

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

นางสาววันวิสา นฤมิตวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

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 SEQUENCING PROBLEM ON MIXED-MODEL TWO-SIDED
ASSEMBLY LINES UNDER LEARNING EFFECT

Ms. Wanwisa Naruemitwong

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

วันวิสา นฤมิตวงศ์ : การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้. (MULTI-OBJECTIVE
SEQUENCING PROBLEM ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES
UNDER LEARNING EFFECT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ปารเมศ ชูติมา, 317
หน้า.

การจัดลำดับการผลิตมีความสำคัญอย่างยิ่งในการช่วยแก้ปัญหาสายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านเพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งปัญหาการจัดลำดับการผลิต
นั้นต้องพิจารณาหลายปัจจัย ทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีหลายตัว และผลกระทบจากการเรียนรู้ จึง
ทำให้ปัญหามีความยุ่งยากซับซ้อนมากยิ่งขึ้น (ปัญหาแบบ NP-Hard)

งานวิจัยนี้ได้นำอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิต
ตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา
การจัดลำดับการผลิต โดยจะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปร
ผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด
แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถแก้ปัญหา
ประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ NSGA-II, DPSO และ PSONK

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผลการวิจัย พบว่า BBO กับ PSONK มี
ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นจึงได้ประยุกต์อัลกอริทึม BBO Adaptive ขึ้นมาเพื่อ
เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมอื่นๆ และสรุปได้ว่า BBO Adaptive สามารถแก้ปัญหาได้
อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่า NSGAII, DPSO และ PSONK

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2555.....

5270799921: MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

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

WANWISA NARJEMITWONG: MULTI-OBJECTIVE SEQUENCING PROBLEM ON TWO-SIDED ASSEMBLY LINES UNDER LEARNING EFFECT. ADVISOR: ASSOC.PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 317 pp.

Sequencing is an important method for solving the mixed model two-sided assembly lines problem to reach maximum production efficiency. Many factors such as multiple objectives and learning effect have to be considered in solving the sequencing problem. These make the problem more complicated as known as “NP-Hard problem”. In this research, a Biogeography Based Optimization (BBO) algorithm is adopted for solving the sequencing problem to minimize variance of production rates, utility work and setup time.

The results are compared with well-known algorithms such as Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) and Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge (PSONK).

The experiments show that BBO has performed effective results approximate to those performed by PSONK. Therefore, BBO adaptive has been applied for effectiveness comparison with the other algorithms. The result show that BBO adaptive is more effective in solving NP-hard problems than NSGAI, DPSO and PSONK algorithms.

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

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

Academic Year: 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้ คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณอาจารย์ไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำงานตลอดระยะเวลาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ลักษณะของปัญหางานวิจัย.....	4
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป.....	8
2.2 ประเภทของสายการประกอบ.....	9
2.3 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์.....	15
2.3.1 วิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์.....	15
2.3.2 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	17
2.3.3 วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับการผลิต.....	34
2.3.4 จำนวนการจัดลำดับการผลิตทั้งหมด.....	51

	หน้า
2.4 ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	51
2.4.1 ตัวอย่างการคำนวณ.....	54
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน.....	57
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม.....	58
2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต.....	60
2.3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสม แบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์.....	61
บทที่ 3 อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัย.....	62
3.1 เจนเนติกอัลกอริทึม.....	62
3.2 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง.....	66
3.3 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ.....	68
3.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์.....	71
3.5 สรุปท้ายบท.....	71
บทที่ 4 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตทาง ภูมิศาสตร์ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลาย วัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบ จากการเรียนรู้.....	73
4.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์.....	73
4.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มี หลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	74
4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มี หลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	77

4.4	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO.....	107
4.5	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	108
4.6	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO.....	129
4.7	วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์แบบปรับตัวได้ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่.....	131
4.7.1	ขั้นตอนการทำงานของ BBO Adaptive ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	131
4.7.2	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ BBO Adaptive ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	134
4.8	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO Adaptive.....	152
4.9	สรุปท้ายบท.....	154
บทที่ 5	ผลการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม.....	155
5.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	155
5.2	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึม.....	162
5.3	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม.....	167
5.4	สรุปท้ายบท.....	203
บทที่ 6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	207
6.1	สรุปงานวิจัย.....	207
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	211
	รายการอ้างอิง.....	213

ภาคผนวก.....		220
ภาคผนวก ก	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	221
ภาคผนวก ข	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	252
ภาคผนวก ค	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ PSONK ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้.....	268
ภาคผนวก ง	ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ.....	306
ภาคผนวก จ	รายละเอียดปัญหา.....	316
ภาคผนวก ฉ	ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัญหาการทดลอง.....	316
ภาคผนวก ช	ผลการทดลองจากโปรแกรม.....	316
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		317

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย.....	4
2.1	ชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C.....	17
2.2	เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์.....	18
2.3	ลำดับการผลิตจากการจัดสมดุล.....	20
2.4	เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model A.....	31
2.5	เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model B.....	31
2.6	เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model C.....	32
2.7	เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model B.....	32
2.8	เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model C.....	33
2.9	เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model C.....	33
2.10	ชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C.....	37
2.11	Model Sequences ในแต่ละชั้นงาน.....	38
2.12	ผลการคำนวณความผันแปรของการผลิตของ A B C B C C.....	41
2.13	เวลาดำเนินงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในแต่ละสถานีงานและความยาวสถานีงาน.....	42
2.14	เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์.....	49
2.15	เวลาปรับตั้งเครื่องของลำดับการผลิต A B C B C C.....	50
2.16	การคำนวณเวลาดำเนินงานการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ A, B และ C โดยใช้วิธี Position-Based Learning Effect.....	56
4.1	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3.....	78
4.2	ค่าความแข็งแรงของสตริง.....	79
4.3	ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว.....	79
4.4	ค่าของสปริงส์เคาท์.....	80
4.5	ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear.....	81
4.6	ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal.....	82
4.7	การอพยพเข้าและออกของสปริงส์เคาท์ 3.....	84

ตารางที่	หน้า
4.8	การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 3..... 85
4.9	การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 2..... 85
4.10	การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 2..... 86
4.11	การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 1..... 86
4.12	การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 1..... 87
4.13	สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ..... 87
4.14	การคัดเลือกสปีชีส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ต..... 88
4.15	สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน..... 89
4.16	สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบชั่วคราวและสตริงคำตอบหลังมิวเตชัน..... 90
4.17	สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 91
4.18	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงที่นำมารวมกัน..... 91
4.19	สตริงคำตอบที่ทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่านวนค่า Crowding Distance..... 92
4.20	สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance..... 92
4.21	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน..... 93
4.22	สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป..... 93
4.23	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3..... 94
4.24	ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว..... 95
4.25	ค่าของสปีชีส์เคาท์..... 95
4.26	ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear..... 96
4.27	การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 2..... 97
4.28	การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 2..... 98
4.29	การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 1..... 99
4.30	การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 1..... 100
4.31	สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ..... 101
4.32	การคัดเลือกสปีชีส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อรูเล็ต..... 101
4.33	สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน..... 102
4.34	สตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราว และสตริงหลังทำมิวเตชัน..... 103

ตารางที่	หน้า
4.35	สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 104
4.36	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงที่นำมารวมกัน..... 104
4.37	สตริงคำตอบที่ทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่านวนค่า Crowding Distance..... 105
4.38	สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance..... 105
4.39	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 2..... 106
4.40	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1..... 106
4.41	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1และรอบที่ 2..... 106
4.42	สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance..... 107
4.43	สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป..... 107
4.44	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.1..... 110
4.45	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.2..... 112
4.46	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.1..... 114
4.47	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.2..... 116
4.48	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.1..... 117
4.49	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.2..... 118
4.50	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.1..... 119
4.51	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.2..... 121
4.52	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.1..... 122
4.53	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2..... 124
4.54	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study..... 126
4.55	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Bartholdi..... 127
4.56	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Lee..... 129
4.57	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม BBO ของแต่ละปัญหา..... 130
4.58	ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว..... 135
4.59	ค่าของสปีชีส์เคาท์..... 136
4.60	ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal..... 136
4.61	สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ..... 137

ตารางที่	หน้า
4.62	สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน..... 138
4.63	สตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราว และสตริงคำตอบหลังมิวเตชัน..... 139
4.64	สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 140
4.65	สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance..... 140
4.66	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน..... 141
4.67	สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป..... 141
4.68	กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง(รอบการทำงานที่ 5) และกลุ่มคำตอบที่ได้ (รอบการทำงานที่ 1)..... 142
4.69	ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1..... 143
4.70	ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2..... 144
4.71	ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3..... 145
4.72	ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบจากการรวมกันของ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์..... 146
4.73	สตริงคำตอบที่นำมาทำ Local Search..... 148
4.74	สตริงคำตอบที่นำมาทำ Local Search..... 148
4.75	สตริงคำตอบทำ Local Search แล้ว..... 149
4.76	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดรอบปัจจุบันและสตริงคำตอบที่ทำ Local Search..... 150
4.77	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดรอบปัจจุบันและสตริงคำตอบที่ทำ Local Search..... 151
4.78	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดรอบปัจจุบัน..... 152
4.79	พารามิเตอร์สำหรับ BBO Adaptive..... 153
5.1	พารามิเตอร์สำหรับ NSGA-II..... 163
5.2	พารามิเตอร์สำหรับ DPSO..... 164
5.3	พารามิเตอร์สำหรับ PSONK..... 165
5.4	พารามิเตอร์สำหรับ BBO..... 166
5.5	พารามิเตอร์สำหรับ BBO Adaptive..... 167

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดี่ยว.....	9
2.2	สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม.....	9
2.3	สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์.....	9
2.4	สายการประกอบแบบสองด้าน.....	11
2.5	สายการประกอบแบบสองด้าน.....	11
2.6	สายการประกอบแบบสองด้านในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์.....	12
2.7	สายการประกอบแบบขนาน.....	12
2.8	สายการประกอบแบบตัวยู.....	12
2.9	สายการประกอบแบบวงกลม/ปิด.....	13
2.10	สายการประกอบแบบไหลต่อเนื่อง.....	13
2.11	สายการประกอบแบบไหลไม่ต่อเนื่อง.....	13
2.12	สายการประกอบแบบป้อนเข้าสู่สายการประกอบหลัก.....	14
2.13	สายการประกอบที่ใช้มนุษย์ดำเนินการ.....	14
2.14	สายการประกอบที่ใช้หุ่นยนต์ดำเนินการ.....	15
2.15	Pareto Optimal Solution.....	16
2.16	เวลาการประกอบของการจัดลำดับการผลิตแบบ A B C B C C.....	19
2.17	สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีความสมดุล.....	20
2.18	แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A, B และ C.....	20
2.19	ตัวอย่างการไหลของสถานีงาน และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ (Utility Work).....	35
2.20	การหาจำนวนปริมาณงานที่ไม่เสร็จของคู่สถานีงานที่ 1 กับ 2.....	46
2.21	การหาจำนวนปริมาณงานที่ไม่เสร็จของคู่สถานีงานที่ 3 กับ 4.....	47
2.22	กราฟเส้นโค้งการเรียนรู้ที่ค่า LR เท่ากับ 80% กราฟแรกจะเป็นกราฟปกติ กราฟที่สองเป็นกราฟ Double-Logarithmic Coordinate system.....	52
3.1	ขั้นตอนการทำงานของวิธีเจเนเนติกอัลกอริทึม.....	65
3.2	ขั้นตอนการทำงานของ DPSO.....	68
3.3	ขั้นตอนการทำงานของ PSONK.....	70

ภาพที่	หน้า
4.1	ขั้นตอนการทำงานของ BBO 76
4.2	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบ ที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 108
4.3	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของ จำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 109
4.4	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของ จำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 109
4.5	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบ ที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 110
4.6	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้าน การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 111
4.7	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของ จำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 111
4.8	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบ ที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 112
4.9	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้าน การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 113
4.10	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 2.1 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของ จำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 113
4.11	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบ ที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 114
4.12	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้าน การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง 115
4.13	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 2.2 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของ จำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 115
4.14	ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบ ที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 116

ภาพที่	หน้า
4.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	117
4.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	118
4.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	119
4.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	120
4.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 4.2 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	120
4.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	121
4.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	122
4.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	123
4.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	123
4.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	124
4.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	125
4.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง..	125
4.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Bartholdi เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	126
4.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Lee เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	127

ภาพที่	หน้า
4.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Lee เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง	129
4.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Lee เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง	129
4.31 ขั้นตอนการทำงานของ BBO Adaptive.....	133
5.1 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 1.1.....	156
5.2 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 1.2.....	156
5.3 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 2.1.....	157
5.4 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 2.2.....	157
5.5 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 3.1.....	158
5.6 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 3.2.....	158
5.7 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 4.1.....	159
5.8 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 4.2.....	159
5.9 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 5.1.....	160
5.10 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 5.2.....	160
5.11 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา Case Study.....	161
5.12 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา Bartholdi.....	161
5.13 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา Lee.....	162
5.14 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1....	169
5.15 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2....	170
5.16 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1....	172
5.17 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2....	173
5.18 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1....	174
5.19 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2....	175
5.20 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1....	177
5.21 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2....	178
5.22 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1....	179
5.23 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2....	180

ภาพที่	หน้า
5.24 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Case Study.....	182
5.25 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Bartholdi.....	183
5.26 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Lee.....	184
5.27 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1....	186
5.28 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2....	187
5.29 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1....	188
5.30 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2....	190
5.31 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1....	191
5.32 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2....	192
5.33 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1....	194
5.34 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2....	195
5.35 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1....	196
5.36 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2....	198
5.37 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Case Study.....	199
5.38 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Bartholdi.....	200
5.39 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Lee.....	202
6.1 Pareto Optimal Solution.....	209

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้โรงงานอุตสาหกรรมได้มีการออกแบบสายการประกอบให้เป็นแบบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งเป็นสายการประกอบที่สามารถผลิตได้หลายผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันจะเข้าสู่สายการประกอบพร้อมๆ กันและต่อเนื่องกัน ปัญหาในการนำสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมาใช้ คือ การจัดลำดับการผลิตเพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ที่โรงงานต้องการ วัตถุประสงค์ที่ใช้กันทั่วไปมีหลายวัตถุประสงค์ เช่น ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด อัตราความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ต้นทุน/เวลาในการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุดความสม่ำเสมอของปริมาณงาน ความเสี่ยงในการหยุดของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด ฯลฯ (Akgunduz and Tunal, 2010) การแก้ปัญหาการ จัดลำดับการผลิตในภาคปฏิบัติจึงต้องพิจารณาหลายวัตถุประสงค์ ไปพร้อมๆ กันทำให้ปัญหามีความซับซ้อนยุ่งยากมากยิ่งขึ้น เวลาที่ใช้ในการคำนวณยาวนานมากขึ้น จำนวนคำตอบที่ได้มากมาย จึงมีการศึกษาวิจัยวิธีการเพื่อที่จะหาคำตอบโดยการนำวิธีฮิวริสติกเข้ามาช่วยแก้ปัญหา เช่น วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GAs) เป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาในการจัดลำดับการผลิต เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น GA สามารถลดเวลาในการคำนวณและให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด Hyun et al. (1998) ได้พัฒนาการค้นหาคำตอบในการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ มีชื่อว่า Pareto Stratum-Niche Cubic (PS-NC) วัตถุประสงค์ที่ใช้มี 3 วัตถุประสงค์ คือ ผลรวมของปริมาณงานที่ไม่เสร็จมีค่าน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ และผลรวมของค่าใช้จ่ายในการปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อยที่สุด McMullen et al. (2000) ได้มีการพิจารณาวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ คือ จำนวนครั้งในการปรับตั้งมีค่าน้อยที่สุด และความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ Mansouri (2005) ได้มีการแก้ปัญหา การจัดลำดับที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm: MOGA) ซึ่งในงานวิจัยสรุปว่า MOGA มีประสิทธิภาพในการนำมาใช้แก้ปัญหาในการจัดลำดับการผลิต Vahed et al. (2007) ได้พัฒนาเจเนติกอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า Multi-Objective Scatter Search (MOSS) โดยใช้วัตถุประสงค์เหมือนกับงานวิจัยของ Hyun et al. (1998) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ NSGA-II และ PS-NC แล้วประสิทธิภาพของ MOSS ดีกว่า แต่ MOSS ใช้เวลาใน

การคำนวณมากกว่า เพราะฉะนั้นในการพัฒนาอัลกอริทึมจึงควรมีการพัฒนาประสิทธิภาพในการหาคำตอบควบคู่ไปกับเวลาที่ใช้หาคำตอบ

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ Simon (2008) ได้มีการศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมใหม่ที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) เป็นการนำแนวคิดการเคลื่อนย้ายประชากรจากแหล่งหนึ่งไปอีกแหล่งหนึ่งมาใช้ โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ได้มีการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากปัญหาในภาคปฏิบัติ คำตอบที่ได้จึงมีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมหลายตัว Abell and Du (2010) ได้นำเอา BBO มาใช้แก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนหลายวัตถุประสงค์ และมีหลายข้อจำกัดของปัญหา Complex System Families และ Mo and Xu (2010) ได้นำ BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา Traveling Salesman จากงานวิจัยที่กล่าวมา พบว่า BBO มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเจเนติก คำตอบที่ได้จาก BBO มีโอกาสที่จะใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด เพราะคำตอบที่ออกมา นั้นเกิดจากคำตอบหลายคำตอบ ซึ่งจะไม่เหมือนวิธีเจเนติกที่คำตอบเกิดมาจากคำตอบของสองคำตอบ

ในการหาคำตอบผลกระทบจากการเรียนรู้มีผลต่อเวลาในการดำเนินการ ซึ่งจะทำให้เวลาในการผลิตลดลง (Biskup, 1999) จึงมีผลต่อค่าวัตถุประสงค์ที่ทำการวิจัย ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำ BBO มาประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ BBO กับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถแก้ปัญหาประเภทนี้ได้ ได้แก่ NSGA-II, DPSO และ PSONK

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO), Genetic Algorithms (GA), Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) และ Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge (PSONK) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม และมีสายการประกอบแบบสองด้านที่มีความสมดุลในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดีโดยมีผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาเกี่ยวข้อง ผลิตภัณฑ์มีการประกอบผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และสามารถจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบสลับลำดับกันอย่างไรก็ได้

1.3.2 นำวิธีการของ BBO เข้ามาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบ

1.3.3 ผลกระทบจากการเรียนรู้เป็นแบบ Position-Based Learning Effect

1.3.4 การหาคำตอบของปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- เพื่อหาความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Variance of Production Rates)

- เพื่อหาปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work)

- เพื่อหาเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Setup Time)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์กับวิธีเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยใช้ตัวชี้วัด 3 ตัว คือ การเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set) และ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่หาได้เทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) ประเมินคำตอบ

ปัญหาของการจัดลำดับการผลิตที่จะทำการศึกษามีดังนี้

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

ปัญหาการทดลอง	จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS)	ความยาวสตริง	จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้
Set 1	1	5	5:3:2:1:1	332640
	2	5	4:4:2:1:1	415800
Set 2	3	5	7:3:2:2:1	10810800
	4	5	4:3:3:3:2	126126000
Set 3	5	5	8:7:2:2:1	2.993E+09
	6	5	5:4:4:4:3	2.444E+11
Set 4	7	10	7:5:1:1:1:1:1:1:1:1	4.023E+12
	8	10	4:4:4:2:1:1:1:1:1:1	2.112E+15
Set 5	9	15	20:20:20:15:15:1:1:1:1:1:1:1:1:1:1	3.79E+78
	10	15	15:15:10:10:10:10:10:10:4:1:1:1:1:1:1	9.959E+92
Case Study 183	2	15:15	30	1.55E+08
Bartholdi 148	4	7:3:4:6	20	4.655E+09
Lee 205	4	5:7:8:10	30	2.997E+15

หมายเหตุ : Set ปัญหาการทดลอง (McMullen, 2001) และ Case Study เป็นปัญหาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด

1.4 ลักษณะของปัญหางานวิจัย

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำสมมติฐานบางส่วนมาจาก Hyun et al. (1998)

- ลักษณะสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
- สายการประกอบที่นำมาจัดลำดับการผลิตมีความสมดุล และมีอัตราส่วนเท่ากับสัดส่วนผลิตภัณฑ์
- ผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตมีหลากหลายรุ่น แต่มีคุณสมบัติคล้ายกันจึงสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้ และบางผลิตภัณฑ์จะไม่มีการทำงานบางชิ้นงาน (Task)
- พิจารณาความต้องการผลิตภัณฑ์จาก Minimum Part Set (MPS)

- สถานีงานเป็นแบบปิด
- ทราบจำนวนสถานีงานที่อยู่ในสายการผลิตและเวลาดำเนินงานของชั้นงานที่อยู่ในสถานีงาน
- ไม่นำระยะทางและเวลาการเดินทางของพนักงานเข้ามาพิจารณา
- รอบเวลาการปล่อยสินค้าเข้าสู่สายพานการผลิตคงที่
- การปรับตั้งเครื่องขึ้นอยู่กับลำดับงานที่อยู่ก่อนหน้า
- งานทุกงานมีความพร้อมทำตลอดเวลา
- งานต้องถูกทำจนเสร็จตามที่กำหนด จึงจะส่งต่อไปยังเครื่องจักรถัดไปได้
- ณ เวลาหนึ่งเครื่องจักรสามารถทำงานได้เพียงงานเดียวเท่านั้น
- ไม่มีการยกเลิกคำสั่งผลิต
- ไม่มีการแทรกงาน
- พื้นที่แถวคอยในกระบวนการผลิตมีไม่จำกัด

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม MATHLAB
- 1.5.3 สร้างอัลกอริทึมโดยใช้โปรแกรม MATHLAB
- 1.5.4 ทดสอบและแก้ไขโปรแกรมให้มีความถูกต้อง
- 1.5.5 ประเมินผลการใช้อัลกอริทึมในการแก้ไขปัญหา
- 1.5.6 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.5.7 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทำให้การแก้ปัญหาคำสั่งลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านโดยมีผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาเกี่ยวข้องมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ช่วยลดความยุ่งยากและลดระยะเวลาในการแก้ปัญหา
- 1.6.2 เป็นแนวทางในการช่วยตัดสินใจในการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาเกี่ยวข้อง

- 1.6.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึม เพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาเกี่ยวข้อง
- 1.6.4 ผลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้
- 1.6.5 สามารถนำวิธีการแก้ปัญหาไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติได้

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน การหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ วิธีการคำนวณค่าของผลกระทบจากการเรียนรู้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ใน Set ปัญหา การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม ผลสรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะต่างๆ จากการทำวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป ประเภทของสายการประกอบ ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ วิธีการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับการผลิต จำนวนการจัดลำดับการผลิตทั้งหมด ทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบจากการเรียนรู้ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 อธิบายทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO)

บทที่ 4 อธิบายทฤษฎี ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ และวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์แบบปรับตัวได้ ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่ รวมถึงการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

บทที่ 5 อธิบายผลการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ซึ่งประกอบด้วย พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของ ผลกระทบจากการเรียนรู้ 80% และ 90%

บทที่ 6 เป็นการสรุปงานวิจัย ผลการนำเอาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของ สิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับปัญหาในงานวิจัย และข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป

สายการประกอบ (Assembly line) ประกอบไปด้วยการจัดลำดับของสถานีงาน (Work Station) โดยชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์จะมีการเคลื่อนย้ายไปยังสถานีงานต่างๆ ด้วยสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง สถานีงานจะมีการทำงานเป็นชิ้นงาน (Task) ที่ซ้ำกันตามคำสั่งการผลิต ชิ้นงานในการประกอบจะมีเวลาที่แน่นอนและจะมีความสัมพันธ์กันในระหว่างสถานีงานตามข้อจำกัดของทางด้านเทคโนโลยีในการผลิต

ในสายการประกอบจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

เวลาดำเนินการของชิ้นงาน (Processing Tasks) เป็นเวลาการดำเนินการที่ไม่สามารถแบ่งแยกออกเป็นส่วนย่อยได้อีก ในสายการประกอบจะมีหลายชิ้นงาน

สถานีงาน (Work Station) จะประกอบไปด้วยชิ้นงานหลายชิ้นงาน ในการดำเนินการอาจจะใช้มนุษย์ หรือหุ่นยนต์เป็นผู้ดำเนินการ โดยจะมีเครื่องมือและอุปกรณ์ช่วยในการดำเนินงาน

รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time) คือเวลาที่ใช้ในการดำเนินการผลิตชิ้นงานหนึ่งชิ้น

ความสัมพันธ์ก่อนหลัง (Precedence Relations) ในการดำเนินการในแต่ละสถานีงาน ชิ้นงานบางชิ้นงานอาจไม่สามารถเริ่มดำเนินการได้ทันที เนื่องจากต้องทำชิ้นงานก่อนหน้าให้เสร็จก่อนถึงจะเริ่มดำเนินการได้ ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ก่อนหลังของแต่ละชิ้นงาน

ภาระของสถานีงาน (Workstation Load) เป็นการจัดให้ชิ้นงานดำเนินการในสถานีงาน

เวลาของสถานีงาน (Workstation Time) คือเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการดำเนินการของทุกๆ ชิ้นงานในสถานีงาน

เวลาเดินเปล่าในสถานีงาน (Workstation Idle Time) เป็นเวลาที่เกิดจากความแตกต่างของรอบเวลาการทำงานกับภาระของสถานีงาน เกิดมาจากการที่รอบเวลาการทำงานมีเวลายาวนานกว่าเวลาของชิ้นงานจึงทำให้เกิดเวลาว่างก่อนที่จะทำชิ้นงานต่อไป

ความสมดุลของสายการประกอบ (Line Balancing) เป็นการจัดสรรชิ้นงานไปยังสถานีงานตามความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานและข้อจำกัดอื่นๆ เพื่อให้การดำเนินการมีประสิทธิภาพมากที่สุด วัตถุประสงค์จะมีการกำหนดจำนวนสถานีงาน เพื่หารอบเวลาการผลิต หรือจะกำหนดรอบเวลาการผลิตแล้วหาจำนวนสถานีงาน

2.2 ประเภทของสายการประกอบ

สายการประกอบที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายประเภท โดยจะพิจารณาตามลักษณะได้ดังนี้ คือ แบ่งตามจำนวนหรือชนิดของผลิตภัณฑ์ แบ่งตามเวลาของชิ้นงาน แบ่งตามรูปร่างหรือผังของสายการประกอบและแบ่งตามจำนวนการไหลของชิ้นงาน

1. แบ่งตามจำนวนหรือชนิดของผลิตภัณฑ์

สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว (Single-Model Line) ในสายการประกอบจะมีผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกัน เป็นสายการประกอบแบบต่อเนื่อง มีการผลิตเป็นจำนวนมาก ดังภาพที่ 2.1



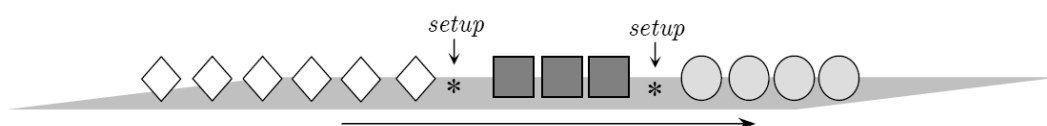
ภาพที่ 2.1 สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียว (Betancourt, 2007)

สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Line) ในสายการประกอบจะมีผลิตภัณฑ์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันจะเข้าสู่สายการประกอบพร้อมๆ กันและต่อเนื่องกัน ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Betancourt, 2007)

สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Line) ในสายการประกอบจะมีผลิตภัณฑ์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีรูปแบบและกระบวนการประกอบที่ใกล้เคียงกัน โดยจะมีการจัดลำดับการผลิตแบบเป็นกลุ่ม และมีการปรับตั้งค่าในช่วงการเปลี่ยนกลุ่มผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Betancourt, 2007)

2. แบ่งตามเวลาของชิ้นงาน

สายการประกอบที่มีเวลาคงที่ (Deterministic) ทุกชิ้นงานจะมีเวลาในการดำเนินการคงที่ตลอด

สายการประกอบที่มีเวลาไม่คงที่ (Stochastic Line) เวลาของชิ้นงานในการดำเนินการอาจจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากความแปรผันที่ต่างกัน เช่น ความสามารถของการเคลื่อนไหวของผู้ปฏิบัติงานแตกต่างกัน

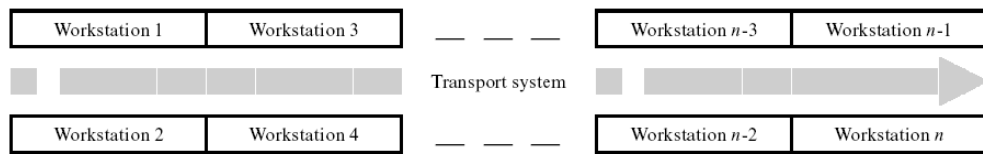
สายการประกอบที่ไม่อิสระ (Dependent Line) เวลาของชิ้นงานในการดำเนินการจะไม่คงที่ตายตัว แต่จะไม่อิสระ เช่น ชิ้นงานจะต้องถูกจัดลงไปในสถานีงานของผู้ปฏิบัติงาน และการจัดลำดับของชิ้นงานที่กำหนดไว้

สายการประกอบแบบพลวัต (Dynamic Line) เวลาของชิ้นงานในการดำเนินงานจะเกินรอบเวลา หรือลดลงได้ เนื่องจากการปรับปรุงกระบวนการในการประกอบที่เกิดจาก Learning Effects เช่น เมื่อผู้ปฏิบัติงานทำชิ้นงานที่คล้ายคลึงกันซ้ำกันหลายครั้ง

3. แบ่งตามรูปร่างหรือผังของสายการประกอบ

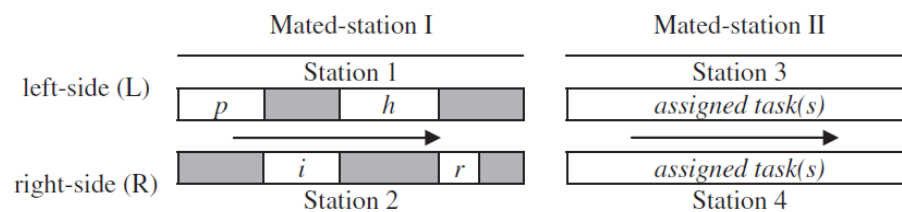
สายการประกอบแบบเส้นตรง (Straight Line) เป็นสายการประกอบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ไปในทิศทางเดียวกัน ในการดำเนินการต่างๆ จะมีการใช้สายพานลำเลียงส่งชิ้นงานไปยังสถานีงานถัดไปอย่างต่อเนื่อง

สายการประกอบแบบสองด้าน (Two – Sided Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่จะมีสถานีงานอยู่ทั้งด้านซ้าย (L) และด้านขวา (R) ดังภาพที่ 2.4 โดยสายการประกอบนี้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ และมีปริมาณการผลิตสูง เช่น รถยนต์ รถบรรทุก สายการประกอบแบบนี้ทำให้ความยาวของสายการประกอบสั้นลงเป็นผลให้ช่วยลดระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของพนักงาน ลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรและลดเวลาในการผลิตให้สั้นลง และเครื่องมืออุปกรณ์ในสถานีงานประเภทนี้สามารถใช้ร่วมกันได้จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง (Ozcan และ Toklu, 2009b) สายการประกอบมีการแยกตามประเภทของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตบนสายการประกอบ เช่น สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว สายการประกอบผลิตภัณฑ์หลายผลิตภัณฑ์ และสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์แบบผสม



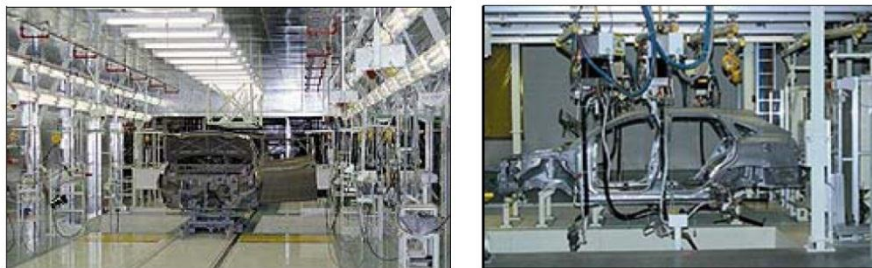
ภาพที่ 2.4 สายการประกอบแบบสองด้าน (Kim et al., 2000)

ในการจัดสรรชิ้นงานลงในสถานีงานบนสายการประกอบแบบสองด้าน มีข้อจำกัดในการจัดสรรชิ้นงาน 2 แบบ คือ ชิ้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสถานีงานได้เพียงด้านเดียวเท่านั้น คือด้านซ้าย (L-type) หรือด้านขวา (R-type) ของสายการประกอบ และชิ้นงานที่สามารถจัดสรรลงในสถานีงานด้านใดด้านหนึ่งของสายการประกอบก็ได้ (E-type) ส่วนสถานีงานที่อยู่คู่กัน เรียกว่า Mated-Station ในภาพที่ 2.4 Mated-Station ที่ 1 คือ สถานีงานที่ 1 กับ สถานีงานที่ 2 และ Mated-Station ที่ 2 คือ สถานีงานที่ 3 กับ สถานีงานที่ 4



ภาพที่ 2.5 สายการประกอบแบบสองด้าน (Ozcan and Toklu, 2009b)

จากภาพที่ 2.5 ในสถานีงานที่ 1 ประกอบด้วยชิ้นงาน p และชิ้นงาน h ส่วนในสถานีงานที่ 2 ประกอบด้วยชิ้นงาน i และชิ้นงาน r ในการจัดสรรชิ้นงานจะมีเงื่อนไขลำดับงานก่อนหลัง เช่น ชิ้นงาน i จะต้องรอให้ชิ้นงาน p เสร็จก่อนจึงจะสามารถเริ่มดำเนินงานได้ และชิ้นงาน h จะเริ่มได้ก็ต่อเมื่อชิ้นงาน i เสร็จ ทำให้สายการประกอบนี้มีส่วนที่แรงเงาเกิดขึ้น ส่วนนี้จะเรียกว่า เวลาเดินเปล่า (Idle Time) ซึ่งทำให้สายการประกอบแบบสองด้านแตกต่างจากสายการประกอบแบบเส้นตรง เวลาดำเนินงานในสถานีงานจะรวมเวลาเดินเปล่าที่เกิดขึ้นเข้าไปด้วย



ภาพที่ 2.6 สายการประกอบแบบสองด้านในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์

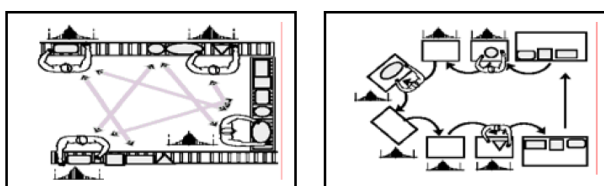
(Betancourt, 2007)

สายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines) เป็นสายการประกอบที่มีการปฏิบัติงานลักษณะขนานกัน ดังภาพที่ 2.7



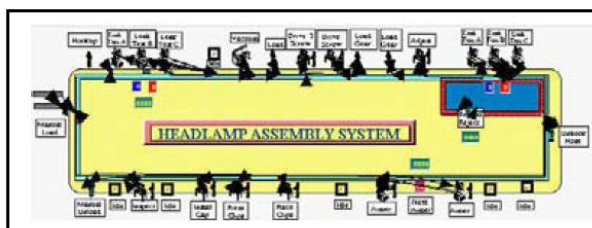
ภาพที่ 2.7 สายการประกอบแบบขนาน (Betancourt, 2007)

สายการประกอบแบบตัวยู (U-Shaped Lines) เป็นสายการประกอบที่มีลักษณะตัวยู ผู้ปฏิบัติการสามารถดำเนินการข้ามกันในระหว่างสถานีได้ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 สายการประกอบแบบตัวยู (Betancourt, 2007)

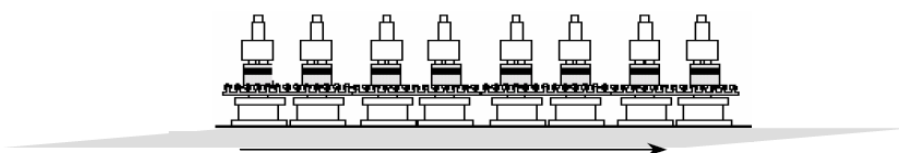
สายการประกอบแบบวงกลม/ปิด (Circle/Closed Lines) เป็นสายการประกอบที่สายพานลำเลียงจะมีลักษณะเป็นวงกลม พนักงานจะอยู่ประจำตำแหน่งของตัวเอง ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตามสายพานลำเลียงเพื่อไปยังสถานีงานถัดไปเรื่อยๆ จนถึงสถานีงานสุดท้าย ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 สายการประกอบแบบวงกลม/ปิด (Betancourt, 2007)

4. แบ่งตามจำนวนการไหลของชิ้นงาน

สายการประกอบแบบไหลต่อเนื่อง (Synchronous Lines) เป็นสายการประกอบแบบต่อเนื่อง ทุกสถานีงานมีการกำหนดรอบเวลาการผลิต ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปยังสถานีงานถัดไปด้วยสายพานลำเลียง ดังภาพที่ 2.10



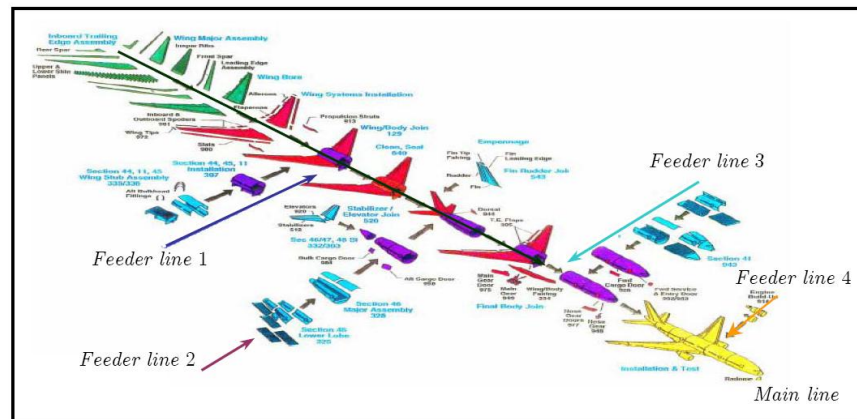
ภาพที่ 2.10 สายการประกอบแบบไหลต่อเนื่อง (Betancourt, 2007)

สายการประกอบแบบไหลไม่ต่อเนื่อง (Asynchronous Lines) เป็นสายการประกอบแบบไม่ต่อเนื่อง ไม่มีกำหนดรอบเวลาผลิต ทุกสถานีงานจะมีความเร็วที่แตกต่างกัน เวลาในการทำงานอาจมากกว่า หรือน้อยกว่ารอบเวลาการผลิต เมื่อชิ้นงานเสร็จจะมีพื้นที่รองรับชิ้นงาน (Buffer) ระหว่างการผลิต ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 สายการประกอบแบบไหลไม่ต่อเนื่อง (Betancourt, 2007)

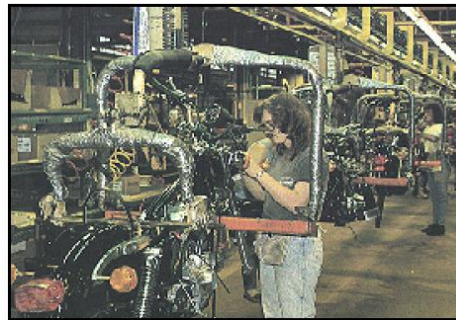
สายการประกอบแบบป้อนเข้าสู่สายการประกอบหลัก (Feeder Lines) เป็นสายการประกอบที่มีการประกอบชิ้นงานรอง แล้วส่งต่อไปที่สายการประกอบของชิ้นงานหลัก เพื่อนำไปประกอบเข้ากับชิ้นงานหลัก จากรูปจะเป็นสายการประกอบเครื่องบิน ประกอบไปด้วยสายการประกอบรอง 4 สาย เพื่อทำการป้อนเข้าสู่สายการประกอบหลัก ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 สายการประกอบแบบป้อนเข้าสู่สายการประกอบหลัก (Betancourt, 2007)

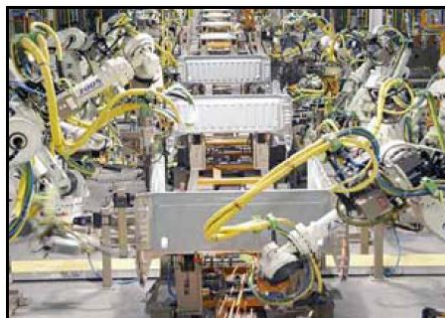
5. แบ่งตามระดับของความอัตโนมัติ

สายการประกอบที่ใช้มนุษย์ดำเนินการ (Manual Lines) ในสายการประกอบนี้ชิ้นงานจะถูกดำเนินการด้วยมนุษย์ทั้งหมด ส่วนใหญ่จะเป็นงานที่ต้องการความละเอียด ความชำนาญเป็นพิเศษ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 สายการประกอบที่ใช้มนุษย์ดำเนินการ (Betancourt, 2007)

สายการประกอบที่ใช้หุ่นยนต์ดำเนินการ (Robotic Lines) สายการประกอบนี้ชิ้นงานจะถูกดำเนินการด้วยหุ่นยนต์ทั้งหมด จะสั่งการหุ่นยนต์โดยการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ให้ดำเนินการตามคำสั่งที่ป้อนเข้าไป ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 สายการประกอบที่ใช้หุ่นยนต์ดำเนินการ (Betancourt, 2007)

2.3 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์

ในการพิจารณาแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ให้มีประสิทธิภาพดีไปพร้อมกัน เป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากวัตถุประสงค์จะมีความขัดแย้งกันในการหาค่าน้อยที่สุดหรือค่าที่มากที่สุด เพราะจะไม่มีคำตอบที่ดีที่สุด (Srinivas and Deb, 2002) (Konak et.al, 2006)

2.3.1 วิธีการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ จึงมีการนำเทคนิคในการค้นหาเซตคำตอบที่อยู่ในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไป (Feasible Region) ได้ทั้งหมด เทคนิคในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) ของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์มีหลายวิธี เช่น วิธีคำนวณค่าแบบเวกเตอร์ (Vector Evaluation Approach) วิธีการรวมฟังก์ชันโดยอาศัยการให้น้ำหนัก (Weighted Sum Approach) วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) เป็นต้น

สิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับสมาชิก ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) ที่มีการจัดอันดับคำตอบแบบพาราเรโต (Pareto Ranking Approach) มาใช้ คำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front) ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ไม่มีคำตอบตัวใดที่ดีกว่ากันหรือไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่น เมื่อทำการหากลุ่มคำตอบที่ดีแล้ว กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้ (นพพล คำภิรมย์, 2551)

- ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีควรจะใกล้เคียงกับขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และควรเป็นเซตย่อยของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

- การกระจายของกลุ่มคำตอบควรมีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) และมีคำตอบที่หลากหลาย
 - กลุ่มคำตอบที่ดีควรจับสเปกตรัมของขอบเขตกลุ่มคำตอบที่แท้จริงได้ทั้งหมด ความหมายคือ สามารถสืบค้นถึงคำตอบที่อยู่ปลายสุดของกลุ่มคำตอบในพื้นที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดได้
- ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุด ดังสมการที่ 2.1

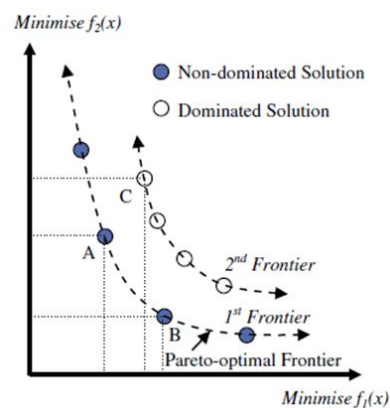
$$\text{Minimize } \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})\} \quad (2.1)$$

โดย \vec{x} คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ

$f_1(\vec{x})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i

ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ y แล้ว จะได้ว่า $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่า $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ และ $f_i(x) < f_i(y)$ มีอย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$

จากภาพที่ 2.15 เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของ 2 ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์พร้อมกัน ลักษณะของกลุ่มคำตอบจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยคำตอบที่อยู่ในเซต A และ B จะเป็นคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์น้อยกว่าคำตอบที่อยู่ในเซต C ทั้งหมด คำตอบในเซต A และ B จึงเป็นคำตอบที่เด่นกว่า (Dominate) คำตอบในเซต C แต่ไม่สามารถบอกได้ว่า เซต คำตอบ A กับ B เซตใดที่เด่นกว่ากันหรือเป็นคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated set) เซต คำตอบของ A และ B จึงเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ในกลุ่มคำตอบ ทั้งหมด



ภาพที่ 2.15 Pareto Optimal Solution (Chutima and Chimklai, 2012)

2.3.2 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

การจัดลำดับการผลิตเป็นการวางแผนผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายเข้าสู่สายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจะมีความแตกต่างกันของเวลาการดำเนินงานของชิ้นงาน ผลิตภัณฑ์บางชนิดก็อาจจะไม่มีการดำเนินงานในบางชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 2.1 ในการจัดลำดับการผลิตนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ ต้องรู้จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความต้องการที่จะผลิตของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต และสายการประกอบที่จัดสมดุลแล้ว ตัวอย่างเช่น มีผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ผลิตภัณฑ์ A, B และ C และมีความต้องการในการผลิต $MPS = 1:2:3$ จะทำการจัดลำดับการผลิตเป็น A B C B C C เวลาที่ใช้ในการประกอบคำนวณได้ดังนี้

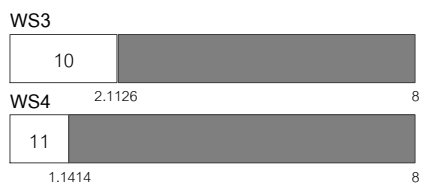
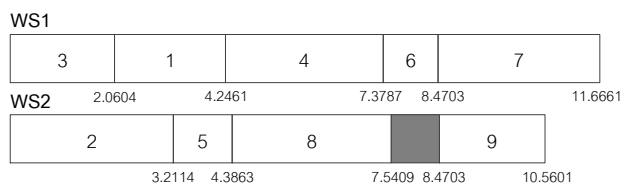
ตารางที่ 2.1 ชิ้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C

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

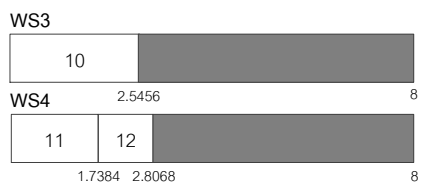
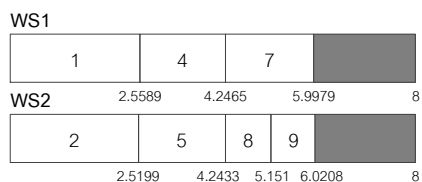
ตารางที่ 2.2 เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์

ชิ้นงาน	เวลาปรับตั้งเครื่อง		
	A	B	C
1	0.1857	0.1988	0.1929
2	0.2114	0.1501	0.2311
3	0.0604	0	0.061
4	0.1326	0.1096	0.1748
5	0.1749	0.1543	0.1338
6	0.0916	0	0.0776
7	0.1958	0.1893	0.1357
8	0.1546	0.1347	0.1623
9	0.0898	0.0873	0
10	0.1126	0.1822	0.1025
11	0.1414	0.1731	0.1781
12	0	0.0684	0.0872

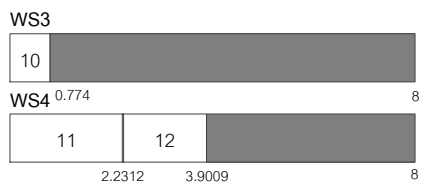
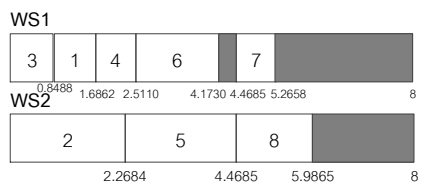
Model A



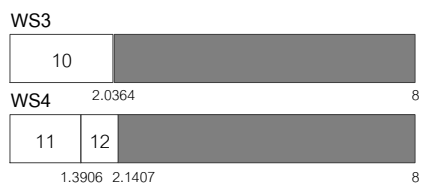
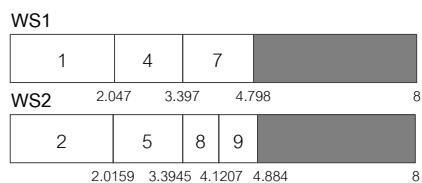
Model B



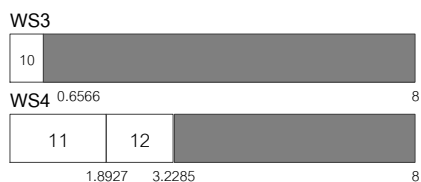
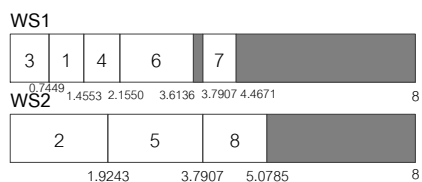
Model C



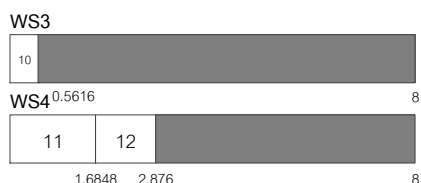
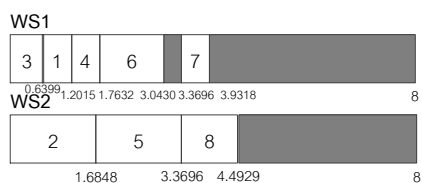
Model B



Model C



Model C



ภาพที่ 2.16 เวลาการประกอบของการจัดลำดับการผลิตแบบ A B C B C C

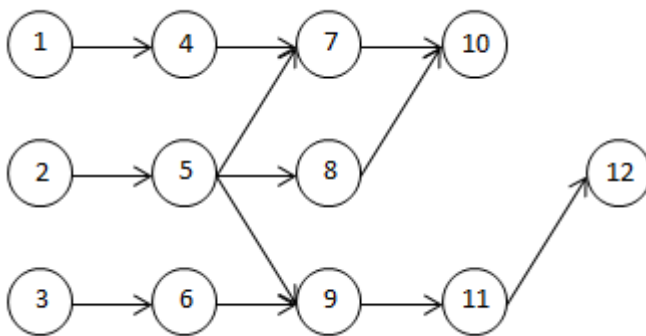
เมื่อทำการจัดสมดุลการประกอบแล้วจะได้ดังนี้



ภาพที่ 2.17 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีความสมดุล

ตารางที่ 2.3 ลำดับการผลิตจากการจัดสมดุล

Task	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WS	1	2	1	1	2	1	1	2	2	3	4	4
Seq	2	5	1	3	6	4	8	7	10	9	11	12



ภาพที่ 2.18 แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A, B และ C

วิธีการวางชิ้นงานเข้าสายการประกอบที่มีความสมดุลแล้ว มีดังนี้

Model A

Seq 1 ชิ้นงานที่ 3 สถานีงานที่ 1 เป็นชิ้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชิ้นงานที่ 3 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ เวลาปรับตั้งเครื่อง+เวลาดำเนินงาน ก็คือ $0.0604+2=2.0604$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ 2.0604

Seq 2 ชิ้นงานที่ 1 สถานีงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชิ้นงานที่ 1 ทำต่อจากชิ้นงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชิ้นงานที่ 1 จึงเท่ากับ 4.2461 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1857+2=2.1857$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $2.0604+2.1857=4.2461$

Seq 3 ชั้นงานที่ 4 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 4 ทำต่อจากชั้นงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 4 จึงเท่ากับ 4.2461 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1326+3=3.1326$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $4.2461+3.1326 = 7.3787$

Seq 4 ชั้นงานที่ 6 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 3 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 6 ทำต่อจากชั้นงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 6 จึงเท่ากับ 7.3787 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.0916+1=1.0916$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $7.3787 + 1.0916=8.4703$

Seq 5 ชั้นงานที่ 2 สถานีงานที่ 2 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 2 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.2114+3=3.2114$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ 3.2114

Seq 6 ชั้นงานที่ 5 สถานีงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 5 ทำต่อจากชั้นงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 5 จึงเท่ากับ 3.2114 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1749+1=1.1749$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $3.2114+1.1749=4.3863$

Seq 7 ชั้นงานที่ 8 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 8 ทำต่อจากชั้นงานที่ 5 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 8 จึงเท่ากับ 4.3863 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1546+3=3.1546$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $4.3863+3.1546 = 7.5409$

Seq 8 ชั้นงานที่ 7 สถานีงานที่ 1 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 4 และ 5 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 7 ทำต่อจากชั้นงานที่ 6 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 7 จึงเท่ากับ 8.4703 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1958+3=3.1958$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $8.4703+3.1958 = 11.6661$

Seq 9 ชั้นงานที่ 10 สถานีงานที่ 3 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 10 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1126+2=2.1126$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 3 เท่ากับ 2.1126

Seq 10 ชั้นงานที่ 9 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 5 และ 6 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 9 ทำต่อจากชั้นงานที่ 8 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 8 เท่ากับ 7.5409 ซึ่งชั้นงานที่ 9 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 6 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 6 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ดำเนินการเสร็จเวลา 8.4703 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 9 จึงเท่ากับ 8.4703 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.0898+2=2.0898$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $8.4703+2.0898=10.5601$

Seq 11 ชั้นงานที่ 11 สถานีงานที่ 4 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 11 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1414+1=1.1414$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ 1.1414

Seq 12 ชั้นงานที่ 12 สถานีงานที่ 4 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 11 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 12 ทำต่อจากชั้นงานที่ 11 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 12 จึงเท่ากับ 1.1414 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 12 ในสถานีงานที่ 4 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ $1.1414+0=1.1414$ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

Model B

Seq 1 ชั้นงานที่ 3 สถานีงานที่ 1 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 3 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ B ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 3 ในสถานีงานที่ 1 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ 0

Seq 2 ชั้นงานที่ 1 สถานีงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 1 ทำต่อจากชั้นงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 1 จึงเท่ากับ 0 ซึ่งเวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 1 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A จึงมีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นเวลาปรับตั้งเครื่องจึงเท่ากับ $0.1988 \times 2^{-0.322} = 0.1590$ เวลาดำเนินการจึงเท่ากับ $3 \times 2^{-0.322} = 2.3998$ เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.1590+2.3998= 2.5589$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0+2.5589$

Seq 3 ชั้นงานที่ 4 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 4 ทำต่อจากชั้นงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 4 จึงเท่ากับ 2.5589 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1096 \times 2^{-0.322})+(2 \times 2^{-0.322})=1.6876$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $2.5589+1.6876=4.2465$

Seq 4 ชั้นงานที่ 6 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 3 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 6 ทำต่อจากชั้นงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 6 จึงเท่ากับ 4.2465 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ B ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 6 ในสถานีงานที่ 1 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0+4.2465=4.2465$

Seq 5 ชั้นงานที่ 2 สถานีงานที่ 2 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 2 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1501 \times 2^{-0.322})+(3 \times 2^{-0.322})=2.52$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ 2.52

Seq 6 ชั้นงานที่ 5 สถานีงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 5 ทำต่อจากชั้นงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 5 จึงเท่ากับ 2.52 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1543 \times 2^{-0.322})+(2 \times 2^{-0.322})=1.7234$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $2.52+1.7234=4.2434$

Seq 7 ชั้นงานที่ 8 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 8 ทำต่อจากชั้นงานที่ 5 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 8 จึงเท่ากับ 4.2434 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1347 \times 2^{-0.322}) + (1 \times 2^{-0.322}) = 0.9077$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $4.2434 + 0.9077 = 5.1511$

Seq 8 ชั้นงานที่ 7 สถานีงานที่ 1 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 4 และ 5 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 7 ทำต่อจากชั้นงานที่ 6 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 7 จึงเท่ากับ 4.2465 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1893 \times 2^{-0.322}) + (2 \times 2^{-0.322}) = 1.7514$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $4.2465 + 1.7514 = 5.9979$

Seq 9 ชั้นงานที่ 10 สถานีงานที่ 3 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 10 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1822 \times 2^{-0.322}) + (3 \times 2^{-0.322}) = 2.5456$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 3 เท่ากับ 2.5456

Seq 10 ชั้นงานที่ 9 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 5 และ 6 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 9 ทำต่อจากชั้นงานที่ 8 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 8 เท่ากับ 5.1511 ซึ่งชั้นงานที่ 9 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 6 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 6 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ไม่มีการดำเนินงาน เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 9 จึงเท่ากับ 5.1511 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0873 \times 2^{-0.322}) + (1 \times 2^{-0.322}) = 0.8698$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $5.1511 + 0.8698 = 6.0209$

Seq 11 ชั้นงานที่ 11 สถานีงานที่ 4 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 11 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1731 \times 2^{-0.322}) + (2 \times 2^{-0.322}) = 1.7384$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ 1.7384

Seq 12 ชั้นงานที่ 12 สถานีงานที่ 4 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 11 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 12 ทำต่อจากชั้นงานที่ 11 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 12 จึงเท่ากับ 1.7384 เวลาในการประกอบเท่ากับ $0.0684 + 1 = 1.0684$ เนื่องจากชั้นที่ 12 ดำเนินงานเป็นครั้งแรกจึงไม่มีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้น เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ $1.7384 + 1.0684 = 2.8068$ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

Model C

Seq 1 ชั้นงานที่ 3 สถานีงานที่ 1 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 3 จึงเท่ากับ 0 เวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 1 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 1 ได้เคย

ดำเนินการมาแล้วใน Model A จึงมีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้นแล้ว เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0061 \times 2^{-0.322}) + (1 \times 2^{-0.322}) = 0.8488$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ 0.8488

Seq 2 ชั้นงานที่ 1 สถานีงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 1 ทำต่อจากชั้นงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 1 จึงเท่ากับ 0.8488 ซึ่งเวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 1 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A และ B เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1929 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.8375$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0.8488 + 0.8375 = 1.6862$

Seq 3 ชั้นงานที่ 4 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 4 ทำต่อจากชั้นงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 4 จึงเท่ากับ 1.6862 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1748 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.8248$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $1.6862 + 0.8248 = 2.511$

Seq 4 ชั้นงานที่ 6 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 3 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 6 ทำต่อจากชั้นงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 6 จึงเท่ากับ 2.511 ชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0776 \times 2^{-0.322}) + (2 \times 2^{-0.322}) = 1.662$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $2.511 + 1.662 = 4.1730$

Seq 5 ชั้นงานที่ 2 สถานีงานที่ 2 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 2 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.2311 \times 3^{-0.322}) + (3 \times 3^{-0.322}) = 2.2684$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ 2.2684

Seq 6 ชั้นงานที่ 5 สถานีงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 5 ทำต่อจากชั้นงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 5 จึงเท่ากับ 2.2684 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1338 \times 3^{-0.322}) + (3 \times 3^{-0.322}) = 2.2001$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $2.2684 + 2.2001 = 4.4685$

Seq 7 ชั้นงานที่ 8 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 8 ทำต่อจากชั้นงานที่ 5 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 8 จึงเท่ากับ 4.4685 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1623 \times 3^{-0.322}) + (2 \times 3^{-0.322}) = 1.5180$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $4.4685 + 1.5180 = 5.9865$

Seq 8 ชั้นงานที่ 7 สถานีงานที่ 1 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 4 และ 5 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 7 ทำต่อจากชั้นงานที่ 6 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 6 เท่ากับ 4.1730 ซึ่งชั้นงานที่ 7 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 5 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 5 อยู่ในสถานีงานที่ 2 ดำเนินการเสร็จเวลา 4.4685 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 7 จึงเท่ากับ 4.4685 เวลาในการประกอบ

เท่ากับ $(0.1357 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.7973$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $4.4685 + 0.7973 = 5.2658$

Seq 9 ชั้นงานที่ 10 สถานีงานที่ 3 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 10 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1025 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.774$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 3 เท่ากับ 0.774

Seq 10 ชั้นงานที่ 9 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 5 และ 6 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 9 ทำต่อจากชั้นงานที่ 8 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 8 เท่ากับ 5.1511 ซึ่งชั้นงานที่ 9 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 6 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 6 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ดำเนินการเสร็จเวลา 4.1730 ซึ่งน้อยกว่าเวลาเสร็จงานของชั้นที่ 5 เวลา 5.9865 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 9 จึงเท่ากับ 5.9865 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ C ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 9 ในสถานีงานที่ 2 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $5.9865 + 0 = 5.9865$

Seq 11 ชั้นงานที่ 11 สถานีงานที่ 4 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 11 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1781 \times 3^{-0.322}) + (3 \times 3^{-0.322}) = 2.2312$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ 2.2312

Seq 12 ชั้นงานที่ 12 สถานีงานที่ 4 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 11 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 12 ทำต่อจากชั้นงานที่ 11 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 12 จึงเท่ากับ 2.2312 ชั้นงานที่ 12 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model B เวลาในการประกอบเท่ากับเวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0872 \times 2^{-0.322}) + (2 \times 2^{-0.322}) = 1.6697$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ $2.2312 + 1.6697 = 3.9009$ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

Model B

Seq 1 ชั้นงานที่ 3 สถานีงานที่ 1 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 3 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ B ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 3 ในสถานีงานที่ 1 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ 0

Seq 2 ชั้นงานที่ 1 สถานีงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 1 ทำต่อจากชั้นงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 1 จึงเท่ากับ 0 ซึ่งเวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 1 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A, B และ C จึงมีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้นแล้ว เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1988 \times 4^{-0.322}) + (3 \times 4^{-0.322}) = 2.047$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0 + 2.047 = 2.047$

Seq 3 ชั้นงานที่ 4 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 1 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 4 ทำต่อจากชั้นงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 4 จึงเท่ากับ 2.047 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1096 \times 4^{-0.322}) + (2 \times 4^{-0.322}) = 1.35$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $2.047 + 1.35 = 3.397$

Seq 4 ชั้นงานที่ 6 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 3 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 6 ทำต่อจากชั้นงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 6 จึงเท่ากับ 3.397 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ B ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 6 ในสถานีงานที่ 1 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0 + 3.397 = 3.397$

