25 6 14 18 19 20 21 22 15 16 17 31 62 60 59 61 54 52 63 64 53 36 37 38 39 40 55 51 56 57 32 33 34 35 58 30 50 65	1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 4 4 1 4 1 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 4 3 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3
	13 44 30 29 1 2 3 23 24 4 25 41 42 49 45 46 47 48 27 28 26 6 12 11 9 10 7 8 5 14 18 19 22 15 16 17 43 20 21 31 52 61 62 56 57 55 54 53 51 63 64 59 32 33 58 34 35 60 36 37 38 40 39 50 65	2 2 1 1 1 2 1 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 4 4 1 3 3 3 3 3 3 4 4 4 3 3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4
	1 44 29 30 13 2 3 23 24 4 11 26 49 45 46 27 28 47 48 12 9 10 41 42 43 5 7 8 6 14 18 22 20 19 21 15 16 17 25 31 58 59 56 57 54 52 51 55 61 53 36 37 38 39 40 60 62 63 64 32 33 34 35 50 65	1 2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1 4 1 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3
BBO-LS	1 29 30 44 13 2 3 23 24 4 11 12 6 26 27 28 49 25 5 7 8 41 42 43 9 10 14 22 18 19 15 16 17 20 21 31 60 62 63 64 52 56 57 53 54 51 36 37 32 33 34 35 61 38 40 39 55 58 59 45 46 47 48 50 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 4 4 1 1 1 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 3 3 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 3 4 3 4 3 3 3 3 3
	1 29 44 30 13 2 3 23 24 4 11 12 6 26 27 28 49 25 9 10 7 8 41 42 43 5 14 22 15 18 19 20 21 16 17 31 60 62 63 64 52 53 54 56 57 51 36 37 32 33 34 35 61 38 40 39 58 55 59 45 46 47 48 50 65	2 1 2 1 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 4 4 3 4 3 3 3 4 3 3 3 4 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 4

ตาราง ข.6 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	30 29 1 44 13 2 3 23 24 4 6 11 27 28 26 41 42 43 45 46 47 48 7 8 12 5 9 10 14 20 22 18 15 16 17 25 49 19 21 31 59 55 52 60 62 63 64 53 58 51 32 33 34 35 61 56 57 36 37 38 39 40 50 54 65	1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 1 1 1 3 2 4 4 4 4 4 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 4 3 4 3
	30 1 29 44 13 2 3 23 24 4 49 5 25 27 28 45 46 47 48 26 11 7 8 6 12 9 10 14 15 22 20 16 17 18 19 21 31 61 55 58 60 53 59 32 33 34 35 51 52 36 37 38 39 40 50 56 57 41 42 43 62 63 64 54 65	1 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 1 2 1 1 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4
	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 7 8 49 6 26 41 42 25 45 46 47 48 27 28 9 5 12 11 10 14 20 22 18 15 16 17 43 19 21 31 59 55 52 60 62 63 64 58 36 37 38 39 53 32 33 34 35 51 61 56 57 40 50 54 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 2 2 1 4 1 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 3 4
	29 30 1 44 13 2 3 23 24 4 12 11 6 5 27 49 28 45 46 47 48 26 7 25 8 9 10 14 18 15 16 17 22 19 20 21 31 54 53 58 59 32 33 34 35 52 51 61 55 36 37 38 39 40 50 56 57 41 42 43 62 63 64 60 65	1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 1 1 1 2 2 1 2 1 1 1 4 1 1 1 1 4 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3
DPSO	30 2 1 44 3 4 49 7 8 45 5 46 47 48 9 10 25 6 12 11 23 24 29 26 13 14 18 22 19 20 21 15 41 42 43 27 28 16 17 31 52 58 54 32 33 61 34 59 53 36 37 38 40 39 56 35 50 62 63 64 51 55 60 57 65	1 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 2 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 1 2 3 2 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4
	44 2 1 3 13 30 4 49 6 11 41 5 7 8 25 26 27 28 23 24 29 9 10 45 46 47 48 12 14 15 22 16 20 18 19 21 17 31 53 55 59 61 54 52 60 51 58 32 33 34 35 42 43 62 63 64 36 37 38 39 40 50 56 57 65	2 1 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 1 2 4 4 4 1 3 3 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 3 3 4
	29 1 30 2 3 4 6 25 41 11 23 12 24 27 28 5 49 44 45 46 47 48 26 13 7 8 9 10 14 22 20 18 15 16 17 19 21 31 58 56 57 53 60 54 51 52 55 32 33 34 35 36 59 37 38 39 40 50 61 42 43 62 63 64 65	1 2 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 1 1 2 1 2 1 1 2 2 1 1 1 2 1 4 1 1 1 4 4 4 3 4 4 4 4 3 4 3 3 3 4 3 4 3 3 3 4 3 4 3 3 3 3 3 4
	44 30 29 13 1 2 3 4 49 6 12 5 7 8 41 42 45 46 47 48 23 24 27 28 11 26 25 9 10 14 22 20 18 19 21 15 16 17 31 32 33 51 56 57 58 60 61 53 55 36 37 34 35 54 38 40 39 50 52 59 43 62 63 64 65	2 1 1 2 1 2 1 1 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 1 1 1 2 2 1 4 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 4
	44 2 1 29 30 3 23 24 13 4 26 41 42 7 11 12 5 49 43 9 10 25 8 6 14 20 22 15 18 16 17 19 21 31 52 54 55 60 51 53 59 36 37 38 39 40 61 62 63 27 28 64 56 57 32 33 34 45 46 47 48 35 50 58 65	2 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 3 2 4 4 3 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4
PSONK	30 29 1 2 3 4 7 8 27 28 49 41 42 43 12 9 10 11 6 5 26 25 44 45 46 47 48 23 24 13 14 18 22 15 16 17 19 20 21 31 60 51 55 59 52 58 32 33 34 35 62 63 64 53 54 36 37 38 39 40 50 61 56 57 65	1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 1 4 1 1 1 1 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 3 4 3 3 3

ตาราง ข.6 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
PSONK	2 13 29 1 3 23 24 4 7 8 25 6 5 27 28 9 10 11 12 14 15 16 17 20 22 18 19 21 26 49 45 31 32 33 34 35 36 37 38 40 39 60 53 55 56 57 52 58 59 61 54 51 44 30 46 47 48 41 42 43 62 63 64 50 65	1 2 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 4 1 1 3 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 4 3 4 3 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 3 3 4 3
	44 30 13 29 1 2 3 4 27 28 49 45 46 47 48 11 12 9 10 23 24 25 6 41 42 43 5 26 7 8 14 18 19 20 21 22 15 16 17 31 60 32 33 34 35 53 54 51 56 57 62 63 64 58 59 55 61 36 37 38 40 39 50 52 65	2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2 2 1 4 4 1 4 3 3 3 3 4 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 3 3 4 3 4 3 4
	44 2 1 3 23 24 4 7 8 5 27 28 49 41 42 43 13 29 30 25 6 9 10 11 12 14 18 19 20 21 15 16 17 22 45 46 47 48 26 31 51 55 59 62 32 33 34 35 53 54 52 58 63 64 36 37 38 40 39 50 61 56 57 60 65	2 1 2 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 4 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 3 4 3
	44 13 30 29 1 2 3 4 7 8 5 26 11 12 49 45 46 47 48 25 6 9 10 23 24 27 28 14 18 19 15 16 17 20 21 22 31 55 56 57 52 58 60 32 33 34 35 53 54 51 61 36 37 38 40 39 50 59 41 42 43 62 63 64 65	2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 3 3 4 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3
	13 29 1 2 3 4 7 8 5 27 28 49 26 11 12 41 42 43 45 25 6 9 10 23 24 14 18 22 19 20 21 15 16 17 31 51 55 59 62 63 64 36 37 38 40 39 32 33 34 35 53 54 60 61 56 57 52 58 44 30 46 47 48 50 65	2 1 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 4 1 4 1 4 1 1 1 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 3 3 4 4 3 3 4 3 4 3 4 3 4 3 3
BBO	29 44 1 13 30 2 3 23 24 4 26 49 9 41 42 43 10 6 12 11 27 28 45 46 47 48 7 8 25 5 14 20 22 15 16 18 17 19 21 31 61 60 55 54 52 51 62 63 64 36 37 38 40 58 32 33 34 35 56 57 39 50 53 59 65	1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 4 1 4 4 4 4 3 4 3 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 4 3 3 3 4 3 4 3
	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 26 49 9 10 6 11 12 25 27 28 41 42 43 45 46 7 8 47 48 5 14 22 15 16 17 18 20 19 21 31 61 60 55 54 52 51 62 63 64 58 36 37 38 40 39 32 33 34 35 50 56 57 53 59 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 3 3 4 3 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3
	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 26 49 9 10 6 11 25 12 27 28 41 42 43 45 46 47 48 7 8 5 14 22 15 16 18 17 20 19 21 31 61 60 55 54 52 51 62 63 64 58 36 37 38 40 39 32 33 34 35 50 56 57 53 59 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3
	30 44 29 1 13 2 3 23 24 4 26 49 9 6 10 11 27 28 12 25 41 42 43 45 46 7 8 47 48 5 14 22 15 16 18 17 20 19 21 31 61 60 55 54 52 51 62 63 64 58 36 37 38 39 40 32 33 34 35 50 56 57 53 59 65	1 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 4 1 3 4 3 3 4 3 4 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4
BBO-LS	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 25 5 49 27 28 26 41 42 43 45 46 47 48 6 12 11 9 10 7 8 14 22 18 19 15 16 17 20 21 31 60 59 55 54 53 62 63 64 52 51 58 36 37 38 40 39 61 56 57 32 33 34 35 50 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 4 4 1 1 1 3 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 3

ตาราง ข.6 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 65 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 544 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 25 5 49 27 28 26 41 42 43 45 46 47 48 12 11 9 10 7 8 6 14 22 18 19 15 16 17 20 21 31 60 59 54 53 62 63 64 52 55 51 58 36 37 38 40 39 61 56 57 32 33 34 35 50 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 4 4 1 1 1 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 3
	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 25 5 49 27 28 26 41 42 43 45 46 47 48 12 11 9 10 7 8 6 14 22 18 19 15 16 17 20 21 31 60 59 54 53 51 62 52 55 63 64 58 36 37 38 40 39 61 56 57 32 33 34 35 50 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 4 4 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 3
	44 30 29 1 13 2 3 23 24 4 25 49 27 28 26 5 41 42 43 45 46 47 48 7 8 12 11 9 10 6 14 22 15 18 19 16 17 20 21 31 60 59 55 54 53 62 63 64 52 51 58 36 37 38 40 39 61 56 57 32 33 34 35 50 65	2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 4 4 1 1 3 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 4

3. การค้นหาคำตอบของปัญหา 148 ขั้นงาน

ตาราง ข.7 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	94 144 145 52 61 141 32 70 57 138 142 148 139 140 91 105 119 132 34 42 33 35 62 63 60 11 12 56 73 96 13 92 93 59 74 104 30 147 2 50 51 69 53 133 82 146 143 83 89 90 64 71 58 84 85 86 43 44 65 99 100 66 75 97 67 68 98 95 101 103 102 127 3 4 1 5 8 6 9 7 10 14 16 15 17 18 19 20 22 21 24 23 26 28 25 27 29 31 36 37 38 39 40 41 45 46 47 48 49 55 87 72 134 135 54 136 76 77 78 79 80 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 114 128 115 120 121 123 124 125 122 129 130 137 131 116 117 118 126	1 1 4 1 1 1 1 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 5 6 5 6 6 5 6 5 6 6 5 6 5 5 6 6 5 6 6 6 6 6 5 5 7 8 7 7 8 8 8 7 8 8 7 7 7 7 8 8 7 7 8 8 7 7 8 8 8 7 8 7 8 7 7 7 10 10 9 10 10 9 10 9 10 9 10 10 10 10 10 10 10 10 9 9 9 10 9 10 10 10 10 10 9 10 9 9 9 9 9 10 10 10 11 11 12 11 11 11 11 12 11 12 11 12 11 11 11 12 11 11 11 11 12 12 12 12
	94 144 145 61 141 30 70 52 57 138 142 148 139 140 91 105 119 132 42 33 62 63 35 60 11 56 73 96 92 93 59 74 104 12 13 147 2 50 51 69 53 133 82 146 143 83 89 90 64 71 58 84 85 86 43 44 32 65 99 100 66 34 75 97 67 68 98 95 101 103 102 127 3 4 1 5 8 6 9 7 10 14 15 16 17 18 19 20 24 23 21 22 27 28 25 26 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 49 55 87 72 134 135 54 136 76 77 78 79 80 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 114 128 115 120 121 123 124 125 122 129 130 137 131 116 117 118 126	1 1 4 1 1 4 4 1 1 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3 3 6 3 3 3 3 3 3 5 5 5 6 6 6 5 6 6 5 6 5 5 6 6 5 6 6 6 6 6 5 5 5 8 7 7 7 8 8 8 7 7 8 8 7 7 7 8 8 7 8 7 8 8 7 7 8 7 7 8 7 8 7 8 7 7 10 10 10 9 10 9 9 9 10 10 10 9 10 10 9 10 10 10 10 9 9 9 9 10 10 10 10 10 9 10 9 9 10 12 12 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 12 11 11 11 11 11 12 12 12 12

ตาราง ข.7 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	141 59 2 56 52 144 92 3 4 32 34 70 61 91 93 58 145 74 75 94 142 132 105 119 11 12 30 148 42 43 44 50 51 53 69 82 146 143 89 90 83 60 64 71 65 66 99 100 57 138 139 140 133 62 63 67 68 95 98 101 103 102 127 13 97 147 73 84 85 96 104 86 33 35 1 8 10 7 5 6 9 14 16 15 17 18 19 20 23 22 24 21 27 28 25 26 29 31 36 37 38 39 40 41 45 46 47 48 55 72 87 134 135 136 49 76 77 78 79 88 111 112 113 128 123 124 129 130 137 114 116 117 115 118 120 125 131 121 122 126 80 81 106 107 108 109 110 54	1 2 2 2 1 1 2 2 2 1 1 2 2 2 1 3 6 3 3 3 6 3 3 3 3 3 6 6 3 3 3 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 5 6 6 5 5 5 6 5 5 6 5 6 6 5 5 8 7 7 7 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 8 8 8 7 7 8 7 8 7 7 8 7 8 9 10 10 9 9 10 10 9 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 9 9 9 9 10 10 9 10 10 10 9 10 10 9 12 9 9 11 11 11 11 12 11 11 11 12 11 11 12 11 11 12 11 12 11 11 12 12 12 11 11 11 11 12 12 12 11
	141 59 2 56 52 144 92 3 4 70 11 91 93 58 145 74 75 94 142 132 33 105 119 12 148 42 43 44 50 51 53 69 82 146 143 89 90 83 60 61 62 63 32 34 35 57 138 139 140 13 133 64 71 65 66 67 68 95 99 100 98 101 103 102 127 97 147 73 84 85 96 104 86 30 1 8 10 7 5 6 9 14 16 15 17 19 18 20 23 22 21 24 26 25 28 27 29 31 36 37 38 39 40 41 45 46 47 48 55 72 87 134 135 136 49 76 77 78 79 88 111 112 113 128 123 124 129 130 137 114 116 117 115 118 120 125 131 121 122 126 80 81 106 107 108 109 110 54	1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 3 6 3 3 3 6 3 6 3 3 3 6 3 3 3 3 5 5 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 5 5 5 6 5 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 5 6 6 7 8 7 7 8 7 8 7 8 7 7 8 7 8 7 7 8 8 7 7 8 7 8 9 9 8 10 10 10 9 9 10 9 10 10 10 10 10 10 9 9 9 10 10 10 9 10 10 10 9 10 10 10 9 10 10 10 10 10 10 9 9 11 11 11 12 12 11 11 11 11 12 11 12 11 12 11 11 12 12 12 11 11 11 11 12 12 12 11	
	141 59 2 56 52 144 92 3 4 70 11 91 93 58 145 74 75 94 142 33 105 119 12 132 148 42 43 44 50 51 53 69 82 146 143 89 90 83 60 61 62 63 32 34 35 57 138 139 140 13 133 64 71 65 66 67 68 95 99 100 98 101 103 102 127 97 147 73 84 85 96 104 86 30 1 8 10 7 5 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 23 21 22 26 25 28 27 29 31 36 37 38 39 40 41 45 46 47 48 55 72 87 134 135 136 49 76 77 78 79 88 111 112 113 120 128 129 116 117 121 122 118 126 123 124 130 137 131 80 81 106 107 108 109 110 114 115 125 54	1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 3 6 3 3 3 6 6 3 3 3 6 3 3 3 3 5 5 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 6 5 6 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 5 6 8 5 8 8 7 8 7 7 8 8 8 8 7 8 7 7 7 8 7 8 8 8 7 8 8 7 8 7 7 8 7 10 9 10 10 9 9 10 10 10 10 10 10 10 9 9 9 10 10 10 9 10 10 9 9 10 10 10 10 10 10 11 11 12 11 11 11 11 11 12 11 11 12 11 12 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 11 11 12 12 12 11
DPSO	92 11 12 13 132 94 56 52 144 60 93 32 34 74 64 65 66 58 2 3 57 91 105 119 99 100 1 5 6 7 70 4 138 139 140 61 145 59 75 97 141 142 147 148 73 84 85 86 96 104 30 62 63 67 68 98 95 101 102 103 127 71 42 43 44 9 33 35 8 10 14 16 15 50 51 53 133 69 82 146 83 143 89 90 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 38 45 46 47 49 39 40 55 54 88 48 87 76 77 78 79 80 72 134 135 136 81 106 107 108 109 110 111 112 113 120 121 122 114 115 128 123 129 130 131 137 41 124 125 116 117 118 126	1 2 2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 1 2 2 2 2 3 2 2 3 2 2 2 4 4 3 3 4 4 4 3 4 4 4 3 4 3 3 3 3 6 5 6 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 6 5 6 8 5 5 5 7 8 8 7 7 7 8 7 7 7 7 7 8 8 8 7 7 8 8 8 8 7 8 7 7 8 8 8 7 7 8 8 8 10 10 10 9 9 9 9 10 10 10 9 10 10 10 9 9 10 9 10 12 12 11 11 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 12 12 11 12 11 11 11 11 12 11 12 11 11 11 12

ตาราง ข.7 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	59 132 32 34 92 60 1 33 35 50 57 91 105 30 11 141 142 119 64 70 71 2 94 144 145 148 42 61 56 73 96 104 52 74 75 97 51 69 82 89 90 83 146 43 44 53 133 3 7 4 8 5 10 6 65 66 99 100 93 62 63 67 68 98 95 101 103 102 127 12 13 138 139 140 58 86 84 85 9 14 16 15 17 18 147 19 20 23 24 22 21 25 26 27 28 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 55 54 72 41 48 87 76 77 78 134 135 136 88 111 112 113 123 116 124 120 114 128 129 121 122 115 130 131 137 125 117 118 126 79 80 81 106 143 107 108 109 110	1 2 1 1 2 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 2 1 4 4 4 1 1 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 6 5 5 6 5 6 5 5 5 5 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 8 5 7 7 7 7 7 7 8 7 8 7 8 7 7 8 8 7 8 7 8 10 10 9 9 9 9 10 10 9 9 9 9 10 10 10 10 9 10 10 9 10 9 9 9 10 10 10 9 9 9 9 9 10 9 11 12 11 11 12 11 12 11 11 11 12 12 12 12 11 11 12 12 11 12 12 12 12
	61 144 32 62 30 34 132 60 52 59 141 64 65 99 100 58 66 94 93 33 70 71 138 139 140 42 43 44 56 35 2 3 4 73 84 85 86 96 145 57 104 63 67 68 98 1 5 8 10 7 74 75 95 101 103 102 127 11 12 13 92 91 105 119 50 51 53 133 69 82 89 90 83 6 142 146 147 143 148 9 14 15 16 17 18 19 20 21 23 24 22 27 26 25 28 29 31 36 97 37 38 39 45 46 47 40 41 49 55 54 76 77 78 79 80 81 48 87 72 134 135 136 88 111 112 113 128 123 114 124 129 130 131 120 121 122 137 115 125 116 117 118 126 106 107 108 109 110	2 1 1 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 3 2 2 3 2 2 2 2 2 3 3 3 2 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 6 5 6 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5 6 5 5 5 6 6 6 5 6 5 8 8 7 7 8 8 8 7 8 8 7 8 8 8 7 8 7 7 8 8 7 7 7 10 9 10 10 10 9 9 9 10 10 9 10 9 10 10 10 10 9 10 9 9 10 10 10 10 9 9 9 9 9 10 11 12 11 11 11 12 12 12 11 12 12 11 11 12 11 12 12 12 12 12
	141 1 11 91 142 144 145 148 50 51 92 59 132 56 73 105 119 57 12 13 74 75 97 64 65 66 93 69 82 143 83 89 2 3 7 4 8 5 10 146 52 53 133 96 104 61 60 58 84 85 86 90 42 138 139 140 147 94 30 99 100 32 34 43 44 70 71 33 35 6 9 14 15 16 17 19 18 20 24 23 22 21 28 25 27 26 29 31 36 37 38 39 40 41 45 46 47 48 49 55 54 72 87 76 77 88 111 112 113 116 117 118 128 129 114 134 135 136 115 78 79 80 81 106 107 108 109 110 130 137 131 123 124 125 120 121 122 126 62 63 67 68 98 95 101 103 102 127	1 2 2 2 2 1 4 4 1 1 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 6 5 6 6 5 6 5 5 6 5 5 6 6 5 6 5 5 6 5 5 8 8 7 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 8 8 8 7 8 7 8 7 7 8 7 7 8 7 8 7 8 7 8 7 7 10 10 10 10 10 10 9 9 9 10 9 10 9 10 10 9 9 10 9 9 9 9 10 9 9 9 10 12 12 12 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 11 12 11
PSONK	30 52 32 34 61 62 63 1 33 35 50 51 2 3 4 57 60 94 59 141 64 65 99 100 66 67 68 98 95 101 103 102 127 92 70 71 42 43 44 132 91 105 119 5 7 6 9 8 10 14 15 16 17 19 18 20 23 24 22 21 26 28 27 25 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 49 55 54 76 77 78 48 144 56 73 96 104 11 12 13 142 58 87 72 134 84 85 86 93 138 139 140 145 74 75 97 88 111 112 113 114 115 123 124 125 116 117 118 128 129 130 131 137 120 121 122 126 53 133 148 147 69 82 143 89 90 79 80 81 106 107 108 109 110 83 146 135 136	2 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 4 4 1 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 5 6 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 7 8 8 8 7 7 8 7 8 8 8 7 7 7 7 7 7 7 7 7 8 7 7 8 8 9 9 9 9 9 9 10 10 10 10 9 9 10 9 10 10 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 9 9

