

การแก้ปัญหาการจัดสมุดสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสาย
การประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนิชาน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLVING MIXED-MODEL PARALLEL U-SHAPED ASSEMBLY LINE
BALANCING PROBLEM UNDER MANY-OBJECTIVES



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมาก
วัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบ
ลักษณะตัวขนาน

โดย

นางสาวเพ็ญนภัส จิรัชัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์จรัสวัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นระเกณต์ พุ่มชูศรี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

เพ็ญนภัส จิรัชัย : การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงคบนสายการประกอบผลิตภัณฑผสมแบบลักษณะตัวขูขนาน (SOLVING MIXED-MODEL PARALLEL U-SHAPED ASSEMBLY LINEBALANCING PROBLEM UNDER MANY-OBJECTIVES) อ.ที่ปริภษาวิทยานิพนธหลัก: ศ. ดร.ปารเมศ ชูติมา, 258 หนา.

การแกัปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงคบนสายการประกอบผลิตภัณฑผสมแบบลักษณะตัวขูขนาน เป็นการแกัปัญหาโดยการพิจารณาทุกวัตถุประสงคไปพรอมๆ กัน ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) ดังนั้นการค้นหาคำตอบจึงต้องนำวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่มีความเหมาะสม

งานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึมใหม่ คือ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงคโดยยึดหลักการจำแนกประยุกตรวมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (The Multi-Objective Evolutionary Optimization Hybridised With The Biogeography-Based Optimization Algorithm: MOEA/D-BBO) สำหรับแกัปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑผสมลักษณะตัวขูขนานที่มีมากวัตถุประสงค โดยงานวิจัยนี้มีจำนวนวัตถุประสงค 4 วัตถุประสงค คือ จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด และความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO กับอัลกอริทึมอื่นๆ ที่เป็นที่ยอมรับ คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงคโดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D)

จากผลการทดลองพบว่า MOEA/D-BBO มีสมรรถนะในการแกัปัญหาคือดีกว่า MOEA/D และ BBO ทั้งด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ ส่วนด้านจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีกว่าอัลกอริทึมอื่น สำหรับโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก และขนาดกลางบางโจทย์ ด้านเวลาในการค้นหาคำตอบนั้น MOEA/D-BBO ใช้เวลานานที่สุด แต่ยังอยู่ในช่วงเวลาที่ยอมรับได้ (นานที่สุดไม่เกิน 1 ชั่วโมง)

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริภษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5870213021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: PARALLEL U-SHAPED ASSEMBLY LINE / LINE BALANCING / MANY OBJECTIVE OPTIMIZATION PROBLEM / MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM BASED ON DECOMPOSITION

PENNAPAT JIRACHAI: SOLVING MIXED-MODEL PARALLEL U-SHAPED ASSEMBLY LINEBALANCING PROBLEM UNDER MANY-OBJECTIVES. ADVISOR: PROF.PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 258 pp.

Solving mixed-model parallel U-shaped assembly line balancing under many-objectives is a solution by considering all the objectives simultaneously. This is an NP-hard problem. Therefore, to optimize this problem, heuristic approaches need to be developed.

This research proposes a new algorithm, The multi-objective evolutionary optimization hybridised with The biogeography-based optimization algorithm (MOEA/D-BBO) for solving mixed-model parallel U-shaped assembly line balancing problem under many-objectives. Four objectives were considered including minimize the number of workstations, minimize the number of stations, minimize different workload between workstations, and minimize work unrelatedness. The performance of MOEA/D-BBO is compared with the well-known algorithm, i.e. The biogeography-based optimization algorithm (BBO), a multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D).

The results from experiments show that MOEA/D-BBO had better performance than MOEA/D and BBO in terms of convergence to the Pareto-optimal set, spread of solutions, ratio of non-dominated solutions. Regarding the number of non-dominated solution, MOEA/D-BBO performs better than other algorithms for small problems and some medium problem. In contrast, MOEA/D-BBO take the longest computation time to solution but also within an acceptable time period (not exceeding the maximum 1 h).

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้มอบความรู้ ความอนุเคราะห์ และคำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ คุณปวีศ เอกพิทักษ์ธรรม สำหรับความช่วยเหลือด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ดังที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ และขอบคุณ นายชินวิชญ์ สีนุเตชากุล และเพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในด้านต่างๆตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งคอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจ ให้ผู้วิจัยทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	8
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 ลักษณะของสายการประกอบ.....	9
2.1.1 สายการประกอบขนาน.....	9
2.1.2 สายการประกอบรูปตัวยู.....	10
2.1.3 สายการประกอบรูปตัวยูขนาน.....	11
2.2 ประเภทของรูปแบบผลิตภัณฑ์บนสายงานการประกอบ.....	12
2.2.1 สายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดี่ยว (Single Model Assembly Line).....	12
2.2.2 สายงานการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Line).....	12
2.2.3 สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly line).....	12
2.3 หลักการจัดสมดุลสายการประกอบ.....	12

2.3.1 Single Model Deterministic	13
2.3.2 Single Model Stochastic	13
2.3.3 Multi Model Deterministic.....	13
2.3.4 Multi Model Stochastic.....	13
2.3.5 Mixed Model Deterministic	13
2.3.6 Mixed Model Stochastic	13
2.4 ประเภทของวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ	14
2.4.1 Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP).....	14
2.4.2 General Assembly Line Balancing Problems (GALBP).....	14
2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)	14
2.6 การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนิท	28
2.6.1 การหาแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม และการหาเวลาชิ้นงานร่วม.....	29
2.6.2 การคำนวณรอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time).....	33
2.6.3 สตรีงคำตอบและการถอดรหัสสตรีงคำตอบ	34
2.6.4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	44
2.7 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม	51
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	55
บทที่ 3 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย	
วัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกในการจัดสมดุลสายการประกอบ	62
3.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย	
วัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก (A Multiobjective Evolutionary Algorithm	
Based on Decomposition: MOEA /D)	62
3.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D	63

3.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ มากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน.....	64
3.4 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการ จำแนกมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บน สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน	69
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ.....	87
4.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO).....	87
4.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO).....	89
4.3 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมาก วัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน	89
4.4 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึม BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการ ประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน.....	94
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย วัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ในการ แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ.....	109
5.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนกประยุกต์ร่วมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์.....	109
5.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO.....	109
5.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการ ประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน.....	110
5.4 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล สายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน	119

บทที่ 6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบ.....	145
6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัย.....	145
6.2 วิธีการทดลองของงานวิจัย	146
6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในอัลกอริทึม.....	147
6.3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองสำหรับอัลกอริทึมต่างๆ	147
6.3.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments).....	151
6.3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง.....	166
6.4 ผลการทดลองการแก้ปัญหาคิวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึม	167
6.4.1 ผลการทดลองการแก้โจทย์ปัญหา.....	168
6.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	172
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	177
7.1 บทสรุปงานวิจัย	177
7.1.1 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง	177
7.1.2 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก.....	178
7.1.3 อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัย	178
7.1.4 ผลการนำอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มาใช้ในการแก้ปัญหา	178
7.2 ข้อเสนอแนะ	179
รายการอ้างอิง.....	180
ภาคผนวก ก ข้อมูลโจทย์ปัญหาที่ใช้ในอัลกอริทึม.....	187
ภาคผนวก ข ผลการทดลองของโจทย์ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย.....	242
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	258

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	รายละเอียดของปัญหาที่นำมาศึกษาในงานวิจัย	8
ตารางที่ 2.1	ความแตกต่างระหว่างงานวิจัยที่ทำการศึกษากับงานวิจัยเดิม	61
ตารางที่ 3.1	ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก p กับ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก j	64
ตารางที่ 3.2	ค่าถ่วงน้ำหนัก λp_i ในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λp	70
ตารางที่ 3.3	ระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λp) กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่น (λj)	71
ตารางที่ 3.4	จุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λp แต่ละจุด	71
ตารางที่ 3.5	สตริงคำตอบเริ่มต้นของเซตค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด	72
ตารางที่ 3.6	ค่าวัตถุประสงค์ และค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร	72
ตารางที่ 3.7	การเก็บคำตอบของประชากรเริ่มต้นในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการ ค้นหาคำตอบ (Elitist)	73
ตารางที่ 3.8	สตริงคำตอบของประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาสำหรับการพัฒนาคำตอบ	73
ตารางที่ 3.9	สตริงคำตอบที่รุ่นลูกทั้ง 2 สตริงที่ผ่านการซ่อมแซม	76
ตารางที่ 3.10	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการซ่อมแซม	76
ตารางที่ 3.11	การปรับปรุงค่าวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดค่าใหม่	76
ตารางที่ 3.12	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก ที่ทำการนอร์มัลไลส์แล้ว	77
ตารางที่ 3.13	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลส์แล้วคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก.....	78
ตารางที่ 3.14	การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละ สตริง	78
ตารางที่ 3.15	การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุด	78
ตารางที่ 3.16	การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 (Offspring 1) ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda 1$	79