Seq 5 ชั้นงานที่ 2 สถานีงานที่ 2 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 2 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1501 \times 4^{-0.322}) + (3 \times 4^{-0.322}) = 2.0159$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ 2.0159

Seq 6 ชั้นงานที่ 5 สถานีงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 5 ทำต่อจากชั้นงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 5 จึงเท่ากับ 2.0159 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1543 \times 4^{-0.322}) + (2 \times 4^{-0.322}) = 1.3786$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $2.0159 + 1.7234 = 3.3945$

Seq 7 ชั้นงานที่ 8 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 8 ทำต่อจากชั้นงานที่ 5 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 8 จึงเท่ากับ 3.3945 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1347 \times 4^{-0.322}) + (1 \times 4^{-0.322}) = 0.7261$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $3.3945 + 0.7261 = 4.1207$

Seq 8 ชั้นงานที่ 7 สถานีงานที่ 1 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 4 และ 5 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 7 ทำต่อจากชั้นงานที่ 6 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 7 จึงเท่ากับ 3.397 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1893 \times 4^{-0.322}) + (2 \times 4^{-0.322}) = 1.401$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $3.397 + 1.401 = 4.798$

Seq 9 ชั้นงานที่ 10 สถานีงานที่ 3 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 10 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1822 \times 4^{-0.322}) + (3 \times 4^{-0.322}) = 2.0364$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 3 เท่ากับ 2.0364

Seq 10 ชั้นงานที่ 9 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 5 และ 6 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 9 ทำต่อจากชั้นงานที่ 8 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 8 เท่ากับ 4.1207 ซึ่งชั้นงานที่ 9 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 6 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 6 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ไม่มีการดำเนินงาน เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 9 จึงเท่ากับ 4.1207 เวลาในการประกอบเท่ากับ

$(0.0873 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.7633$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $4.1207 + 0.7633 = 4.884$

Seq 11 ชั้นงานที่ 11 สถานีงานที่ 4 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 11 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1731 \times 4^{-0.322}) + (2 \times 4^{-0.322}) = 1.3906$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ 1.3906

Seq 12 ชั้นงานที่ 12 สถานีงานที่ 4 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 11 ในการจัดสมดุลงานที่ 12 ทำต่อจากชั้นงานที่ 11 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 12 จึงเท่ากับ 1.3906 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0684 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.7501$ เนื่องจากชั้นที่ 12 ดำเนินงานเป็นครั้งแรก จึงไม่มีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้น เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ $1.3906 + 0.7501 = 2.1407$ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

Model C

Seq 1 ชั้นงานที่ 3 สถานีงานที่ 1 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 3 จึงเท่ากับ 0 เวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 3 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 3 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A จึงมีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้นแล้ว เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.061 \times 3^{-0.322}) + (1 \times 3^{-0.322}) = 0.7449$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ 0.7449

Seq 2 ชั้นงานที่ 1 สถานีงานที่ 1 ในการจัดสมดุลงานที่ 1 ทำต่อจากชั้นงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 1 จึงเท่ากับ 0.7449 ซึ่งเวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 1 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A และ B เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1929 \times 5^{-0.322}) + (1 \times 5^{-0.322}) = 0.7105$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0.7449 + 0.7105 = 1.4553$

Seq 3 ชั้นงานที่ 4 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 1 ในการจัดสมดุลงานที่ 4 ทำต่อจากชั้นงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 4 จึงเท่ากับ 1.4553 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1748 \times 5^{-0.322}) + (1 \times 5^{-0.322}) = 0.6997$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $1.4553 + 0.6997 = 2.155$

Seq 4 ชั้นงานที่ 6 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 3 ในการจัดสมดุลงานที่ 6 ทำต่อจากชั้นงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 6 จึงเท่ากับ 2.155 ชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0776 \times 3^{-0.322}) + (2 \times 3^{-0.322}) = 1.4586$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $2.155 + 1.4586 = 3.6136$

Seq 5 ชั้นงานที่ 2 สถานีงานที่ 2 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 2 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.2311 \times 5^{-0.322}) + (3 \times 5^{-0.322}) = 1.9243$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ 1.9243

Seq 6 ชั้นงานที่ 5 สถานีงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 5 ทำต่อจากชั้นงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 5 จึงเท่ากับ 1.9243 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1338 \times 5^{-0.322}) + (3 \times 5^{-0.322}) = 1.8664$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $1.9243 + 1.8664 = 3.7907$

Seq 7 ชั้นงานที่ 8 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 8 ทำต่อจากชั้นงานที่ 5 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 8 จึงเท่ากับ 3.7907 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1623 \times 5^{-0.322}) + (2 \times 5^{-0.322}) = 1.2878$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $3.7907 + 1.2878 = 5.0785$

Seq 8 ชั้นงานที่ 7 สถานีงานที่ 1 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 4 และ 5 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 7 ทำต่อจากชั้นงานที่ 6 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 6 เท่ากับ 3.6136 ซึ่งชั้นงานที่ 7 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 5 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 5 อยู่ในสถานีงานที่ 2 ดำเนินการเสร็จเวลา 3.7907 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 7 จึงเท่ากับ 3.7907 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1357 \times 5^{-0.322}) + (1 \times 5^{-0.322}) = 0.6764$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $3.7907 + 0.6764 = 4.4671$

Seq 9 ชั้นงานที่ 10 สถานีงานที่ 3 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 10 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1025 \times 5^{-0.322}) + (1 \times 5^{-0.322}) = 0.6566$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 3 เท่ากับ 0.6566

Seq 10 ชั้นงานที่ 9 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 5 และ 6 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 9 ทำต่อจากชั้นงานที่ 8 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 8 เท่ากับ 5.0785 ซึ่งชั้นงานที่ 9 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 6 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 6 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ดำเนินการเสร็จเวลา 3.6136 ซึ่งน้อยกว่าเวลาเสร็จงานของชั้นที่ 5 เวลา 3.7907 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 9 จึงเท่ากับ 5.0785 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ C ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 9 ในสถานีงานที่ 2 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $5.0785 + 0 = 5.0785$

Seq 11 ชั้นงานที่ 11 สถานีงานที่ 4 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 11 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.1781 \times 5^{-0.322}) + (3 \times 5^{-0.322}) = 1.8928$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ 1.8928

Seq 12 ชั้นงานที่ 12 สถานีงานที่ 4 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 11 ในการจัดสมดุลงานที่ 12 ทำต่อจากชั้นงานที่ 11 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 12 จึงเท่ากับ 1.8928 ชั้นงานที่ 12 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model B เวลาในการประกอบเท่ากับเวลาในการประกอบเท่ากับ $(0.0872 \times 4^{-0.322}) + (2 \times 4^{-0.322}) = 1.3357$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ $1.8928 + 1.3357 = 3.2285$ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

เนื่องจาก Model ต่อไปเป็น Model C เหมือนกันทำให้ไม่ต้องมีการปรับตั้งเครื่องอีกครั้งจึงคิดแต่ค่าเวลาการดำเนินการเท่านั้น ดังนี้

Model C

Seq 1 ชั้นงานที่ 3 สถานีงานที่ 1 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 3 จึงเท่ากับ 0 ชั้นงานที่ 3 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A จึงมีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้นแล้ว เวลาในการประกอบเท่ากับ $(1 \times 4^{-0.322}) = 0.6399$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ 0.6399

Seq 2 ชั้นงานที่ 1 สถานีงานที่ 1 ในการจัดสมดุลงานที่ 1 ทำต่อจากชั้นงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 1 จึงเท่ากับ 0.6399 ซึ่งเวลาปรับตั้งเครื่องของชั้นงานที่ 1 และเวลาดำเนินการของชั้นงานที่ 1 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A และ B เวลาในการประกอบเท่ากับ $(1 \times 6^{-0.322}) = 0.5616$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $0.6399 + 0.5616 = 1.2015$

Seq 3 ชั้นงานที่ 4 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 1 ในการจัดสมดุลงานที่ 4 ทำต่อจากชั้นงานที่ 1 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 4 จึงเท่ากับ 1.2015 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(1 \times 6^{-0.322}) = 0.5616$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $1.2015 + 0.5616 = 1.7632$

Seq 4 ชั้นงานที่ 6 สถานีงานที่ 1 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 3 ในการจัดสมดุลงานที่ 6 ทำต่อจากชั้นงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 6 จึงเท่ากับ 1.7632 ชั้นงานที่ 6 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model A เวลาในการประกอบเท่ากับ $(2 \times 4^{-0.322}) = 1.2799$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $1.7632 + 1.2799 = 3.043$

Seq 5 ชั้นงานที่ 2 สถานีงานที่ 2 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 2 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(3 \times 3^{-0.322}) = 1.6848$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ 1.6848

Seq 6 ชั้นงานที่ 5 สถานีงานที่ 2 ในการจัดสมดุลงานที่ 5 ทำต่อจากชั้นงานที่ 2 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 5 จึงเท่ากับ 1.6848 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(3 \times 5^{-0.322}) = 1.6848$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $1.6848 + 1.6848 = 3.3696$

Seq 7 ชั้นงานที่ 8 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 2 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 8 ทำต่อจากชั้นงานที่ 5 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 8 จึงเท่ากับ 3.3696 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(2 \times 6^{-0.322}) = 1.1232$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $3.3696 + 1.1232 = 4.4929$

Seq 8 ชั้นงานที่ 7 สถานีงานที่ 1 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 4 และ 5 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 7 ทำต่อจากชั้นงานที่ 6 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 6 เท่ากับ 3.043 ซึ่งชั้นงานที่ 7 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 5 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 5 อยู่ในสถานีงานที่ 2 ดำเนินการเสร็จเวลา 3.3696 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 7 จึงเท่ากับ 3.3696 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(1 \times 6^{-0.322}) = 0.5616$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 1 เท่ากับ $3.3696 + 0.5616 = 3.9312$

Seq 9 ชั้นงานที่ 10 สถานีงานที่ 3 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 3 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 10 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(1 \times 6^{-0.322}) = 0.5616$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 3 เท่ากับ 0.5616

Seq 10 ชั้นงานที่ 9 สถานีงานที่ 2 มีชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 5 และ 6 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 9 ทำต่อจากชั้นงานที่ 8 แต่เวลาประกอบเสร็จของชั้นงานที่ 8 เท่ากับ 4.4929 ซึ่งชั้นงานที่ 9 ไม่สามารถดำเนินการได้ต้องรอให้ชั้นงานที่ 6 เสร็จแล้วซึ่งชั้นงานที่ 6 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ดำเนินการเสร็จเวลา 3.3043 ซึ่งน้อยกว่าเวลาเสร็จงานของชั้นที่ 5 เวลา 3.3696 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 9 จึงเท่ากับ 4.4929 เวลาในการประกอบเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ C ในชั้นงานนี้ จึงไม่มีชั้นงานที่ 9 ในสถานีงานที่ 2 เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 2 เท่ากับ $4.4929 + 0 = 4.4929$

Seq 11 ชั้นงานที่ 11 สถานีงานที่ 4 เป็นชั้นงานแรกที่วางในสถานีงานที่ 4 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 11 จึงเท่ากับ 0 เวลาในการประกอบเท่ากับ $(3 \times 6^{-0.322}) = 1.6848$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ 1.6848

Seq 12 ชั้นงานที่ 12 สถานีงานที่ 4 ชั้นงานลำดับก่อนหน้าคือ ชั้นงานที่ 11 ในการจัดสมดุลชั้นงานที่ 12 ทำต่อจากชั้นงานที่ 11 เวลาเริ่มงานของชั้นงานที่ 12 จึงเท่ากับ 1.6848 ชั้นงานที่ 12 ได้เคยดำเนินการมาแล้วใน Model B เวลาในการประกอบเท่ากับเวลาในการประกอบเท่ากับ $(2 \times 5^{-0.322}) = 1.1911$ เวลาดำเนินการรวมของสถานีที่ 4 เท่ากับ $1.6848 + 1.1911 = 2.8759$ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.4 เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model A

Model A									
Seq.	Task	Work Station	Precedent task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly time			Total time in WS
						Setup time	Operation time	Total	
1	3	1	-	0	0	0.0604	2	2.0604	2.0604
2	1	1	-	0	2.0604	0.1857	2	2.1857	4.2461
3	4	1	1	4.2461	4.2461	0.1326	3	3.1326	7.3787
4	6	1	3	2.0604	7.3787	0.0916	1	1.0916	8.4703
5	2	2	-	0	0	0.2114	3	3.2114	3.2114
6	5	2	2	3.2114	3.2114	0.1749	1	1.1749	4.3863
7	8	2	5	4.3863	4.3863	0.1546	3	3.1546	7.5409
8	7	1	4,5	7.3787,4.3863	8.4703	0.1958	3	3.1958	11.6661
9	10	3	7,8	11.6661,7.5409	0	0.1126	2	2.1126	2.1126
10	9	2	5,6	4.3863,8.4703	8.4703	0.0898	2	2.0898	10.5601
11	11	4	9	10.5601	0	0.1414	1	1.1414	1.1414
12	12	4	11	1.1414	1.1414	0	0	0	1.1414

ตารางที่ 2.5 เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model B

Model B									
Seq.	Task	Work Station	Precedent task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly time			Total time in WS
						Setup time	Operation time	Total	
1	3	1	-	0	0	0	0	0	0
2	1	1	-	0	0	0.1590	2.3999	2.5589	2.5589
3	4	1	1	2.5589	2.5589	0.0877	1.5999	1.6876	4.2465
4	6	1	3	0	4.2465	0.0000	0.0000	0.0000	4.2465
5	2	2	-	0	0	0.1201	2.3999	2.5200	2.5200
6	5	2	2	2.52	2.52	0.1234	1.5999	1.7234	4.2434
7	8	2	5	4.2434	4.2434	0.1078	0.8000	0.9077	5.1511
8	7	1	4,5	4.2465,4.2434	4.2465	0.1514	1.5999	1.7514	5.9979
9	10	3	7,8	5.9979,5.1511	0	0.1458	2.3999	2.5456	2.5456
10	9	2	5,6	4.2434,4.2465	5.1511	0.0698	0.8000	0.8698	6.0209
11	11	4	9	6.0209	0	0.1385	1.5999	1.7384	1.7384
12	12	4	11	1.7384	1.7384	0.0684	1.0000	1.0684	2.8068

ตารางที่ 2.6 เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model C

Model C									
Seq.	Task	Work Station	Precedent task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly time			Total time in WS
						Setup time	Operation time	Total	
1	3	1	-	0	0	0.0488	0.8000	0.8488	0.8488
2	1	1	-	0	0.8488	0.1354	0.7020	0.8375	1.6862
3	4	1	1	1.6862	2.5589	0.1227	0.7020	0.8248	2.5110
4	6	1	3	0.8488	2.511	0.0621	1.5999	1.6620	4.1730
5	2	2	-	0	0	0.1622	2.1061	2.2684	2.2684
6	5	2	2	2.2684	2.2684	0.093934	2.1061	2.2001	4.4685
7	8	2	5	4.4685	4.4685	0.113942	1.4041	1.5180	5.9865
8	7	1	4,5	2.5110,4.4685	4.4685	0.0953	0.7020	0.7973	5.2658
9	10	3	7,8	5.2658,6.0024	0	0.0720	0.7020	0.7740	0.7740
10	9	2	5,6	4.4685,4.1730	5.9865	0.0000	0.0000	0.0000	5.9865
11	11	4	9	6.0024	0	0.1250	2.1061	2.2312	2.2312
12	12	4	11	2.2312	2.2312	0.0698	1.5999	1.6697	3.9009

ตารางที่ 2.7 เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model B

Model B									
Seq.	Task	Work Station	Precedent task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly time			Total time in WS
						Setup time	Operation time	Total	
1	3	1	-	0	0	0	0	0	0
2	1	1	-	0	0	0.1272	1.9198	2.0470	2.0470
3	4	1	1	2.047	2.047	0.0701	1.2799	1.3500	3.3970
4	6	1	3	3.397	3.397	0.0000	0.0000	0.0000	3.3970
5	2	2	-	0	0	0.0961	1.9198	2.0159	2.0159
6	5	2	2	2.0159	2.0159	0.0987	1.2799	1.3786	3.3945
7	8	2	5	3.3945	3.3945	0.0862	0.6399	0.7261	4.1207
8	7	1	4,5	3.3970,3.3945	3.397	0.1211	1.2799	1.4010	4.7980
9	10	3	7,8	4.7980,4.1207	0	0.1166	1.9198	2.0364	2.0364
10	9	2	5,6	3.3945,3.3970	4.1207	0.0613	0.7020	0.7633	4.8840
11	11	4	9	4.884	0	0.1108	1.2799	1.3906	1.3906
12	12	4	11	1.3906	1.3906	0.0480	0.7020	0.7501	2.1407

ตารางที่ 2.8 เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model C

Model C									
Seq.	Task	Work Station	Precedent task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly time			Total time in WS
						Setup time	Operation time	Total	
1	3	1	-	0	0	0.0428	0.7020	0.7449	0.7449
2	1	1	-	0	0.7449	0.1149	0.5956	0.7105	1.4553
3	4	1	1	1.4553	1.4553	0.1041	0.5956	0.6997	2.1550
4	6	1	3	0.7449	2.155	0.0545	1.4041	1.4586	3.6136
5	2	2	-	0	0	0.1376	1.7867	1.9243	1.9243
6	5	2	2	1.9243	1.9243	0.079687	1.7867	1.8664	3.7907
7	8	2	5	3.7907	3.7907	0.096661	1.1911	1.2878	5.0785
8	7	1	4,5	2.1550,3.7907	3.7907	0.0808	0.5956	0.6764	4.4671
9	10	3	7,8	4.4671,5.0785	0	0.0610	0.5956	0.6566	0.6566
10	9	2	5,6	3.7907,3.3924	5.0785	0.0000	0.0000	0.0000	5.0785
11	11	4	9	5.0785	0	0.1061	1.7867	1.8928	1.8928
12	12	4	11	1.8928	1.8928	0.0558	1.2799	1.3357	3.2285

ตารางที่ 2.9 เวลาการประกอบของลำดับการผลิต Model C

Model C									
Seq.	Task	Work Station	Precedent task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly time			Total time in WS
						Setup time	Operation time	Total	
1	3	1	-	0	0	0	0.6399	0.6399	0.6399
2	1	1	-	0	0.679	0	0.5616	0.5616	1.2015
3	4	1	1	1.2015	1.2015	0	0.5616	0.5616	1.7632
4	6	1	3	0.6399	1.7632	0	1.2799	1.2799	3.0430
5	2	2	-	0	0	0	1.6848	1.6848	1.6848
6	5	2	2	1.6848	1.6848	0	1.6848	1.6848	3.3696
7	8	2	5	3.3696	3.3696	0	1.1232	1.1232	4.4929
8	7	1	4,5	1.7632,3.3696	3.3696	0	0.5616	0.5616	3.9312
9	10	3	7,8	3.9312,4.4929	0	0	0.5616	0.5616	0.5616
10	9	2	5,6	3.3696,3.0430	4.4929	0	0.0000	0.0000	4.4929
11	11	4	9	4.4929	0	0	1.6848	1.6848	1.6848
12	12	4	11	1.6848	1.6848	0	1.1911	1.1911	2.8759

2.3.3 วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับการผลิต (Objective Function)

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates) ดังสมการที่ (2.2)
- ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work) ดังสมการที่ (2.3)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time) ดังสมการที่ (2.4)

Minimize $\{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\}$

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \left[x_{im} - i \frac{d_m}{I} \right]^2 \quad (2.2)$$

$$f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} (\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m} / v_c) \quad (2.3)$$

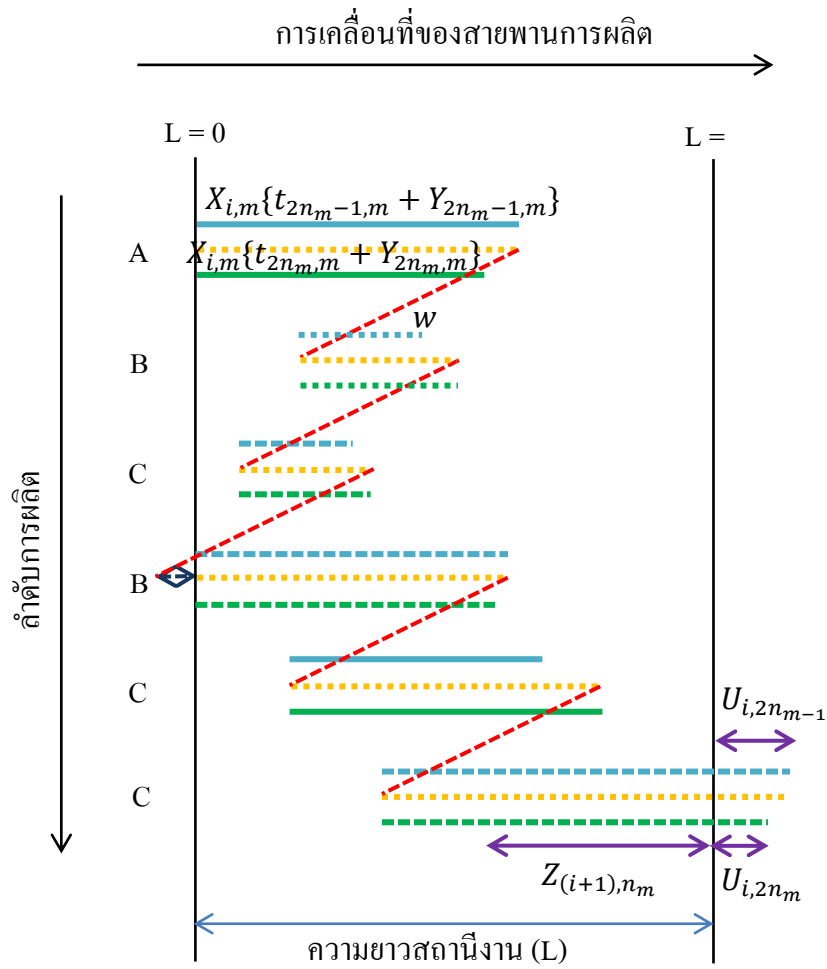
เมื่อ

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

$Z_{(i+1),n_m} =$

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

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M s_i t_m \quad (2.4)$$



- ระยะทางของการทำงานคู่สถานีงานด้านซ้าย
- ระยะทางของการทำงานคู่สถานีงานด้านขวา
- ระยะทางที่มากที่สุดของคู่สถานีงาน
- ↔ ระยะทางที่งานไม่เสร็จ (Distance Utility Work)
- ↔ ระยะทางเดินเปล่า (Distance Idle Time)

ภาพที่ 2.19 ตัวอย่างการไหลของสถานีงาน และปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ (Utility Work)

กำหนดให้

$f_1(x)$ คือ ความผันแปรในการผลิตในลำดับการผลิต

$f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิต

$f_3(x)$ คือ เวลาของการปรับตั้งเครื่อง

CT คือ รอบเวลาการผลิตทั้งหมดของแต่ละผลิตภัณฑ์

n_m คือ คู่สถานีงาน (Mated Station) โดย $n_m = 1, 2, \dots, n_m$

n_w คือ คู่สถานีงานด้านซ้ายและด้านขวา $n_w = 2n_m - 1$ และ $2n_m$ โดย $n_w = 1, 2, \dots, n_w = 2n_m$

M คือ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตทั้งหมด

d_m คือ ความต้องการของผลิตภัณฑ์ m โดย $m = 1, 2, \dots, M$

I คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของทุกผลิตภัณฑ์ หรือความต้องการในการผลิตทั้งหมดในทุกผลิตภัณฑ์ โดย $I = \sum_{m=1}^M d_m$

T คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของการผลิตหนึ่งรอบเวลาการผลิต หรือหนึ่งรอบ Model Sequence โดยที่

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

$t_{2n_m-1,m}$ และ $t_{2n_m,m}$ คือ เวลาดำเนินการ (Processing Time) ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่คู่สถานีงานด้านซ้ายและด้านขวา โดยที่ $t_{2n_m-1,m}$ และ $t_{2n_m,m} = p_{k,m} + t_{k,m}$

$p_{k,m}$ คือ เวลาดำเนินงาน (Processing Time) ในชั้นงาน k ของผลิตภัณฑ์ m

t_m คือ เวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักร ซึ่งจะมีแต่ละชั้นงาน k ของแต่ละผลิตภัณฑ์ m จะได้เป็น $t_{k,m}$

k คือ ชั้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์

$Y_{2n_m-1,m}$ และ $Y_{2n_m,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมด เนื่องมาจากลำดับก่อนหน้าของชั้นงานของผลิตภัณฑ์ m ที่คู่สถานีงานด้านซ้ายและด้านขวา

γ คือ ช่วงเวลาการปล่อย (Launch Interval) ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายพานการผลิต

โดยที่ $\gamma = T / (I * N_M)$

w คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงานเพื่อเริ่มต้นผลิตผลิตภัณฑ์ถัดไป โดยที่

$$w = \gamma \times v_c$$

v_c คือ ความเร็วของสายพานการผลิต

s_i คือ การปรับตั้งเครื่อง ถ้า $s_i = 1$ เมื่อมีการปรับตั้งเครื่องเกิดขึ้น และ $s_i = 0$ เมื่อไม่มีการปรับตั้งเครื่องเกิดขึ้น

$x_{i,m}$ คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่ถูกผลิตในลำดับการผลิต i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, I$

U_{i,n_m} คือ ปริมาณของ Utility Work (งานที่ทำไม่เสร็จ) ของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m

$Z_{(i+1),n_m}$ คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m

$x_{i,m}$ คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตในลำดับที่ i โดยที่ $x_{i,m} = 1$ เมื่อผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i เป็นผลิตภัณฑ์ชนิด m และ $x_{i,m} = 0$ เมื่อผลิตภัณฑ์ในลำดับที่ i ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ชนิด m

L_j คือ ความยาวของสถานีงาน j

1. ความแปรผันในการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)

$$\text{จากสมการที่ (2.2)} \quad f_1(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \left[x_{im} - i \frac{d_m}{I} \right]^2$$

ตัวอย่างการคำนวณกำหนดให้ Model Sequence = A B C B C C

ผลิตภัณฑ์ (M) 3 ชนิด $\therefore I = \sum_{m=1}^3 d_m = 1 + 2 + 3 = 6$

ตารางที่ 2.10 ชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C

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

ตารางที่ 2.11 Model Sequences ในแต่ละชั้นงาน

ชั้นงาน	Model Sequences					
1	A	B	C	B	C	C
2	A	B	C	B	C	C
3	A	C	C	C	-	-
4	A	B	C	B	C	C
5	A	B	C	B	C	C
6	A	C	C	C	-	-
7	A	B	C	B	C	C
8	A	B	C	B	C	C
9	A	B	B	-	-	-
10	A	B	C	B	C	C
11	A	B	C	B	C	C
12	B	C	B	C	C	-

จากตารางที่ 2.11 จะทราบว่าในแต่ละชั้นงานจะมีจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตทั้งหมดเป็นเท่าไร เช่น ในชั้นงานที่ 1 มีจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 6 คือ A B C B C C ส่วนชั้นงานที่ 3 มีจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ต้องผลิตเท่ากับ 4 คือ A C C C จากทั้งหมดเท่ากับ 6 เนื่องจากในชั้นงานที่ 3 ไม่มีเวลาการดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ B ความแปรผันของการผลิตจะเริ่มคำนวณตั้งแต่ชั้นงานที่ 1 จนถึงชั้นงานสุดท้าย ดังนี้

ความแปรผันของการผลิตชั้นงานที่ 1

ลำดับ ที่ (i)	x_{im}			$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$			Product Scheduled	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	A	B	C		
1	1	0	0	$1*(1/6)=0.17$	$1*(2/6)=0.33$	$1*(3/6)=0.5$	1	1.0556
2	1	1	0	$2*(1/6)=0.33$	$2*(2/6)=0.67$	$2*(3/6)=1$	2	1.5556
3	1	1	1	$3*(1/6)=0.5$	$3*(2/6)=1$	$3*(3/6)=1.5$	3	0.5
4	1	2	1	$4*(1/6)=0.67$	$4*(2/6)=1.33$	$4*(3/6)=2$	2	1.5556
5	1	2	2	$5*(1/6)=0.83$	$5*(2/6)=1.67$	$5*(3/6)=2.5$	3	0.3889
6	1	2	3	$6*(1/6)=1$	$6*(2/6)=2$	$6*(3/6)=3$	3	0
ความแปรผันของการผลิตของชั้นที่ 1 $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$								5.0556

จากตาราง Model Sequences ความแปรผันของการผลิตชั้นงานที่ 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 และ 11 เท่ากัน

ความแปรผันของการผลิตชั้นงานที่ 3

ลำดับ ที่ (i)	x_{im}			$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$			Product Scheduled	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	A	B	C		
1	1	0	0	$1*(1/4)=0.25$	$1*(0/4)=0$	$1*(3/4)=0.75$	1	1.125
2	1	0	1	$2*(1/4)=0.5$	$2*(0/4)=0$	$2*(3/4)=1.5$	3	0.5
3	1	0	2	$3*(1/4)=0.75$	$3*(0/4)=0$	$3*(3/4)=2.25$	3	0.125
4	1	0	3	$4*(1/4)=1$	$4*(0/4)=0$	$4*(3/4)=3$	3	0
ความแปรผันของการผลิตของชั้นที่ 3 $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$								1.75

จากตาราง Model Sequences ความแปรผันของการผลิตชั้นงานที่ 3 และ 6 เท่ากัน

ความแปรผันของการผลิตชิ้นงานที่ 9

ลำดับ ที่(i)	x_{im}			$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$			Product Scheduled	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	A	B	C		
1	1	0	0	$1*(1/3)=0.33$	$1*(2/3)=0.67$	$1*(0/3)=0$	1	0.8889
2	1	1	0	$2*(1/3)=0.67$	$2*(2/3)=1.33$	$2*(0/3)=0$	2	0.2222
3	1	2	0	$3*(1/3)=1$	$3*(2/3)=2$	$3*(0/3)=0$	2	0
ความแปรผันของการผลิตของชิ้นที่ 9 $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$								1.1111

ความแปรผันของการผลิตชิ้นงานที่ 12

ลำดับ ที่(i)	x_{im}			$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$			Product Scheduled	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	A	B	C		
1	0	1	0	$1*(0/5)=0$	$1*(2/5)=0.4$	$1*(3/5)=0.6$	2	0.72
2	0	1	1	$2*(0/5)=0$	$2*(2/5)=0.8$	$2*(3/5)=1.2$	3	0.08
3	0	2	1	$3*(0/5)=0$	$3*(2/5)=1.2$	$3*(3/5)=1.8$	2	1.28
4	0	2	2	$4*(0/5)=0$	$4*(2/5)=1.6$	$4*(3/5)=2.4$	3	0.32
5	0	2	3	$5*(0/5)=0$	$5*(2/5)=2$	$5*(3/5)=3$	3	0
ความแปรผันของการผลิตของชิ้นที่ 12 $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$								2.4

ตารางที่ 2.12 ผลการคำนวณความผันแปรของการผลิตของ A B C B C C

ชิ้นงาน	Model Sequences						$(\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2)$
1	A	B	C	B	C	C	5.0556
2	A	B	C	B	C	C	5.0556
3	A	C	C	C	-	-	1.75
4	A	B	C	B	C	C	5.0556
5	A	B	C	B	C	C	5.0556
6	A	C	C	C	-	-	1.75
7	A	B	C	B	C	C	5.0556
8	A	B	C	B	C	C	5.0556
9	A	B	B	-	-	-	1.1111
10	A	B	C	B	C	C	5.0556
11	A	B	C	B	C	C	5.0556
12	B	C	B	C	C	-	2.4
ความแปรผันของการผลิตของ A B C B C C							47.4556

จากตารางการคำนวณความผันแปรของการผลิตในหนึ่งรอบการผลิตที่มีลำดับการผลิต A B C B C C มีความผันแปรของการผลิตเท่ากับ 47.4556

2. ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)

$$\text{จากสมการที่ (2.3) } f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} (\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m} / v_c)$$

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

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

ตารางที่ 2.13 เวลาดำเนินงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในแต่ละสถานีงานและความยาวสถานีงาน

สถานีงาน	Model Sequence						ความยาว สถานีงาน
	A	B	C	B	C	C	
1	11.6661	5.9979	5.2658	4.798	4.4671	3.9313	8
2	10.5601	6.0208	5.9865	4.884	5.0785	4.4929	8
3	2.1126	2.5456	0.774	2.0364	0.6566	0.5616	8
4	1.1414	2.8068	3.9009	2.1407	3.2285	2.876	8

เมื่อได้เวลาในการประกอบในการจัดลำดับการผลิตแบบ A B C B C C ของแต่ละสถานีงานมาแล้ว ในการจัดสมดุลการผลิตนี้จะกำหนดให้รอบเวลาการผลิตทั้งหมดของแต่ละผลิตภัณฑ์ (Cycle time) เท่ากับ 8 ซึ่งจะเท่ากับความยาวสถานีงาน จากนั้นจะทำการคำนวณค่าดังนี้

ค่า I คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของทุกผลิตภัณฑ์ หรือความต้องการในการผลิตทั้งหมดในทุกผลิตภัณฑ์ มาจาก $d_1 = 1, d_2 = 2, d_3 = 3 \therefore I = \sum_{m=1}^3 d_m = 1 + 2 + 3 = 6$

ค่า T คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของการผลิตหนึ่งรอบเวลาการผลิต ซึ่งก็คือผลรวมของค่าที่มากที่สุดของเวลาดำเนินการที่รวมกันของแต่ละคู่สถานีงาน

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

$$T = \max(11.6661 + 5.9979 + \dots + 3.9313, 10.5601 + 6.0208 + \dots + 4.4929) \\ + \max(2.1126 + 2.5456 + \dots + 0.5616, 1.1414 + 2.8068 + \dots \\ + 2.8760)$$

$$T = \max(36.1256, 37.0221) + \max(8.6878, 16.0937)$$

$$T = 37.0221 + 16.0937 = 53.1158$$

ค่า γ คือ ช่วงเวลาการปล่อย(Launch Interval) ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายพานการผลิต

$$\gamma = \frac{T}{I * N_M} = \frac{53.1158}{6 * 2} = 4.4263$$

ค่า w คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงานเพื่อเริ่มต้นผลิตผลิตภัณฑ์ถัดไป

$$w = \gamma * v_c = 4.4263 * 1 = 4.4263$$

เมื่อได้ค่าจากการคำนวณทั้งหมดแล้ว จะทำการคำนวณหาค่า $Z_{(i+1),n_m}$ คือ เวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m และ U_{i,n_m} คือ ปริมาณของ Utility Work (งานที่ทำไม่เสร็จ) ของผลิตภัณฑ์ลำดับที่ i ในคู่สถานีงาน n_m ตามสมการดังนี้

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

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

โดยจะเริ่มจากคู่สถานีงานที่ 1 สถานีงานซ้ายคือสถานีงานที่ 1 และสถานีงานขวาคือสถานีงานที่ 2 จากภาพที่ 2.20 การจัดลำดับเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ A พนักงานสถานีงานที่ 1 และ 2 เริ่มงานพร้อมกันที่ $L=0$ คือเริ่มจากเวลาที่ 0 แล้วดำเนินการประกอบโดยสถานีงานที่ 1 ใช้เวลาเท่ากับ 11.6661 ส่วนสถานีงานที่ 2 ใช้เวลาเท่ากับ 10.5601 ซึ่งสายพานการผลิตนี้มีรอบการผลิตเท่ากับ 8 แสดงว่างานทำไม่เสร็จไปทั้งหมด $(11.6661 - 8) + (10.5601 - 8) = 6.2262$ ก็คือค่า U_{11} เนื่องจากสายพานการผลิตมีการเคลื่อนที่พนักงานสถานีงานที่ 1 และ 2 ต้องรอเดินกลับมาเริ่มงานใหม่พร้อมกัน โดยจะต้องรอพนักงานในสถานีงานที่ใช้เวลามากกว่าเสร็จ ในผลิตภัณฑ์ A พนักงานสถานีงานทั้งสองเดินไปจนถึง 8 แล้วจึงเดินย้อนกลับพร้อมกันเพื่อเริ่มต้นผลิตผลิตภัณฑ์ถัดไปเป็นระยะเท่ากับ 4.4263 เมื่อเริ่มต้นผลิตภัณฑ์ B พนักงานสถานีงานที่ 1 และ 2 เริ่มงานพร้อมกันที่ $L = 3.5737$ ซึ่งก็คือค่า Z_{21} เพราะฉะนั้นปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จจะนำเอาเวลาเริ่มงานของของผลิตภัณฑ์ลำดับสุดท้ายในคู่สถานีงานมารวมกับปริมาณของ Utility Work (งานที่ทำไม่เสร็จ) ของผลิตภัณฑ์ในการลำดับการผลิตทั้งหมด ดังแสดงคำนวณดังนี้

N_1

$$Z_{21} = \max[0, \min(0 + 11.6661 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 10.5601 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 3.5737$$

$$Z_{31} = \max[0, \min(3.5737 + 5.9979 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(3.5737 + 6.0208 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 3.5737$$

$$Z_{41} = \max[0, \min(3.5737 + 5.2658 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(3.5737 + 5.9865 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 3.5737$$

$$Z_{51} = \max[0, \min(3.5737 + 4.798 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(3.5737 + 4.884 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 3.5737$$

$$Z_{61} = \max[0, \min(3.5737 + 4.4671 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(3.5737 + 5.0785 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 3.5737$$

$$Z_{71} = \max[0, \min(3.5737 + 3.9313 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(3.5737 + 4.4929 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 3.5737$$

$$U_{11} = \max[0, (0 + 11.6661 - 8)] + \max[0, (0 + 10.5601 - 8)] \\ = 3.6661 + 2.5601 = 6.2262$$

$$U_{21} = \max[0, (3.5737 + 5.9979 - 8)] + \max[0, (3.5737 + 6.0208 - 8)] \\ = 1.5715 + 1.5945 = 3.166$$

$$U_{31} = \max[0, (3.5737 + 5.2658 - 8)] + \max[0, (3.5737 + 5.9865 - 8)] \\ = 0.8393 + 1.56 = 2.3993$$

$$U_{41} = \max[0, (3.5737 + 4.798 - 8)] + \max[0, (3.5737 + 4.884 - 8)] \\ = 0.3717 + 0.4575 = 0.8292$$

$$U_{51} = \max[0, (3.5737 + 4.4671 - 8)] + \max[0, (3.5737 + 5.0785 - 8)] \\ = 0.0406 + 0.652 = 0.6926$$

$$U_{61} = \max[0, (3.5737 + 3.9313 - 8)] + \max[0, (3.5737 + 4.4929 - 8)] \\ = 0 + 0.0665 = 0.0665$$

$$\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m} / v_c = \sum_{i=1}^6 U_{i,1} + Z_{7,1} / v_c \\ = 6.2262 + 3.166 + 2.3993 + 0.8292 + 0.6926 + 0.0665 \\ + 3.5737 = 16.9535$$

N_2

$$Z_{22} = \max[0, \min(0 + 2.1126 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 1.1414 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 0$$

$$Z_{32} = \max[0, \min(0 + 2.5456 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 2.8068 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 0$$

$$Z_{42} = \max[0, \min(0 + 0.774 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 3.9009 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 0$$

$$Z_{52} = \max[0, \min(0 + 2.0364 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 2.1407 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 0$$

$$Z_{62} = \max[0, \min(0 + 0.6566 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 3.2285 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 0$$

$$Z_{72} = \max[0, \min(0 + 0.5616 - 4.4263, 8 - 4.4263), \min(0 + 2.8760 - 4.4263, 8 - 4.4263)] = 0$$

$$U_{12} = \max[0, (0 + 2.1126 - 8)] + \max[0, (0 + 1.1414 - 8)] = 0$$

$$U_{22} = \max[0, (0 + 2.5456 - 8)] + \max[0, (0 + 2.8068 - 8)] = 0$$

$$U_{32} = \max[0, (0 + 0.774 - 8)] + \max[0, (0 + 3.9009 - 8)] = 0$$

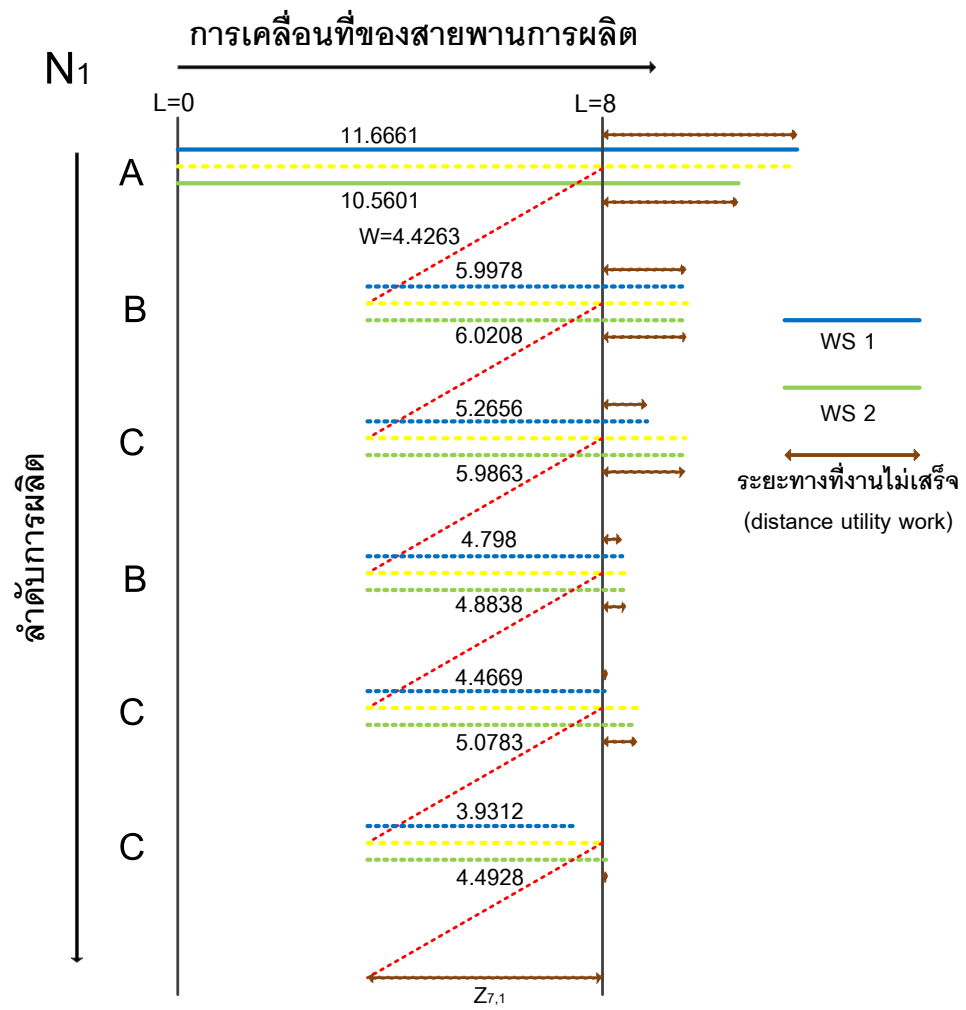
$$U_{42} = \max[0, (0 + 2.0364 - 8)] + \max[0, (0 + 2.1407 - 8)] = 0$$

$$U_{52} = \max[0, (0 + 0.6566 - 8)] + \max[0, (0 + 3.2285 - 8)] = 0$$

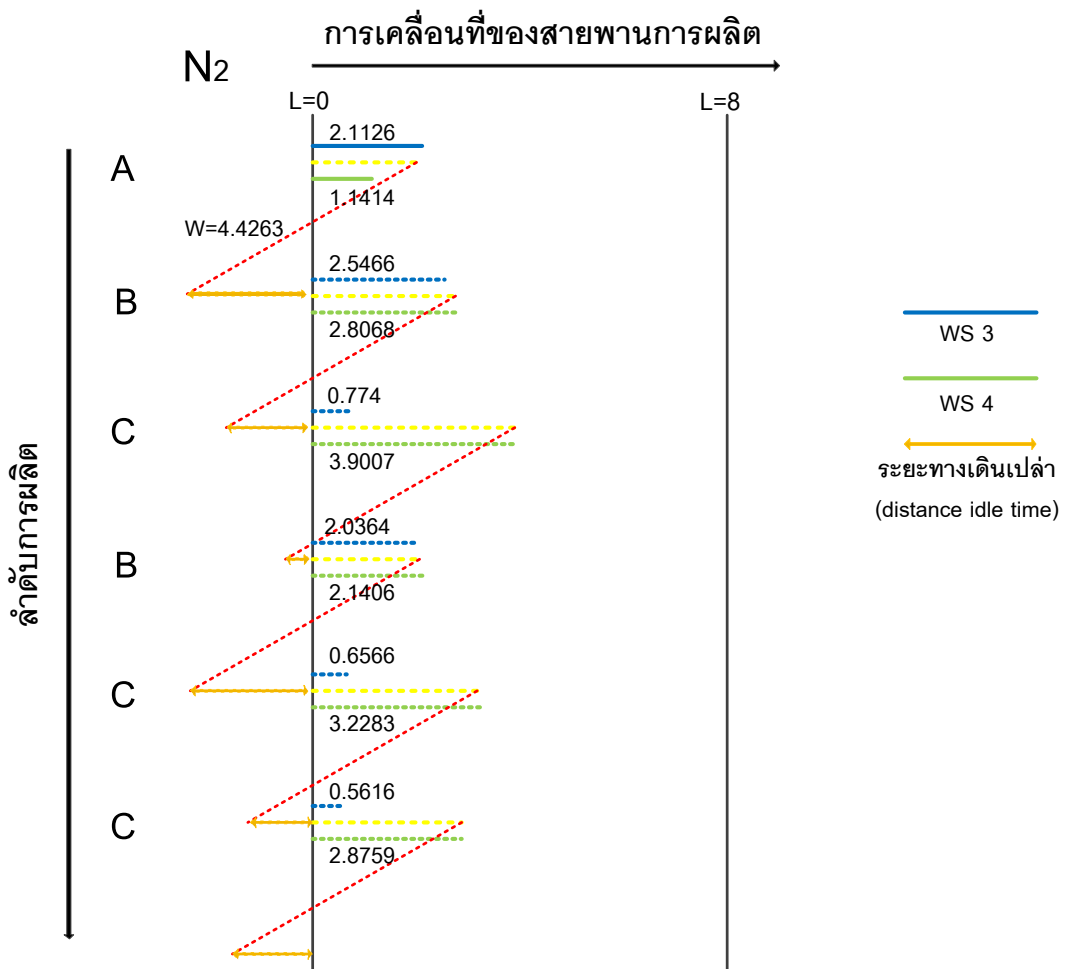
$$U_{62} = \max[0, (0 + 0.5616 - 8)] + \max[0, (0 + 2.8760 - 8)] = 0$$

$$\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m} / v_c = \sum_{i=1}^6 U_{i,1} + Z_{7,1} / v_c = 0 + 0 = 0$$

$$\therefore \sum_{n_m=1}^{N_M} \left(\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m} / v_c \right) = 16.9535 + 0 = 16.9535$$



ภาพที่ 2.20 การหาจำนวนปริมาณงานที่ไม่เสร็จของคู่สถานีงานที่ 1 กับ 2



ภาพที่ 2.21 การหาจำนวนปริมาณงานที่ไม่เสร็จของคู่สถานีงานที่ 3 กับ 4

จากการคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตของการจัดลำดับการผลิต A B C B C C ของคู่สถานีงานที่ 1 (สถานีงานที่ 1 กับ 2) และคู่สถานีงานที่ 2 (สถานีงานที่ 3 กับ 4) มีค่าเท่ากับ $16.9535+0 = 16.9535$

3. เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

$$\text{จากสมการที่ (2.4)} \quad f_3(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M s_i t_m$$

ตัวอย่างการคำนวณกำหนดให้ Model Sequence = A B C B C C

ผลิตภัณฑ์ (M) 3 ชนิด $\therefore I = \sum_{m=1}^3 d_m = 1 + 2 + 3 = 6$

ในการคำนวณเวลาการปรับตั้งเครื่องจะมีผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยจะใช้วิธี Position-Based Learning Effect จะคำนวณจากสมการ

$$t_{k,m} = t_{k,m} r^a$$

โดย $t_{k,m}$ คือ เวลาปรับตั้งค่าเครื่องจักรของชิ้นงานที่ k ของผลิตภัณฑ์ m

r คือ จำนวนการทำซ้ำของชิ้นงานที่ i ของทุกผลิตภัณฑ์

a คือ ค่า Learning Index

ค่าของ a จะขึ้นอยู่กับค่า Learning Rate (LR) , $a = \log LR / \log 2 = \log_2 LR$

ในการคำนวณจะกำหนดให้ค่า LR เท่ากับ 80% ค่า $a = \log_2 0.8 = -0.322$

เข้ามาทำให้เวลาปรับตั้งเครื่องมีค่าลดลงเมื่อมีการปรับตั้งเครื่องหลายครั้ง

เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์มาจากการใช้วิธีการสุ่ม โดยกำหนดช่วงของเวลาปรับตั้งเครื่องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.1 (Lummus, 1995) ของเวลาเฉลี่ยชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C (ตารางที่ 2.10)

ตัวอย่างการสุ่มค่าเวลาปรับตั้งเครื่อง เช่น ชิ้นงานที่ 1 นำเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C ในตารางที่ 2.15 มารวมกันแล้วหารเฉลี่ย จะเท่ากับ $\frac{2+3+1}{3} = 2$ แล้วนำค่าที่ได้ไปคูณกับค่าที่อยู่ระหว่าง 0.05-0.1 จะเท่ากับค่า $2 \times 0.05 = 0.1$ ถึงค่า $2 \times 0.1 = 0.2$ เพราะฉะนั้นค่าในการสุ่มเวลาปรับตั้งเครื่องจะอยู่ระหว่าง 0.1-0.2 ซึ่งในตารางที่ 2.14 ชิ้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ A, B และ C คือ 0.1857, 0.1988 และ 0.1929 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.14 เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์

ชั้นงาน	เวลาปรับตั้งเครื่อง		
	A	B	C
1	0.1857	0.1988	0.1929
2	0.2114	0.1501	0.2311
3	0.0604	0	0.061
4	0.1326	0.1096	0.1748
5	0.1749	0.1543	0.1338
6	0.0916	0	0.0776
7	0.1958	0.1893	0.1357
8	0.1546	0.1347	0.1623
9	0.0898	0.0873	0
10	0.1126	0.1822	0.1025
11	0.1414	0.1731	0.1781
12	0	0.0684	0.0872

จากตาราง Model Sequences (ตารางที่ 2.11) จะเริ่มพิจารณาจากการจัดลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละชั้นงาน ตัวอย่างเช่น

ชั้นงานที่ 1 มีการผลิตผลิตภัณฑ์ A ซึ่งมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ 0.1857 เป็นครั้งแรก แสดงว่ายังไม่มีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นผลิตภัณฑ์ B ซึ่งมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ 0.1988 แต่ได้มีการเรียนรู้ในการปรับตั้งเครื่องเกิดขึ้นแล้ว เพราะฉะนั้นเวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ B จะเท่ากับ $t_{1,B} = t_{1,B}r^a \therefore 0.1988 \times 2^{-0.322} = 0.15903$ ลำดับต่อไปผลิตภัณฑ์ C จึงมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ $0.1929 \times 3^{-0.322} = 0.13543$ ลำดับต่อไปผลิตภัณฑ์ B จึงมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ $0.1988 \times 4^{-0.322} = 0.12722$ ลำดับต่อไปผลิตภัณฑ์ C จึงมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ $0.1929 \times 5^{-0.322} = 0.11489$ และลำดับการผลิตสุดท้ายก็คือผลิตภัณฑ์ C ซึ่งได้มีการปรับตั้งเครื่องผลิตภัณฑ์ C ในลำดับก่อนหน้าไปแล้ว การปรับตั้งจึงมีค่าเท่ากับ 0

ชั้นงานที่ 3 มีการผลิตผลิตภัณฑ์ A ซึ่งมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ 0.0604 เป็นครั้งแรก แสดงว่ายังไม่มีผลกระทบจากการเรียนรู้เกิดขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นผลิตภัณฑ์ C ซึ่งมีเวลาปรับตั้งเครื่องเท่ากับ 0.061 แต่ได้มีการเรียนรู้ในการปรับตั้งเครื่องเกิดขึ้นแล้ว เพราะฉะนั้นเวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์ B จะเท่ากับ $t_{3,B} = t_{3,B}r^a \therefore 0.061 \times 2^{-0.322} = 0.0488$ ลำดับต่อไป ผลิตภัณฑ์ C และลำดับการผลิตสุดท้ายเป็นผลิตภัณฑ์ C เหมือนกัน การปรับตั้งจึงมีค่าเท่ากับ 0 ดังแสดงในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 เวลาปรับตั้งเครื่องของลำดับการผลิต A B C B C C

ชั้นงาน	เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์						$\sum_{m=1}^M t_m$
1	0.1857	0.15903	0.13543	0.12722	0.11489	0	0.722262
2	0.2114	0.12007	0.16224	0.09605	0.13764	0	0.727408
3	0.0604	0.0488	0	0	-	-	0.109198
4	0.1326	0.08768	0.12272	0.07014	0.10411	0	0.517236
5	0.1749	0.12343	0.09393	0.09874	0.07969	0	0.570697
6	0.0916	0.06208	0	0	-	-	0.153677
7	0.1958	0.15143	0.09527	0.12114	0.08082	0	0.644459
8	0.1546	0.10775	0.11394	0.0862	0.09666	0	0.559157
9	0.0898	0.06984	0	-	-	-	0.159637
10	0.1126	0.14575	0.07196	0.1166	0.06105	0	0.507955
11	0.1414	0.13847	0.12503	0.11077	0.10607	0	0.621752
12	0.0684	0.06976	0.04802	0.0558	0	-	0.241979
$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M s_i t_m$							5.535415

จากการคำนวณการปรับตั้งเครื่องของลำดับการผลิต A B C B C C มีเวลาปรับตั้งเครื่องรวมทั้งหมดเท่ากับ 5.5354

2.3.4 จำนวนการจัดลำดับการผลิตทั้งหมด

ในปัญหาการจัดลำดับผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบผสม ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีการประกอบที่ใกล้เคียงกัน ความเปลี่ยนแปลงในสายการประกอบจะขึ้นอยู่กับเวลาการดำเนินงานของผลิตภัณฑ์และความต้องการวัตถุดิบของแต่ละสถานีงานที่มีความแตกต่างกัน จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 (Mansouri, 2005) (Akgunduz and Tunal, 2010)

$$\text{จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด (Total Sequence)} = \frac{(\sum_{m=1}^M d_m)!}{\prod_{m=1}^M (d_m!)} \quad (2.5)$$

โดยกำหนดให้ M เป็นจำนวนของชนิดผลิตภัณฑ์ m เป็นชนิดของผลิตภัณฑ์ และ d_m เป็นจำนวนความต้องการของผลิตภัณฑ์ m เมื่อขนาดของปัญหาเพิ่มขึ้นจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้จะเพิ่มขึ้นแบบ Exponential ปัญหาการจัดลำดับการผลิตจึงเป็นปัญหา NP-hard

2.4 ผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect)

ในปีค.ศ. 1936 Wright (1936) ได้มีการอธิบายงานวิจัยในอุตสาหกรรมเครื่องบินว่า เวลาที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวกันที่มีการผลิตแบบต่อเนื่องกันนั้นมีค่าลดลง ผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นแต่ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยจะลดลง

การเรียนรู้ทำให้เวลาในการทำงานของพนักงานลดลง การเรียนรู้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$p_{[k]} = p_{[1]}k^a \quad (2.6)$$

โดย $p_{[k]}$ คือ เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ชิ้นที่ k ของการผลิตผลิตภัณฑ์จำนวน k ชิ้น

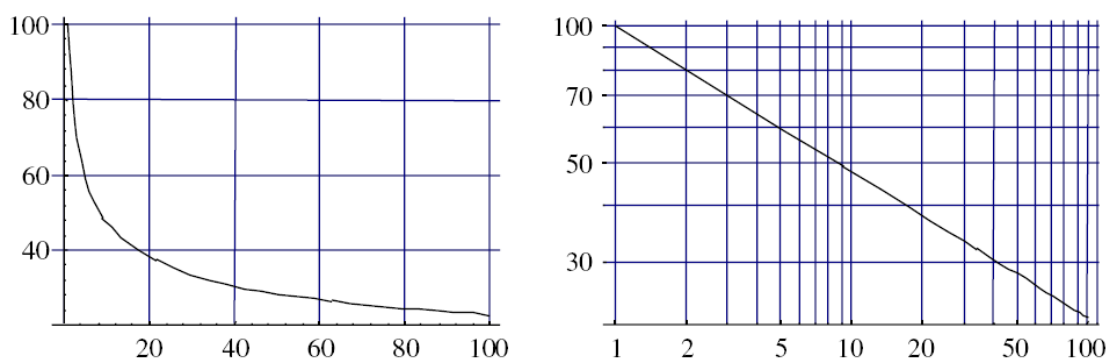
$p_{[1]}$ คือ เวลาทำงานของผลิตภัณฑ์ชิ้นแรก

a คือ ค่า Learning Index

ค่าของ a จะขึ้นอยู่กับค่า Learning Rate (LR) , $a = \log LR / \log 2 = \log_2 LR$

ดังนั้น เมื่อกำหนดให้ค่าการเรียนรู้เท่ากับ 80% ค่า $a = \log_2 0.8 = -0.322$ กำหนดให้เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ชิ้นแรกเท่ากับ 100 ดังนั้น $p_{[k]} = 100k^{-0.322}$ ถ้า k มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เวลาการทำงานลดลง เมื่อนำจุดเวลามาพล็อตต่อกันจะเป็นเส้นกราฟดังภาพที่

2.22 โดยแกน y เป็นแกนของเวลาที่เริ่มต้นจาก 100 และแกน x เป็นแกนของจำนวนชิ้นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต



ภาพที่ 2.22 กราฟเส้นโค้งการเรียนรู้ที่ค่า LR เท่ากับ 80% กราฟแรกจะเป็นกราฟปกติ กราฟที่สองเป็นกราฟ Double-Logarithmic Coordinate system (Biskup, 2008)

ผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effects) จะมีความสำคัญต่อการวางแผนการ جدตารางการผลิตแบบระยะสั้น Keachie and Fontana (1996) เป็นคนแรกที่พิจารณาเรื่องของผลกระทบจากการเรียนรู้ในการคำนวณความเหมาะสมของจำนวนขนาดผลิตภัณฑ์ที่จะผลิต ถ้าผลกระทบจากการเรียนรู้ได้เกิดกับการผลิตผลิตภัณฑ์ชุดแรกแล้ว ผลิตภัณฑ์ชุดสุดท้ายที่ผลิตเสร็จจะใช้เวลาในการผลิตเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการนำผลกระทบจากการเรียนรู้เข้าไปใช้ ค่าใช้จ่ายในการผลิตจะสูงเมื่อมีการผลิตในจำนวนที่น้อย

ปัญหาของการจัดตารางจะเกิดขึ้นเมื่อมีการทำงานที่มีลักษณะแตกต่างกัน หรือมีการดำเนินงานบนหนึ่ง หรือมากกว่าบนเครื่องจักร ลักษณะในสภาพแวดล้อมของการผลิตของกิจกรรมที่ต้องใช้ความสามารถของพนักงานสูง มีดังนี้

1. การติดตั้งเครื่องจักร (ในการจัดตารางอาจมีการรวมเวลานี้เข้ากับเวลาการดำเนินงาน)
2. การทำความสะอาดเครื่องจักรหลังจากครบรอบเวลาการทำงาน
3. การดำเนินการและการควบคุมเครื่องจักร
4. การวางแผนการซ่อมบำรุงเครื่องจักร
5. การนำเครื่องจักรที่เสียออก
6. การอ่าน ทำความเข้าใจและการตีความข้อมูลของเครื่องจักร
7. งานที่ต้องใช้ฝีมือในการทำงาน

สภาพแวดล้อมในการผลิต จำนวนกิจกรรมในการทำงานมีผลต่อการเรียนรู้มาก ซึ่งมันเป็นเหตุผลให้มีการพิจารณาการเรียนรู้ที่ได้จากสภาพแวดล้อม แต่ผลที่ได้จากการเรียนรู้จะไม่ได้เกิดขึ้นในการทำงานทุกๆ พื้นที่ของการทำงาน ในสถานที่ที่มีการดำเนินงานตลอดปี มีการผลิตในขอบเขตที่เหมือนเดิม ใช้แรงงานที่เหมือนเดิม และเครื่องจักรที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ผลกระทบจากการเรียนรู้ก็จะมีไม่สำคัญ ผลกระทบจากการเรียนรู้จะมีความสำคัญถ้าสภาพแวดล้อมในการผลิตที่เปลี่ยน ดังตัวอย่างเช่น

1. มีการเปลี่ยนพนักงานใหม่
2. มีการลงทุนเครื่องจักร/เปลี่ยนเครื่องมืออุปกรณ์ เทคโนโลยีในการผลิต
3. เปลี่ยนขั้นตอนการทำงาน อาจเป็นผลมาจากความต้องการภายใน หรือภายนอก
4. การตอบรับการผลผลิต ซึ่งผลิตภัณฑ์นั้นยังไม่เคยผลิตมาก่อน

นอกจากนี้ในการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ น้อยๆ ของสภาพแวดล้อมการผลิต เช่น การปรับปรุงโปรแกรม การออกแบบเอกสารข้อมูลใหม่ การจัดการสินค้าคงคลัง ฯลฯ อาจมีผลกระทบต่อผลกระทบจากการเรียนรู้ พนักงานมีความเคยชินต่อสถานการณ์ใหม่ทำให้เกิดประสบการณ์การเรียนรู้ขึ้น