ตาราง ข.7 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 204 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	2 144 145 138 57 59 139 140 92 132 64 94 93 30 91 105 119 141 142 148 65 99 66 11 12 13 58 56 73 96 104 84 85 86 50 51 69 82 146 89 90 83 60 61 62 63 67 68 95 52 53 133 143 98 70 71 147 32 34 33 35 42 43 44 74 75 97 100 101 103 102 127 3 4 1 8 10 5 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 23 21 26 28 27 25 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 48 55 76 77 78 79 87 72 134 54 41 88 111 112 113 116 117 118 123 114 115 124 125 128 129 130 131 137 80 81 106 107 108 109 110 135 136 120 121 122 126	1 1 4 1 1 1 1 1 1 1 4 3 3 4 3 3 3 3 6 6 3 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 8 7 7 7 7 7 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 7 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 8 9 9 8 10 10 10 9 10 9 9 10 9 10 10 9 9 10 10 9 9 10 9 9 10 10 9 9 9 9 10 10 10 10 10 10 12 12 12 11 12 12 11 12 11 11 11 11 11 11 11 11 12 11 12 11 11 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 11 11 12 12 12 12
BBO-LS	144 141 142 92 132 60 59 93 74 75 97 94 70 57 145 148 61 62 63 56 52 50 51 53 133 42 138 139 140 33 35 32 34 30 73 96 104 58 84 85 86 91 105 119 11 12 13 147 69 82 146 143 89 90 83 43 44 64 71 65 66 67 68 98 99 100 95 101 102 103 127 2 3 4 1 7 6 9 8 10 5 14 15 16 17 18 19 20 22 23 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 87 54 72 134 135 136 76 77 78 79 80 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 128 120 121 116 123 124 129 117 118 114 115 125 130 137 131 122 126	1 1 4 1 1 1 1 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 5 6 6 6 5 5 6 5 6 6 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 7 6 6 6 7 6 6 6 7 7 6 8 8 8 8 8 8 8 7 7 8 7 7 8 8 8 7 7 7 7 8 8 8 7 7 10 10 9 10 10 9 9 10 10 10 9 9 10 10 10 10 10 9 9 9 9 10 10 10 10 10 10 10 9 10 10 10 10 9 9 9 9 12 11 11 11 11 11 11 12 12 11 11 11 12 12 11 11 11 11 12 11 12 11 11 11 11 11 12 12
	144 141 142 59 138 139 140 70 94 92 91 105 74 64 65 99 100 71 50 51 93 66 132 145 148 56 73 96 104 30 58 86 84 85 75 97 61 62 63 67 147 42 43 44 119 57 32 33 35 34 52 53 133 69 82 146 143 11 12 13 83 68 98 95 101 103 102 127 89 90 60 2 3 4 1 6 8 10 9 7 5 14 16 15 17 18 19 20 24 23 22 21 28 27 25 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 54 48 87 41 72 134 135 136 113 128 123 124 120 114 115 125 116 129 130 137 121 122 117 118 126 106 107 108 109 110 131	1 1 4 1 1 1 1 4 3 3 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 4 6 6 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 7 7 6 6 7 7 7 7 6 6 6 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 8 8 7 7 8 8 7 7 8 8 7 7 8 7 7 7 10 9 10 9 9 10 9 9 10 10 10 9 10 10 9 9 9 9 10 10 10 10 10 10 9 10 10 10 10 10 10 11 10 12 12 12 12 12 12 11 11 11 11 11 11 11 12 11 11 11 11 12 12 11 11 12 11 11 11 11 11 11

ตาราง ข.8 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	144 145 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 58 53 133 89 90 33 35 32 34 74 83 56 73 96 104 86 84 85 142 147 143 146 148 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 98 95 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 7 10 6 9 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 21 24 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 1 2 3 3 4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 5 6 5 6 6 5 6 5 5 6 6 6 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 5 6 6 7 7 8 8 8 8 7 8 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 8 7 8 7 7 8 7 7 7 7 7 7 8
	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 56 73 96 104 84 85 33 35 32 34 74 83 89 90 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 6 9 7 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 7 8 8 7 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8	
	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 56 73 96 104 84 85 33 35 32 34 74 83 89 90 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 6 9 8 7 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 7 8 8 7 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8
	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 89 90 33 35 32 34 74 83 56 73 96 104 84 85 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 7 10 6 9 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 5 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 5 6 5 6 6 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 8 7 7 7 8 7 8 8 7 8 8 8 8 8 8 8

ตาราง ข.8 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	141 50 32 57 51 69 34 94 61 144 59 92 42 43 58 1 138 139 140 132 30 60 82 11 56 74 75 97 73 96 104 86 145 84 85 52 53 62 63 89 90 91 105 119 133 12 13 44 33 35 2 3 7 5 4 8 10 83 93 64 65 99 100 142 148 147 143 146 66 67 68 95 98 101 103 102 127 6 9 14 16 15 17 18 19 20 21 22 24 23 28 26 27 25 29 31 36 37 38 45 46 39 40 41 47 55 87 72 134 48 88 111 112 113 114 120 121 122 115 123 124 125 128 129 130 137 116 117 118 126 49 76 77 78 79 80 81 106 135 136 54 107 108 109 110 131 70 71	1 2 1 1 1 2 1 2 1 1 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 4 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 4 4 6 6 5 5 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 5 6 5 5 6 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 8 7 7 7 8 7 8 8 7 7 7 7 8 8 7 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8
	2 92 132 1 94 52 141 61 62 144 70 58 56 73 96 138 139 140 60 86 63 145 91 105 119 42 43 57 93 64 71 65 99 66 100 142 147 74 33 35 3 4 8 10 5 6 7 148 104 59 75 97 67 68 98 95 101 103 102 127 30 84 85 44 9 14 15 16 17 18 19 20 23 24 21 22 26 27 25 28 29 31 32 34 36 37 38 39 40 41 45 46 47 48 49 55 54 87 88 111 112 72 134 113 114 115 116 117 123 120 121 122 128 129 130 137 118 126 131 76 77 78 124 125 11 12 13 50 51 53 133 135 136 69 82 83 89 90 79 146 143 80 81 106 107 108 109 110	2 1 2 1 2 1 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 4 1 3 3 3 4 4 3 3 4 3 4 3 4 4 4 3 3 4 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 5 6 6 5 6 5 5 6 6 5 6 5 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 6 6 6 7 6 6 7 8 8 8 7 7 7 7 7 7 7 7 7 8 8 7 8 8 8 7 7 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 7
	144 141 30 93 91 50 2 3 145 64 70 1 5 71 94 42 7 142 148 147 58 51 52 53 133 60 138 57 6 59 43 74 132 9 105 119 65 99 100 66 75 97 56 73 84 86 85 11 12 13 61 62 63 67 68 95 44 4 8 10 33 35 32 34 14 16 15 17 19 18 20 21 23 22 24 25 26 28 98 101 103 102 127 139 140 69 96 104 82 146 143 89 90 83 92 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 49 48 55 87 72 134 135 136 76 77 78 79 80 54 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 120 128 129 121 122 114 115 130 137 131 123 124 125 116 117 118 126	1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 1 1 1 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 3 4 3 3 4 3 4 4 4 4 3 6 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 5 5 6 5 5 6 6 6 6 5 6 5 5 6 5 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 6 5 6 6 5 6 6 6 7 7 7 8 8 7 8 8 8 7 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7 7 8 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7 7 7 7 7 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 7 7 7 7
	144 61 91 2 94 42 59 64 65 105 93 11 74 75 97 62 66 145 70 71 138 139 3 4 30 60 63 67 58 92 68 95 98 119 12 13 32 34 52 132 140 33 35 43 44 141 142 147 148 1 6 9 8 10 5 57 50 51 69 53 133 82 143 83 89 90 146 7 14 16 15 17 19 18 20 22 21 24 23 27 28 25 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 55 54 72 134 135 136 48 76 77 78 79 80 81 106 107 108 109 110 99 100 101 103 102 127 56 73 84 85 86 87 96 104 88 111 112 113 120 116 121 122 117 118 126 128 129 130 137 131 114 115 123 124 125	1 2 2 2 2 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 4 1 1 1 1 4 1 1 1 1 1 1 1 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 4 4 5 6 5 6 6 5 6 5 5 6 5 6 6 6 6 5 5 6 5 6 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 7 6 6 8 8 7 7 7 7 7 8 7 8 8 8 8 8 7 7 7 8 7 8 7 7 7 7 8 7 8 8 7 7 7 7 7 8 7 7 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 8

ตาราง ข.8 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	70 30 59 94 92 56 52 1 144 64 138 139 140 42 145 91 32 50 71 2 3 6 4 8 10 57 5 7 61 58 65 99 100 66 9 105 119 34 73 96 104 84 85 43 44 33 35 11 12 13 93 51 53 69 82 89 90 83 141 142 148 146 147 143 132 14 15 16 17 18 19 20 23 24 22 21 25 27 28 26 29 31 36 37 38 45 46 39 40 41 47 48 62 63 67 68 98 95 101 103 102 127 49 74 75 97 86 55 72 76 134 54 87 88 111 112 113 114 115 128 129 116 117 123 124 130 137 118 125 120 121 122 126 60 133 135 136 131 77 78 79 80 81 106 107 108 109 110	2 2 1 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 1 2 1 1 1 2 1 1 1 3 3 3 3 2 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 6 6 6 5 5 6 6 5 6 5 5 5 6 6 5 6 5 6 6 5 5 6 6 5 6 6 6 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 6 5 8 7 7 7 8 8 8 8 8 8 7 8 7 8 7 7 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 8 7 7 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 7
PSONK	61 92 74 11 12 13 33 35 2 132 56 73 96 104 1 91 105 119 30 70 93 138 139 140 141 42 43 44 62 63 3 4 8 10 5 6 9 7 64 94 52 32 34 71 59 58 84 85 86 14 16 15 17 18 19 20 23 21 24 22 25 26 28 27 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 54 76 77 78 72 134 57 50 51 53 133 69 82 89 90 79 80 81 106 107 108 109 110 135 136 87 83 75 97 88 111 112 113 123 128 129 130 131 137 124 116 117 118 120 121 122 126 114 115 125 60 142 144 145 65 99 100 147 148 143 146 66 67 68 98 95 101 102 103 127	1 2 1 2 1 2 2 2 1 1 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 3 3 3 3 4 4 3 3 4 3 4 4 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 5 5 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 5 5 8 5 5 8 5 5 5 5 5 8 5 5 5 5 5 8 8 8 8 5 5 8 8 5 5 5 5 8 7 8 7 7 7 7 8 7 8 8 8 8 8 7 7 8 7 8
BBO	132 144 145 58 138 139 140 92 94 70 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 89 90 30 119 93 42 43 44 53 133 33 35 32 34 74 83 56 73 96 104 86 84 85 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 98 95 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 7 10 6 9 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 28 25 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 1 2 3 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 6 6 6 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 5 6 5 6 5 5 5 6 6 6 5 6 5 6 5 5 6 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 5 6 5 6 6 6 6 6 5 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 7 8 8 7 8 7 8 8 7 7 7 7 7 7 7 7
	144 145 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 58 53 133 89 90 33 35 32 34 74 83 56 73 96 104 86 84 85 142 147 143 146 148 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 98 95 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 7 10 6 9 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 21 24 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 1 2 3 3 4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 5 6 5 6 6 5 6 5 5 6 6 6 6 6 5 5 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 5 6 6 7 7 8 8 8 8 7 8 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 8 7 8 7 8 7 7 8 7 7 7 7 7 7 7 8

ตาราง ข.8 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 56 73 96 104 84 85 33 35 32 34 74 83 89 90 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 6 9 7 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 7 8 8 7 8 7 8 8 7 7 7 7 7 7 7 8
	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 56 73 96 104 84 85 33 35 32 34 74 83 89 90 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 6 9 8 7 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 5 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 6 5 5 6 6 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 7 8 8 7 8 7 8 8 7 7 7 7 7 7 7 8
	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 91 105 50 61 62 63 57 60 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 89 90 33 35 32 34 74 83 56 73 96 104 84 85 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 7 10 6 9 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 5 4 4 4 4 4 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 5 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 5 6 6 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 7 7 6 6 6 6 7 7 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 8 7 7 7 8 7 8 8 8 8 8 8 8
	144 145 58 138 139 140 92 94 70 132 141 50 61 62 63 57 60 91 105 52 51 69 82 30 119 93 42 43 44 53 133 56 73 96 104 84 85 33 35 32 34 74 83 89 90 86 142 147 143 148 146 11 12 13 64 71 65 99 100 66 67 68 95 98 101 102 103 127 59 75 97 2 3 4 1 8 6 9 7 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 38 39 40 41 47 48 55 72 134 88 111 112 76 77 78 79 113 120 128 114 129 130 131 116 117 118 121 123 124 115 125 122 126 49 87 137 135 136 54 80 81 106 107 108 109 110	1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 5 5 4 6 6 6 6 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 6 5 6 5 5 6 5 5 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 5 7 8 8 8 8 8 7 7 8 8 8 8 7 8 8 8 8 8 7 7 7 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 7 8 7 8 7 7 8 7 8 8 7 8 8 8 8 8 8 8

ตาราง ข.8 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 306 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	144 60 64 132 93 138 139 57 65 99 100 50 51 92 91 105 56 73 141 142 42 96 104 66 69 82 146 83 89 61 143 59 58 86 140 145 147 148 52 53 133 94 43 44 62 63 67 68 95 98 101 102 90 32 34 103 127 30 119 74 75 97 70 71 84 85 11 12 13 33 35 2 3 4 1 5 7 8 10 6 9 14 16 15 17 18 19 20 23 21 24 22 25 27 28 26 29 31 36 37 45 38 39 46 47 49 40 41 55 88 87 72 134 135 76 111 136 77 112 113 128 129 123 120 114 115 121 122 116 54 130 131 137 48 78 79 80 81 106 107 108 109 110 117 118 126 124 125	1 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 2 4 5 5 5 5 4 5 5 4 4 5 4 5 5 5 4 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 4 4 4 5 4 6 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 5 5 6 5 5 6 6 5 6 5 5 6 5 6 6 6 5 5 6 6 5 5 5 6 6 6 6 7 8 8 7 8 8 8 7 7 7 7 7 8 7 8 8 7 8 7 7 7 7 7 8 8 8 8 7 8 7 8 7 7 8 8 8 8 8

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	92 57 93 91 141 132 52 64 138 139 142 140 144 145 148 2 70 71 65 99 100 56 73 96 104 50 51 53 133 69 82 89 90 143 83 146 74 32 34 30 61 62 63 60 59 75 97 33 35 147 42 43 44 94 11 12 13 3 58 84 85 86 4 66 67 68 95 98 101 103 102 127 105 119 1 5 7 6 9 8 10 14 16 15 17 18 19 20 22 21 24 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 54 88 87 111 112 76 77 78 79 113 128 123 124 129 130 131 116 117 118 120 121 122 126 114 115 125 72 134 135 136 80 81 106 107 108 109 110 137	1 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 4 3 3 3 4 3 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 3 3 3 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
	92 57 93 91 105 141 52 64 138 139 142 140 144 145 148 2 70 71 65 99 100 56 73 96 104 50 51 53 133 69 82 89 90 83 143 146 132 74 32 34 30 61 62 63 60 59 75 97 33 35 119 147 42 43 44 94 11 12 13 3 58 84 85 86 4 66 67 68 95 98 101 103 102 127 1 5 7 6 9 8 10 14 16 15 17 18 19 20 22 21 23 24 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 54 88 111 112 87 76 77 78 79 113 116 120 121 114 115 123 124 125 122 128 129 130 131 72 134 135 136 117 118 126 80 81 137 106 107 108 109 110	1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 1 4 1 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 6 6 6 6 6 5 5 6 6 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6
	92 57 93 91 141 30 132 52 64 65 99 138 139 100 142 140 144 145 148 2 56 73 96 104 70 71 50 51 53 133 69 82 89 90 83 143 146 74 32 34 61 62 63 60 59 75 97 33 35 147 42 43 44 94 11 12 13 3 58 84 85 86 4 66 67 68 95 98 101 103 102 127 105 119 1 5 7 6 9 8 10 14 15 16 17 19 18 20 23 24 21 22 27 26 25 28 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 54 88 87 111 112 76 77 78 79 113 128 123 124 129 130 131 116 117 118 120 121 122 126 114 115 125 72 134 135 136 80 81 106 107 108 109 110 137	2 1 1 2 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 1 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 6 5 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	64 92 57 93 141 132 52 138 139 91 94 142 140 144 145 148 2 70 71 65 99 100 61 56 73 96 104 50 51 53 133 69 74 32 34 30 62 63 59 75 97 60 33 35 147 42 43 44 11 12 13 82 83 89 143 90 146 3 58 84 86 85 4 66 67 68 95 98 101 103 102 127 105 119 1 5 7 6 9 8 10 14 15 16 17 19 18 20 22 21 24 23 26 28 25 27 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 88 87 54 111 112 76 77 78 79 113 128 129 130 131 116 123 124 117 118 120 121 122 126 114 115 125 72 134 135 136 80 81 106 107 108 109 110 137	2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 4 1 1 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 3 4 3 3 3 4 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 5 5 5 5 4 6 6 6 6 6 6 5 5 6 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5
	32 52 11 141 142 132 60 144 74 58 59 30 94 145 148 64 65 42 43 44 99 100 147 56 73 96 104 84 85 1 34 66 50 138 61 92 139 140 75 97 62 12 13 33 35 70 71 63 67 68 98 95 51 53 133 69 82 89 143 83 146 90 91 105 119 57 93 86 2 3 6 4 7 5 9 8 10 14 15 16 17 18 19 20 22 21 24 23 25 26 27 28 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 55 87 48 54 88 111 112 72 134 135 136 76 77 78 79 80 81 106 107 108 113 116 117 128 129 130 137 120 121 122 118 126 114 115 123 124 125 109 110 131 101 102 103 127	1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 1 3 2 2 2 2 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 5 4 5 5 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 5 6 5 6 5 5 5 6 6 6 6
	50 60 1 51 33 61 58 74 35 138 139 57 64 59 75 2 30 132 56 73 86 144 11 94 145 52 53 133 97 140 65 12 13 66 141 142 148 92 91 105 119 32 34 70 71 3 4 8 6 9 5 7 10 14 16 84 85 93 15 17 18 19 20 22 24 23 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 62 63 67 68 95 98 39 40 41 55 87 54 48 72 134 135 136 88 111 112 113 123 124 120 121 122 116 117 118 126 76 77 78 96 104 42 43 99 100 101 103 102 127 147 128 129 130 137 131 114 115 125 69 82 143 146 89 90 79 80 81 106 107 108 109 110 83 44	2 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 5 5 5 6 5 5 5 6 6 6 5 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5
	30 92 94 60 144 132 57 74 93 2 3 4 56 73 64 65 99 66 138 145 139 140 50 51 69 82 83 89 11 90 58 84 86 70 71 96 104 59 75 97 85 32 34 91 105 119 61 62 63 67 68 98 95 42 43 44 100 101 103 102 127 12 13 33 35 52 53 133 141 142 148 147 143 146 1 7 6 8 5 10 9 14 16 15 17 19 18 20 22 23 21 24 27 25 28 26 29 31 36 37 38 39 45 40 41 46 47 49 55 76 77 78 79 54 48 87 80 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 120 121 122 116 117 128 129 130 131 123 124 118 126 114 115 125 137 72 134 135 136	2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 3 4 4 3 3 6 3 6 6 5 6 5 5 6 6 5 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 6 5 6 6 6 5 6 6 6 5