ตารางที่ 3.17 การเก็บคำตอบของสตริงคำตอบที่นำไปแทนที่เข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอด กระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)	79
ตารางที่ 3.18 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3	80
ตารางที่ 3.19 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละ สตริงที่จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3	80
ตารางที่ 3.20 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6	81
ตารางที่ 3.21 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละ สตริงที่จุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6	81
ตารางที่ 3.22 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 และค่าวัตถุประสงค์ ลงในจุดข้างเคียง	81
ตารางที่ 3.23 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร	82
ตารางที่ 3.24 การเก็บสตริงคำตอบที่นำไปแทนที่เข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการ ค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน.....	83
ตารางที่ 3.25 การกำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการ ค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน.....	84
ตารางที่ 3.26 คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D เมื่อ สิ้นสุดตามเจเนอเรชันที่กำหนด	86
ตารางที่ 4.1 สตริงคำตอบเริ่มต้น Y และสตริงคำตอบชั่วคราว Z ที่คัดลอกออกมา พร้อมค่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	95
ตารางที่ 4.2 ผลการกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท์ และค่าต่างๆในการอพยพ.....	95
ตารางที่ 4.3 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 4 เพื่อทำการอพยพ..	97
ตารางที่ 4.4 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_2 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ..	98
ตารางที่ 4.5 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_5 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ..	99
ตารางที่ 4.6 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_3 ในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ	100
ตารางที่ 4.7 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_4 ในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ	101
ตารางที่ 4.8 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 4	102
ตารางที่ 4.9 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_2 ในสปีชีส์เคาท์ 3.....	102

ตารางที่ 4.10	การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_5 ในสปีชีส์เคาท์ 3	103
ตารางที่ 4.11	การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_3 ในสปีชีส์เคาท์ 2	103
ตารางที่ 4.12	การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_4 ในสปีชีส์เคาท์ 1	104
ตารางที่ 4.13	เซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพ	104
ตารางที่ 4.14	ค่าที่ใช้ประกอบการมิวเตชันของสตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพ	105
ตารางที่ 4.15	การมิวเตชันสตริง z'_2	106
ตารางที่ 4.16	สตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการพัฒนาคำตอบ	107
ตารางที่ 4.17	ผลการจัดอันดับสตริงคำตอบทั้งหมดในเจเนอเรชันที่ 1	107
ตารางที่ 4.18	การเก็บคำตอบที่ดีที่สุดเข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ ..	108
ตารางที่ 4.19	เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ของเจเนอเรชันที่ 2	108
ตารางที่ 5.1	ค่าถ่วงน้ำหนัก λp_i ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λp	120
ตารางที่ 5.2	ระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λp) กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่น (λj)	120
ตารางที่ 5.3	สตริงคำตอบเริ่มต้นสำหรับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด	121
ตารางที่ 5.4	ค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร	121
ตารางที่ 5.5	การเก็บคำตอบของประชากรเริ่มต้นในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)	122
ตารางที่ 5.6	กลุ่มประชากรย่อยที่จะเริ่มทำการพัฒนาคำตอบ	122
ตารางที่ 5.7	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อย ที่ทำการนอร์มัลไลซ์แล้ว	123
ตารางที่ 5.8	การคูณกันระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักของจุดถ่วงน้ำหนักที่กำลังทำการพิจารณา λp	123
ตารางที่ 5.9	ค่าความแข็งแรงและสปีชีส์เคาท์ของประชากรย่อย	124
ตารางที่ 5.10	การคัดลอกสตริงคำตอบ y_i และสตริงคำตอบชั่วคราว z_i	125
ตารางที่ 5.11	อัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของแต่ละสตริงคำตอบ	125

ตารางที่ 5.12 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการ อพยพ.....	127
ตารางที่ 5.13 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_6 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการ อพยพ.....	128
ตารางที่ 5.14 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 3	129
ตารางที่ 5.15 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_6 ในสปีชีส์เคาท์ 3	129
ตารางที่ 5.16 สตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์	129
ตารางที่ 5.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของประชากร.....	130
ตารางที่ 5.18 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการนอร์มัลไลซ์แล้ว.....	130
ตารางที่ 5.19 การคูณกันของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักของจุด λp ที่กำลัง พิจารณา.....	131
ตารางที่ 5.20 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละ สตริงคำตอบ.....	131
ตารางที่ 5.21 การแทนที่สตริงคำตอบหลังการพัฒนาคำตอบด้วยการอพยพลงในจุดของค่าถ่วง น้ำหนัก λ_1	132
ตารางที่ 5.22 การเก็บคำตอบที่มีการแทนที่เข้าในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหา คำตอบ (Elitist).....	133
ตารางที่ 5.23 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3 ...	134
ตารางที่ 5.24 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงที่คูณกับค่าถ่วง น้ำหนักของ λ_3	134
ตารางที่ 5.25 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_7 ...	134
ตารางที่ 5.26 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงที่คูณกับค่าถ่วง น้ำหนักของ λ_7	134
ตารางที่ 5.27 การแทนที่สตริงคำตอบหลังทำการพัฒนาคำตอบ และค่าวัตถุประสงค์ ในจุด ข้างเคียง	135
ตารางที่ 5.28 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของประชากร.....	135

ตารางที่ 5.29	การมิวเตชันสตริงคำตอบ $z'6$	136
ตารางที่ 5.30	สตริงคำตอบ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ $z'6$	136
ตารางที่ 5.31	การปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของประชากร	136
ตารางที่ 5.32	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ $z'6$ และสตริงคำตอบในกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว	137
ตารางที่ 5.33	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วคุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ $\lambda 1$	137
ตารางที่ 5.34	การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่จุดค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda 1$	138
ตารางที่ 5.35	การแทนที่สตริงคำตอบที่ทำมิวเตชัน $z6'$ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda 1$ ที่กำลังพิจารณา	138
ตารางที่ 5.36	การเก็บคำตอบที่มีการแทนที่เข้าในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist).....	138
ตารางที่ 5.37	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วคุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ $\lambda 4$	139
ตารางที่ 5.38	การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่ค่าถ่วงน้ำหนักของ $\lambda 4$	140
ตารางที่ 5.39	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วคุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ $\lambda 6$	140
ตารางที่ 5.40	การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่ค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda 6$	140
ตารางที่ 5.41	การแทนที่สตริงคำตอบที่ทำมิวเตชัน $z6'$ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในจุดข้างเคียง	140
ตารางที่ 5.42	การหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร.....	141
ตารางที่ 5.43	คำตอบที่ได้จากการพัฒนาของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO.....	142
ตารางที่ 5.44	การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting.....	143
ตารางที่ 5.45	คำตอบที่ดีที่สุดของ อัลกอริทึม MOEA/D-BBO.....	144
ตารางที่ 6.1	รายละเอียดของปัญหาที่นำมาศึกษาในงานวิจัย	146

ตารางที่ 6.2	จำนวนเจเนอเรชันของโจทย์ปัญหา.....	148
ตารางที่ 6.3	จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D	152
ตารางที่ 6.4	ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม BBO	152
ตารางที่ 6.5	ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO.....	153
ตารางที่ 6.6	โจทย์ปัญหาสำหรับทดสอบพารามิเตอร์.....	153
ตารางที่ 6.7	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ	155
ตารางที่ 6.8	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ	158
ตารางที่ 6.9	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ	161
ตารางที่ 6.10	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม BBO	166
ตารางที่ 6.11	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม MOEA/D.....	167
ตารางที่ 6.12	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม MOEA/D-BBO.....	167
ตารางที่ 6.13	คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 30 หน่วยเวลา	168
ตารางที่ 6.14	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 30 หน่วยเวลา	169
ตารางที่ 6.15	คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 36 หน่วยเวลา	169
ตารางที่ 6.16	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 36 หน่วยเวลา	170
ตารางที่ 6.17	คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 42 หน่วยเวลา	171
ตารางที่ 6.18	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 42 หน่วยเวลา	171
ตารางที่ 6.19	สรุปจำนวนสถานีงานและจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในการ แก้ปัญหาตัวอย่าง	174
ตารางที่ 6.20	สรุปผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆในการแก้ปัญหาตัวอย่าง	175

ตารางที่ 6.21	สรุปผลภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านต่างๆในแต่ละอัลกอริทึม	176
ตารางที่ ก.1	ลำดับก่อนหลังของชิ้นงานของ Mitchell (1957) ขนาด 21 ชิ้นงาน	187
ตารางที่ ก.2	ลำดับก่อนหลังของชิ้นงานของ Jackson (1956) ขนาด 11 ชิ้นงาน	187
ตารางที่ ก.3	ลำดับก่อนหลังของ Roszige (1992) ขนาด 25 ชิ้นงาน	188
ตารางที่ ก.4	ลำดับก่อนหลังของ Warnecke (1971) ขนาด 58 ชิ้นงาน	188
ตารางที่ ก.5	ลำดับก่อนหลังของ Wee-mag (1981) ขนาด 75 ชิ้นงาน	189
ตารางที่ ก.6	ลำดับก่อนหลังของ Tonge (1960) ขนาด 70 ชิ้นงาน	191
ตารางที่ ก.7	ลำดับก่อนหลังของ Arcus1 (1965) ขนาด 83 ชิ้นงาน	192
ตารางที่ ก.8	ลำดับก่อนหลังของ Arcus2 (1965) ขนาด 111 ชิ้นงาน	194
ตารางที่ ก.9	ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชิ้นงาน	196
ตารางที่ ก.10	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 1 ขนาด 32 (21-11) ชิ้นงาน	202
ตารางที่ ก.11	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 2 ขนาด 46 (21-25) ชิ้นงาน	203
ตารางที่ ก.12	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 3 ขนาด 133 (58-75) ชิ้นงาน	204
ตารางที่ ก.13	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 4 ขนาด 145 (75-70) ชิ้นงาน	207
ตารางที่ ก.14	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 5 ขนาด 194 (83-111) ชิ้นงาน	211
ตารางที่ ก.15	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน	215
ตารางที่ ก.16	เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน	228
ตารางที่ ข.1	คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 46 ชิ้นงาน รอบเวลา การผลิต 34 หน่วยเวลา	242
ตารางที่ ข.2	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 46 ชิ้นงาน รอบเวลาการ ผลิต 34 หน่วยเวลา	242
ตารางที่ ข.3	คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 46 ชิ้นงาน รอบเวลา การผลิต 42 หน่วยเวลา	243
ตารางที่ ข.4	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 46 ชิ้นงาน รอบเวลาการ ผลิต 42 หน่วยเวลา	243