ในการเลือกใช้ผลที่ได้จากการเรียนรู้จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของการผลิต บางครั้งชิ้นงาน (Task) จะเป็นอิสระจากเวลาการดำเนินงานทั้งหมดในการดำเนินการผลิต เช่น การติดตั้งหรือการควบคุมคุณภาพ ผลกระทบจากการเรียนรู้ผลกระทบจากการเรียนรู้จะมีสองวิธีการที่แตกต่างกันตามลักษณะของสภาพแวดล้อมในการจัดตารางการผลิต คือวิธีแรกเป็นวิธี Position-Based Learning Effect การเรียนรู้จะส่งผลกระทบต่อจำนวนของงานในการดำเนินการผลิต การเรียนรู้จะเกิดขึ้นจากเวลาในการดำเนินงานที่มีความเป็นอิสระจากเวลาการดำเนินงานทั้งหมด เช่น การติดตั้งเครื่องจักร ส่วนมากวิธีนี้จะถูกใช้ในกรณีกระบวนการการผลิตมีการทำงานโดยใช้เครื่องจักรเป็นส่วนใหญ่ เช่น การผลิต Memory Chips และ Circuit Boards หรือ Running Bottling Plants วิธีที่สองเป็นวิธี Sum-of-Processing-Time Based Learning Effect การเรียนรู้จะเกิดจากเวลารวมของการดำเนินการของทุกงานก่อนหน้า จะเป็นผลที่เกิดจากประสบการณ์การทำงานของพนักงาน จะถูกใช้ในกรณี เช่น ในกรณี Offset Printing ในกรณีที่ลูกค้ามีความต้องการผลิตภัณฑ์สูง ในการผลิต High-end Electric Tools การซ่อมบำรุงของเครื่องบิน Pimping Car ฯลฯ ความแตกต่างของ Position-Based Learning Effect และ Sum-of-Processing-Time Based Learning Effect คือ Position-Based Learning Effect จะไม่สนใจเวลาในการดำเนินงานของงานที่ทำก่อนหน้า

2.4.1 ตัวอย่างการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี Position-Based Learning Effect คือ การเรียนรู้จะส่งผลต่อจำนวนของงานในการดำเนินการผลิต การเรียนรู้จะเกิดขึ้นจากเวลาในการดำเนินงานในชั้นงานที่ทำซ้ำกันตามการจัดลำดับการผลิต

จากตารางที่ 2.10 แสดงชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C ก่อนทำการจัดลำดับการผลิต เวลาดำเนินงานในแต่ละชั้นงานยังไม่มี Learning Effect เข้ามาเกี่ยวข้อง จะสังเกตว่าผลิตภัณฑ์ทั้งสามชนิดจะมีชั้นงานที่เหมือนกัน แต่บางผลิตภัณฑ์จะไม่มีการทำงานบางชั้นงาน

วิธี Position-Based Learning Effect จะคำนวณจากสมการที่ 2.7

$$p_{[im]} = p_{[im]} r^a \quad (2.7)$$

โดย $p_{[im]}$ คือ เวลาการดำเนินงานของชั้นงานที่ i ของผลิตภัณฑ์ m

r คือ จำนวนการทำซ้ำของชั้นงานที่ i ของทุกผลิตภัณฑ์

a คือ ค่า Learning Index

ค่า a จะขึ้นอยู่กับค่า Learning Rate (LR) , $a = \log LR / \log 2 = \log_2 LR$

ในการคำนวณจะกำหนดให้ค่า LR เท่ากับ 80% ค่า $a = \log_2 0.8 = -0.322$

จากตารางที่ 2.16 มีการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ A, B และ C กำหนดให้มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชั้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชั้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชั้น เข้าไปในสายการประกอบ โดยมีการจัดลำดับการผลิต (Model Sequence) เป็น ABCBCC จะเริ่มจากการทำผลิตภัณฑ์ A ก่อน แล้วทำผลิตภัณฑ์ B และ C ไปเรื่อยๆ จนครบลำดับการผลิต

วิธีในการคำนวณจากตารางที่ 2.16 เริ่มพิจารณาจากชั้นงานที่ 1 ของลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์

ชั้นงานที่ 1

ชั้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ A $p_{[1A]} = 2$ เป็นชั้นงานแรกที่เริ่มทำ $r = 1$ เพราะฉะนั้นจากสมการ

$$p_{[im]} = p_{[im]} r^a \text{ แทนค่าได้เป็น } p_{[1A]} = 2(1)^{-0.322} = 2$$

ชั้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ B $p_{[1B]} = 3$ ทำชั้นงานที่ 1 เป็นครั้งที่ $r = 2$

$$p_{[1B]} = 3(2)^{-0.322} = 2.3998804$$

ชั้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[1C]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 1 เป็นครั้งที่ $r = 3$

$$p_{[1C]} = 1(3)^{-0.322} = 0.7020482$$

ชั้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ B $p_{[1B]} = 3$ ทำชั้นงานที่ 1 เป็นครั้งที่ $r = 4$

$$p_{[1B]} = 3(4)^{-0.322} = 1.9198086$$

ชั้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[1C]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 1 เป็นครั้งที่ $r = 5$

$$p_{[1C]} = 1(5)^{-0.322} = 0.5955684$$

ชั้นงานที่ 1 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[1C]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 1 เป็นครั้งที่ $r = 6$

$$p_{[1C]} = 1(6)^{-0.322} = 0.5616106$$

ชั้นงานที่ 3

ชั้นงานที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ A $p_{[3A]} = 2$ เป็นชั้นงานแรกที่เริ่มทำ $r = 1$

$$p_{[3A]} = 2(1)^{-0.322} = 2$$

ชั้นงานที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ B $p_{[3B]} = 0$ แสดงว่าไม่มีการทำชั้นงานนี้ในผลิตภัณฑ์ B

ชั้นงานที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[3C]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 3 เป็นครั้งที่ $r = 2$

$$p_{[3C]} = 1(2)^{-0.322} = 0.7999601$$

ชั้นงานที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ B $p_{[3B]} = 0$ แสดงว่าไม่มีการทำชั้นงานนี้ในผลิตภัณฑ์ B

ชั้นงานที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[3C]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 3 เป็นครั้งที่ $r = 3$

$$p_{[3C]} = 1(3)^{-0.322} = 0.7020482$$

ชั้นงานที่ 3 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[3C]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 3 เป็นครั้งที่ $r = 4$

$$p_{[3C]} = 1(4)^{-0.322} = 0.6399362$$

ชั้นงานที่ 12

ชั้นงานที่ 12 ของผลิตภัณฑ์ A $p_{[12A]} = 0$ แสดงว่าไม่มีการทำชั้นงานนี้ในผลิตภัณฑ์ A

ชั้นงานที่ 12 ของผลิตภัณฑ์ B $p_{[12B]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 12 เป็นครั้งที่ $r = 1$

$$p_{[12B]} = 1(1)^{-0.322} = 1$$

ชั้นงานที่ 12 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[12C]} = 2$ ทำชั้นงานที่ 12 เป็นครั้งที่ $r = 2$

$$p_{[12C]} = 2(2)^{-0.322} = 1.5999203$$

ชั้นงานที่ 12 ของผลิตภัณฑ์ B $p_{[12B]} = 1$ ทำชั้นงานที่ 12 เป็นครั้งที่ $r = 3$

$$p_{[12B]} = 1(3)^{-0.322} = 0.7020482$$

ชั้นงานที่ 12 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[12C]} = 2$ ทำชั้นงานที่ 12 เป็นครั้งที่ $r = 4$

$$p_{[12C]} = 2(4)^{-0.322} = 1.2798724$$

ชั้นงานที่ 12 ของผลิตภัณฑ์ C $p_{[12C]} = 2$ ทำชั้นงานที่ 12 เป็นครั้งที่ $r = 5$

$$p_{[12C]} = 2(5)^{-0.322} = 1.1911368$$

จะสังเกตได้ว่าในตารางการคำนวณเวลาดำเนินงานการจัดลำดับการผลิต เวลาดำเนินงานของทุกชั้นงานลดลง เมื่อมีการทำชั้นงานนั้นซ้ำ เนื่องจากมีผลมาจาก Learning Effect เพราะฉะนั้นในการจัดลำดับการผลิตถ้าจัดให้ชั้นงานของผลิตภัณฑ์ที่มีเวลาดำเนินงานมากไว้ลำดับหลังๆ จะมีผลทำให้เวลาในดำเนินงานลดลงมาก

ตารางที่ 2.16 การคำนวณเวลาดำเนินงานการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ A, B และ C โดยใช้วิธี Position-Based Learning Effect

ชั้นงาน	Model Sequences					
	A	B	C	B	C	C
1	2	2.3998804	0.7020482	1.9198086	0.5955684	0.5616106
2	3	2.3998804	2.1061447	1.9198086	1.7867052	1.6848318
3	2	0	0.7999601	0	0.7020482	0.6399362
4	3	1.5999203	0.7020482	1.2798724	0.5955684	0.5616106
5	1	1.5999203	2.1061447	1.2798724	1.7867052	1.6848318
6	1	0	1.5999203	0	1.4040965	1.2798724
7	3	1.5999203	0.7020482	1.2798724	0.5955684	0.5616106
8	3	0.7999601	1.4040965	0.6399362	1.1911368	1.1232212
9	2	0.7999601	0	0.7020482	0	0
10	2	2.3998804	0.7020482	1.9198086	0.5955684	0.5616106
11	1	1.5999203	2.1061447	1.2798724	1.7867052	1.6848318
12	0	1	1.5999203	0.7020482	1.2798724	1.1911368

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้รวบรวมและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

- 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน
- 2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม
- 2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต
- 2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO)

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน

Kim et al. (2000) ได้ศึกษาปัญหาการจัดสมดุลในสายการประกอบแบบสองด้านที่มีการกำหนดสถานีงาน เพื่อหาขอบเวลาการผลิตที่น้อยที่สุดด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม โดยทั่วไปปัญหาสายการประกอบแบบสองด้านจะพบได้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ และมีการผลิตเป็นจำนวนมาก ในการนำเจเนติกอัลกอริทึมเข้ามาประยุกต์ใช้ พบว่าเจเนติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ได้ดี

Lee et al. (2001) ได้ศึกษาปัญหาการจัดสมดุลในสายการประกอบแบบสองด้าน มีการนำวิธีการจัดกลุ่มมาใช้ในกระบวนการจัดชิ้นงานลงสถานีงาน วัตถุประสงค์เพื่อทำให้ Work Relatedness และ Work Slackness มีค่าน้อยที่สุด โดยอาศัยความสัมพันธ์ของชิ้นงาน พบว่าเวลาของรอบการทำงาน และสถานีงานลดลง

Ozcan and Toklu (2009a) ได้ศึกษาปัญหาการจัดสมดุลในสายการประกอบแบบสองด้าน โดยนำ Mathematical Model, Pre-Emptive Goal Programming Model และ Fuzzy Goal Programming Model มาใช้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้จำนวนคู่ของสถานีงาน และจำนวนสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดค่าของรอบเวลาการทำงาน

Kim et al. (2009) ได้ศึกษาปัญหาการจัดสมดุลในสายการประกอบแบบสองด้าน โดยนำ Mathematical Model และเจเนติกอัลกอริทึมเข้ามาใช้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้รอบเวลาการทำงานมีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดค่าจำนวนของคู่สถานีงาน (Mated-Stations)

Ozcan and Toklu (2009b) ได้ศึกษาปัญหาการจัดสมดุลบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยนำ Mathematical Model และอัลกอริทึม Simulated

Annealing มาใช้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้จำนวนคู่สถานีงาน (Mated-Stations) และจำนวนสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดค่าของรอบเวลาการทำงาน

Ozcan and Toklu (2010) ได้ศึกษาปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบสองด้านที่เวลาปรับตั้งเครื่องขึ้นอยู่กับลำดับผลิตภัณฑ์ก่อนหน้า โดยนำวิธี Mixed Integer Program (MIP) และวิธี 2-COMSOAL/S มาใช้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าจำนวนของคู่สถานีงาน (Mated-Stations) และจำนวนสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด สรุปว่าทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหา

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

Tsai (1995) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์แบบผสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ และความเสี่ยงในการหยุดของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด โดยได้ศึกษาพบว่าปัญหานี้เป็นแบบ NP-hard

Hyun et al. (1998) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยศึกษา 3 วัตถุประสงค์ คือ ผลรวมของปริมาณงานที่ไม่เสร็จมีค่าน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ และผลรวมของค่าใช้จ่ายในการปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อยที่สุด ได้พัฒนาการค้นหาคำตอบในการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ มีชื่อว่า Pareto Stratum-Niche Cubic (PS-NC)

McMullen and Frazier (2000) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยนำอัลกอริทึม Simulated Annealing มาใช้ในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์การปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อยที่สุด และมีความสม่ำเสมอของอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบ สรุปว่าอัลกอริทึม Simulated Annealing มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีขนาดเล็ก

McMullen et al. (2001) ได้ศึกษาการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) โดยใช้วิธีเจเนเนติกอัลกอริทึม วิธี Simulated Annealing และวิธี Tabu Search มาใช้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ระบบการผลิตมีความยืดหยุ่นมากที่สุด และการปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อยที่สุด แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ สรุปว่าวิธีทั้ง 3 วิธีมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาได้ใกล้เคียงกันในปัญหาขนาดเล็ก และวิธีเจเนเนติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้ดีกว่าวิธี Simulated Annealing และวิธี Tabu Search

Kotani et al. (2004) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบในระบบการผลิตของโตโยต้า และได้นำระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) มาใช้ในการหาวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เกิดการหยุดของสายการผลิตน้อยที่สุด โดยจัดพนักงานเข้าไปช่วยและทำให้เกิดความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ โดยใช้ Approximation Algorithm ในการหาคำตอบ

Mansouri (2005) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) มาใช้ในการหาวัตถุประสงค์อัตราความผันแปรของการผลิตและจำนวนครั้งในการปรับตั้งน้อยที่สุด วัตถุประสงค์สองตัวนี้มีความแปรผันกันโดยตรง โดยนำวิธีเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithms: MOGAs) เข้ามาใช้แก้ปัญหา สรุปว่า MOGAs มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

Ding et al. (2006) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อทำให้น้ำหนักของผลรวมของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของคำตอบที่ดีที่สุดมีค่าน้อยที่สุด มีการใช้วัตถุประสงค์ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ความสม่ำเสมอของปริมาณงานและความสมดุลของภาระงานมีค่าน้อยที่สุด โดยใช้วิธีการ Comparing Two Weighted สรุปว่าวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา

Konak et al. (2006) ได้ศึกษาการหาคำตอบที่เหมาะสมของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึมมาแก้ปัญหา สรุปได้ว่าเจเนติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยเจเนติกอัลกอริทึมได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหามากมาย เช่น Vector Evaluated GA (VEGA), Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), Niche Pareto Genetic Algorithm (NPGA), Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) และ Fast Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) เป็นต้น

นายณพพล คำภิรมย์ (2008) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวโยในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุดและความผันแปรของภาระงานมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้มีการใช้ตัววัดสมรรถนะกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดในการเปรียบเทียบอัลกอริทึม 3 ตัว คือ ตัววัดสมรรถนะในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measurement)

การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread Measurement) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of non-dominated solution)

กรรณ จิตเมตตา (2011) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบมาแก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด และปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่า PSONK สามารถแก้ปัญหาการจัดตารางได้ดีกว่าอัลกอริทึม COMSOAL NSGA-II DPSO และ BBO

2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ผลกระทบจากการเรียนรู้ (Learning Effect) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

จากการสำรวจงานวิจัยของผลกระทบจากการเรียนรู้ ส่วนมากจะนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในการจัดตารางเครื่องจักร โดยแบ่ง 2 วิธี คือ วิธีแรกเป็นวิธี Position-Based Learning Effect การเรียนรู้จะส่งผลต่อจำนวนของงานในการดำเนินการผลิต การเรียนรู้จะเกิดขึ้นจากเวลาในการดำเนินงานที่มีความเป็นอิสระจากเวลาการดำเนินการทั้งหมด **Biskup (1999)** ได้ศึกษาการนำผลกระทบจากการเรียนรู้มาประยุกต์ใช้ในปัญหาการจัดตารางของเครื่องจักรเดียว โดยใช้วัตถุประสงค์เพื่อทำให้เวลาเสร็จงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด **Mosheiov (2001a)** ได้ศึกษาแก้ปัญหาการจัดตารางตามกฎ EDD (Earliest Due Date) เพื่อทำให้เวลาล่าช้าของงานมากที่สุดมีค่าน้อยที่สุด ใช้กฎ WSPT (Weighted Shortest Processing Time) เพื่อทำให้เวลาปิดงานของระบบแบบถ่วงน้ำหนักมีค่าน้อยที่สุด และใช้กฎของ Moore เพื่อทำให้จำนวนงานที่ล่าช้ามีค่าน้อยที่สุด **Mosheiov (2001b)** ได้ศึกษาแก้ปัญหาบนเครื่องจักรขนานเพื่อทำให้เวลาเสร็จงานมีค่าน้อยที่สุด **Lee et al. (2004)** ได้แก้ปัญหาบนเครื่องจักรเดียว เพื่อทำให้เวลาเสร็จงานของระบบและเวลาที่เสร็จช้ามากที่สุดมีค่าน้อยที่สุด **Lee and Wu (2004)** ได้ศึกษาแก้ปัญหา Two-Machine Flowshop เพื่อทำให้ค่าเวลาปิดงานน้อยที่สุด **Chen et al. (2006)** ได้ศึกษาแก้ปัญหา two machine flowshop เพื่อทำให้เวลาเสร็จงานของระบบมีค่าน้อยที่สุด และจำนวนงานล่าช้ามากที่สุดมีค่าน้อยที่สุด **Bachman and Janiak (2004)** ได้ศึกษาการจัดตารางเครื่องจักรเดียว วัตถุประสงค์เพื่อทำให้เวลาปิดงานน้อยที่สุด **Koulamas and Kyparisis (2007)** ได้ศึกษาการเรียนรู้ภายใต้สิ่งแวดล้อมแบบใหม่ แล้วนำมาใช้ในปัญหา Two-Machine Flowshop **Eren and Guner (2007)** ได้ศึกษาและพัฒนา Tabu Search และ Simulated Annealing เพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรเดียวที่มีวัตถุประสงค์เวลาล่าช้าของงาน **Kuo and Yang (2007)**

ศึกษาการนำค่าปรับตั้งเครื่องจักรเข้ามาในปัญหาการจัดตาราง Wu et al. (2007a,b) ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางโดยใช้กฎ EDD โดยนำ Simulated Annealing หาค่าเวลาล่าช้ามากที่สุดบนเครื่องจักรเดียว Mosheiov and Sidney (2003, 2005) มีการพัฒนารูปแบบเพื่อให้สามารถจัดตารางโดยที่มีค่า Learning Rate ที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากพนักงานแต่ละคนมีค่าการเรียนรู้ที่แตกต่างกัน Biskup and Simons (2004) นำรูปแบบไปใช้หาค่า Learning Rate ที่เหมาะสมกับการฝึกอบรมให้กับพนักงาน Wang (2006) Wang and Cheng (2007) ได้ศึกษาการนำค่า Learning ไปประยุกต์ใช้กับงาน Deteriorating วิธีที่สองเป็นวิธี Sum-of-Processing-Time Based Learning Effect การเรียนรู้จะเกิดจากเวลารวมของการดำเนินการของทุกงานก่อนหน้า จะเป็นผลที่เกิดจากประสบการณ์การทำงานของพนักงาน Kuo and Yang (2006a) ทำการศึกษาจัดตารางบนเครื่องจักรเดียวโดยใช้ การจัดแบบ SPT วัตถุประสงค์เพื่อให้เวลาเสร็จงานมีค่าน้อยที่สุด Kuo and Yang (2006b,c) ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางของกลุ่มเครื่องจักรเดียว เพื่อให้เวลาปิดงานมีค่าน้อยที่สุด และ Koulamas and Kyparisis (2007) ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางของสองเครื่องจักร

Toksari et al (2008) ได้ศึกษาการนำผลกระทบจากการเรียนรู้ มาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบแบบทั่วไป และสายการประกอบแบบตัวยู โดยกำหนดรอบเวลาการทำงาน เพื่อหาจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด และทำการเปรียบเทียบสายการประกอบแบบทั่วไปกับแบบตัวยู เมื่อค่าของรอบเวลาการทำงานและค่าของผลกระทบจากการเรียนรู้ไม่เท่ากัน สรุปว่าถ้าค่าของรอบเวลาการทำงานเพิ่มขึ้น ผลกระทบจากการเรียนรู้จึงมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนชิ้นงานของแต่ละสถานีงาน

2.5.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO)

Simon (2008) ได้ศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมใหม่ที่มีลักษณะเป็น Evolution Algorithm มีชื่อว่า Biogeography Based Optimization: BBO เป็นการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ เป็นการนำแนวคิดการเคลื่อนย้ายประชากรจากแหล่งหนึ่งไปอีกแหล่งหนึ่งมาใช้ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ ได้มีการเปรียบเทียบคำตอบกับอัลกอริทึมอื่น คำตอบที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมหลายตัว

Abell and Du (2010) ได้ทำวิจัยโดยนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหา Complex System Families ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์แบบดั้งเดิม โดยปัญหาแบบดั้งเดิม (Traditional Problem) เป็นปัญหาที่มีการกำหนดจำนวนของวัตถุประสงค์ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความเฉพาะเจาะจง แต่ปัญหา Complex System เป็นปัญหาที่มีการปรับตั้งทั้งวัตถุประสงค์และข้อจำกัด จะเหมือนกับปัญหาจริงที่พบในโรงงาน BBO/mdo จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับปัญหานี้ ในการแก้ปัญหาที่มีการปรับตั้งที่แตกต่างกันทั้งในด้านวัตถุประสงค์และข้อจำกัด ผลที่ได้จากการวิจัยนี้สรุปว่า BBO มีความสอดคล้องกับปัญหา และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหานี้

Mo and Xu (2010) ได้ทำวิจัยโดยนำ BBO มาใช้ในการแก้ปัญหา Travelling Salesman โดยนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหา Oliver30, Eil50, Eil75 และ KroA100 แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม ACO, GA, PSO, IA และ Fish Swarm พบว่า TSPBMA (Travelling Salesman Biogeography Migration Algorithm) เป็นแนวคิดที่ดีและให้ผลที่มีประสิทธิภาพที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมตัวอื่น BBO จึงเป็นแนวทางใหม่อีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหานี้

Kundra and Sood (2010) ได้ทำวิจัยโดยการนำเอาวิธี PSO ประยุกต์ใช้ร่วมกับ BBO เป็นแนวคิดในการค้นหาแผนที่ลักษณะภูมิประเทศ ใช้หลีกเลี่ยงเส้นทางที่ยุ่งยากลำบากและเส้นทางในการเดินทางข้ามประเทศของอุปกรณ์นำทางในรถยนต์ โดยนำ PSO มาใช้ในการหาเส้นทาง เก็บข้อมูลเส้นทางที่ยุ่งยากลำบากจากภาพถ่ายดาวเทียมและ BBO นำมาใช้ในการหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ยุ่งยากลำบาก นำไปยังเส้นทางที่ไปถึงจุดมุ่งหมายได้ใกล้ที่สุด ผลที่ได้จากการวิจัย อัลกอริทึม BBO มีประสิทธิภาพที่ดี สามารถค้นหาเส้นทางที่ใกล้ที่สุดได้อย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

Ma (2010) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องคุณภาพของ Species Count ในทฤษฎีทางชีววิทยา โดยศึกษาลักษณะการทำงาน แล้วจำแนกความแตกต่างของการอพยพออกมา 6 รูปแบบ และศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรูปแบบแต่ละรูปแบบ เช่น ขนาดของประชากร ขนาดของปัญหา อัตราการกลายพันธุ์ และอัตราในการอพยพที่สูงสุดของอัลกอริทึม BBO แล้วนำกราฟแต่ละรูปแบบมาเปรียบเทียบกัน สรุปได้ว่ากราฟการอพยพรูปแบบที่ไม่ใช่เส้นตรง (Nonlinear Migration Models) มีค่าดีกว่ารูปแบบเส้นตรง (Linear Migration Models)

บทที่ 3

อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO)

3.1 เจเนติกอัลกอริทึม (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms: NSGA-II)

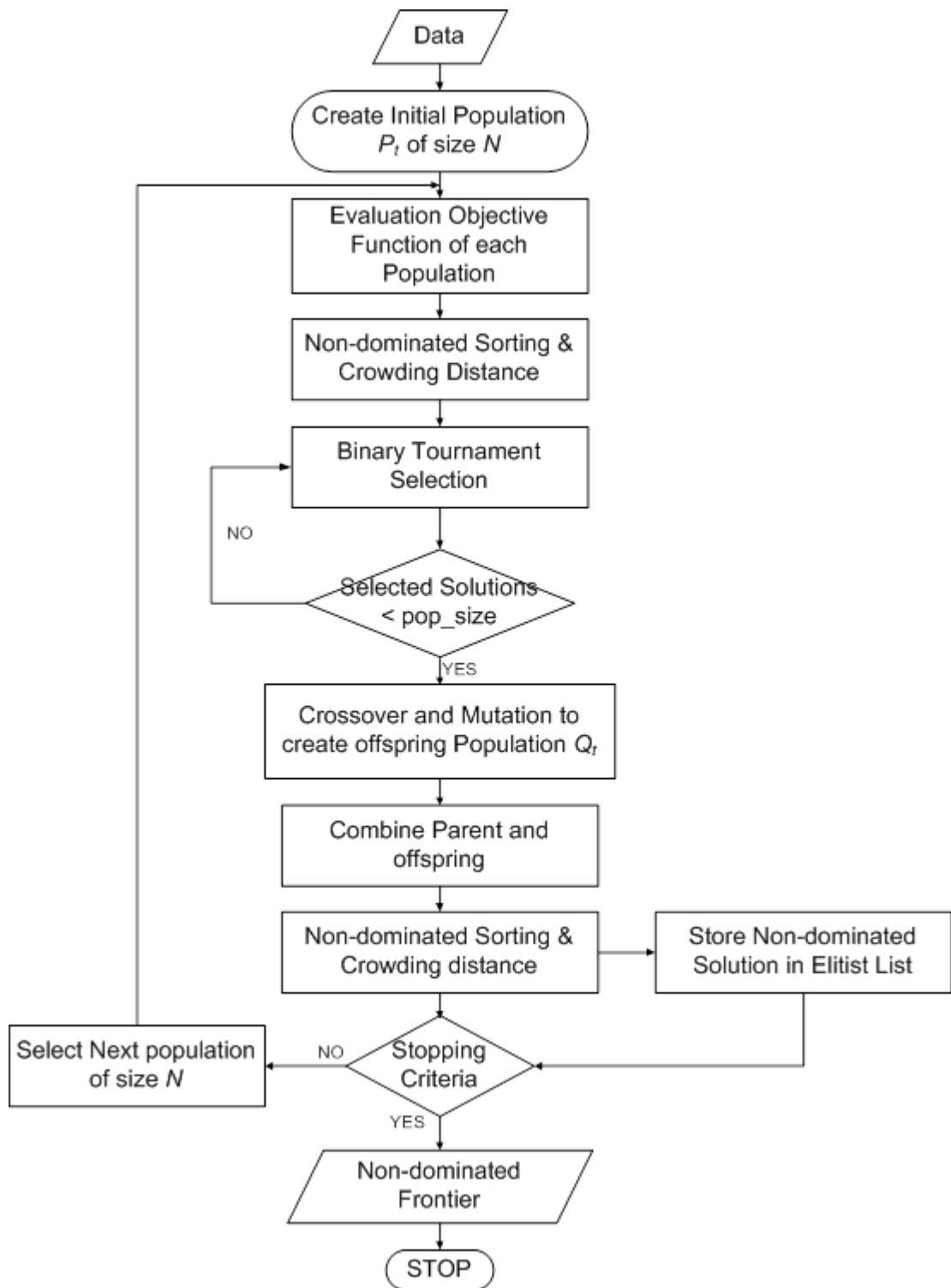
เจเนติกอัลกอริทึม เป็นวิธีการทางชีววิวัฒนาการที่นำวิธีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูกหลาน ด้วยการคัดเลือกโครโมโซม (Chromosome) หรือสตริงคำตอบ (String) ออกมาด้วยวิธีการสุ่ม ในสตริงคำตอบจะประกอบด้วยยีน (Gene) หรือคุณลักษณะ (Character) ที่มีความแตกต่างกันในแต่ละสตริง แล้วนำสตริงคำตอบไปผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด หรือใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด

3.1.1 ขั้นตอนการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ (ภาพที่ 3.1)

1. Data Input ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพัทธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิต
2. Representation & Initialization นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว โดยใช้วิธีการสุ่ม
3. Evaluation นำสตริงคำตอบที่ทำการจัดลำดับการผลิตมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด

4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting
5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)
6. Selection ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection
7. Crossover ทำการนำสตริงคำตอบที่อยู่ใน Mating Pool มาทำการแลกเปลี่ยนส่วนของคำตอบของประชากรด้วยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX)
8. Mutation ทำการนำสตริงคำตอบมาสลับกันภายในสตริงด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation
9. Combination Population ทำการนำสตริงคำตอบรุ่นลูก (Q_t) มารวมกับสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P_t)
10. Selection Next Population ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 9 เพื่อใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป
11. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population เก็บประชากรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 ไว้ แล้วนำคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากเจนเนอเรชันก่อนหน้า มาเปรียบเทียบกัน แล้วทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting แล้วทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดจำนวน N ตัว แล้วนำไปเป็นประชากรคำตอบที่ดีที่สุด ในเจนเนอเรชันถัดไป
12. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้
13. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วนำประชากรคำตอบที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 11 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของวิธีเจเนติกอัลกอริทึม

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ อยู่ในภาคผนวก ก

3.2 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO)

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค เป็นวิธีการทางฮิวริสติกที่ใช้วิธีการค้นหาคำตอบโดยการเลียนแบบพฤติกรรมบินหาอาหารของฝูงนกจากการจดจำเส้นทางจากประสบการณ์ที่ผ่านมาของตัวเองและของสมาชิกในฝูง โดยกำหนดให้นกแต่ละตัวแทนด้วยอนุภาค (Particle) ซึ่งอนุภาคจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย เรียกว่า ฝูง (Swarm) แล้วใช้หลักการการเคลื่อนที่ (Velocity) ไปในจุดหมายและทิศทางต่างๆ แล้วทำการจดจำคำตอบที่ได้พบ ซึ่งตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution: Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution: Gbest) โดย Kennedy and Eberhart (1995) ได้เป็นผู้คิดค้น จากนั้นได้มีการพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization) ขึ้นเพื่อใช้ในปัญหาการจัดตารางระบบผลิต (Liao et al., 2007)

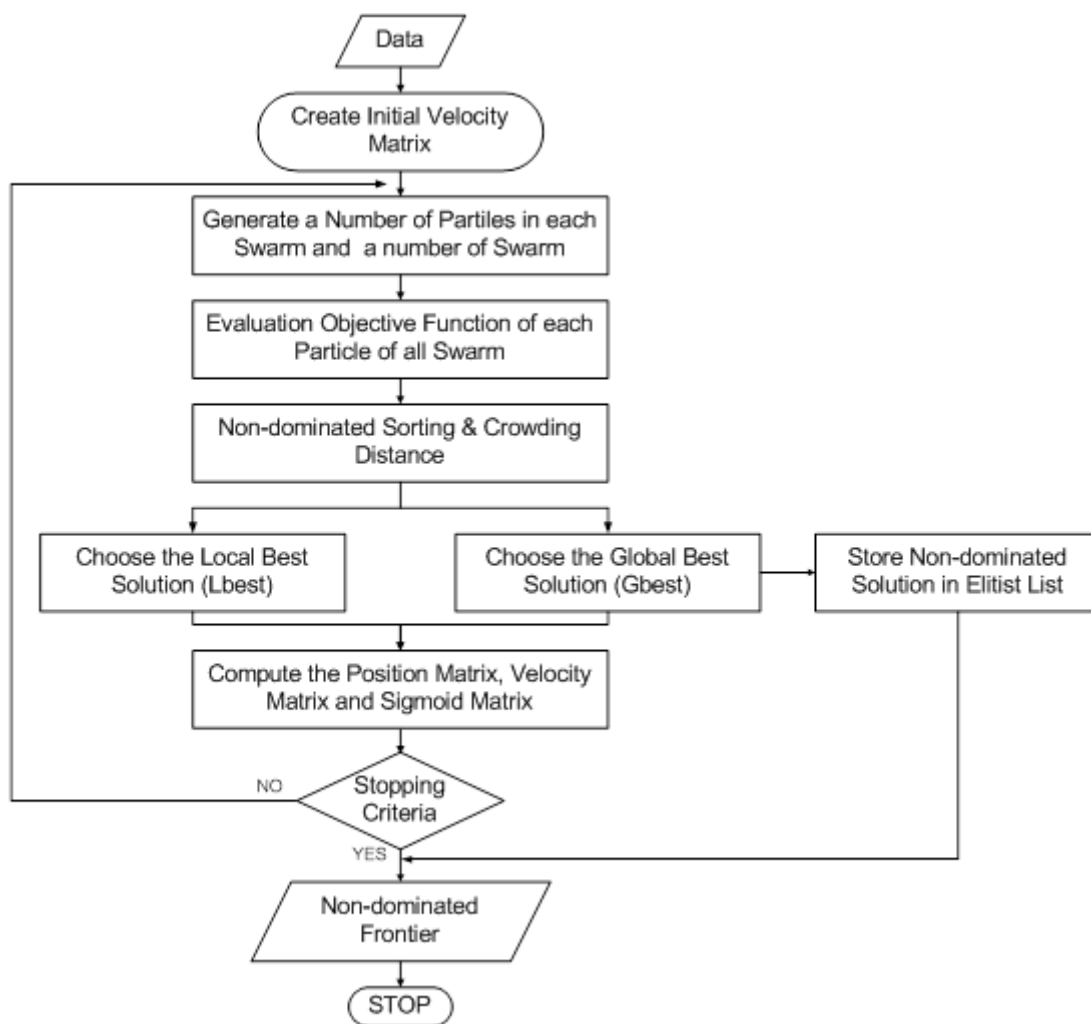
3.2.1 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ (ภาพที่ 3.2)

1. Data Input ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานแผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิต
2. Representation & Initialization นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว โดยใช้วิธีการสุ่ม
3. Evaluation นำสตริงคำตอบที่ทำกรจัดลำดับการผลิตมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด
4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting

5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)
6. Selection ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมด (Gbest) มาอย่างละหนึ่งค่าด้วยวิธี Non-dominated Sorting
7. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population เก็บประชากรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากในรอบก่อนหน้า แล้วนำมารวมกับประชากรคำตอบที่ดีที่สุดปัจจุบัน แล้วทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting แล้วทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่รอบก่อนหน้า
8. Update Matrix ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) และตารางตำแหน่งอนุภาค (Position Matrix) โดยกำหนดจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมด (Gbest)
9. Compute Sigmoid Matrix นำค่าในตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคมาแปลงค่าความน่าจะเป็นด้วย Sigmoid Function เพื่อนำไปใช้สร้างสตริงคำตอบในรอบถัดไป
10. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเงื่อนไขสูงสุดที่กำหนดไว้
11. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 10 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ อยู่ในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO

3.3 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge: PSONK)

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ เป็นการนำวิธีอีวิวิสติคของการค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคมาประยุกต์กับแนวคิดความรู้เชิงลบ (Negative Knowledge) หรือวิธีการบรรจวบ (COIN) ซึ่งเป็นการจดจำทั้งคำตอบที่ดีและไม่ดีแล้วนำไปปรับปรุงค่าความน่าจะเป็น โดยจะเพิ่มความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดีของฝูงย่อยและประชากร (Local Best Solution: Lbest และ Global Best Solution: Gbest) ทำให้โอกาสที่จะเกิดสตริงคำตอบที่ดีเพิ่มขึ้น และลดความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แยของฝูงย่อยและประชากร (Local Worst Solution: Lworst และ Global Worst Solution: Gworst) ทำให้โอกาสที่จะเกิดสตริงคำตอบไม่ดียี่ลดลง

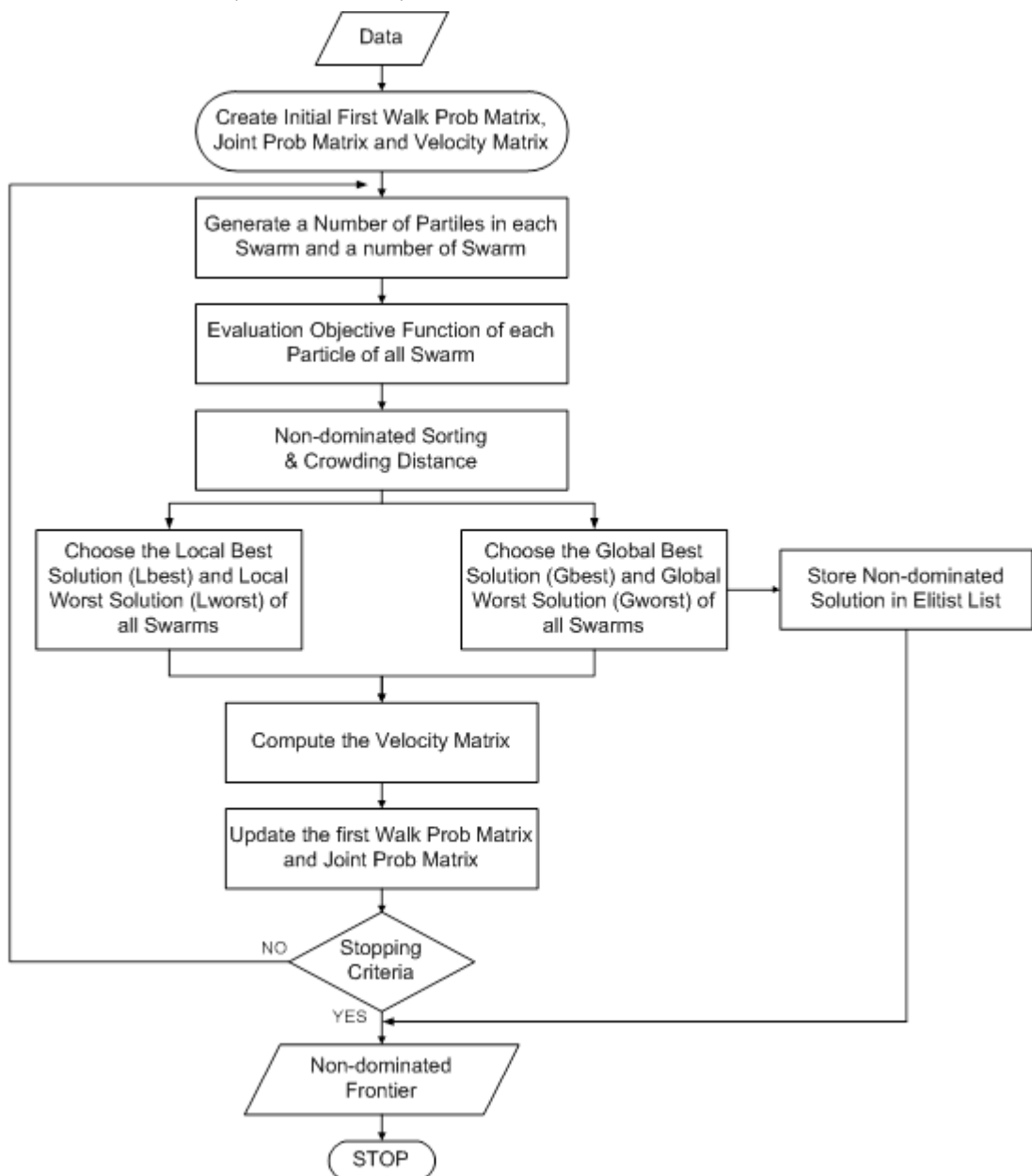
3.3.1 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ (ภาพที่ 3.3)

1. Data Input ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานแผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิต
2. Representation & Initialization นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว โดยใช้วิธีการสุ่ม
3. Evaluation นำสตริงคำตอบที่ทำการจัดลำดับการผลิตมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด
4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting
5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)
6. Selection ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและแย่งของแต่ละฝูง (Lbest และ Lworst) จากนั้นทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและแย่งของประชากรทั้งหมด (Gbest และ Gworst) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting
7. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population เก็บประชากรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากในรอบก่อนหน้า แล้วนำมารวมกับประชากรคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting แล้วทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่รอบก่อนหน้า
8. Update Probability Matrix ทำการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) และตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) โดยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งในตารางที่เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งในตารางที่เป็นสตริงคำตอบที่แย่ง

แล้วนำตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เพื่อนำไปใช้สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานถัดไป

9. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเงื่อนไขสูงสุดที่กำหนดไว้
10. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ PSONK ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ อยู่ในภาคผนวก ค

3.4 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO)

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์แบบปรับตัวได้ (BBO Adaptive) ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่จะกล่าวในบทถัดไป

3.5 สรุปท้ายบท

เนื้อหาที่กล่าวในบทนี้เป็น การนำทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO)

เจเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการทางชีววิวิติคที่ได้รับความนิยมในการนำมาแก้ปัญหาประเภทนี้ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมจากพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูกหลาน หลักการของวิธีเจเนติกอัลกอริทึมจะประกอบด้วยการคัดเลือกสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่เป็นสตริงคำตอบที่ดี จากนั้นนำสตริงคำตอบที่คัดเลือกไปทำการครอสโอเวอร์และการทำมิวเตชันเพื่อให้ได้สตริงคำตอบที่ดีขึ้น แล้วนำไปเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจเนเนอเรชันถัดไปจนครบตามจำนวนเจเนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้ เพื่อให้ได้สตริงคำตอบที่มีค่าที่เหมาะสม หรือเป็นสตริงคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด

DPSO เป็นวิธีการทางชีววิวิติคที่นำวิธีการค้นหาคำตอบโดยการเลียนแบบพฤติกรรมบินหาอาหารของฝูงนกจากการจดจำเส้นทางจากประสบการณ์ที่ผ่านมาของตัวเองและของสมาชิกในฝูง โดยกำหนดให้นกแต่ละตัวแทนด้วยอนุภาค (Particle) ซึ่งอนุภาคจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย เรียกว่าฝูง (Swarm) แล้วใช้หลักการการเคลื่อนที่ (Velocity) ไปในจุดหมายและทิศทางต่างๆ แล้วทำการจดจำคำตอบที่ได้พบ ซึ่งตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution: Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution: Gbest) แล้วนำคำตอบที่ได้ทำการ

ปรับปรุงค่าทิศทางการเคลื่อนที่และตำแหน่งของอนุภาคเพื่อให้ได้สตริงคำตอบที่มีค่าที่เหมาะสม หรือเป็นสตริงคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด

PERSONK เป็นการนำวิธีวิวัฒนาการค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคมาประยุกต์กับแนวคิดความรู้เชิงลบ (Negative Knowledge) หรือวิธีการบรรจบ (COIN) ซึ่งเป็นการจดจำทั้งคำตอบที่ดีและไม่ดีแล้วนำไปปรับปรุงค่าความน่าจะเป็น โดยจะเพิ่มความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่ดีของฝูงย่อยและประชากร (Local Best Solution: Lbest และ Global Best Solution: Gbest) ทำให้โอกาสที่จะเกิดสตริงคำตอบที่ดีเพิ่มขึ้น และลดความน่าจะเป็นในตำแหน่งของสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงย่อยและประชากร (Local Worst Solution: Lworst และ Global Worst Solution: Gworst) ทำให้โอกาสที่จะเกิดสตริงคำตอบที่ไม่ดีลดลง เพื่อให้ได้สตริงคำตอบที่มีค่าที่เหมาะสม หรือเป็นสตริงคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด

บทที่ 4

ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลาย วัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบ จากการเรียนรู้

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของ
สิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) และการนำวิธี BBO
ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ตัวอย่างการคำนวณ รวมถึงการ
กำหนดและการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึมของปัญหาที่
ใช้ในการวิจัยที่แตกต่างกัน 13 ปัญหา

4.1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO)

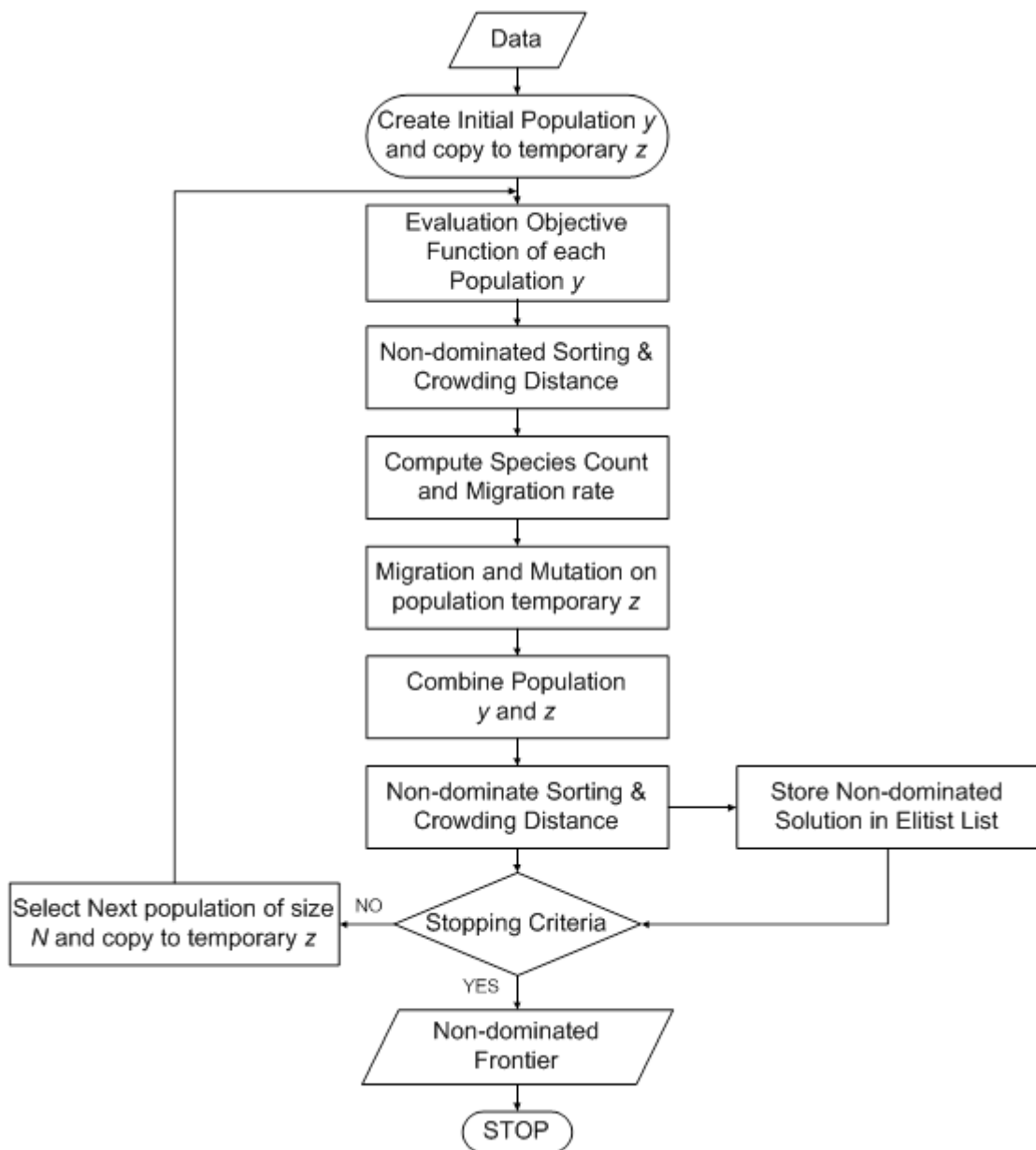
Simon (2008) ได้มีการศึกษาและพัฒนาอัลกอริทึมใหม่ที่มีลักษณะเป็น Evolution Algorithm
มีชื่อว่า การหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based
Optimization: BBO) เป็นการนำแนวคิดการเคลื่อนย้ายประชากรจากแหล่งหนึ่งไปอีกแหล่งหนึ่ง
มาใช้ BBO จะมีค่าที่สำคัญ 4 ค่า คือ Habitat Suitability Index (HSI) เป็นค่า Fitness ที่ใช้วัดว่า
คำตอบของประชากรเป็นคำตอบที่ดีหรือคำตอบที่แย่ ค่าที่สองคือ Suitability Index Variable
(SIV) เป็นค่าลักษณะ (Feature) ของคำตอบแต่ละตัวของประชากรในเกาะ ค่าที่สามคือ
Immigration Rate เป็นอัตราการอพยพเข้าของประชากรในเกาะ และค่าที่สี่คือ Emigration Rate
เป็นอัตราการอพยพออกของประชากรในเกาะ ถ้าค่าคำตอบของประชากรในเกาะมีค่าที่ดี ค่าของ
การอพยพเข้าจะมีค่าน้อย ค่าของการอพยพออกจะมีค่ามาก เนื่องจากประชากรของเกาะที่มี
คำตอบที่ดีจะพยายามแบ่งลักษณะ (Feature) ของคำตอบไปให้ประชากรของเกาะที่มีคำตอบที่แย่
กว่าเพื่อให้คำตอบในเกาะที่แย่นั้นดีขึ้น

4.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ (ภาพที่ 4.1)

1. Data Input ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิต
2. Representation & Initialization นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว โดยใช้วิธีการสุ่ม
3. Evaluation นำสตริงคำตอบที่ทำการจัดลำดับการผลิตมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด
4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting
5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)
6. Migration Rate กำหนดรูปแบบการอพยพ (Migration Model) ทำการคำนวณค่าอัตราการอพยพเข้า (λ), อัตราการอพยพออก (μ), ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ), ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) และค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ (P_K)
7. Migration ทำการอพยพโดยจะเริ่มจากการเลือกบิตที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ที่กำลังพิจารณาด้วยค่า $P_{\lambda,k}$ และทำการนำบิตที่จะอพยพเข้าโดยการเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยค่า P_μ แล้วทำการอพยพบิตในสตริงคำตอบ และทำการซ่อมแซมคำตอบ
8. Mutation นำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการอพยพเข้าสู่อัลกอริทึมด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation

9. Selection Next Population นำคำตอบที่ผ่านการอพยพและผ่านการมิวเตชันมารวมกับคำตอบเริ่มต้น แล้วทำการจัดอันดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด และนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้นไปใช้ในรอบถัดไป
10. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population เก็บประชากรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากในรอบก่อนหน้า แล้วนำมารวมกับประชากรคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting แล้วทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่รอบก่อนหน้า แล้วนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้นไปใช้ในรอบถัดไป
11. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเงินเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้
12. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 11 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO

4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

4.3.1 ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้าต่างๆ เช่น จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิตจะเหมือนกับภาคผนวก ก

4.3.1.1 พารามิเตอร์ของ BBO

จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว

รูปแบบการอพยพใช้แบบ Linear และ Sinusoidal

วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation

ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.1 ($P_m = 0.01$)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ เท่ากับ 80% (Learning Rate = 0.8)

4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบเบื้องต้นเป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบโดยใช้วิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างได้กำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้น จะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 ทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต

Model Sequence	A	B	B	C	C	C
String	1	2	3	4	5	6

แล้วทำการสุ่มสตริงคำตอบออกมาด้วยขนาดของประชากรเท่ากับ 5 จะได้สตริงคำตอบ 5 คำตอบ คือ

Strings	Model Sequences
1	3 5 1 2 6 4
2	2 6 3 1 4 5
3	1 2 5 3 4 6
4	3 6 1 5 4 2
5	4 1 5 2 6 3

4.3.3 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น ตามลำดับดังนี้

4.3.3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)
- ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

สมการในการคำนวณ ตัวแปรต่างๆ ในสมการ และตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากบทที่ 2

ตารางที่ 4.1 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	31.4556	15.6622	5.6877
2	40.1222	15.5409	5.6253
3	47.4556	14.9536	5.5354
4	22.6556	15.5363	5.6327
5	34.7889	15.8744	4.3763

1. การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบจากสตริงที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่า Fitness = 1) ไปจนถึงสตริงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่า Fitness มากที่สุด)

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งแรงของสตริง

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness
1	31.4556	15.6622	5.6877	2
2	40.1222	15.5409	5.6253	1
3	47.4556	14.9536	5.5354	1
4	22.6556	15.5363	5.6327	1
5	34.7889	15.8744	4.3763	3

2. การกำหนดค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น Crowding Distance จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน (ค่า Fitness เท่ากัน) เริ่มจากสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่า Fitness = 1) จนถึงความแข็งแรงน้อยที่สุดตามลำดับ ถ้าสตริงไหนมีค่าความแข็งแรงค่าเดียวจะกำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity)

ตารางที่ 4.3 ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	31.4556	15.6622	5.6877	2	Infinity
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
3	47.4556	14.9536	5.5354	1	Infinity
4	22.6556	15.5363	5.6327	1	Infinity
5	34.7889	15.8744	4.3763	3	Infinity

3. การกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์โดยการพิจารณาค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด (เท่ากับ 1) ค่าสปีชีส์เคาท์จะมีค่าสูงที่สุดแล้วเรียงลำดับไปจนถึงค่าความแข็งแรงที่น้อยที่สุดค่าสปีชีส์เคาท์จะมีค่าต่ำที่สุด ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าของสปีชีส์เคาท์

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Species Count
1	31.4556	15.6622	5.6877	2	2
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
3	47.4556	14.9536	5.5354	1	3
4	22.6556	15.5363	5.6327	1	3
5	34.7889	15.8744	4.3763	3	1

4.3.4 การหาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์

ในการอพยพมีการอพยพเข้า (Immigration Rate: λ) และการอพยพออก (Emigration Rate: μ) เป็นวิธีการที่สตริงคำตอบพยายามที่จะแบ่งลักษณะ (Feature) ของคำตอบไปให้สตริงคำตอบอื่นๆ การอพยพแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ลักษณะเชิงเส้นตรงและลักษณะไม่เชิงเส้นตรง รูปแบบการอพยพจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ (Ma, 2010) ในงานวิจัยจะทำการศึกษาการอพยพ 2 แบบ คือ Linear และ Sinusoidal ดังนี้

4.3.4.1 การอพยพแบบ Linear

ค่า Immigration Rate (λ_k) มีสมการดังนี้

$$\lambda_k = I \left(1 - \frac{k}{n}\right); n = K + 1 \quad (4.1)$$

ค่า Emigration Rate (μ_k) มีสมการดังนี้

$$\mu_k = E \left(\frac{k}{n}\right); n = K + 1 \quad (4.2)$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k ($P_{K,k}$) มีสมการดังนี้

$$P_{K,k} = \frac{\left(\frac{I}{E}\right)^k \left(\frac{n!}{k!(n-k)!}\right)}{1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{I}{E}\right)^i \left(\frac{n!}{i!(n-i)!}\right)} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear

No.	String	Species Count	λ_k	μ_k	P_λ	P_μ	$P_{K,k}$
1	4	3	0.2500	0.7500	0.1667	0.5000	0.2500
2	2						
3	3						
4	1	2	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.3750
5	5	1	0.7500	0.2500	0.5000	0.1667	0.2500

4.3.4.2 การอพยพแบบ Sinusoidal

ค่า Immigration Rate (λ_k) มีสมการดังนี้

$$\lambda_k = \frac{I}{2} \left(\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1\right); n = K + 1 \quad (4.4)$$

ค่า Emigration Rate (μ_k) มีสมการดังนี้

$$\mu_k = \frac{E}{2} \left(-\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1\right); n = K + 1 \quad (4.5)$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k ($P_{K,k}$) มีสมการดังนี้

$$P_{K,k} = \frac{\prod_{j=1}^k \left(\frac{I}{E}\right)^k \left(\frac{\sin^2\left(\frac{(n+j+1)\pi}{2n}\right)}{\sin^2\left(\frac{j\pi}{2n}\right)}\right)}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \left(\frac{I}{E}\right)^i \left(\frac{\sin^2\left(\frac{(n+j+1)\pi}{2n}\right)}{\sin^2\left(\frac{j\pi}{2n}\right)}\right)} \quad (4.6)$$

โดยกำหนดให้ค่า I คืออัตราการอพยพเข้าสูงสุด และ E อัตราการอพยพออกสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1 และ $n = K + 1$

ตารางที่ 4.6 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

No.	String	Species Count	λ_k	μ_k	P_λ	P_μ	$P_{K,k}$
1	4	3	0.1464	0.8536	0.0976	0.5690	0.2500
2	2						
3	3						
4	1	2	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.4268
5	5	1	0.8536	0.1464	0.5690	0.0976	0.2500

จากการคำนวณการอพยพ 2 รูปแบบ คือ Linear และ Sinusoidal โดยในตัวอย่างบทนี้จะใช้การอพยพแบบ Linear

4.3.5 การอพยพ

การอพยพเป็นการแบ่งลักษณะ (Feature) ของสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ซึ่งถ้าสตริงคำตอบมีค่าสปีชีส์เคาท์สูงค่าของการอพยพเข้า (Immigration Rate) จะมีน้อยเนื่องจากเป็นสตริงคำตอบที่ดีอยู่แล้ว ส่วนค่าของการอพยพออก (Emigration Rate) จะมีมากเพื่อที่จะเป็นการพยายามแบ่งลักษณะของคำตอบที่ดีไปให้กับประชากรสตริงคำตอบที่แย่กว่าเพื่อให้คำตอบของประชากรสตริงคำตอบนั้นดีขึ้น การอพยพของสตริงคำตอบจะพิจารณา ดังนี้

4.3.5.1 ทำการคัดลอกสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) ลงไปในสตริงคำตอบชั่วคราว

(Z) เช่น $Y_1 = 3 \ 5 \ 1 \ 2 \ 6 \ 4$

$Y_{1(1)} = 3, Y_{1(2)} = 5, Y_{1(3)} = 1, Y_{1(4)} = 2, Y_{1(5)} = 6, Y_{1(6)} = 4$

$$Z_1 = 3 \ 5 \ 1 \ 2 \ 6 \ 4$$

$$Z_{1(1)} = 3, Z_{1(2)} = 5, Z_{1(3)} = 1, Z_{1(4)} = 2, Z_{1(5)} = 6, Z_{1(6)} = 4$$

4.3.5.2 ทำการอพยพกับทุกสตรึงคำตอบ โดยเริ่มจากสตรึงคำตอบที่มีค่า Species Count สูงที่สุดไปจนถึงต่ำสุด ในตารางจะมีสตรึงคำตอบที่มีค่า Species Count สูงที่สุด 3 สตรึงคำตอบ ทำการสุ่มด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากัน เช่น ทำการสุ่มออกมาได้สตรึงที่ 4 คือ $Z_4 = 3 \ 6 \ 1 \ 5 \ 4 \ 2$

4.3.5.3 สร้างเลขสุ่ม (r) เพื่อทำการอพยพสตรึงคำตอบ ถ้าค่าสุ่ม $r < P_{\lambda,k}$ จะทำการอพยพเข้า โดยจะใช้วงล้อรูเล็ตในการเลือกค่าที่จะอพยพออก โดยการสุ่มค่าของ P_μ ถ้าสุ่มได้ค่า Species Count ที่มีหลายสตรึงคำตอบ ให้สุ่มเลือกสตรึงคำตอบที่อยู่ใน Species Count มา 1 สตรึง ตัวอย่างเช่น เราจะเริ่มพิจารณาการอพยพที่ละ Solution Feature ของสตรึงที่ 4 คือ $z_{4(1)} = 3$ ค่า $P_{\lambda,3} = 0.1667$ โดยการสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ออกมา ค่าที่สุ่มออกมาได้ $r = 0.3155$ ซึ่งค่า $r > P_{\lambda,3}$ จะไม่ทำการอพยพ คงค่าไว้เหมือนเดิม

$z_{4(2)} = 6$ ค่า $P_{\lambda,3} = 0.1667$ ค่าที่สุ่มออกมาได้ $r = 0.3007$ ซึ่งค่า $r > P_{\lambda,3}$ จะไม่ทำการอพยพ คงค่าไว้เหมือนเดิม

$z_{4(3)} = 1$ ค่า $P_{\lambda,3} = 0.1667$ ค่าที่สุ่มออกมาได้ $r = 0.0420$ ซึ่งค่า $r < P_{\lambda,3}$

แสดงว่ามีกรอพยพเข้า เราจึงใช้วงล้อรูเล็ตเลือกค่าที่จะอพยพออก โดยการสุ่มค่าของ P_μ ซึ่งเราสุ่มได้ $P_\mu = 0.5279$ ซึ่งจะไปตกอยู่ที่สปีชีส์เคาท์ที่ 2 ซึ่งมีสตรึงคำตอบที่ 1 จึงนำสตรึงคำตอบที่ 1 ตรงตำแหน่งที่ $Y_{1(3)} = 1$ จึงทำการอพยพเข้าไปใน $z_{3(2)}$

$$Y_1 = 3 \ 5 \ 1 \ 2 \ 6 \ 4$$

$$Z_4 = 3 \ 6 \ 1 \ 5 \ 4 \ 2$$

$$Y_{1(1)} = 3 \ Y_{1(2)} = 5 \ Y_{1(3)} = 1 \ Y_{1(4)} = 2 \ Y_{1(5)} = 6 \ Y_{1(6)} = 4$$

$$z_{4(1)} = 3 \ z_{4(2)} = 6 \ z_{4(3)} = 1 \ z_{4(4)} = 5 \ z_{4(5)} = 4 \ z_{4(6)} = 2$$

จะได้เป็น

$$z_{4(1)} = 3 \ z_{4(2)} = 6 \ z_{4(3)} = 1 \ z_{4(4)} = 5 \ z_{4(5)} = 4 \ z_{4(6)} = 2$$

4.3.5.4 ถ้าค่าสตรึงคำตอบที่ได้มีตัวเลขที่ซ้ำกัน จึงทำการซ่อมแซมคำตอบโดย

การนำสตรึงคำตอบ Y_4 มาแทนจะได้

$$Y_4 = 3 \ 6 \ 1 \ 5 \ 4 \ 2$$

$$Y_{4(1)} = 3 \ Y_{4(2)} = 6 \ Y_{4(3)} = 1 \ Y_{4(4)} = 5 \ Y_{4(5)} = 4 \ Y_{4(6)} = 2$$

$$z_{4(1)} = 3 \ z_{4(2)} = 6 \ z_{4(3)} = 1 \ z_{4(4)} = 5 \ z_{4(5)} = 4 \ z_{4(6)} = 2$$

จะได้สตรึงคำตอบ $Z_4 = 3 \ 6 \ 1 \ 5 \ 4 \ 2$ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 3