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	1 59 141 142 57 144 58 61 91 138 139 140 64 11 50 51 93 56 42 52 53 30 33 35 65 99 145 147 148 74 75 97 69 82 89 90 143 146 73 86 96 104 2 66 70 71 3 7 5 4 8 10 132 100 133 32 34 43 44 83 84 85 94 62 63 67 68 98 95 101 102 103 127 92 12 13 105 119 60 6 9 14 16 15 17 19 18 20 22 23 21 24 28 26 25 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 54 87 72 134 76 77 78 135 136 88 111 112 113 123 120 114 124 115 128 125 129 79 130 131 137 121 122 116 117 118 126 49 80 81 106 107 108 109 110	2 1 1 2 1 1 1 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 3 2 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 4 4 3 3 6 5 6 5 5 6 6 5 6 6 6 6 5 5 6 6 5 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 5 6 5 5 6 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6
	70 91 105 141 144 119 138 30 11 12 93 42 43 44 74 59 75 97 58 92 32 34 61 62 63 60 64 57 33 1 52 132 145 142 147 148 139 140 65 99 100 66 67 68 98 95 101 102 103 127 56 73 86 84 85 96 104 2 3 4 8 6 10 9 5 7 14 16 15 17 19 18 20 24 21 23 22 26 25 27 71 28 29 31 50 51 53 133 69 82 83 89 143 146 90 13 35 94 36 37 38 45 46 47 49 39 40 41 55 76 72 134 135 48 77 136 78 54 79 80 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 114 120 123 124 121 122 128 129 130 137 131 115 125 116 117 118 126 87	2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 4 4 3 4 3 3 4 3 3 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 5 6 5 5 6 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 6 5 6 6 6 6 5 5 5 5 6 6 5 5 5 6 5 5 6 6 5 6 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 5
	1 2 42 91 50 52 105 119 3 5 144 70 132 59 56 141 43 44 145 60 6 32 34 9 142 148 147 7 58 4 8 74 75 97 11 12 13 64 71 30 57 65 99 66 100 94 51 69 82 146 143 89 90 83 53 133 73 96 104 86 92 61 62 63 67 68 98 93 95 101 103 102 127 33 35 138 139 140 84 85 10 14 16 15 17 18 19 20 21 24 23 22 26 28 25 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 55 76 77 78 79 87 48 49 80 54 81 106 107 108 109 110 72 134 135 136 88 111 112 113 116 114 115 128 129 130 131 137 123 124 125 117 118 120 121 122 126	2 1 1 2 1 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 3 4 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 5 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 5 5 6 5 6 5 6 5 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 5 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5
	57 91 132 33 61 59 50 51 94 32 34 35 52 105 119 62 60 30 63 70 144 145 2 3 74 75 97 92 56 73 96 104 53 133 69 82 83 89 58 86 84 85 138 139 140 11 12 13 93 1 6 9 5 90 141 142 143 146 148 147 4 8 10 42 43 44 64 71 65 66 67 68 95 98 99 100 101 103 102 127 7 14 15 16 17 19 18 20 22 24 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 87 72 76 77 88 111 112 78 79 80 81 106 107 108 109 110 54 134 135 136 113 120 114 115 116 117 118 123 124 125 128 129 130 137 121 122 126 131	1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 1 1 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 2 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 3 4 4 4 3 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 5 6 6 5 6 5 6 5 6 5 6 5 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 6 5 6 5 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
PSONK	70 93 138 74 132 11 2 1 92 50 141 60 94 30 52 142 139 140 61 56 73 96 104 33 35 42 43 44 57 12 13 3 5 6 9 58 84 85 86 4 8 51 53 133 69 82 146 89 143 10 64 65 71 66 99 100 91 105 119 144 59 75 97 62 63 67 68 95 145 148 147 32 34 98 101 102 90 103 127 7 14 15 16 17 19 18 20 23 24 21 22 27 25 28 26 29 31 36 37 38 39 45 46 47 49 40 55 54 87 76 88 111 112 113 123 128 129 130 131 116 117 124 72 120 121 41 48 118 122 134 135 136 114 115 125 126 137 77 78 79 80 81 106 107 108 109 110 83	2 1 2 1 2 2 2 1 1 2 1 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2 2 2 1 3 2 4 4 4 3 3 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 4 6 3 5 6 5 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 6 5 6 6 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 6 6 6 5 6
	32 52 11 141 142 132 60 144 74 58 59 30 94 145 148 64 65 42 43 44 99 100 147 56 73 96 104 84 85 1 34 66 50 138 61 92 139 140 75 97 62 12 13 33 35 70 71 63 67 68 98 95 51 53 133 69 82 89 143 83 146 90 91 105 119 57 93 86 2 3 6 4 7 5 9 8 10 14 15 16 17 18 19 20 22 21 24 23 25 26 27 28 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 55 87 48 54 88 111 112 72 134 135 136 76 77 78 79 80 81 106 107 108 113 116 117 128 129 130 137 120 121 122 118 126 114 115 123 124 125 109 110 131 101 102 103 127	1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 1 3 2 2 2 2 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 5 4 5 5 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 5 6 5 6 5 5 5 6 6 6 6
	50 60 1 51 33 61 58 74 35 138 139 57 64 59 75 2 30 132 56 73 86 144 11 94 145 52 53 133 97 140 65 12 13 66 141 142 148 92 91 105 119 32 34 70 71 3 4 8 6 9 5 7 10 14 16 84 85 93 15 17 18 19 20 22 24 23 21 25 28 27 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 62 63 67 68 95 98 39 40 41 55 87 54 48 72 134 135 136 88 111 112 113 123 124 120 121 122 116 117 118 126 76 77 78 96 104 42 43 99 100 101 103 102 127 147 128 129 130 137 131 114 115 125 69 82 143 146 89 90 79 80 81 106 107 108 109 110 83 44	2 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 5 5 5 6 5 5 5 6 6 6 5 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5
	30 92 94 60 144 132 57 74 93 2 3 4 56 73 64 65 99 66 138 145 139 140 50 51 69 82 83 89 11 90 58 84 86 70 71 96 104 59 75 97 85 32 34 91 105 119 61 62 63 67 68 98 95 42 43 44 100 101 103 102 127 12 13 33 35 52 53 133 141 142 148 147 143 146 1 7 6 8 5 10 9 14 16 15 17 19 18 20 22 23 21 24 27 25 28 26 29 31 36 37 38 39 45 40 41 46 47 49 55 76 77 78 79 54 48 87 80 81 106 107 108 109 110 88 111 112 113 120 121 122 116 117 128 129 130 131 123 124 118 126 114 115 125 137 72 134 135 136	2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 3 4 4 3 3 6 3 6 6 5 6 5 5 6 6 5 6 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 6 5 6 6 6 5 6 6 6 5

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 64 71 94 59 60 42 43 44 147 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 138 139 140 74 75 97 83 58 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 4 146 1 6 9 7 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 41 48 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 54 87 113 116 117 114 115 118 128 129 130 137 131 120 121 122 126 123 124 125 134 135 136 106 107 108 109 110	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 3 2 2 2 2 2 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 4 5 5 5 5 4 4 4 4 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 5 6 6 5 5 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5
	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 64 71 94 59 58 60 42 43 44 147 33 35 32 34 69 82 143 89 90 138 139 140 61 62 63 74 75 97 83 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 98 95 101 102 103 127 3 4 146 1 7 6 9 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 24 22 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 46 47 49 39 40 41 48 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 54 87 113 116 120 117 114 115 121 122 118 126 128 129 130 137 131 123 124 125 134 135 136 106 107 108 109 110	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 1 2 1 1 1 3 2 2 3 3 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 3 4 3 4 4 4 4 4 5 4 5 5 5 4 4 4 4 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 5 5 5 5 6 5 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 5 6 5 5 5 5 5
	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 64 71 94 138 139 140 59 60 42 43 44 147 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 74 75 97 83 58 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 4 146 1 6 9 7 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 24 22 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 46 47 49 39 40 41 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 134 135 87 48 136 113 116 117 114 115 118 128 129 130 137 123 124 125 120 121 122 126 106 107 108 109 110 131 54	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 3 2 3 2 2 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 4 3 3 4 4 4 3 3 4 3 4 3 3 3 4 3 4 4 4 3 6 6 5 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 6 6 6 6 6 5 5
	144 138 139 140 132 30 70 145 92 91 105 119 2 50 51 64 71 57 94 141 142 148 59 58 60 42 43 44 1 147 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 74 75 97 83 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 4 6 9 7 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 24 22 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 46 47 49 146 39 40 41 48 55 72 88 111 112 76 77 78 79 80 81 134 135 87 136 113 120 116 117 114 115 121 122 118 126 128 129 130 137 131 123 124 125 54 106 107 108 109 110	1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 3 2 2 2 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 3 4 3 4 3 4 3 4 3 4 3 4 3 4 4 4 5 4 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 6 5 6 6 6 6 5 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 5 6 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 6 6

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 94 59 60 42 43 44 1 64 71 147 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 138 139 140 74 75 97 83 58 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 6 4 9 7 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 46 47 49 146 39 40 41 48 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 54 87 113 120 116 117 114 115 121 122 118 126 128 129 130 137 131 123 124 125 134 135 136 106 107 108 109 110	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 2 2 3 4 4 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 4 3 4 3 6 6 6 5 6 5 5 5 6 6 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 6 5 6 5 6 5 6 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5
	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 64 71 94 59 60 42 43 44 1 147 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 83 138 139 140 74 75 97 58 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 6 4 9 7 8 10 5 14 16 15 146 17 19 18 20 23 24 22 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 46 39 40 41 47 48 49 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 134 135 87 136 113 116 117 114 115 118 128 129 130 137 123 124 125 54 120 121 122 126 106 107 108 109 110 131	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 2 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 3 2 2 2 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 3 3 3 4 3 4 3 4 3 4 4 3 6 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 6 5
	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 64 71 94 58 59 60 42 43 44 147 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 138 139 140 74 75 97 83 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 4 146 1 6 9 7 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 24 22 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 46 47 49 39 40 41 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 134 135 87 48 136 113 116 117 114 115 118 128 129 130 131 123 124 125 54 120 121 122 126 106 107 108 109 110 137	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 2 2 1 1 1 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 3 2 2 2 2 2 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 4 3 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 4 5 4 5 5 5 4 4 4 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5
	144 132 30 70 145 141 142 148 92 91 105 119 2 50 51 57 64 71 94 138 139 140 59 58 60 147 42 43 44 61 62 63 33 35 32 34 69 82 143 89 90 74 75 97 83 11 12 13 93 52 53 133 56 73 84 85 86 96 104 65 99 100 66 67 68 95 98 101 103 102 127 3 4 146 1 6 9 7 8 10 5 14 16 15 17 19 18 20 23 22 24 21 27 25 28 26 29 31 36 37 45 46 47 49 38 39 40 55 88 111 112 76 77 78 79 80 81 72 134 135 87 48 136 113 116 117 114 115 118 128 129 130 137 123 124 125 54 120 121 122 126 106 107 108 109 110 131 41	1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 2 3 3 3 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 3 2 2 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 5 5 5 6 6 6 6 6 5 6

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	58 32 144 141 138 139 60 30 64 91 105 119 50 51 142 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 65 99 100 61 62 63 147 57 93 132 74 42 43 44 33 35 70 71 34 82 143 83 146 66 67 68 95 98 101 103 102 127 52 53 133 140 59 75 97 92 89 90 86 11 12 13 2 3 4 1 8 7 10 6 9 5 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 111 112 113 114 72 76 77 78 79 87 134 135 136 120 121 122 123 124 115 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 2 2 3 3 3 2 4 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 4 4 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 5 4 6 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 60 91 30 105 119 33 35 94 145 56 73 96 104 84 138 139 140 61 62 63 57 93 132 52 85 74 70 42 43 44 141 142 148 147 59 75 97 92 50 51 69 82 143 146 89 90 83 53 133 86 64 71 65 99 100 66 67 68 98 95 101 102 103 127 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 7 10 6 9 14 16 15 17 18 19 20 24 23 22 21 28 25 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 76 77 78 79 88 111 112 113 120 121 114 87 72 134 135 136 122 123 124 115 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 4 4 3 4 4 4 4 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 6 3 5 6 5 6 6 5 5 5 6 6 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 60 30 64 65 99 100 91 105 119 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 138 139 140 61 62 63 147 92 93 132 52 74 42 43 70 71 82 143 146 66 67 68 98 95 101 103 102 127 53 133 83 44 59 75 97 57 89 90 86 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 7 10 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 28 25 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 111 112 113 114 72 76 77 78 79 87 134 135 136 120 121 122 123 124 115 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 3 2 3 4 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 4 3 4 4 4 3 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 4 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 60 52 64 65 99 100 91 105 142 50 51 33 35 94 145 148 69 57 138 139 140 119 61 62 63 59 147 93 132 74 75 97 56 73 96 104 84 85 70 71 82 143 146 66 67 68 98 95 101 102 103 127 53 133 42 43 83 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 111 112 113 114 72 76 77 78 79 87 134 135 136 120 121 122 123 115 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 2 4 4 4 4 4 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 3 4 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 3 4 3 4 3 5 6 6 6 5 6 6 6 6 5 5 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	58 144 141 60 64 65 99 100 91 105 119 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 57 138 139 140 61 62 63 59 147 93 132 52 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 102 103 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 7 10 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 28 26 25 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 111 112 113 114 72 76 77 78 79 87 134 135 136 120 121 122 123 115 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 2 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 4 3 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 3 4 4 4 4 5 6 6 6 6 5 5 6 6 6 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 60 64 65 99 100 91 105 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 138 139 140 119 61 62 63 59 147 57 93 132 52 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 103 102 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 87 111 112 76 77 78 79 72 134 135 136 113 114 115 120 121 122 123 124 125 49 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 128 129 130 137 131	1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 2 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4 5 5 6 6 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 60 64 65 99 100 91 105 119 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 57 138 139 140 61 62 63 59 147 93 132 52 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 103 102 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 87 111 112 76 77 78 79 72 134 135 136 113 114 115 120 121 122 123 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 2 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 52 60 64 65 99 100 91 105 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 138 139 140 119 61 62 63 59 147 57 93 132 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 102 103 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 27 25 28 26 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 87 111 112 76 77 78 79 72 134 135 136 113 114 115 120 121 122 123 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 2 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4 5 5 5 6 6 5 6 5 6 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5

ตาราง ข.9 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 148 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 408 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	58 144 141 52 60 64 65 99 100 91 105 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 138 139 140 119 61 62 63 59 147 57 93 132 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 103 102 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 87 111 112 76 77 78 79 72 134 135 136 113 114 115 120 121 122 123 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 2 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 5 4 4 4 4 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 52 60 64 65 99 100 91 105 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 138 139 140 119 61 62 63 59 147 57 93 132 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 103 102 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 28 27 26 25 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 87 111 112 76 77 78 79 72 134 135 136 113 114 115 120 121 122 123 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 2 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 5 4 4 4 4 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5
	58 144 141 52 60 64 65 99 100 91 105 142 50 51 33 35 94 145 148 56 73 96 104 84 85 69 138 139 140 119 61 62 63 59 147 57 93 132 74 75 97 70 71 82 143 83 146 66 67 68 98 95 101 103 102 127 53 133 42 43 44 92 89 90 86 30 32 34 11 12 13 2 3 4 1 5 8 10 7 6 9 14 16 15 17 19 18 20 24 22 21 23 25 28 26 27 29 31 36 37 45 38 39 40 41 46 47 48 55 88 87 111 112 76 77 78 79 72 134 135 136 113 114 115 120 121 122 123 124 125 49 128 129 130 137 80 81 106 107 108 109 110 54 116 117 118 126 131	1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 2 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 3 4 3 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 5 4 4 4 4 5 5 5 6 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 6 6 6 6 5

4. การค้นหาคำตอบของปัญหา 205 ขั้นงาน

ตาราง ข.10 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	6 21 25 20 201 22 19 23 24 34 27 26 28 29 30 32 31 33 35 1 2 4 3 5 13 14 15 16 17 18 7 8 9 10 11 12 36 83 69 110 62 42 111 37 70 71 112 75 41 63 64 68 40 54 55 61 56 57 59 60 58 65 66 67 38 39 43 44 45 51 53 48 49 50 52 46 47 72 73 74 76 79 78 77 82 80 81 84 85 86 87 88 90 91 89 92 94 95 93 98 99 96 97 100 103 105 109 101 106 134 102 104 107 108 113 120 118 124 116 117 114 203 121 171 122 115 204 119 163 123 125 174 126 127 129 205 128 135 153 142 151 152 147 154 155 149 141 148 145 146 137 150 156 169 158 159 144 131 132 133 157 162 138 130 136 161 139 140 143 160 164 165 166 167 168 184 179 178 180 183 181 182 170 172 173 175 176 177 186 185 195 194 188 196 197 199 200 202 198 187 189 193 190 191 192	2 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 4 4 4 5 5 5 5 5 5 5 4 5 5 4 5 4 5 5 4 5 4 5 4 4 5 5 4 5 4 4 4 4 4 5 5 5 4 5 4 4 5 5 5 5 4 5 5 4 4 4 5 4 5 5 4 4 4 5 4 4 5 6 6 6 5 6 5 6 5 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 5 5 6 5 6 6 6 6 5 6 6 5 6 5 6 6
DPSO	20 19 201 25 21 22 1 6 23 34 24 26 28 29 33 30 31 32 27 35 2 3 4 5 13 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 36 41 72 75 83 112 42 110 111 37 38 39 40 54 55 43 44 45 53 46 51 48 49 50 56 61 47 57 58 62 63 64 68 65 66 67 69 70 71 73 74 76 78 79 77 82 59 60 52 80 81 84 85 90 86 87 88 89 91 92 97 98 94 95 99 100 130 131 105 106 103 104 107 93 132 101 102 134 133 96 109 108 113 118 163 162 119 205 174 114 203 115 120 121 171 169 204 122 116 161 124 125 117 123 126 129 127 128 135 152 145 139 136 140 150 138 144 137 149 141 146 153 154 155 156 147 157 151 158 142 159 143 148 160 178 170 172 173 184 164 165 166 167 168 179 180 183 181 182 175 176 177 187 195 186 196 185 194 197 202 198 199 200 188 189 191 190 193 192	1 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 1 2 2 2 4 4 1 5 5 5 5 4 5 5 5 5 4 4 5 4 5 4 4 4 4 4 4 5 5 5 4 5 4 4 5 5 4 4 5 5 5 5 5 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 6 5 6 6 5 5 6 5 5 5 6 5 6 5 6 5 5 5 5 6 6 5 6 5 6 5 6 5 6 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 5 6 6 5 6 6 5 6 6 6 5 5 6 5 6 5
PSONK	6 25 21 2 3 4 5 13 14 15 16 17 18 7 8 9 10 11 12 19 20 22 23 24 27 28 29 30 31 33 32 34 26 1 201 35 36 72 62 63 64 68 41 75 69 110 111 37 38 39 40 42 112 83 70 71 73 74 76 77 82 65 66 67 79 78 80 81 84 85 88 86 87 89 43 44 54 45 53 51 52 46 47 48 49 50 55 61 56 57 58 59 60 90 91 92 96 94 99 93 98 97 95 100 134 131 132 133 101 102 105 107 130 109 103 104 106 108 113 163 171 203 120 169 115 204 116 162 118 174 161 124 125 119 114 123 117 122 205 121 126 127 129 128 135 140 153 139 136 141 145 146 144 149 142 137 148 152 158 159 147 154 155 156 157 151 138 150 143 160 179 178 180 181 182 183 184 164 165 166 167 168 170 172 173 175 176 177 195 185 186 187 188 189 193 191 192 190 196 194 197 198 199 200 202	2 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 2 4 5 5 4 5 5 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 5 4 4 5 4 5 4 4 5 5 5 5 4 5 5 4 5 5 4 4 5 5 4 5 4 4 4 4 5 5 4 4 4 5 5 4 4 4 4 5 6 6 5 6 5 5 5 6 5 5 6 5 6 6 5 5 6 5 6 6 6 5 5 5 6 5 6 5 6 5 6 5 6 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 6 5 6 6 6 5 6 6 5 6 6 6 6 5