ตารางที่ ข.31 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลา
การผลิต 5400 หน่วยเวลา 254

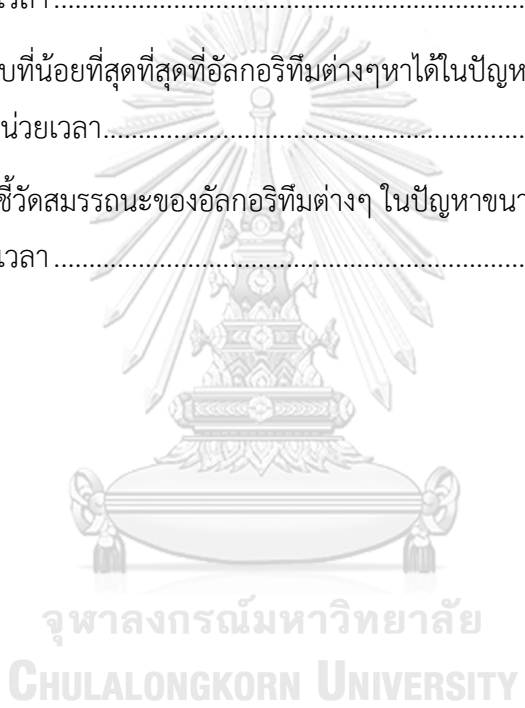
ตารางที่ ข.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลา
การผลิต 5400 หน่วยเวลา 255

ตารางที่ ข.33 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบ
เวลาการผลิต 6480 หน่วยเวลา..... 255

ตารางที่ ข.34 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลา
การผลิต 6480 หน่วยเวลา 256

ตารางที่ ข.35 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบ
เวลาการผลิต 7776 หน่วยเวลา..... 256

ตารางที่ ข.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลา
การผลิต 7776 หน่วยเวลา 257



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	การจัดสมดุลงานสายการประกอบรูปตัวยูชานาน (Kucukkoc and Zhang, 2015).....	7
รูปที่ 1.2	สรุปภาพรวมของงานวิจัย.....	10
รูปที่ 2.1	สายการประกอบแบบชานาน.....	9
รูปที่ 2.2	สายการประกอบรูปตัวยู.....	10
รูปที่ 2.3	สายการประกอบรูปตัวยูชานาน.....	11
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบ.....	67
รูปที่ 3.2	แผนภาพการทำงานของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการ จำแนก.....	68
รูปที่ 3.3	การสลับสายพันธุ์ของสตริงคำตอบ.....	74
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม BBO (ณัฐชัย โยธาบริหาร, 2556).....	93
รูปที่ 4.2	วงล้อรูเล็ตสำหรับการสุ่มเลือกสตริงอพยพออก.....	96
รูปที่ 4.3	วงล้อรูเล็ตสำหรับการสุ่มเลือกสตริงคำตอบไปทำการมิวเตชัน.....	105
รูปที่ 5.1	การหาค่าความแข็งแรง (Fitness) ของสตริงคำตอบในประชากรย่อยที่กำลังพิจารณา... ..	113
รูปที่ 5.2	การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) สตริง คำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 และสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา....	115
รูปที่ 5.3	แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO.....	118
รูปที่ 5.4	วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงที่ไปทำการอพยพ.....	126
รูปที่ 6.1	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้าน Convergence ในปัญหา 32 ชั้นงาน.....	156
รูปที่ 6.2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้าน Spread ในปัญหา 32 ชั้นงาน.....	156
รูปที่ 6.3	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยร่วมทั้งสอง ด้วยวิธี Response Optimizer.....	157
รูปที่ 6.4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวชี้วัดด้าน Convergence ในปัญหา 145 ชั้นงาน.....	158

รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวชี้วัดด้าน Spread ในปัญหา 145 ชั้นงาน	159
รูปที่ 6.6 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ด้วยวิธี Response Optimizer	160
รูปที่ 6.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO กับตัวแปรตอบสนองด้าน Convergence ในปัญหา 32 ชั้นงาน	163
รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) Neighborhood กับ %Replace ของตัวชี้วัดด้าน Convergence	164
รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบคู่ลำดับระหว่างปัจจัย Neighborhood กับ %Replace ของตัวชี้วัดด้าน Convergence ของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ขนาดปัญหา 32 ชั้นงาน	164
รูปที่ 6.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO กับตัวแปรตอบสนองด้าน Spread ในปัญหา 32 ชั้นงาน	165
รูปที่ 6.11 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ด้วยวิธี Response Optimizer	166

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมต่างๆ มีการแข่งขันสูง ภาคอุตสาหกรรมจึงต้องจัดการการผลิตสินค้าให้ทันตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นการจัดสายการประกอบแบบทันเวลาพอดี (Just-in time) ของ Monden (1998) จะทำให้สามารถผลิตสินค้าได้ในปริมาณมาก และมีต้นทุนการผลิตต่ำ ซึ่งสิ่งสำคัญของระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี คือระบบมีความยืดหยุ่นสูง (Flexibility) พร้อมทั้งปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการของลูกค้า เนื่องจากพฤติกรรมของลูกค้ามีความต้องการที่หลากหลายมากขึ้น จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนสายการผลิต จากการผลิตสินค้าประเภทเดียว (Single Production) มาเป็นการผลิตแบบผสม (Mixed-Model Production) คือ หนึ่งสายการผลิต จะมีผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน 2 ชนิดหรือมากกว่า เข้าสู่สายการผลิตแบบปะปนกันโดยไม่มีรูปแบบ และในระหว่างการผลิตไม่มีการปรับตั้งเครื่องจักร ดังนั้นสายการประกอบที่มีลักษณะของการผลิตที่มีความหลากหลายในตัวผลิตภัณฑ์ จะเป็นสายการประกอบที่มีความสามารถในการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาได้ หรือสามารถเรียกว่า สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Line: MMAL)

และอีกสิ่งหนึ่งที่เป็นการปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ในปัจจุบันของอุตสาหกรรมต่างๆ สำหรับการจัดการต้นทุนและการผลิตให้ตอบสนองทันความต้องการของลูกค้า คือการออกแบบสายการประกอบ และการวางผังเครื่องจักร ให้เหมาะสม (Kucukkoc and Zhang, 2015) โดยสายการประกอบ (Assembly Line) นั้น เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน ที่ประกอบไปด้วย กลุ่มของสถานีงานที่จัดวางต่อเนื่องกัน และมีการเชื่อมโยงกันด้วยสายพานลำเลียงหรือระบบขนย้ายวัสดุอื่นๆ ที่คอยทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานระหว่างสถานีงาน โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะเริ่มถูกประกอบขึ้น ที่สถานีงานแรก และถูกส่งไปประกอบต่อในสถานีงานถัดๆ ไปในทุกรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) พร้อมกับเริ่มประกอบชิ้นงานใหม่อย่างต่อเนื่องในทุกๆ รอบเวลาการผลิตนี้เช่นกัน เมื่อแต่ละสถานีงานรับชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าเข้ามา ก็จะทำการประกอบชิ้นงานนั้นตามชิ้นงาน (Task) ที่ได้รับมอบหมาย ซึ่งใช้เวลารวมไม่เกินรอบเวลาการผลิต จากนั้นเมื่อสิ้นสุดรอบเวลาการผลิตแล้วก็จะส่งชิ้นงานดังกล่าวไปยังสถานีงานถัดไป พร้อมกับรับชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าเข้ามาประกอบตามชิ้นงานเดิม วนซ้ำเป็นวงจรเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ชิ้นงานแต่ละชิ้นเมื่อได้ผ่านการประกอบจากทุกสถานีงานแล้วจะกลายมาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จุดสิ้นสุดของสายการประกอบ ดังนั้นในการ ออกแบบ พัฒนาสายการประกอบ และการวางผังเครื่องจักรให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่างๆ จะต้องมีการจัดสรรชิ้นงาน

ให้กับสถานีงานต่างๆ ในปริมาณที่เท่าๆ กันเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดโดยที่ไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดต่างๆ เช่น รอบเวลาการผลิต ลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน เป็นต้น เรียกว่า การจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing) (ณัฐชัย โยธาภิบาล, 2556)