Immigration				Emigration			
String	Bit	r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือก ด้วย P_{μ}	สตริงในสปี ชีส์เคาท์ k	สตริงที่สุ่ม ได้	$x_{k,m_k}(b)$
4	1	0.3155	-	-	-	-	-
	2	0.3007	-	-	-	-	-
	3	0.0420	adjusted	0.5279	2	1	1
	4	0.2560	-	-	-	-	-
	5	0.4087	-	-	-	-	-
	6	0.9475	-	-	-	-	-
3	1	0.9193	-	-	-	-	-
	2	0.1212	adjusted	0.5919	2	1	5
	3	0.3597	-	-	-	-	-
	4	0.7193	-	-	-	-	-
	5	0.5236	-	-	-	-	-
	6	0.2608	-	-	-	-	-
2	1	0.4931	-	-	-	-	-
	2	0.8558	-	-	-	-	-
	3	0.7244	-	-	-	-	-
	4	0.1991	-	-	-	-	-
	5	0.1573	adjusted	0.3705	3	3	4
	6	0.1413	adjusted	0.0793	3	2	5

ตารางที่ 4.8 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 3

String	Bit	Immigration $Z_{k,n_k}(b)$	Emigration $X_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ					
					1	2	3	4	5	6
4	3	1	1	เริ่มต้น	3	6	1	5	4	2
				ปรับปรุง	3	6	<u>1</u>	5	4	2
				ซ่อมแซม	3	6	<u>1</u>	5	4	2
3	2	1	5	เริ่มต้น	1	2	5	3	4	6
				ปรับปรุง	1	<u>5</u>	5	3	4	6
				ซ่อมแซม	1	5	<u>2</u>	3	4	6
2	5	3	4	เริ่มต้น	2	6	3	1	4	5
				ปรับปรุง	2	6	3	1	<u>4</u>	5
				ซ่อมแซม	2	6	3	1	<u>4</u>	5
	6	2	5	เริ่มต้น	2	6	3	1	4	5
				ปรับปรุง	2	6	3	1	4	<u>5</u>
				ซ่อมแซม	2	6	3	1	4	<u>5</u>

ตารางที่ 4.9 การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 2

Immigration				Emigration			
String	Bit	r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือก ด้วย P_{μ}	สตริงในสปี ชีส์เคาท์ k	สตริงที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
1	1	0.4603	-	-	-	-	-
	2	0.5157	-	-	-	-	-
	3	0.2720	adjusted	0.2316	3	3	5
	4	0.3652	-	-	-	-	-
	5	0.5986	-	-	-	-	-
	6	0.6685	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.10 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 2

String	Bit	Immigration $Z_{k,n_k}(b)$	Emigration $X_{k,m_k}(b)$	การ ปรับปรุง	สตริงคำตอบ					
					1	2	3	4	5	6
1	3	3	5	เริ่มต้น	3	5	1	2	6	4
				ปรับปรุง	3	5	<u>5</u>	2	6	4
				ซ่อมแซม	3	<u>1</u>	5	2	6	4

ตารางที่ 4.11 การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 1

Immigration				Emigration			
String	Bit	r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือก ด้วย P_{μ}	สตริงในสปี ชีส์เคาท์ k	สตริงที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
5	1	0.8946	-	-	-	-	-
	2	0.0873	adjusted	0.5390	2	1	5
	3	0.4284	adjusted	0.6172	2	1	1
	4	0.5589	-	-	-	-	-
	5	0.2259	adjusted	0.1045	3	4	4
	6	0.7795	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.12 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 1

String	Bit	Immigration $Z_{k,n_k}(b)$	Emigration $X_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ					
					1	2	3	4	5	6
5	2	1	5	เริ่มต้น	4	1	5	2	6	3
				ปรับปรุง	4	<u>5</u>	5	2	6	3
				ซ่อมแซม	4	5	<u>1</u>	2	6	3
	3	1	1	เริ่มต้น	4	5	1	2	6	3
				ปรับปรุง	4	5	<u>1</u>	2	6	3
				ซ่อมแซม	4	5	<u>1</u>	2	6	3
	5	4	4	เริ่มต้น	4	5	1	2	6	3
				ปรับปรุง	4	5	1	2	<u>4</u>	3
				ซ่อมแซม	<u>6</u>	5	1	2	4	3

ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ

Strings	Model Sequences
1	3 1 5 2 6 4
2	2 6 3 1 4 5
3	1 5 2 3 4 6
4	3 6 1 5 4 2
5	6 5 1 2 4 3

4.3.6 การมิวเตชัน

เมื่อทำการอพยพสตริงคำตอบเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่กระบวนการมิวเตชันโดยสตริงคำตอบ Z มาทำการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ในการมิวเตชันสตริงคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

- เลือกสปีชีส์เคาท์ที่จะทำมิวเตชันโดยใช้วงล้อสุ่มค่า r ที่อยู่ระหว่าง 0-1 ให้กับสปีชีส์เคาท์ ถ้าค่า $q_{k-1} \leq r < q_k$; $q_0 = 0$ สปีชีส์เคาท์จะถูกเลือกไปทำการมิวเตชัน

$$m(k) = \frac{1 - P_{K,k}}{\sum_{k=1}^K (1 - P_{K,k})} \quad (4.7)$$

โดยที่ $m(k)$ คือ ความน่าจะเป็นในการเลือกสปีชีส์เคาท์ k

$P_{K,k}$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์ k

ตารางที่ 4.14 การคัดเลือกสปีชีส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อสุ่ม

No.	String	Species Count	$P_{K,k}$	$1 - P_{K,k}$	$m(k)$	q_k	r
1	4	3	0.2500	0.7500	0.3529	0.3529	Selected
2	2						
3	3						
4	1	2	0.3750	0.6250	0.2941	0.6470	-
5	5	1	0.2500	0.7500	0.3529	1	-

จากตัวอย่างทำการสุ่มค่าได้ $r = 0.3355$ ซึ่งจะไปตกอยู่ที่สปีชีส์เคาท์ 3 ซึ่งมีสตริงคำตอบ 3 สตริงคำตอบ คือสตริงคำตอบที่ 4, 2 และ 3

- เมื่อได้สปีชีส์เคาท์ที่จะทำการมิวเตชันแล้ว ให้นำสตริงคำตอบที่อยู่ในสปีชีส์เคาท์ทำการสลับบิตกันโดยจะใช้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) = 0.01 ทำการคูณกับจำนวนบิตทั้งหมดในสตริงคำตอบ $0.01 \times 18 = 0.18$ บิต เพราะฉะนั้นจะทำการสลับบิต ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation จะทำโดยสุ่มตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ 2 ตำแหน่งมาทำการสลับตำแหน่งกัน จากตัวอย่างสตริงคำตอบที่ 4 ทำการสุ่มตำแหน่งที่ 3 สลับกับตำแหน่งที่

String 4 = [3 6 1 5 4 2]

String ที่ได้ = [3 6 5 1 4 2]

หลังจากทำการมิวเตชันเสร็จจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้น และทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้

ตารางที่ 4.15 สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน

Strings	Model Sequences
1	3 1 5 2 6 4
2	2 6 3 1 4 5
3	1 5 2 3 4 6
4	3 6 5 1 4 2
5	6 5 1 2 4 3

4.3.7 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงต่างๆ เช่น การอพยพ และการมิวเตชันสูญหายไป เพราะในกระบวนการปรับปรุงอาจทำให้เกิดคำตอบที่แย่กว่าคำตอบก่อนปรับปรุงได้ จึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) สตริงคำตอบคำตอบชั่วคราว (Z) และสตริงคำตอบหลังจากมิวเตชันมารวมกันแล้วหาค่าที่ดีที่สุดจากนั้นทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ตารางที่ 4.16 สตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราวและสตริงคำตอบหลังมีเวตชัน

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	3 5 1 2 6 4
	2	2 6 3 1 4 5
	3	1 2 5 3 4 6
	4	3 6 1 5 4 2
	5	4 1 5 2 6 3
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	3 1 5 2 6 4
	7	2 6 3 1 4 5
	8	1 5 2 3 4 6
	9	3 6 1 5 4 2
	10	6 5 1 2 4 3
สตริงคำตอบที่มีเวตชัน	11	3 6 5 1 4 2

เมื่อนำสตริงคำตอบมารวมกัน ทำการตัดสตริงคำตอบที่ซ้ำกันออกแล้วทำการคำนวณหา
ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 4.17 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่มลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	3 5 1 2 6 4
	2	2 6 3 1 4 5
	3	1 2 5 3 4 6
	4	3 6 1 5 4 2
	5	4 1 5 2 6 3
สตริงคำตอบรุ่มลูก	6	3 1 5 2 6 4
	7	1 5 2 3 4 6
	8	3 6 5 1 4 2
	9	6 5 1 2 4 3

ตารางที่ 4.18 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงที่นำมารวมกัน

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	31.4556	15.6622	5.6877
2	40.1222	15.5409	5.6253
3	47.4556	14.9536	5.5354
4	22.6556	15.5363	5.6327
5	34.7889	15.8744	4.3763
6	44.1222	14.6109	5.5928
7	41.7222	14.4929	4.7298
8	22.6556	14.7049	5.6327
9	40.1222	14.9716	5.6381

จากนั้นทำการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting กำหนดค่าความแข็งแรง และคำนวณค่า Crowding Distance ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด

ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบที่ทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณค่า Crowding Distance

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	31.4556	15.6622	5.6877	3	Infinity
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
3	47.4556	14.9536	5.5354	2	Infinity
4	22.6556	15.5363	5.6327	2	Infinity
5	34.7889	15.8744	4.3763	4	Infinity
6	44.1222	14.6109	5.5928	2	2.2957
7	41.7222	14.4929	4.7298	1	Infinity
8	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
9	40.1222	14.9716	5.6381	2	1.7961

ทำการเรียงค่า Fitness จากน้อยไปมาก และเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย

ตารางที่ 4.20 สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
7	41.7222	14.4929	4.7298	1	Infinity
8	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
3	47.4556	14.9536	5.5354	2	Infinity
4	22.6556	15.5363	5.6327	2	Infinity
6	44.1222	14.6109	5.5928	2	2.2957
9	40.1222	14.9716	5.6381	2	1.7961
1	31.4556	15.6622	5.6877	3	Infinity
5	34.7889	15.8744	4.3763	4	Infinity

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness น้อยที่สุด (Fitness = 1) และมีค่า Crowding Distance มากที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดและคัดเลือกสตริงคำตอบไว้ดำเนินการในรอบถัดไป

ตารางที่ 4.21 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

Strings	Model Sequences
7	1 5 2 3 4 6
8	3 6 5 1 4 2
2	2 6 3 1 4 5

ตารางที่ 4.22 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

Strings	Model Sequences
7	1 5 2 3 4 6
8	3 6 5 1 4 2
2	2 6 3 1 4 5
3	1 2 5 3 4 6
4	3 6 1 5 4 2

4.3.8 การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

ในการแก้ปัญหารอบที่ 2 มีขั้นตอนเหมือนการแก้ในรอบที่ 1 แต่สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะได้จากสตริงคำตอบที่ได้ในรอบที่ 1 (ตารางที่ 4.22)

4.3.8.1 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น ตามลำดับดังนี้

1. การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)
- ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

สมการในการคำนวณ ตัวแปรต่างๆในสมการ และตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากบทที่ 2

ตารางที่ 4.23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	41.7222	14.4929	4.7298
2	22.6556	14.7049	5.6327
3	40.1222	15.5409	5.6253
4	47.4556	14.9536	5.5354
5	22.6556	15.5363	5.6327

2. การกำหนดค่าความแข็งแรงและการกำหนดค่าความแข็งแรง

วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบจากสตริงที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่า Fitness = 1) ไปจนถึงสตริงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่า Fitness มากที่สุด)

วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น Crowding Distance จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน (ค่า Fitness เท่ากัน) เริ่มจากสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่า Fitness = 1) จนถึงความแข็งแรงน้อยที่สุดตามลำดับ ถ้าสตริงไหนมีค่าความแข็งแรงค่าเดียวจะกำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity)

ตารางที่ 4.24 ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	41.7222	14.4929	4.7298	1	Infinity
2	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
3	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
4	47.4556	14.9536	5.5354	2	Infinity
5	22.6556	15.5363	5.6327	2	Infinity

3. การกำหนดค่าสปีชีส์เคาท

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชีส์เคาทโดยการพิจารณาค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด (เท่ากับ 1) ค่าสปีชีส์เคาทจะมีค่าสูงที่สุดแล้วเรียงลำดับไปจนถึงค่าความแข็งแรงที่น้อยที่สุดค่าสปีชีส์เคาทจะมีค่าต่ำที่สุด ดังนี้

ตารางที่ 4.25 ค่าของสปีชีส์เคาท

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Species Count
1	41.7222	14.4929	4.7298	1	2
2	22.6556	14.7049	5.6327	1	2
3	40.1222	15.5409	5.6253	1	2
4	47.4556	14.9536	5.5354	2	1
5	22.6556	15.5363	5.6327	2	1

4.3.8.2 การหาอัตราอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์

ทำการคำนวณค่าการอพยพ ดังนี้

ตารางที่ 4.26 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Linear

No.	String	Species Count	λ_k	μ_k	P_λ	P_μ	$P_{K,k}$
1	2	2	0.3333	0.6667	0.3333	0.6667	0.3750
2	3						
3	1						
4	5	1	0.6667	0.3333	0.6667	0.3333	0.3750
5	4						

1. การอพยพ

ทำการอพยพกับทุกสตริงคำตอบ โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่มีค่า Species Count สูงที่สุดไปจนถึงต่ำสุด ดังนี้

ตารางที่ 4.27 การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 2

Immigration				Emigration			
String	Bit	r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือก ด้วย P_{μ}	สตริงในสปี ชีส์เคาท์ k	สตริงที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
1	1	0.5620	-	-	-	-	-
	2	0.5465	-	-	-	-	-
	3	0.5508	-	-	-	-	-
	4	0.6945	-	-	-	-	-
	5	0.9275	-	-	-	-	-
	6	0.9442	-	-	-	-	-
3	1	0.9033	-	-	-	-	-
	2	0.6041	-	-	-	-	-
	3	0.9262	-	-	-	-	-
	4	0.1169	adjusted	0.3408	2	2	1
	5	0.1812	adjusted	0.4262	2	2	4
	6	0.5370	-	-	-	-	-
2	1	0.7691	-	-	-	-	-
	2	0.6389	-	-	-	-	-
	3	0.8931	-	-	-	-	-
	4	0.0607	adjusted	0.1758	2	2	1
	5	0.0259	adjusted	0.1376	2	2	4
	6	0.7545	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.28 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 2

String	Bit	Immigration $Z_{k,n_k}(b)$	Emigration $X_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ					
					1	2	3	4	5	6
1	-	-	-	เริ่มต้น	1	5	2	3	4	6
				ปรับปรุง	1	5	2	3	4	6
				ซ่อมแซม	1	5	2	3	4	6
3	4	2	1	เริ่มต้น	2	6	3	1	4	5
				ปรับปรุง	2	6	3	<u>1</u>	4	5
				ซ่อมแซม	2	6	3	<u>1</u>	4	5
	5	2	4	เริ่มต้น	2	6	3	1	4	5
				ปรับปรุง	2	6	3	1	<u>4</u>	5
				ซ่อมแซม	2	6	3	1	<u>4</u>	5
2	4	2	1	เริ่มต้น	3	6	5	1	4	2
				ปรับปรุง	3	6	5	<u>1</u>	4	2
				ซ่อมแซม	3	6	5	<u>1</u>	4	2
	5	2	4	เริ่มต้น	3	6	5	1	4	2
				ปรับปรุง	3	6	5	1	<u>4</u>	2
				ซ่อมแซม	3	6	5	1	<u>4</u>	2

ตารางที่ 4.29 การอพยพเข้าและออกของสปีชีส์เคาท์ 1

Immigration				Emigration			
String	Bit	r	$r < P_{\lambda,k}$	สุ่มเลือก ด้วย P_{μ}	สตริงในสปีชีส์เคาท์ k	สตริงที่สุ่มได้	$x_{k,m_k}(b)$
5	1	0.6187	adjusted	0.0068	2	1	1
	2	0.3606	adjusted	0.1911	2	3	6
	3	0.0170	adjusted	0.0398	2	1	2
	4	0.7541	-	-	-	-	-
	5	0.5195	adjusted	0.5859	2	1	4
	6	0.0561	adjusted	0.3352	2	2	2
4	1	0.6853	-	-	-	-	-
	2	0.6957	-	-	-	-	-
	3	0.7998	-	-	-	-	-
	4	0.6606	adjusted	0.5199	2	1	3
	5	0.5112	adjusted	0.7403	1	5	4
	6	0.5382	adjusted	0.9101	1	5	2

ตารางที่ 4.30 การปรับปรุงสตริงคำตอบของสปีชีส์เคาท์ 1

String	Bit	Immigration $Z_{k,n_k}(b)$	Emigration $X_{k,m_k}(b)$	การปรับปรุง	สตริงคำตอบ					
					1	2	3	4	5	6
5	1	1	1	เริ่มต้น	3	6	1	5	4	2
				ปรับปรุง	<u>1</u>	6	1	5	4	2
				ซ่อมแซม	1	6	<u>3</u>	5	4	2
	2	3	6	เริ่มต้น	1	6	3	5	4	2
				ปรับปรุง	1	<u>6</u>	3	5	4	2
				ซ่อมแซม	1	<u>6</u>	3	5	4	2
	3	1	2	เริ่มต้น	1	6	3	5	4	2
				ปรับปรุง	1	6	<u>2</u>	5	4	2
				ซ่อมแซม	1	6	2	5	4	<u>3</u>
	5	1	4	เริ่มต้น	1	6	2	5	4	3
				ปรับปรุง	1	6	2	5	<u>4</u>	3
				ซ่อมแซม	1	6	2	5	<u>4</u>	3
6	2	2	เริ่มต้น	1	6	2	5	4	3	
			ปรับปรุง	1	6	2	5	4	<u>2</u>	
			ซ่อมแซม	1	6	<u>3</u>	5	4	2	
4	4	1	3	เริ่มต้น	1	2	5	3	4	6
				ปรับปรุง	1	2	5	<u>3</u>	4	6
				ซ่อมแซม	1	2	5	<u>3</u>	4	6
	5	5	4	เริ่มต้น	1	2	5	3	4	6
				ปรับปรุง	1	2	5	3	<u>4</u>	6
				ซ่อมแซม	1	2	5	3	<u>4</u>	6
	6	5	2	เริ่มต้น	1	2	5	3	4	6
				ปรับปรุง	1	2	5	3	4	<u>2</u>
				ซ่อมแซม	1	<u>6</u>	5	3	4	2

ตารางที่ 4.31 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ

Strings	Model Sequences
1	1 5 2 3 4 6
2	3 6 5 1 4 2
3	2 6 3 1 4 5
4	1 6 5 3 4 2
5	1 6 3 5 4 2

4.3.8.3 การมิวเตชัน

เมื่อทำการอพยพสตริงคำตอบเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่กระบวนการมิวเตชันโดยสตริงคำตอบ Z มาทำการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ในการมิวเตชันสตริงคำตอบดังนี้

ตารางที่ 4.32 การคัดเลือกสปีชีส์เคาท์เข้าสู่กระบวนการมิวเตชันด้วยวงล้อลูกเต๋า

No.	String	Species Count	$P_{K,k}$	$1 - P_{K,k}$	$m(k)$	q_k	r
1	1	2	0.3750	0.6250	0.5000	0.5000	-
2	3						
3	2						
4	5	1	0.3750	0.6250	0.5000	1	selected
5	4						

จากตัวอย่างทำการสุ่มค่าได้ $r = 0.9277$ ซึ่งจะไปตกอยู่ที่สปีชีส์เคาท์ 1 ซึ่งมีสตริงคำตอบ 2 สตริงคำตอบ คือสตริงคำตอบที่ 5 และ 3 จึงทำการสุ่มสตริงคำตอบที่ทำการมิวเตชันได้ สตริงคำตอบที่ 5 หลังจากทำการมิวเตชันเสร็จจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้น และทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้

ตารางที่ 4.33 สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน

Strings	Model Sequences
1	1 5 2 3 4 6
2	3 6 5 1 4 2
3	2 6 3 1 4 5
4	1 6 5 3 4 2
5	1 6 3 2 4 5

4.3.8.4 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงต่างๆ เช่น การอพยพ และการมิวเตชันสูญหายไป เพราะในกระบวนการปรับปรุงอาจทำให้เกิดคำตอบที่แย่กว่าคำตอบก่อนปรับปรุงได้ จึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) สตริงคำตอบชั่วคราว (Z) และสตริงหลังทำมิวเตชันมารวมกันแล้วหาค่าที่ดีที่สุดจากนั้นทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ตารางที่ 4.34 สตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราว และสตริงหลังทำมิวเตชัน

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	1 5 2 3 4 6
	2	3 6 5 1 4 2
	3	2 6 3 1 4 5
	4	1 2 5 3 4 6
	5	3 6 1 5 4 2
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	1 5 2 3 4 6
	7	3 6 5 1 4 2
	8	2 6 3 1 4 5
	9	1 6 5 3 4 2
	10	1 6 3 5 4 2
สตริงหลังทำมิวเตชัน	11	1 5 2 3 4 6
	12	3 6 5 1 4 2
	13	2 6 3 1 4 5
	14	1 6 5 3 4 2
	15	1 6 3 2 4 5

เมื่อนำสตริงคำตอบมารวมกัน ทำการตัดสตริงคำตอบที่ซ้ำกันออกแล้วทำการคำนวณหา
ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 4.35 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	1 5 2 3 4 6
	2	3 6 5 1 4 2
	3	2 6 3 1 4 5
	4	1 2 5 3 4 6
	5	3 6 1 5 4 2
สตริงคำตอบรุ่นลูก	6	1 6 5 3 4 2
	7	1 6 3 2 4 5

ตารางที่ 4.36 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงที่นำมารวมกัน

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	41.7222	14.4929	4.7298
2	22.6556	14.7049	5.6327
3	40.1222	15.5409	5.6253
4	47.4556	14.9536	5.5354
5	22.6556	15.5363	5.6327
6	42.1222	14.2131	5.5431
7	41.7222	14.4929	4.7298

จากนั้นทำการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting กำหนดค่าความแข็งแรง และคำนวณค่า Crowding Distance ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด

ตารางที่ 4.37 สถริงคำตอบที่ทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่านวนค่า Crowding Distance

String	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	41.7222	14.4929	4.7298	1	1.6064
2	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
3	40.1222	15.5409	5.6253	1	2.9795
4	47.4556	14.9536	5.5354	2	Infinity
5	22.6556	15.5363	5.6327	2	Infinity
6	42.1222	14.2131	5.5431	1	Infinity
7	41.7222	14.4929	4.7298	1	1.6064

ทำการเรียงค่า Fitness จากน้อยไปมาก และเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย

ตารางที่ 4.38 สถริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance

String	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
2	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
6	42.1222	14.2131	5.5431	1	Infinity
3	40.1222	15.5409	5.6253	1	2.9795
1	41.7222	14.4929	4.7298	1	1.6064
7	41.7222	14.4929	4.7298	1	1.6064
4	47.4556	14.9536	5.5354	2	Infinity
5	22.6556	15.5363	5.6327	2	Infinity

ทำการคัดเลือกสถริงคำตอบที่มีค่า Fitness น้อยที่สุด (Fitness = 1) และมีค่า Crowding Distance มากที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดและคัดเลือกสถริงคำตอบไว้ดำเนินการในรอบถัดไป โดยนำสถริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1 และรอบที่ 2 มารวมกันแล้วทำการจัดอันดับ

แบบ Non-Dominated Sorting กำหนดค่าความแข็งแรงและค่านวนค่า Crowding Distance ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด เพื่อหาสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

ตารางที่ 4.39 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 2

Strings	Model Sequences
2	3 6 5 1 4 2
6	1 6 5 3 4 2
3	2 6 3 1 4 5
1	1 5 2 3 4 6
7	1 6 3 2 4 5

ตารางที่ 4.40 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1

Strings	Model Sequences
1	1 5 2 3 4 6
2	3 6 5 1 4 2
3	2 6 3 1 4 5

ตารางที่ 4.41 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1 และรอบที่ 2

Strings	Model Sequences
1	3 6 5 1 4 2
2	1 6 5 3 4 2
3	2 6 3 1 4 5
4	1 5 2 3 4 6
5	1 6 3 2 4 5

ตารางที่ 4.42 สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
2	42.1222	14.2131	5.5431	1	Infinity
3	40.1222	15.5409	5.6253	1	2.9795
4	41.7222	14.4929	4.7298	1	1.6064
5	41.7222	14.4929	4.7298	1	1.6064

ตารางที่ 4.43 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

Strings	Model Sequences
1	3 6 5 1 4 2
2	1 6 5 3 4 2
3	2 6 3 1 4 5
4	1 5 2 3 4 6
5	1 6 3 2 4 5

4.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO

เนื่องจากปัญหาที่ใช้ในการวิจัยที่แตกต่างกัน 13 ปัญหา จึงต้องมีการทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละปัญหาเพื่อให้ค่าของคำตอบที่ค้นหามีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในอัลกอริทึมนี้มีการทำการทดสอบพารามิเตอร์ของรูปแบบการอพยพแบบเป็น 2 แบบ คือ Linear และ Sinusoidal โดยทำการทดลองแบบ Full Factorial Design ทำซ้ำที่ 2 Replicate ดังนั้นในบทนี้ทำการทดลองเท่ากับ $2 \times 2 \times 13 = 52$ ครั้ง โดยจะใช้ตัวแปรตอบสนอง 4 ตัวในการวิเคราะห์ คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto Optimal Set) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominate Solution) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computation Time to Solution)

4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อทำการออกแบบการทดลองเสร็จจึงนำผลของ BBO มาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

4.5.1 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.1

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0000014	0.0000014	16.66	0.055
Error	2	0.0000002	0.0000001		
Total	3	0.0000016			

S = 0.0002891 R-Sq = 89.28% R-Sq(adj) = 83.92%

ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.1 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.2 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.055 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.4 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.012 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ 1 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-S

ตารางที่ 4.44 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.1

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.5.2 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.2

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0002695	0.0002695	*	*
Error	2	0.0000000	0.0000000		
Total	3	0.0002695			

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

ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.5 ค่า P-Value หาค่าไม่ได้ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0034087	0.0034087	*	*
Error	2	0.0000000	0.0000000		
Total	3	0.0034087			

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

ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.6 ค่า P-Value หาค่าไม่ได้ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Ratio versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0275151	0.0275151	*	*
Error	2	0.0000000	0.0000000		
Total	3	0.0275151			

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

ภาพที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 1.2 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.7 ค่า P-Value หาค่าไม่ได้ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

4. การวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านเวลาในการคำนวณเป็นตัวแปรตอบสนอง รูปแบบการอพยพที่ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ BBO-S

ตารางที่ 4.45 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 1.2

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.5.3 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.1

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0000137	0.0000137	13.94	0.065
Error	2	0.0000020	0.0000010		
Total	3	0.0000156			

S = 0.0009904 R-Sq = 87.46% R-Sq(adj) = 81.18%

ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.8 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.065 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0000541	0.0000541	1.58	0.336
Error	2	0.0000687	0.0000343		
Total	3	0.0001228			

S = 0.005859 R-Sq = 44.08% R-Sq(adj) = 16.12%

ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.1 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

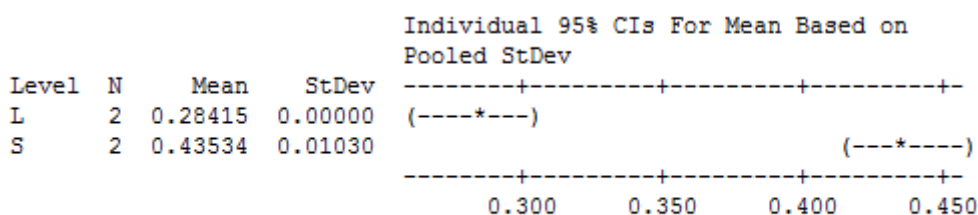
จากภาพที่ 4.9 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.336 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้ลงและจำนวนอนุภาคในผู้ลงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Ratio versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0228566	0.0228566	430.56	0.002
Error	2	0.0001062	0.0000531		
Total	3	0.0229628			

S = 0.007286 R-Sq = 99.54% R-Sq(adj) = 99.31%



Pooled StDev = 0.00729

ภาพที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 2.1 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.10 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.002 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้ลงและจำนวนอนุภาคในผู้ลงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ 1 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-S

ตารางที่ 4.46 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.1

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.5.4 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.2

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0000160	0.0000160	0.32	0.630
Error	2	0.0001009	0.0000504		
Total	3	0.0001169			

S = 0.007102 R-Sq = 13.68% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.11 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.630 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.00025	0.00025	0.08	0.807
Error	2	0.00636	0.00318		
Total	3	0.00661			

S = 0.05641 R-Sq = 3.74% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 2.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.12 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.807 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้และจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Ratio versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0165	0.0165	0.56	0.534
Error	2	0.0593	0.0296		
Total	3	0.0757			

S = 0.1721 R-Sq = 21.73% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 2.2 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.13 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.534 มากกว่า 0.5 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้และจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

4. การวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านเวลาในการคำนวณเป็นตัวแปรตอบสนองรูปแบบการอพยพที่ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ BBO-S

ตารางที่ 4.47 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 2.2

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.5.5 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.1

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0000638	0.0000638	31.56	0.030
Error	2	0.0000040	0.0000020		
Total	3	0.0000678			

S = 0.001421 R-Sq = 94.04% R-Sq(adj) = 91.06%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
L	2	0.010759	0.000000
S	2	0.018745	0.002010

0.0100 0.0150 0.0200 0.0250

Pooled StDev = 0.001421

ภาพที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.1 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.14 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.030 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-L

ตารางที่ 4.48 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.1

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-L

4.5.6 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.2

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0012539	0.0012539	462.76	0.002
Error	2	0.0000054	0.0000027		
Total	3	0.0012593			

S = 0.001646 R-Sq = 99.57% R-Sq(adj) = 99.35%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
L	2	0.003395	0.000000
S	2	0.038805	0.002328

0.000 0.012 0.024 0.036

Pooled StDev = 0.001646

ภาพที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 3.2 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.15 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.002 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-L

ตารางที่ 4.49 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 3.2

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-L

4.5.7 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.1

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0005535	0.0005535	5633.60	0.000
Error	2	0.0000002	0.0000001		
Total	3	0.0005537			

S = 0.0003134 R-Sq = 99.96% R-Sq(adj) = 99.95%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
L	2	0.007862	0.000443	+-----+-----+-----+----- (*-)
S	2	0.031388	0.000000	+-----+-----+-----+----- (-*)

0.0070 0.0140 0.0210 0.0280

Pooled StDev = 0.000313

ภาพที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.1 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.16 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-L

ตารางที่ 4.50 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.1

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-L

4.5.8 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.2

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0002680	0.0002680	*	*
Error	2	0.0000000	0.0000000		
Total	3	0.0002680			

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

ภาพที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.17 ค่า P-Value หาค่าไม่ได้ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0025260	0.0025260	*	*
Error	2	0.0000000	0.0000000		
Total	3	0.0025260			

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

ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 4.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.18 ค่า P-Value หาค่าไม่ได้ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นต่อไป

3. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Ratio versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.2894058	0.2894058	*	*
Error	2	0.0000000	0.0000000		
Total	3	0.2894058			

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

ภาพที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา 4.2 เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.19 ค่า P-Value หาค่าไม่ได้ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นต่อไป

4. การวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านเวลาในการคำนวณเป็นตัวแปรตอบสนอง รูปแบบการอพยพที่ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ BBO-L

ตารางที่ 4.51 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 4.2

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-L

4.5.9 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.1

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0001711	0.0001711	3.33	0.210
Error	2	0.0001029	0.0000514		
Total	3	0.0002740			

S = 0.007172 R-Sq = 62.45% R-Sq(adj) = 43.68%

ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

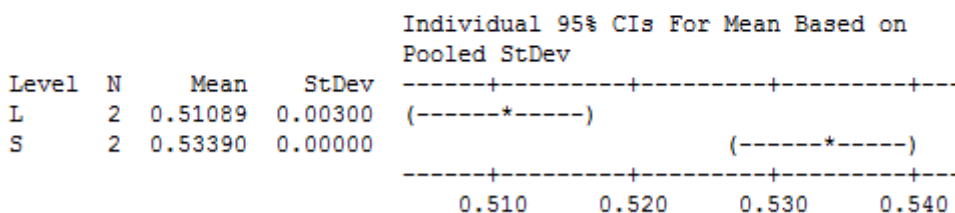
จากภาพที่ 4.20 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.210 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0005292	0.0005292	117.88	0.008
Error	2	0.0000090	0.0000045		
Total	3	0.0005382			

S = 0.002119 R-Sq = 98.33% R-Sq(adj) = 97.50%



Pooled StDev = 0.00212

ภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.1 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.21 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.008 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-L

ตารางที่ 4.52 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.1

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-L

4.5.10 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.002286	0.002286	2.58	0.250
Error	2	0.001773	0.000886		
Total	3	0.004058			

S = 0.02977 R-Sq = 56.32% R-Sq(adj) = 34.48%

ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

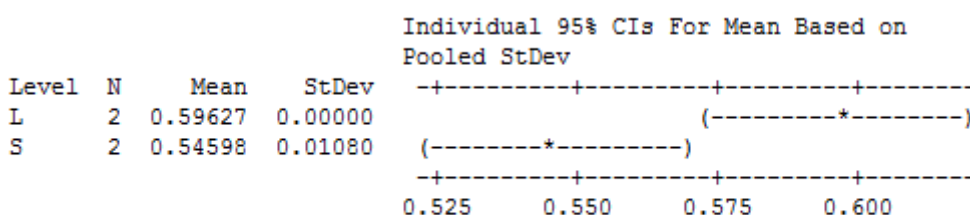
จากภาพที่ 4.22 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.250 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0025291	0.0025291	43.35	0.022
Error	2	0.0001167	0.0000583		
Total	3	0.0026458			

S = 0.007638 R-Sq = 95.59% R-Sq(adj) = 93.38%



Pooled StDev = 0.00764

ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Set 5.2 เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.23 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.022 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-S

ตารางที่ 4.53 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Set 5.2

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.5.11 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study 183 ชั้นงาน

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.008309	0.008309	16.20	0.057
Error	2	0.001026	0.000513		
Total	3	0.009334			

S = 0.02264 R-Sq = 89.01% R-Sq(adj) = 83.52%

ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.24 ค่า P-Value 0.057 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0030	0.0030	0.14	0.748
Error	2	0.0450	0.0225		
Total	3	0.0480			

S = 0.1500 R-Sq = 6.35% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.25 ค่า P-Value 0.748 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้และจำนวนอนุภาคในผู้ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Ratio versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0400	0.0400	3.20	0.216
Error	2	0.0250	0.0125		
Total	3	0.0650			

S = 0.1118 R-Sq = 61.54% R-Sq(adj) = 42.31%

ภาพที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Case Study เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.26 ค่า P-Value เท่ากับ 0.216 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้และจำนวนอนุภาคในผู้ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

4. การวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านเวลาในการคำนวณเป็นตัวแปรตอบสนอง รูปแบบการอพยพที่ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ BBO-S

ตารางที่ 4.54 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Case Study

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.5.12 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Bartholdi 148 ชั้นงาน

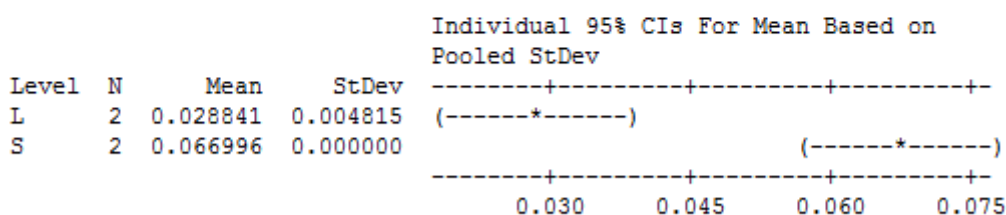
จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0014558	0.0014558	125.61	0.008
Error	2	0.0000232	0.0000116		
Total	3	0.0014790			

S = 0.003404 R-Sq = 98.43% R-Sq(adj) = 97.65%



Pooled StDev = 0.003404

ภาพที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Bartholdi เมื่อใช้ค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.27 ค่า P-Value เท่ากับ 0.008 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-L

ตารางที่ 4.55 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Bartholdi

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-L

4.5.13 การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Lee 205 ชั้นงาน

จากการวิเคราะห์ ANOVA ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Convergence versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.0001941	0.0001941	2.74	0.240
Error	2	0.0001419	0.0000710		
Total	3	0.0003360			

S = 0.008423 R-Sq = 57.76% R-Sq(adj) = 36.65%

ภาพที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Lee เมื่อใช้ค่าการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.28 ค่า P-Value เท่ากับ 0.240 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Spread versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.00109	0.00109	1.00	0.423
Error	2	0.00220	0.00110		
Total	3	0.00329			

S = 0.03313 R-Sq = 33.25% R-Sq(adj) = 0.00%

ภาพที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Lee เมื่อใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนอง

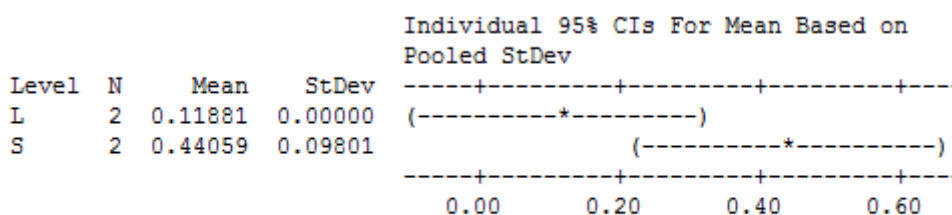
จากภาพที่ ค่า P-Value เท่ากับ 0.423 มากกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนผู้ลงและจำนวนอนุภาคในผู้ลง ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นตัวแปรตอบสนองจึงต้องนำผลไปทำการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

3. การวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

One-way ANOVA: Ratio versus BBO

Source	DF	SS	MS	F	P
BBO	1	0.10354	0.10354	21.56	0.043
Error	2	0.00961	0.00480		
Total	3	0.11315			

S = 0.06931 R-Sq = 91.51% R-Sq(adj) = 87.26%



Pooled StDev = 0.06931

ภาพที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของปัญหา Lee เมื่อใช้ตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4.30 ค่า P-Value เท่ากับ 0.043 น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่า ปัจจัย จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาคในฝูงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวน คำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีค่าเข้าใกล้ 1 ที่รูปแบบการอพยพ คือ BBO-S

ตารางที่ 4.56 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา Lee

ปัจจัย	พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
รูปแบบการอพยพ	BBO-S

4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 13 ปัญหา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ทั้งจากการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการทดลองเบื้องต้นของอัลกอริทึม BBO มี รายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.57 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม BBO ของแต่ละปัญหา

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.01	Ma (2010)
รูปแบบในการอพยพ	Set 1.1 : S	การทดลอง
	Set 1.2 : S	
	Set 2.1 : S	
	Set 2.2 : S	
	Set 3.1 : L	
	Set 3.2 : L	
	Set 4.1 : L	
	Set 4.2 : L	
	Set 5.1 : L	
	Set 5.2 : S	
	Case Study : S	
	Bartholdi : L	
Lee : S		
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

4.7 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์แบบปรับตัวได้ (BBO Adaptive) ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่

เป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์มาประยุกต์กับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการวิวัฒนาการและการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) เพื่อให้คำตอบที่ได้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงมากที่สุดและมีการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบที่เหมาะสม ทำให้คำตอบที่ได้มีค่าดีขึ้น

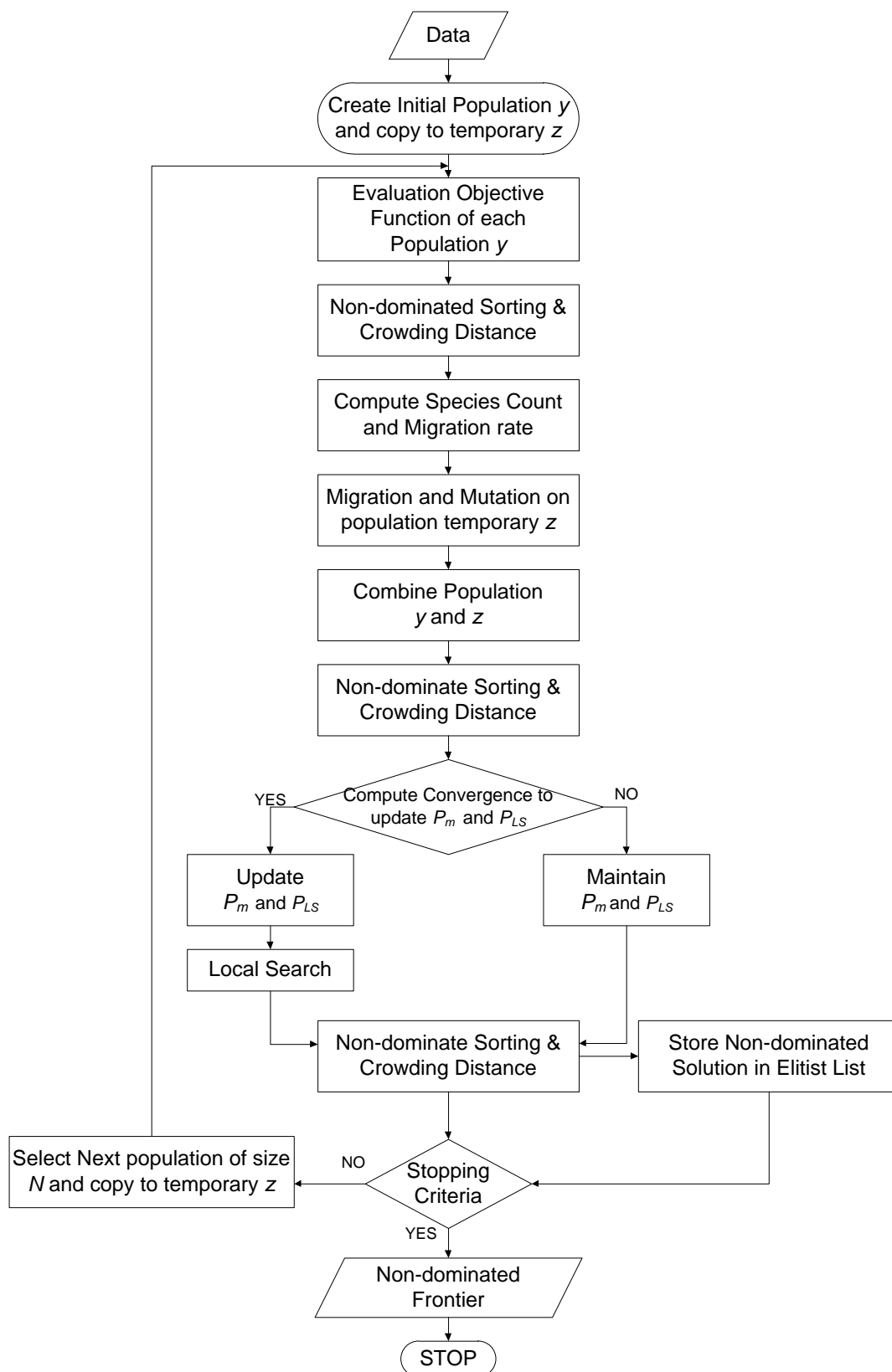
4.7.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO Adaptive ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

มีขั้นตอนในการทำงานดังนี้ (ภาพที่ 4.31)

1. Data Input ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิต
2. Representation & Initialization นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว โดยใช้วิธีการสุ่ม
3. Evaluation นำสตริงคำตอบที่ทำกรการจัดลำดับการผลิตมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด
4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting
5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)
6. Migration Rate กำหนดรูปแบบการอพยพ (Migration Model) ทำการคำนวณค่าอัตราการอพยพเข้า (λ), อัตราการอพยพออก (μ), ค่าความ

น่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ), ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) และค่าความน่าจะเป็นเป็นการเกิดสปีชีส์เคาท (P_K)

7. Migration ทำการอพยพโดยจะเริ่มจากการเลือกบิทที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาทที่กำลังพิจารณาด้วยค่า $P_{\lambda,k}$ และทำการนำบิทที่จะอพยพเข้าโดยการเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยค่า P_μ แล้วทำการอพยพบิทในสตริงคำตอบ และทำการซ่อมแซมคำตอบ
8. Mutation นำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการอพยพเข้าสู่การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation
9. Selection Next Population นำคำตอบที่ผ่านการอพยพและผ่านการมิวเตชันมารวมกับคำตอบเริ่มต้น แล้วทำการจัดอันดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด และนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้นไปใช้ในรอบถัดไป
10. Local Search Heuristic เป็นการปรับปรุงคำตอบหลังจากที่ได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ด้วยการวนค้นหาเฉพาะที่ซ้ำจำนวน k ครั้ง ซึ่งความถี่ในการค้นหาจะขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นของความถี่ในการค้นหาเฉพาะที่ที่กำหนด
11. Update P_m และค่าความน่าจะเป็นของการทำ Local Search (P_{2-opt})
12. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population เก็บประชากรคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากในรอบก่อนหน้า แล้วนำมารวมกับประชากรคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วทำการเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Non-dominated Sorting แล้วทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดแทนที่รอบก่อนหน้า แล้วนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับสตริงคำตอบเริ่มต้นไปใช้ในรอบถัดไป
13. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเงื่อนไขสูงสุดที่กำหนดไว้
14. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วนำประชากรคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 13 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



ภาพที่ 4.31 ขั้นตอนการทำงานของ BBO Adaptive

4.7.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ BBO Adaptive ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

4.7.2.1 ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้าต่างๆ เช่น จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิตจะเหมือนกับภาคผนวก ก

4.7.2.2 พารามิเตอร์ของ BBO Adaptive

จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว

รูปแบบการอพยพใช้แบบ Sinusoidal

วิธีการมิวเทชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation

ความน่าจะเป็นในการมิวเทชัน เท่ากับ 0.1 ($P_m=0.1$)

ความน่าจะเป็นในการทำ Local Search เท่ากับ 0.3 ($P_{2-opt}=0.3$)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ เท่ากับ 80% (Learning Rate = 0.8)

4.7.3 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบเบื้องต้นเป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบโดยใช้วิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างได้กำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้น จะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 ทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต

Model Sequence	A	B	B	C	C	C
String	1	2	3	4	5	6

แล้วทำการสุ่มสตริงคำตอบออกมาด้วยขนาดของประชากรเท่ากับ 5 จะได้สตริงคำตอบ 5 คำตอบ คือ

Strings	Model Sequences
1	3 5 1 2 6 4
2	2 6 3 1 4 5
3	1 2 5 3 4 6
4	3 6 1 5 4 2
5	4 1 5 2 6 3

4.7.4 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น ตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 4.58 ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	31.4556	15.6622	5.6877	2	Infinity
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
3	47.4556	14.9536	5.5354	1	Infinity
4	22.6556	15.5363	5.6327	1	Infinity
5	34.7889	15.8744	4.3763	3	Infinity

4.7.5 การกำหนดค่าสปีชีส์เคาท

เมื่อทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นเรียบร้อยแล้ว จะทำการจัดลำดับสตริงคำตอบด้วยการกำหนดค่าสปีชีส์เคาทโดยการพิจารณาค่าความแข็งแรงที่มากที่สุด (เท่ากับ 1) ค่าสปีชีส์เคาทจะมีค่าสูงที่สุดแล้วเรียงลำดับไปจนถึงค่าความแข็งแรงที่น้อยที่สุดค่าสปีชีส์เคาทจะมีค่าต่ำที่สุด ดังนี้

ตารางที่ 4.59 ค่าของสปีชีส์เคาท์

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Species Count
1	31.4556	15.6622	5.6877	2	2
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	3
3	47.4556	14.9536	5.5354	1	3
4	22.6556	15.5363	5.6327	1	3
5	34.7889	15.8744	4.3763	3	1

4.7.6 การหาอัตราการอพยพ (Migration Rate) และค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสปีชีส์เคาท์

ในการอพยพมีการอพยพเข้า (Immigration Rate: λ) และการอพยพออก (Emigration Rate: μ) เป็นวิธีการที่สตรึงคำตอบพยายามที่จะแบ่งลักษณะ (Feature) ของคำตอบไปให้สตรึงคำตอบอื่นๆ การอพยพแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ลักษณะเชิงเส้นตรงและลักษณะไม่เชิงเส้นตรง รูปแบบการอพยพจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ (Ma, 2010) ในงานวิจัยจะทำการศึกษารูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

ตารางที่ 4.60 ค่าความน่าจะเป็นการอพยพเข้าและออกที่มีการอพยพแบบ Sinusoidal

No.	String	Species Count	λ_k	μ_k	P_λ	P_μ	$P_{K,k}$
1	4	3	0.1464	0.8536	0.0976	0.5690	0.2500
2	2						
3	3						
4	1	2	0.5000	0.5000	0.3333	0.3333	0.4268
5	5	1	0.8536	0.1464	0.5690	0.0976	0.2500

4.7.7 การอพยพ

การอพยพเป็นการแบ่งลักษณะ (Feature) ของสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ซึ่งถ้าสตริงคำตอบมีค่าสปีชีส์เคาท์สูงค่าของการอพยพเข้า (Immigration Rate) จะมีน้อยเนื่องจากเป็นสตริงคำตอบที่ดีอยู่แล้ว ส่วนค่าของการอพยพออก (Emigration Rate) จะมีมากเพื่อที่จะเป็นการพยายามแบ่งลักษณะของคำตอบที่ดีไปให้กับประชากรสตริงคำตอบที่แย่กว่าเพื่อให้คำตอบของประชากรสตริงคำตอบนั้นดีขึ้น การอพยพของสตริงคำตอบจะเหมือนกับ BBO

ตารางที่ 4.61 สตริงคำตอบหลังจากผ่านกระบวนการอพยพ

Strings	Model Sequences
1	3 5 2 1 6 4
2	2 6 3 1 4 5
3	2 1 5 3 4 6
4	3 6 1 5 4 2
5	1 6 5 2 4 3

4.7.8 การมิวเตชัน

เมื่อทำการอพยพสตริงคำตอบเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่กระบวนการมิวเตชันโดยสตริงคำตอบ Z มาทำการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ในการมิวเตชันสตริงคำตอบจะทำเหมือน BBO หลังจากทำการมิวเตชันเสร็จจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้น และทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้

ตารางที่ 4.62 สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน

Strings	Model Sequences
1	1 5 2 3 6 4
2	2 6 3 1 4 5
3	2 1 5 3 4 6
4	3 6 1 5 4 2
5	1 6 5 2 4 3

4.7.9 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดคำตอบที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงต่างๆ เช่น การอพยพ และการมิวเตชันสูญหายไป เพราะในกระบวนการปรับปรุงอาจทำให้เกิดคำตอบที่แย่กว่าคำตอบก่อนปรับปรุงได้ จึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) สตริงคำตอบชั่วคราว (Z) และสตริงคำตอบหลังทำมิวเตชันมารวมกันแล้วหาค่าที่ดีที่สุดจากนั้นทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ตารางที่ 4.63 สตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราว และสตริงคำตอบหลังมีเวตชัน

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (Y)	1	3 5 1 2 6 4
	2	2 6 3 1 4 5
	3	1 2 5 3 4 6
	4	3 6 1 5 4 2
	5	4 1 5 2 6 3
สตริงคำตอบชั่วคราว (Z)	6	3 5 2 1 6 4
	7	2 6 3 1 4 5
	8	2 1 5 3 4 6
	9	3 6 1 5 4 2
	10	1 6 5 2 4 3
สตริงคำตอบหลังมีเวตชัน	11	1 5 2 3 6 4
	12	2 6 3 1 4 5
	13	2 1 5 3 4 6
	14	3 6 1 5 4 2
	15	1 6 5 2 4 3

เมื่อนำสตริงคำตอบมารวมกัน ทำการตัดสตริงคำตอบที่ซ้ำกันออกแล้วทำการคำนวณหา
ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 4.64 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น	1	3 5 1 2 6 4
	2	2 6 3 1 4 5
	3	1 2 5 3 4 6
	4	3 6 1 5 4 2
	5	4 1 5 2 6 3
สตริงคำตอบรุ่นลูก	6	3 5 2 1 6 4
	7	2 1 5 3 4 6
	8	1 6 5 2 4 3
	9	1 5 2 3 6 4

ตารางที่ 4.65 สตริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance

String	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
4	22.6556	15.5363	5.6327	1	Infinity
8	42.1222	14.2131	5.5431	1	Infinity
2	40.1222	15.5409	5.6253	1	0.9103
6	40.1222	15.5409	5.6253	1	0.9103
9	41.7222	14.4929	4.7298	1	0.8965
1	31.4556	15.6622	5.6877	2	Infinity
3	47.4556	14.9536	5.5354	2	Infinity
7	44.1222	14.6109	5.5928	2	3
5	34.7889	15.8744	4.3763	3	Infinity

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness น้อยที่สุด (Fitness = 1) และมีค่า Crowding Distance มากที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดและคัดเลือกสตริงคำตอบไว้ดำเนินการในรอบถัดไป

ตารางที่ 4.66 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

Strings	Model Sequences
4	3 6 1 5 4 2
8	1 6 5 2 4 3
2	2 6 3 1 4 5
6	3 5 2 1 6 4
9	1 5 2 3 6 4

ตารางที่ 4.67 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

Strings	Model Sequences
4	3 6 1 5 4 2
8	1 6 5 2 4 3
2	2 6 3 1 4 5
6	3 5 2 1 6 4
9	1 5 2 3 6 4

เมื่อได้ค่าที่ดีที่สุดของคำตอบรอบการทำงานที่ 1 มาแล้วให้ทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้เป็น Obtain Pareto

4.7.10 การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

ในการแก้ปัญหาในรอบที่ 2 มีขั้นตอนเหมือนการแก้ในรอบที่ 1 แต่สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะได้จากสตริงคำตอบที่ได้ในรอบที่ 1 (ตารางที่ 4.67) จากนั้นทำการวนซ้ำจนถึงรอบที่ 5 เมื่อได้ค่าที่ดีที่สุดของคำตอบรอบการทำงานที่ 5 มาแล้วให้ทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้เป็น True Pareto

4.7.11 การคำนวณค่า Efficiency

วิธีการคำนวณค่าจะอยู่ในภาคผนวก ง โดย BBO adaptive จะนำค่าที่กำหนดช่วงก็คือ รอบการทำงานที่ 1 และรอบการทำงานที่ 5 โดยจะกำหนดคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 1 เป็นค่า Obtain Pareto และรอบการทำงานสุดท้ายซึ่งในที่นี้ก็คือรอบการทำงานที่ 5 เป็นค่า True Pareto เพื่อนำมาหาค่า การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)

ตารางที่ 4.68 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง(รอบการทำงานที่ 5) และกลุ่มคำตอบที่ได้ (รอบการทำงานที่ 1)

กลุ่มคำตอบ	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal Solution)	19.5889	15.2717	4.4344
	70.9222	14.0759	4.7132
	19.5889	15.8083	5.6973
	44.1222	14.4168	5.6001
	34.3889	14.4735	4.8227
	22.6556	14.7049	5.6327
	41.7222	14.4929	4.7298
	22.5222	15.1276	4.4237
	25.5889	14.6662	5.6253
	32.2556	14.6600	5.6001
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution)	22.6556	15.5363	5.6327
	42.1222	14.2131	5.5431
	40.1222	15.5409	5.6253
	41.7222	14.4929	4.7298

ตารางที่ 4.69 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชัน
วัตถุประสงคที่ 1

True Pareto	Obtained Pareto			
	22.6556	40.1222	41.7222	42.1222
19.5889	0.0036	0.16	0.1859	0.1927
19.5889	0.0036	0.16	0.1859	0.1927
22.5222	0	0.1176	0.1399	0.1458
22.6556	0	0.1158	0.138	0.1438
25.5889	0.0033	0.0802	0.0988	0.1037
32.2556	0.035	0.0235	0.034	0.0369
34.3889	0.0522	0.0125	0.0204	0.0227
41.7222	0.138	0.001	0	0.0001
44.1222	0.1749	0.0061	0.0022	0.0015
70.9222	0.8841	0.36	0.3236	0.3148

ตารางที่ 4.70 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชัน
วัตถุประสงคที่ 2

True Pareto	Obtained Pareto			
	15.5363	15.5409	14.4929	14.2131
15.2717	0.012	0.0124	0.2553	0.1517
15.8083	0.0127	0.0122	0.0802	0.028
15.1276	0.0286	0.0292	0.3191	0.2017
14.7049	0.1183	0.1196	0.5472	0.3894
14.6662	0.1296	0.131	0.5712	0.4096
14.6600	0.1314	0.1329	0.5751	0.4129
14.4735	0.1933	0.1951	0.6981	0.518
14.4929	0.1566	0.1551	0	0.0134
14.4168	0.2145	0.2163	0.7378	0.5524
14.0759	0.3651	0.3674	1	0.7819

ตารางที่ 4.71 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชัน
วัตถุประสงคที่ 3

True Pareto	Obtained Pareto			
	5.6327	5.6253	4.7298	5.5431
4.4344	0.217	0.221	0.9809	0.2682
5.6973	0.0014	0.0017	0.316	0.008
4.4237	0.2112	0.2151	0.9685	0.2618
5.6327	0	0	0.2752	0.0027
5.6253	0	0	0.2707	0.0023
5.6001	0.0004	0.0002	0.2557	0.0011
4.8227	0.2215	0.2175	0.0029	0.1752
4.7298	0.2752	0.2707	0	0.2233
5.6001	0.0004	0.0002	0.2557	0.0011
4.7132	0.2854	0.2808	0.0001	0.2325

ตารางที่ 4.72 ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบจากการรวมกันของ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

True Pareto	Obtained Pareto				Minimum Distance
	1	2	3	4	
1	0.4822	0.6272	1.1925	0.7827	0.4822
2	0.1328	0.4171	0.7629	0.4783	0.1328
3	0.4897	0.6016	1.1948	0.7805	0.4897
4	0.344	0.4852	0.98	0.732	0.3440
5	0.3645	0.4595	0.9699	0.7181	0.3645
6	0.4084	0.3957	0.9299	0.6715	0.3957
7	0.6834	0.6519	0.8493	0.8461	0.6519
8	0.7549	0.6533	0	0.4866	0
9	0.6243	0.4718	0.9978	0.745	0.4718
10	1.2388	1.0041	1.1505	1.1529	1.0041
Total Minimum Distance					4.3367
Average Minimum Distance					0.4337

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าการลู่เข้ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (CM) เท่ากับ 0.4337

4.7.12 การปรับค่า P_m และค่า P_{2-opt}

การปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการมิวเทชันของ BBO ปกติจะกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเทชันมีค่าคงที่ตลอดจนจบรอบการทำงาน ซึ่งการปรับค่าความน่าจะเป็นในการมิวเทชันที่ระดับสูงจะทำให้ได้คำตอบที่หลากหลายและช่วยป้องกันการติด local optimal แต่บางครั้งคำตอบที่ได้จะ converge ลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีช้ามาก เพราะฉะนั้นช่วงแรกเราจะทำการปรับให้ค่า P_m ให้น้อยๆ เพื่อให้คำตอบลู่เข้ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Exploit) ก่อน และเมื่อคำตอบ Converge แล้วจะทำการปรับค่า P_m ให้เพิ่มขึ้นเพื่อให้มีการกระจายของกลุ่มคำตอบ (Explore) ส่วนการปรับตั้งค่า P_{2-opt} นั้นเพื่อเป็นการค้นหาเฉพาะที่ในสตริงคำตอบที่ดีเพื่อหวังว่าจะสามารถเจอสตริงคำตอบที่ดีกว่า ในงานวิจัยนี้มีกำหนดเงื่อนไขว่า

กฎข้อที่ 1 ถ้า $P_m = 0.1$ และ $CM \leq 0.1$ ให้ทำการกำหนดค่า $P_m = 0.3$ และ $P_{2-opt} = 0.1$

กฎข้อที่ 2 ถ้า $P_m = 0.1$ และ $CM > 0.1$ ให้ทำการกำหนดค่า $P_m = 0.1$ และ $P_{2-opt} = 0.3$

กฎข้อที่ 3 ถ้า $P_m = 0.3$ และ $CM > 0.1$ ให้ทำการกำหนดค่า $P_m = 0.1$ และ $P_{2-opt} = 0.3$

กฎข้อที่ 4 ถ้า $P_m = 0.3$ และ $CM \leq 0.1$ ให้ทำการกำหนดค่า $P_m = 0.3$ และ $P_{2-opt} = 0.1$

เราทำการเริ่มต้นรอบการทำงานที่ 1 ด้วยค่า $P_m = 0.1$ และ $P_{2-opt} = 0.3$ จะได้คำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 1 มาเป็น Obtain Pareto ในตัวอย่างนี้ได้กำหนดไว้ที่ 5 รอบการทำงานแล้วทำการเปรียบเทียบค่าโดยให้คำตอบที่ดีที่สุดในรอบการทำงานที่ 5 เป็นค่า True Pareto แล้วทำการหาค่าการสุ่มเข้ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (CM) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4337 ซึ่งจะอยู่ตรงเงื่อนไขที่ 2 เพราะฉะนั้นในรอบการทำงานถัดไปเราจะทำการปรับค่า $P_m = 0.1$ และ $P_{2-opt} = 0.3$ ทำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนครบรอบการทำงานที่กำหนดไว้

4.7.12.1 การทำการค้นหาเฉพาะที่ Local Search

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดมาแล้วให้ทำการสลับบิตด้วยวิธีการ 2-Opt ด้วยค่า $P_{2-opt} = 0.3$ จำนวนสตริงคำตอบที่ทำการค้นหาเฉพาะที่เท่ากับค่าความน่าจะเป็นคูณกับจำนวนสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน (ตารางที่ 4.73) คือ $0.3 \times 16 = 4.8$ เท่ากับ 5 สตริงคำตอบ แล้วทำการสุ่มสตริงคำตอบมา 5 คำตอบ สุ่มได้สตริงคำตอบที่ 10, 4, 13, 6 และ 16 (ตารางที่ 4.74) ตำแหน่งที่จะทำการสลับในสตริงที่ 10 คือ ระหว่างตำแหน่งที่ 1 กับ ตำแหน่งที่ 2

สตริงคำตอบที่ 10 = [2 6 5 1 4 3]

สตริงคำตอบที่ทำ 2-Opt แล้ว = [6 2 5 1 4 3]