ตาราง ข.10 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1888 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	201 1 6 25 21 20 22 23 34 24 28 27 29 33 30 32 31 26 35 19 2 4 3 5 13 14 15 16 7 8 9 10 11 12 17 18 36 112 110 41 42 40 43 44 75 83 111 62 63 64 65 66 67 69 70 71 54 55 61 59 60 56 57 58 72 73 74 76 79 78 77 82 37 38 39 45 53 51 52 48 49 50 46 47 68 80 81 84 85 86 87 88 89 90 91 92 97 99 98 100 105 134 106 109 103 104 93 101 102 95 107 108 131 132 133 96 113 205 114 203 169 161 174 163 121 124 122 118 117 116 115 204 171 162 125 119 94 123 130 120 126 128 129 127 135 153 154 155 141 140 137 148 156 152 139 142 143 157 138 144 149 158 159 150 136 151 145 146 147 160 184 178 164 165 166 179 180 183 181 182 167 168 170 172 173 175 176 177 195 187 186 185 196 194 197 202 199 200 198 188 189 191 190 192 193	1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 3 6 3 3 3 6 6 3 3 6 3 3 3 6 6 3 3 3 3 3 3 6 3 6 6 6 3 3 6 6 6 6 3 6 6 6 3 6 6 6 6 6 6 3 3 3 3 6 3 3 3 6 5 5 6 5 5 6 6 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 6 6 5 6 6 6 5 6 6 6 5 5 6 5 5 6
BBO-LS	201 21 1 2 4 20 22 23 34 25 24 27 28 29 30 31 33 32 26 35 19 3 6 5 7 8 13 14 15 16 17 18 9 10 11 12 36 42 111 41 40 37 38 39 112 83 75 69 70 71 62 63 64 68 65 66 67 72 73 74 76 79 78 77 80 82 54 81 84 85 86 87 90 91 88 89 43 44 45 51 52 53 46 47 48 49 50 110 55 59 60 61 56 57 58 92 96 94 99 98 95 93 97 100 130 103 104 101 102 105 107 131 132 133 134 106 108 109 113 204 163 162 124 125 205 169 119 171 121 120 122 118 117 114 115 174 161 116 203 123 126 128 127 129 135 141 139 151 136 152 150 144 147 145 140 138 148 142 143 149 153 154 155 156 158 159 146 137 160 184 179 178 164 180 183 181 182 165 166 167 168 170 172 173 175 176 177 195 188 196 187 186 194 197 202 198 185 199 200 157 189 190 193 191 192	1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 1 1 2 1 2 1 1 2 2 2 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 4 4 4 4 4 5 5 4 5 4 5 5 5 5 4 4 4 4 5 5 5 5 5 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 4 5 5 6 5 6 6 5 5 6 5 5 5 6 6 5 5 5 6 6 5 5 6 5 6 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 6 5 5 5 5 6 6 6 6 5 5 5 5 5 6 5 5 6 6 6 5 6 5 6 5 6 6 6 6 5 6 6 6

ตาราง ข.11 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	6 1 201 21 25 20 22 23 34 24 26 28 29 30 32 33 31 27 35 19 2	2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2
	4 3 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 36 41 40 69 112 37 110	2 1 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2
	75 72 70 71 73 62 63 64 65 66 74 76 77 78 82 79 68 42 43 54	1 2 1 1 2 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 2 2 1
	55 61 59 60 56 44 57 58 83 38 39 45 51 52 53 48 49 50 46 47	1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1
	67 80 81 84 85 90 88 91 89 86 87 92 93 95 94 98 97 96 99 100	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1
	130 131 132 109 105 107 103 104 101 102 133 106 108 134 111	2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 1 2 1 1
	113 205 203 169 162 171 123 114 121 120 117 161 119 115 124	1 2 2 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3
	125 163 204 118 174 116 122 126 127 128 129 135 144 158 140	3 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4
	151 153 149 148 147 145 146 141 150 136 142 143 137 138 152	3 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4
	139 160 170 184 172 173 178 175 176 164 179 180 183 165 166	3 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4
	167 168 177 187 185 186 195 196 181 182 159 194 197 199 200	4 4 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3
	198 202 154 155 156 157 188 189 190 193 191 192	3 3 3 3 4 4 3
	6 1 201 21 25 20 22 23 34 24 26 28 29 30 32 33 31 27 35 19 2	2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2
	4 3 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 36 41 40 69 37 110 111	1 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2
	75 72 70 71 73 62 63 64 65 66 74 76 77 78 82 79 112 68 42 43	1 1 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2
	54 55 61 59 60 56 44 57 58 83 38 39 45 51 52 53 48 49 50 46	2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2
	47 67 80 81 84 85 90 88 91 89 86 87 92 93 95 94 98 97 96 99	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2
	100 131 130 132 133 103 104 105 107 101 102 106 108 134 109	1 2 1 2 1 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 4 4
	113 205 203 169 162 116 118 171 121 115 161 117 114 124 123	1 4 1 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 3
	125 120 163 204 122 174 119 126 128 129 127 135 137 144 158	3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 4 4
	140 151 153 149 148 147 145 146 136 139 141 150 142 143 152	3 4 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 3 4 3 4 3 3
	138 160 170 184 172 173 178 175 176 164 179 180 183 165 166	3 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4
	167 168 177 187 185 186 195 196 181 182 159 194 197 199 200	4 4 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3
	198 202 154 155 156 157 188 189 190 193 191 192	3 3 3 3 4 4 4
DPSO	2 20 3 25 6 201 1 21 22 23 34 24 28 29 33 26 30 31 32 27 35	1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2
	19 4 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 36 83 72 40 37 112 62	2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1
	42 43 54 44 55 59 41 61 56 57 58 60 63 64 69 70 71 73 74 68	2 2 1 2 1 2 1 1 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2
	111 76 79 77 82 78 75 38 39 45 51 52 53 46 47 48 49 50 110 65	2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 1 1
	66 67 80 81 84 85 90 86 87 88 89 91 92 95 94 98 99 93 96 97	1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2
	100 131 132 109 101 133 103 105 107 134 102 104 130 106 108	1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 1 2 2 2 2 1 1
	113 163 162 118 115 204 205 117 161 122 116 169 123 120 174	2 1 3 3 4 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 4
	171 119 114 203 124 125 121 126 129 127 128 135 144 149 140	4 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 4 4 3 4
	158 150 148 139 137 151 138 159 147 136 142 145 146 153 152	3 3 4 3 4 4 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3 3
	154 155 156 157 141 143 160 164 170 172 184 165 178 179 180	3 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4
	183 166 181 182 167 168 173 175 176 177 187 185 195 188 196	3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 4
	186 189 193 190 191 192 194 197 198 199 200 202	3 4 4 4 4 4 3

ตาราง ข.11 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	25 6 201 2 4 3 21 19 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 1 20 22 23 34 24 27 26 28 29 30 33 32 31 35 36 112 75 42 40 111 83 69 70 71 110 41 54 55 61 59 43 44 62 63 64 65 68 66 67 37 38 39 45 51 46 47 53 48 49 50 52 72 73 74 76 78 79 60 56 57 58 77 80 81 84 85 86 88 89 90 91 82 87 92 94 96 93 99 97 95 98 100 131 101 102 109 103 104 130 134 105 106 107 108 113 161 205 115 204 171 116 118 120 203 123 121 169 122 162 114 119 174 163 124 125 126 128 129 127 135 152 150 153 136 148 147 140 158 159 137 151 138 149 139 141 144 142 143 132 133 145 146 154 155 156 157 117 160 178 170 184 179 164 165 166 167 168 172 173 175 176 177 194 195 186 196 197 202 198 199 200 188 185 180 183 181 182 187 189 190 191 192 193	2 1 1 2 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 3 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4
PSONK	21 19 2 3 4 1 6 25 20 22 23 34 24 28 29 30 32 31 33 26 27 35 5 13 14 15 16 17 18 7 8 9 10 11 12 201 36 112 62 40 69 70 71 111 110 83 75 42 43 72 73 74 76 79 77 82 78 63 64 65 66 67 68 37 41 38 39 54 55 59 60 61 56 57 58 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 44 45 53 46 47 51 52 48 49 50 92 95 94 93 98 97 99 100 103 131 132 133 104 101 130 102 134 105 107 109 106 108 96 113 115 174 118 203 116 204 161 117 169 122 114 124 125 121 123 205 119 162 163 171 120 126 127 129 128 135 138 147 139 149 141 158 159 136 142 148 151 145 152 146 140 143 137 153 144 150 154 155 156 157 160 178 179 180 183 181 182 164 165 166 167 168 170 172 173 175 176 177 194 188 185 187 186 195 196 197 198 199 200 189 190 193 191 192 184 202	1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 2 1 2 2 2 2 1 2 1 4 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 4 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3
BBO	25 21 20 2 3 19 201 22 23 24 27 26 34 28 29 30 31 33 32 35 6 4 5 13 14 15 16 17 18 7 8 9 10 11 12 1 36 112 62 63 75 42 110 72 83 64 68 65 66 67 111 41 40 54 55 61 59 60 56 57 58 43 69 70 71 73 74 76 78 77 79 82 37 38 39 44 45 48 46 51 52 53 49 50 47 80 81 84 85 88 89 90 86 87 91 92 99 98 97 95 94 100 134 130 103 104 105 106 109 93 101 102 96 131 132 133 107 108 113 171 119 123 162 122 115 163 161 124 169 121 118 116 120 203 204 117 125 126 129 128 127 135 151 144 149 147 148 141 140 139 138 137 158 159 150 136 145 146 205 114 153 154 174 142 143 155 156 157 152 160 164 165 166 167 168 179 170 172 173 175 176 177 194 186 185 187 188 189 190 191 192 195 196 197 202 198 199 200 193 178 180 181 182 183 184	2 1 1 2 2 1 1 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 1 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 4 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3 4 4 4 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 3 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3

ตาราง ข.11 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	20 21 19 1 22 23 34 25 24 28 29 33 30 31 32 27 26 35 6 2 4 3 5 13 14 15 16 17 18 7 8 9 10 11 12 36 111 41 110 40 83 72 112 42 54 55 59 56 61 60 43 44 69 70 71 73 74 76 77 79 78 37 38 39 45 53 51 52 46 47 48 49 50 57 58 75 82 62 63 64 65 68 66 67 80 81 84 85 88 89 86 90 91 87 92 94 93 98 97 96 95 99 100 109 134 130 103 104 101 102 105 107 106 108 113 203 117 115 124 169 162 161 121 120 125 122 119 118 116 204 174 163 114 205 123 126 129 128 127 135 151 149 148 140 144 137 136 142 152 158 139 141 150 143 145 146 159 131 132 133 171 138 147 160 184 179 170 172 178 180 183 181 182 164 165 166 167 168 173 175 176 177 195 196 186 187 194 188 197 199 200 185 198 153 154 155 156 157 189 191 193 192 190 201 202	1 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 4 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 3 3 4 4 3 3 4 3 3 3 4 4 3 4 3 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 3 3 4 4 4 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 3 3
BBO-LS	6 1 19 201 20 25 21 22 23 34 24 28 29 30 32 31 33 26 27 35 2 3 4 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 36 37 62 63 64 112 110 42 41 83 75 69 70 71 68 72 73 74 76 79 78 77 82 40 54 43 55 59 56 61 60 65 66 67 80 81 84 85 86 88 90 91 89 87 44 38 39 45 51 46 48 53 52 49 50 47 111 57 58 92 93 98 95 94 97 99 100 131 132 133 130 109 105 106 103 104 134 101 102 107 108 96 113 205 115 204 171 121 163 124 125 114 119 117 116 118 120 203 162 123 169 122 126 127 128 129 135 138 139 153 158 159 152 150 147 151 140 141 136 142 143 144 148 154 155 156 157 149 174 145 146 137 160 170 184 172 178 173 175 176 164 165 166 179 180 181 182 183 161 167 168 177 195 188 185 194 187 186 189 193 191 192 190 196 197 198 199 200 202	2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2 4 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 3 4 4 4 3 4 3 4 4 3 4 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 3 4 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3
	201 19 1 25 21 20 22 23 24 34 26 28 29 30 32 31 27 6 33 35 2 4 3 5 13 7 14 15 16 17 8 9 10 11 12 18 36 83 112 40 110 72 75 69 70 71 73 74 76 78 77 82 37 42 43 44 54 55 59 60 56 57 58 41 38 39 45 53 51 52 48 49 50 46 47 111 79 62 63 64 65 66 67 68 80 81 84 85 90 91 86 87 61 88 89 92 93 98 96 95 97 99 100 134 131 130 109 105 106 107 103 104 101 102 132 108 113 205 116 174 163 162 203 115 120 124 125 122 121 118 117 114 204 171 133 119 169 94 123 126 127 128 129 161 135 145 147 158 159 136 152 139 153 150 148 146 142 141 144 138 154 155 156 157 149 151 140 143 137 160 184 179 170 164 165 166 167 168 172 173 175 176 177 187 188 186 185 189 193 190 194 195 196 197 198 202 199 200 178 180 183 181 182 191 192	1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 2 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 4 1 1 1 4 1 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 4 3 3 4 3 4 3 4 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4

ตาราง ข.11 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	6 1 19 201 20 25 21 22 23 34 24 28 29 30 32 31 33 26 27 35 2 3 4 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 36 37 62 63 64 112 110 42 41 83 75 69 70 71 68 72 73 74 76 79 78 77 82 40 54 43 55 59 56 61 60 65 66 67 80 81 84 85 86 88 90 91 89 87 44 38 39 45 51 46 48 53 52 49 50 47 111 57 58 92 93 98 95 94 97 99 100 131 132 133 130 109 105 106 103 104 134 101 102 107 108 96 113 205 115 204 171 121 163 124 125 114 119 117 116 118 120 203 162 123 169 122 126 127 128 129 135 138 139 153 158 159 152 150 147 151 140 141 136 142 143 144 148 154 155 156 157 149 174 145 146 137 160 170 184 172 178 173 175 176 164 165 166 179 180 181 182 183 161 167 168 177 195 188 185 194 187 186 189 193 191 192 190 196 197 198 199 200 202	2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2 4 1 1 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 4 4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3
	19 25 1 201 6 21 20 22 23 24 34 26 27 28 29 30 32 31 2 4 3 5 13 14 15 16 17 18 33 35 7 8 9 10 11 12 36 83 112 40 72 110 75 69 70 71 73 74 76 78 77 82 37 38 42 43 44 54 55 59 60 41 39 45 51 52 46 47 53 48 49 50 111 62 63 64 65 66 67 68 56 57 58 79 80 81 84 85 90 91 86 61 88 89 87 92 93 98 96 95 97 99 100 131 134 130 109 105 106 107 103 104 132 108 101 102 113 122 163 203 120 124 125 205 118 117 116 114 204 121 171 115 174 162 123 119 126 128 127 129 94 135 141 158 159 136 152 139 153 154 150 148 147 142 155 144 156 157 138 137 149 151 140 143 169 133 161 145 146 160 170 164 165 166 167 168 172 173 179 178 180 183 181 182 184 175 176 177 187 188 186 185 189 193 191 194 195 196 197 198 192 202 199 200 190	2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 3 4 3 4 3 4 3 3 3 3 4 3 4 4 4 4 4 3 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 4
	19 25 1 201 6 21 20 22 23 24 34 26 27 28 29 30 32 31 2 4 33 35 3 5 13 14 15 16 17 18 7 8 9 10 11 12 36 83 112 40 72 110 75 69 70 71 73 74 76 78 77 82 37 38 42 43 44 54 55 59 60 41 39 45 51 52 46 47 53 48 49 50 111 62 63 64 65 66 67 68 56 57 58 79 80 81 84 85 90 91 86 61 88 89 87 92 93 98 96 95 97 99 100 131 134 130 109 105 106 107 103 104 132 108 101 102 113 122 163 203 120 124 125 205 118 117 116 114 204 121 171 115 174 162 123 119 126 128 127 129 94 135 141 158 159 136 152 139 153 154 150 148 147 142 155 144 156 157 138 137 149 151 140 143 169 133 161 145 146 160 170 164 165 166 167 168 172 173 179 178 180 183 181 182 184 175 176 177 187 188 186 185 189 193 191 194 195 196 197 198 192 202 199 200 190	2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 4 1 1 1 1 1 4 1 3 3 3 3 4 3 4 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 3 3 4 4 4

ตาราง ข.11 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2266 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	1 19 201 20 25 21 22 23 34 24 28 29 30 32 31 33 26 27 35 2 4	1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2
	3 5 7 13 14 15 16 17 18 6 8 9 10 11 12 36 37 62 63 64 112 110	1 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2
	42 41 83 75 69 70 71 68 72 73 74 76 79 78 77 82 40 54 43 55	1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1
	59 56 61 60 65 66 67 80 81 84 85 86 88 90 91 89 87 44 38 39	1 2 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1
	45 51 46 48 53 52 49 50 47 111 57 58 92 93 98 95 94 97 99 100	1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	131 132 133 130 109 105 106 103 104 134 101 102 107 108 96	1 1 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 4 1
	113 205 115 204 171 121 163 124 125 114 119 117 116 118 120	3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 3 3 4 4 4
	203 162 123 169 122 126 127 128 129 135 138 139 153 158 159	4 3 3 4 4 3 4 3 4 4 3 4 4 4 4 3 3 4
	152 150 147 151 140 141 136 142 143 144 148 154 155 156 157	3 3 4 4 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4
	149 174 145 146 137 160 170 184 172 178 173 175 176 164 165	4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 3
	166 179 180 181 182 183 161 167 168 177 195 188 185 194 187	3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 3 3 4 4 3
	186 189 193 191 192 190 196 197 198 199 200 202	4 4 4 4 4 4 3

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	21 19 20 1 22 23 24 26 34 27 25 28 29 33 30 32 31 35 201 6 2	1 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
	4 3 5 7 8 9 13 14 15 16 10 17 18 11 12 36 72 83 62 112 110	1 2 2 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 2 2
	111 37 38 75 42 40 54 55 61 59 56 57 39 41 63 64 68 65 66 67	2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2
	43 44 45 53 51 52 48 49 50 46 47 69 70 71 73 74 76 77 82 79	1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	78 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 60 58 92 97 99 95 98 94 93	1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2
	100 131 101 102 109 103 104 132 133 105 107 130 134 96 106	2 1 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 1 1 1
	108 113 205 203 163 114 120 162 169 161 204 116 121 124 117	2 4 4 1 1 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3 3 4 3
	125 115 123 171 122 119 118 174 126 128 129 127 135 150 149	4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 4 4
	136 153 148 147 145 146 142 138 154 155 156 140 141 143 157	3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 4
	151 139 152 158 159 144 137 160 184 179 178 164 165 166 167	4 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3
	168 180 181 182 170 172 173 175 176 177 195 194 187 185 196	3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4
	197 202 198 199 188 200 183 186 189 191 192 190 193	3 4 4 4 4 3 4