โดยในการจัดสมดุลสายการประกอบนั้นมีแนวคิดเริ่มแรกเป็นรูปแบบการจัดวางในแนวเส้นตรง หรือที่เรียกว่าสายการประกอบเส้นตรง (Straight Line) เพื่อให้ง่ายต่อการจัดสมดุลสายการประกอบ (Balancing Assembly Line) ต่อมาได้มีการพัฒนาสายการประกอบรูปแบบใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงรูปแบบการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และมีความยืดหยุ่นในการผลิต (Becker and Scholl, 2006) เช่น สายการประกอบรูปตัวยู (U-Shape Line) (Miltenburg and Wijngaard, 1994) ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากสายการประกอบเส้นตรง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดของเสียในการผลิตซึ่งสายการประกอบรูปตัวยู (U-Shape Line) นั้นสามารถประยุกต์ใช้กับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตอบสนองในด้านความยืดหยุ่นในการผลิต อีกทั้งยังทำให้พนักงานมีทักษะการทำงานที่หลากหลาย เนื่องจากการวางตัวของสายการประกอบรูปตัวยูสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ด้านหน้า (Front) ด้านข้าง (Side) และด้านหลัง (Back) โดยที่ด้านหน้าและด้านหลังจะมีความยาวเท่ากัน ซึ่งจากการวางตัวของสายการประกอบลักษณะนี้ ทำให้เกิดสถานีงานแบบใหม่ คือ สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) พนักงานจึงสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ ซึ่งเป็นจุดเด่นของสายการประกอบรูปตัวยู โดยถ้าชิ้นงานถูกจัดสรรให้สถานีงานทางด้านหน้า ชิ้นงานนั้นจะอยู่บนด้านหน้าของสายการประกอบ แต่ถ้าเกิดจากการเคลื่อนย้อนกลับ ชิ้นงานนั้นจะอยู่บนด้านหลังของสายการประกอบ และถ้าสถานีงานใดก็ตามมีทั้งชิ้นงานที่อยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ สถานีงานนั้นจะเรียกว่า สถานีงานจุดข้าม และสถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่งจะเรียกว่า สถานีงานปกติ จากลักษณะการจัดสรรชิ้นงานดังกล่าวทำให้การจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยู มีประสิทธิภาพมากขึ้น เวลาว่างงานลดลง และประหยัดพื้นที่ในการปฏิบัติงาน ต่อมาได้มีการพัฒนาสายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines) คือสายการประกอบเส้นตรงที่วางขนานกัน และมีพนักงานอยู่ระหว่างสายการประกอบเพื่อสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการประกอบ ซึ่งลักษณะการทำงานเช่นนี้สามารถจัดสรรชิ้นงานของสองสายการประกอบที่อยู่ติดกัน ลงในสถานีงานได้ จึงทำให้การดำเนินงานทั้งระบบอาศัยจำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบกับการดำเนินงานในลักษณะสายการประกอบเดี่ยวที่เป็น อิสระต่อกันจำนวนหลายๆ สาย (Gökçen et al., 2006) และสายการประกอบอีกประเภทคือ สายการประกอบสถานีงานขนาน (Parallel Workstation Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่ยอมให้มีหลายสถานีงานที่เหมือนกัน ตั้งแต่สองสถานีงานขึ้นไปอยู่บนสายการประกอบเดียวกัน โดยในแต่ละสถานีงานที่ทำงานขนานกันนั้น จะมีคนงานที่ทำงานของชิ้นงานที่เหมือนกันทุกประการไปพร้อมๆ กัน และเมื่อมีชิ้นงานเข้ามาสู่สถานีงานขนาน

ชิ้นงานก็จะถูกแจกจ่ายให้กับหนึ่งในสถานีงานขนานเหล่านั้นตามความเหมาะสม เช่น สถานีงานที่มีภาระงานน้อยที่สุด เป็นต้น สาเหตุหลักที่ต้องขนานสถานีงานเกิดจากการแข่งขันที่สูงขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ผู้ผลิตต้องลดรอบเวลาลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและเพิ่มผลผลิต ซึ่งการลดรอบเวลาลงนี้เอง อาจทำให้เวลาชิ้นงานที่มีค่าสูงที่สุดของผลิตภัณฑ์มีค่าเกินกว่ารอบเวลาที่กำหนดให้ (McMullen and Frazier, 1997)

ด้วยลักษณะเด่นของสายการประกอบรูปตัวยู คือ มีความยืดหยุ่นสูง ประหยัดพื้นที่ จำนวนสถานีงานลดลง และสามารถประยุกต์ใช้กับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้สายการประกอบรูปตัวยูถูกพัฒนาในรูปแบบสายการประกอบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากสายการประกอบรูปตัวยู (U-Shape Line) เป็นสายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีงานขนาน (U-Shape Assembly Line With Parallel Workstation) โดยนำรูปแบบสายการประกอบสถานีงานขนาน (Parallel Workstation Assembly Line) มาประยุกต์ใช้ คือ ถ้าสถานีงานไหนมีรอบเวลาการผลิตเกินรอบเวลาการผลิตที่กำหนด จะทำการเพิ่มสถานีงานขนานให้กับสถานีงานนั้น จึงทำให้สายการประกอบรูปแบบนี้มีประสิทธิภาพดีกว่า และเวลารอทำงานภายในสถานีงานลดลง แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่ คือ สถานีงานขนานที่เพิ่มมานั้นจะมีได้ไม่เกิน 1 สถานี (สุชาติดา คัดอ่าน, 2553) ด้วยข้อจำกัดนี้จึงได้มีการพัฒนารูปแบบสายการประกอบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ต่อมา Kucukkoc and Zhang (2015) ได้คิดค้นสายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Balancing of Parallel U-Shaped Assembly Lines) โดยนำแนวคิดสายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines) มาประยุกต์ใช้กับสายการประกอบรูปตัวยู (U-Shape Line) จึงเกิดสายการประกอบรูปตัวยู 2 สาย วางขนานกัน ซึ่งการจัดวางสายการประกอบเช่นนี้ ทำให้เกิดประโยชน์ในการมอบหมายงานไปยังสถานีงานระหว่างสายการผลิตด้านนอกและด้านใน หรือระหว่างคู่สายที่อยู่ติดกัน หรือเรียกว่า สถานีงานร่วม (Multi-Line Workstation) และยังสามารถมอบหมายงานไปยังสถานีงานระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบชั้นในหรือเรียกว่าสถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) อีกด้วย จึงทำให้ลดความจำเป็นในการใช้แรงงานลง ลดความจำเป็นในการจัดตั้งสถานีงาน ใช้สอยพื้นที่การผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และความสะดวกของภาระงานภายในสถานีงานมีการกระจายไปยังสถานีงานอย่าง เท่าเทียมกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Balancing of Parallel U-Shaped Assembly Lines) มีประสิทธิภาพดีกว่าในด้านการจัดสรรพนักงาน การเพิ่มทักษะการทำงานของพนักงาน และจำนวนสถานีงานน้อยกว่า สายการประกอบรูปตัวยู (U-Shape Line) เพียงสายเดียว แต่การแก้ปัญหาของสายการประกอบรูปตัวยูขนานของ Kucukkoc and Zhang (2015) นั้น เป็นการแก้ปัญหาเพียงวัตถุประสงค์เดียว มีลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบเพียงรูปแบบเดียว (Single Model) และวิธีที่ใช้ในการหาคำตอบอาจไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นงานวิจัยแรกสำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูขนาน ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการ

สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบรูปตัวยูชานานสำหรับผลิตภัณฑ์ผสม เพื่อให้เหมาะ กับรูปแบบการผลิตของอุตสาหกรรมในปัจจุบันที่เป็นการประกอบผลิตภัณฑ์แบบผสม (Mixed Model) ซึ่งการจัดสมดุสสายการประกอบนั้น ต้องพิจารณาองค์ประกอบและวัตถุประสงค์หลาย วัตถุประสงค์ เพื่อสามารถแก้ปัญหาของการจัดสมดุสสายการประกอบได้เหมาะสม แต่สิ่งที่ตามมาใน การแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือ ความยุ่งยากและความซับซ้อนของปัญหา ซึ่งการจัดสมดุส สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) ดังนั้นในการหาคำตอบที่ดี ที่สุด จึงต้องอาศัยฮิวริสติกมาช่วยในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีในระดับที่น่าพอใจหรือ อาจเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยมีวิธีการหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุสสาย การประกอบรูปตัวยู โดยประยุกต์ใช้วิธีเมเมติกอัลกอริทึมและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูง อนุภาคเชิงลบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของสายการประกอบรูปตัวยูที่มี สถานีงานชานาน (สุชาติ คัดอ่าน, 2553), วิธี Parallel U-line Heuristic:PUH สำหรับการจัดสมดุส สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบลักษณะรูปตัวยูชานาน (Kucukkoc and Zhang, 2015), (ณัฐชัย โยธาบริบาร, 2556) ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุสที่มี หลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบชานานผลิตภัณฑ์ผสม โดยได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์ ทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความสมดุลของ ภาระงานระหว่างสถานีงานสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของชั้นงานสูงที่สุด ผลที่ได้จากการทดลองแสดง ให้เห็นว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูก ครอบงำ II (NSGA-II) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) โดย เปรียบเทียบด้วยตัววัดสมรรถนะทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ ซึ่งหลายๆ ปัญหาที่ แท้จริงของโลกวมทั้งการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบรูปตัวยูชานานมีวัตถุประสงค์ มากกว่าสามวัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งกัน จึงมักจะมี ความกังวลและจะต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพไป พร้อม ๆ กันซึ่งจะเรียกกันทั่วไปว่าเป็นปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ (MaOPs) ดังนั้นวิธีที่ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหานี้คือการหาวิธีการที่จะลดจำนวนของวัตถุประสงค์ โดยรวม วัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งเข้ามาเป็นวัตถุประสงค์เดี่ยว (Brockhoff and Zitzler, 2009) แต่วิธีนี้ไม่ สามารถใช้ได้กับปัญหาในทางปฏิบัติ เป็นผลให้อัลกอริทึมชนิดใหม่ได้รับการพัฒนาที่เรียกว่าขั้นตอน วิธีวิวัฒนาการการเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ (MaOEA) หนึ่งใน MaOEAs ที่มีชื่อเสียงมาก ที่สุดคือวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) พัฒนาโดยZhang and Li (2007)