สตริงคำตอบที่ 4 จะทำการสลับระหว่างตำแหน่งที่ 1 กับ ตำแหน่งที่ 2

สตริงคำตอบที่ 4 = [6 2 5 1 4 3]

สตริงคำตอบที่ทำ 2-Opt แล้ว = [2 6 5 1 4 3]

สตริงคำตอบที่ 13 จะทำการสลับระหว่างตำแหน่งที่ 6 กับ ตำแหน่งที่ 4

สตริงคำตอบที่ 13 = [3 5 6 2 1 4]

สตริงคำตอบที่ทำ 2-Opt แล้ว = [3 5 6 4 1 2] ดังแสดงในตารางที่ 4.75

ตารางที่ 4.73 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่สุ่มรอบปัจจุบัน

Strings	Model Sequences
1	6 3 5 1 4 2
2	5 3 6 1 4 2
3	4 5 6 2 1 3
4	6 2 5 1 4 3
5	6 4 5 2 1 3
6	6 2 1 4 5 3
7	6 4 5 3 1 2
8	5 6 2 4 1 3
9	6 5 2 3 1 4
10	2 6 5 1 4 3
11	1 5 2 3 6 4
12	6 2 5 3 1 4
13	3 5 6 2 1 4
14	5 3 6 4 1 2
15	6 2 5 4 1 3
16	6 3 5 4 1 2

ตารางที่ 4.74 สตริงคำตอบที่นำมาทำ Local Search

Strings	Model Sequences
10	2 6 5 1 4 3
4	6 2 5 1 4 3
13	3 5 6 2 1 4
6	6 2 1 4 5 3
16	6 3 5 4 1 2

ตารางที่ 4.75 สตริงคำตอบทำ Local Search แล้ว

Strings	Model Sequences
10	6 2 5 1 4 3
4	2 6 5 1 4 3
13	3 5 6 4 1 2
6	6 1 2 4 5 3
16	6 3 5 1 4 2

หลังจากนั้นนำสตริงที่ทำ Local Search แล้วมารวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน แล้วทำการตัดสตริงที่ซ้ำออก และจัดอันดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting

ตารางที่ 4.76 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่สุ่มรอบปัจจุบันและสตริงคำตอบที่ทำ Local Search

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่สุ่มในรอบปัจจุบัน	1	6 3 5 1 4 2
	2	5 3 6 1 4 2
	3	4 5 6 2 1 3
	4	6 2 5 1 4 3
	5	6 4 5 2 1 3
	6	6 2 1 4 5 3
	7	6 4 5 3 1 2
	8	5 6 2 4 1 3
	9	6 5 2 3 1 4
	10	2 6 5 1 4 3
	11	1 5 2 3 6 4
	12	6 2 5 3 1 4
	13	3 5 6 2 1 4
	14	5 3 6 4 1 2
	15	6 2 5 4 1 3
	16	6 3 5 4 1 2
สตริงคำตอบรุ่นลูก	17	6 2 5 1 4 3
	18	2 6 5 1 4 3
	19	3 5 6 4 1 2
	20	6 1 2 4 5 3
	21	6 3 5 1 4 2

ตารางที่ 4.77 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดรอบปัจจุบันและสตริงคำตอบที่ทำ

Local Search

String	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	19.5889	15.2717	4.4344	1	Infinity
2	19.5889	15.2717	4.4344	1	Infinity
3	70.9222	14.0759	4.7132	1	Infinity
4	19.5889	15.2717	4.4344	1	Infinity
5	70.9222	14.0759	4.7132	1	Infinity
6	19.5889	15.8083	5.6973	1	Infinity
7	70.9222	14.0759	4.7132	1	Infinity
17	35.3222	14.1449	4.7536	1	1.0323
9	34.3889	14.4735	4.8227	1	0.7646
11	41.7222	14.4929	4.7298	1	0.7455
10	22.6556	14.7049	5.6327	1	0.7145
12	22.5222	15.1276	4.4237	1	0.5538
13	25.5889	14.6662	5.6253	1	0.2246
14	32.2556	14.66	5.6001	1	0.1471
15	32.2556	14.66	5.6001	1	0.1471
16	32.2556	14.66	5.6001	1	0.1471
8	44.1222	14.4168	5.6001	2	Infinity
18	25.5889	14.0063	5.6381	2	Infinity

เพราะฉะนั้นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน (ตารางที่ 4.78)

ตารางที่ 4.78 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่สุกรอบปัจจุบัน

Strings	Model Sequences
1	6 3 5 1 4 2
2	5 3 6 1 4 2
3	4 5 6 2 1 3
4	6 2 5 1 4 3
5	6 4 5 2 1 3
6	6 2 1 4 5 3
7	6 4 5 3 1 2
8	3 5 6 4 1 2
9	6 5 2 3 1 4
10	1 5 2 3 6 4
11	2 6 5 1 4 3
12	6 2 5 3 1 4
13	3 5 6 2 1 4
14	5 3 6 4 1 2
15	6 2 5 4 1 3
16	6 3 5 4 1 2

4.8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน BBO Adaptive

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา 13 ปัญหา ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทั้งจากการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและจากการทดลองเบื้องต้นของอัลกอริทึม BBO มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4.79 พารามิเตอร์สำหรับ BBO Adaptive

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1,0.3	Ma (2010)
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	Ma (2010)
Local Search	2-Opt	ปาไลดา (2553)
ความน่าจะเป็น 2-Opt	0.1,0.3	ปาไลดา (2553)
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

4.9 สรุปท้ายบท

เนื้อหาที่กล่าวในบทนี้เป็นการนำอัลกอริทึม BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ BBO เป็นการนำแนวคิดการเคลื่อนย้ายประชากรจากแหล่งหนึ่งไปอีกแหล่งหนึ่งมาใช้ BBO จะมีค่าที่สำคัญ 4 ค่า คือ Habitat Suitability Index (HSI) เป็นค่า Fitness ที่ใช้วัดว่าคำตอบของประชากรเป็นคำตอบที่ดีหรือคำตอบที่แย่ ค่าที่สองคือ Suitability Index Variable (SIV) เป็นค่าลักษณะ (Feature) ของคำตอบแต่ละตัวของประชากรในเกาะ ค่าที่สามคือ Immigration Rate เป็นอัตราการอพยพเข้าของประชากรในเกาะ และค่าที่สี่คือ Emigration Rate เป็นอัตราการอพยพออกของประชากรในเกาะ ถ้าค่าคำตอบของประชากรในเกาะมีค่าที่ดี ค่าของการอพยพเข้าจะมีค่าน้อย ค่าของการอพยพออกจะมีค่ามาก เนื่องจากประชากรของเกาะที่มีคำตอบที่ดีจะพยายามแบ่งลักษณะ (Feature) ของคำตอบไปให้ประชากรของเกาะที่มีคำตอบที่แย่กว่าเพื่อให้คำตอบในเกาะที่แย่นั้นดีขึ้น เพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าที่เหมาะสม หรือเป็นสตริงคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด และในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์และการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO ที่นำไปใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยทั้ง 13 ปัญหา

บทที่ 5

ผลการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ในบทนี้จะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการทดลองและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม คือ NSGAI, DPSO, PSONK, BBO และ BBO Adaptive ของปัญหาที่ใช้ในการวิจัยที่แตกต่างกัน 13 ปัญหา โดยนำเอาตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Chutima and Olanviwatchai, 2010)

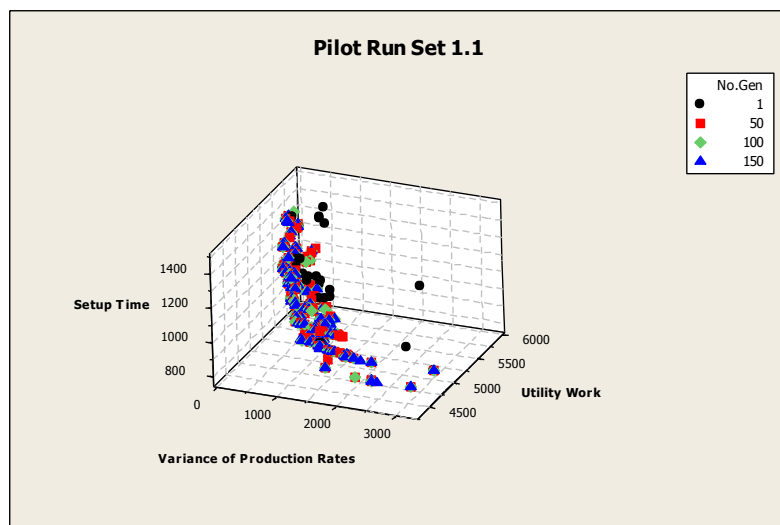
5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทำการทดลองต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อมาใช้ในการทดลอง โดยการทำการทดลองเบื้องต้นและค่าที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้า โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละปัญหาการวิจัยจะสรุปไว้ในบทนี้

5.1.1 จำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสม

ในการทดลองเบื้องต้นจะต้องมีการกำหนดจำนวนรอบการทำงานที่เหมาะสมของแต่ละปัญหา เพื่อให้ได้รอบการทำงานที่สามารถค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพ ในการกำหนดจำนวนรอบของการทดลองในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองด้วยวิธี Pilot Run ทั้ง 13 ปัญหา ดังตารางที่ 1.1 โดยในงานวิจัยทำการศึกษาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates) ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work) และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time) ซึ่งค่าที่ได้ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะไม่สามารถทำการพิจารณาแยกได้ ทำให้คำตอบที่ได้จากการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมมีค่าที่มากกว่างานวิจัยทั่วไป เนื่องจากคำตอบที่ได้ออกมาจะมีคำตอบที่ดีเพิ่มขึ้นมาเรื่อยๆ

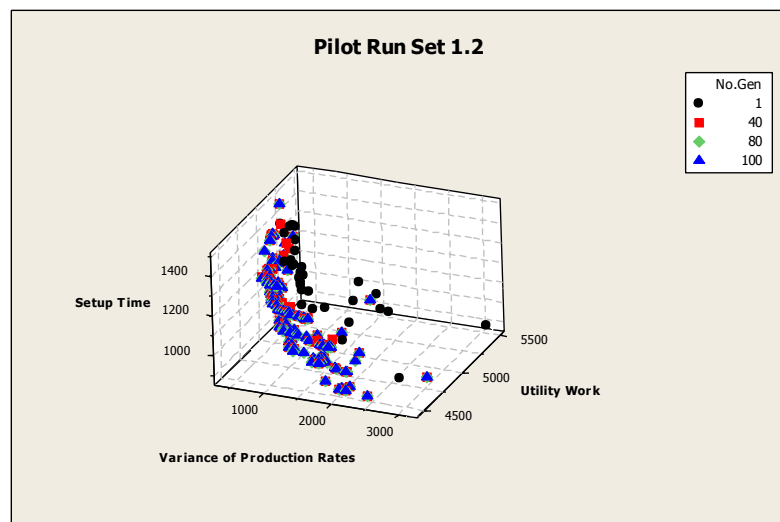
5.1.1.1 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 1.1



ภาพที่ 5.1 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 1.1

จากภาพที่ 5.1 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 1.1 คือ 150

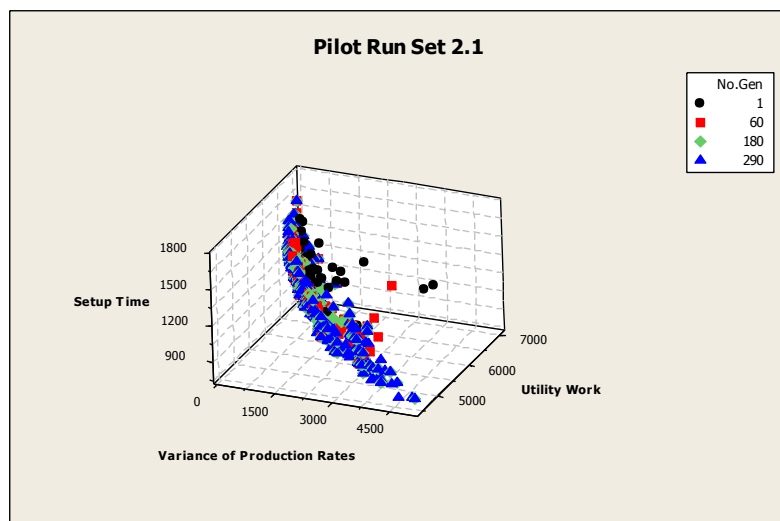
5.1.1.2 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 1.2



ภาพที่ 5.2 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 1.2

จากภาพที่ 5.2 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 1.2 คือ 10

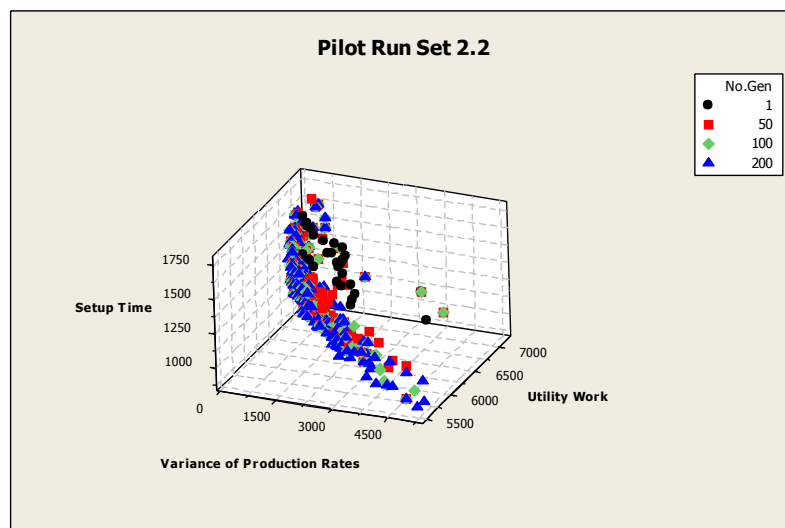
5.1.1.3 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 2.1



ภาพที่ 5.3 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 2.1

จากภาพที่ 5.3 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 2.1 คือ 290

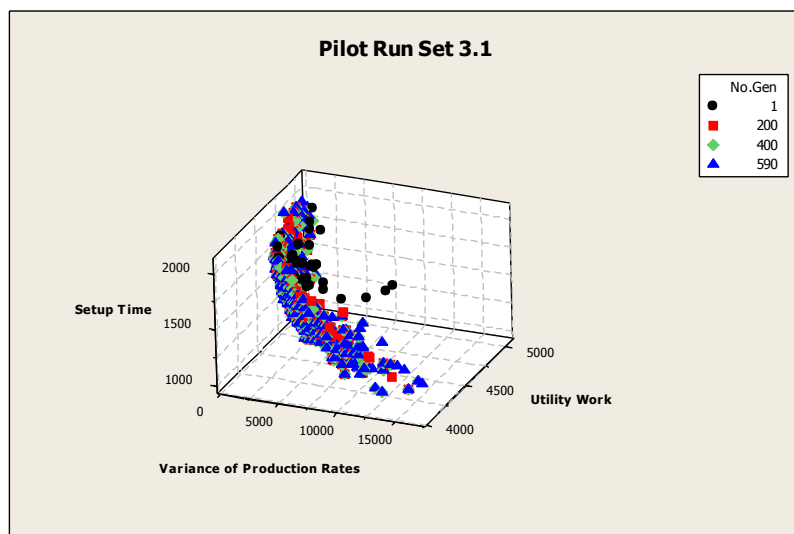
5.1.1.4 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 2.2



ภาพที่ 5.4 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 2.2

จากภาพที่ 8.4 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 2.2 คือ 200

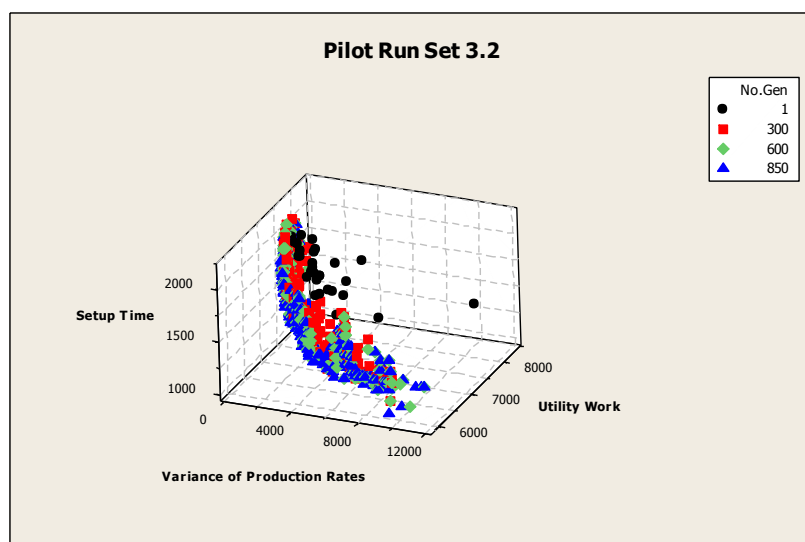
5.1.1.5 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 3.1



ภาพที่ 5.5 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 3.1

จากภาพที่ 5.5 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 3.1 คือ 590

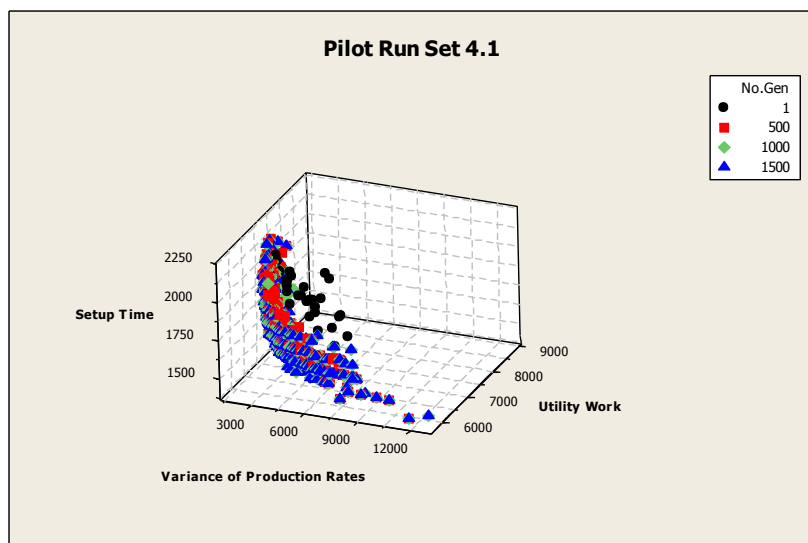
5.1.1.6 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 3.2



ภาพที่ 5.6 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 3.2

จากภาพที่ 8.6 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 3.2 คือ 850

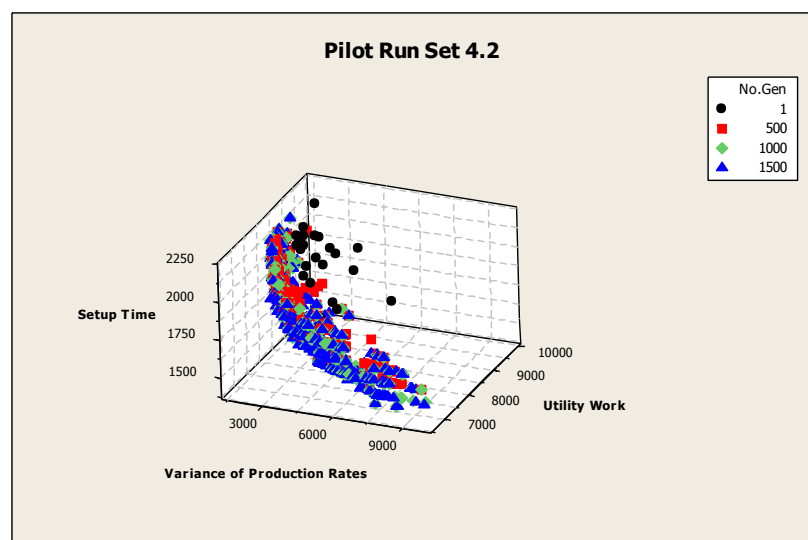
5.1.1.7 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 4.1



ภาพที่ 5.7 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 4.1

จากภาพที่ 5.7 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Set 4.1 คือ 1500

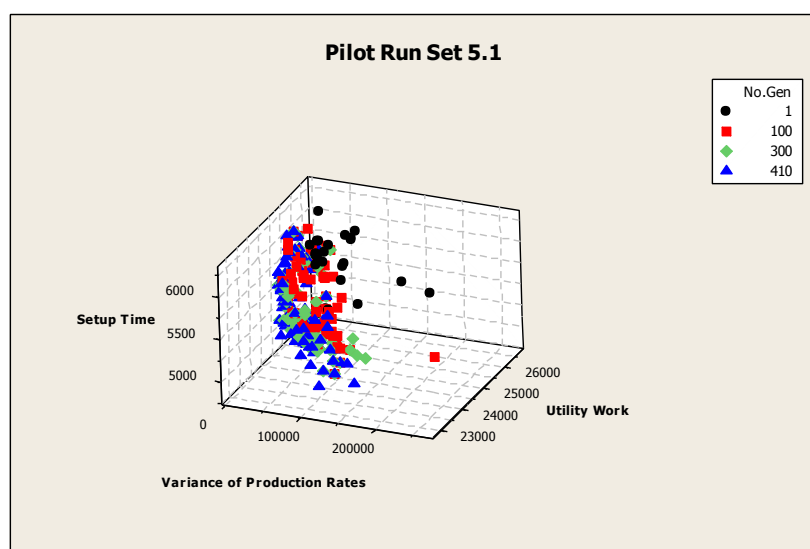
5.1.1.8 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 4.2



ภาพที่ 5.8 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 4.2

จากภาพที่ 5.8 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดี และคงที่ของปัญหา Set 4.2 คือ 1500

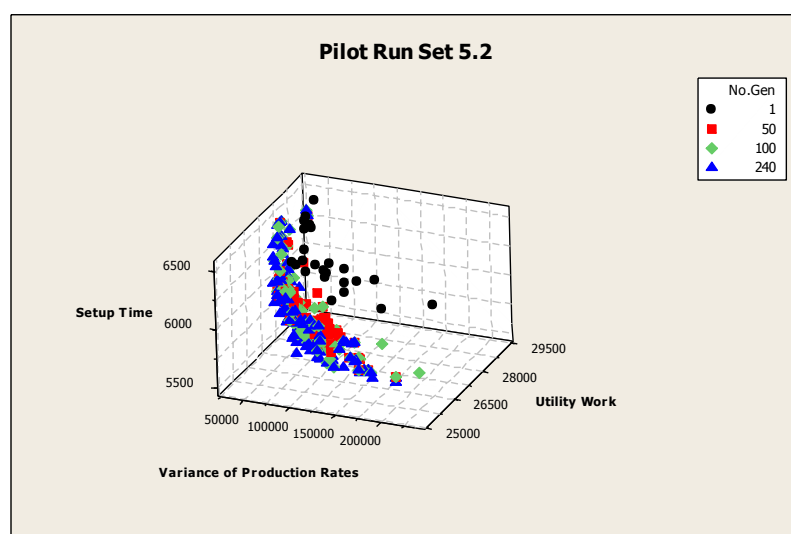
5.1.1.9 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 5.9



ภาพที่ 5.9 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 5.1

จากภาพที่ 5.9 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดี และคงที่ของปัญหา Set 5.1 คือ 410

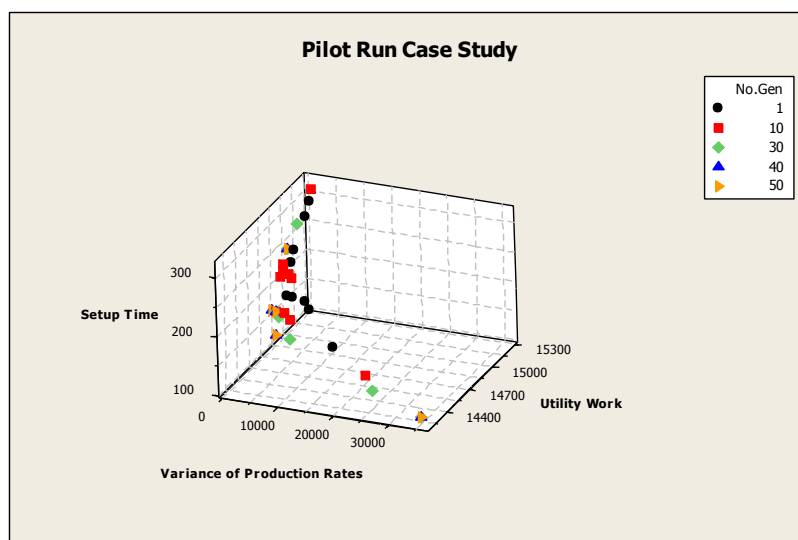
5.1.1.10 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Set 5.2



ภาพที่ 5.10 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา 5.2

จากภาพที่ 8.10 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดี และคงที่ของปัญหา Set 5.2 คือ 240

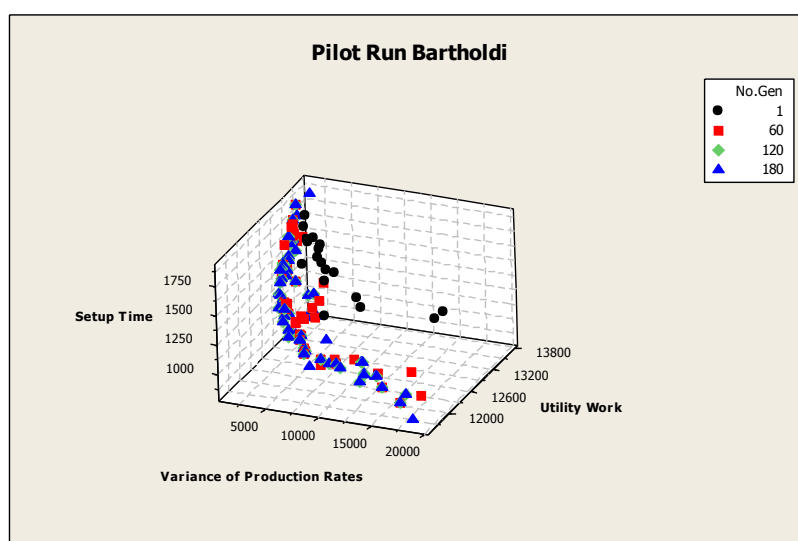
5.1.1.11 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Case Study183 ชั้นงาน



ภาพที่ 5.11 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา Case Study

จากภาพที่ 5.11 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดี และคงที่ของปัญหา Set 5.11 คือ 50

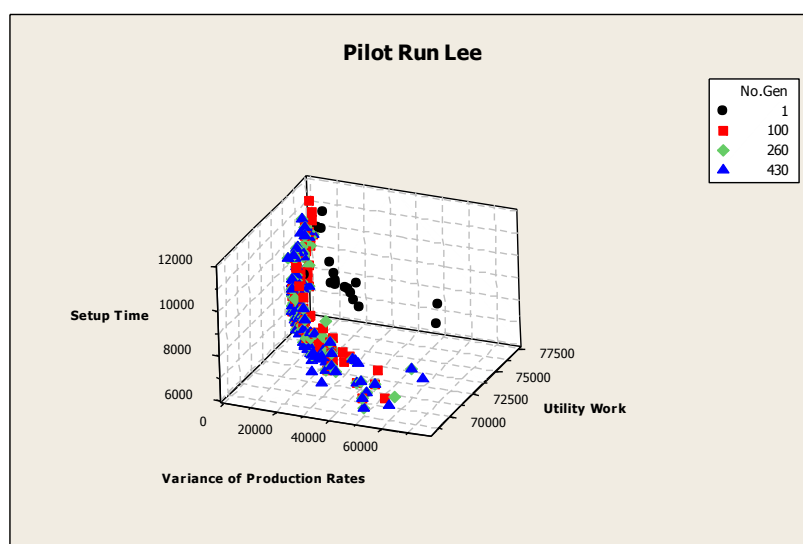
5.1.1.12 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Bartholdi 148 ชั้นงาน



ภาพที่ 5.12 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา Bartholdi

จากภาพที่ 5.12 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Bartholdi คือ 180

5.1.1.13 จำนวนรอบการทำงานของปัญหา Lee 205 ชั้นงาน



ภาพที่ 5.13 ผลการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมด้วยวิธี Pilot Run ของปัญหา Lee

จากภาพที่ 5.13 พบว่า จำนวนรอบการทำงานที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีและคงที่ของปัญหา Lee คือ 430

จากการทำ Pilot Run ทั้งหมดทุกปัญหา พบว่า คำตอบที่ได้ออกมาจะมีคำตอบที่ดีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะฉะนั้นจึงกำหนดให้ปัญหา Set 1.1, Set 1.2, Set 2.1, Set 2.2, Set 3.1, Set 3.2, Set 4.1 และ Set 4.2 มีจำนวนรอบการทำงานสูงสุดเท่ากับ 1500 รอบ และ Set 5.1, Set 5.2, Case Study 183 ชั้นงาน, Bartholdi 142 ชั้นงาน และ Lee 205 ชั้นงาน มีจำนวนรอบการทำงานสูงสุดเท่ากับ 2000 รอบ

5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึม

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ 5 อัลกอริทึมสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์สำหรับ NSGA-II

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีการครอสโอเวอร์	Weight Mapping Crossover	ปาไลดา (2553)
วิธีการมิวเทชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ และความน่าจะเป็นในการมิวเทชัน	Set 1.1 : $P_c = 0.8, P_m = 0.1$	การทดลอง
	Set 1.2 : $P_c = 0.8, P_m = 0.2$	
	Set 2.1 : $P_c = 0.9, P_m = 0.1$	
	Set 2.2 : $P_c = 0.9, P_m = 0.2$	
	Set 3.1 : $P_c = 0.8, P_m = 0.3$	
	Set 3.2 : $P_c = 0.7, P_m = 0.3$	
	Set 4.1 : $P_c = 0.9, P_m = 0.1$	
	Set 4.2 : $P_c = 0.6, P_m = 0.4$	
	Set 5.1 : $P_c = 0.9, P_m = 0.2$	
	Set 5.2 : $P_c = 0.7, P_m = 0.4$	
	Case Study : $P_c = 0.6, P_m = 0.2$	
	Bartholdi : $P_c = 0.8, P_m = 0.3$	
Lee : $P_c = 0.6, P_m = 0.1$		
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์สำหรับ DPSO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
Cognitive Component	$C_1 = 0.1$	Wattanapornprom et al.(2009)
Social Component	$C_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al.(2009)
น้ำหนักความหวัง	$w = 0.1$	Salman et al. (2002)
จำนวนฝูงและจำนวนอนุภาค	Set 1.1 : 10-10	การทดลอง
	Set 1.2 : 5-20	
	Set 2.1 : 10-10	
	Set 2.2 : 10-10	
	Set 3.1 : 10-10	
	Set 3.2 : 10-10	
	Set 4.1 : 4-25	
	Set 4.2 : 4-25	
	Set 5.1 : 5-20	
	Set 5.2 : 5-20	
	Case Study : 5-20	
	Bartholdi : 4-25	
Lee : 4-25		
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์สำหรับ PSONK

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
Cognitive Component	$C_1 = 0.1$	Wattanapornprom et al.(2009)
Social Component	$C_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al.(2009)
น้ำหนักความหวัง	$w = 0.1$	Salman et al. (2002)
จำนวนผู้และจำนวนอนุภาค	Set 1.1 : 5-20	การทดลอง
	Set 1.2 : 10-10	
	Set 2.1 : 5-20	
	Set 2.2 : 4-25	
	Set 3.1 : 4-25	
	Set 3.2 : 10-10	
	Set 4.1 : 4-25	
	Set 4.2 : 10-10	
	Set 5.1 : 4-25	
	Set 5.2 : 5-20	
	Case Study : 4-25	
	Bartholdi : 4-25	
Lee : 10-10		
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์สำหรับ BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.01	Ma (2010)
รูปแบบในการอพยพ	Set 1.1 : S	การทดลอง
	Set 1.2 : S	
	Set 2.1 : S	
	Set 2.2 : S	
	Set 3.1 : L	
	Set 3.2 : L	
	Set 4.1 : L	
	Set 4.2 : L	
	Set 5.1 : L	
	Set 5.2 : S	
	Case Study : S	
	Bartholdi : L	
Lee : S		
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

ตารางที่ 5.5 พารามิเตอร์สำหรับ BBO Adaptive

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
จำนวนประชากร	100	Kim et al. (1996)
วิธีการมิวเตชัน	Reciprocal Exchange Mutation	Kim et al. (1996)
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1,0.3	Ma (2010)
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	Ma (2010)
Local Search	2-Opt	ปาไลดา (2553)
ความน่าจะเป็น 2-Opt	0.1,0.3	ปาไลดา (2553)
ผลกระทบจากการเรียนรู้	80% และ 90%	Wu et al. (2007a)
จำนวนรอบการทำงาน	Set 1.1 : 1500 รอบ	การทดลอง
	Set 1.2 : 1500 รอบ	
	Set 2.1 : 1500 รอบ	
	Set 2.2 : 1500 รอบ	
	Set 3.1 : 1500 รอบ	
	Set 3.2 : 1500 รอบ	
	Set 4.1 : 1500 รอบ	
	Set 4.2 : 1500 รอบ	
	Set 5.1 : 2000 รอบ	
	Set 5.2 : 2000 รอบ	
	Case Study : 2000 รอบ	
	Bartholdi : 2000 รอบ	
Lee : 2000 รอบ		

5.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบโดยการนำผลการค้นหาคำตอบของทุกอัลกอริทึมมาทำการหากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ แล้วนำคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมมาเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบในงานวิจัยของ Chutima and Olanviwatchai (2010) ดังนี้

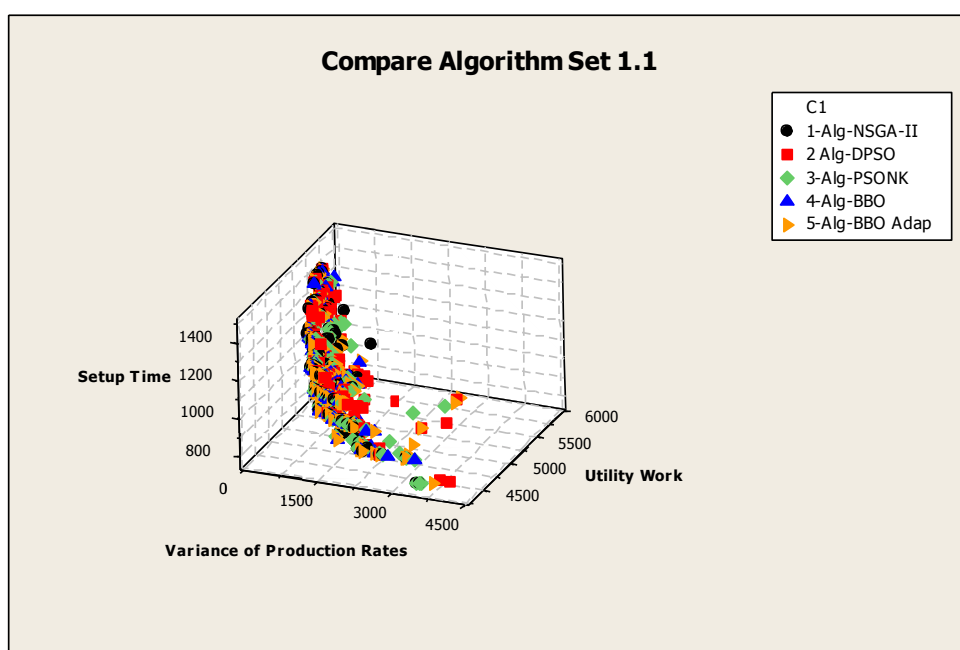
1. สมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มคำตอบที่ค้นพบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ามีกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง กลุ่มคำตอบที่ค้นพบจึงมีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงจึงถือว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดี
2. สมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) เป็นการเปรียบเทียบค่าของการกระจายของสมาชิกคำตอบที่ค้นพบ ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบเป็นกลุ่มคำตอบที่มีการกระจายที่สม่ำเสมอ
3. สมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบว่ามีจำนวนคำตอบอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเท่าไร ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ค้นพบมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง กลุ่มคำตอบที่ค้นพบมีคุณภาพใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงจึงถือว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดี
4. เวลาในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) เป็นการเปรียบเทียบเวลาการทำงานของแต่ละอัลกอริทึมตั้งแต่การทำงานรอบแรกจนถึงรอบสุดท้าย ถ้าอัลกอริทึมใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยจะถือว่าเป็นอัลกอริทึมที่เป็นทางเลือกที่ดี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม 5 อัลกอริทึมด้วยการรันโปรแกรมบน Matlab 2009a บนคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7 CPU 2670QM 2.2GHz Ram 8 GB Windows 7 ซึ่งได้ผลดังต่อไปนี้

5.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ Learning Rate 80%

5.3.1.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 1.1

คำตอบของปัญหา Set 1.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.14 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1

ตารางที่ 5.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1

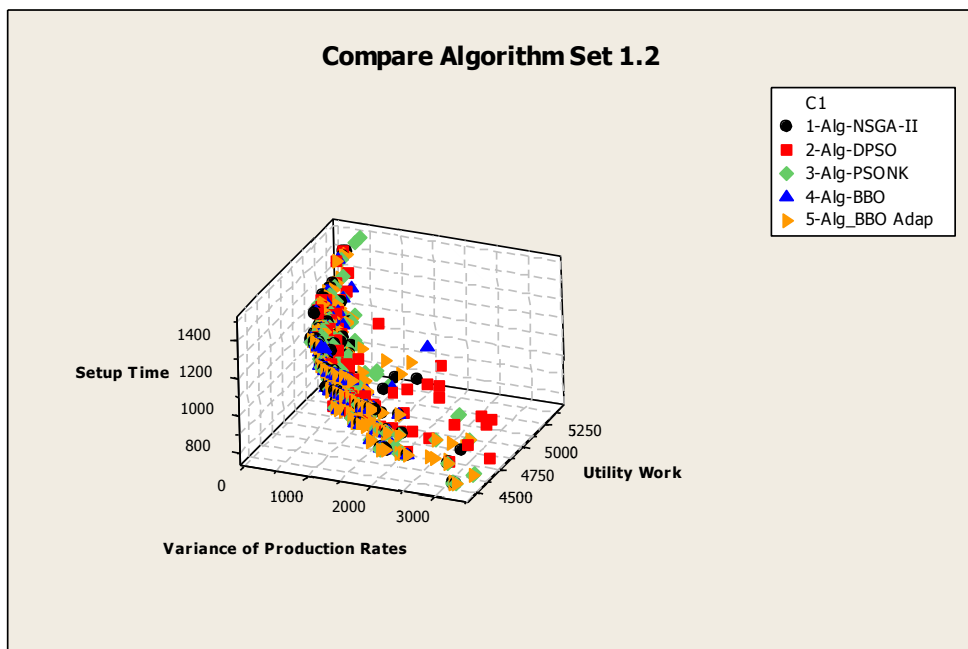
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0303672	0.573608	0.243986	304920
DPSO	0.0285614	0.560583	0.0652921	8282.47
PSONK	0.0165674	0.583042	0.295533	5548.40
BBO	0.0295012	0.503287	0.302405	244750
BBO Adaptive	0.0095384	0.615324	0.604811	63714.2

จากตารางที่ 5.6 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด

รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO Adaptive, BBO และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 1.1 มากที่สุด

5.3.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 1.2

คำตอบของปัญหา Set 1.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.15 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2

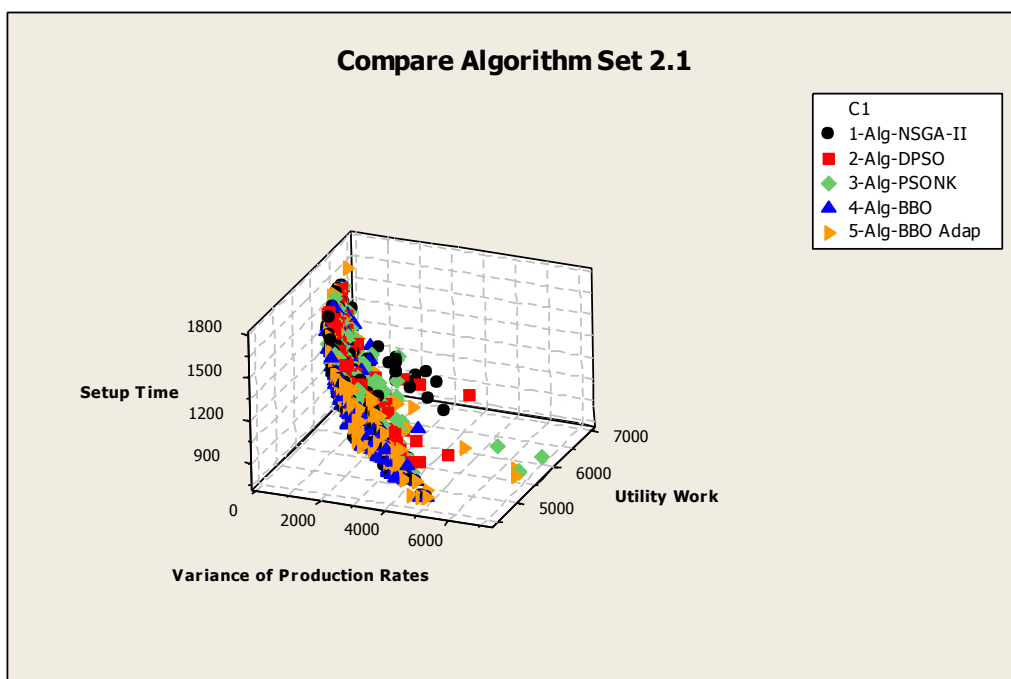
ตารางที่ 5.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0296340	0.697061	0.234501	366274
DPSO	0.0548258	0.613627	0.048518	2585
PSONK	0.0194910	0.627881	0.315364	11159
BBO	0.0382940	0.583247	0.229111	47370
BBO Adaptive	0.0091436	0.658114	0.630728	306096

จากตารางที่ 5.7 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 1.2 มากที่สุด

5.3.1.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 2.1

คำตอบของปัญหา Set 2.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.16 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1

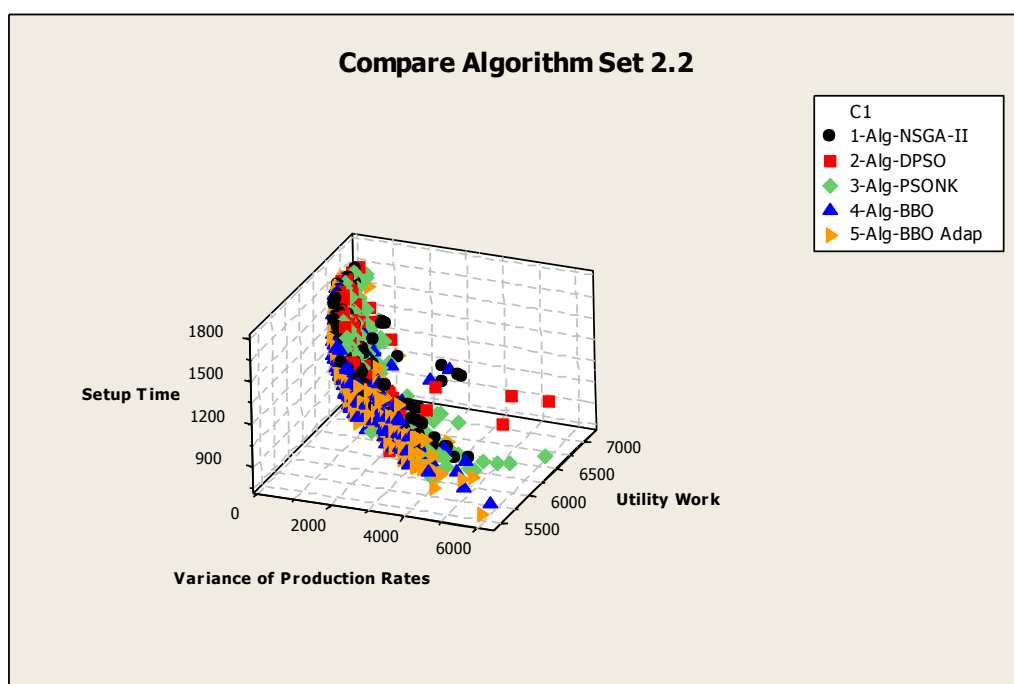
ตารางที่ 5.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0298887	0.712418	0.0707610	663328
DPSO	0.0442331	0.621042	0.0453939	15990
PSONK	0.0261431	0.593260	0.2069426	212355
BBO	0.0244794	0.605315	0.2603471	260559
BBO Adaptive	0.0090371	0.604318	0.5313752	369272

จากตารางที่ 5.8 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่ออกสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 2.1 มากที่สุด

5.3.1.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 2.2

คำตอบของปัญหา Set 2.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.17 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2

ตารางที่ 5.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2

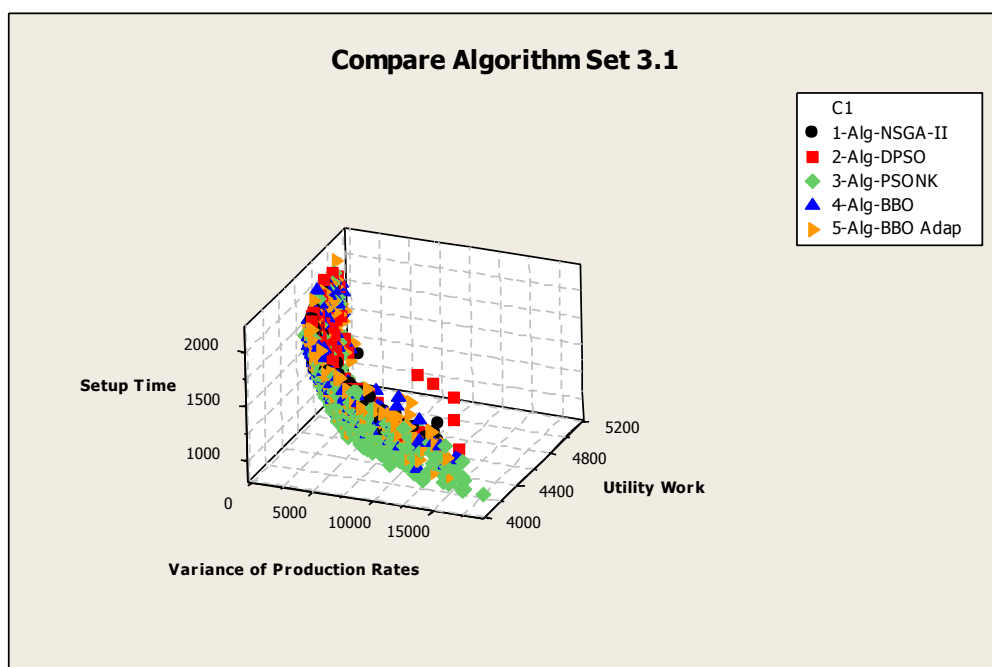
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0502402	0.682207	0.0223285	234640
DPSO	0.0713362	0.612747	0.0063796	6794
PSONK	0.0395377	0.619952	0.1547049	12846
BBO	0.0244470	0.638524	0.2934609	132634
BBO Adaptive	0.0123167	0.668988	0.6220096	205255

จากตารางที่ 5.9 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่ม

คำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 2.2 มากที่สุด

5.3.1.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 3.1

คำตอบของปัญหา Set 3.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1

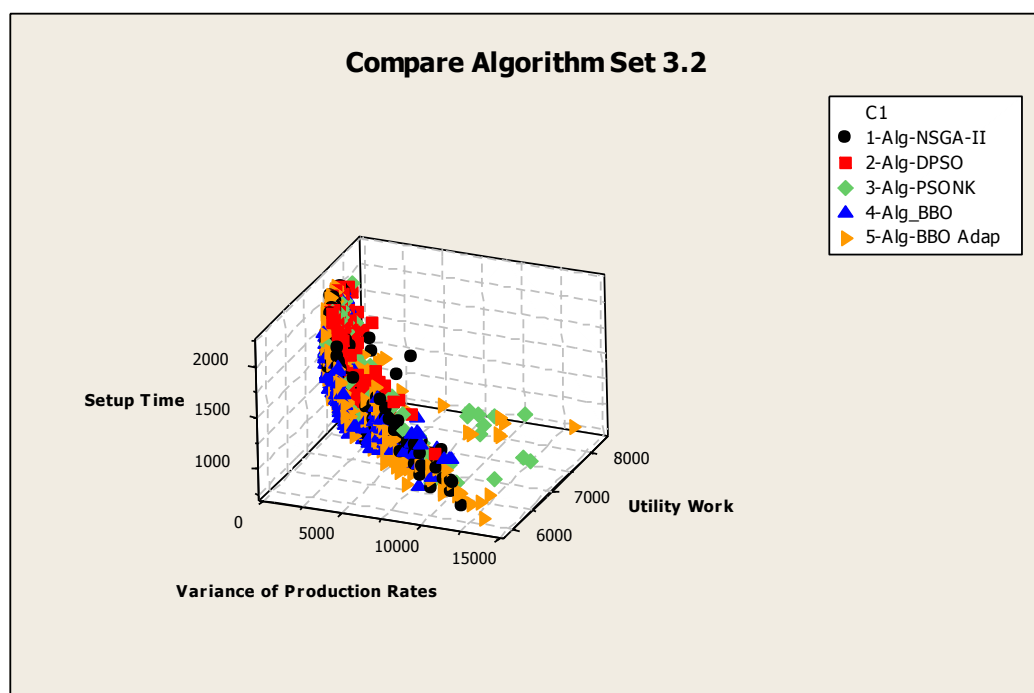
ตารางที่ 5.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0553686	0.589249	0.0124805	493125
DPSO	0.0579040	0.662303	0.0046802	22605
PSONK	0.0055081	0.602786	0.6583463	1894520
BBO	0.0279825	0.570675	0.0998440	106253
BBO Adaptive	0.0191767	0.631511	0.2246490	221097

จากตารางที่ 5.10 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO Adaptive, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, BBO Adaptive, NSGA-II และ PSONK ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 3.1 มากที่สุด

5.3.1.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 3.2

คำตอบของปัญหา Set 3.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.19 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2

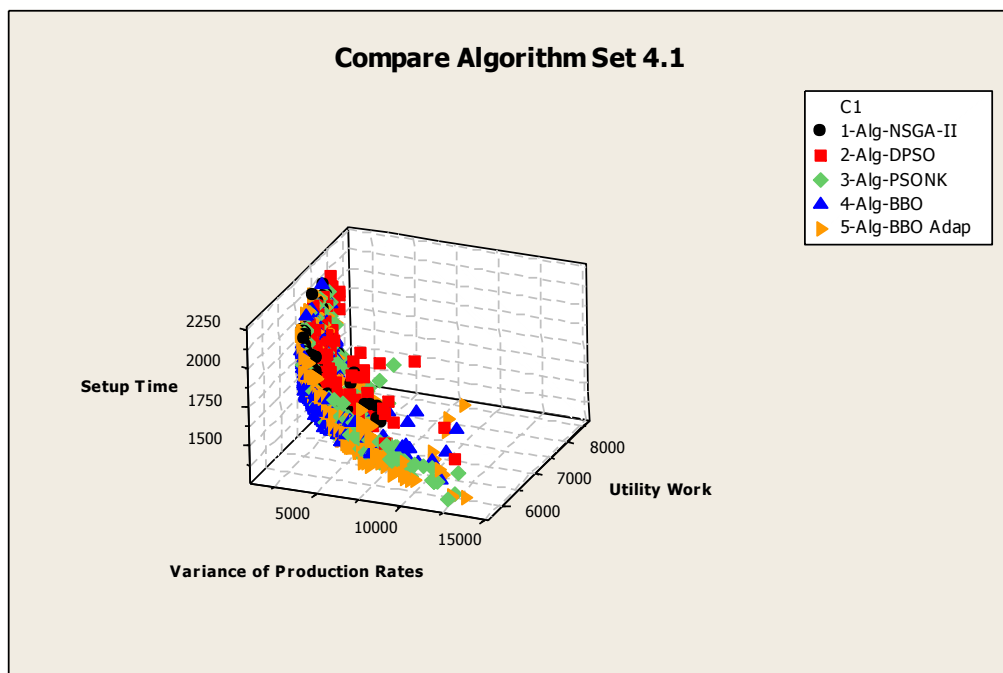
ตารางที่ 5.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0628893	0.619395	0.0208	284080
DPSO	0.0979858	0.578494	0.0016	9491
PSONK	0.0420817	0.682957	0.1920	21744
BBO	0.0349835	0.574228	0.2912	91345
BBO Adaptive	0.0143409	0.699746	0.4944	250292

จากตารางที่ 5.11 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 3.2 มากที่สุด

5.3.1.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 4.1

คำตอบของปัญหา Set 4.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1

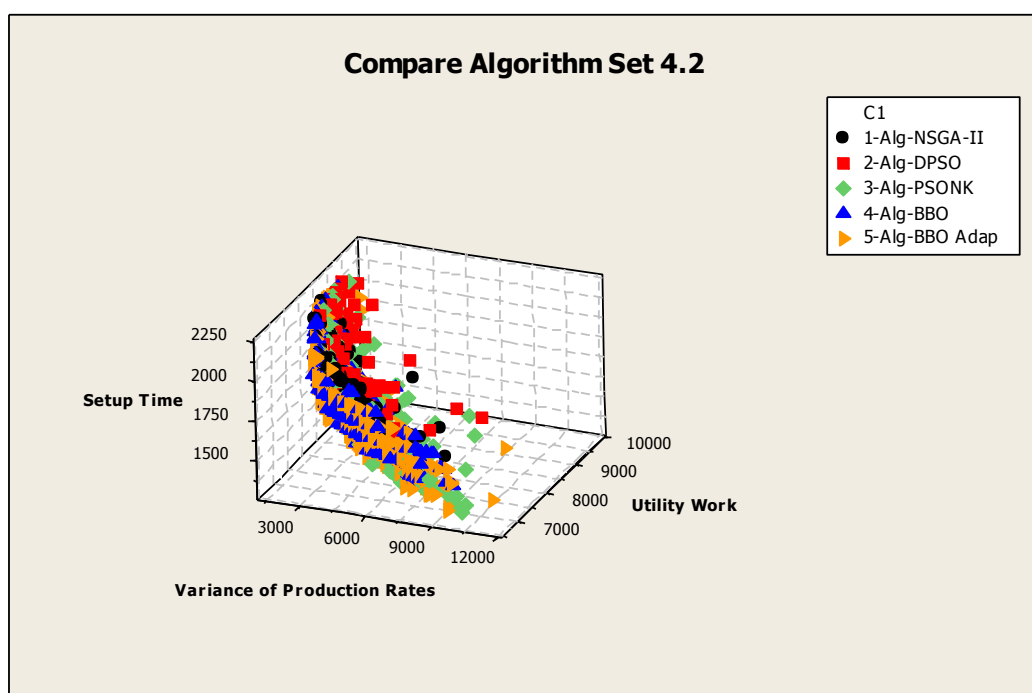
ตารางที่ 5.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0983772	0.577678	0.0023529	992000
DPSO	0.1032226	0.600946	0.0011765	5976
PSONK	0.0232459	0.574636	0.0529412	119132
BBO	0.0211307	0.794602	0.5000000	760865
BBO Adaptive	0.0076732	0.718091	0.4435294	541872

จากตารางที่ 5.12 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่ออกสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 4.1 มากที่สุด

5.3.1.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 4.2

คำตอบของปัญหา Set 4.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.21 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2

ตารางที่ 5.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2

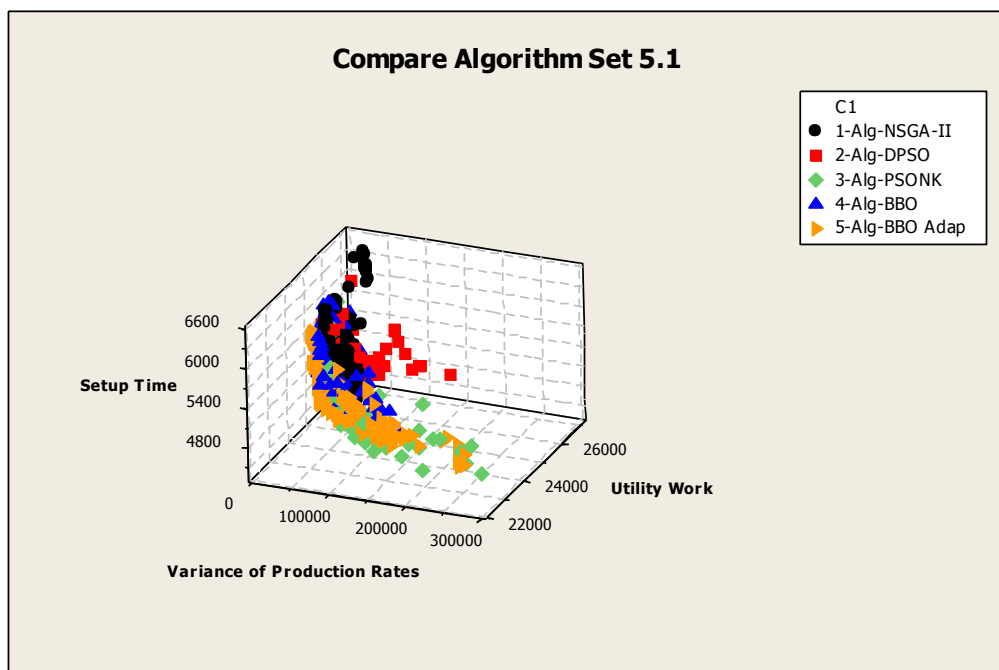
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0791980	0.668773	0.0241730	295525
DPSO	0.1386045	0.478910	0.0012723	6816
PSONK	0.0369215	0.551578	0.1959288	75213
BBO	0.0285486	0.614122	0.2328244	146784
BBO Adaptive	0.0111272	0.659257	0.5458015	277737

จากตารางที่ 5.13 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่ม

คำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 4.2 มากที่สุด

5.3.1.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 5.1

คำตอบของปัญหา Set 5.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.22 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1

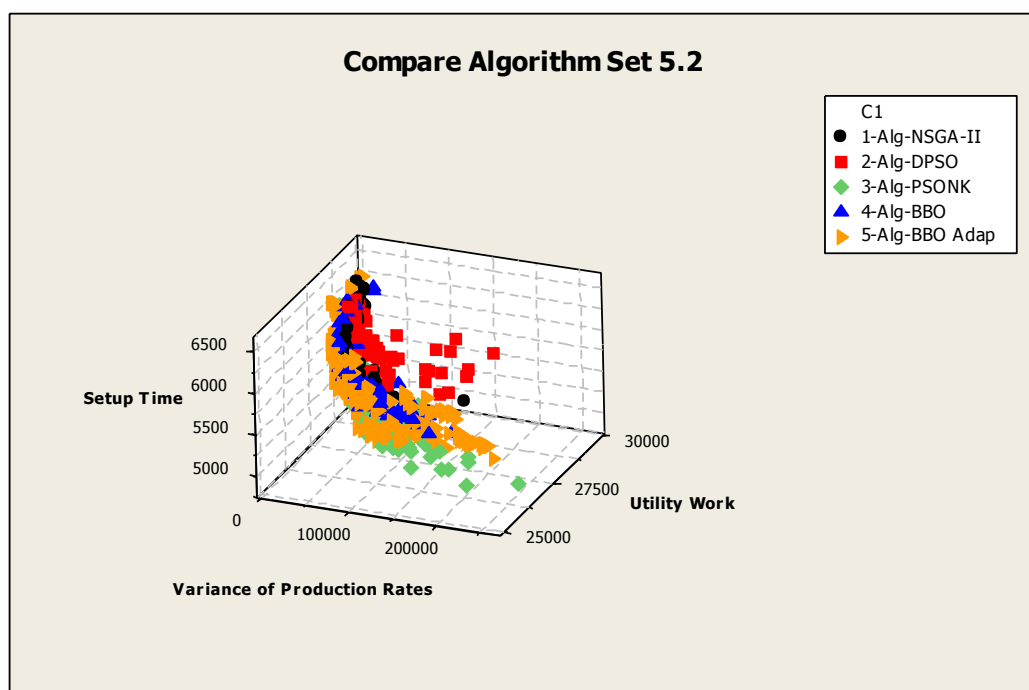
ตารางที่ 5.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.178978	0.649678	0.000000	317175
DPSO	0.283493	0.532721	0.000000	12513
PSONK	0.068585	0.517488	0.144366	117154
BBO	0.111535	0.508776	0.010563	41945
BBO Adaptive	0.014317	0.660116	0.845070	293166

จากตารางที่ 5.14 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 5.1 มากที่สุด

5.3.1.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 5.2

คำตอบของปัญหา Set 5.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.23 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2

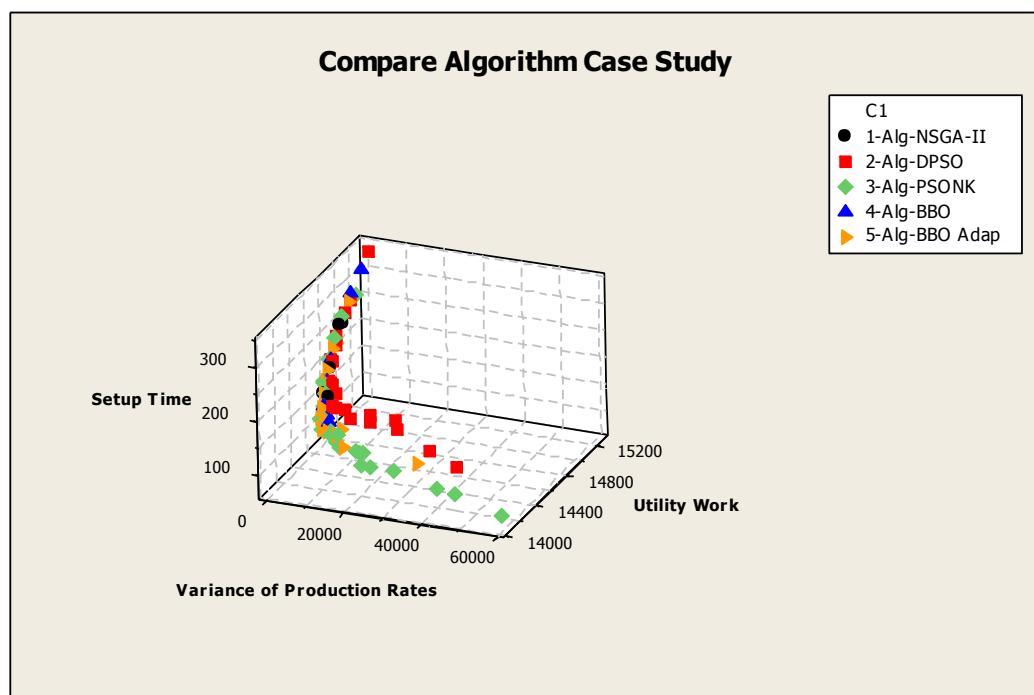
ตารางที่ 5.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.189429	0.688265	0.0023095	302050
DPSO	0.210281	0.533091	0.0000000	22184
PSONK	0.107609	0.521020	0.1732102	106501
BBO	0.100722	0.553621	0.0277136	46171
BBO Adaptive	0.019534	0.781543	0.7967667	290820