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	21 19 20 1 22 23 34 24 26 27 25 28 29 33 30 32 31 35 201 6 2 3 4 5 7 13 14 15 16 8 9 10 17 18 11 12 36 83 62 112 110 111 75 42 72 40 54 55 61 59 60 43 56 57 58 44 41 63 64 68 65 66 67 37 38 39 45 48 49 50 53 51 52 46 47 69 70 71 73 74 76 77 78 82 79 80 81 84 85 88 86 87 89 90 91 92 97 95 98 94 93 99 100 131 130 101 102 109 132 133 105 107 103 104 134 96 106 108 113 205 203 163 114 120 162 169 161 204 116 124 117 125 115 123 171 122 119 118 174 121 126 128 129 127 135 150 136 153 148 147 145 146 142 138 140 141 143 154 155 156 157 139 152 151 158 159 149 144 137 160 184 179 178 164 165 166 167 168 180 181 182 170 172 173 175 176 177 195 194 187 185 196 197 202 198 199 188 200 183 186 189 191 192 190 193	1 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 4 1 3 3 3 3 3 4 3 3 4 3 4 3 4 3 3 4 4 3 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4
	21 19 20 1 22 23 34 24 26 27 25 28 29 33 30 32 31 35 201 6 2 3 4 5 7 13 14 15 16 8 9 10 17 18 11 12 36 83 62 112 110 111 75 42 72 40 54 55 61 59 60 43 56 57 58 44 41 63 64 68 65 66 67 37 38 39 45 48 49 50 53 51 52 46 47 69 70 71 73 74 76 77 82 79 78 80 81 84 85 88 86 87 89 90 91 92 97 95 98 94 93 99 100 131 130 101 102 109 132 133 105 107 103 104 134 96 106 108 113 205 203 114 120 162 169 161 204 116 124 125 117 115 123 163 122 171 119 118 174 121 126 128 129 127 135 150 136 153 148 147 145 146 142 138 140 149 141 143 154 155 156 157 151 139 152 158 159 144 137 160 184 179 178 164 180 181 182 170 172 173 175 176 165 166 167 168 177 195 194 187 185 196 197 202 198 199 188 200 183 186 189 191 192 190 193	1 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 1 1 1 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 4 1 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 3 4 4 3 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4
	21 19 20 1 22 23 34 24 26 27 25 28 29 33 30 32 31 35 201 6 2 3 4 5 7 8 9 13 14 15 16 10 17 18 11 12 36 83 62 112 110 111 75 42 72 40 54 55 61 59 60 43 56 57 58 44 41 63 64 68 65 66 67 37 38 39 45 48 49 50 53 51 52 46 47 69 70 71 73 74 76 77 78 82 79 80 81 84 85 88 86 87 89 90 91 92 97 95 98 94 93 99 100 131 130 109 101 102 132 133 105 107 96 103 104 134 106 108 113 205 203 114 120 162 169 161 204 116 124 125 117 115 123 163 171 122 119 118 174 121 126 128 129 127 135 150 149 136 153 148 147 145 146 142 138 140 141 143 154 155 156 157 139 152 151 158 159 144 137 160 184 179 178 164 165 166 167 168 180 181 182 170 172 173 175 176 177 195 194 187 185 196 197 202 198 199 188 200 183 186 189 191 192 190 193	1 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	21 19 20 1 22 23 34 24 26 27 25 28 29 33 30 32 31 35 201 6 2 3 4 5 7 8 9 13 14 15 16 10 17 18 11 12 36 83 62 112 110 111 75 42 72 40 54 55 61 59 60 43 56 57 58 44 41 63 64 68 65 66 67 37 38 39 45 48 49 50 53 51 52 46 47 69 70 71 73 74 76 77 82 79 78 80 81 84 85 88 86 87 89 90 91 92 97 95 98 94 93 99 100 131 130 101 102 109 132 133 105 107 96 103 104 134 106 108 113 205 203 114 120 162 169 161 204 116 124 125 117 115 123 163 171 122 119 118 174 121 126 128 129 127 135 150 149 136 153 148 147 145 146 142 138 140 141 143 154 155 156 157 139 152 151 158 159 144 137 160 184 179 178 164 165 166 167 168 180 181 182 170 172 173 175 176 177 195 194 187 185 196 197 202 198 199 188 200 183 186 189 191 192 190 193	1 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 3 4 3 3 4 4 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4
	21 19 20 1 22 23 34 24 26 27 25 28 29 33 30 32 31 35 201 6 2 3 4 5 7 8 9 13 14 15 16 10 17 18 11 12 36 83 62 112 110 111 72 40 42 54 55 61 59 60 43 56 57 58 44 41 75 63 64 68 65 66 67 37 38 39 45 48 49 50 53 51 52 46 47 69 70 71 73 74 76 77 82 79 78 80 81 84 85 88 86 87 89 90 91 92 97 95 98 94 93 99 100 131 130 101 102 109 132 133 105 107 96 103 104 134 106 108 113 205 203 114 161 162 169 120 204 116 124 125 117 115 123 163 171 122 119 118 174 121 126 127 128 129 135 136 150 153 148 147 145 146 142 138 140 141 143 154 155 156 157 139 152 151 158 159 149 144 137 160 184 179 178 164 165 166 167 168 180 181 182 170 172 173 175 176 177 195 194 187 185 196 197 202 198 199 188 200 183 186 189 191 192 190 193	2 1 1 2 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 1 1 2 2 2 1 1 1 1 2 1 1 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 1 4 4 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 3 4 3 4 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4
DPSO	20 201 19 1 6 21 22 23 24 26 27 34 2 3 4 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 25 28 29 30 32 33 31 35 36 75 40 41 111 42 83 37 38 39 112 43 44 45 51 52 46 47 48 72 54 55 56 57 59 60 53 110 69 61 62 63 64 68 65 66 67 49 58 50 70 71 73 74 76 79 78 77 80 81 84 82 85 88 89 90 91 86 87 92 97 98 95 94 99 100 131 130 105 101 102 103 107 104 96 109 132 133 106 108 113 118 116 174 119 205 171 161 115 162 169 204 122 120 203 121 93 117 123 124 125 126 127 129 128 135 140 136 153 152 150 151 158 159 139 141 147 149 154 142 143 155 156 157 148 144 145 146 138 114 134 163 137 160 179 178 180 181 164 165 166 167 168 182 184 183 170 172 173 175 176 177 194 195 187 196 197 198 188 199 200 202 186 185 189 191 192 190 193	1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 2 1 2 4 4 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 4 4 3 4

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
DPSO	21 20 22 23 34 25 19 6 2 4 3 5 7 8 13 14 15 16 17 18 9 10	1 2 2 2 1 2 1 1 2 1 2 1 2 2 1 1 1 1
	11 12 1 201 24 27 28 29 30 32 31 26 33 35 36 42 83 41 75 40	1 1 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1
	54 43 37 72 111 55 61 56 57 58 59 60 112 44 62 63 64 68 65	1 2 1 2 1 2 2 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2
	66 67 69 70 71 73 110 74 76 79 77 82 78 80 81 84 85 86 90	2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1
	91 88 89 87 38 39 45 51 52 53 48 49 50 46 47 92 98 94 96 95	1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	93 99 97 100 131 109 103 104 101 102 132 133 130 134 105	1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2
	106 107 108 113 174 118 203 123 204 115 119 117 171 121 169	2 2 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
	116 124 125 120 161 162 163 205 114 122 126 129 127 128 135	3 3 4 3 4 3 4 3 4 4 4 3 3 4 4 4 4 3
	137 138 147 141 148 145 146 136 149 151 140 150 152 142 143	3 4 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3
	144 139 160 184 178 179 180 183 170 172 173 181 182 164 165	4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 4
	166 167 175 176 168 177 194 188 195 196 185 187 186 197 199	4 4 3 3 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3
	200 202 198 158 159 153 154 155 156 157 189 193 191 190 192	3 3 3 4 4 3 4
	20 2 4 3 5 13 14 6 1 7 8 19 15 16 17 18 21 22 23 34 24 27	1 2 1 2 2 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2
	26 201 25 9 10 11 12 28 29 33 30 32 31 35 36 42 110 41 112	2 1 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
	83 40 72 43 69 37 38 62 63 64 65 66 67 54 44 55 59 60 61 56	2 2 2 1 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	57 58 75 70 71 73 74 76 78 77 82 79 39 45 48 46 47 49 50 51	2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2
	52 53 111 68 80 81 84 85 86 88 89 90 91 87 92 93 96 95 97	2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2
	94 99 98 100 105 103 131 109 101 107 132 102 133 130 104	2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1 2 1 2
	106 108 113 121 116 117 119 124 122 205 161 204 169 174 171	2 2 4 1 4 4 4 3 3 3 3 4 3 3 4 3 3 4
	115 163 114 162 203 125 120 118 123 126 129 128 127 135 152	3 3 3 3 4 4 3 4 3 4 4 4 3 4 3 4 4 3
	137 149 140 136 147 142 158 159 148 144 139 150 145 146 151	3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 3 4
	153 154 155 156 157 138 134 141 143 160 178 164 184 170 179	4 4 4 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3
	180 183 181 182 172 173 175 176 165 166 167 168 177 187 195	3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 4 4 3
	188 196 194 197 199 200 198 185 186 189 190 191 193 192 202	4 4 3 4 4 4 3
	6 25 21 19 20 2 4 3 5 7 8 9 10 11 12 1 22 23 24 27 26 28 29	2 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2
	33 34 30 31 32 35 201 13 14 15 16 17 18 36 75 37 62 63 38	2 2 1 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1
	41 39 111 83 69 70 42 110 112 64 65 66 67 68 40 54 55 59 61	1 1 1 2 2 1 2 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1
	43 44 56 57 45 48 51 49 46 47 50 53 58 52 72 71 73 74 76 78	1 1 1 2 2 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1
	79 77 82 80 81 84 85 86 90 91 88 89 87 60 92 94 99 96 95 97	1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 2
	93 98 100 105 107 109 101 102 134 103 104 106 108 113 171	2 1 1 1 2 2 1 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1
	118 123 169 116 120 162 205 119 117 174 114 163 122 204 124	2 2 1 4 1 1 3 3 4 3 3 4 3 4 3 3 3 3
	125 203 115 121 126 128 129 127 135 153 152 151 154 148 138	3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3
	145 140 144 139 149 146 150 137 142 141 143 158 159 131 132	4 3 3 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4
	133 161 147 160 178 164 165 179 180 183 166 170 172 173 175	4 3 3 3 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3
	176 167 168 181 182 177 185 187 186 195 196 188 194 197 198	3 4 3 4 4 3 4 3 3 4 4 3 4 4 3 3 4 3
	202 199 200 155 156 157 184 130 136 189 191 193 190 192	4 3 3 4 4 3 3

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
PSONK	201 19 1 21 6 20 22 23 34 24 27 26 25 28 29 30 32 31 33 35 2 4 3 5 13 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 36 110 111 42 75 83 72 41 62 63 64 68 65 40 54 55 56 59 60 61 66 67 43 44 37 38 39 45 48 49 50 51 52 53 46 47 112 57 58 69 70 71 73 74 76 78 79 77 82 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 92 95 93 99 97 96 98 100 134 130 109 105 106 103 104 101 102 131 132 133 107 108 113 205 204 162 117 161 116 120 119 114 123 169 174 121 171 163 115 94 124 125 118 122 126 129 128 127 135 149 138 140 153 144 136 139 145 146 148 151 142 147 158 159 152 141 143 154 155 156 157 203 137 150 160 170 172 173 175 176 178 184 179 180 183 164 165 166 167 168 177 188 186 187 185 189 191 190 192 193 194 195 196 197 202 198 199 200 181 182	1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 1 1 2 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 4 4 4 1 1 1 1 1 4 1 4 4 1 3 3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 3 4 3 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4 3 3
	201 19 1 21 6 20 22 23 34 24 27 26 25 28 29 30 32 31 33 35 2 4 3 5 13 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 36 110 111 42 75 83 72 69 70 71 73 41 74 76 78 79 77 82 40 54 55 56 57 58 61 59 60 37 38 39 43 44 45 53 51 52 48 49 50 46 47 112 62 63 64 65 66 67 68 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 92 95 93 99 97 96 98 100 134 130 109 105 106 103 104 101 102 131 132 133 107 108 113 205 204 162 117 161 116 120 119 114 123 169 174 121 171 163 115 94 118 124 125 122 126 129 128 127 135 149 138 140 153 144 136 139 145 146 148 151 142 147 158 159 152 141 143 154 155 156 157 203 137 150 160 170 172 173 175 176 178 184 179 180 183 164 165 166 167 168 177 188 186 187 185 189 191 190 192 193 194 195 196 197 202 198 199 200 181 182	1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 4 4 4 1 1 1 1 1 4 1 4 4 1 1 1 1 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4 3 3
	201 19 1 21 6 20 22 23 34 24 26 27 25 28 29 30 32 31 33 35 2 4 3 5 13 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 36 110 111 42 75 83 72 69 70 71 73 41 74 76 78 79 77 82 40 54 55 56 57 58 61 59 60 43 44 37 38 39 45 53 51 52 48 49 50 46 47 112 62 63 64 65 66 67 68 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 92 95 93 99 97 96 98 100 134 130 109 105 106 103 104 101 102 131 132 133 107 108 113 205 204 171 162 117 161 116 120 174 119 114 123 121 163 115 94 124 125 118 122 126 129 128 127 135 149 138 140 153 144 136 139 145 146 148 151 142 147 158 159 152 141 143 154 155 156 157 203 137 150 160 178 184 179 180 183 181 182 164 165 166 167 168 169 170 172 173 175 176 177 188 187 194 185 186 189 191 190 192 193 195 196 197 202 198 199 200	1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 1 2 1 1 1 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 4 4 4 1 1 1 1 1 1 4 1 4 4 1 1 1 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4 3 3 4 3 4 4 3 4 4 3 4 4 4

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
PSONK	201 19 1 21 6 20 22 23 34 24 26 27 25 28 29 30 32 31 33 35	1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2
	2 4 3 5 13 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 36 110 111 42 75	2 1 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1
	83 72 69 70 71 73 41 74 76 78 79 77 82 40 54 55 56 57 58 61	2 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2
	59 60 43 44 37 38 39 45 53 51 52 48 49 50 46 47 112 62 63	1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	64 65 66 67 68 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 92 95 93 99 97	1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	96 98 100 134 130 109 105 106 103 104 101 102 131 132 133	1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1
	107 108 113 205 204 171 162 121 161 116 120 174 119 114 123	2 2 2 2 4 4 4 1 1 1 1 1 1 4 1 4 4 1
	117 163 115 94 124 125 118 122 126 129 128 127 135 149 138	1 1 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 3 4
	140 153 144 136 139 145 146 148 151 142 147 158 159 152 141	3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 4
	143 154 155 156 157 203 137 150 160 178 184 179 180 183 181	4 4 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4
	182 164 165 166 167 168 169 170 172 173 175 176 177 188 187	4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 4 4 3 4 4
	194 185 186 189 191 190 192 193 195 196 197 202 198 199 200	3 4 4 3 4 4 4
	201 19 1 25 21 6 20 22 23 34 24 26 28 29 30 32 31 33 27 35	1 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2
	2 4 3 5 13 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 36 110 111 42 75	2 2 1 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1
	83 72 69 70 71 73 41 74 76 78 79 77 82 40 54 55 56 57 58 61	1 2 1 1 1 2 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2
	59 60 43 44 37 38 39 45 53 51 52 48 49 50 46 47 112 62 63	1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	64 65 66 67 68 80 81 84 85 88 89 90 91 86 87 92 95 93 99 97	1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	96 98 100 134 130 109 105 106 103 104 101 102 131 132 133	1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1
	107 108 113 205 204 116 171 162 121 161 120 174 119 114 123	2 2 2 2 4 4 4 1 1 1 1 1 4 3 4 3 4 3
	117 163 115 94 124 125 118 122 126 129 128 127 135 149 138	3 3 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 4
	140 153 144 136 139 145 146 148 151 142 147 158 159 152 141	3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 3 3 4 4 3 3 3 4
	143 154 155 156 157 203 137 150 160 178 184 179 180 183 181	4 4 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4
	182 164 165 166 167 168 169 170 172 173 175 176 177 188 187	4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 4 4 4 4 3 4 4
	194 185 186 189 191 190 192 193 195 196 197 202 198 199 200	3 4 4 3 4 4 4
BBO	25 20 201 19 21 2 4 3 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 6	2 1 1 2 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2
	22 23 24 28 29 30 31 32 27 34 26 1 33 35 36 42 37 83 112 41	2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 2
	38 39 75 62 63 64 65 66 67 68 110 72 111 69 70 71 73 74 76	2 2 1 1 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1
	79 77 82 78 80 81 84 85 86 87 90 88 89 91 40 43 54 55 59 60	1 2 2 2 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2
	61 56 57 58 44 45 51 52 46 47 53 48 49 50 92 99 96 95 97 98	1 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1
	100 131 130 101 109 103 104 132 133 134 93 94 105 107 106	1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2
	108 102 113 120 204 205 171 169 163 161 122 123 174 116 114	2 2 4 4 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4
	115 203 119 121 117 162 124 125 118 126 129 128 127 135 145	3 3 3 4 3 3 3 3 4 4 4 3 4 3 4 3 4 4
	144 149 158 142 153 154 155 156 157 147 138 140 146 152 139	3 3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4
	148 151 137 136 141 143 150 160 170 172 173 175 176 164 165	4 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3
	166 167 168 177 188 185 195 196 186 194 187 179 178 180 183	3 4 3 4 4 3 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 4
	181 182 184 197 198 202 199 200 159 189 193 190 191 192	4 4 4 4 3 4 4

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	201 2 3 4 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 25 1 6	1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2
	22 23 24 28 29 33 30 31 32 27 26 34 35 19 36 112 83 110 72	1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2
	111 62 63 64 65 66 67 68 37 38 39 75 40 69 70 71 73 74 76	2 2 1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 2 1
	79 78 77 82 80 81 84 85 90 91 86 87 88 89 42 41 43 44 45 51	1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1
	52 46 47 48 49 50 53 54 55 59 60 56 57 58 61 92 97 94 98 95	1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2
	96 99 100 131 105 107 130 109 101 102 106 108 103 104 134	2 2 2 2 2 2 1 2 1 2 1 2 2 2 1 1 2 2
	132 133 113 161 171 123 122 119 117 169 121 118 116 163 162	1 2 1 1 2 2 2 4 4 1 4 1 1 1 1 1 1 1
	115 174 205 204 120 114 203 124 125 126 129 128 127 93 135	3 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 4
	144 152 138 137 141 142 136 151 150 153 154 155 156 157 147	3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4
	145 148 140 158 159 149 139 143 146 160 170 172 173 175 176	3 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4
	164 165 184 179 166 167 168 177 194 195 196 197 198 202 199	4 4 4 4 3 4 4 4 3 4 4 3 4 3 4 3 4 4
	200 185 187 188 186 189 193 191 192 190 178 180 183 181 182	4 3 3 3 3 3 3
	21 20 22 23 34 24 26 27 2 4 3 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10	2 1 2 2 1 2 1 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1
	11 12 6 19 1 25 28 29 33 30 31 32 35 36 41 83 69 70 71 111	1 2 2 2 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2
	110 72 112 42 37 38 39 62 63 64 65 66 40 43 54 55 61 56 57	1 2 2 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	58 59 60 44 45 53 48 49 50 46 47 51 52 201 68 75 67 73 74	1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1
	76 77 82 79 78 80 81 84 85 88 89 86 87 90 91 92 95 96 99 97	1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 1
	94 98 100 131 101 102 130 105 107 106 108 103 104 134 132	1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 1
	133 109 113 121 163 162 171 205 203 115 114 119 117 118 174	2 1 1 2 2 4 4 4 1 1 1 4 4 1 1 3 3 3
	124 125 161 123 204 169 122 116 120 126 128 127 129 93 135	3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 3 4 3 4 4 4
	148 145 146 151 141 158 159 147 142 137 139 152 144 153 154	3 4 3 3 4 3 4 4 3 3 4 4 3 4 3 3 3 3
	155 156 157 149 136 140 143 138 150 160 184 164 165 170 172	3 4 3 3 3 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4
	173 175 176 166 167 168 177 188 186 185 194 195 196 197 198	4 4 3 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3
	199 200 202 179 178 180 183 181 182 187 189 190 193 191 192	3 4 4 4 4 4 4
	6 1 21 20 19 2 4 3 5 7 13 14 15 16 17 18 8 9 10 11 12 201	2 1 2 2 2 2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2
	22 23 34 24 26 27 25 28 29 33 30 31 32 35 36 42 83 110 72	2 2 2 1 2 2 1 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1
	40 43 112 69 70 71 73 74 76 79 78 77 82 41 75 37 38 39 111	1 2 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1
	54 55 59 60 61 56 57 58 44 45 48 49 50 53 51 52 46 47 62 63	2 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1
	64 68 65 66 67 80 81 84 85 90 91 88 89 86 87 92 98 93 94 99	1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2
	97 100 103 131 132 133 134 101 102 109 105 106 107 108 130	2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 1 1 4 4 4 1
	104 96 95 113 122 169 119 163 162 115 174 204 116 120 117	1 1 3 3 3 3 4 4 3 4 3 3 3 4 4 4 3 3
	161 118 114 203 123 124 125 121 126 128 127 129 135 158 138	4 4 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4
	147 136 142 144 141 148 145 146 151 137 150 140 159 139 152	3 3 3 3 4 3 4 3 3 4 4 4 3 4 4 3 3 4
	143 149 153 154 155 156 157 160 184 170 179 178 180 183 181	3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 3 3 3 3 4 3 3 3
	182 205 171 172 173 175 176 164 165 166 167 168 177 185 194	3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 4 3 4 4 4
	195 196 197 198 202 199 200 187 188 186 189 193 191 192 190	3 4 4 4 4 4 3

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	19 6 20 1 201 25 21 22 23 34 24 28 26 29 30 32 31 27 33 35 2 3 4 5 7 13 14 8 9 15 16 17 18 10 11 12 36 83 111 75 42 110 41 72 62 63 64 68 69 70 71 73 74 76 78 77 82 79 40 43 54 55 59 60 44 61 56 57 58 112 65 66 67 80 81 84 85 90 88 91 89 86 87 37 38 39 45 53 51 52 46 47 48 49 50 92 98 99 93 95 97 100 131 134 132 133 130 105 107 106 108 109 96 101 102 94 103 104 113 171 116 118 114 119 161 120 162 163 203 205 204 174 121 124 123 122 117 115 169 125 126 129 128 127 135 138 150 141 137 136 144 140 148 149 142 143 153 145 146 147 154 155 156 157 151 152 139 160 164 184 170 172 173 175 176 165 166 167 168 178 177 195 194 187 185 188 186 196 179 180 181 182 183 158 159 189 193 191 192 190 197 202 198 199 200	2 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 3 2 2 2 3 2 4 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 4 4 3 3 4 3 3 4 4 4 3 4 3 3 4 3 4 3 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 3 4 4 4
	19 1 20 201 25 21 22 23 34 24 28 29 26 30 32 31 27 6 33 35 2 3 4 5 7 13 14 8 9 15 16 17 18 10 11 12 36 75 83 111 42 110 41 72 62 63 64 68 69 70 71 73 74 76 78 77 82 79 40 43 54 55 59 60 44 61 56 57 58 112 65 66 67 80 81 84 85 90 88 91 89 86 87 37 38 39 45 53 51 52 46 47 48 49 50 92 98 99 93 95 97 100 131 103 104 134 132 133 130 105 107 106 108 109 96 101 102 113 171 116 118 120 204 114 119 161 162 163 205 174 121 124 123 122 117 115 203 169 125 126 128 129 94 127 135 138 150 141 136 137 144 140 148 149 142 143 152 153 145 146 147 154 155 156 157 151 139 160 164 184 170 172 173 175 176 165 166 167 168 178 177 195 194 187 185 188 186 179 180 181 182 183 158 159 189 193 191 192 190 196 197 202 198 199 200	1 2 1 1 2 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 2 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 3 4 4 3 4 4 4 4 3 3 4 4 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 3 4 3 3 4 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4
	19 20 1 201 25 21 22 23 34 24 28 26 29 30 32 31 27 6 33 35 2 3 4 5 7 13 14 8 9 15 16 10 11 12 17 18 36 110 83 42 111 41 75 72 62 63 64 68 69 70 71 73 74 76 78 77 82 79 40 54 55 59 60 43 44 61 56 57 58 112 65 66 67 80 81 84 85 88 90 91 89 86 87 37 38 39 45 53 51 52 46 47 48 49 50 92 98 99 93 95 97 100 131 103 104 134 132 133 130 105 107 106 108 96 109 101 102 113 171 116 118 120 114 119 161 162 163 205 204 174 121 124 123 122 117 115 203 169 125 126 128 129 94 127 135 139 138 150 141 137 136 144 140 148 149 142 143 153 145 146 147 154 155 156 157 151 152 160 184 164 170 165 166 167 168 172 173 175 176 178 177 195 194 187 185 188 186 179 180 181 182 183 158 159 189 193 191 192 190 196 197 202 199 200 198	2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 2 2 1 2 2 1 2 1 1 2 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 2 4 4 4 1 1 1 1 1 3 3 3 3 3 4 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 4 3 4 3 4 4 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 4 4 4 4 3 3 3 3 4 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4