ซึ่งเป็นการจำแนกปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสเกลาร์และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานไปพร้อมกัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการแก้ปัญหาคำตอบที่รวมการปรับสมดุลสายการประกอบมาด้วยวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวคูณขนาน เพื่อนำหลักการปรับสมดุลสายการประกอบนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความหลากหลายในการผลิต เช่น ชนิด รูปแบบ ของผลิตภัณฑ์ ตามความต้องการของผู้บริโภค เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต ลดจำนวนพนักงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่โรงงานเมื่อมีการขยายกำลังการผลิต เป็นต้น โดยใช้วิธีการหาคำตอบคือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกประยุกต์รวมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (The Multi-Objective Evolutionary Optimisation Hybridised With The Biogeography-Based Optimisation Algorithm: MOEA / D-BBO) ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 1 (Type I Problem) คือเป็นการจัดสรรงานลงสถานีงานให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดรอบเวลาการทำงาน เพื่อให้ได้คำตอบที่ดี มีประสิทธิภาพ และลดเวลาในการหาคำตอบ โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด (Minimum Number Workstation) ทำให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด (Minimum Number of station) ทำให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และทำให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Work Unrelatedness)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการหาคำตอบแบบเมตาฮีริสติก (Meta Heuristic) มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก สำหรับการปรับสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวคูณขนานในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยมีดังนี้

1. ปัญหาคำตอบที่รวมการปรับสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีลักษณะสายการผลิตแบบตัวคูณขนานเป็นปัญหาประเภทที่มีการกำหนดรอบเวลาการผลิตมาให้ โดยมีวัตถุประสงค์ 4 วัตถุประสงค์ คือ

วัตถุประสงค์ที่ 1 :ทำให้จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด

วัตถุประสงค์ที่ 2 :ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์ที่ 3 :ทำให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

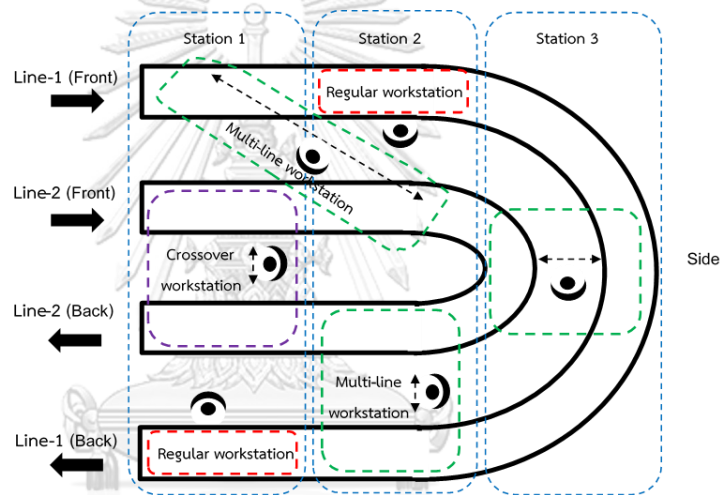
วัตถุประสงค์ที่ 4 :ทำให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

โดยในการแก้ปัญหาจะทำให้วัตถุประสงค์ ทั้ง 4 วัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อมๆกัน

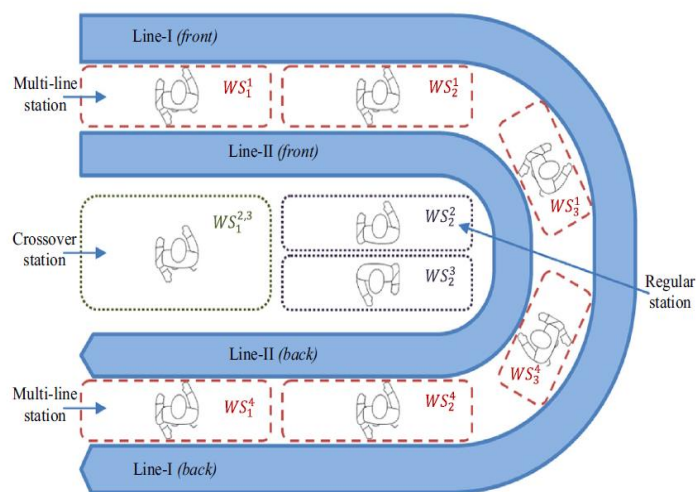
2. ข้อกำหนดในการแก้ปัญหาค่าการจัดสมดุลสายการประกอบ มีดังนี้

- 1) มีพนักงาน 1 คนต่อ 1 สถานีงาน
- 2) ไม่พิจารณาระยะเวลาการเดินทางของพนักงานในการย้ายมาทำชิ้นงานต่อไปภายในสถานีงาน
- 3) พนักงานมีทักษะหลากหลาย และสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการผลิต
- 4) พนักงานที่อยู่ระหว่างสายการประกอบด้านในและด้านนอก จะต้องถูกมอบหมายงานที่อยู่บนสายการผลิตด้านนอกอย่างน้อย 1 ชิ้นงาน
- 5) ในการพิจารณามอบหมายงาน งานสามารถถูกมอบหมายได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ โดยไม่ผิดลำดับความสัมพันธ์ของชิ้นงาน
- 6) ในการจัดสมดุลสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกำหนดเข้าสู่สายการประกอบด้านในหรือด้านนอกแล้ว ไม่สามารถข้ามสายการประกอบได้
- 7) ในการจัดชิ้นงานลงสถานีงาน จะจัดชิ้นงานลงสถานีงานหนึ่งให้ครบตามรอบเวลาการผลิตที่กำหนดก่อน แล้วจึงขึ้นสถานีงานใหม่
- 8) ชิ้นงานใดที่ถูกจัดสรรลงสถานีงานแล้วจะไม่ถูกเลือกซ้ำอีกครั้ง
- 9) ใน 1 สถานี (Station) มีพนักงานได้ไม่เกิน 4 คน หรือ 4 สถานีงาน ดังรูปที่ 1.1(ข)
- 10) ในการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูขนานในงานวิจัยนี้ จะจัดตามค่าของลำดับความสำคัญ (Priority) โดยเรียงจากค่าน้อยไปมาก
- 11) ในสถานีเดียวกัน ถ้ามีสถานีงานร่วมบนสายการประกอบด้านใดด้านหนึ่ง ด้านนั้นจะไม่มีสถานีงานประเภทอื่น เนื่องจากพนักงาน 2 คนไม่สามารถประกอบชิ้นงานพร้อมกันได้
- 12) สถานีงานร่วมและสถานีจุดข้ามสามารถเชื่อมกันได้ 1 สถานี ดังรูปที่ 1.1 (ก)
- 13) สถานีงานจุดข้าม (Crossover Station) จะมีเฉพาะสายการประกอบด้านในและจะไม่เกิดในสถานีงานสุดท้าย
- 14) ด้านข้าง (Side) ของสายการประกอบลักษณะยูขนาน จะมีสถานีงานบนสายการประกอบ 1 หรือ 2 ได้มากที่สุด 1 สถานีงาน

3. อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา คือ 1)อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) 2)อัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และ 3) อัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกประยุกต์รวมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (The Multi-Objective Evolutionary Optimisation Hybridised With The Biogeography-Based Optimisation Algorithm: MOEA / D-BBO)
4. ใช้โปรแกรม C++ ในการแก้ปัญหา
5. ปัญหาที่ใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบ มี 7 ปัญหา ดังตารางที่ 1.1



(ก) ลักษณะการแบ่งสถานี



(ข) ลักษณะการทำงานของพนักงานและการจัดวางสถานีงาน

รูปที่ 1.1 การจัดสมดุลบนสายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Kucukkoc and Zhang, 2015)

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของปัญหาที่นำมาศึกษาในงานวิจัย

No.	Line1			Line2				C รวม (ครน.)	
	Problem	C	M	MPS	Problem	C	M		MPS
1	Mitchell	15	3	2:1:2	Jackson	10	2	3:1	30
		18				12			36
		21				14			42
2	Mitchell	17	3	2:1:2	ROSZIEG	34	3	1:2:1	34
		21				42			42
		25				50			50
3	Warnecke	100	2	2:1	Wee-mag	100	3	1:1:1	100
		120				120			120
		144				144			144
4	Wee-mag	70	3	1:1:1	Tonge	210	2	3:1	210
		84				252			252
		101				303			303
5	Arcus1	4600	3	2:2:1	Arcus2	9200	2	1:1	9200
		5520				11040			11040
		6624				13248			13248
6	Scholl	3120	3	3:1:2	Arcus1	4680	3	2:2:1	9360
		3744				5616			11232
		4500				6750			13500
7	Scholl	2700	3	3:1:2	Arcus2	5400	2	1:1	5400
		3240				6480			6480
		3888				7776			7776

หมายเหตุ: M คือ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์, MPS คือ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด, C คือ รอบเวลาการผลิต (วินาที)

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยมีดังนี้

1. ลดความยุ่งยากและระยะเวลาในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับการจัดสมดุลการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม ที่มีลักษณะสายการประกอบแบบตัวยูขนาน
2. เป็นแนวทางการตัดสินใจในการจัดสถานีการทำงาน ของสายการประกอบรูปตัวยูขนานแบบผลิตภัณฑ์ผสมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