จากตารางที่ 5.15 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 5.2 มากที่สุด

5.3.1.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Case Study 183 ขั้นงาน

คำตอบของปัญหา Case Study ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.24 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Case Study

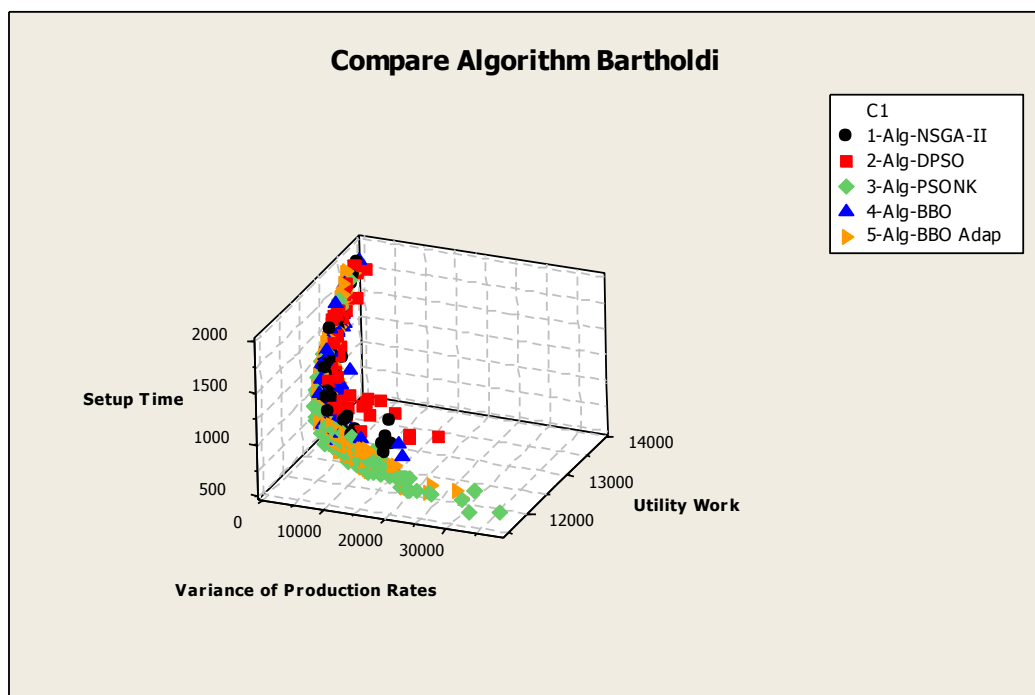
ตารางที่ 5.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Case Study

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.271557	0.569998	0.000000	61296.0
DPSO	0.114979	0.667013	0.000000	3052.4
PSONK	0.016907	0.632930	0.575758	9289.5
BBO	0.167632	0.663937	0.030303	5374.1
BBO Adaptive	0.062641	0.750438	0.393939	50846.0

จากตารางที่ 5.16 พบว่า PSONK มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO Adaptive, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า PSONK เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Case Study มากที่สุด

5.3.1.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Bartholdi 148 ชิ้นงาน

คำตอบของปัญหา Bartholdi ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.25 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Bartholdi

ตารางที่ 5.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Bartholdi

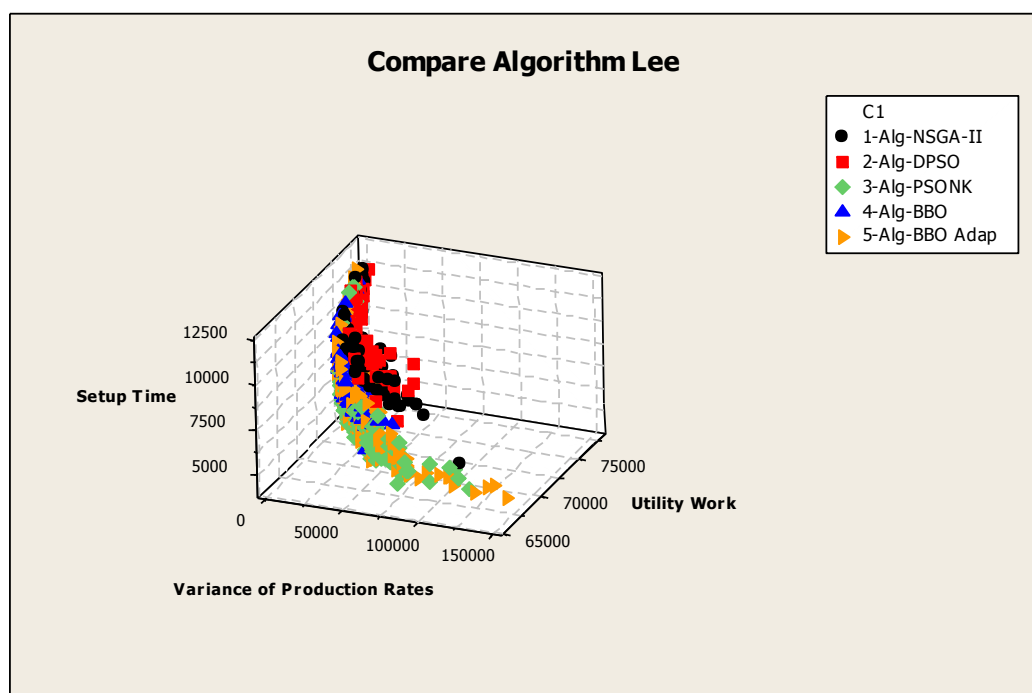
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.105027	0.589844	0.0064935	323450
DPSO	0.124375	0.498394	0.0032468	5736
PSONK	0.016243	0.513607	0.4448052	38339
BBO	0.054455	0.542029	0.0292208	19214
BBO Adaptive	0.009614	0.625440	0.5681818	283171

จากตารางที่ 5.17 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดี

สูงสุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Bartholdi มากที่สุด

5.3.1.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Lee 205 ชั้นงาน

คำตอบของปัญหา Lee ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.26 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Lee

ตารางที่ 5.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Lee

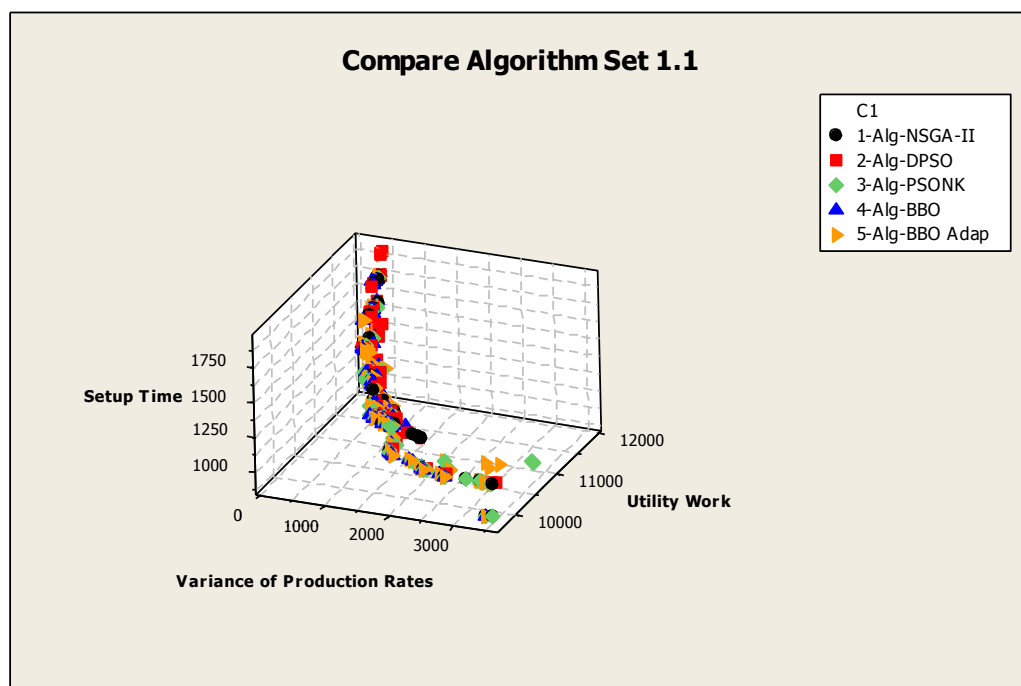
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.147198	0.573805	0.000000	471500
DPSO	0.153692	0.584648	0.000000	9193
PSONK	0.017272	0.596049	0.396419	206473
BBO	0.055491	0.596019	0.058824	98564
BBO Adaptive	0.015911	0.725896	0.544757	443578

จากตารางที่ 5.18 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Lee มากที่สุด

5.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ Learning Rate 90%

5.3.2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 1.1

คำตอบของปัญหา Set 1.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.27 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1

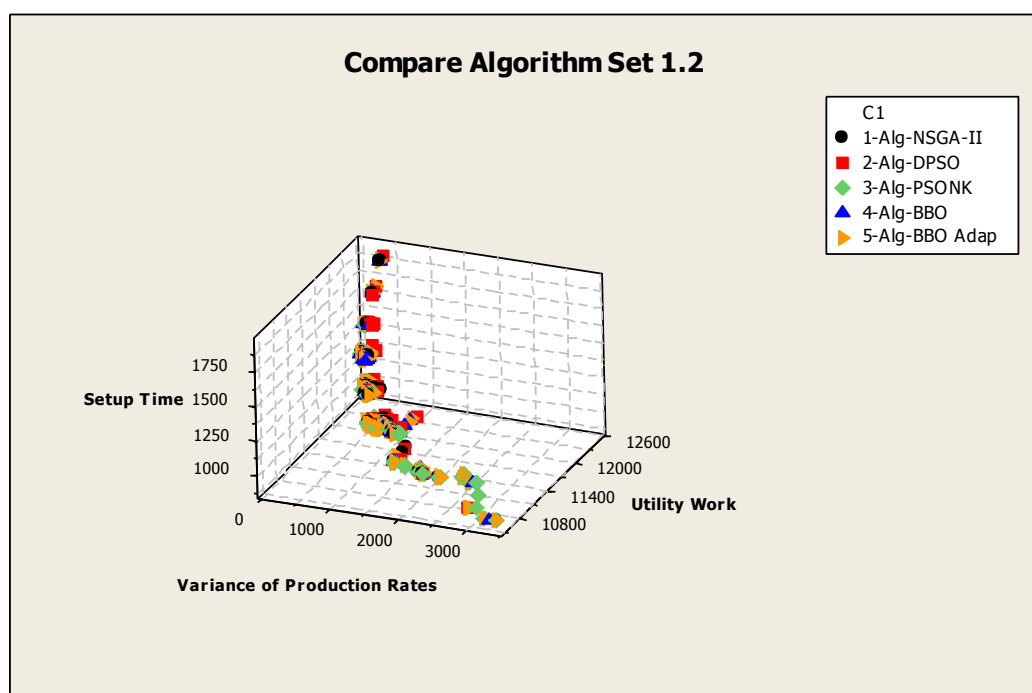
ตารางที่ 5.19 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0488490	0.696545	0.117647	657036
DPSO	0.0436107	0.676799	0.050420	2097
PSONK	0.0217991	0.774998	0.403361	2831
BBO	0.0316033	0.792455	0.462185	119685
BBO Adaptive	0.0071015	0.736103	0.563025	419455

จากตารางที่ 5.19 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO Adaptive, BBO และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 1.1 มากที่สุด

5.3.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 1.2

คำตอบของปัญหา Set 1.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.28 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2

ตารางที่ 5.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 1.2

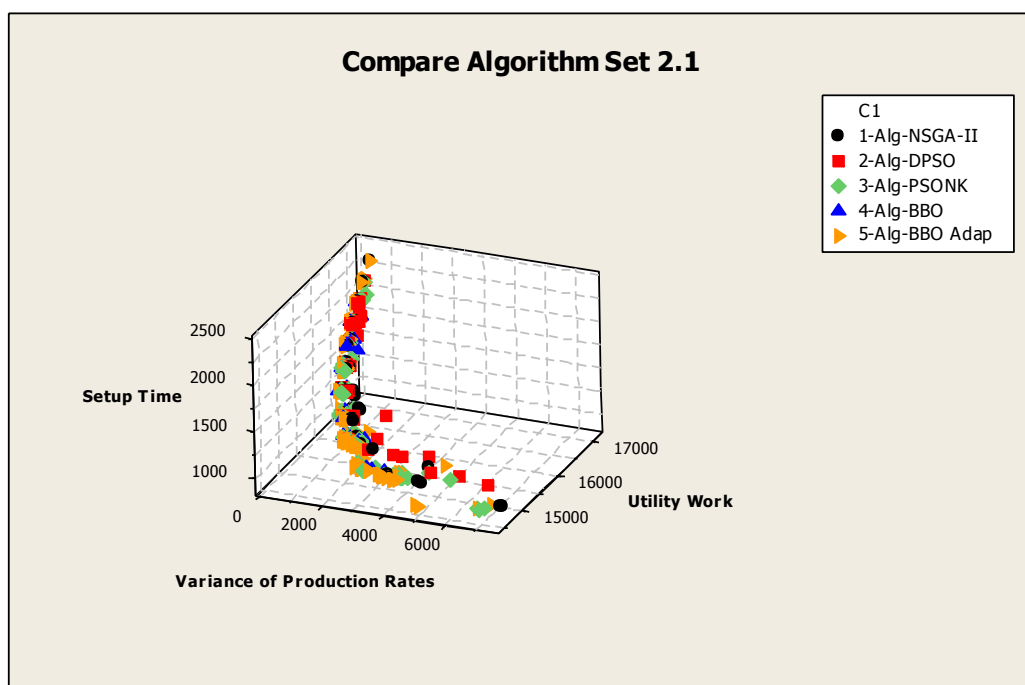
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0237586	0.890552	0.127168	143040
DPSO	0.0374850	0.766487	0.017341	1572
PSONK	0.0122418	0.861226	0.381503	10040
BBO	0.0224296	0.980778	0.202312	6186
BBO Adaptive	0.0029696	0.914140	0.728324	126021

จากตารางที่ 5.20 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่ออกเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่ม

คำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 1.2 มากที่สุด

5.3.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 2.1

คำตอบของปัญหา Set 2.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.29 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1

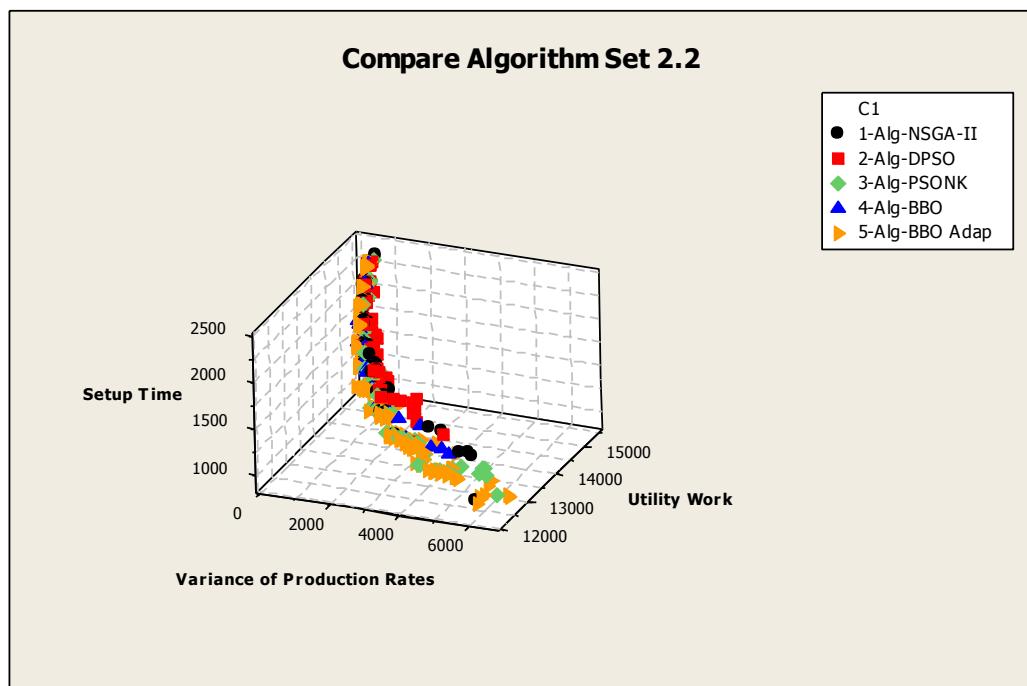
ตารางที่ 5.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0371270	0.782325	0.0042735	247068
DPSO	0.0481471	0.806877	0.0085470	6529
PSONK	0.0149530	0.795220	0.2051282	3788
BBO	0.0385297	0.752656	0.0512821	4312
BBO Adaptive	0.0027089	0.864173	0.8076923	244364

จากตารางที่ 5.21 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 2.1 มากที่สุด

5.3.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 2.2

คำตอบของปัญหา Set 2.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.30 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2

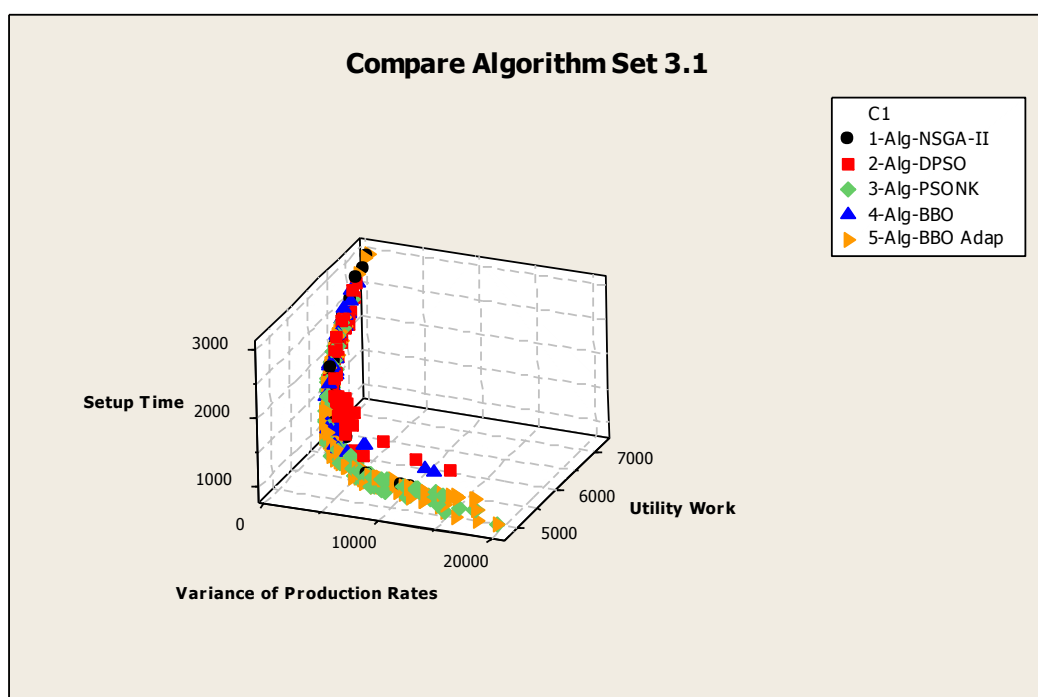
ตารางที่ 5.22 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 2.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0546769	0.851672	0.0088106	261065
DPSO	0.0730296	0.641906	0.0000000	4735
PSONK	0.0261214	0.649296	0.1497797	5873
BBO	0.0519627	0.652153	0.0352423	1702
BBO Adaptive	0.0038921	0.738269	0.8546256	256304

จากตารางที่ 5.22 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 2.2 มากที่สุด

5.3.2.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 3.1

คำตอบของปัญหา Set 3.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.31 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1

ตารางที่ 5.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.1

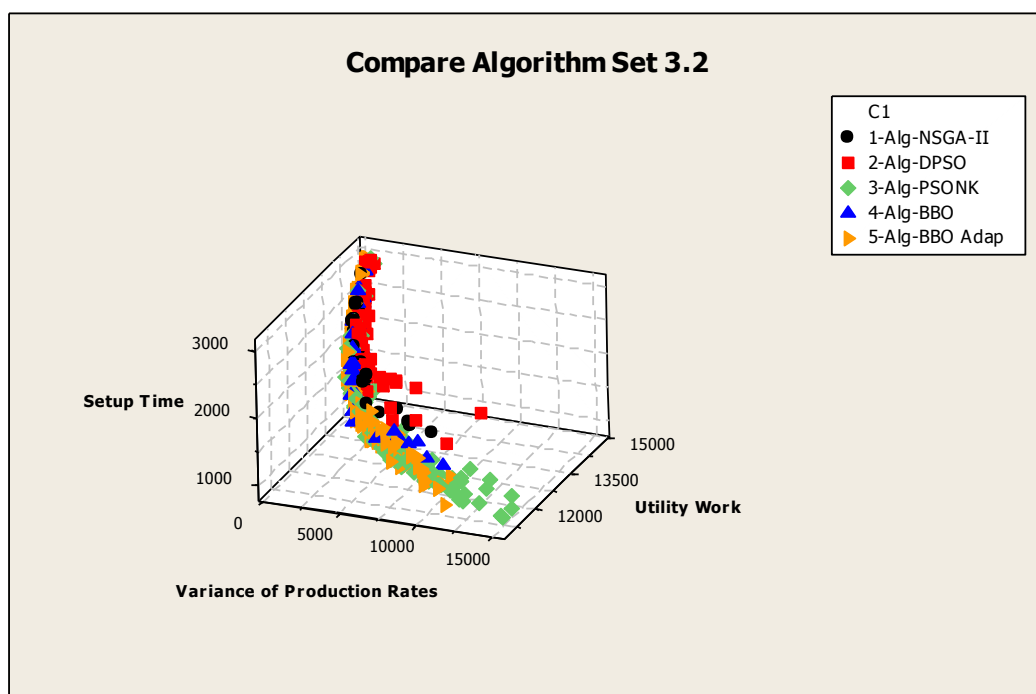
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0776495	0.697877	0.0165563	220162
DPSO	0.0898954	0.627887	0.0033113	5646
PSONK	0.0141553	0.697911	0.3245033	49024
BBO	0.0723299	0.498222	0.0298013	9250
BBO Adaptive	0.0040960	0.725341	0.6490066	172519

จากตารางที่ 5.23 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่ม

คำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 3.1 มากที่สุด

5.3.2.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 3.2

คำตอบของปัญหา Set 3.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.32 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2

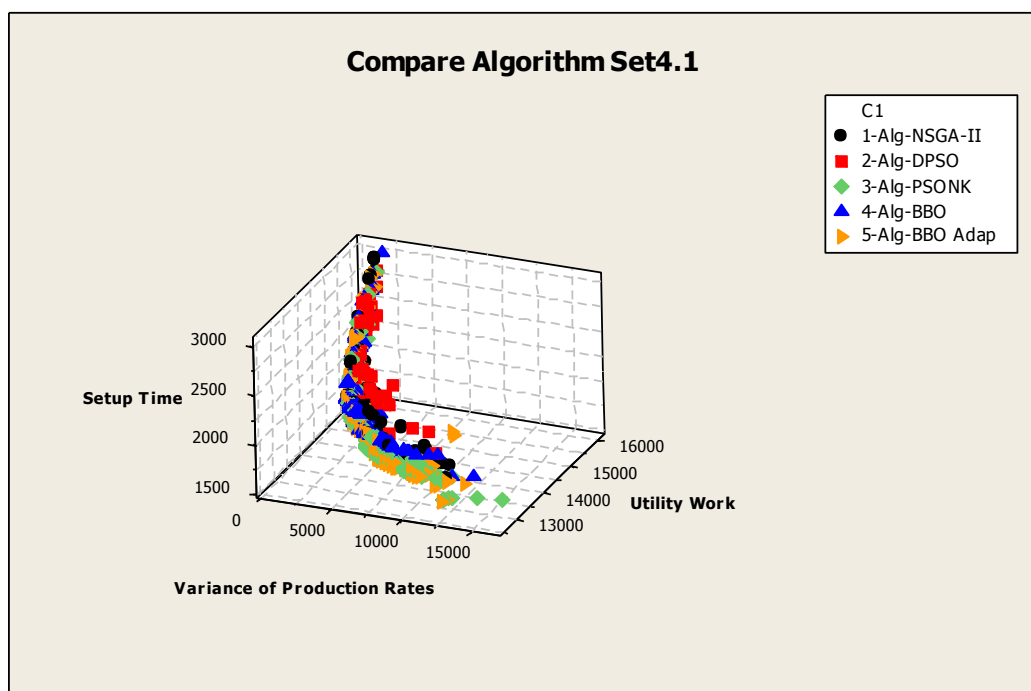
ตารางที่ 5.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 3.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.137311	0.730272	0.0037594	144120
DPSO	0.131439	0.561411	0.0000000	4000
PSONK	0.021175	0.526661	0.3834586	29581
BBO	0.076649	0.587505	0.0187970	2714
BBO Adaptive	0.020809	0.748853	0.5977444	140646

จากตารางที่ 5.24 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 3.2 มากที่สุด

5.3.2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 4.1

คำตอบของปัญหา Set 4.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.33 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1

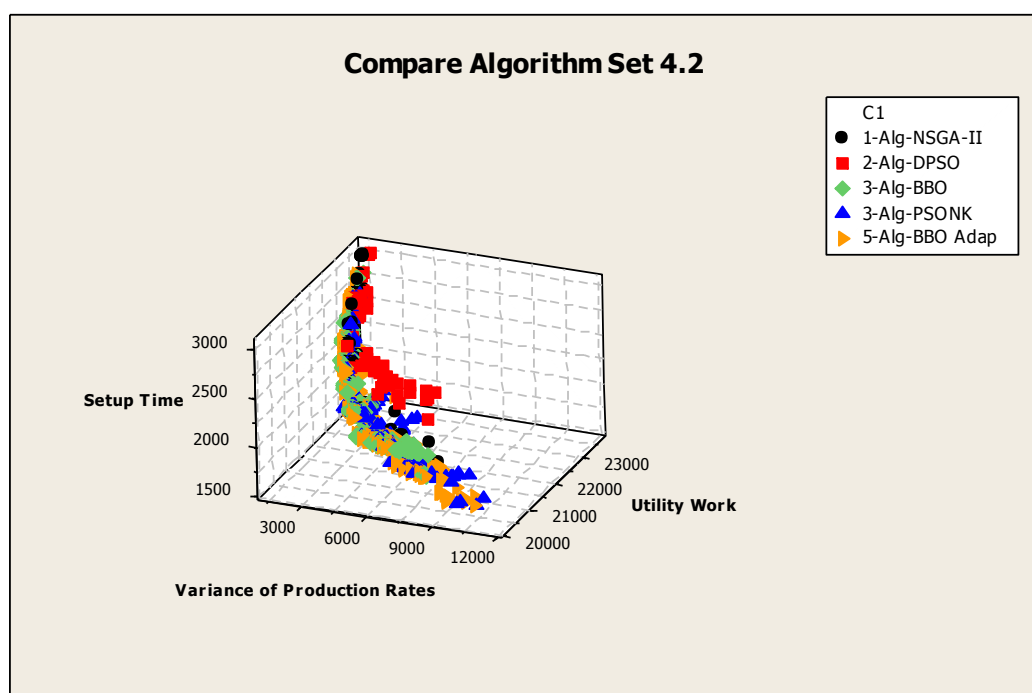
ตารางที่ 5.25 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0646978	0.725851	0.0175879	1477176
DPSO	0.1120866	0.532933	0.0000000	2632
PSONK	0.0136372	0.783828	0.2010050	36095
BBO	0.0349497	0.863664	0.2060302	95575
BBO Adaptive	0.0054174	0.937582	0.5753769	176452

จากตารางที่ 5.25 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 4.1 มากที่สุด

5.3.2.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 4.2

คำตอบของปัญหา Set 4.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.34 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2

ตารางที่ 5.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 4.2

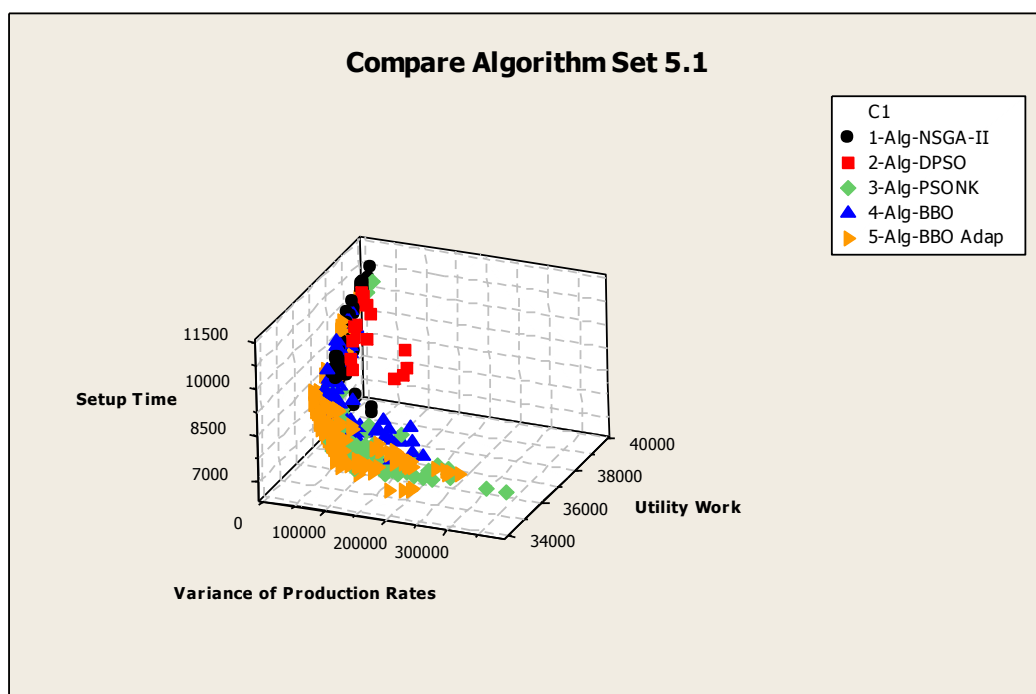
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.0778552	0.896156	0.0050761	229600
DPSO	0.1702585	0.523627	0.0000000	3969
PSONK	0.0197698	0.699968	0.0659898	43842
BBO	0.0229128	0.755901	0.3654822	264028
BBO Adaptive	0.0057920	0.809688	0.5651438	250139

จากตารางที่ 5.26 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่ม

คำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO Adaptive, NSGA-II และ BBO ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 4.2 มากที่สุด

5.2.2.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 5.1

คำตอบของปัญหา Set 5.1 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.35 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1

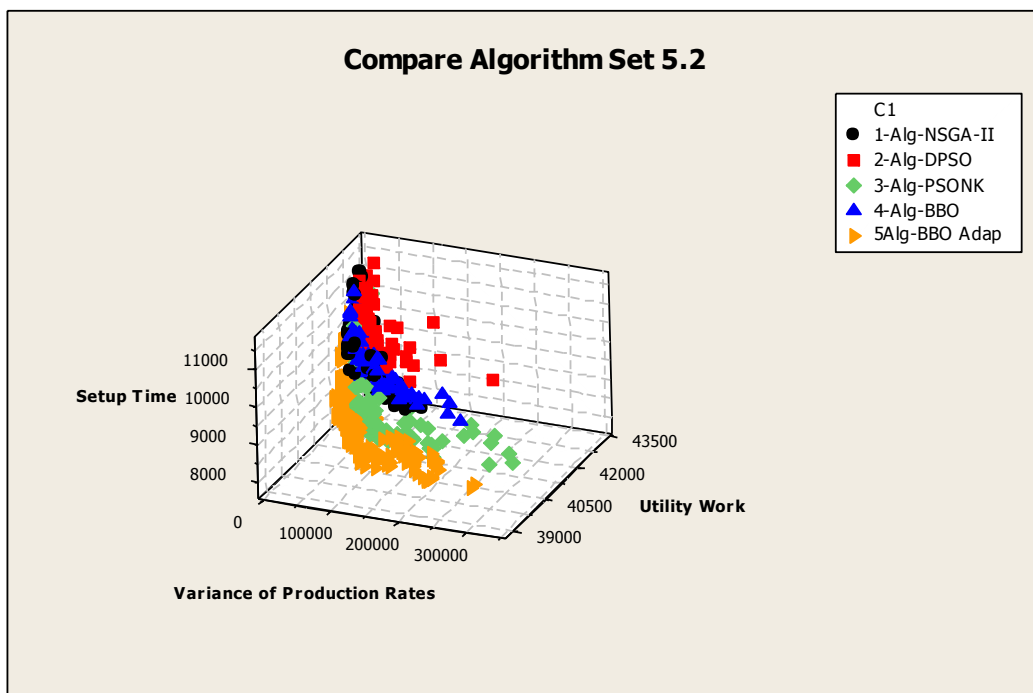
ตารางที่ 5.27 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.225746	0.721579	0.0000000	266980
DPSO	0.426698	0.365647	0.0000000	3510
PSONK	0.061326	0.560768	0.0322581	138682
BBO	0.096180	0.558710	0.0064516	35509
BBO Adaptive	0.003151	0.745046	0.9612903	252583

จากตารางที่ 5.27 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 5.1 มากที่สุด

5.3.2.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Set 5.2

คำตอบของปัญหา Set 5.2 ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึม เปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.36 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2

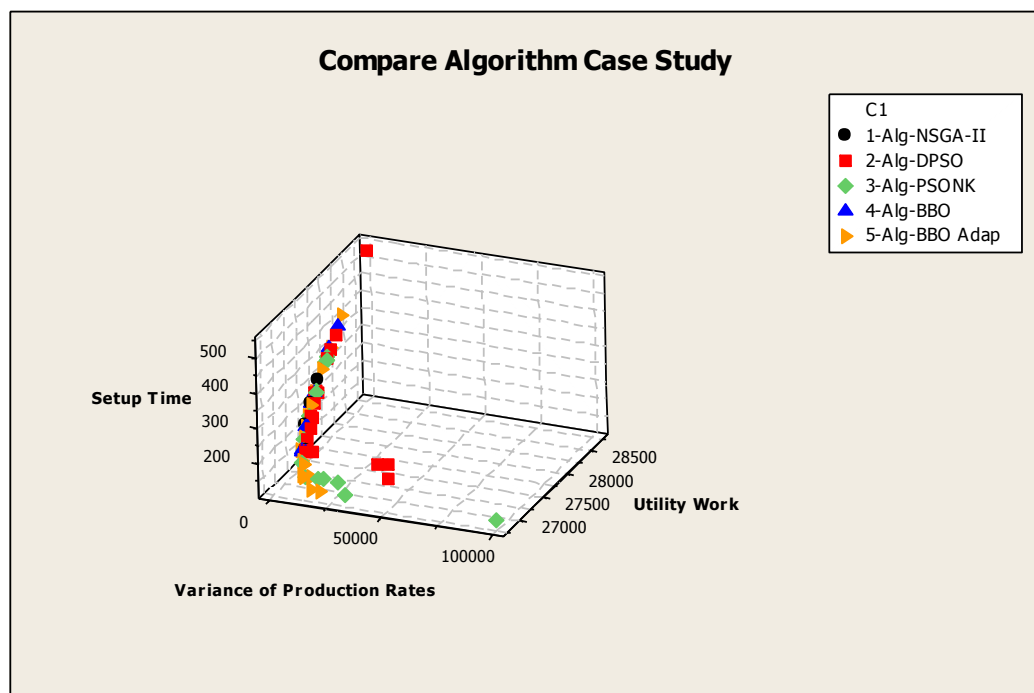
ตารางที่ 5.28 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Set 5.2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.247143	0.757602	0.000000	263360
DPSO	0.372212	0.594691	0.000000	19243
PSONK	0.121199	0.527974	0.005195	119936
BBO	0.267582	0.468354	0.000000	42935
BBO Adaptive	0.001510	0.768769	0.994805	250287

จากตารางที่ 5.28 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, NSGA-II, BBO และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Set 5.2 มากที่สุด

5.3.2.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Case Study183 ชิ้นงาน

คำตอบของปัญหา Case Study ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.37 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Case Study

ตารางที่ 5.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Case Study

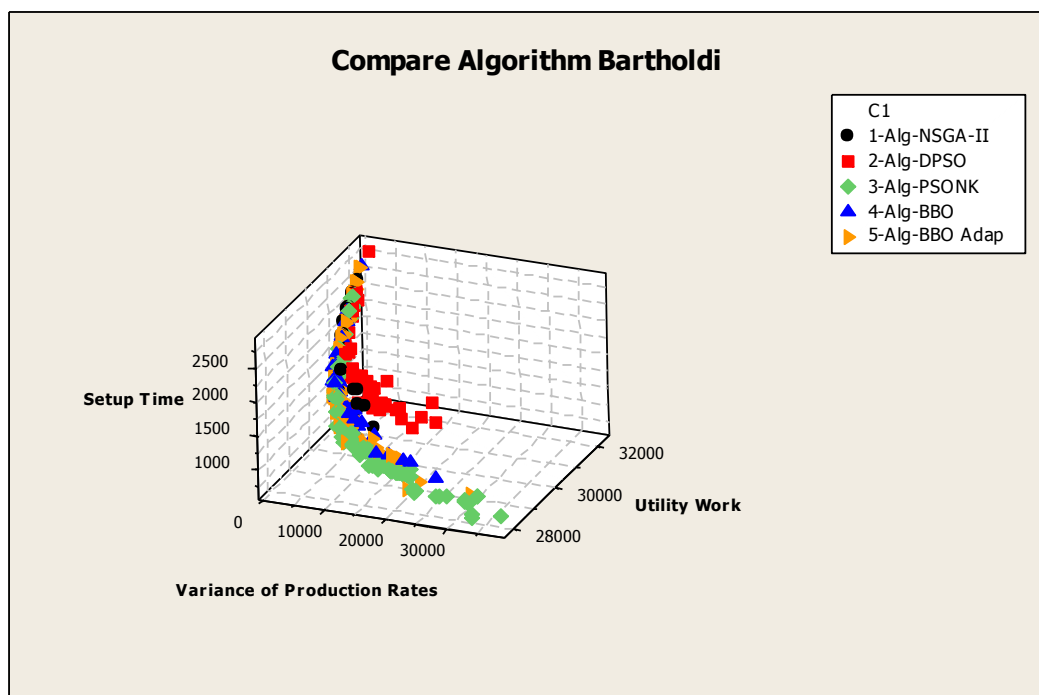
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.179133	0.587078	0.0869565	21756.4
DPSO	0.090365	0.905863	0.0000000	3795.7
PSONK	0.038566	0.790496	0.1739130	6046.5
BBO	0.139030	0.546402	0.1739130	10175.8
BBO Adaptive	0.049523	0.548763	0.5652174	18528.2

จากตารางที่ 5.29 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดี

สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Case Study มากที่สุด

5.3.2.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Bartholdi 148 ชิ้นงาน

คำตอบของปัญหา Bartholdi ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.38 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Bartholdi

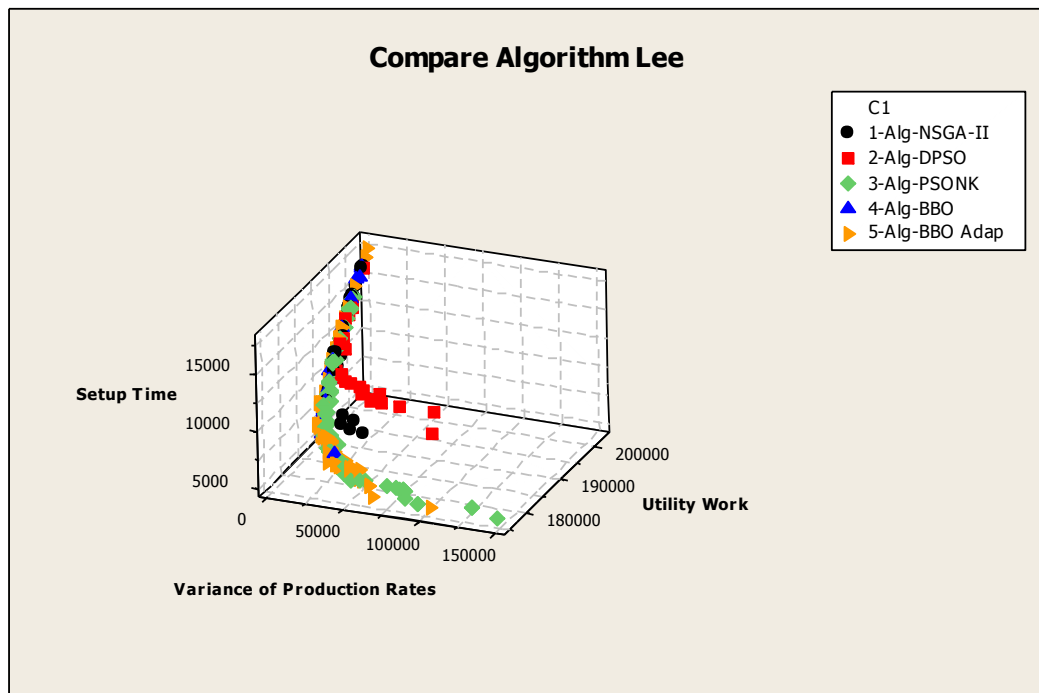
ตารางที่ 5.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Bartholdi

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.149581	0.724376	0.0285714	199276
DPSO	0.161054	0.562928	0.0000000	4293
PSONK	0.013258	0.718967	0.4171429	28742
BBO	0.049687	0.719145	0.0571429	15842
BBO Adaptive	0.022555	0.706795	0.5028571	199385

จากตารางที่ 5.30 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Bartholdi มากที่สุด

5.3.2.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมของปัญหา Lee 205 ชั้นงาน

คำตอบของปัญหา Lee ที่ได้จากอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ได้ผลดังนี้



ภาพที่ 5.39 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Lee

ตารางที่ 5.31 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของทั้ง 5 อัลกอริทึมในปัญหา Lee

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	Ratio	Time(s)
NSGA-II	0.121239	0.801092	0.0000000	226502
DPSO	0.232842	0.656482	0.0000000	9981
PSONK	0.026506	0.656263	0.0948276	36999
BBO	0.073215	0.848700	0.0517241	40126
BBO Adaptive	0.004808	0.855420	0.8534483	170033

จากตารางที่ 5.31 พบว่า BBO Adaptive มีค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ดีที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบทุกอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนด้านเวลาในการคำนวณนั้น DPSO ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO Adaptive, BBO และ NSGA-II ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะแล้ว จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา Lee มากที่สุด

5.4 สรุปท้ายบท

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้ง 5 อัลกอริทึมของปัญหาทั้ง 13 ปัญหา โดยการนำผลการค้นหาคำตอบของทุกอัลกอริทึมมาทำการหากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ แล้วนำคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมมาเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) สมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) สมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง BBO กับ PSONK ผลที่ได้คืออัลกอริทึมมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นจึงได้ประยุกต์อัลกอริทึม BBO Adaptive ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมอื่นๆ เพื่อดูว่าผลการเปรียบเทียบของ BBO Adaptive ที่ได้ ออกมามีประสิทธิภาพขึ้นหรือไม่ จากผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้ คือ

จากตารางที่ 5.31 เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง พบว่า ปัญหาขนาดกลาง Set 1.1 – Set 1.2 BBO Adaptive มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ปัญหาขนาดกลาง Set 2.1, Set 2.2, Set 3.2, Set 4.1 และ Set 4.2 BBO Adaptive มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด รองลงมาคือ BBO, PSONK, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ปัญหาขนาดกลาง Set 3.1 PSONK มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 รองลงมาคือ BBO Adaptive, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนปัญหาขนาดใหญ่ Set 5.1-Set 5.2 BBO Adaptive มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ปัญหาขนาดใหญ่ Case Study 183 ชั้นงาน PSONK มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ 0 รองลงมาคือ BBO Adaptive, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ปัญหาขนาดกลาง Bartholdi 142 ชั้นงาน และ Lee 205 ชั้นงาน BBO Adaptive มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเข้าใกล้ค่า 0 มากที่สุด รองลงมาคือ PSONK, BBO, NSGA-II และ DPSO ตามลำดับ ส่วนสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงจะเหมือนกันกับสมรรถนะด้านการลู่เข้า

เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบพบว่า ทุกอัลกอริทึมมีค่าสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบใกล้เคียงกัน และเวลาในการค้นหาคำตอบโดยภาพรวม พบว่า อัลกอริทึมที่ใช้เวลาน้อยที่สุด คือ DPSO รองลงมาคือ PSONK, BBO, BBO Adaptive และ NSGA-II ตามลำดับ

และจากการเปรียบเทียบค่าของผลกระทบบจากการเรียนรู้ที่ระดับ 80% และ 90 % พบว่าปัจจัยของผลกระทบบจากการเรียนรู้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแต่ละอัลกอริทึม จึงสรุปได้ว่า BBO Adaptive สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่า NSGAII DPSO และ PSONK

ตารางที่ 5.32 ผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่ผลกระทบจากการเรียนรู้ 80%

Efficiency	Algorithm	Problems												
		Set 1.1	Set 1.2	Set 2.1	Set 2.2	Set 3.1	Set 3.2	Set 4.1	Set 4.2	Set 5.1	Set 5.2	Case Study	Bartholdi	Lee
Convergence	NSGAI	0.0303672	0.0296340	0.0298887	0.0502402	0.0553686	0.0628893	0.0983772	0.0791980	0.178978	0.189429	0.271557	0.105027	0.147198
	DPSO	0.0285614	0.0548258	0.0442331	0.0713362	0.0579040	0.0979858	0.1032226	0.1386045	0.283493	0.210281	0.114979	0.124375	0.153692
	PSONK	0.0165674	0.0194910	0.0261431	0.0395377	0.0055081	0.0420817	0.0232459	0.0369215	0.068585	0.107609	0.016907	0.016243	0.017272
	BBO	0.0295012	0.0382940	0.0244794	0.0244470	0.0279825	0.0349835	0.0211307	0.0285486	0.111535	0.100722	0.167632	0.054455	0.055491
	BBO Adap	0.0095384	0.0091436	0.0090371	0.0123167	0.0191767	0.0143409	0.0076732	0.0111272	0.014317	0.019534	0.062641	0.009614	0.015911
Spread	NSGAI	0.573608	0.697061	0.712418	0.682207	0.589249	0.619395	0.577678	0.668773	0.649678	0.688265	0.569998	0.589844	0.573805
	DPSO	0.560583	0.613627	0.621042	0.612747	0.662303	0.578494	0.600946	0.478910	0.532721	0.533091	0.667013	0.498394	0.584648
	PSONK	0.583042	0.627881	0.593260	0.619952	0.602786	0.682957	0.574636	0.551578	0.517488	0.521020	0.632930	0.513607	0.596049
	BBO	0.503287	0.583247	0.605315	0.638524	0.570675	0.574228	0.794602	0.614122	0.508776	0.553621	0.663937	0.542029	0.596019
	BBO Adap	0.615324	0.658114	0.604318	0.668988	0.631511	0.699746	0.718091	0.659257	0.660116	0.781543	0.750438	0.625440	0.725896
Ratio	NSGAI	0.243986	0.234501	0.0707610	0.0223285	0.0124805	0.0208	0.0023529	0.0241730	0.000000	0.0023095	0.000000	0.0064935	0.000000
	DPSO	0.0652921	0.048518	0.0453939	0.0063796	0.0046802	0.0016	0.0011765	0.0012723	0.000000	0.0000000	0.000000	0.0032468	0.000000
	PSONK	0.295533	0.315364	0.2069426	0.1547049	0.6583463	0.1920	0.0529412	0.1959288	0.144366	0.1732102	0.575758	0.4448052	0.396419
	BBO	0.302405	0.229111	0.2603471	0.2934609	0.0998440	0.2912	0.5000000	0.2328244	0.010563	0.0277136	0.030303	0.0292208	0.058824
	BBO Adap	0.604811	0.630728	0.5313752	0.6220096	0.2246490	0.4944	0.4435294	0.5458015	0.845070	0.7967667	0.393939	0.5681818	0.544757
Time(s)	NSGAI	304920	366274	663328	234640	493125	284080	992000	295525	317175	302050	61296.0	323450	471500
	DPSO	8282.47	2585	15990	6794	22605	9491	5976	6816	12513	22184	3052.4	5736	9193
	PSONK	5548.40	11159	212355	12846	1894520	21744	119132	75213	117154	106501	9289.5	38339	206473
	BBO	244750	47370	260559	132634	106253	91345	760865	146784	41945	46171	5374.1	19214	98564
	BBO Adap	63714.2	306096	369272	205255	221097	250292	541872	277737	293166	290820	50846.0	283171	443578

ตารางที่ 5.32 ผลการเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่ผลกระทบจากการเรียนรู้ 90%

Efficiency	Algorithm	Problems												
		Set 1.1	Set 1.2	Set 2.1	Set 2.2	Set 3.1	Set 3.2	Set 4.1	Set 4.2	Set 5.1	Set 5.2	Case Study	Bartholdi	Lee
Convergence	NSGAI	0.0488490	0.0237586	0.0371270	0.0546769	0.0776495	0.137311	0.0646978	0.0778552	0.225746	0.247143	0.179133	0.149581	0.121239
	DPSO	0.0436107	0.0374850	0.0481471	0.0730296	0.0898954	0.131439	0.1120866	0.1702585	0.426698	0.372212	0.090365	0.161054	0.232842
	PSONK	0.0217991	0.0122418	0.0149530	0.0261214	0.0141553	0.021175	0.0136372	0.0197698	0.061326	0.121199	0.038566	0.013258	0.026506
	BBO	0.0316033	0.0224296	0.0385297	0.0519627	0.0723299	0.076649	0.0349497	0.0229128	0.096180	0.267582	0.139030	0.049687	0.073215
	BBO Adap	0.0071015	0.0029696	0.0027089	0.0038921	0.0040960	0.020809	0.0054174	0.0057920	0.003151	0.001510	0.049523	0.022555	0.004808
Spread	NSGAI	0.696545	0.890552	0.782325	0.851672	0.697877	0.730272	0.725851	0.896156	0.721579	0.757602	0.587078	0.724376	0.801092
	DPSO	0.676799	0.766487	0.806877	0.641906	0.627887	0.561411	0.532933	0.523627	0.365647	0.594691	0.905863	0.562928	0.656482
	PSONK	0.774998	0.861226	0.795220	0.649296	0.697911	0.526661	0.783828	0.699968	0.560768	0.527974	0.790496	0.718967	0.656263
	BBO	0.792455	0.980778	0.752656	0.652153	0.498222	0.587505	0.863664	0.755901	0.558710	0.468354	0.546402	0.719145	0.848700
	BBO Adap	0.736103	0.914140	0.864173	0.738269	0.725341	0.748853	0.937582	0.809688	0.745046	0.768769	0.548763	0.706795	0.855420
Ratio	NSGAI	0.117647	0.127168	0.0042735	0.0088106	0.0165563	0.0037594	0.0175879	0.0050761	0.0000000	0.0000000	0.0869565	0.0285714	0.0000000
	DPSO	0.050420	0.017341	0.0085470	0.0000000	0.0033113	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
	PSONK	0.403361	0.381503	0.2051282	0.1497797	0.3245033	0.3834586	0.2010050	0.0659898	0.0322581	0.005195	0.1739130	0.4171429	0.0948276
	BBO	0.462185	0.202312	0.0512821	0.0352423	0.0298013	0.0187970	0.2060302	0.3654822	0.0064516	0.0000000	0.1739130	0.0571429	0.0517241
	BBO Adap	0.563025	0.728324	0.8076923	0.8546256	0.6490066	0.5977444	0.5753769	0.5651438	0.9612903	0.994805	0.5652174	0.5028571	0.8534483
Time(s)	NSGAI	657036	143040	247068	261065	220162	144120	1477176	229600	266980	263360	21756.4	199276	226502
	DPSO	2097	1572	6529	4735	5646	4000	2632	3969	3510	19243	3795.7	4293	9981
	PSONK	2831	10040	3788	5873	49024	29581	36095	43842	138682	119936	6046.5	28742	36999
	BBO	119685	6186	4312	1702	9250	2714	95575	264028	35509	42935	10175.8	15842	40126
	BBO Adap	419455	126021	244364	256304	172519	140646	176452	250139	252583	250287	18528.2	199385	170033

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นบทสรุปงานวิจัย ประกอบด้วย ลักษณะปัญหาการทดลอง การทำ BBO และ BBO Adaptive เข้ามาแก้ปัญหา การกำหนดและทดสอบพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหา ผลการนำ BBO และ BBO Adaptive เข้ามาใช้แก้ปัญหา และข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

6.1 สรุปงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีเมทาฮีริสติกที่นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้ ซึ่งปัญหาการจัดลำดับการผลิตนั้นต้องพิจารณาหลายปัจจัย ทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีหลายตัว และผลกระทบจากการเรียนรู้ จึงทำให้ปัญหามีความยุ่งยากซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และเมื่อขนาดของปัญหาเพิ่มขึ้นจำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้จะเพิ่มขึ้นแบบ Exponential ปัญหาการจัดลำดับการผลิตจึงเป็นปัญหาแบบ NP-hard ทำให้การค้นหาคำตอบใช้เวลายาวนานมากขึ้น จำนวนคำตอบที่ได้มากมาย จึงมีการศึกษาวิจัยวิธีการเพื่อที่จะหาคำตอบโดยการนำวิธีเมทาฮีริสติก (Metaheuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหา ซึ่งเป็นวิธีที่นักวิชาการให้การยอมรับและนิยมนำมาใช้ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา

6.1.1 ลักษณะของปัญหาการทดลอง

ลักษณะสายการประกอบในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังนี้ 1) เป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ซึ่งสายการประกอบที่นำมาจัดลำดับการผลิตเป็นสายการประกอบที่มีความสมดุลที่อัตราส่วนเท่ากับสัดส่วนผลิตภัณฑ์ 2) ผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตจะมีหลากหลายรุ่น แต่มีคุณสมบัติคล้ายกันจึงสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้ และบางผลิตภัณฑ์จะไม่มีการทำงานบางชิ้นงาน (Task) 3) ในการจัดจะพิจารณาความต้องการผลิตภัณฑ์จาก Minimum Part Set (MPS) 4) สถานีงานที่ใช้จัดเป็นแบบปิด ทราบจำนวนสถานีงานที่อยู่ในสายการผลิตและเวลาดำเนินงานของชิ้นงานที่อยู่ในสถานีงาน 5) ไม่นำระยะทางและเวลาการเดินทางของพนักงานเข้ามาพิจารณา 6) รอบเวลาในการปล่อยสินค้าเข้าสู่สายพานการผลิตมีค่าคงที่ และ 7) การปรับตั้งเครื่องขึ้นอยู่กับลำดับงานที่อยู่ก่อนหน้า

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด ไปพร้อมกัน โดยงานวิจัยนำปัญหามาตรฐานของ McMullen (2001) ซึ่งแบ่งออกเป็นปัญหา 2 ประเภท คือ ปัญหาขนาดกลาง (Set 1.1-Set 4.2) และปัญหาขนาดใหญ่ (Set 5.1-Set 5.2, Bartholdi 142 ชิ้นงาน และ Lee 205 ชิ้นงาน) และมีปัญหา Case Study 182 ชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัญหาจริงของอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ของบริษัท ธนบุรีประกอบรถยนต์ จำกัด

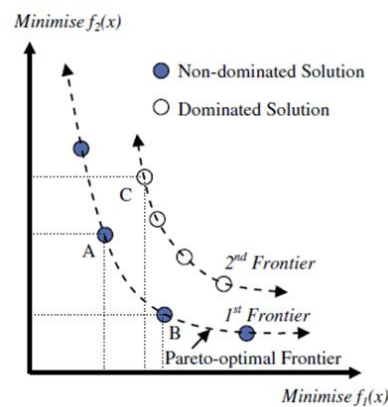
6.1.2 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์

เมื่อไม่มีเงื่อนไขใดๆ มาเกี่ยวข้องการแก้ปัญหาในการจัดลำดับการผลิตที่มีวัตถุประสงค์เดียวจะมีความสำคัญ (Akgunduz and Tunal, 2010) ซึ่งการแก้ปัญหาการจัดลำดับที่มีวัตถุประสงค์เดียวนั้น จะเลือกคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์นั้นน้อยหรือมากที่สุดแล้วแต่วัตถุประสงค์ที่กำหนด แต่อย่างไรก็ตามในภาคปฏิบัติจะมีหลายวัตถุประสงค์ บ่อยครั้งที่วัตถุประสงค์หลายตัวมีความขัดแย้งกัน โดยจะต้องพิจารณาไปพร้อมๆ กัน และต้องทำการตัดสินใจในการจัดลำดับการผลิตปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Hyun et al., 1998) Tsai (1995) Hyun et al. (1998) McMullen and Frazier (2000) McMullen et al. (2001) Kotani et al. (2004) Mansouri (2005) Ding et al. (2006) Konak et al. (2006) นายณพพล คำภีร์มย์ (2008) กรวรรณ จิตเมตตา 2011 ซึ่งรายละเอียดงานวิจัยจะกล่าวในบทที่ 2

เนื่องจากในงานวิจัยมีการพิจารณาแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด ไปพร้อมกัน ซึ่งในการหาคำตอบให้มีประสิทธิภาพดีไปพร้อมกัน เป็นเรื่องที่แทบจะเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากวัตถุประสงค์จะมีความขัดแย้งกันในการหาค่าน้อยที่สุดหรือค่าที่มากที่สุดเพราะจะไม่มีคำตอบที่ดีที่สุด (Srinivas and Deb, 2002) (Konak et.al, 2006) เพราะฉะนั้นในงานวิจัยจึงนำเทคนิคในการค้นหาเซตคำตอบที่อยู่ในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไป (Feasible Region) ได้ทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญของวัตถุประสงค์เท่ากันจึงไม่ใช้วิธี Method of Objective Weighting ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ความสำคัญของแต่ละวัตถุประสงค์ไม่เท่ากันและวิธีนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยม ในงานวิจัยจึงใช้เทคนิคในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) มาแก้ปัญหา สิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์นี้ คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับสมาชิก เทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) มีการจัดอันดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) คำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set หรือ

Pareto Optimal Front) ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ไม่มีคำตอบตัวใดที่ดีกว่ากัน หรือไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่น

จากภาพที่ 6.1 เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ของ 2 ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์พร้อมกัน ลักษณะของกลุ่มคำตอบจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยคำตอบที่อยู่ในเซต A และ B จะเป็นคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์น้อยกว่าคำตอบที่อยู่ในเซต C ทั้งหมด คำตอบในเซต A และ B จึงเป็นคำตอบที่เด่นกว่า (Dominate) คำตอบในเซต C แต่ไม่สามารถบอกได้ว่า เซต คำตอบ A กับ B เซตใดที่เด่นกว่ากันหรือเป็นคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated set) เซต คำตอบของ A และ B จึงเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ในกลุ่มคำตอบ ทั้งหมด



ภาพที่ 6.1 Pareto Optimal Solution (Chutima and Chimklai, 2012)

6.1.3 อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้

อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีเจเนเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบโดยการนำผลการค้นหาคำตอบของทุกอัลกอริทึมมาทำการหากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ แล้วนำคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมมาเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะคำตอบในงานวิจัยของ (Chutima and Olanviwatchai, 2010) กล่าวในบทที่ 5

6.1.4 การประยุกต์ใช้ BBO

การนำ BBO มาประยุกต์ใช้กับปัญหางานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงาน 8 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ข้อมูลนำเข้า: ข้อมูลนำเข้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิต
2. การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น: นำข้อมูลนำเข้ามาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น P_t จำนวน N ตัว สตริงคำตอบเบื้องต้นเป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบโดยใช้วิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างได้กำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้น และผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้น จะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 การจัดลำดับการผลิต เช่น ABCBCC
3. การประเมินค่า: นำสตริงคำตอบที่ทำการจัดลำดับการผลิตมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด
4. วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด: กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือ Non-dominated Sorting
5. การกำหนดค่าความหนาแน่น: กำหนดค่าความหนาแน่นให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)
6. Migration Rate กำหนดรูปแบบการอพยพ (Migration Model) ทำการคำนวณค่าอัตราการอพยพเข้า (λ), อัตราการอพยพออก (μ), ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_λ), ค่าความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_μ) และค่าความน่าจะเป็นเป็นการเกิดสปีชีส์เคาท์ (P_k)
7. Migration ทำการอพยพโดยจะเริ่มจากการเลือกบิตที่จะทำการอพยพเข้าของสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ที่กำลังพิจารณาด้วยค่า $P_{\lambda,k}$ และทำการนำบิตที่จะอพยพเข้า

โดยการเลือกสตริงคำตอบที่จะทำการอพยพออกด้วยค่า P_{μ} แล้วทำการอพยพพิทในสตริงคำตอบ และทำการซ่อมแซมคำตอบ

8. Mutation นำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการอพยพเข้าสู่การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation

6.1.5 การกำหนดและการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ BBO

เนื่องจากปัญหาที่ใช้ในการวิจัยที่แตกต่างกัน 13 ปัญหา จึงต้องมีการทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละปัญหาเพื่อให้ค่าของคำตอบที่ค้นหามีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งในอัลกอริทึมนี้มีการทำการทดสอบพารามิเตอร์ของรูปแบบการอพยพแบบเป็น 2 แบบ คือ Linear และ Sinusoidal

6.1.6 ผลการนำ BBO เข้ามาแก้ปัญหา

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง BBO กับ PSONK ผลที่ได้คือ อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นจึงได้ประยุกต์อัลกอริทึม BBO Adaptive ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมอื่นๆ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า BBO Adaptive สามารถค้นหากลุ่มคำตอบได้ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากที่สุด ทั้งด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ส่วนด้านการกระจายกลุ่มนั้นประสิทธิภาพของ BBO Adaptive มีค่าใกล้เคียงกับทุกอัลกอริทึม ส่วนเวลาในการหาคำตอบนั้น BBO และ BBO Adaptive ยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากเมื่อเทียบกับ DPSO และ PSONK ในการพัฒนาอัลกอริทึมบางครั้งมีพัฒนาให้ได้คำตอบที่ใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากที่สุด แต่เวลาที่ใช้อาจมีเวลาที่ยาวนานมากขึ้น ซึ่งอาจจะทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้ เพราะฉะนั้นในการพัฒนาอัลกอริทึมจึงควรพัฒนาประสิทธิภาพในการหาคำตอบควบคู่ไปกับเวลาที่ใช้หาคำตอบ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates) ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work) และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time) และมีการนำผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาประยุกต์ใช้ ซึ่งค่าที่ได้ของ

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะไม่สามารถทำการพิจารณาแยกได้ ทำให้คำตอบที่ได้จากการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมมีค่าที่มากกว่างานวิจัยทั่วไป เนื่องจากคำตอบที่ได้ออกมาจะมีคำตอบที่ดีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เวลาที่ใช้ในการหาคำตอบจะมากกว่างานวิจัยอื่น

2. ปัญหาการจัดลำดับการผลิตมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์อีกหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จึงสามารถทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมโดยเลือกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมกับปัญหางานวิจัยที่ต้องการได้
3. เนื่องจากปัญหาที่นำมาใช้ในแต่ละงานวิจัยมีหลายปัญหา เพราะฉะนั้นในการกำหนดค่าพารามิเตอร์นั้นควรกำหนดให้เหมาะสมกับปัญหามากที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์บางค่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของแต่ละอัลกอริทึม
4. ในงานวิจัยนี้เป็นการเน้นการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึมเพื่อหาอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีและเหมาะสมกับปัญหา ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นปัญหามาตรฐาน ถึงแม้จะมีปัญหา Case Study ที่เอามาจากปัญหาจริงก็ตาม ข้อสมมติฐานและข้อจำกัดที่ใช้ยังไม่สามารถครอบคลุมกับปัญหาอุตสาหกรรมจริง จึงถือว่ายังไม่เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริงได้ แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าวางงานวิจัยไปต่อยอดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงนั้นต้องมีการเพิ่มเติมข้อจำกัดในการทำงานจริงให้มากขึ้นเพื่อให้อัลกอริทึมที่นำไปประยุกต์ใช้มีประสิทธิภาพและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรรณ จิตเมตตา. การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฟุ้งอนุภาคสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

นพพล คำภิรมย์. การประยุกต์ใช้วิธีการบรรจบร่วมกับเมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวอยู่ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ปารเมศ ชูติมา. การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ปาลิดา ฉิมคล้าย. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาษาอังกฤษ

Abell, J., and Du, D. A Framework for Multi-objective, Biogeography Based Optimization of Complex System Families. AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference Fort worth Texas, 2010.