ตาราง ข.12 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 205 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2454 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO-LS	19 20 1 201 25 21 22 23 34 24 28 29 26 30 32 31 27 6 33 35 2 3 4 5 7 13 14 8 9 15 16 10 11 12 17 18 36 110 83 111 42 41 75 72 62 63 64 68 69 70 71 73 74 76 78 77 82 79 40 54 55 59 60 43 44 61 56 57 58 112 65 66 67 80 81 84 85 90 88 91 89 86 87 37 38 39 45 53 51 52 46 47 48 49 50 92 98 99 93 95 97 100 131 103 104 134 132 133 130 105 107 106 108 109 96 101 102 113 171 116 118 120 114 119 161 162 163 205 204 174 121 124 123 122 117 115 203 169 125 126 127 129 128 94 135 141 138 150 136 137 144 140 148 149 142 143 152 153 145 146 147 154 155 156 157 151 139 160 164 184 170 172 173 175 176 165 166 167 168 178 177 195 194 187 185 188 186 179 180 181 182 183 158 159 189 193 191 192 190 196 197 202 198 199 200	2 1 2 1 2 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 2 1 2 2 1 2 2 1 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 3 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 4 3 3 4 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 3 4 3 4 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 3 3 4 3 3 4 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 4 4

5. การค้นหาคำตอบของปัญหา 183 ขั้นงาน

ตาราง ข.13 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	24 2 11 32 4 8 31 33 10 21 14 27 34 25 22 52 35 156 26 51 155 23 48 170 20 42 135 138 129 143 6 13 44 56 16 79 77 38 125 78 9 29 46 18 40 3 7 19 41 128 30 49 57 58 47 134 137 139 1 5 28 55 12 43 73 45 84 50 15 37 124 76 17 39 126 74 72 71 54 59 60 61 62 64 63 65 36 53 99 114 100 152 150 151 149 66 67 68 69 83 70 85 86 89 87 88 96 80 81 95 90 93 91 97 98 92 111 112 102 103 104 118 105 106 109 108 117 107 110 113 131 119 120 122 121 164 165 160 161 162 123 166 167 168 169 171 172 173 174 175 179 157 158 159 82 176 177 181 180 178 182 183 130 163 101 154 153 75 115 116 127 133 136 132 142 141 140 148 144 145 146 147 94	1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 3 2 2 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 4 6 6 3 3 3 3 3 3 3 3 6 3 3 6 6 3 5 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 7 6 6 6 6 6 6 7 8 7 7 7 7 7 8 8 7 7 7 7 9 9 9 10 10 10 9 10 10 9 10 10 9 10 10 9 9 10 11 11 11 10 12 12 12 12 11 12 11 11 12 14 14 14 13 13 14 13 13 14 13 13 14 13 13 13 13 15 15 16 16 15 18 18 17 17 18 17 17 18 18 18 17 17 19 18 20 20 20 19 19 19 20 20 20 19 19 19 20 19 19 20 20 20 20 19

ตาราง ข.13 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
NSGAII	24 2 11 32 4 8 31 33 10 14 27 34 25 21 22 52 156 35 26 51 155 23 20 42 129 135 143 138 48 170 6 13 44 16 56 79 77 38 125 78 9 29 46 18 40 3 7 19 41 134 128 137 139 30 49 57 58 47 1 5 28 55 12 43 73 45 84 50 15 37 124 76 17 39 126 74 72 71 54 59 60 61 63 62 64 65 36 53 99 114 100 152 149 151 150 66 67 68 69 83 70 89 80 81 85 86 130 87 88 96 95 90 93 91 97 98 92 111 112 102 103 104 118 105 131 106 109 108 117 107 110 113 119 120 122 121 164 165 160 161 162 123 166 167 168 169 171 172 173 174 175 179 157 158 159 82 163 176 177 181 180 178 182 183 101 153 154 75 115 132 142 116 127 133 136 141 140 144 148 145 146 147 94	1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 2 2 4 4 4 4 3 3 3 4 4 4 4 4 4 6 6 3 3 3 3 3 3 6 6 3 3 3 6 3 3 5 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 6 7 6 6 6 6 7 6 6 7 6 6 8 8 8 8 7 7 8 8 8 8 8 8 7 8 10 9 9 10 10 10 10 10 11 10 10 10 11 12 12 11 11 11 12 12 12 11 12 12 13 14 13 13 14 14 14 13 13 14 13 13 14 13 13 16 15 15 15 15 15 15 16 16 15 18 18 17 17 18 17 18 17 18 18 18 17 17 19 20 19 20 19 19 19 19 20 20 20 19 20 19 20 19 20 20 20 19
	24 2 11 32 4 8 31 33 10 14 27 34 25 21 22 52 35 156 26 51 155 23 48 170 20 42 129 135 143 138 6 13 44 56 16 79 77 38 125 78 9 29 46 18 40 3 7 19 41 134 137 139 128 30 49 57 58 47 1 5 28 55 12 43 45 84 50 15 37 124 73 76 17 39 126 74 72 71 54 59 60 61 63 62 64 65 36 53 99 101 100 152 149 151 114 154 153 150 66 67 68 69 83 70 85 86 130 89 87 88 96 80 81 95 90 93 91 97 98 102 92 103 104 105 106 118 107 109 108 117 110 131 119 120 122 121 164 165 160 161 162 123 166 167 168 169 171 172 173 174 175 179 157 158 159 82 176 177 181 180 178 182 183 163 111 112 113 75 115 132 142 116 127 133 136 141 140 144 145 148 146 147 94	1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 2 1 2 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 3 4 4 4 3 4 3 3 4 4 4 4 4 4 6 6 3 3 3 3 3 6 6 3 3 3 3 6 3 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 6 5 5 5 5 5 6 6 7 6 6 6 6 7 6 6 7 6 6 8 8 8 8 7 7 8 8 7 8 8 8 8 8 9 8 10 10 10 9 10 10 9 10 9 10 10 10 9 10 12 11 11 12 12 12 11 12 12 14 11 11 13 14 14 13 14 13 13 14 13 13 16 15 15 15 15 15 15 16 16 15 18 18 17 17 18 17 17 18 18 18 17 17 19 20 19 19 20 19 19 19 19 20 20 20 19 20 19 20 19 19 20 20 19
DPSO	3 2 1 4 33 25 6 9 7 19 30 8 31 26 51 35 16 38 22 125 29 46 13 32 24 11 5 12 28 45 55 15 37 124 17 39 126 170 34 48 27 49 57 50 74 71 72 75 58 52 155 156 20 42 129 135 143 47 36 53 99 114 115 132 101 153 154 100 151 152 149 150 23 54 59 60 61 62 64 63 65 66 67 41 134 137 139 128 142 10 14 56 79 21 43 44 73 76 78 77 84 138 68 69 80 70 81 82 83 89 85 130 86 90 87 88 96 94 93 91 92 111 112 97 98 102 103 104 105 106 109 108 117 163 119 95 118 107 110 113 131 120 157 158 160 162 161 159 122 123 121 164 165 166 167 168 169 171 172 173 174 18 40 116 133 141 136 127 140 144 145 148 175 176 177 181 179 178 182 183 180 146 147	1 2 1 2 1 2 2 2 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 1 2 2 2 2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 3 3 3 3 4 4 4 4 4 3 4 4 3 4 3 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 3 4 5 6 6 5 6 5 6 6 6 5 5 6 5 6 5 8 8 8 5 5 8 8 7 7 7 7 7 7 7 8 8 7 8 7 7 9 8 8 10 9 10 10 9 9 10 10 10 10 10 10 9 9 10 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 12 11 11 13 14 14 14 14 14 14 14 13 13 13 14 14 13 14 16 15 15 15 16 16 16 15 15 15 18 18 17 18 18 18 18 18 18 17 18 17 18 18 17 20 19 20 20 20 19 19 19 20 20 20

ตาราง ข.13 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
PSONK	24 25 1 5 170 11 2 6 13 16 38 125 10 3 7 35 4 8 31 20 42 135 129 143 18 40 34 14 21 23 33 17 39 12 22 26 15 37 36 53 52 156 43 99 100 149 150 9 29 19 41 128 134 137 139 44 73 56 77 78 79 124 152 101 153 154 48 138 126 28 45 27 30 47 32 51 155 114 115 116 132 142 151 49 50 54 57 59 60 61 63 62 64 65 66 67 68 69 83 89 80 81 82 71 72 55 46 74 75 127 133 136 141 140 144 145 146 147 85 130 76 58 84 148 70 86 87 91 94 88 95 90 97 98 92 111 102 103 104 105 112 106 108 93 96 131 118 109 119 117 163 120 121 164 160 162 157 158 122 159 161 123 165 166 167 168 169 171 172 173 174 175 179 176 177 178 180 182 183 107 110 113 181	1 2 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 4 4 4 1 1 4 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 4 4 1 3 3 3 4 4 4 3 3 3 3 4 6 6 6 3 3 6 3 5 6 5 5 6 6 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 8 5 5 5 5 5 7 7 8 7 7 7 8 8 7 7 8 8 7 7 9 12 12 12 9 12 12 12 9 9 12 12 9 12 9 9 9 9 9 12 12 11 12 11 11 12 12 12 11 11 12 12 12 12 12 11 11 12 12 12 12 11 13 14 13 13 14 14 14 14 13 13 14 13 15 14 14 16 15 16 16 15 16 16 16 17 18 17 17 18 18 17 20 20 19 20 19 20 19 19 20 20 20 20
	26 11 51 4 8 20 170 10 3 7 30 47 34 35 1 2 14 22 6 18 40 13 23 33 24 27 5 17 39 12 15 21 25 32 52 156 155 9 29 16 38 125 56 77 78 79 126 36 53 99 114 43 28 45 42 135 138 19 41 134 100 149 152 46 55 137 139 44 73 151 150 101 153 154 115 116 127 133 136 132 141 37 31 50 54 72 74 71 75 49 58 76 128 48 57 59 60 61 62 64 63 84 142 65 66 67 68 69 83 89 80 81 82 85 86 130 90 87 94 88 95 93 91 98 92 96 102 103 104 105 111 112 131 106 108 107 119 117 163 118 120 122 157 158 110 109 160 162 123 121 164 165 159 161 166 167 168 169 113 97 171 172 173 174 175 179 176 177 181 178 182 183 180 129 143 124 140 148 144 145 146 147 70	1 2 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 4 5 4 4 4 4 4 5 5 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 4 6 5 5 5 5 6 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 6 5 6 8 8 7 7 8 7 8 8 7 8 8 7 7 8 8 7 7 8 7 7 8 7 8 10 7 9 9 10 10 10 9 10 9 9 10 10 10 10 12 12 12 12 11 12 12 11 11 12 11 11 12 12 12 12 13 13 12 14 14 14 13 14 14 13 13 14 13 13 16 16 13 16 15 15 15 16 16 15 15 16 16 17 18 18 17 18 18 17 20 20 19 20 20 19 19 19 20 20 20 19 19 19 20 20 20 20 19
BBO	1 26 27 34 22 25 52 32 11 4 3 51 155 156 35 33 23 170 24 10 21 14 8 20 42 129 31 48 135 143 138 7 19 41 134 128 30 47 137 139 49 57 58 5 12 43 15 37 124 28 45 17 39 126 2 6 9 13 44 73 76 56 77 79 78 16 36 53 29 46 84 50 72 74 75 71 54 59 60 61 64 62 63 65 66 67 68 69 83 89 80 81 82 70 85 130 86 87 94 88 96 95 90 93 99 100 152 150 149 151 114 115 132 142 18 40 116 133 136 140 127 55 91 92 111 112 98 102 103 104 105 106 119 118 120 160 162 123 122 121 164 165 166 109 108 117 163 107 110 157 113 161 131 97 167 168 169 171 172 173 158 159 174 175 179 176 177 178 182 181 180 183 101 153 154 38 125 141 144 145 146 148 147	1 1 2 2 2 2 2 1 2 2 1 1 1 2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 3 3 4 3 3 3 3 3 3 3 3 5 5 5 4 4 4 4 4 4 5 6 5 6 6 6 6 6 6 5 6 6 5 5 5 6 6 6 5 8 7 7 8 8 8 8 8 7 7 8 8 8 8 8 8 8 7 8 9 10 10 10 10 10 10 10 9 9 10 9 9 9 10 10 10 10 9 11 10 12 11 11 11 11 12 12 12 12 12 12 12 11 11 13 14 13 14 13 13 14 14 14 13 13 13 14 15 16 16 15 16 16 15 16 15 15 18 18 17 18 17 20 20 19 20 19 19 20 20 19 20 19 20 20 20 20 19 20 20 19 20

ตาราง ข.13 ผลลัพธ์ของลำดับขั้นงาน และการจัดสรรงานลงสถานีงาน ในปัญหา 183 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 22 (ต่อ)

วิธีการหาค่าเหมาะสม	ลำดับขั้นงาน	สถานีงาน
BBO	22 23 34 33 170 4 8 31 48 35 27 2 25 52 156 11 32 26 51 155 24 20 42 135 138 129 143 1 5 17 12 15 37 124 28 45 39 126 6 16 13 9 29 55 46 18 40 38 125 3 7 19 30 50 74 75 71 72 54 49 58 57 59 60 61 63 64 62 65 66 47 67 68 69 83 89 80 81 82 70 41 128 134 137 139 36 53 99 114 115 132 116 142 133 140 127 141 144 145 146 100 151 136 149 147 150 152 101 154 153 10 21 43 44 73 76 14 56 78 85 130 79 77 84 148 86 87 94 91 88 96 95 90 97 93 92 111 112 98 102 103 118 104 105 131 106 108 117 107 110 113 119 120 157 158 160 121 164 162 161 123 122 165 166 163 109 167 168 169 171 172 173 174 175 179 176 177 178 180 181 182 183 159	1 2 2 1 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 5 5 6 6 5 6 5 6 6 6 5 6 6 5 6 5 6 5 5 5 8 7 7 7 7 7 7 8 8 8 7 7 8 8 7 7 8 7 8 9 8 10 10 10 10 9 9 9 9 10 10 10 10 10 9 9 10 9 10 10 11 10 12 12 12 12 11 11 11 11 12 12 11 11 12 11 12 12 12 12 13 13 13 12 12 14 14 14 14 14 13 13 14 14 16 16 13 15 15 15 16 15 15 16 17 16 16 16 18 18 18 17 17 17 17 18 18 19 20 20 19 20 19 20 20 19 19 20
	27 3 7 19 41 128 1 35 170 24 10 134 137 139 34 33 32 25 52 156 23 22 26 51 155 14 11 21 30 47 5 12 43 28 17 45 39 126 15 37 124 4 8 31 48 49 58 20 42 129 135 143 138 57 2 6 9 29 55 50 72 54 74 75 59 60 61 63 64 62 65 71 46 18 40 13 56 78 79 84 77 44 73 76 66 67 68 69 80 70 81 82 83 85 130 89 86 87 94 91 98 90 93 92 111 88 102 103 118 97 96 95 112 104 105 106 109 108 117 163 119 120 123 121 122 107 110 113 131 16 38 125 36 53 99 157 158 159 101 153 114 115 132 116 133 136 100 151 150 152 141 160 162 161 149 140 127 142 148 144 145 146 147 164 165 166 167 168 169 171 172 173 174 175 179 176 177 180 181 178 182 183 154	1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 2 1 1 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 3 3 4 4 4 4 4 3 4 3 6 5 6 6 6 5 6 6 5 5 6 6 6 6 5 6 5 5 5 6 6 7 8 8 8 8 8 7 8 8 7 8 8 7 8 8 7 7 8 8 7 9 9 8 10 10 10 10 9 10 9 10 10 9 12 11 11 11 12 11 12 11 12 12 14 14 14 14 14 14 11 11 11 11 13 14 13 13 13 13 13 14 14 13 14 13 14 16 16 13 16 15 15 15 16 15 15 16 16 16 16 15 18 17 17 17 17 17 18 18 17 20 20 19 20 20 20 19 19 19 20
BBO-LS	11 10 24 35 26 1 3 7 14 5 12 21 51 32 43 4 33 170 28 45 27 25 52 156 155 2 22 34 19 17 39 126 15 37 124 8 31 20 42 129 48 135 138 143 6 13 56 78 77 79 44 18 40 36 53 99 114 115 132 116 133 140 127 101 154 153 100 151 149 152 150 136 9 29 46 55 84 23 41 134 128 142 137 139 30 49 58 57 47 50 54 59 71 72 60 61 63 64 65 66 74 75 62 67 68 69 83 89 85 130 80 81 82 70 86 90 87 93 91 92 111 112 88 96 97 95 98 102 103 104 118 105 106 107 119 120 123 122 121 164 165 131 160 161 166 167 168 169 162 171 172 94 157 158 159 173 174 175 179 176 177 180 178 182 181 183 109 108 110 113 117 163 73 76 16 38 125 141 148 144 145 146 147	2 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 2 1 2 1 2 1 2 1 1 2 2 2 2 1 2 1 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 4 4 4 3 4 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 4 4 5 6 6 6 5 6 5 5 6 6 5 6 6 6 5 7 6 7 7 7 7 8 8 7 7 8 7 7 8 7 7 7 8 8 8 7 8 8 7 8 9 8 10 10 10 9 10 10 10 9 9 9 9 10 10 10 12 13 13 13 13 12 13 12 12 12 12 12 12 12 12 14 14 13 13 14 14 13 13 14 14 13 13 15 15 16 15 16 15 16 15 15 15 18 18 17 18 18 17 18 18 17 19 20 19 20 19 19 20 19 19 20 19 20 20 20 20 19 20 20 20 20

ภาคผนวก ค
ผลวิเคราะห์การทดลอง

ภาคผนวก ค

ผลวิเคราะห์การทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่าเหมาะสมของพารามิเตอร์ โดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์แบบปรับตัวได้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB R2009a คอมพิวเตอร์ Intel(R) Corei5-2520M CPU@2.50GHz. Ram4 GB Window7 มีรายละเอียดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และตัวชี้วัดสมรรถนะดังนี้

1. วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (NSGAII)

ตาราง ค.1 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี NSGAII

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	p_c	p_m	Convergence		Spread		Ratio	
				rep1	rep2	rep1	rep2	rep1	rep2
1	12	0.6	0.1	0	0	0.6667	0.6667	1	1
2	12	0.6	0.2	0	0	0.6667	0.6667	1	1
3	12	0.6	0.3	0	0	0.6667	0.6667	1	1
4	12	0.6	0.4	0	0	0.6667	0.6667	1	1
5	12	0.7	0.1	0	0	0.6667	0.6667	1	1
6	12	0.7	0.2	0	0	0.6667	0.6667	1	1
7	12	0.7	0.3	0	0	0.6667	0.6667	1	1
8	12	0.7	0.4	0	0	0.6667	0.6667	1	1
9	12	0.8	0.1	0	0	0.6667	0.6667	1	1
10	12	0.8	0.2	0	0	0.6667	0.6667	1	1
11	12	0.8	0.3	0	0	0.6667	0.6667	1	1
12	12	0.8	0.4	0	0	0.6667	0.6667	1	1
13	12	0.9	0.1	0	0	0.6667	0.6667	1	1
14	12	0.9	0.2	0	0	0.6667	0.6667	1	1
15	12	0.9	0.3	0	0	0.6667	0.6667	1	1
16	12	0.9	0.4	0	0	0.6667	0.6667	1	1
17	65	0.6	0.1	0.5121	0.2618	0.5966	0.6993	0	0
18	65	0.6	0.2	0.2618	0.5121	0.6993	0.5966	0	0
19	65	0.6	0.3	0.3077	0.3164	0.6260	0.5874	0	0
20	65	0.6	0.4	0.3164	0.3077	0.5874	0.6260	0	0