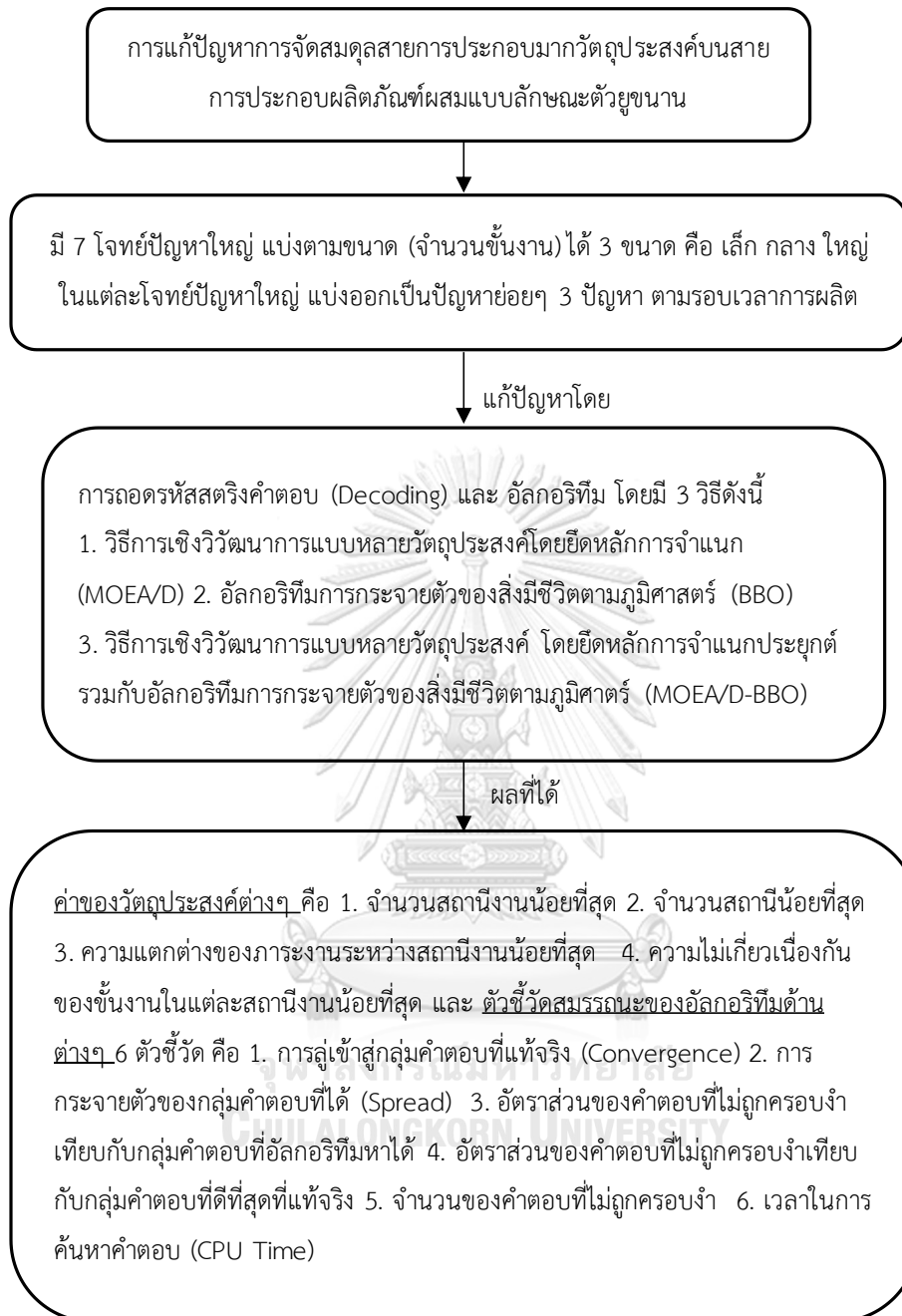
3. สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. คิดวิธีการถอดรหัสตรงคำตอบในการจัดสมดุลสายการประกอบลักษณะยูซนาน
3. คิดค้นวิธีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม BBO, MOEA/D และ MOEA/D-BBO สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะยูซนาน
4. เขียนโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ของอัลกอริทึม BBO, MOEA/D และ MOEA/D-BBO ด้วยภาษา C++
5. นำปัญหาตัวอย่างมาทดสอบด้วยโปรแกรมอัลกอริทึมที่เขียนไว้
6. ประเมินผลและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง
7. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

โดยภาพรวมของงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 สรุปภาพรวมของงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

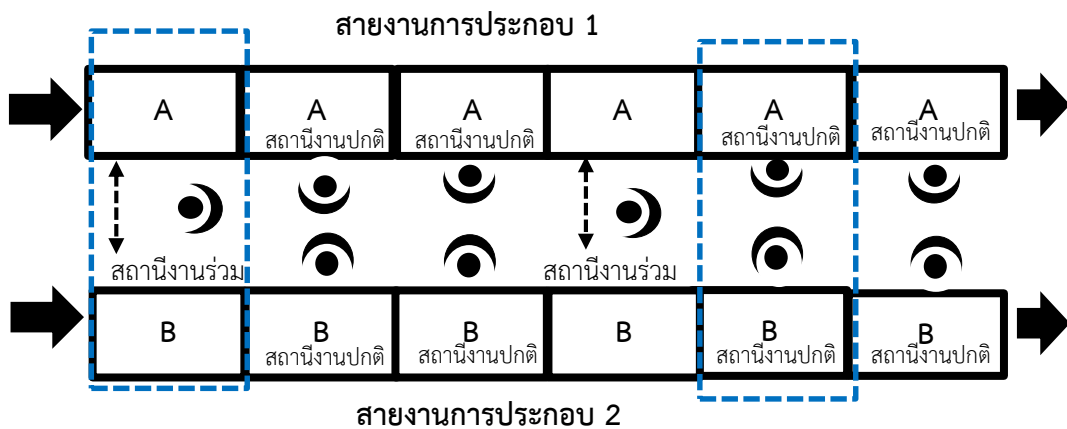
ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีลักษณะสายการผลิตแบบตัวขนาน เพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าที่เหมาะสม โดยมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 ลักษณะของสายการประกอบ

สายงานการประกอบ (Assembly Line) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนที่ภายในระบบประกอบด้วยกลุ่มของสถานีงาน (Work Stations) ที่จัดเรียงต่อเนื่องกัน โดยมีสายพานลำเลียงหรือระบบการขนย้ายวัสดุอื่นๆ ที่มีความใกล้เคียงกัน คอยทำหน้าที่ส่งต่อชิ้นงานระหว่างสถานีงาน ซึ่งแต่ละสถานีงานจะมีรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) เป็นตัวกำหนดระยะเวลาการประกอบชิ้นงาน จากสถานีงานหนึ่งไปยังอีกสถานีงานหนึ่ง

2.1.1 สายการประกอบขนาน

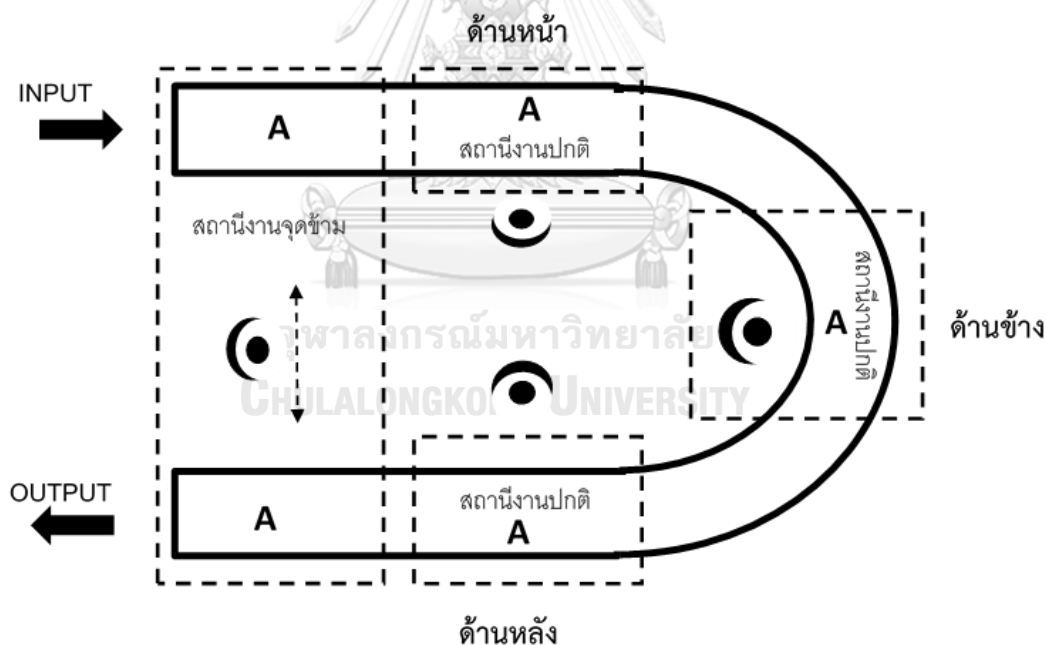
สายการประกอบขนาน (Parallel Assembly Line) หมายถึง ระบบผลิตที่ประกอบด้วยสายการประกอบเส้นตรงตั้งแต่ 2 สายการประกอบขึ้นไป ที่ถูกนำมาจัดเรียงในแนวขนานกัน และมีสถานีงานบนสายการประกอบ 2 แบบ คือ สถานีงานแยก และสถานีงานร่วม (คือ การยุบรวมคู่สถานีงานที่ขนานกันอยู่บางส่วนให้เป็นสถานีงานเดียวกัน) ซึ่งสถานีงานร่วมนี้ทำให้สายการประกอบขนานเกิดความยืดหยุ่นแก่ระบบ และยังลดเวลาเดินเปล่า ลดจำนวนสถานีงานที่ต้องใช้ ทำให้มีผลผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยสายการประกอบประเภทนี้สามารถที่จะนำมาใช้ในการประกอบผลิตภัณฑ์เพียงแบบเดียวหรือแบบผสมก็ได้ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สายการประกอบแบบขนาน