Akgunduz, O., and Tunal, S. A review of the current applications of genetic algorithms in mixed-model assembly line sequencing. International Journal of Production Research (May 2010): 1–21.

Bachman, A., and Janiak, A. Scheduling jobs with position-dependent processing times. Journal of the Operational Research Society 55 (Mar 2004): 257–264.

- Betancourt, L.C. ASALBP: the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem. Formalization and Resolution Procedures. Institute of Industrial and Control Engineering, 2007.
- Biskup, D. Single-machine scheduling with learning considerations. European Journal of Operational Research 115 (June 1999): 173–178.
- Biskup, D. A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. European Journal of Operational Research 188 (June 2008): 315–329.
- Biskup, D., and Simons, D. Common due date scheduling with autonomous and induced learning. European Journal of Operational Research 159 (November 2004): 606–616.
- Chen, P., Wu, C.-C. and Lee, W.-C. A bi-criteria two-machine flowshop scheduling problem with a learning effect. Journal of the Operational Research Society 57 (September 2006): 1113–1125.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6(2) (April 2002): 182-197.
- Ding, F., Zhu, J., and Sun, H. Comparing two weighted approaches for sequencing mixed-model assembly lines with multiple objectives. Int. J. Production Economics 102 (April 2006): 108–131.
- Eren, T., and Guner, E. Minimizing total tardiness in a scheduling problem with a learning effect. Applied Mathematical Modelling 31 (June 2007): 1351–1361.
- Goldberg, D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Boston: Addison-Wesley, 1989.
- Hyun, C.J., Kim, Y., and Kim, Y.K. A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines, Computers and Operations Research 25 (February 1998): 675–690.
- Hwang, R. K., and Katayama, H. Integrated procedure of balancing and sequencing for mixed-model assembly lines: a multi-objective evolutionary approach. International Journal of Production Research 47 (November 2010): 6417–6441.

- 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., Song, W. S., and Kim, J. H. A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. Computers & Operations Research 36 (November 2009): 853-865.
- Kim, Y. K., Hyun, C. J., and Kim, Y. Sequencing in mixed model assembly lines: A genetic algorithm approach. Computers and Operations Research 23(12) (1996): 1131-1145.
- Keachie, E.C., and Fontana, R.J. Effects of learning on optimal lot size. Management Science 13 (October 1966): B102–B108.
- Kotani, S., Ito, T., and Ohno, K. Sequencing problem for a mixed-model assembly line in the Toyota production system. Int. J. Production Research 42, (December 2004): 4955–4974.
- Konak, A., Coit, D. W., and Alice, E. S. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability Engineering and System Safety 91 (January 2006): 992-1007.
- Koulamas, C., and Kyparisis, G.J. Single-machine and two-machine flowshop scheduling with general learning function. European Journal of Operational Research 178 (April 2007): 402–407.
- Kundra, H., and Sood, M. Cross-Country Path Finding using Hybrid approach of PSO and BBO. International Journal of Computer Applications (September 2010): 15-19.
- Kuo, W.-H., and Yang, D.-L. Minimizing the total completion time in a single-machine scheduling problem with a time-dependent learning effect. European Journal of Operational Research 174 (June 2006a): 1184–1190.
- Kuo, W.-H., and Yang, D.-L. Single-machine group scheduling with a time-dependent learning effect. Computers and Operations Research 33 (January 2006b): 2099–2112.

- Kuo, W.-H., and Yang, D.-L. Minimizing the makespan in a single machine scheduling problem with a time-based learning effect. Information Processing Letters 97 (2006c): 64–67.
- Kuo, W.-H., and Yang, D.-L. Single machine scheduling with past-sequence-dependent setup times and learning effects. Information Processing Letters 102 (November 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.
- Lee, W.-C. A note on deteriorating jobs and learning in single-machine scheduling problems. International Journal of Business and Economics 3 (May 2004): 83–89.
- Lee, W.-C., and Wu, C.-C. Minimizing total completion time in a two-machine flowshop with a learning effect. International Journal of Production Economics 88 (May 2004): 85–93.
- Liao, C., Tseng, C. T., and Luarn, P. A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems. Computers and Operations Research 34(10) (2007): 3099-3111.
- Lummus, R. A simulation analysis of sequencing alternatives for JIT lines using kanbans. Journal of Operations Management 13(1995): 183-191.
- Ma, H. An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization. Information Sciences 180 (May 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 (September 2005): 696–716.
- McMullen, P.R. An efficient frontier approach to addressing JIT sequencing problems with setups via search heuristics, Computers and Industrial Engineering 41(July 2001): 335-353.

- McMullen, P.R. and Frazier, G.V. A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line. IIE Transactions 32 (August 2000): 679–686.
- McMullen, P.R., Tarasewich, P., and Frazier, G.V., Using genetic algorithms to solve the multi-product JIT sequencing problem with set-ups. International Journal of Production Research 38 (August 2000): 2653–2670.
- Mo, H., and Xu, L. Biogeography Migration Algorithm for Traveling Salesman Problem. International Conference on Swarm Intelligence Beijing, 2010.
- Mosheiov, G. Scheduling problems with a learning effect. European Journal of Operational Research 132 (May 2001a): 687–693.
- Mosheiov, G. Parallel machine scheduling with a learning effect. Journal of the Operational Research Society 52 (October 2001b): 1–5.
- Mosheiov, G., and Sidney, J.B. Scheduling with general job-dependent learning curves. European Journal of Operational Research 147 (March 2003): 665–670.
- Mosheiov, G., and Sidney, J.B. Note on scheduling with general learning curves to minimize number of tardy jobs. Journal of the Operational Research Society 56 (January 2005): 110–112.
- 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 (June 2009a): 1955-1965.
- Ozcan, U., and Toklu, B. Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. Computers & Industrial Engineering (August 2009b): 217-227.
- Ozcan, U., and Toklu, B. Balancing two-sided assembly lines with sequence-dependent setup times. International Journal of Production Research (September 2010): 5363-5383.
- Parames Chutima and Palida Chimklai. Multi-objective two- sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge, Computers & Industrial Engineering (August 2012): 39-55.

- Parames Chutima and Panuwat Olanviwatchai. Mixed-Model U-shaped assembly line balancing problems with coincidence memetic algorithm. Journal of Software Engineering and Applications 03(04) (January 2010): 347-363.
- Salman, A., Ahmad, I., and Al-Madani, S. Particle swarm optimization for task assignment problem. Microprocessors and Microsystems 26 (November 2002): 363-371.
- Simon, D. Biogeography-Based Optimization. IEEE transactions on evolutionary computation 12 (December 2008): 702-713.
- Srinivas, N., and Deb, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. the Journal of Evolutionary Computation: 221-248.
- Toksari, M., Isleyen, S., Guner, E. and Baykoc, O., Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect. ScienceDirect Applied Mathematical Modelling 32 (October 2008): 2954-2961.
- Tsai, L., Mixed model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. Management Science 41(March 1995), 485-495.
- Wang, J.-B., A note on scheduling problems with learning effects and deteriorating jobs. International Journal of Systems Science 37 (May 2006): 827-833.
- Wang, X., Cheng, T.C.E. Single-machine scheduling with deteriorating jobs and learning effects to minimize the makespan. European Journal of Operational Research 178 (April 2007): 57-70.
- Wattanapornprom, W., Olanviwatchai, P., Chutima, P., and Chongstitvatana, P. Multi-objective combinatorial optimization with coincidence algorithm. Evolutionary Computation. (May 2009): 1675-1682.
- Wright, T.P. Factors affecting the cost of airplanes. Journal of Aeronautical Sciences 3 (1936): 122-128.
- Wu, C.-C., Lee, W.-C., and Chen, T. Heuristic algorithms for solving the maximum lateness scheduling problem with learning considerations. Computers and Industrial Engineering 52 (December 2007a): 124-132.

Wu, C.-C., Lee, W.-C., and Wang, W.C. A two-machine flowshop maximum tardiness scheduling problem with a learning effect. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 31 (2007b): 743–750.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

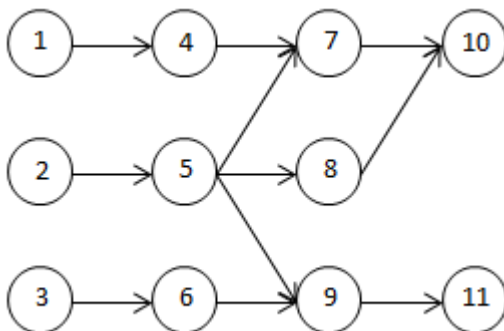
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

1. ข้อมูลนำเข้า

ปัญหาตัวอย่างเป็นการจัดลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ A, B และ C โดยกำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้น เข้าไปในสายการประกอบ จะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 ก่อนทำการจัดลำดับการผลิตต้องนำข้อมูลไปทำการจัดสมดุลการผลิตตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานของปัญหา Kim et al.(2000) ที่มีจำนวนชิ้นงานการประกอบเท่ากับ 12 ชิ้นงาน และรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 8

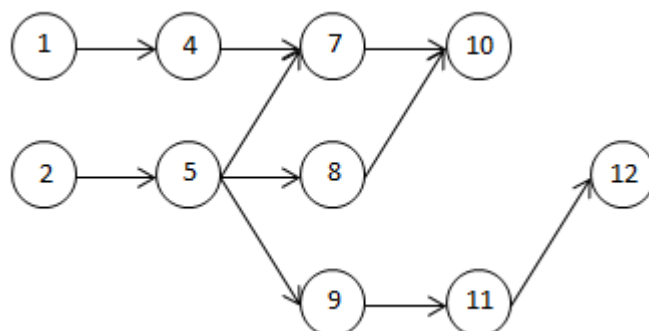
1.1 ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน

ผลิตภัณฑ์ A



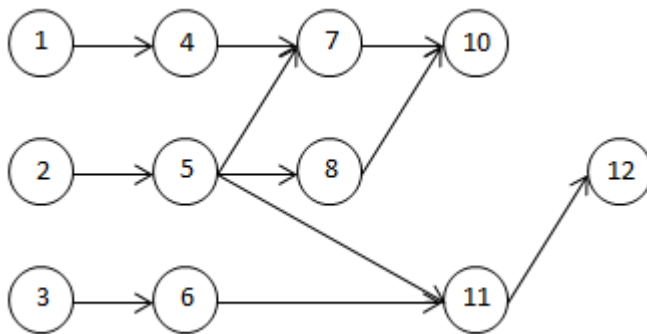
แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ A

ผลิตภัณฑ์ B

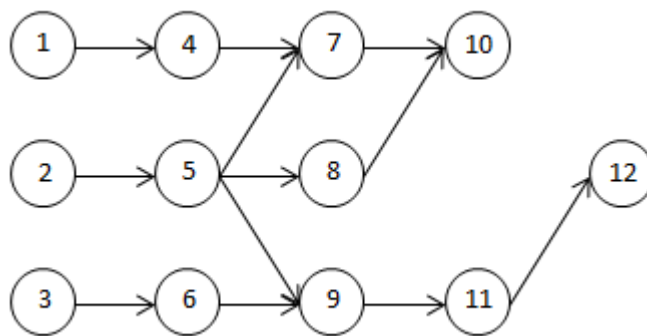


แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ B

ผลิตภัณฑ์ C



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ C



แผนภาพความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์รวม A, B และ C

ภาพที่ ก.1 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์รวม (Overall Precedence Diagram)
ของปัญหาตัวอย่างขนาด 12 ขั้นตอน (Kim et al., 2000)

1.2 เวลาการดำเนินงานของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ ก.1 ชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C

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

สัดส่วนของความต้อการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set : MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้น โดยจะนำสัดส่วนความต้อการของแต่ละผลิตภัณฑ์คูณกับเวลาการดำเนินงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น

ชั้นงานที่ 1

เวลาดำเนินงานของ A คือ $1 \times 2 = 2$

เวลาดำเนินงานของ B คือ $2 \times 3 = 6$

เวลาดำเนินงานของ C คือ $3 \times 1 = 3$

ดังนั้นเวลาเฉลี่ยของผลิต A, B และ C ของชั้นงานที่ 1 คือ $\frac{(2+6+3)}{(1+2+3)}$ เท่ากับ 1.833333 ดังแสดง

ในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 เวลาเฉลี่ยชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C

ชิ้นงาน	เวลาดำเนินงาน			เวลาเฉลี่ย
	A	B	C	
1	2	6	3	1.833333
2	3	6	9	3
3	2	0	3	0.833333
4	3	4	3	1.666667
5	1	4	9	2.333333
6	1	0	6	1.166667
7	3	4	3	1.666667
8	3	2	6	1.833333
9	2	2	0	0.666667
10	2	6	3	1.833333
11	1	4	9	2.333333
12	0	2	6	1.333333

เมื่อได้เวลาเฉลี่ยชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C แล้วจึงนำไปทำสมดุลงเพื่อจัดชิ้นงานลงสู่สถานีงานก่อนทำงานจัดลำดับการผลิตต่อไป

1.3 สายการประกอบแบบสองด้านที่จัดความสมดุลแล้ว

นำข้อมูลนำเข้าทั้งหมดมาทำการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน เมื่อทำการจัดสมดุลทำให้เราทราบว่ามีการจัดสถานีงาน รอบเวลาการผลิตเป็นเท่าไร ชิ้นงานอยู่ในสถานีงานไหน มีลำดับการดำเนินชิ้นงานอย่างไร ก่อนที่จะนำไปทำการจัดลำดับการผลิต

WS1

3	1	4	6	7
---	---	---	---	---

WS2

2	5	8	9
---	---	---	---

WS3

10	
----	--

WS4

11	12	
----	----	--

ภาพที่ ก.2 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีความสมดุล

ตารางที่ ก.3 ลำดับการผลิตจากการจัดสมดุล

Task	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WS	1	2	1	1	2	1	1	2	2	3	4	4
Seq	2	5	1	3	6	4	8	7	10	9	11	12

จากตารางที่ ก.3 ชิ้นงานที่ 3 จะอยู่ในสถานีที่ 1 ลำดับการดำเนินงานเป็นลำดับที่ 1 ชิ้นงานที่ 1 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ลำดับการดำเนินงานเป็นลำดับที่ 2 ชิ้นงานที่ 4 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ลำดับการดำเนินงานเป็นลำดับที่ 3 ดังแสดงในรูป ก.2

1.4 เวลาปรับตั้งเครื่องของผลิตภัณฑ์

เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์มาจากการใช้วิธีการสุ่ม โดยกำหนดช่วงของเวลาปรับตั้งเครื่องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05-0.1 (Lummus, 1995) ของเวลาเฉลี่ยชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A, B และ C วิธีการคำนวณค่าแสดงในบทที่ 2

ตารางที่ ก.4 เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์

ชิ้นงาน	เวลาปรับตั้งเครื่อง		
	A	B	C
1	0.1857	0.1988	0.1929
2	0.2114	0.1501	0.2311
3	0.0604	0	0.061
4	0.1326	0.1096	0.1748
5	0.1749	0.1543	0.1338
6	0.0916	0	0.0776
7	0.1958	0.1893	0.1357
8	0.1546	0.1347	0.1623
9	0.0898	0.0873	0
10	0.1126	0.1822	0.1025
11	0.1414	0.1731	0.1781
12	0	0.0684	0.0872

1.5 ค่าการเรียนรู้

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี Position-Based Learning Effect คือ การเรียนรู้จะส่งผลต่อจำนวนของงานในการดำเนินการผลิต การเรียนรู้จะเกิดขึ้นจากเวลาในการดำเนินงานในชั้นงานที่ทำซ้ำกัน ตามการจัดลำดับการผลิต วิธีการคำนวณค่าแสดงในบทที่ 2

1.6 พารามิเตอร์ของ NSGA-II

จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว

วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX)

วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation

ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เท่ากับ 0.7 ($P_c=0.7$)

ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.3 ($P_m=0.3$)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ เท่ากับ 80% (Learning Rate = 0.8)

2. การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบเบื้องต้นเป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบโดยใช้วิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างได้กำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้น จะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 ทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต

Model Sequence	A	B	B	C	C	C
String	1	2	3	4	5	6

แล้วทำการสุ่มสตริงคำตอบออกมาด้วยขนาดของประชากรเท่ากับ 5 จะได้สตริงคำตอบ 5 คำตอบ คือ

Strings	Model Sequences
1	1 2 4 3 5 6
2	4 2 1 3 5 6
3	4 1 5 2 3 6
4	2 1 3 4 5 6
5	2 1 4 5 3 6

3. การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น ตามลำดับ ดังนี้

3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)
- ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

สมการในการคำนวณ ตัวแปรต่างๆ ในสมการ และตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากบทที่ 2

ตารางที่ ก.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	47.4556	16.9536	5.5354
2	28.3889	15.903	5.6526
3	31.7222	15.9456	5.6069
4	70.9222	16.7213	4.7069
5	32.2556	16.2287	5.5928

3.1.1 การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบจากสตริงที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่า Fitness = 1) ไปจนถึงสตริงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่า Fitness มากที่สุด) ถ้าค่าความแข็งแรงมีค่าเท่ากันให้เรียงลำดับค่าที่น้อยที่สุดจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งแรงของสตริง

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness
2	28.3889	15.903	5.6526	1
3	31.7222	15.9456	5.6069	1
5	32.2556	16.2287	5.5928	1
1	47.4556	16.9536	5.5354	1
4	70.9222	16.7213	4.7069	1

3.1.2 การกำหนดค่าความหนาแน่นด้วยวิธี Crowding Distance

วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น Crowding Distance จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน (ค่า Fitness เท่ากัน) เริ่มจากสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่า Fitness = 1) จนถึงความแข็งแรงน้อยที่สุดตามลำดับ ถ้าสตริงไหนมีค่าความแข็งแรงค่าเดียวจะกำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity) ส่วนค่าที่เท่ากันจะคำนวณหาดังนี้

1. กำหนดค่า i ให้สตริงคำตอบ $i=1$ สตริงคำตอบลำดับที่ 1 และเรียงลำดับค่า i เรื่อยๆ จนถึงลำดับสุดท้าย แล้วกำหนดให้สตริงคำตอบที่ $i=1$ หรือมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และสตริงคำตอบลำดับสุดท้าย $i=5$ หรือมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด กำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity)

ตารางที่ ก.7 การเรียงลำดับค่า i จากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	i
2	28.3889	15.903	5.6526	1	1
3	31.7222	15.9456	5.6069	1	2
5	32.2556	16.2287	5.5928	1	3
1	47.4556	16.9536	5.5354	1	4
4	70.9222	16.7213	4.7069	1	5

2. คำนวณค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบที่เหลือ $i=2$ ถึง $i=4$ จากตัวอย่าง กำหนดให้ f_1^{max}, f_1^{min} คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด คือ 70.9222 และ 28.3889 ตามลำดับ

f_2^{max}, f_2^{min} คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด คือ 16.9536 และ 15.903 ตามลำดับ

f_3^{max}, f_3^{min} คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด คือ 5.6526 และ 4.7069 ตามลำดับ

$$cd_1(x_{[2,1]}) = \left| \frac{f_1(x_{[2+1,1]}) - f_1(x_{[2-1,1]})}{f_1^{max} - f_1^{min}} \right| \quad (ก.1)$$

$$cd_1(x_{[2,1]}) = \left| \frac{32.2556 - 28.3889}{70.9222 - 28.3889} \right| = 0.0909$$

$$cd_2(x_{[2,2]}) = \left| \frac{f_1(x_{[2+1,2]}) - f_1(x_{[2-1,2]})}{f_2^{max} - f_2^{min}} \right|$$

$$cd_2(x_{[2,2]}) = \left| \frac{16.2287 - 15.903}{16.9536 - 15.903} \right| = 0.31001 \text{ และ}$$

$$cd_3(x_{[2,3]}) = \left| \frac{f_1(x_{[2+1,3]}) - f_1(x_{[2-1,3]})}{f_3^{max} - f_3^{min}} \right|$$

$$cd_3(x_{[2,3]}) = \left| \frac{5.5928 - 5.6526}{5.6526 - 4.7069} \right| = 0.06323$$

ลำดับที่ $i=2$ จะมีค่า Crowding Distance เท่ากับ $0.0909 + 0.31001 + 0.06323 = 0.4642$

ตารางที่ ก.8 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบ

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	i	Crowding Distance
2	28.3889	15.903	5.6526	1	1	Infinity
3	31.7222	15.9456	5.6069	1	2	0.4642
5	32.2556	16.2287	5.5928	1	3	1.405
1	47.4556	16.9536	5.5354	1	4	2.3147
4	70.9222	16.7213	4.7069	1	5	Infinity

ตารางที่ ก.9 ค่าของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	47.4556	16.9536	5.5354	1	2.3147
2	28.3889	15.903	5.6526	1	Infinity
3	31.7222	15.9456	5.6069	1	0.4642
4	70.9222	16.7213	4.7069	1	Infinity
5	32.2556	16.2287	5.5928	1	1.405

4. การคัดเลือกคำตอบ

ในการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะพิจารณาจากค่า Fitness และค่า Crowding Distance โดยจะพิจารณาจากค่า Fitness น้อยที่สุด และค่า Crowding Distance มากที่สุดก่อน ตามขั้นตอนการคัดเลือกดังนี้

4.1 การสร้างวงล้อสุ่ม

วงล้อสุ่มเป็นวงกลมที่มีพื้นที่ขนาด 1 หน่วย การสร้างวงล้อสุ่มจะทำการแบ่งพื้นที่ให้จำนวนประชากรทั้งหมด โดยจะกำหนดจากความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของสตริงคำตอบดังนี้

1. แปลงค่า Fitness จากค่าน้อยไปมากเป็นค่ามากไปน้อย เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นในวงล้อสุ่ม
2. หาค่าผลรวมของ Fitness ที่แปลงแล้วของสตริงคำตอบ ตามสมการ

$$F = \sum_{i=1}^N f_i \text{ เมื่อ } i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{ก.2})$$

โดยที่ f_i คือ ค่า Fitness ที่แปลงแล้ว

N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด

3. หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก (Probability of Selection) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว ตามสมการ

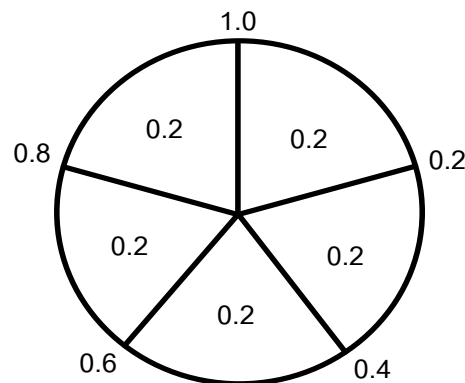
$$p_i = \frac{f_i}{F} \quad (\text{ก.3})$$

4. หาค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกสะสม (Cumulative Probability of Selection) ของสตริงคำตอบแต่ละตัว ตามสมการ

$$q_i = \sum_{j=1}^i p_j \quad (\text{ก.4})$$

ตารางที่ ก.10 การสร้างวงล้อสุ่ม

Strings	Fitness	แปลง Fitness	p_i	q_i
1	1	1	0.2	0.2
2	1	1	0.2	0.4
3	1	1	0.2	0.6
4	1	1	0.2	0.8
5	1	1	0.2	1
รวม		5		



ภาพที่ ก.4 วงล้อภูเลิศ

4.1 วิธีการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

วิธี Binary Tournament Selection เป็นการสุ่มสตริงคำตอบจากการหมุนวงล้อภูเลิศออกมา 2 สตริง แล้วนำสตริงคำตอบที่สุ่มมาพิจารณาค่า Fitness มาเปรียบเทียบกับกัน เพื่อทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความเหมาะสม โดยมีขั้นตอนการพิจารณาดังนี้

1. สร้างตัวเลขสุ่ม r มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ออกมาสองค่า คือ r_1 กับ

$$r_2$$

2. ถ้า $r_1 < q_i$ ให้เลือกสตริงคำตอบตัวแรก แต่ถ้า $q_{i-1} < r_1 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าน้อยกว่าจำนวนประชากรทั้งหมด) ให้เลือกสตริงคำตอบตัวที่ i เป็นคำตอบแรก และถ้า $r_2 < q_i$ ให้เลือกสตริงคำตอบตัวที่สอง แต่ถ้า $q_{i-1} < r_2 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าน้อยกว่าจำนวนประชากรทั้งหมด) ให้เลือกสตริงคำตอบตัวที่ i เป็นคำตอบตัวที่สอง
3. เมื่อสุ่มสตริงคำตอบสองตัวให้นำมาพิจารณาค่า Fitness ของสตริงแต่ละตัว ถ้าสตริงคำตอบใดมีค่า Fitness น้อยกว่าให้เลือกสตริงคำตอบนั้นเข้าสู่ Mating Pool แต่ถ้าค่า Fitness ของสตริงคำตอบสองตัวเท่ากัน ให้พิจารณาจากค่า Crowding Distance ถ้าสตริงคำตอบใดที่มีค่า Crowding Distance มากกว่าให้เลือกสตริงนั้นเข้าสู่ Mating Pool และถ้าค่า Crowding Distance ของสองสตริงมีค่าเท่ากันอีกให้เลือกสตริงคำตอบโดยการสุ่มเข้าสู่ Mating Pool

ตารางที่ ก.11 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

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	0.5870	0.6	3	1	0.9952	1	5	1	5
2	0.4139	0.6	3	1	0.1866	0.2	1	1	1
3	0.3091	0.4	2	1	0.7811	0.8	4	1	4
4	0.2638	0.4	2	1	0.1958	0.2	1	1	2
5	0.7588	0.8	4	1	0.9924	1	5	1	4

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบสตริงคำตอบที่ได้คือ สตริงคำตอบที่ 5 1 4 2 และ 4 ตามลำดับ สตริงคำตอบที่เลือกจะเข้าสู่ Mating Pool

5. การครอสโอเวอร์

การครอสโอเวอร์เป็นการนำสตริงที่ได้จากการคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection ที่อยู่ใน Mating Pool มาทำการจับคู่กันเพื่อแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสตริงคำตอบตัวใหม่ ส่วนสตริงคำตอบที่ไม่ได้ถูกทำการจับคู่จะยังคงสภาพเดิมอยู่ใน Mating Pool ในการจับคู่สตริงคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

1. จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกนำมาจับคู่ (N_c) จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_c) ซึ่งค่า P_c ในตัวอย่างนี้จะเท่ากับ 0.7 แสดงว่าสตริงคำตอบที่ถูกครอสโอเวอร์จะมีประมาณ 70% ของสตริงคำตอบทั้งหมด ก็คือ $0.7 \times 5 = 3.5$ หรือ 4 สตริงคำตอบ
2. ทำการสุ่มค่า r ที่อยู่ระหว่าง 0-1 ให้กับสตริงคำตอบ ถ้าค่า $r < P_c$ สตริงคำตอบนั้นจะถูกเลือกไปจับคู่ ถ้าไม่มีสตริงคำตอบใดเลยที่ค่า $r < P_c$ ให้สุ่มค่า r ใหม่อีกครั้ง
3. ถ้าจำนวนสตริงคำตอบที่ถูกนำมาจับคู่ (N_c) มีค่าเป็นจำนวนคี่ ให้พิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้

- 3.1 ถ้า (N_c) เป็นจำนวนคี่ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1- จำนวนประชากรทั้งหมด ให้สร้างเลขสุ่มที่มีค่าเป็น 0 กับ 1 ขึ้นมา ถ้าทำการสุ่มได้ 0 จะทำการตัดสตริงคำตอบ

ที่เลือกไว้ทั้ง 1 ตัว และถ้าสุ่มได้ 1 จะทำการเพิ่มสตริงคำตอบจากตัวที่เหลือ
ใน Mating Pool

3.2 ถ้า (N_c) มีค่าเท่ากับ 1 ให้ทำการเพิ่มสตริงคำตอบเข้าไป 1 ตัวเท่านั้น

3.3 ถ้า (N_c) มีค่าเท่ากับจำนวนประชากรทั้งหมด ซึ่งเป็นจำนวนคี่ ให้ทำการตัด
สตริงคำตอบที่เลือกไว้ทั้ง 1 ตัวเท่านั้น

4. เมื่อได้สตริงคำตอบทั้งหมดแล้วให้ทำการจับคู่ตามลำดับ จำนวนคู่จะเท่ากับ $\frac{N_c}{2}$ คู่

ตารางที่ ก.12 สตริงคำตอบที่ทำการครอสโอเวอร์

Strings	Model Sequences	r_i	$r_i < 0.7$
1	2 1 4 5 3 6	0.3565	selected
2	1 2 4 3 5 6	0.0732	selected
3	2 1 3 4 5 6	0.5910	selected
4	4 2 1 3 5 6	0.9102	-
5	2 1 3 4 5 6	0.1938	selected

จากตารางที่ จะได้สตริงคำตอบที่นำไปครอสโอเวอร์ คือ สตริงคำตอบหมายเลข 1 2 3
และ 5 ซึ่งจับคู่ได้เป็น 1-2 และ 3-5

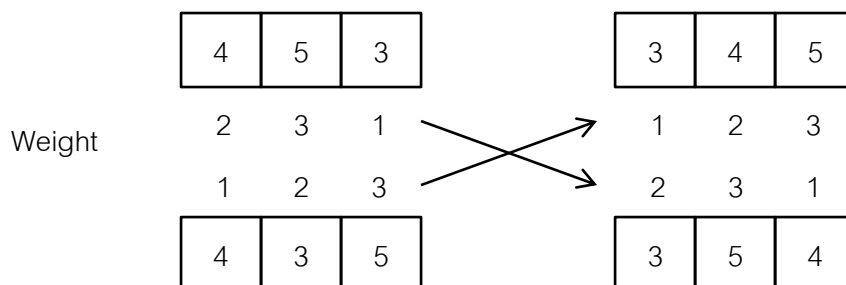
สตริงคำตอบที่ได้จากการจับคู่จะถูกนำมาทำการครอสโอเวอร์ โดยสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่
(Parent) จะถูกนำไปทำการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบซึ่งกันและกัน ได้ออกมาเป็นสตริง
คำตอบรุ่นลูก (Offspring) ในงานวิจัยจะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping
Crossover (WMX) มีขั้นตอนดังนี้

นำสตริงคำตอบคู่แรกมาทำการสุ่มตำแหน่งในการครอสโอเวอร์

Parent 1 = [2 | 1 | 4 5 3 | 6]

Parent 2 = [1 | 2 | 4 3 5 | 6]

แล้วกำหนดค่าน้ำหนักให้ช่วงที่สุ่มของแต่ละสตริง และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดและทำการเปลี่ยนค่าภายในโครโมโซม



จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) คือ

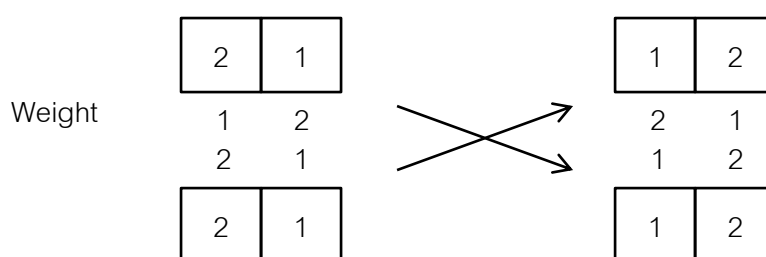
Offspring 1 = [2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6]

Offspring 2 = [1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 6]

Parent 3 = [2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6]

Parent 5 = [2 | 1 | 3 | 4 | 5 | 6]

แล้วกำหนดค่าน้ำหนักให้ช่วงที่สุ่มของแต่ละสตริง และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดและทำการเปลี่ยนค่าภายในโครโมโซม



จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) คือ

Offspring 3 = [1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6]

Offspring 5 = [1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6]

ตารางที่ ก.13 สตริงคำตอบที่ทำการครอสโอเวอร์แล้ว

Strings	Model Sequences
1	2 1 3 4 5 6
2	1 2 3 5 4 6
3	1 2 3 4 5 6
4	4 2 1 3 5 6
5	1 2 3 4 5 6

6. การมิวเตชัน

การมิวเตชันเป็นการนำสตริงคำตอบที่ได้จากการครอสโอเวอร์มาทำการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ในการมิวเตชันสตริงคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

1. จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกนำมาจับคู่ (N_m) จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_m) ซึ่งค่า P_m ในตัวอย่างนี้จะเท่ากับ 0.3 แสดงว่าสตริงคำตอบที่ถูกครอสโอเวอร์จะมีประมาณ 70% ของสตริงคำตอบทั้งหมด ก็คือ $0.3 \times 5 = 1.5$ หรือ 2 สตริงคำตอบ
2. ทำการสุ่มค่า r ที่อยู่ระหว่าง 0-1 ให้กับสตริงคำตอบ ถ้าค่า $r < P_m$ สตริงคำตอบนั้นจะถูกเลือกไปจับคู่ ถ้าไม่มีสตริงคำตอบใดเลยที่ค่า $r < P_m$ ให้สุ่มค่า r ใหม่อีกครั้ง

ตารางที่ ก.14 สตริงคำตอบที่ทำมิวเตชัน

Strings	Model Sequences	r_i	$r_i < 0.3$
1	2 1 3 4 5 6	0.1156	selected
2	1 2 3 5 4 6	0.0514	selected
3	1 2 3 4 5 6	0.3043	-
4	4 2 1 3 5 6	0.5802	-
5	1 2 3 4 5 6	0.5310	-

จากตารางที่ ก.14 จะได้สตริงคำตอบที่นำไปมิวเตชันคือ สตริงคำตอบหมายเลข 2 และ 4

วิธี Reciprocal Exchange Mutation จะทำโดยสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ 2 ตำแหน่งมาทำการสลับตำแหน่งกัน จากตัวอย่างสตริงคำตอบที่ 1 ทำการสลับเลขได้ 2 และ 6 แล้วทำการสลับตำแหน่งของตัวเลข

$$\text{Parent 1} = [2 \quad 1 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad \underline{6}]$$

$$\text{Offspring 1} = [\underline{6} \quad 1 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad \underline{2}]$$

สตริงคำตอบที่ 2 ทำการสลับเลขได้ 3 และ 6 แล้วทำการสลับตำแหน่งของตัวเลข

$$\text{Parent 2} = [1 \quad 2 \quad \underline{3} \quad 5 \quad 4 \quad \underline{6}]$$

$$\text{Offspring 2} = [1 \quad 2 \quad \underline{6} \quad 5 \quad 4 \quad \underline{3}]$$

หลังจากทำการมิวเตชันเสร็จจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้น และทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้

ตารางที่ ก.15 สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน

Strings	Model Sequences
1	6 1 3 4 5 2
2	1 2 6 5 4 3
3	1 2 3 4 5 6
4	4 2 1 3 5 6
5	1 2 3 4 5 6

7. เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้คำตอบที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการปรับปรุงต่างๆ เช่น การครอสโอเวอร์ และการมิวเตชัน สูญหายไป เพราะในกระบวนการปรับปรุงอาจทำให้เกิดคำตอบที่แย่กว่าคำตอบก่อนปรับปรุงได้ จึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูกมารวมกันแล้วหาค่าที่ดีที่สุดจากนั้นทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ตารางที่ ก.16 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	1 2 4 3 5 6
	2	4 2 1 3 5 6
	3	4 1 5 2 3 6
	4	2 1 3 4 5 6
	5	2 1 4 5 3 6
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	6 1 3 4 5 2
	7	1 2 6 5 4 3
	8	1 2 3 4 5 6
	9	4 2 1 3 5 6
	10	1 2 3 4 5 6

เมื่อนำสตริงคำตอบมารวมกัน ทำการตัดสตริงคำตอบที่ซ้ำกันออกแล้วทำการคำนวณหา
ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ ก.17 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	1 2 4 3 5 6
	2	4 2 1 3 5 6
	3	4 1 5 2 3 6
	4	2 1 3 4 5 6
	5	2 1 4 5 3 6
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	6 1 3 4 5 2
	7	1 2 6 5 4 3
	8	1 2 3 4 5 6

ตารางที่ ก.18 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงที่นำมารวมกัน

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	47.4556	16.9536	5.5354
2	28.3889	15.903	5.6526
3	31.7222	15.9456	5.6069
4	70.9222	16.7213	4.7069
5	32.2556	16.2287	5.5928
6	25.5889	16.0063	5.6381
7	38.6556	16.5449	4.6987
8	74.2556	16.7352	ก.8238

จากนั้นทำการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting กำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณค่า Crowding Distance ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด

ตารางที่ ก.19 สตริงคำตอบที่ทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณค่า Crowding Distance

String	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	47.4556	16.9536	5.5354	2	Infinity
2	28.3889	15.903	5.6526	1	0.2161
3	31.7222	15.9456	5.6069	1	0.5035
4	70.9222	16.7213	4.7069	2	Infinity
5	32.2556	16.2287	5.5928	1	1.3592
6	25.5889	16.0063	5.6381	1	Infinity
7	38.6556	16.5449	4.6987	1	2.4389
8	74.2556	16.7352	ก.8238	1	Infinity

ทำการเรียงค่า Fitness จากน้อยไปมาก และเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย

ตารางที่ ก.20 สถริงคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance

String	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
6	25.5889	16.0063	5.6381	1	Infinity
8	74.2556	16.7352	๓.8238	1	Infinity
7	38.6556	16.5449	4.6987	1	2.4389
5	32.2556	16.2287	5.5928	1	1.3592
3	31.7222	15.9456	5.6069	1	0.5035
2	28.3889	15.903	5.6526	1	0.2161
1	47.4556	16.9536	5.5354	2	Infinity
4	70.9222	16.7213	4.7069	2	Infinity

ทำการคัดเลือกสถริงคำตอบที่มีค่า Fitness น้อยที่สุด (Fitness = 1) และมีค่า Crowding Distance มากที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดและคัดเลือกสถริงคำตอบไว้ดำเนินการในรอบถัดไป

ตารางที่ ก.21 สถริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

Strings	Model Sequences
6	6 1 3 4 5 2
8	1 2 3 4 5 6
7	1 2 6 5 4 3
5	2 1 4 5 3 6
3	4 1 5 2 3 6
2	4 2 1 3 5 6

ตารางที่ ก.22 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

Strings	Model Sequences
6	6 1 3 4 5 2
8	1 2 3 4 5 6
7	1 2 6 5 4 3
5	2 1 4 5 3 6
3	4 1 5 2 3 6

8. การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

ในการแก้ปัญหาในรอบที่ 2 มีขั้นตอนเหมือนการแก้ในรอบที่ 1 แต่สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะได้จากสตริงคำตอบที่ได้ในรอบที่ 1 (ตารางที่ ก.22)

8.1 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น

ตารางที่ ก.23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	25.5889	16.0063	5.6381
2	74.2556	16.7352	ก.8238
3	38.6556	16.5449	4.6987
4	32.2556	16.2287	5.5928
5	31.7222	15.9456	5.6069

ตารางที่ ก.24 ค่าความแข็งแรงของสตริง

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness
1	25.5889	16.0063	5.6381	1
2	74.2556	16.7352	๓.8238	1
3	38.6556	16.5449	4.6987	1
4	32.2556	16.2287	5.5928	1
5	31.7222	15.9456	5.6069	1

ตารางที่ ก.25 ค่า Crowding Distance ของสตริงคำตอบที่เรียงลำดับแล้ว

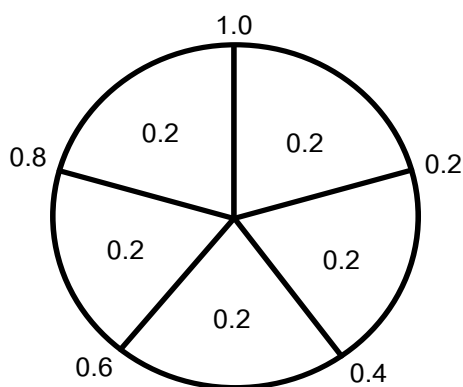
Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance
1	25.5889	16.0063	5.6381	1	Infinity
2	74.2556	16.7352	๓.8238	1	Infinity
3	38.6556	16.5449	4.6987	1	2.4795
4	32.2556	16.2287	5.5928	1	1.4020
5	31.7222	15.9456	5.6069	1	0.4436

8.2 การคัดเลือกคำตอบ

ในการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection จะพิจารณาจากค่า Fitness และค่า Crowding Distance โดยจะพิจารณาจากค่า Fitness น้อยที่สุด และค่า Crowding Distance มากที่สุดก่อน ทำการหาค่า $p_i = 1/5 = 0.2$

ตารางที่ ก.26 การสร้างวงล้อรูเล็ต

Strings	Fitness	แปลง Fitness	p_i	q_i
1	1	1	0.2	0.2
2	1	1	0.2	0.4
3	1	1	0.2	0.6
4	1	1	0.2	0.8
5	1	1	0.2	1
รวม		5		



ภาพที่ ก.5 วงล้อรูเล็ต

วิธี Binary Tournament Selection เป็นการสุ่มสตริงคำตอบจากการหมุนวงล้อรูเล็ต ออกมา 2 สตริง แล้วนำสตริงคำตอบที่สุ่มมาพิจารณาค่า Fitness มาเปรียบเทียบกัน เพื่อทำการ คัดเลือกสตริงคำตอบที่มีความเหมาะสม

ตารางที่ ก.27 การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

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	0.3343	0.4	2	1	0.7350	0.8	4	1	2
2	0.5966	0.6	3	1	0.9541	1	5	1	3
3	0.9020	1	5	1	0.5428	0.6	3	1	3
4	0.7021	0.8	4	1	0.5401	0.6	3	1	3
5	0.3775	0.4	2	1	0.3111	0.4	2	1	2

จากการคัดเลือกสตริงคำตอบสตริงคำตอบที่ได้คือ สตริงคำตอบที่ 5 1 4 2 และ 4 ตามลำดับ สตริงคำตอบที่เลือกจะเข้าสู่ Mating Pool

8.3 การครอสโอเวอร์

การครอสโอเวอร์เป็นการนำสตริงที่ได้จากการคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection ที่อยู่ใน Mating Pool มาทำการจับคู่กันเพื่อแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบซึ่งกันและกัน จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกนำมาจับคู่ (N_c) จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_c) ซึ่งค่า P_c ในตัวอย่างนี้จะเท่ากับ 0.7 แสดงว่าสตริงคำตอบที่ถูกครอสโอเวอร์จะมีประมาณ 70% ของสตริงคำตอบทั้งหมด ก็คือ $0.7 \times 5 = 3.5$ หรือ 4 สตริงคำตอบ

ตารางที่ ก.28 สตริงคำตอบที่ทำครอสโอเวอร์

Strings	Model Sequences	r_i	$r_i < 0.7$
1	1 2 3 4 5 6	0.9150	-
2	1 2 6 5 4 3	0.6427	selected
3	1 2 6 5 4 3	0.0014	selected
4	1 2 6 5 4 3	0.0304	selected
5	1 2 3 4 5 6	0.2085	selected

จากตารางที่ ก.28 จะได้สตริงคำตอบที่นำไปครอสโอเวอร์ คือ สตริงคำตอบหมายเลข 2 3 4 และ 5 ซึ่งจับคู่ได้เป็น 2-3 และ 4-5

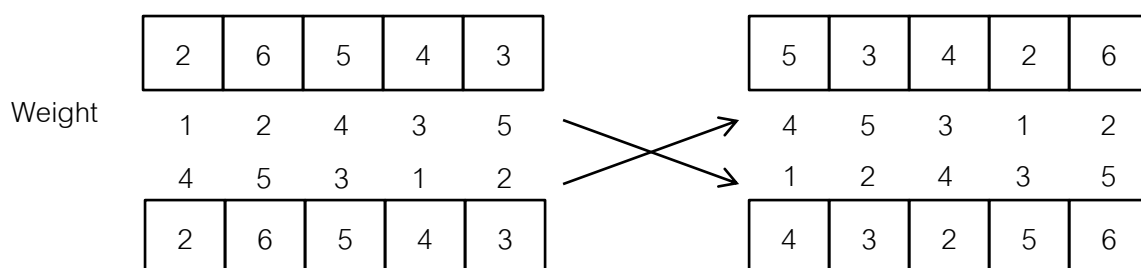
สตริงคำตอบที่ได้จากการจับคู่จะถูกนำมาทำการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX)

นำสตริงคำตอบคู่แรกมาทำการสุ่มตำแหน่งในการครอสโอเวอร์

Parent 2 = [1 | 2 6 5 4 3 |]

Parent 3 = [1 | 2 6 5 4 3 |]

แล้วกำหนดค่าน้ำหนักให้ช่วงที่สุ่มของแต่ละสตริง และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดและทำการเปลี่ยนค่าภายในโครโมโซม



จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) คือ

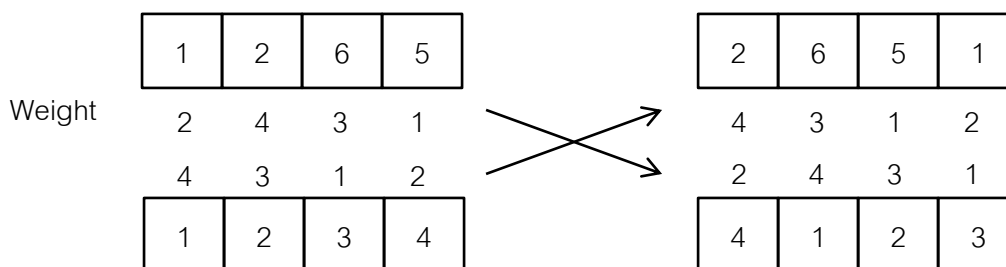
Offspring 2 = [1 | 5 3 4 2 6 |]

Offspring 3 = [1 | 4 3 2 5 6 |]

Parent 4 = [1 | 2 6 5 | 4 3 |]

Parent 5 = [1 | 2 3 4 | 5 6 |]

แล้วกำหนดค่าน้ำหนักให้ช่วงที่สุ่มของแต่ละสตริง และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดและทำการเปลี่ยนค่าภายในโครโมโซม



จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) คือ

$$\text{Offspring 4} = [|2 \quad 6 \quad 5 \quad 1| \quad 4 \quad 3]$$

$$\text{Offspring 5} = [|4 \quad 1 \quad 2 \quad 3| \quad 5 \quad 6]$$

ตารางที่ ก.29 สตริงคำตอบที่ทำการครอสโอเวอร์แล้ว

Strings	Model Sequences
1	1 2 3 4 5 6
2	1 5 3 4 2 6
3	1 4 3 2 5 6
4	2 6 5 1 4 3
5	4 1 2 3 5 6

8.4 การมิวเตชัน

การมิวเตชันเป็นการนำสตริงคำตอบที่ได้จากการครอสโอเวอร์มาทำการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกนำมาจับคู่ (N_m) จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_m) ซึ่งค่า P_m ในตัวอย่างนี้จะเท่ากับ 0.3 แสดงว่าสตริงคำตอบที่ถูกครอสโอเวอร์จะมีประมาณ 70% ของสตริงคำตอบทั้งหมด ก็คือ $0.3 \times 5 = 1.5$ หรือ 2 สตริงคำตอบ

ตารางที่ ก.30 สตริงคำตอบที่ทำมิวเตชัน

Strings	Model Sequences	r_i	$r_i < 0.3$
1	1 2 3 4 5 6	0.4550	-
2	1 5 3 4 2 6	0.1273	selected
3	1 4 3 2 5 6	0.0086	selected
4	2 6 5 1 4 3	0.7271	-
5	4 1 2 3 5 6	0.3541	-

จากตารางที่ ก.30 จะได้สตริงคำตอบที่นำไปมิวเตชันคือ สตริงคำตอบหมายเลข 2 และ 3

วิธี Reciprocal Exchange Mutation จะทำโดยสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ 2 ตำแหน่งมาทำการสลับตำแหน่งกัน จากตัวอย่างสตริงคำตอบที่ 2 ทำการสลับเลขได้ 3 และ 5 แล้วทำการสลับตำแหน่งของตัวเลข

Parent 2 = [1 5 3 4 2 6]

Offspring 2 = [1 3 5 4 2 6]

สตริงคำตอบที่ 3 ทำการสลับเลขได้ 3 และ 5 แล้วทำการสลับตำแหน่งของตัวเลข

Parent 3 = [1 4 3 2 5 6]

Offspring 3 = [1 4 5 2 3 6]

หลังจากทำการมิวเตชันเสร็จจะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมด 5 สตริงคำตอบ เพื่อนำไปรวมกับสตริงคำตอบเริ่มต้น และทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้

ตารางที่ ก.31 สตริงคำตอบหลังทำการมิวเตชัน

Strings	Model Sequences
1	1 2 3 4 5 6
2	1 3 5 4 2 6
3	1 4 5 2 3 6
4	2 6 5 1 4 3
5	4 1 2 3 5 6

8.5 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดทำการเก็บค่าสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูกมารวมกันแล้วหาค่าที่ดีที่สุดจากนั้นทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เท่ากับจำนวนของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ตารางที่ ก.32 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	6 1 3 4 5 2
	2	1 2 3 4 5 6
	3	1 2 6 5 4 3
	4	2 1 4 5 3 6
	5	4 1 5 2 3 6
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	1 2 3 4 5 6
	7	1 3 5 4 2 6
	8	1 4 5 2 3 6
	9	2 6 5 1 4 3
	10	4 1 2 3 5 6

เมื่อนำสตริงคำตอบมารวมกัน ทำการตัดสตริงคำตอบที่ซ้ำกันออกแล้วทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ ก.33 สตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูก

กลุ่มสตริงคำตอบ	String No.	Model Sequences
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	6 1 3 4 5 2
	2	1 2 3 4 5 6
	3	1 2 6 5 4 3
	4	2 1 4 5 3 6
	5	4 1 5 2 3 6
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	1 3 5 4 2 6
	7	1 4 5 2 3 6
	8	2 6 5 1 4 3
	9	4 1 2 3 5 6

ตารางที่ ก.34 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงที่นำมารวมกัน

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	25.5889	16.0063	5.6381
2	74.2556	16.7352	ก.8238
3	38.6556	16.5449	4.6987
4	32.2556	16.2287	5.5928
5	31.7222	15.9456	5.6069
6	35.5889	16.5714	5.5354
7	39.0556	16.2843	4.7298
8	22.6556	14.7049	5.6327
9	34.3889	15.8214	4.8248

จากนั้นทำการจัดอันดับแบบ Non-Dominated Sorting กำหนดค่าความแข็งแรงและค่านวนค่า Crowding Distance ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด

ตารางที่ ก.35 สถิติคำตอบที่ทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและคำนวณค่า Crowding Distance

String s	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness s	Crowding Distance
1	25.5889	16.0063	5.6381	2	Infinity
2	74.2556	16.7352	๓.8238	1	Infinity
3	38.6556	16.5449	4.6987	1	0.3710
4	32.2556	16.2287	5.5928	1	0.5452
5	31.7222	15.9456	5.6069	1	0.9586
6	35.5889	16.5714	5.5354	2	Infinity
7	39.0556	16.2843	4.7298	1	1.2673
8	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
9	34.3889	15.8214	4.8248	1	0.7740

ทำการเรียงค่า Fitness จากน้อยไปมาก และเรียงค่า Crowding Distance จากมากไปน้อย

ตารางที่ ก.36 สถิติคำตอบที่เรียงค่า Fitness และค่า Crowding Distance

String s	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness s	Crowding Distance
2	74.2556	16.7352	๓.8238	1	Infinity
8	22.6556	14.7049	5.6327	1	Infinity
7	39.0556	16.2843	4.7298	1	1.2673
5	31.7222	15.9456	5.6069	1	0.9586
9	34.3889	15.8214	4.8248	1	0.7740
4	32.2556	16.2287	5.5928	1	0.5452
3	38.6556	16.5449	4.6987	1	0.3710
1	25.5889	16.0063	5.6381	2	Infinity
6	35.5889	16.5714	5.5354	2	Infinity

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness น้อยที่สุด (Fitness = 1) และมีค่า Crowding Distance มากที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดและคัดเลือกสตริงคำตอบไว้ดำเนินการในรอบถัดไป

ตารางที่ ก.37 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน

Strings	Model Sequences
2	1 2 3 4 5 6
8	2 6 5 1 4 3
7	1 4 5 2 3 6
5	4 1 5 2 3 6
9	4 1 2 3 5 6
4	2 1 4 5 3 6
3	1 2 6 5 4 3

ตารางที่ ก.38 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป

Strings	Model Sequences
2	1 2 3 4 5 6
8	2 6 5 1 4 3
7	1 4 5 2 3 6
5	4 1 5 2 3 6
9	4 1 2 3 5 6

9. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเจนเนติกอัลกอริทึม

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเจนเนติกอัลกอริทึมและการวิเคราะห์ผลการทดลองจะอยู่ในภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

1. ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้าต่างๆ เช่น จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิตจะเหมือนกับภาคผนวก ก

1.1 พารามิเตอร์ของ DPSO

จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarms: P) $P = 3$

จำนวนฝูง (Number of Swarms: S) $S = 2$

น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight: w) $w = 1$ (กรรณ, 2554)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor: c_1, c_2) $c_1, c_2 = 0.1$ (กรรณ, 2554)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ เท่ากับ 80% (Learning Rate = 0.8) (Wu et al., 2007a)

2. การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบเบื้องต้นเป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบโดยใช้วิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างได้กำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้นจะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 ทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต

Model Sequence	A	B	B	C	C	C
String	1	2	3	4	5	6

แล้วทำการสุ่มสตริงคำตอบออกมาตามที่ได้กำหนดคือ จำนวนฝูงเท่ากับ 2 และอนุภาคของฝูงเท่ากับ 3 ดังนี้

Strings(s, p)	Model Sequences
1,1	3 6 5 4 1 2
1,2	4 6 1 2 5 3
1,3	3 5 4 2 6 1
2,1	2 5 1 6 3 4
2,2	2 6 5 1 4 3
2,3	1 2 6 4 5 3

3. การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น ตามลำดับ ดังนี้

3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)
- ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

สมการในการคำนวณ ตัวแปรต่างๆ ในสมการ และตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากบทที่ 2 ตารางที่ ข.1 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1,1	35.3222	14.1449	4.7536
1,2	40.1222	14.9716	5.6381
1,3	32.9222	14.1330	5.5281
2,1	19.5889	15.5351	6.4249
2,2	22.6556	14.7049	5.6327
2,3	38.6556	16.5449	4.6987

4. การกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าความหนาแน่น และการคัดเลือกสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบจากสตริงที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่า Fitness = 1) ไปจนถึงสตริงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่า Fitness มากที่สุด)

วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น Crowding Distance จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน (ค่า Fitness เท่ากัน) เริ่มจากสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่า Fitness = 1) จนถึงความแข็งแรงน้อยที่สุดตามลำดับ ถ้าสตริงไหนมีค่าความแข็งแรงค่าเดียวจะกำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity)

เมื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบแล้ว จะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฟลูง (Local Best Solution: Lbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 ถ้าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีหลายสตริงคำตอบจะทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นที่มีค่ามากที่สุดเป็นลำดับถัดไป แต่ถ้ามีหลายสตริงคำตอบที่มีค่าทั้งสองอย่างเท่ากันให้ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากันมาฟลูงละหนึ่งสตริงคำตอบ ดังนี้

ตารางที่ ข.2 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของฟลูงที่ 1

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	35.3222	14.1449	4.7536	1	Infinity	Lbest
1,2	40.1222	14.9716	5.6381	2	Infinity	-
1,3	32.9222	14.1330	5.5281	1	Infinity	-

ตารางที่ ข.3 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของฟลูงที่ 2

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
2,1	19.5889	15.5351	6.4249	1	Infinity	Lbest
2,2	22.6556	14.7049	5.6327	1	2.5488	-
2,3	38.6556	16.5449	4.6987	1	Infinity	-

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฟลูงออกมาแล้วให้นำสตริงคำตอบที่ดีมารวมกันแล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบใหม่ จากนั้นทำการ

พิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution: Gbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 ถ้าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีหลายสตริงคำตอบจะทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นที่มีค่ามากที่สุดเป็นลำดับถัดไป แต่ถ้ามีหลายสตริงคำตอบที่มีค่าทั้งสองอย่างเท่ากันให้ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากัน มาผู้ลงหนึ่งสตริงคำตอบ ดังนี้

ตารางที่ ข.4 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของผู้ที่ 1 และ 2

Strings	Model Sequences
1,1	3 6 5 4 1 2
2,1	2 5 1 6 3 4

ตารางที่ ข.5 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	35.3222	14.1449	4.7536	1	Infinity	-
2,1	19.5889	15.5351	6.4249	1	Infinity	Gbest

ตารางที่ ข.6 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร

Strings	Model Sequences
2,1	2 5 1 6 3 4

5. การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแล้วจึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

ตารางที่ ข.7 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 1

Strings	Model Sequences
1,1	3 6 5 4 1 2
2,1	2 5 1 6 3 4

6. การปรับปรุงค่าในตาราง

การปรับปรุงค่าในตารางของรอบการทำงานที่ 1 จะทำการสร้างตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Position Matrix) และตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Velocity Matrix) โดยตารางทั้งสองมีขนาดเท่ากับ $n \times n$ เมื่อ n เท่ากับจำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมดของการจัดลำดับการผลิต ซึ่ง $n = 6$ ค่าในตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นจะได้รับการแปลงค่าสตริงที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) เป็นตาราง From-To เช่น สตริงคำตอบที่เป็น Lbest ของฝูงที่ 1 คือ 1 2 6 5 4 3 จะเริ่มจากลำดับที่ 1 คือ รหัสผลิตภัณฑ์ที่ 1 จึงกำหนดให้เท่ากับ 1 จากนั้นลำดับที่ 2 คือ รหัสผลิตภัณฑ์ที่ 2 จึงกำหนดให้เท่ากับ 1 ลำดับที่ 3 คือ รหัสผลิตภัณฑ์ที่ 6 จึงกำหนดให้เท่ากับ 1 ลำดับที่ 4 คือ รหัสผลิตภัณฑ์ที่ 5 จึงกำหนดให้เท่ากับ 1 ลำดับที่ 5 คือ รหัสผลิตภัณฑ์ที่ 4 จึงกำหนดให้เท่ากับ 1 และลำดับสุดท้ายลำดับที่ 6 คือ รหัสผลิตภัณฑ์ที่ 3 จึงกำหนดให้เท่ากับ 1 ส่วนช่องอื่นๆ จะกำหนดเป็นเลข 0 ดังแสดงในตารางที่ ๗.9 ส่วนตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 ทั้งหมด (ZeroMatrix)

ตารางที่ ๗.8 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของฝูงที่ 1 และ 2 (Lbest)

Strings	Model Sequences
1,1	3 6 5 4 1 2
2,1	2 5 1 6 3 4

ตารางที่ ๗.9 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นของฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0	0	1
3	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0

ตารางที่ ข.10 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นของฝูงที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1
5	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0

หลังจากนั้นทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคและตารางตำแหน่งของอนุภาคเพื่อนำไปใช้ในรอบถัดไปจากสมการดังนี้ (กรรณ,2011)

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1r_1(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}) + c_2r_2(G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}) \quad (ข.1)$$

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \quad (ข.2)$$

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

โดยที่ i คือ รอบการทำงาน

j คือ ฝูงอนุภาคที่ j

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

c_1 และ c_2 คือ ตัวประกอบการเร่ง (Learning Factor)

r_1 และ r_2 คือ ตัวเลขสุ่มในช่วง $[0,1]$

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

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

หลังจากปรับปรุงตารางเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำค่า Sigmoid Function $S(V_{(i,j)})$ เพื่อใช้เป็นค่าความน่าจะเป็นสำหรับการสร้างสตริงคำตอบในรอบการทำงานถัดไป