ตาราง ค.1 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี NSGAII (ต่อ)

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	p_c	p_m	Convergence		Spread		Ratio	
				rep1	rep2	rep1	rep2	rep1	rep2
21	65	0.7	0.1	0.2273	0.2439	0.5501	0.7505	0.25	0
22	65	0.7	0.2	0.2439	0.2273	0.7505	0.5501	0	0.25
23	65	0.7	0.3	0.3079	0.5819	0.6140	0.6667	0	0
24	65	0.7	0.4	0.5819	0.3079	0.6667	0.6140	0	0
25	65	0.8	0.1	0.5276	0.5902	0.5895	0.4922	0	0
26	65	0.8	0.2	0.2639	0.5221	0.7447	0.5029	0	0
27	65	0.8	0.3	0.6589	0.5022	0.6875	0.4595	0	0
28	65	0.8	0.4	0.5288	0.4805	0.6517	0.5345	0	0
29	65	0.9	0.1	0.2171	0.2733	0.5931	0.5672	0	0
30	65	0.9	0.2	0.1263	0.1163	0.6886	0.6926	0.25	0.25
31	65	0.9	0.3	0.4967	0.3853	0.6092	0.4096	0	0
32	65	0.9	0.4	0.1688	0.2498	0.7274	0.6667	0.5	0.5
33	148	0.6	0.1	1.0110	1.0868	0.4864	0.5735	0	0
34	148	0.6	0.2	1.0428	1.0428	0.6920	0.5560	0	0
35	148	0.6	0.3	0.9981	0.9957	0.5041	0.6150	0	0
36	148	0.6	0.4	0.9981	0.9957	0.5041	0.6150	0	0
37	148	0.7	0.1	1.0023	1.0023	0.8038	0.7527	0	0
38	148	0.7	0.2	1.0048	0.9883	0.6590	0.6756	0	0
39	148	0.7	0.3	1.0023	1.0023	0.8038	0.7527	0	0
40	148	0.7	0.4	1.0345	1.0345	0.6169	0.5815	0	0
41	148	0.8	0.1	0.9932	0.9932	0.5103	0.5104	0	0
42	148	0.8	0.2	1.0266	1.0305	0.6923	0.6667	0	0
43	148	0.8	0.3	1.1776	1.0428	0.6046	0.7031	0	0
44	148	0.8	0.4	1.0037	0.9852	0.6154	0.7045	0	0
45	148	0.9	0.1	0.0000	0.9951	N/A	0.4775	1	0
46	148	0.9	0.2	1.4142	0.9988	N/A	0.5599	0	0
47	148	0.9	0.3	1.4142	0.9903	N/A	0.6259	0	0
48	148	0.9	0.4	1.4142	0.9940	N/A	0.4708	0	0
49	205	0.6	0.1	0.3362	0.4863	0.4520	0.5794	0	0
50	205	0.6	0.2	0.7881	0.7782	0.5753	0.6697	0	0
51	205	0.6	0.3	0.6766	0.8925	0.6305	N/A	0	0
52	205	0.6	0.4	0.8925	0.7223	N/A	0.5612	0	0
53	205	0.7	0.1	0.2138	0.2139	0.6381	0.6378	0	0
54	205	0.7	0.2	0.3498	0.3504	0.3624	0.5748	0.2	0
55	205	0.7	0.3	0.4467	0.4723	0.6069	0.5674	0	0
56	205	0.7	0.4	0.3094	0.3095	0.6412	0.6383	0.6	0.4
57	205	0.8	0.1	0.3362	0.3237	0.4520	0.5080	0	0

ตาราง ค.1 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี NSGAII (ต่อ)

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	p_c	p_m	Convergence		Spread		Ratio	
				rep1	rep2	rep1	rep2	rep1	rep2
58	205	0.8	0.2	0.3403	0.3648	0.4928	0.6222	0	0
59	205	0.8	0.3	0.4245	0.6783	0.6762	0.5987	0	0
60	205	0.8	0.4	0.2347	0.4016	0.5071	0.5075	0.2	0
61	205	0.9	0.1	0.2984	0.2984	0.4900	0.4504	0	0
62	205	0.9	0.2	0.1933	0.3596	0.8111	0.6283	0	0
63	205	0.9	0.3	0.4890	0.5410	0.4829	0.6282	0	0
64	205	0.9	0.4	0.6992	0.6992	0.6456	0.5629	0	0
65	183	0.6	0.1	1.3187	1.0571	N/A	0.5032	0	0
66	183	0.6	0.2	1.1871	0.9967	N/A	0.6667	0	0
67	183	0.6	0.3	1.3022	1.2463	N/A	N/A	0	0
68	183	0.6	0.4	1.2492	1.2492	N/A	N/A	0	0
69	183	0.7	0.1	1.3315	1.2492	N/A	N/A	0	0
70	183	0.7	0.2	1.2305	1.3260	0.6667	N/A	0	0
71	183	0.7	0.3	1.2634	1.3334	0.6667	N/A	0	0
72	183	0.7	0.4	1.2136	1.2233	N/A	N/A	0	0
73	183	0.8	0.1	0.3374	1.0450	0.6667	N/A	0.3333	0
74	183	0.8	0.2	0.3995	0.6613	0.6667	N/A	0.3333	0.3333
75	183	0.8	0.3	1.1664	1.0391	N/A	0.6667	0	0
76	183	0.8	0.4	1.1528	1.0046	N/A	0.6084	0	0
77	183	0.9	0.1	0.7878	1.0241	N/A	0.5383	0.3333	0
78	183	0.9	0.2	1.1312	1.3022	N/A	N/A	0	0
79	183	0.9	0.3	1.2757	1.0615	N/A	0.6667	0	0
80	183	0.9	0.4	1.3802	1.0615	N/A	0.6667	0	0

2. วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (DPSO)

ตาราง ค.2 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี DPSO

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	จำนวนฝูง / อนุภาค	Convergence		Spread		Ratio	
			rep 1	rep 2	rep 1	rep 2	rep 1	rep 2
1	12	4/25	0	0	0.6667	0.6667	1	1
2	12	5/20	0	0	0.6667	0.6667	1	1
3	12	10/10	0	0	0.6667	0.6667	1	1
4	65	4/25	0.3261	0.1013	0.6667	0.7816	0	0.5
5	65	5/20	0.2487	0.1004	0.5895	0.6875	0	0
6	65	10/10	0.3110	0.1921	0.7447	0.6517	0.1667	0.3333
7	148	4/25	0.1682	0.2256	0.5103	0.6923	0.1429	0.2857

ตาราง ค.2 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี DPSO (ต่อ)

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	จำนวนฝูง / อนุภาค	Convergence		Spread		Ratio	
			rep 1	rep 2	rep 1	rep 2	rep 1	rep 2
8	148	5/20	0.1943	0.1994	0.4864	0.6920	0.2857	0.2857
9	148	10/10	0.2343	0.2343	0.5041	0.5041	0	0
10	205	4/25	0.1591	0.3087	0.4829	0.6456	0.25	0.25
11	205	5/20	0.1799	0.2757	0.5794	0.5753	0	0.25
12	205	10/10	0.4911	0.4911	N/A	N/A	0.25	0.25
13	183	4/25	0.7071	0.9158	N/A	N/A	0.5	0
14	183	5/20	1.1675	1.0497	N/A	N/A	0	0
15	183	10/10	0.7071	1.1124	N/A	N/A	0.5	0

3. วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยอาศัยความรู้เชิงลบ (PSONK)

ตาราง ค.3 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี PSONK

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	จำนวนฝูง / อนุภาค	Convergence		Spread		Ratio	
			rep 1	rep 2	rep 1	rep 2	rep 1	rep 2
1	12	4/25	0	0	0.6667	0.6667	1	1
2	12	5/20	0	0	0.6667	0.6667	1	1
3	12	10/10	0	0	0.6667	0.6667	1	1
4	65	4/25	0.2206	0.1650	0.5931	0.6886	0	0.25
5	65	5/20	0.5164	0.2408	0.6092	0.7274	0	0.5
6	65	10/10	0.2127	0.2062	0.6201	0.6080	0.25	0
7	148	4/25	1.1776	1.0037	0.6046	0.6154	0	0
8	148	5/20	0	1.4142	N/A	N/A	1	0
9	148	10/10	1.4142	1.4142	N/A	N/A	0	0
10	205	4/25	0.1490	0.1478	0.5080	0.4928	0.125	0.125
11	205	5/20	0.1155	0.0975	0.4900	0.8111	0.25	0.125
12	205	10/10	0.2379	0.0966	0.6762	0.5071	0	0.375
13	183	4/25	1.1664	1.1528	N/A	N/A	0	0
14	183	5/20	0.7878	1.1312	N/A	N/A	0.3333	0
15	183	10/10	0.3374	0.3995	0.6667	0.6667	0.3333	0.3333

4. **วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์** (BBO)

ตาราง ค.4 ผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี BBO

ลำดับผลการทดลอง	ขนาดปัญหา	รูปแบบการอพยพ	Convergence		Spread		Ratio	
			rep 1	rep 2	rep 1	rep 2	rep 1	rep 2
1	12	Linear	0	0	0.6667	0.6667	1	1
2	12	Sinusoidal	0	0	0.6667	0.6667	1	1
3	65	Linear	0.3566	0.5945	0.5261	0.5796	0	0
4	65	Sinusoidal	0	0.4233	0.6561	0.6355	1	0
5	148	Linear	0.0691	0.0927	0.8038	0.6169	0.250	0.25
6	148	Sinusoidal	0.0691	0.0313	0.8038	0.6590	0.250	0.5
7	205	Linear	0.2450	0.6055	0.6381	0.3624	0	0.25
8	205	Sinusoidal	0.5686	0.2311	0.6069	0.6412	0	0.75
9	183	Linear	0.6818	0.2762	N/A	0.6667	0	0.6667
10	183	Sinusoidal	1.0855	0.7476	0.6667	N/A	0	0.3333

ภาคผนวก ง
ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ

ในภาคผนวกนี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) และอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่ที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) โดยเป้าหมายของตัวชี้วัดสมรรถนะ คือ กลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal) มีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือกลุ่มคำตอบที่ได้มีการกระจายสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ ง.1 ตัวอย่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและกลุ่มคำตอบที่ได้

กลุ่มคำตอบ	$f_1(x)$	$f_2(x)$
กลุ่มคำตอบเริ่มต้น (Obtained Pareto)	3.8788	0.1668
	3.8824	0.0144
	3.8857	0.0048
	3.8889	0.0025
	3.8919	0.0014
	3.8947	0.0007
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal)	3.8788	0.0104
	3.8857	0.0024
	3.8919	0.0013
	3.8947	0.0007

1. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดหรือกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) (Kumar and Singh, 2007) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่ม

คำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง และถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพสูง (นพพล คำพิรมย์, 2551) โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการ

$$Convergence = \frac{\sum_{i=1}^{|A^*|} d_i}{|A^*|} \quad \text{(ง.1)}$$

เมื่อ $d_i = \min_{j=1}^{|A^*|} \sqrt{\sum_{k=1}^{2} \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2}$ (ง.2)

โดยที่ $|A^*|$ คือ จำนวนคำตอบที่แท้จริง

d_i คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y

$f_k^{\max}$ และ $f_k^{\min}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

$f_k(x)$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่หาได้

$f_k(y)$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่แท้จริง

ขั้นตอนการคำนวณการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีดังนี้

1) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงรวมกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มคำตอบได้ จากนั้นหาค่าที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 จากตัวอย่างในตาราง ง.1 จะได้ $f_1^{max} = 3.8947, f_1^{min} = 3.8788, f_2^{max} = 0.1668$ และ $f_2^{min} = 0.0007$ จากนั้นคำนวณระยะทางของแต่ละคำตอบโดยใช้สมการที่ (ง.2) จะได้ผลดังตารางที่ ง.2 – ง.4

2) หาค่าเฉลี่ยระยะทางการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่น้อยที่สุดของแต่ละคำตอบด้วยจำนวนของสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ได้ดังตารางที่ ง.4

ตารางที่ ง.2 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบเริ่มต้นกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1

true-Pareto	Obtained Pareto					
	3.8788	3.8824	3.8857	3.8889	3.8919	3.8947
3.8788	0	0.05	0.1886	0.4011	0.6751	1
3.8857	0.1886	0.0444	0	0.0396	0.15	0.3201
3.8919	0.6751	0.3577	0.15	0.0355	0	0.0318
3.8947	1	0.6029	0.3201	0.1344	0.0318	0

ตัวอย่างการคำนวณระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่หาได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เช่น คำตอบที่หาได้เท่ากับ 3.8857 และคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงเท่ากับ 3.8788 จะได้ระยะทางเท่ากับ $\left(\frac{3.8788-3.8788}{3.8947-3.8788}\right)^2 = 0$

ตารางที่ ง.3 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบเริ่มต้นกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

true-Pareto	Obtained Pareto					
	0.1668	0.0144	0.0048	0.0025	0.0014	0.0007
0.0104	0.8866	0.0006	0.0011	0.0023	0.0029	0.0034
0.0024	0.9793	0.0052	0.0002	0	0	0.0001
0.0013	0.9931	0.0063	0.0004	0	0	0
0.0007	1	0.0068	0.0006	0.0001	0	0

ตัวอย่างการคำนวณระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่หาได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 4 เช่น คำตอบที่หาได้เท่ากับ 0.1668 และคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงเท่ากับ 0.0104 จะได้ระยะทางเท่ากับ $\left(\frac{0.1668-0.0104}{0.1668-0.0007}\right)^2 = 0.8866$

ตารางที่ ง.4 ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบจากการรวมกันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 2

true-Pareto	Obtained Pareto						Minimum Distance
	1	2	3	4	5	6	
1	0.9416	0.2248	0.4356	0.6351	0.8234	1.0017	0.2248
2	1.0807	0.2227	0.0141	0.1991	0.3874	0.5658	0.0141
3	1.2916	0.6033	0.3879	0.1884	0.0008	0.1784	0.0008
4	1.4142	0.7808	0.5663	0.3668	0.1784	0	0
Total Minimum Distance							0.2398
Average Minimum Distance							0.0599

ตัวอย่างการคำนวณระยะทางระหว่างคำตอบจากการรวมกันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 2 เช่น ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ตัวที่ 1 กับคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ $\sqrt{(0+0.8866)} = 0.9416$ และจากการเปรียบเทียบระยะทางโดยหาระยะทางที่น้อยที่สุด และทำการหาค่าเฉลี่ยการลู่เข้า จะได้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเท่ากับ 0.0599

2. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

การวัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน (Li and Zheng, 2009) ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ และถือว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพสูง โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการ

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \qquad (ง.3)$$

เมื่อ $$d_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{2} \left(\frac{f_k(x_i) - f_k(x_{i+1})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \qquad (ง.4)$$

โดยที่ d_f และ d_l คือ ระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน (Extreme solution) ของเส้นของเขตของกลุ่มคำตอบที่หาได้

$\bar{d}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i คือ ระยะห่างของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในเซตคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อ $i = 1,2,\ldots,|A|-1$

$|A|$ คือ จำนวนคำตอบที่หาได้

ขั้นตอนการคำนวณการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้มีดังนี้

1) คำนวณระยะทางของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน (d_i)

2) หาค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน $(\bar{d})$ ที่อยู่ติดกันทั้งหมด $N-1$ ตัว

3) คำนวณหาผลต่างระหว่าง d_i กับ $\bar{d}$ และหาผลรวมของผลต่างที่ได้

4) ใช้สมการที่ (ง.3) คำนวณหาระยะห่างระหว่างสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

ตารางที่ ง.5 การหาระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

No.	Obtained Pareto		Normalized		Euclidean Distance	
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$		
1	3.8788	0.1668	0.05	0.8418	$d_1 = d_f$	0.9443
2	3.8824	0.0144	0.0444	0.0034	d_2	0.2186
3	3.8857	0.0048	0.0396	0.0002	d_3	0.1996
4	3.8889	0.0025	0.0355	0	d_4	0.1884
5	3.8919	0.0014	0.0318	0	$d_5 = d_l$	0.1784
6	3.8947	0.0007	$\bar{d}$			0.3459

ตัวอย่างการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่เนื่องกัน จากสมการ ง.4 การหาระยะทางระหว่างจุดที่ 1 และ 2 โดยที่ $f_1^{max} = 3.8947,\ f_1^{min} = 3.8788,\ f_2^{max} = 0.1668$ และ $f_2^{min} = 0.0007$ จะได้ระยะทางระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่1เท่ากับ$\left(\frac{3.8788-3.8824}{3.8947-3.8788}\right)^2 = 0.05$ ระยะทางระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 เท่ากับ $\left(\frac{0.1668-0.0144}{0.1668-0.0007}\right)^2 = 0.8418$ และคำนวณระยะทางระหว่างคำตอบได้เท่ากับ $\sqrt{(0.0513 + 0.8418} = 0.9443$

ตารางที่ ง.6 ผลต่างระหว่างระยะทางของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันและค่าเฉลี่ยของระยะทาง

No.	d_i	$d_i - \bar{d}$	$\left\|d_i - \bar{d}\right\|$
1	0.9443	0.5985	0.5985
2	0.2186	-0.1273	0.1273
3	0.1996	-0.1463	0.1463
4	0.1884	-0.1575	0.1575
5	0.1784	-0.1674	0.1674
6	$\sum_{i=1}^{N-1}\left\|d_i - \bar{d}\right\|$		1.1969

จากสมการที่ (ง.3) จะได้การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้เท่ากับ $Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1}|d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} = \frac{0.9943 + 0.1784 + 1.1969}{0.9943 + 0.1784 + (6-1)(0.3459)} = 0.8133$

3. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่ได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่ที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) เป็นการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบที่ได้ว่าอยู่บนเส้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) เป็นอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (Gen and Lin, 2005) ถ้ากลุ่มคำตอบที่หาได้เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่แท้จริงค่าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้จะมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพสูง โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการ

$$Ratio = \frac{\left|S_j - \left\{x \in S_j \mid \exists_y S : y \prec x\right\}\right|}{\left|S_j\right|} \qquad \text{(ง.5)}$$

โดยที่ S_j คือ เซตคำตอบที่ j เมื่อ $j = 1,2,\ldots,J$

S คือ การร่วมกันของ j เซตคำตอบ ซึ่ง $S = S_1 \cup S_2 .. \cup S_J$

x คือ เซตคำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y \prec x$ คือ คำตอบ x เด่นกว่าคำตอบ y

ขั้นตอนการคำนวณอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีดังนี้

1) สร้างเมตริกซ์ขนาด $n \times m$ เมื่อ n คือจำนวนกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง และ m คือจำนวนกลุ่มคำตอบที่ได้

2) ทำการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบที่หาได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ในตำแหน่ง (x) และ (y) ตามลำดับ ด้วยหลักการ Pareto Dominance ดังนี้

- ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ค่าเปรียบเทียบระหว่าง x และ y จะมีค่าเท่ากับ 1
- ถ้าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 2 ของกลุ่มคำตอบที่หาได้ไม่เท่ากับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง ค่าเปรียบเทียบระหว่าง x และ y จะมีค่าเท่ากับ 0

3) หาผลรวมในแต่ละแถว ค่าที่ได้นี้คือจำนวนคำตอบที่อยู่บนเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด จากนั้นหาผลรวมของค่าจำนวนคำตอบที่อยู่บนเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดและหารด้วยจำนวนกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง จะได้ค่าอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงดังตารางที่ ง.7

ตารางงที่ ง.7 การเปรียบเทียบจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง

No.	True-Pareto	Obtained Pareto						Value
		1	2	3	4	5	6	
		3.8788	3.8824	3.8857	3.8889	3.8919	3.8947	
		0.1668	0.0144	0.0048	0.0025	0.0014	0.0007	
1	3.8788 0.0104	0	0	0	0	0	0	0
2	3.8857 0.0024	0	0	0	0	0	0	0
3	3.8919 0.0013	0	0	0	0	0	0	0
4	3.8947 0.0007	0	0	0	0	0	1	1
Total Value								1
Ratio of Solution								0.25

ภาคผนวก จ
การทดสอบโปรแกรม MATLAB

ภาคผนวก จ

การทดสอบโปรแกรม MATLAB

การใช้โปรแกรมในการทดลองจำเป็นจะต้องมีการตรวจเช็คโปรแกรมให้มีความถูกต้อง เพื่อผลการทดสอบที่ได้จะได้มีความน่าเชื่อถือ ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อหาผลการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนในการตรวจสอบโปรแกรม ดังนี้

1. ทำการเขียนตัวอย่างและคำนวณค่าต่างๆ ตามขั้นตอนการทำงานของแต่ละอัลกอริทึม โดยใช้ปัญหาตัวอย่างขนาดเล็กในการแสดงตัวอย่าง

2. เขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อให้แสดงผลของอัลกอริทึมต่างๆ ตามขั้นตอนที่กำหนด