2.1.2 สายการประกอบรูปตัวยู

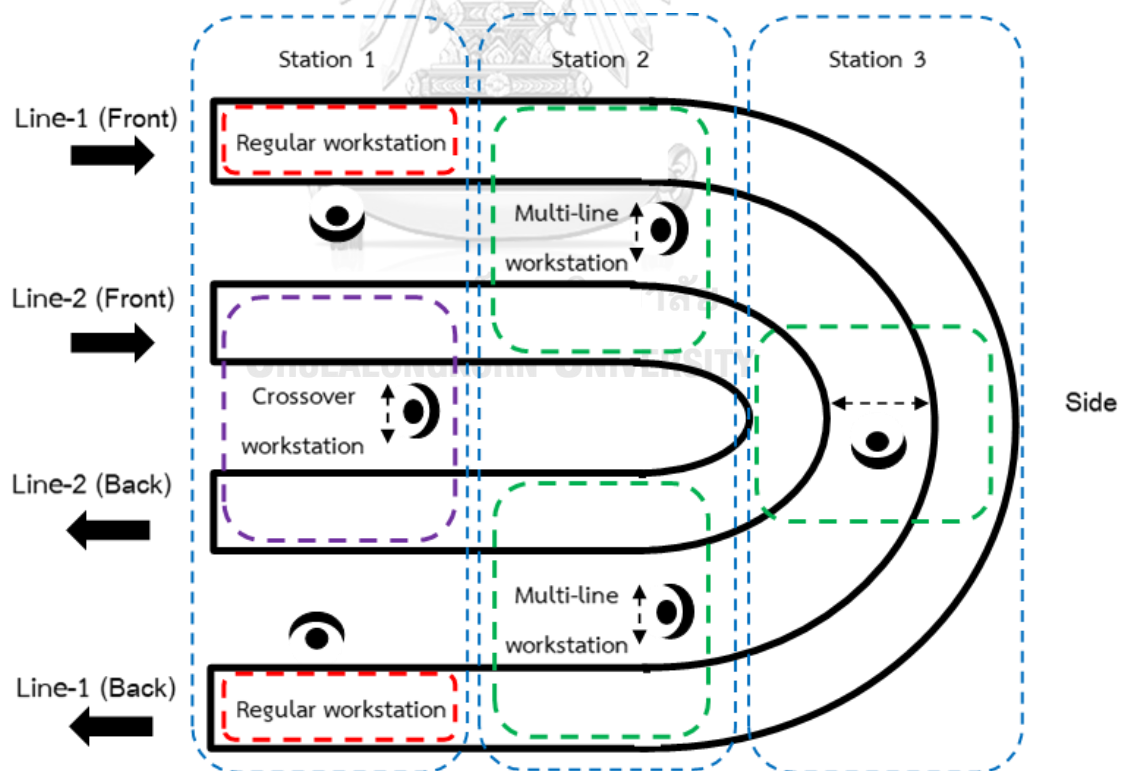
สายการประกอบรูปตัวยู (U-Shaped Assembly Line) สามารถแบ่งการวางตัวของสายการประกอบออกเป็น 3 ส่วน คือ ด้านหน้า (Front) ด้านข้าง (Side) และด้านหลัง (Back) โดยมีจุดที่นำวัตถุดิบเข้า (Input) และจุดที่นำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปออก (Output) อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกัน จึงทำให้มีทิศทางการทำงานในทิศทางไปข้างหน้า (Forward work) และทิศทางในการทำงานมาจากข้างหลัง (Backward work) ดังนั้นจึงแบ่งสถานีงานในสายการประกอบรูปตัวยูได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. สถานีงานปกติ (Regular Workstation) หมายถึง สถานีงานที่ชิ้นงานภายในสถานีงานมีทิศทางการทำงานไปในทิศทางเดียวกันตามลำดับความสัมพันธ์ของชิ้นงาน 2. สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) หมายถึง สถานีงานที่มีชิ้นงานที่ต้องทำอยู่ในด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบรูปตัวยู โดยพนักงานสามารถปฏิบัติงานที่ด้านหน้าและหมุนตัวกลับมาทำงานที่ด้านหลังได้ จึงทำให้สายการประกอบรูปตัวยูมีความยืดหยุ่นในการผลิต และมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าสายการประกอบทั่วไป ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สายการประกอบรูปตัวยู

2.1.3 สายการประกอบรูปตัวยูขนาน

สายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Parallel U-Shape Assembly Line) เป็นการรวมข้อดีของรูปแบบสายการประกอบแบบขนานและสายการประกอบรูปตัวยูเข้าด้วยกัน โดยแบ่งสถานีงานในสายการประกอบรูปตัวยูขนานได้เป็น 3 ประเภท คือ 1. สถานีงานปกติ (Regular Workstation) หมายถึง สถานีงานที่ชั้นงานภายในสถานีงานมีทิศทางการทำงานไปในทิศทางเดียวกันตามลำดับความสัมพันธ์ของชั้นงานบนสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่ง 2. สถานีงานร่วม (Multi-line Workstations) หมายถึง สถานีงานที่มีชั้นงานภายในสถานีงานอยู่บนสายการประกอบทั้งด้านในและด้านนอก (พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของตนเอง) 3. สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstations) หมายถึง สถานีงานที่มีชั้นงานที่ต้องทำอยู่บนด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบด้านในของรูปตัวยูขนาน โดยพนักงานสามารถปฏิบัติงานที่ด้านหน้าและหมุนตัวกลับมาทำงานที่ด้านหลังได้ จากสถานีงานร่วมที่เพิ่มเข้ามาและสถานีงานจุดข้ามซึ่งเป็นจุดเด่นของสายการประกอบตัวยู จึงทำให้สายการประกอบรูปตัวยูขนาน มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลมากขึ้น มีจำนวนสถานีงานน้อย พนักงานมีทักษะการปฏิบัติงานหลากหลายมากขึ้นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สายการประกอบรูปตัวยูขนาน

2.2 ประเภทของรูปแบบผลิตภัณฑ์บนสายงานการประกอบ

แบ่งเป็น 3 รูปแบบ (Håkansson et al., 2008) ดังนี้

2.2.1 สายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Line)

คือ สายการประกอบที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียว รูปแบบเดียว ดังรูปที่ 2.4

2.2.2 สายงานการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Line)

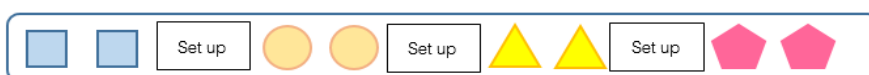
คือ สายการประกอบที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์สองชนิดขึ้นไป โดยผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีลักษณะการประกอบใกล้เคียงกัน โดยจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ละชนิด และเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของผลิตภัณฑ์ จะมีการปรับตั้งสายการประกอบใหม่ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.5

2.2.3 สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly line)

คือ สายการประกอบที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์สองชนิดขึ้นไป โดยผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกัน และระหว่างการผลิตจะไม่มี การปรับตั้งสายการประกอบ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.4 สายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Line)



รูปที่ 2.5 สายงานการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Line)



รูปที่ 2.6 สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly line)

2.3 หลักการจัดสมดุลสายการประกอบ

เป็นการจัดสรรชิ้นงานลงในสถานีงานต่างๆ ให้มีความสมดุลกัน โดยใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่มีให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (Ghosh and Gagnon 1989; Shtub and Dar-El 1989) ได้แบ่งหลักการจัดสมดุลสายการประกอบไว้ดังนี้

2.3.1 Single Model Deterministic

Single Model Deterministic เป็นการจัดสมดุลสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว และเวลาการทำงานของชิ้นงานถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน เนื่องจากความแปรผันของเวลาของชิ้นงานมีค่าน้อยมาก

2.3.2 Single Model Stochastic

Single Model Stochastic เป็นการจัดสมดุลสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว และเวลาการทำงานของชิ้นงานไม่คงที่ เนื่องจากมีความแปรผันของเวลาการดำเนินงาน เช่น การเสียของเครื่องจักร จึงต้องนำสิ่งเหล่านี้มาพิจารณาไปด้วย

2.3.3 Multi Model Deterministic

Multi Model Deterministic เป็นการจัดสมดุลสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ทีละชนิด และเวลาการทำงานของชิ้นงานถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน โดยการจัดสมดุลสายการประกอบนั้นจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ทีละชนิดซึ่งพิจารณาเพียงข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน เนื่องจากความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานในสายการประกอบหลายผลิตภัณฑ์มีลักษณะคล้ายกัน

2.3.4 Multi Model Stochastic

Multi Model Stochastic เป็นการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ทีละชนิด และเวลาการทำงานของชิ้นงานไม่คงที่

2.3.5 Mixed Model Deterministic

Mixed Model Deterministic เป็นการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์สองชนิดขึ้นไป โดยผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกัน และมีเวลาการทำงานของชิ้นงานถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน โดยการจัดสมดุลสายการประกอบนั้นจะพิจารณาข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานและอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่เข้าสู่สายการประกอบ

2.3.6 Mixed Model Stochastic

Mixed Model Stochastic เป็นการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์สองชนิดขึ้นไป โดยผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกัน และมีเวลาการทำงานของชิ้นงานไม่คงที่ จึงเป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีความยุ่งยากซับซ้อน