6.1 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค

ในการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคจะกำหนดให้ค่า c_1 และ c_2 เท่ากับ 0.1 ค่า w เท่ากับ 1 ส่วนค่า r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 1 จะทำการสุ่มออกมาซึ่งได้เท่ากับ 0.6065 และ 0.3048 ตามลำดับ ค่า r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 2 จะทำการสุ่มออกมาซึ่งได้เท่ากับ 0.4769 และ 0.2924 ตามลำดับแทนค่าทั้งหมดลงในสมการ $V_{(i,j)}$ แล้วนำไปปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละฝูงดังตารางที่ ข.11 และ ข.12

$$V_{(i,1)} = 1 \times V_{(i-1,1)} + 0.1 \times 0.4035(P_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}) + 0.1 \times 0.4795(G_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}) \quad (\text{ข.4})$$

$$V_{(i,2)} = 1 \times V_{(i-1,2)} + 0.1 \times 0.9350(P_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}) + 0.1 \times 0.2318(G_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}) \quad (\text{ข.5})$$

ตารางที่ ข.11 ตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0.0479	0	-0.0479	0
2	0.0479	0	0	0	0	-0.0479
3	-0.0479	0	0	0	0.0479	0
4	0	0	0	-0.0479	0	0.0479
5	0	0.0479	-0.0479	0	0	0
6	0	-0.0479	0	0.0479	0	0

ตารางที่ ข.12 ตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

6.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

ในการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค(Position Matrix) แต่ละฝูง ในสมการ $X_{(i,j)}$ จะได้ ตารางตำแหน่งของอนุภาคในแต่ละฝูงดังตารางที่ ข.13 และ ข.14

ตารางที่ ข.13 ตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) ของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0.0479	0	0.9521	0
2	0.0479	0	0	0	0	0.9521
3	0.9521	0	0	0	0.0479	0
4	0	0	0	0.9521	0	0.0479
5	0	0.0479	0.9521	0	0	0
6	0	0.9521	0	0.0479	0	0

ตารางที่ ข.14 ตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) ของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1
5	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0

7. การสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไป

ในการสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไปจะสร้างจากค่าความน่าจะเป็นของ Sigmoid Function ซึ่งเป็นการแปลงค่าจากตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละฝูงในสมการ $S(V_{(i,j)})$ ดังแสดงในตารางที่ ข.15 และ ข.16

ตารางที่ ข.15 ตารางSigmoid ของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0.5000	0.5000	0.5120	0.5000	0.4880	0.5000
2	0.5120	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.4880
3	0.4880	0.5000	0.5000	0.5000	0.5120	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5000	0.4880	0.5000	0.5120
5	0.5000	0.5120	0.4880	0.5000	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.4880	0.5000	0.5120	0.5000	0.5000

ตารางที่ ข.16 ตารางSigmoid ของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
2	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
5	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
6	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000

8. การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

ในการแก้ปัญหาในรอบที่ 2 มีขั้นตอนเหมือนการแก้ในรอบที่ 1 แต่สตรึงคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะได้จากการสุ่มโดยใช้ค่าความน่าจะเป็นจากตาราง Sigmoid ของแต่ละฝูงในรอบการทำงานก่อนหน้าโดยจะทำการรวมค่าของ Sigmoid ของแต่ละแถวแล้วทำให้เป็นค่าความน่าจะเป็น (วงเล็บรูปสี่เหลี่ยม) ที่รวมกันได้เท่ากับ 1 แล้วทำการสุ่มค่าของแต่ละแถวออกมาเป็นค่ารหัสสตรึง

ตารางที่ ข.17 สตริงคำตอบเริ่มต้นของฝูงที่ 1 และ 2 ในรอบถัดไป

Strings(s, p)	Model Sequences
1,1	4 6 1 2 3 5
1,2	1 5 3 2 4 6
1,3	3 2 6 4 5 1
2,1	2 1 3 6 4 5
2,2	3 5 1 4 2 6
2,3	6 3 2 4 5 1

8.1 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น

ตารางที่ ข.18 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1	37.0556	15.0429	4.8248
2	41.7222	16.4929	4.7298
3	66.2556	14.4501	3.8175
4	70.9222	16.7213	4.7069
5	19.5889	15.5351	6.4249
6	39.0556	14.4618	4.7255

ตารางที่ ข.19 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	37.0556	15.0429	4.8248	1	Infinity	-
1,2	41.7222	16.4929	4.7298	1	2.2902	-
1,3	66.2556	14.4501	3.8175	1	Infinity	Lbest

ตารางที่ ข.20 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีของฝูงที่ 2

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
2,1	70.9222	16.7213	4.7069	1	Infinity	-
2,2	19.5889	15.5351	6.4249	1	Infinity	Lbest
2,3	39.0556	14.4618	4.7255	1	2.5250	-

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีของแต่ละฝูงออกมาแล้วให้นำสตริงคำตอบที่ดีมารวมกันแล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบใหม่ จากนั้นทำการพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution: Gbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 ถ้าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีหลายสตริงคำตอบจะทำการพิจารณาค่าความหนาแน่นที่มีค่ามากที่สุดเป็นลำดับถัดไป แต่ถ้ามีหลายสตริงคำตอบที่มีค่าทั้งสองอย่างเท่ากันให้ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบด้วยค่าความน่าจะเป็นที่เท่ากันมาฝูงละหนึ่งสตริงคำตอบ ดังนี้

ตารางที่ ข.21 สตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 และ 2

Strings	Model Sequences
1,3	3 2 6 4 5 1
2,2	3 5 1 4 2 6

ตารางที่ ข.22 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีของประชากร

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,3	66.2556	14.4501	3.8175	1	Infinity	Gbest
2,2	19.5889	15.5351	6.4249	1	Infinity	-

ตารางที่ ข.23 สตริงคำตอบที่ดีของประชากร

Strings	Model Sequences
2,2	3 2 6 4 5 1

8.2 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีแล้วจึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 รวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานก่อนหน้าแล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่น จากนั้นเก็บสตริงคำตอบที่เท่ากับ 1 ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

ตารางที่ ข.24 การรวมสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

Strings	Model Sequences
1,1 (รอบที่ 1)	3 6 5 4 1 2
2,1 (รอบที่ 1)	2 5 1 6 3 4
1,3 (รอบที่ 2)	3 2 6 4 5 1
2,2 (รอบที่ 2)	3 5 1 4 2 6

ตารางที่ ข.25 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,2 (รอบที่ 1)	35.3222	14.1449	4.7536	1	2.7805	Selected
2,1 (รอบที่ 1)	19.5889	15.5351	6.4249	1	Infinity	Selected
1,3 (รอบที่ 2)	66.2556	14.4501	3.8175	1	Infinity	Selected
2,2 (รอบที่ 2)	19.5889	15.5351	6.4249	1	Infinity	Selected

8.3 การปรับปรุงค่าในตาราง

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค และตารางตำแหน่งของอนุภาคโดยการใช้สตริงคำตอบ Lbest และ Gbest

8.3.1 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค

ในการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคจะกำหนดให้ค่า c_1 และ c_2 เท่ากับ 0.1 ค่า w เท่ากับ 1 ส่วนค่า r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 1 จะทำการสุ่มออกมาซึ่งได้เท่ากับ 0.8146 และ 0.6233ตามลำดับ ค่า r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 2 จะทำการสุ่มออกมาซึ่งได้เท่ากับ 0.4344 และ 0.3503ตามลำดับแทนค่าทั้งหมดลงในสมการ $V_{(i,j)}$ แล้วนำไปปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละฝูงดังตารางที่ ข.26 และ ข.27

$$V_{(i,1)} = 1 \times V_{(i-1,1)} + 0.1 \times 0.7156(P_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}) + 0.1 \times 0.4333(G_{(i,1)} - X_{(i-1,1)}) \quad (ข.6)$$

$$V_{(i,2)} = 1 \times V_{(i-1,2)} + 0.1 \times 0.5777(P_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}) + 0.1 \times 0.8842(G_{(i,2)} - X_{(i-1,2)}) \quad (ข.7)$$

ตารางที่ ข.26 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0.0424	0	-0.1573	0.1149
2	0.0424	0.1149	0	0	0	-0.1573
3	-0.0424	0	0	0	0.0424	0
4	0	0	0	-0.0424	0	0.0424
5	0	0.0424	-0.1573	0	0.1149	0
6	0	-0.1573	0.1149	0.0424	0	0

ตารางที่ ข.27 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	-0.0884	0	0	0.0884
2	-0.1462	0.0884	0	0	0.0578	0
3	0.1462	0	0	0	-0.1462	0
4	0	0	0	0.1462	0	-0.1462
5	0	-0.0884	0	0	0.0884	0
6	0	0	0.0884	-0.1462	0	0.0578

8.3.2 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค

ในการปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) แต่ละฝูง ในสมการ $X_{(i,j)}$ จะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคในแต่ละฝูงดังตารางที่ ข.28 และ ข.29

ตารางที่ ข.28 ตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) ของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0.0904	0	0.7947	0.1149
2	0.0904	0.1149	0	0	0	0.7947
3	0.9096	0	0	0	0.0904	0
4	0	0	0	0.9096	0	0.0904
5	0	0.0904	0.7947	0	0.1149	0
6	0	0.7947	0.1149	0.0904	0	0

ตารางที่ ข.29 ตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) ของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0.9116	0	0	0.0884
2	0.8538	0.0884	0	0	0.0578	0
3	0.1462	0	0	0	0.8538	0
4	0	0	0	0.1462	0	0.8538
5	0	0.9116	0	0	0.0884	0
6	0	0	0.0884	0.8538	0	0.0578

8.4 การสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไป

ในการสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไปจะสร้างจากค่าความน่าจะเป็นของ Sigmoid Function ซึ่งเป็นการแปลงค่าจากตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละฝูงในสมการ $S(V_{(i,j)})$ ดังแสดงในตารางที่ ข.30 และ ข.31

ตารางที่ ข.30 ตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0.5000	0.5000	0.5106	0.5000	0.4607	0.5287
2	0.5106	0.5287	0.5000	0.5000	0.5000	0.4607
3	0.4894	0.5000	0.5000	0.5000	0.5106	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5000	0.4894	0.5000	0.5106
5	0.5000	0.5106	0.4607	0.5000	0.5287	0.5000
6	0.5000	0.4607	0.5287	0.5106	0.5000	0.5000

ตารางที่ ข.31 ตาราง Sigmoid ของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0.5000	0.5000	0.4779	0.5000	0.5000	0.5221
2	0.4635	0.5221	0.5000	0.5000	0.5144	0.5000
3	0.5365	0.5000	0.5000	0.5000	0.4635	0.5000
4	0.5000	0.5000	0.5000	0.5365	0.5000	0.4635
5	0.5000	0.4779	0.5000	0.5000	0.5221	0.5000
6	0.5000	0.5000	0.5221	0.4635	0.5000	0.5144

9. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธีหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธีหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคและการวิเคราะห์ผลการทดลองจะอยู่ในภาคผนวก ข

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ PSONK ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้

1. ข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลนำเข้าต่างๆ เช่น จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน แผนผังของสายการประกอบที่ได้จัดสมดุลแล้ว และค่าการเรียนรู้ในการผลิตจะเหมือนกับภาคผนวก ก

1.1 พารามิเตอร์ของ PSONK

จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarms: P) $P = 3$

จำนวนฝูง (Number of Swarms: S) $S = 2$

น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight: w) $w = 1$ (กรรณ, 2011)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor: c_1, c_2) $c_1, c_2 = 0.1$ (กรรณ, 2011)

ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ เท่ากับ 80% (Learning Rate = 0.8) (Wu et al., 2007a)

2. การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

สตริงคำตอบเบื้องต้นเป็นการจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบโดยใช้วิธีการสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ปัญหาตัวอย่างได้กำหนดสัดส่วนของความต้องการผลิตภัณฑ์ (Minimum Part Set: MPS) = 1:2:3 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตนี้จะมีผลิตภัณฑ์ A จำนวน 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 ชิ้นและผลิตภัณฑ์ C จำนวน 3 ชิ้นจะมีความยาวของลำดับการผลิตเท่ากับ 6 ทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต

Model Sequence	A	B	B	C	C	C
String	1	2	3	4	5	6

ในการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะต้องสร้างตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ที่มีขนาด $1 \times n$ ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ที่มีขนาด $n \times n$ ซึ่ง n เท่ากับจำนวนความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่ง $n = 6$ ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกจะมีค่า

เริ่มต้นเท่ากับ $\frac{1}{n} = \frac{1}{6} = 0.1667$ ตารางความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{n-1} = \frac{1}{6-1} = 0.2$ ยกเว้นค่าความน่าจะเป็นในแนวทแยงมุมจะเท่ากับ 0 ทั้งหมด และตารางทิศทาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับ 0 ทั้งหมด (Zero Matrix) ดังนี้

ตารางที่ ค.1 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix)

1	2	3	4	5	6
0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667

ตารางที่ ค.2 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

From/To	1	2	3	4	5	6
1	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2
3	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0.2
4	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2
5	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.2
6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0

ตารางที่ ค.3 ตารางทิศทาง การเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

แล้วทำการสุ่มสตริงคำตอบออกมาโดยสตริงคำตอบจะเริ่มจากการสุ่มงานแรกจากตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก จากนั้นลำดับถัดมาจะใช้ตารางความน่าจะเป็นร่วมสุ่มงานจนถึงลำดับงานสุดท้ายตามที่ได้กำหนดคือ จำนวนฝูงเท่ากับ 2 และอนุภาคของฝูงเท่ากับ 3 ดังนี้

ตารางที่ ค.4 สตริงคำตอบเบื้องต้นของฝูงที่ 1 และ 2

Strings (s, p)	Model Sequences
1,1	6 2 4 5 3 1
1,2	4 5 2 6 1 3
1,3	1 3 4 6 5 2
2,1	4 6 2 1 3 5
2,2	6 2 3 5 4 1
2,3	3 5 2 4 6 1

3. การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่น ตามลำดับ ดังนี้

3.1 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)
- ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

สมการในการคำนวณ ตัวแปรต่างๆในสมการ และตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากบทที่ 2

ตารางที่ ค.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1,1	35.5889	14.3296	5.5381
1,2	44.1222	14.4168	5.6001
1,3	38.6556	16.5449	4.6987
2,1	28.3889	14.8695	5.6526
2,2	39.0556	14.4618	4.7255
2,3	42.1222	14.5294	5.5281

4. การกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าความหนาแน่น และการคัดเลือกสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบจากสตริงที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่า Fitness = 1) ไปจนถึงสตริงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่า Fitness มากที่สุด)

วิธีการกำหนดค่าความหนาแน่น Crowding Distance จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน (ค่า Fitness เท่ากัน) เริ่มจากสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่า Fitness = 1) จนถึงความแข็งแรงน้อยที่สุดตามลำดับ ถ้าสตริงไหนมีค่าความแข็งแรงค่าเดียวจะกำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity)

เมื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบแล้ว จะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 และสตริงคำตอบที่แย่ของแต่ละฝูง (Local Worst Solution: Lworst) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ดังนี้

ตารางที่ ค.6 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	35.5889	14.3296	5.5381	1	Infinity	Lbest
1,2	44.1222	14.4168	5.6001	2	Infinity	Lworst
1,3	38.6556	16.5449	4.6987	1	Infinity	Lbest

ตารางที่ ค.7 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 2 4 5 3 1	Lbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Lbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Lworst

ตารางที่ ค.8 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
2,1	28.3889	14.8695	5.6526	1	Infinity	Lbest
2,2	39.0556	14.4618	4.7255	1	Infinity	Lbest
2,3	42.1222	14.5294	5.5281	2	Infinity	Lworst

ตารางที่ ค.9 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 2

Strings	Model Sequences	Selection
2,1	4 6 2 1 3 5	Lbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Lbest
2,3	3 5 2 4 6 1	Lworst

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของแต่ละฝูงออกมาแล้ว ให้นำสตริงคำตอบของแต่ละฝูงมารวมกันแล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบใหม่ จากนั้นทำการพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution: Gbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Global Worst Solution: Gworst) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ถ้าสตริงคำตอบความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากดังนี้

ตารางที่ ค.10 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีของประชากร

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	35.5889	14.3296	5.5381	1	2.7188	Gbest
1,3	38.6556	16.5449	4.6987	1	1.2365	Gbest
2,1	28.3889	14.8695	5.6526	1	Infinity	Gbest
2,2	39.0556	14.4618	4.7255	1	Infinity	Gbest

ตารางที่ ค.11 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่แย่ของประชากร

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,2	44.1222	14.4168	5.6001	1	Infinity	Gworst
2,3	42.1222	14.5294	5.5281	1	Infinity	Gworst

ตารางที่ ค.12 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 2 4 5 3 1	Gbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Gbest
2,1	4 6 2 1 3 5	Gbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Gbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Gworst
2,3	3 5 2 4 6 1	Gworst

5. การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีแล้วจึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

ตารางที่ ค.13 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 1

Strings	Model Sequences
1,1	6 2 4 5 3 1
1,3	1 3 4 6 5 2
2,1	4 6 2 1 3 5
2,2	6 2 3 5 4 1

6. การปรับปรุงค่าในตาราง

การปรับปรุงค่าในตารางจะทำการปรับตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางทิศทางการเคลื่อนของอนุภาค (Velocity Matrix) เพื่อนำไปใช้ในรอบถัดไป โดยจะทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับสตริงคำตอบที่ดี และลดค่าความน่าจะเป็นให้กับสตริงคำตอบที่แย่ จะทำให้ในรอบถัดไปโอกาสที่จะเลือกสตริงคำตอบที่ดีมีค่ามากขึ้นการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (V) และตารางความน่าจะเป็นร่วม (X) จะทำตามสมการดังนี้ (กรรณ, 2554)

$$V_{(i,s)} = wV_{(i-1,s)} + c_1r_1D_1 + c_2r_2D_2 \quad (\text{ค.1})$$

$$X_{(i+1,s)} = X_{(i,s)} + V_{(i,s)} \quad (\text{ค.2})$$

โดยที่ i คือ รอบการทำงาน

s คือ หมายเลขของฝูงสตริงคำตอบ

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

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

D_1 และ D_2 คือ ผลจากการปรับปรุงตารางที่ได้จาก Local และ Global

6.1 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก

ในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก โดยกำหนดให้ $r = 1$ และ $c = 0.1$ ซึ่ง r คือ ตัวเลขสุ่ม และ c คือ สัมประสิทธิ์การเรียนรู้ จะทำการปรับปรุงสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 1}{(6-1)} = 0.02$ และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(6-1)^2} = 0.004$ จากนั้นทำการปรับปรุงสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst)

ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1 \times 1}{(6-1)} = 0.02$ และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(6-1)^2} = 0.004$ ดังนี้

6.1.1 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

จากสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้
ตารางที่ ค.14 สตริงคำตอบที่ปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 2 4 5 3 1	Lbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Lbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Lworst
1,1	6 2 4 5 3 1	Gbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Gbest
2,1	4 6 2 1 3 5	Gbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Gbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Gworst
2,3	3 5 2 4 6 1	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.15 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest

1	2	3	4	5	6
0.1827	0.1587	0.1587	0.1587	0.1587	0.1827

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 4 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 4 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.16 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest และ Lworst

1	2	3	4	5	6
0.1867	0.1627	0.1627	0.1387	0.1627	0.1867

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 4 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 4 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.17 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest Lworst และ Gbest

1	2	3	4	5	6
0.1947	0.1467	0.1467	0.1467	0.1467	0.2187

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 4 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็น

เป็นให้กับตำแหน่งที่ 4 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 3 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.18 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest Lworst Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6
0.2027	0.1547	0.1307	0.1307	0.1547	0.2267

6.1.2 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

จากสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.19 สตริงคำตอบที่ปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

Strings	Model Sequences	Selection
2,1	4 6 2 1 3 5	Lbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Lbest
2,3	3 5 2 4 6 1	Lworst
1,1	6 2 4 5 3 1	Gbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Gbest
2,1	4 6 2 1 3 5	Gbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Gbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Gworst
2,3	3 5 2 4 6 1	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 4 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 4 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ

0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.20 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest

1	2	3	4	5	6
0.1587	0.1587	0.1587	0.1827	0.1587	0.1827

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 3 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.21 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest และ Lworst

1	2	3	4	5	6
0.1627	0.1627	0.1387	0.1867	0.1627	0.1867

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 4 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 4 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.22 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest Lworst และ Gbest

1	2	3	4	5	6
0.1707	0.1467	0.1227	0.1947	0.1467	0.2187

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 4 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 4 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 3 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.23 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest LworstGbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6
0.1787	0.1547	0.1067	0.1787	0.1547	0.2267

6.2 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ในการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยกำหนดให้ $r = 1$ และ $c = 0.1$ ซึ่ง r คือ ตัวเลขสุ่ม และ c คือ สัมประสิทธิ์การเรียนรู้ จะทำการปรับปรุงสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Lbest) และสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 1}{(6-2)} = 0.025$ และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(6-2)^2} = 0.0063$ จากนั้นทำการปรับปรุงสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst)

ด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)} = \frac{0.1 \times 1}{(6-2)} = 0.025$ และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่นๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-2)^2} = \frac{0.1 \times 1}{(6-2)^2} = 0.0063$ ดังนี้

6.2.1 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

จากสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.24 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 2 4 5 3 1	Lbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Lbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Lworst
1,1	6 2 4 5 3 1	Gbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Gbest
2,1	4 6 2 1 3 5	Gbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Gbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Gworst
2,3	3 5 2 4 6 1	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,4), (4,5), (5,3) และ (3,1)เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,4), (4,6), (6,5) และ (5,2)เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.25 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0063	0.025	-0.0063	-0.0063	-0.0063
2	-0.0063	0	-0.0063	0.025	-0.0063	-0.0063
3	0.0187	-0.0125	0	0.0187	-0.0125	-0.0125
4	-0.0125	-0.0125	-0.0125	0	0.0187	0.0187
5	-0.0125	0.0187	0.0187	-0.0125	0	-0.0125
6	-0.0125	0.0187	-0.0125	-0.0125	0.0187	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (4,5), (5,2), (2,6), (6,1) และ (1,3) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.26 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest และ Lworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0.0313	0	-0.0313
3	0.0188	-0.0125	0	0.0188	-0.0125	-0.0125
4	-0.0063	-0.0063	-0.0063	0	-0.0063	0.025
5	-0.0063	-0.0063	0.025	-0.0063	0	-0.0063
6	-0.0375	0.025	-0.0063	-0.0063	0.025	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,4), (4,5), (5,3) และ (3,1) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,4), (4,6), (6,5) และ (5,2) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (4,6), (6,2), (2,1), (1,3) และ (3,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,3), (3,5), (5,4) และ (4,1) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.27 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest Lworst และ Gbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0125	0.05	-0.0125	-0.0125	-0.0125
2	0.0125	0	0.0125	0.0437	-0.0188	-0.05
3	0.025	-0.0375	0	0.025	0.025	-0.0375
4	0	-0.0313	-0.0313	0	0	0.0625
5	-0.025	0.0063	0.0375	0.0063	0	-0.025
6	-0.0625	0.0938	-0.0313	-0.0313	0.0313	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (4,5), (5,2), (2,6), (6,1) และ (1,3) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,5), (5,2), (2,4), (4,6) และ (6,1) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.28 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest Lworst Gbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0063	0.025	-0.0063	-0.0063	-0.0063
2	0.025	0	0.025	0.025	-0.0063	-0.0688
3	0.0313	-0.0313	0	0.0313	0	-0.0313
4	0.0125	-0.0187	-0.0187	0	-0.0187	0.0437
5	-0.0125	-0.0437	0.05	0.0188	0	-0.0125
6	-0.1125	0.1063	-0.0187	-0.0187	0.0437	0

6.2.2 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

จากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.29 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

Strings	Model Sequences	Selection
2,1	4 6 2 1 3 5	Lbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Lbest
2,3	3 5 2 4 6 1	Lworst
1,1	6 2 4 5 3 1	Gbest
1,3	1 3 4 6 5 2	Gbest
2,1	4 6 2 1 3 5	Gbest
2,2	6 2 3 5 4 1	Gbest
1,2	4 5 2 6 1 3	Gworst
2,3	3 5 2 4 6 1	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (4,6), (6,2), (2,1), (1,3) และ (3,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,3), (3,5), (5,4) และ (4,1) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.30 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0063	0.0250	-0.0063	-0.0063	-0.0063
2	0.0187	0	0.0187	-0.0125	-0.0125	-0.0125
3	-0.0125	-0.0125	0	-0.0125	0.0500	-0.0125
4	0.0187	-0.0125	-0.0125	0	-0.0125	0.0187
5	-0.0063	-0.0063	-0.0063	0.0250	0	-0.0063
6	-0.0125	0.0500	-0.0125	-0.0125	-0.0125	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,5), (5,2), (2,4), (4,6) และ (6,1) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.31 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest และ Lworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0063	0.0250	-0.0063	-0.0063	-0.0063
2	0.0250	0	0.0250	-0.0375	-0.0063	-0.0063
3	-0.0063	-0.0063	0	-0.0063	0.0250	-0.0063
4	0.0250	-0.0063	-0.0063	0	-0.0063	-0.0063
5	0.0000	-0.0313	0.0000	0.0313	0	0.0000
6	-0.0375	0.0563	-0.0063	-0.0063	-0.0063	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,4), (4,5), (5,3) และ (3,1) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,4), (4,6), (6,5) และ (5,2) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (4,6), (6,2), (2,1), (1,3) และ

(3,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,3), (3,5), (5,4) และ (4,1) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.32 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest Lworst และ Gbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0188	0.0750	-0.0188	-0.0188	-0.0188
2	0.0375	0	0.0375	-0.0250	-0.0250	-0.0250
3	0.0000	-0.0313	0	0.0000	0.0625	-0.0313
4	0.0313	-0.0313	-0.0313	0	0.0000	0.0313
5	-0.0188	-0.0188	0.0125	0.0437	0	-0.0188
6	-0.0625	0.1250	-0.0313	-0.0313	0.0000	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (4,5), (5,2), (2,6), (6,1) และ (1,3) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,5), (5,2), (2,4), (4,6) และ (6,1) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.33 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest Lworst Gbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0125	0.0500	-0.0125	-0.0125	-0.0125
2	0.0500	0	0.0500	-0.0438	-0.0125	-0.0437
3	0.0063	-0.0250	0	0.0063	0.0375	-0.0250
4	0.0437	-0.0187	-0.0187	0	-0.0187	0.0125
5	-0.0063	-0.0688	0.0250	0.0562	0	-0.0063
6	-0.1125	0.1375	-0.0187	-0.0187	0.0125	0

6.3 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมจากสมการ $X_{(i+1,s)} = X_{(i,s)} + V_{(i,s)}$ จะได้ ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 และ 2 สำหรับรอบการทำงานถัดไปดังนี้

ตารางที่ ค.34 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0.1938	0.2250	0.1938	0.1938	0.1938
2	0.2250	0	0.2250	0.2250	0.1938	0.1312
3	0.2313	0.1688	0	0.2313	0.2000	0.1688
4	0.2125	0.1813	0.1813	0	0.1813	0.2438
5	0.1875	0.1563	0.2500	0.2188	0	0.1875
6	0.0875	0.3063	0.1813	0.1813	0.2438	0

ตารางที่ ค.35 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0	0.1875	0.2500	0.1875	0.1875	0.1875
2	0.2500	0	0.2500	0.1563	0.1875	0.1563
3	0.2063	0.1750	0	0.2063	0.2375	0.1750
4	0.2438	0.1813	0.1813	0	0.1813	0.2125
5	0.1938	0.1312	0.2250	0.2562	0	0.1938
6	0.0875	0.3375	0.1813	0.1813	0.2125	0

7. การแก้ปัญหาในรอบการทำงานที่ 2

ในการแก้ปัญหาในรอบที่ 2 มีขั้นตอนเหมือนการแก้ในรอบที่ 1 แต่สตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะได้จากการสุ่มงานแรกจากตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก จากนั้นลำดับถัดมาจะใช้ ตารางความน่าจะเป็นร่วมสุ่มงานจนถึงลำดับงานสุดท้ายตามที่ได้กำหนดคือ จำนวนฝูงเท่ากับ 2 และอนุภาคของฝูงเท่ากับ 3 ดังนี้

ตารางที่ ค.36 สตริงคำตอบเบื้องต้นของฝูงที่ 1 และ 2

Strings(s, p)	Model Sequences
1,1	6 4 3 2 1 5
1,2	6 2 5 3 1 4
1,3	1 6 4 5 3 2
2,1	1 3 6 2 4 5
2,2	3 2 5 6 1 4
2,3	1 3 6 2 4 5

7.1 การประเมินค่า

นำสตริงคำตอบเบื้องต้นที่สุ่มได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด แล้วทำการกำหนดค่าความแข็งและหาค่าความหนาแน่นตามลำดับดังนี้

7.1.2 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ

- ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Variance of Production Rates)
- ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Utility Work)
- เวลาของการปรับตั้งเครื่องในการผลิตน้อยที่สุด (Setup Time)

สมการในการคำนวณ ตัวแปรต่างๆในสมการ และตัวอย่างการคำนวณสามารถดูได้จากบทที่ 2

ตารางที่ ค.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time
1,1	34.3889	14.4735	4.8227
1,2	22.5222	15.1276	6.4237
1,3	66.2556	15.9265	3.8295
2,1	47.4556	16.9536	5.5354
2,2	58.9222	14.9278	4.7539
2,3	47.4556	16.9536	5.5354

7.2 การกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าความหนาแน่น และการคัดเลือกสตริงคำตอบ

วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Non-Dominated Sorting เป็นการจัดอันดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบจากสตริงที่มีความแข็งแรงสูงที่สุด (ค่า Fitness = 1) ไปจนถึงสตริงที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด (ค่า Fitness มากที่สุด)

วิธีกำหนดค่าความหนาแน่น Crowding Distance จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงที่เท่ากัน (ค่า Fitness เท่ากัน) เริ่มจากสตริงที่มีความแข็งแรงมากที่สุด (ค่า Fitness = 1) จนถึงความแข็งแรงน้อยที่สุดตามลำดับ ถ้าสตริงไหนมีค่าความแข็งแรงค่าเดียวจะกำหนดค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity)

เมื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบแล้ว จะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Local Best Solution: Lbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 และสตริงคำตอบที่แย่งของแต่ละฝูง (Local Worst Solution: Lworst) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ดังนี้

ตารางที่ ค.38 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดและแย่งของฝูงที่ 1

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	34.3889	14.4735	4.8227	1	2.5498	Lbest,Lworst
1,2	22.5222	15.1276	6.4237	1	Infinity	Lbest,Lworst
1,3	66.2556	15.9265	3.8295	1	Infinity	Lbest,Lworst

ตารางที่ ค.39 สตริงคำตอบที่ดีและแยของฝูงที่ 1

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 4 3 2 1 5	Lbest,Lworst
1,2	6 2 5 3 1 4	Lbest,Lworst
1,3	1 6 4 5 3 2	Lbest,Lworst

ตารางที่ ค.40 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีและแยของฝูงที่ 2

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
2,1	47.4556	16.9536	ค.5354	1	Infinity	Lbest,Lworst
2,2	58.9222	14.9278	4.7539	1	Infinity	Lbest,Lworst
2,3	47.4556	16.9536	ค.5354	1	Infinity	Lbest,Lworst

ตารางที่ ค.41 สตริงคำตอบที่ดีและแยของฝูงที่ 2

Strings	Model Sequences	Selection
2,1	1 3 6 2 4 5	Lbest,Lworst
2,2	3 2 5 6 1 4	Lbest,Lworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Lbest,Lworst

เมื่อได้สตริงคำตอบที่ดีและแยของแต่ละฝูงออกมาแล้ว ให้นำสตริงคำตอบของแต่ละฝูงมารวมกันแล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบใหม่ จากนั้นทำการพิจารณาเลือกสตริงคำตอบที่ดีของประชากรสตริงคำตอบ (Global Best Solution: Gbest) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 และสตริงคำตอบที่แยของประชากร (Global Worst Solution: Gworst) โดยจะพิจารณาจากสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ถ้าสตริงคำตอบความแข็งแรงเท่ากันให้เรียงลำดับสตริงคำตอบตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมากดังนี้

ตารางที่ ค.42 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีของประชากร

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	34.3889	14.4735	4.8227	1	Infinity	Gbest
1,2	22.5222	15.1276	6.4237	1	Infinity	Gbest
1,3	66.2556	15.9265	3.8295	1	1.6135	Gbest
2,1	47.4556	16.9536	5.5354	2	Infinity	-
2,2	58.9222	14.9278	4.7539	1	2.1115	Gbest
2,3	47.4556	16.9536	5.5354	2	Infinity	-

ตารางที่ ค.43 ค่าของสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกคำตอบที่แย่ของประชากร

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1	34.3889	14.4735	4.8227	1	Infinity	-
1,2	22.5222	15.1276	6.4237	1	Infinity	-
1,3	66.2556	15.9265	3.8295	1	1.6135	-
2,1	47.4556	16.9536	5.5354	2	Infinity	Gworst
2,2	58.9222	14.9278	4.7539	1	2.1115	-
2,3	47.4556	16.9536	5.5354	2	Infinity	Gworst

ตารางที่ ค.44 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากร

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 2 5 3 1 4	Gbest
1,2	1 6 4 5 3 2	Gbest
1,3	6 4 3 2 1 5	Gbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Gbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Gworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Gworst

7.3 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดแล้วจึงทำการเก็บค่าสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากับ 1 รวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานก่อนหน้าแล้วทำการกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่น จากนั้นเก็บสตริงคำตอบที่เท่ากับ 1 ไว้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานปัจจุบัน

ตารางที่ ค.45 การรวมสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

Strings	Model Sequences
1,1 (รอบที่ 1)	6 2 4 5 3 1
1,3 (รอบที่ 1)	1 3 4 6 5 2
2,1 (รอบที่ 1)	4 6 2 1 3 5
2,2 (รอบที่ 1)	6 2 3 5 4 1
1,1 (รอบที่ 2)	6 2 5 3 1 4
1,2 (รอบที่ 2)	1 6 4 5 3 2
1,3 (รอบที่ 2)	6 4 3 2 1 5
2,2 (รอบที่ 2)	3 2 5 6 1 4

ตารางที่ ค.46 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

Strings	Variance of Production Rates	Utility Work	Setup Time	Fitness	Crowding Distance	Selection
1,1 (รอบที่ 1)	3ค.5889	14.3296	ค.5381	1	1.0804	Selected
1,3 (รอบที่ 1)	38.6556	16.5449	4.6987	1	0.4522	Selected
2,1 (รอบที่ 1)	28.3889	14.8695	ค.6526	1	1.1838	Selected
2,2 (รอบที่ 1)	39.0556	14.4618	4.7255	1	1.2453	Selected
1,1 (รอบที่ 2)	34.3889	14.4735	4.8227	1	0.4525	Selected
1,2 (รอบที่ 2)	22.5222	1ค.1276	6.4237	1	Infinity	Selected
1,3 (รอบที่ 2)	66.2556	1ค.9265	3.8295	1	Infinity	Selected
2,2 (รอบที่ 2)	58.9222	14.9278	4.7539	2	Infinity	Selected

ตารางที่ ค.47 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดของรอบการทำงานที่ 2

Strings	Model Sequences
1,1 (รอบที่ 1)	6 2 4 5 3 1
1,3 (รอบที่ 1)	1 3 4 6 5 2
2,1 (รอบที่ 1)	4 6 2 1 3 5
2,2 (รอบที่ 1)	6 2 3 5 4 1
1,1 (รอบที่ 2)	6 2 5 3 1 4
1,2 (รอบที่ 2)	1 6 4 5 3 2
1,3 (รอบที่ 2)	6 4 3 2 1 5

7.4 การปรับปรุงค่าในตาราง

การปรับปรุงค่าในตารางจะทำการปรับตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และตารางทิศทางเคลื่อนของอนุภาค (Velocity Matrix) เพื่อนำไปใช้ในรอบถัดไป โดยจะทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับสตริงคำตอบที่ดี และลดค่าความน่าจะเป็นให้กับสตริงคำตอบที่แย่ จะทำให้ในรอบถัดไปโอกาสที่จะเลือกสตริงคำตอบที่ดีมีค่ามากขึ้น

7.4.1 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

จากสตริงคำตอบที่ดีและแยของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.48 สตริงคำตอบที่ปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 4 3 2 1 5	Lbest
1,2	6 2 5 3 1 4	Lbest
1,3	1 6 4 5 3 2	Lbest
1,1	6 4 3 2 1 5	Lworst
1,2	6 2 5 3 1 4	Lworst
1,3	1 6 4 5 3 2	Lworst
1,1	6 2 5 3 1 4	Gbest
1,2	1 6 4 5 3 2	Gbest
1,3	6 4 3 2 1 5	Gbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Gbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Gworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.49 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest

1	2	3	4	5	6
0.2147	0.1427	0.1187	0.1187	0.1427	0.2627

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็น

เป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.50 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest และ Lworst

1	2	3	4	5	6
0.2027	0.1547	0.1307	0.1307	0.1547	0.2267

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 3 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.51 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest Lworst และ Gbest

1	2	3	4	5	6
0.2107	0.1387	0.1387	0.1147	0.1387	0.2587

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับ

ตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004
ดังนี้

ตารางที่ ค.52 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 Lbest Lworst
Gbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6
0.1707	0.1467	0.1467	0.1227	0.1467	0.2667

7.4.2 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

จากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.53 สตริงคำตอบที่ปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2

Strings	Model Sequences	Selection
2,1	1 3 6 2 4 5	Lbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Lbest
2,3	1 3 6 2 4 5	Lbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Lworst
2,2	3 2 5 6 1 4	Lworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Lworst
1,1	6 2 5 3 1 4	Gbest
1,2	1 6 4 5 3 2	Gbest
1,3	6 4 3 2 1 5	Gbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Gbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Gworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจาก
สตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็น
ให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ

0.004 สตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 3 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.54 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest

1	2	3	4	5	6
0.2147	0.1427	0.1187	0.1667	0.1427	0.2147

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 3 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.55 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest และ Lworst

1	2	3	4	5	6
0.1787	0.1547	0.1067	0.1787	0.1547	0.2267

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,2 มีงานที่ 6 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 6 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 สตริงคำตอบที่ 1,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 2 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,2 มีงานที่ 3 เป็น

งานแรก จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 3 เท่ากับ 0.02 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.56 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest Lworst และ Gbest

1	2	3	4	5	6
0.1867	0.1387	0.1147	0.1627	0.1387	0.2587

ทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 2,1 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 และสตริงคำตอบที่ 2,3 มีงานที่ 1 เป็นงานแรก จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.02 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ตารางที่ ค.57 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 Lbest LworstGbest และ Gworst

1	2	3	4	5	6
0.1467	0.1467	0.1227	0.1707	0.1467	0.2667

7.4.3 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1

จากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.58 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนของอนุภาคของฝูงที่ 1

Strings	Model Sequences	Selection
1,1	6 4 3 2 1 5	Lbest
1,2	6 2 5 3 1 4	Lbest
1,3	1 6 4 5 3 2	Lbest
1,1	6 4 3 2 1 5	Lworst
1,2	6 2 5 3 1 4	Lworst
1,3	1 6 4 5 3 2	Lworst
1,1	6 2 5 3 1 4	Gbest
1,2	1 6 4 5 3 2	Gbest
1,3	6 4 3 2 1 5	Gbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Gbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Gworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,4), (4,3), (3,2), (2,1) และ (1,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,5), (5,3), (3,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,6), (6,4), (4,5), (5,3) และ (3,2) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.59 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0250	0.0062	0.0062	0.0062	0.0062
2	0.0437	0	0.0125	0.0125	0.0125	-0.0813
3	0.0438	0.0125	0	0.0125	-0.0188	-0.0500
4	0.0000	-0.0313	0.0000	0	0.0000	0.0312
5	-0.0250	-0.0563	0.1000	0.0063	0	-0.0250
6	-0.1313	0.1188	-0.0375	0.0250	0.0250	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,4), (4,3), (3,2), (2,1) และ (1,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,5), (5,3), (3,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,6), (6,4), (4,5), (5,3) และ (3,2) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.60 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest และ Lworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0063	0.0250	-0.0062	-0.0062	-0.0062
2	0.0250	0	0.0250	0.0250	-0.0063	-0.0688
3	0.0313	-0.0313	0	0.0313	0.0000	-0.0313
4	0.0125	-0.0188	-0.0187	0	-0.0187	0.0437
5	-0.0125	-0.0437	0.0500	0.0188	0	-0.0125
6	-0.1125	0.1063	-0.0188	-0.0187	0.0437	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,4), (4,3), (3,2), (2,1) และ (1,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,5), (5,3), (3,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,6), (6,4), (4,5), (5,3) และ (3,2) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,2), (2,5), (5,6), (6,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.61 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest Lworst และ Gbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0313	0.0000	0.0313	0.0000	0.0000
2	0.0375	0	0.0063	0.0062	0.0375	-0.0875
3	0.0375	0.0375	0	0.0063	-0.0250	-0.0563
4	0.0000	-0.0313	0.0000	0	0.0000	0.0312
5	-0.0313	-0.0625	0.0938	0.0000	0	0.0000
6	-0.1062	0.1125	-0.0438	0.0188	0.0187	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.62 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 Lbest Lworst Gbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0187	-0.0500	0.0437	0.0125	0.0125
2	0.0500	0	0.0188	-0.0438	0.0500	-0.0750
3	0.0500	0.0500	0	0.0188	-0.0125	-0.1063
4	0.0125	-0.0188	0.0125	0	-0.0500	0.0437
5	-0.0313	-0.0625	0.0938	0.0000	0	0.0000
6	-0.0937	0.0625	-0.0313	0.0313	0.0312	0

7.4.4 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

จากสตริงคำตอบที่ดีและแย่ของฝูงที่ 1 และของประชากร ดังนี้

ตารางที่ ค.63 สตริงคำตอบสำหรับปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2

Strings	Model Sequences	Selection
2,1	1 3 6 2 4 5	Lbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Lbest
2,3	1 3 6 2 4 5	Lbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Lworst
2,2	3 2 5 6 1 4	Lworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Lworst
1,1	6 2 5 3 1 4	Gbest
1,2	1 6 4 5 3 2	Gbest
1,3	6 4 3 2 1 5	Gbest
2,2	3 2 5 6 1 4	Gbest
2,1	1 3 6 2 4 5	Gworst
2,3	1 3 6 2 4 5	Gworst

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lbest คือสตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,2), (2,5), (5,6), (6,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับตำแหน่งอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.64 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0313	0.0938	0.0000	-0.0313	-0.0313
2	0.0313	0	0.0313	0.0000	0.0000	-0.0625
3	-0.0125	-0.0125	0	-0.0125	0.0187	0.0187
4	0.0312	-0.0313	-0.0313	0	0.0313	0.0000
5	-0.0125	-0.0750	0.0187	0.0500	0	0.0187
6	-0.1000	0.1813	-0.0375	-0.0375	-0.0063	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Lworst คือสตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,2), (2,5), (5,6), (6,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.65 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest และ Lworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0125	0.0500	-0.0125	-0.0125	-0.0125
2	0.0500	0	0.0500	-0.0438	-0.0125	-0.0437
3	0.0063	-0.0250	0	0.0063	0.0375	-0.0250
4	0.0437	-0.0188	-0.0188	0	-0.0187	0.0125
5	-0.0063	-0.0688	0.0250	0.0562	0	-0.0063
6	-0.1125	0.1375	-0.0188	-0.0188	0.0125	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gbest คือสตริงคำตอบที่ 1,1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,4), (4,3), (3,2), (2,1) และ (1,5) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (6,2), (2,5), (5,3), (3,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 สตริงคำตอบที่ 1,3 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,6), (6,4), (4,5), (5,3) และ (3,2) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,2 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (3,2), (2,5), (5,6), (6,1) และ (1,4) เท่ากับ 0.025 และทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.66 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest Lworst และ Gbest

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0375	0.0250	0.0250	-0.0063	-0.0063
2	0.0625	0	0.0313	-0.0625	0.0313	-0.0625
3	0.0125	0.0438	0	-0.0188	0.0125	-0.0500
4	0.0312	-0.0313	0.0000	0	0.0000	0.0000
5	-0.0250	-0.0875	0.0688	0.0375	0	0.0063
6	-0.1062	0.1438	-0.0438	0.0187	-0.0125	0

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 เริ่มจากสตริงคำตอบ Gworst คือสตริงคำตอบที่ 2,1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 และสตริงคำตอบที่ 2,3 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับ (1,3), (3,6), (6,2), (2,4) และ (4,5) เท่ากับ 0.025 และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่อันดับอื่นๆ เท่ากับ 0.0063 ดังนี้

ตารางที่ ค.67 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 Lbest LworstGbest และ Gworst

	1	2	3	4	5	6
1	0	-0.0250	-0.0250	0.0375	0.0062	0.0062
2	0.0750	0	0.0437	-0.1125	0.0437	-0.0500
3	0.0250	0.0563	0	-0.0063	0.0250	-0.1000
4	0.0437	-0.0188	0.0125	0	-0.0500	0.0125
5	-0.0250	-0.0875	0.0688	0.0375	0	0.0063
6	-0.0937	0.0938	-0.0313	0.0312	0.0000	0

8. การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมจากสมการ $X_{(i+1,s)} = X_{(i,s)} + V_{(i,s)}$ จะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 และ 2 สำหรับรอบการทำงานถัดไปดังนี้

ตารางที่ ค.68 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6
1	0	0.1750	0.1750	0.2375	0.2063	0.2063
2	0.2750	0	0.2438	0.1812	0.2438	0.0562
3	0.2813	0.2188	0	0.2500	0.1875	0.0625
4	0.2250	0.1625	0.1938	0	0.1313	0.2875
5	0.1563	0.0938	0.3438	0.2188	0	0.1875
6	-0.0062	0.3688	0.1500	0.2125	0.2750	0

ตารางที่ ค.69 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6
1	0	0.1625	0.2250	0.2250	0.1938	0.1938
2	0.3250	0	0.2938	0.0437	0.2313	0.1063
3	0.2313	0.2313	0	0.2000	0.2625	0.0750
4	0.2875	0.1625	0.1938	0	0.1313	0.2250
5	0.1688	0.0437	0.2938	0.2937	0	0.2000
6	-0.0062	0.4313	0.1500	0.2125	0.2125	0

9. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธีหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเชิงลบ

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธีหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเชิงลบและการวิเคราะห์ผลการทดลองจะอยู่ในภาคผนวก จ

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะ

ตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) การวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) และอัตราส่วนของกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Pareto-Optimal Solution) มีวิธีการคำนวณดังนี้

ตารางที่ ง.1 ตัวอย่างกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงและกลุ่มคำตอบที่ได้

กลุ่มคำตอบ	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง(True Pareto Optimal Solution)	74.2556	16.7352	3.8238
	38.6556	16.5449	4.6987
	32.2556	16.2287	5.5928
	31.7222	15.9456	5.6069
	22.6556	14.7049	5.6327
	39.0556	16.2843	4.7298
	34.3889	15.8214	4.8248
	22.5222	15.1276	6.4237
	37.0556	15.0429	4.8248
	16.5222	15.3134	6.4857
กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้(Obtained Pareto Optimal Solution)	41.7222	13.915	4.7255
	74.2556	16.7352	3.8238
	38.6556	16.5449	4.6987
	32.2556	16.2287	5.5928
	31.7222	15.9456	5.6069
	22.6556	14.7049	5.6327
	39.0556	16.2843	4.7298
34.3889	15.8214	4.8248	

1. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal Solution) ในการวัดสมรรถนะของคำตอบนั้นเป็นการวัดสมรรถนะอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการหาคำตอบ กลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพสูง (นพดล คำภิรมย์, 2551) มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$\text{Convergence} = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y \in S^*} \min\{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (ง.1)$$

โดยที่

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

เมื่อ S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้กลุ่มที่ j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, J$

S^* คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

$|S^*|$ คือ จำนวนคำตอบในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

d_{xy} คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่ได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y

f_i^{\max} และ f_i^{\min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

$f_i(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้

$f_i(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

1. หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดจากตารางที่ ง.1 คือ $f_1^{\max} = 74.2556, f_1^{\min} = 16.5222, f_2^{\max} = 16.7352, f_2^{\min} = 13.9150, f_3^{\max} = 6.4857$ และ $f_3^{\min} = 3.8238$

2. หาระยะทางลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่มีค่าน้อยที่สุดของแต่ละคำตอบ แล้วนำมา
รวมกัน จากนั้นก็หาค่าเฉลี่ยโดยการหารด้วยจำนวนสมาชิกกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่
แท้จริง ดังตารางที่ ง.5

ตารางที่ ง.2 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ที่ 1

True Pareto	Obtained Pareto						
	22.6556	31.7222	32.2556	34.3889	38.6556	39.0556	74.2556
16.5222	0.0113	0.0693	0.0743	0.0958	0.147	0.1523	1
22.5222	0	0.0254	0.0284	0.0422	0.0781	0.082	0.8029
22.6556	0	0.0247	0.0276	0.0413	0.0768	0.0807	0.7988
31.7222	0.0247	0	0.0001	0.0021	0.0144	0.0161	0.5428
32.2556	0.0276	0.0001	0	0.0014	0.0123	0.0139	0.5292
34.3889	0.0413	0.0021	0.0014	0	0.0055	0.0065	0.4768
37.0556	0.0622	0.0085	0.0069	0.0021	0.0008	0.0012	0.4152
38.6556	0.0768	0.0144	0.0123	0.0055	0	0	0.3802
39.0556	0.0807	0.0161	0.0139	0.0065	0	0	0.3717
41.7222	0.1091	0.03	0.0269	0.0161	0.0028	0.0021	0.3175
74.2556	0.7988	0.5428	0.5292	0.4768	0.3802	0.3717	0

จากตารางที่ ง.2 มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้ ทำการเรียงลำดับกลุ่มคำตอบเฉพาะค่า
วัตถุประสงค์ที่ 1 จากน้อยไปมาก $f_1^{max} = 74.2556$, $f_1^{min} = 16.5222$ กลุ่มคำตอบที่ได้ คือ
22.6556 คำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง คือ 22.6556 จะได้ระยะทางเท่ากับ $\left(\frac{22.6556-16.5222}{74.2556-16.5222}\right)^2 =$
0.0113

ตารางที่ ง.3 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ที่ 2

True Pareto	Obtained Pareto						
	14.7049	15.9456	16.2287	15.8214	16.5449	16.2843	16.7352
15.3134	0.0466	0.0502	0.1053	0.0324	0.1907	0.1185	0.2542
15.1276	0.0225	0.0841	0.1524	0.0605	0.2525	0.1682	0.3249
14.7049	0	0.1935	0.2919	0.1567	0.4257	0.3136	0.5183
15.9456	0.193	0	0.0101	0.0019	0.0452	0.0144	0.0784
16.2287	0.29	0.0101	0	0.0209	0.0126	0.0004	0.0323
15.8214	0.156	0.0019	0.0209	0	0.0658	0.0269	0.105
15.0429	0.0144	0.1025	0.1768	0.0762	0.2837	0.1938	0.3601
16.5449	0.4257	0.0452	0.0126	0.0658	0	0.0085	0.0046
16.2843	0.3136	0.0144	0.0004	0.0269	0.0085	0	0.0256
13.915	0.0785	0.5184	0.6731	0.4569	0.8696	0.7058	1
16.7352	0.518	0.0784	0.0323	0.105	0.0046	0.0256	0

จากตารางที่ ง.3 มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$f_2^{max} = 16.7352, f_2^{min} = 13.9150$ กลุ่มคำตอบที่ได้ คือ 14.7049 คำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง
คือ 15.3134 จะได้ระยะทางเท่ากับ $\left(\frac{14.7049-15.3134}{16.7352-13.9150}\right)^2 = 0.0466$

ตารางที่ ง.4 ระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงของฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ที่ 3

True Pareto	Obtained Pareto						
	5.6327	5.6069	5.5928	4.8248	4.6987	4.7298	3.8238
6.4857	0.1027	0.109	0.1125	0.3893	0.4507	0.4352	1
6.4237	0.0883	0.0941	0.0974	0.3608	0.4199	0.405	0.9539
5.6327	0	0.0001	0.0002	0.0921	0.1231	0.1151	0.4618
5.6069	0.0001	0	0	0.0863	0.1164	0.1086	0.4487
5.5928	0.0002	0	0	0.0832	0.1128	0.1051	0.4416
4.8248	0.0921	0.0863	0.0832	0	0.0022	0.0013	0.1414
4.8248	0.0921	0.0863	0.0832	0	0.0022	0.0013	0.1414
4.6987	0.1231	0.1164	0.1128	0.0022	0	0.0001	0.108
4.7298	0.1151	0.1086	0.1051	0.0013	0.0001	0	0.1158
4.7255	0.1162	0.1096	0.1062	0.0014	0.0001	0	0.1147
3.8238	0.4618	0.4487	0.4416	0.1414	0.108	0.1158	0

จากตารางที่ ง.4 มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$f_3^{max} = 6.4857$ และ $f_3^{min} = 3.8238$ กลุ่มคำตอบที่ได้ คือ 5.6327 คำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

คือ 6.4857 จะได้ระยะทางเท่ากับ $\left(\frac{5.6327-6.4857}{6.4857-3.8238}\right)^2 = 0.1027$

ตารางที่ ง.5 ระยะทางระหว่างแต่ละคำตอบจากการรวมกันของ 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

True Pareto	Obtained Pareto							Minimum Distance
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0.4007	0.4781	0.5405	0.7194	0.8879	0.8402	1.5014	0.4007
2	0.3328	0.4513	0.5275	0.6808	0.8664	0.8094	1.4428	0.3328
3	0	0.4672	0.5655	0.5386	0.7909	0.7137	1.3337	0
4	0.4672	0	0.1009	0.3007	0.4195	0.373	1.0343	0
5	0.5655	0.1009	0	0.3248	0.3711	0.3455	1.0016	0
6	0.5386	0.3007	0.3248	0	0.2711	0.1864	0.8504	0
7	0.4107	0.4442	0.5167	0.2799	0.5354	0.443	0.9574	0.2799
8	0.7909	0.4195	0.3711	0.2711	0	0.0934	0.702	0
9	0.7137	0.373	0.3455	0.1864	0.0934	0	0.7163	0
10	0.5511	0.8112	0.8978	0.6888	0.9341	0.8414	1.1968	0.5511
11	1.3337	1.0343	1.0016	0.8504	0.702	0.7163	0	0
Total Minimum Distance								1.5644
Average Minimum Distance								0.1422

จากตารางที่ ง.5 มีตัวอย่างการคำนวณดังนี้ แล้วนำระยะทางมารวมกัน $\sqrt{0.0113 + 0.0466 + 0.1027} = 0.4007$ แล้วนำค่าที่น้อยที่สุดของระยะทางมารวมกันแล้วหาค่าเฉลี่ยในการลู่เข้า จะได้ค่าการลู่เข้ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงเท่ากับ 0.1422

2. การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ได้

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะห่างของสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ภายในขอบเขตกลุ่มคำตอบเดียวกัน ในการวัดสมรรถนะของคำตอบนั้นเป็นการวัดสมรรถนะอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการหา

คำตอบ กลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพสูง มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (ง.2)$$

โดยที่ d_f และ d_l คือ ระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน (Extreme Solution) ของเส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่หาได้

\bar{d} คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i คือ ระยะห่างของสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในเซตที่ดีที่สุด

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N - 1$

N คือจำนวนสมาชิกในกลุ่มคำตอบที่หาได้

วิธีการคำนวณมีดังนี้

1. หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 วัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดจากตารางที่ คือ $f_1^{max} = 74.2556, f_1^{min} = 16.5222, f_2^{max} = 16.7352, f_2^{min} = 13.9150, f_3^{max} = 6.4857$ และ $f_3^{min} = 3.8238$
2. หาค่า Normalized ระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ด้วยสมการนี้

$$f_i(z) = \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2 \quad (ง.3)$$

โดยที่ $f_i(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบก่อนหน้า

$f_i(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบถัดไป

$f_i(z)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่ได้จาก Normalized

f_i^{max} และ f_i^{min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุด และค่าน้อยที่สุด

3. เมื่อคำนวณเสร็จนำค่ามาหารระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

(Euclidean Distance) ด้วยสมการ $\sqrt{\sum_{i=1}^k (f_i(z))^2}$ เมื่อ $i = 1, 2$ และ 3

4. แล้วนำค่าที่คำนวณได้มาคำนวณค่า d_i และ \bar{d}

5. คำนวณค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ $Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}}$

ตารางที่ ง.6 การหาระยะทางระหว่างสมาชิกคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน

No.	Obtained Pareto			Normalized			Euclidean Distance	
	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$		
1	22.6556	14.7049	5.6327	0.0309	0.3734	0.0002	$d_1 = d_f$	0.6360
2	31.7222	15.9456	5.6069	0.0001	0.0194	0.0001	d_2	0.1400
3	32.2556	16.2287	5.5928	0.0017	0.0403	0.1803	d_3	0.4714
4	34.3889	15.8214	4.8248	0.0068	0.1270	0.0049	d_4	0.3724
5	38.6556	16.5449	4.6987	0.0001	0.0165	0.0003	d_5	0.1297
6	39.0556	16.2843	4.7298	0.4654	0.0493	0.0493	$d_6 = d_l$	0.8749
7	74.2556	16.7352	3.8238	\bar{d}				0.4374

ตารางที่ ง.7 ผลต่างระหว่างระยะทางของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันและค่าเฉลี่ยของระยะทาง

No.	d_i	$d_i - \bar{d}$	$ d_i - \bar{d} $
1	0.6360	0.1986	0.1986
2	0.1400	-0.2974	0.2974
3	0.4714	0.0340	0.0340
4	0.3724	-0.0650	0.0650
5	0.1297	-0.3077	0.3077
6	0.8749	0.4375	0.4375
7	$\sum_{i=1}^{N-1} d_i - \bar{d} $		1.3402

ค่าการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} = \frac{0.6360 + 0.8749 + 1.3402}{0.6360 + 0.8749 + (7-1)(0.4374)} = 0.6894$$

3. การวัดสมรรถนะขอคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะขอคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Pareto-Optimal Solution) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ได้ที่อยู่ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) กับอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด ในการวัดสมรรถนะขอคำตอบนั้นเป็นการวัดสมรรถนะอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในการหาคำตอบ กลุ่มคำตอบที่มีคุณภาพจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพสูง มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$Ratio = \left| \frac{S_j - \{x \in S_j | \exists y: y < x\}}{|S_j|} \right| \quad (ง.4)$$

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

S คือ การรวมกันของเซตคำตอบทั้งหมด j เซต โดยที่ $S = S_1 \cup S_2 \dots \cup S_j$

x คือ เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้

y คือ เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง

$y < x$ คือ กลุ่มคำตอบ x ถูกครอบงำด้วยกลุ่มคำตอบ y

ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้ (ปาไลดา, 2553)

1. สร้างเมตริกซ์ขนาด $n \times m$ โดยที่ n คือจำนวนกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง และ m คือจำนวนกลุ่มคำตอบที่ได้
2. เปรียบเทียบคำตอบที่หาได้ (x) กับคำตอบที่แท้จริง (y) ด้วยวิธีเชิงกลุ่มแบบ Non-Dominance Sorting ดังนี้
 - ถ้าคำตอบที่ได้เทียบเท่ากับคำตอบที่แท้จริงทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 จะกำหนดให้ค่าเปรียบเทียบระหว่าง x กับ y เท่ากับ 1

- ถ้าคำตอบที่ได้ไม่เท่ากับคำตอบที่แท้จริงในทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 จะกำหนดให้ค่าเปรียบเทียบระหว่าง x กับ y เท่ากับ 0
3. หาผลรวมของจำนวนกลุ่มคำตอบที่ค้นพบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดยนำผลรวมหารด้วยจำนวนคำตอบที่แท้จริง ดังแสดงในตารางที่ ง.8

ตารางที่ ง.8 การเปรียบเทียบอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

No.	True Pareto	Optained Pareto							Value
		1	2	3	4	5	6	7	
1	22.6556	0	0	0	0	0	0	0	0
	31.7222	0	0	0	0	0	0	0	
	6.4857	0	0	0	0	0	0	0	
2	22.5222	0	0	0	0	0	0	0	0
	15.1276	0	0	0	0	0	0	0	
	6.4237	0	0	0	0	0	0	0	
3	22.6556	1	0	0	0	0	0	0	1
	14.7049	0	0	0	0	0	0	0	
	5.6327	0	0	0	0	0	0	0	
4	31.7222	0	1	0	0	0	0	0	1
	15.9456	0	0	0	0	0	0	0	
	5.6069	0	0	0	0	0	0	0	
5	32.2556	0	0	1	0	0	0	0	1
	16.2287	0	0	0	0	0	0	0	
	5.5928	0	0	0	0	0	0	0	
6	34.3889	0	0	0	1	0	0	0	1
	15.8214	0	0	0	0	0	0	0	
	4.8248	0	0	0	0	0	0	0	
7	37.0556	0	0	0	0	0	0	0	0
	15.0429	0	0	0	0	0	0	0	
	4.8248	0	0	0	0	0	0	0	
8	38.6556	0	0	0	0	1	0	0	1
	16.5449	0	0	0	0	0	0	0	
	4.6987	0	0	0	0	0	0	0	
9	39.0556	0	0	0	0	0	1	0	1
	16.2843	0	0	0	0	0	0	0	
	4.7298	0	0	0	0	0	0	0	
10	41.7222	0	0	0	0	0	0	0	0
	13.915	0	0	0	0	0	0	0	
	4.7255	0	0	0	0	0	0	0	
11	74.2556	0	0	0	0	0	0	1	1
	16.7352	0	0	0	0	0	0	0	
	3.8238	0	0	0	0	0	0	0	
Total Value									7
Ratio of Solution									0.6364

ภาคผนวก จ

รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัญหาการทดลอง

ภาคผนวก ช

ผลการทดลองจากการรันโปรแกรม

(ภาคผนวกทั้งหมดนี้อยู่ใน CD ที่แนบมา)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววันวิสา นฤมิตวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลายจากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย จังหวัดสงขลา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมการผลิต จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2552