3. ทำการตรวจเช็คความถูกต้องของโปรแกรมว่าผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมเป็นไปตามขั้นตอนที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (Input) ลงในโปรแกรมจากนั้นทำการทดสอบการดำเนินการของโปรแกรม หากผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมไม่เป็นไปตามขั้นตอนที่เรากำหนดไว้ ก็จะทำการแก้ไขและตรวจเช็คจนกว่าโปรแกรมที่ได้จะมีความถูกต้อง

4. ถ้าการทดสอบโปรแกรมในขั้นแรกมีความถูกต้องแล้วจะทำการทดสอบโปรแกรมซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง เพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมว่าสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องหรือไม่เมื่อบางปัจจัยเปลี่ยนไป

5. เมื่อโปรแกรมแสดงผลได้อย่างถูกต้องในปัญหาขนาดเล็กแล้วจะนำโปรแกรมไปทดลองกับปัญหาขนาดใหญ่ และทดสอบโปรแกรมว่าสามารถทำงานได้ในทุกกรณีหรือไม่ หากมีบางกรณีที่โปรแกรมไม่สามารถแสดงผลได้ก็จะกลับไปแก้ไขโปรแกรมอีกครั้งเพื่อให้โปรแกรมสามารถใช้ได้ทุกปัญหา

ตัวอย่างการแสดงผลการดำเนินการของโปรแกรมเมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี BBO ในปัญหาขนาด 12 ขั้นงาน ที่รอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ได้ดังผลด้านล่าง ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบว่ามีความถูกต้องตามขั้นตอนของตัวอย่างที่เราคำนวณไว้หรือไม่

```
gen_round =          จำนวนเจนเนอเรชัน

   2

cycle_time =         รอบเวลาการทำงาน

   7
```

n_task = *จำนวนขั้นงาน*

12

gen_idx = *เจนเนอเรชันที่ 1*

1

priority = *สตริงคำตอบค่าสิทธิในการเลือกงานเท่ากับประชากรเริ่มต้น 5 ตัว*

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

task_seq = *แปลงค่าจากสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานไปเป็นลำดับขั้นงาน*

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

p_station = *สถานีงานที่ทำการจัดสรร*

1	1	2	2	2	1	2	3	3	4	4	4
2	2	2	1	1	1	1	2	3	3	4	5
1	1	2	1	2	2	2	1	1	4	3	3
1	1	2	1	2	2	3	2	2	2	4	4
1	1	1	1	2	2	2	3	2	2	4	4

obj = *ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์*

2.0000	4.0000	3.3333	0.0332
3.0000	5.0000	4.1667	0.0209
2.0000	4.0000	3.3333	0.1786
2.0000	4.0000	3.3333	0.1076
2.0000	4.0000	3.4286	0.0468

crowding_distance = *การหาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงและค่า Crowding Distance*

1.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.0332	1.0000	Inf
3.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.1786	3.0000	Inf
4.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.1076	2.0000	Inf
5.0000	2.0000	4.0000	3.4286	0.0468	2.0000	Inf

migration = *คำนวณค่าสปีชี่ส์เคาท์ อัตราการอพยพ และค่าความน่าจะเป็นในการอพยพ*

```
% migration = [no, str, species_count, immigration, emmirgraion, Pim,
Pem, Pk]
```

1.0000	1.0000	3.0000	0.2500	0.7500	0.1667	0.5000	0.2500
1.0000	4.0000	2.0000	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.3750
2.0000	5.0000	2.0000	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.3750
1.0000	3.0000	1.0000	0.7500	0.2500	0.5000	0.1667	0.2500

ทำการอพยพสตริงคำตอบ โดยเริ่มจากสปีชี่ส์เคาท์สูงสุด และทำการพิจารณาการอพยพในแต่ละบิทของทุกสตริงคำตอบ

p_species_count = *ค่าสปีชี่ส์เคาท์*

3

rand_str = *สตริงคำตอบในสปีชี่ส์เคาท์*

1

r_adjust =1 *ค่า random ที่สุ่มได้เพื่อตัดสินใจว่าจะทำการอพยพหรือไม่ (ในตำแหน่งบิทที่ 1)*

0.9149

Pim = *ค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ในการตัดสินใจว่าจะทำการอพยพหรือไม่*

0.1667

r_adjust =2

0.4566

Pim =

0.1667

r_adjust =3

0.9047

Pim =

0.1667

r_adjust =4

0.2919

Pim =

0.1667

r_adjust =5

0.7822

Pim =

0.1667

---

r_adjust =6 *ค่า random ที่สุ่มได้เพื่อตัดสินใจว่าจะทำการอพยพหรือไม่ (ในตำแหน่งบิทที่ 6)*

0.0559

Pim = *ค่าความน่าจะเป็นที่ใช้ในการตัดสินใจว่าจะทำการอพยพหรือไม่*

0.1667

r_species = *(เนื่องจากค่า random สุ่มได้มีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก ดังนั้นจะทำการสุ่มค่า r ขึ้นมาเพื่อเลือกสปีชี่ส์เคาท์ที่จำทำการอพยพเข้า)*

0.2130

species_count = *สปีชี่ส์เคาท์ที่จะทำการอพยพเข้า*

3

cross_str = *สตริงคำตอบที่จะทำการอพยพเข้า*

1

---

r_adjust =7

0.7765

Pim =

0.1667

r_adjust =8

0.6968

Pim =

0.1667

r_adjust =9

0.9079

```
Pim =

    0.1667

r_adjust =10

    0.6089

Pim =

    0.1667

r_adjust =11

    0.5446

Pim =

    0.1667

r_adjust =12

    0.7531

Pim =

    0.1667

-----------------------------------------------------------------------------------------------------
p_species_count =

     2


rand_str =

     4
     5


r_adjust =1

    0.8558

Pim =

    0.3333

r_adjust =2

    0.6832

Pim =

    0.3333

r_adjust =3
```

```
    0.4076

Pim =

    0.3333

r_adjust =4

    0.0479

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.2384

species_count =

     3

cross_str =

     1

r_adjust =5

    0.0140

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.3817

species_count =

     3

cross_str =

     1

r_adjust =6

    0.9071

Pim =

    0.3333
```

r_adjust =7

0.3036

Pim =

0.3333

r_species =

0.8673

species_count =

1

cross_str =

3

r_adjust =8

0.1472

Pim =

0.3333

r_species =

0.3099

species_count =

3

cross_str =

1

r_adjust =9

0.4182

Pim =

0.3333

r_adjust =10

0.2102

```
Pim =

   0.3333

r_species =

   0.7675

species_count =

    2

cross_str =

    4

r_adjust =11

   0.2975

Pim =

   0.3333

r_species =

   0.1907

species_count =

    3

cross_str =

    1

r_adjust =12

   0.7241

Pim =

   0.3333

r_adjust =1

   0.9568

Pim =

   0.3333

r_adjust =2
```

```
    0.9015

Pim =

    0.3333

r_adjust =3

    0.7006

Pim =

    0.3333

r_adjust =4

    0.8135

Pim =

    0.3333

r_adjust =5

    0.8664

Pim =

    0.3333

r_adjust =6

    0.8882

Pim =

    0.3333

r_adjust =7

    0.2305

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.6265

species_count =

     2
```

```
cross_str =

     4

r_adjust =8

    0.7828

Pim =

    0.3333

r_adjust =9

    0.7158

Pim =

    0.3333

r_adjust =10

    0.2446

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.7378

species_count =

     2

cross_str =

     5

r_adjust =11

    0.9715

Pim =

    0.3333

r_adjust =12

    0.1429

Pim =
```

```
    0.3333

r_species =

    0.8569

species_count =

     1

cross_str =

     3

----------------------------------------------------------------------------------------------
p_species_count =

     1

rand_str =

     3

r_adjust =1

    0.7621

Pim =

    0.5000

r_adjust =2

    0.7603

Pim =

    0.5000

r_adjust =3

    0.4594

Pim =

    0.5000

r_species =

    0.3841

species_count =

     3
```

```
cross_str =

    1

r_adjust =4

    0.1074

Pim =

    0.5000

r_species =

    0.4555

species_count =

    3

cross_str =

    1

r_adjust =5

    0.1472

Pim =

    0.5000

r_species =

    0.2936

species_count =

    3

cross_str =

    1

r_adjust =6

    0.3804

Pim =

    0.5000
```

```
r_species =

   0.9245

species_count =

    1

cross_str =

    3

r_adjust =7

   0.1935

Pim =

   0.5000

r_species =

   0.6551

species_count =

    2

cross_str =

    5

r_adjust =8

   0.0317

Pim =

   0.5000

r_species =

   0.8018

species_count =

    2

cross_str =

    4

r_adjust =9
```

0.5906

Pim =

0.5000

r_adjust =10

0.2964

Pim =

0.5000

r_species =

0.8155

species_count =

2

cross_str =

5

r_adjust =11

0.8152

Pim =

0.5000

r_adjust =12

0.5551

Pim =

0.5000

pop = *สตริงคำตอบก่อนการอพยพ*

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

pop_z = *สตริงคำตอบหลังจากผ่านการอพยพ*

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

```
   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
   7   2   5   4   9   6   8   1   3  10  11  12
  11   2   9   6   8   7   1   3   5  10   4  12
   7   3  11   4   5   6   8   1   9  10   2  12
```

priority_z =

```
   7   2   5   6   8   1  11   3   9  10   4  12
   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
   7   2   5   4   9   6   8   1   3  10  11  12
  11   2   9   6   8   7   1   3   5  10   4  12
   7   3  11   4   5   6   8   1   9  10   2  12
```

กระบวนการมิวเตชัน

r_mutated =

```
   0.8146
```

species_count =

```
   1
```

str_arr =

```
   3
```

number_of_mutation =

```
   1
```

a1 =

```
   1
```

a2 =

```
  11
```

p_r_mutate =

```
   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0   1   0
```

new_bit_pos =

```
   2
```

---

task_seq_prioz =

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

p_station_prioz =

```
   1   1   2   2   2   1   2   4   1   3   3   4
   2   2   1   1   1   1   3   2   2   2   4   3
   1   2   1   1   2   2   2   1   4   4   3   3
   1   1   1   1   2   2   2   4   3   4   4   5
```

obj_prioz =

```
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0257
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0630
   2.0000   4.0000   3.5556   0.1317
   3.0000   5.0000   4.5000   0.0297
```

นำสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพและการมิวเตชันมารวมกัน

combine_pop =

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

combine_seq =

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

combine_station =

```
   1   1   2   2   2   1   2   3   3   4   4   4
   2   2   2   1   1   1   1   2   3   3   4   5
   1   1   2   1   2   2   2   1   1   4   3   3
   1   1   2   1   2   2   3   2   2   2   4   4
   1   1   1   1   2   2   2   3   2   2   4   4
   1   1   2   2   2   1   2   4   1   3   3   4
   2   2   1   1   1   1   3   2   2   2   4   3
   1   2   1   1   2   2   2   1   4   4   3   3
   1   1   1   1   2   2   2   4   3   4   4   5
```

combine_obj =

```
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0332
   3.0000   5.0000   4.1667   0.0209
   2.0000   4.0000   3.3333   0.1786
   2.0000   4.0000   3.3333   0.1076
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0468
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0257
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0630
   2.0000   4.0000   3.5556   0.1317
   3.0000   5.0000   4.5000   0.0297
```

crowding_distance_combine =

1.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.0332	1.0000	Inf
3.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.1786	4.0000	Inf
4.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.1076	3.0000	Inf
5.0000	2.0000	4.0000	3.4286	0.0468	2.0000	Inf
6.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.0630	2.0000	Inf
7.0000	2.0000	4.0000	3.5556	0.1317	4.0000	Inf

ทำการเก็บค่าคำตอบที่ดีที่สุด

elitist =

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

elitist_seq =

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

elitist_station =

1	1	2	2	2	1	2	3	3	4	4	4

elitist_obj =

2.0000	4.0000	3.3333	0.0332

crowding_elitist =

1.0000	2.0000	4.0000	3.3333	0.0332	1.0000	Inf

elitist =

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

elitist_seq =

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

elitist_station =

1	1	2	2	2	1	2	3	3	4	4	4

elitist_obj =

2.0000	4.0000	3.3333	0.0332

เริ่มต้นการทำงานในเจนเนอเรชันที่ 2

gen_idx =

2

priority =

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

task_seq =

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

p_station =

```
   1   1   2   2   2   1   2   3   3   3   4   4
   2   2   1   1   1   1   3   2   2   2   4   4
   2   1   1   1   2   2   2   3   2   2   4   3
   1   1   2   1   2   2   2   1   1   4   4   3
   1   1   2   1   2   2   2   1   1   4   3   4
```

obj =

```
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0604
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0743
   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0384
```

crowding_distance =

```
   1.0000   2.0000   4.0000   3.3333   0.0604   1.0000      Inf
   2.0000   2.0000   4.0000   3.3333   0.0743   2.0000      Inf
   3.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807   3.0000      Inf
   4.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214   1.0000      Inf
   5.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.0384   2.0000      Inf
```

migration =

```
% migration = [no, str, species_count, immigration, emmirgraion, Pim,
Pem, Pk]
   1.0000   1.0000   3.0000   0.2500   0.7500   0.1667   0.5000   0.2500
   2.0000   4.0000   3.0000   0.2500   0.7500   0.1667   0.5000   0.2500
   1.0000   2.0000   2.0000   0.5000   0.5000   0.3333   0.3333   0.3750
   2.0000   5.0000   2.0000   0.5000   0.5000   0.3333   0.3333   0.3750
   1.0000   3.0000   1.0000   0.7500   0.2500   0.5000   0.1667   0.2500
```

p_species_count =

```
   3
```

rand_str =

```
   4
   1
```

r_adjust =

```
    0.2271

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.4663

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.8990

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.5442

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.0571

Pim =

    0.1667

r_species =

    0.7945

species_count =

     2

cross_str =

     5

r_adjust =

    0.0258
```

Pim =

0.1667

r_species =

0.9755

species_count =

1

cross_str =

3

r_adjust =

0.2424

Pim =

0.1667

r_adjust =

0.9010

Pim =

0.1667

r_adjust =

0.4484

Pim =

0.1667

r_adjust =

0.0628

Pim =

0.1667

r_species =

0.0993

species_count =

```
    3

cross_str =

    1

r_adjust =

    0.3801

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.0017

Pim =

    0.1667

r_species =

    0.7176

species_count =

    2

cross_str =

    2

r_adjust =

    0.1693

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.6212

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.4246
```

```
Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.6771

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.1788

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.8875

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.1599

Pim =

    0.1667

r_species =

    0.0978

species_count =

     3

cross_str =

     1

r_adjust =

    0.2477
```

```
Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.5972

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.0766

Pim =

    0.1667

r_species =

    0.2665

species_count =

     3

cross_str =

     4

r_adjust =

    0.4874

Pim =

    0.1667

r_adjust =

    0.3568

Pim =

    0.1667

p_species_count =

     2

rand_str =
```

```
     2
     5

r_adjust =

    0.7648

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.3961

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.8227

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.5250

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.1027

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.0484

species_count =

     3

cross_str =

     4
```

```
r_adjust =

    0.9919

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.4768

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.9827

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.5721

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.2325

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.1170

species_count =

     3

cross_str =

     1
```

r_adjust =

0.1383

Pim =

0.3333

r_species =

0.1872

species_count =

3

cross_str =

4

r_adjust =

0.4587

Pim =

0.3333

r_adjust =

0.1029

Pim =

0.3333

r_species =

0.1705

species_count =

3

cross_str =

1

r_adjust =

0.3724

Pim =

0.3333

r_adjust =

0.3066

Pim =

0.3333

r_species =

0.8976

species_count =

1

cross_str =

3

r_adjust =

0.7244

Pim =

0.3333

r_adjust =

0.4067

Pim =

0.3333

r_adjust =

0.1864

Pim =

0.3333

r_species =

0.0516

species_count =

3

```
cross_str =

     4

r_adjust =

    0.5961

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.5135

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.8958

Pim =

    0.3333

r_adjust =

    0.1858

Pim =

    0.3333

r_species =

    0.0935

species_count =

     3

cross_str =

     4

r_adjust =

    0.6827

Pim =
```

```
    0.3333

r_adjust =

    0.4755

Pim =

    0.3333

p_species_count =

     1

rand_str =

     3

r_adjust =

    0.9270

Pim =

    0.5000

r_adjust =

    0.4114

Pim =

    0.5000

r_species =

    0.8700

species_count =

     1

cross_str =

     3

r_adjust =

    0.7100

Pim =

    0.5000
```

r_adjust =

0.9424

Pim =

0.5000

r_adjust =

0.4802

Pim =

0.5000

r_species =

0.4346

species_count =

3

cross_str =

1

r_adjust =

0.4691

Pim =

0.5000

r_species =

0.9585

species_count =

1

cross_str =

3

r_adjust =

0.8561

```
Pim =

    0.5000

r_adjust =

    0.3055

Pim =

    0.5000

r_species =

    0.7203

species_count =

     2

cross_str =

     5

r_adjust =

    0.1568

Pim =

    0.5000

r_species =

    0.0771

species_count =

     3

cross_str =

     4

r_adjust =

    0.4539

Pim =

    0.5000

r_species =
```

```
   0.7924

species_count =

    2

cross_str =

    2

r_adjust =

   0.7315

Pim =

   0.5000

r_adjust =

   0.4599

Pim =

   0.5000

r_species =

   0.4050

species_count =

    3

cross_str =

    1

pop =

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

pop_z =

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

priority_z =
```

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

r_mutated =

```
   0.8083
```

species_count =

```
   1
```

str_arr =

```
   3
```

number_of_mutation =

```
   1
```

a1 =

```
   1
```

a2 =

```
   2
```

p_r_mutate =

```
   0   1   0   0   0   0   0   0   0   0   0   0
```

new_bit_pos =

```
  11
```

task_seq_prioz =

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

p_station_prioz =

```
   1   1   2   2   2   2   4   3   3   4   6   6
   1   2   1   1   2   2   3   2   2   2   4   3
   2   1   1   1   2   2   2   3   3   4   3   6
   1   1   2   1   2   2   2   2   2   3   4   3
   2   1   1   1   2   2   2   3   4   4   3   4
```

obj_prioz =

```
   3.0000   5.0000   4.3750   0.0156
   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807
   3.0000   5.0000   4.4444   0.0894
   2.0000   4.0000   3.3333   0.1540
   2.0000   4.0000   3.5556   0.0474
```

combine_pop =

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

combine_seq =

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

combine_station =

```
   1   1   2   2   2   1   2   3   3   3   4   4
   2   2   1   1   1   1   3   2   2   2   4   4
   2   1   1   1   2   2   2   3   2   2   4   3
   1   1   2   1   2   2   2   1   1   4   4   3
   1   1   2   1   2   2   2   1   1   4   3   4
   1   1   2   2   2   2   4   3   3   4   6   6
   1   2   1   1   2   2   3   2   2   2   4   3
   2   1   1   1   2   2   2   3   3   4   3   6
   1   1   2   1   2   2   2   2   2   3   4   3
   2   1   1   1   2   2   2   3   4   4   3   4
```

combine_obj =

```
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0604
   2.0000   4.0000   3.3333   0.0743
   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0384
   3.0000   5.0000   4.3750   0.0156
   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807
   3.0000   5.0000   4.4444   0.0894
   2.0000   4.0000   3.3333   0.1540
   2.0000   4.0000   3.5556   0.0474
```

crowding_distance_combine =

```
   1.0000   2.0000   4.0000   3.3333   0.0604   1.0000      Inf
```

```
   2.0000   2.0000   4.0000   3.3333   0.0743   2.0000      Inf
   3.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807   4.0000      Inf
   4.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214   1.0000      Inf
   5.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.0384   2.0000      Inf
   6.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.1807   4.0000      Inf
   8.0000   2.0000   4.0000   3.3333   0.1540   3.0000      Inf
   9.0000   2.0000   4.0000   3.5556   0.0474   3.0000      Inf


elitist =

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


elitist_seq =

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


elitist_station =

    1    1    2    2    2    1    2    3    3    4    4    4
    1    1    2    1    2    2    2    1    1    4    4    3


elitist_obj =

   2.0000   4.0000   3.3333   0.0332
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214


crowding_elitist =

   1.0000   2.0000   4.0000   3.3333   0.0332   1.0000      Inf
   2.0000   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214   1.0000      Inf


elitist =

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


elitist_seq =

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


elitist_station =

    1    1    2    2    2    1    2    3    3    4    4    4
    1    1    2    1    2    2    2    1    1    4    4    3


elitist_obj =

   2.0000   4.0000   3.3333   0.0332
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214


obtain =

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

```
obtain_seq =

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


obtain_station =

   1   1   2   2   2   1   2   3   3   4   4   4
   1   1   2   1   2   2   2   1   1   4   4   3


obtain_obj =

   2.0000   4.0000   3.3333   0.0332
   2.0000   4.0000   3.4286   0.0214

Elapsed time is 5.996815 seconds.
>>
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเอื้อมพร จันทร์แซม เกิดเมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย จากโรงเรียนอุดรพิทยานุกูล จังหวัดอุดรธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา พ.ศ. 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2552