2.4 ประเภทของวัตถุประสงค้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ มีการแยกลักษณะของการพิจารณาข้อจำกัด และความแตกต่างของวัตถุประสงค์ ดังนี้

2.4.1 Simple Assembly Line Balancing Problems (SALBP)

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบอย่างง่าย เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรงที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์แบบเดียว แบ่งเป็น 4 ลักษณะดังนี้ (Becker and Scholl, 2006)

- 1) Type 1 (SALB-1) เป็นปัญหาการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)
- 2) Type 2 (SALB-2) เป็นปัญหาการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน เพื่อให้มีรอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดจำนวนสถานีงาน (Work Station)
- 3) Type E (SALB-E) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Type 1 และ Type 2 ร่วมกัน คือเป็นปัญหาการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานและรอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด
- 4) Type F (SALB-F) เป็นปัญหาที่มีความเป็นไปได้ (Feasibility) หรือ การหาทางออกของปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ เมื่อมีการกำหนดจำนวนสถานีงานและรอบเวลาการทำงาน

2.4.2 General Assembly Line Balancing Problems (GALBP)

ปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบทั่วไป เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีข้อจำกัด (Restriction) เพิ่มขึ้น (Becker and Scholl, 2006) เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับการรวมชิ้นงาน (Zoning Restriction) ข้อจำกัดของสถานีงานที่ต้องเป็นสถานีงานแบบขนาน (Parallel Station) หรือข้อจำกัดด้านขนาดวัสดุคงคลังของแต่ละสถานีงาน (Buffer Size) เป็นต้น โดยปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบทั่วไป ได้แก่ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem : MALBP) เป็นต้น

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) คือกระบวนการหาค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหา โดยคำตอบนั้นจะต้องไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่มีอยู่ ซึ่งการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนี้ จะประกอบด้วยเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (Vector of Decision Variables) ข้อจำกัด (Constraints) และเวกเตอร์ฟังก์ชัน (Vector Functions) หรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions) โดยการหาค่าตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่มากที่สุด

(Maximization) หรือน้อยที่สุด (Minimization) เนื่องจากการหาค่าตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น จะมีเกณฑ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าเพื่อหาค่าตอบที่ดีที่สุดจึงแบ่งปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ออกเป็น 3 รูปแบบตามการพิจารณาจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

- 1) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Optimization Problem : SOPs)
- 2) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi Objective Optimization Problem: MOPs) จะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 ถึง 3 วัตถุประสงค์ และทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน
- 3) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก (Many-Objective Optimization Problem: MaOPs) จะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 4 วัตถุประสงค์ขึ้นไปและทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน

การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในปัจจุบันนั้นเป็นการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก เนื่องจากธุรกิจต่างๆ จำเป็นต้องลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำที่สุด เช่นค่าแรง สถานที่ตั้ง การขนส่ง ขั้นตอนการผลิตที่ทำให้เกิดการสูญเปล่า ดังนั้นการจัดสมดุลสายการประกอบจึงเป็นปัญหาที่จะต้องทำการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมๆ กัน เพื่อทำการหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งการแก้ปัญหานี้ คือการหาเซตของคำตอบภายในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทุกฟังก์ชันที่กำหนดมีค่าที่ดีที่สุดพร้อม ๆ กัน โดยรูปแบบของปัญหาในการวิจัยครั้งนี้เป็นรูปแบบที่มีเป้าหมายให้ทุก ๆ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าที่น้อยที่สุดและวิธีการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2วิธีหลักๆคือ วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) และ วิธีการจำแนกค่าวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach)

1. วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach)

คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับคำตอบนั้น กล่าวอีกมุมหนึ่ง คือการชี้วัดคุณภาพของคำตอบ มีเป้าหมายเพื่อให้ทราบว่าแต่ละคำตอบที่พิจารณาเป็นคำตอบที่ดีหรือแย่มากเพียงใด เมื่อเทียบกับคำตอบอื่นๆ โดยจัดลำดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) คำตอบที่อยู่ใน Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front จะเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่กลุ่มคำตอบที่อยู่ในนี้จะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มคำตอบใดเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีกว่ากันหรือที่เรียกว่า Non-dominated Solution จากกลุ่มของคำตอบอื่น

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าที่น้อยที่สุด (Minimization) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังนั้นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์สามารถเขียนเป็น สมการได้ดังนี้ (2.1)

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)\} \quad (2.1)$$

โดย $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ คือคำตอบซึ่งเป็นเวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจขนาด n ในสเปซคำตอบ X ของปัญหาที่กำลังพิจารณา

○ คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

$f_i(x)$ คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i เมื่อ $i = \{1, 2, \dots, O\}$

ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ทำได้ด้วยการหาคำตอบ \bar{x} ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อมๆกัน ดังสมการ 2.2

$$\text{Minimize } f(\bar{x}) = \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_o(\bar{x})\} \quad (2.2)$$

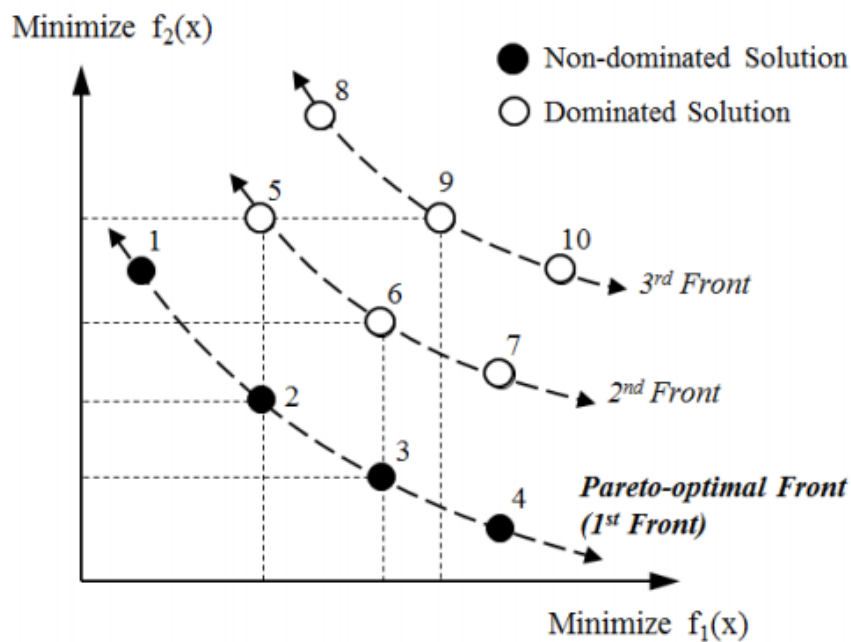
อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงแล้ววัตถุประสงค์ต่างๆ มักมีความขัดแย้งซึ่งกันและกัน กล่าวคือ เมื่อทำให้วัตถุประสงค์หนึ่งมีค่าที่เหมาะสมที่สุด อาจส่งผลให้อีกวัตถุประสงค์มีค่าที่ไม่เป็นที่พอใจ ยกตัวอย่างเช่นในปัญหาที่มี 2 วัตถุประสงค์ คำตอบที่ทำให้วัตถุประสงค์ที่ 1 มีความเหมาะสมที่สุดอาจทำให้วัตถุประสงค์ที่ 2 มีค่าที่ไม่ดี ขณะที่อีกคำตอบที่ทำให้วัตถุประสงค์ที่ 2 มีความเหมาะสมที่สุดกลับทำให้วัตถุประสงค์ที่ 1 มีค่าแย่กว่าที่ได้จากคำตอบที่ 1 เป็นต้น ดังนั้นจึงแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะมีคำตอบที่สมบูรณ์แบบเพียงคำตอบเดียวที่ทำให้ทุกๆ วัตถุประสงค์มีค่าที่เหมาะสม ที่สุดไปในเวลาเดียวกัน แต่คำตอบที่ดีที่สุดจะอยู่ในรูปของเซตคำตอบหลายๆ คำตอบที่ดีเทียบเท่ากัน ซึ่งเป็นคำตอบที่ไม่ถูกรองงำโดยคำตอบอื่นๆ ในสเปซคำตอบเลย

ในกรณีปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบทำให้มีค่าน้อยที่สุด ○ วัตถุประสงค์ คำตอบ x จะถือว่าครอบงำหรือดีกว่าคำตอบ y ($x < y$) ก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

$$f_i(x) \leq f_i(y) \text{ สำหรับทุกค่า } i \in \{1, 2, \dots, O\} \text{ และ}$$

$$f_i(x) < f_i(y) \text{ อย่างน้อยหนึ่งค่า } i \in \{1, 2, \dots, O\}$$

คำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นๆ ในสเปซคำตอบเลย เรียกว่า คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-Optimal Solution) โดยในการแก้ปัญหาอาจพบเพียงคำตอบเดียวหรือหลายคำตอบก็ได้ อย่างไรก็ตาม การค้นพบจำนวนหลายๆ คำตอบนั้นเป็นที่พึงพอใจกว่าการค้นพบเพียงคำตอบเดียว เนื่องจากทำให้ผู้แก้ปัญหาสามารถเลือกที่หลากหลายน่าสนใจกว่า ทั้งนี้ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตทั้งหมดเมื่อนำมารวมกันเป็นเซตจะเรียกว่า เซตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-Optimal Set) ขณะที่แนวเส้นโค้งที่ลากผ่านทุกจุดของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตบนสเปซวัตถุประสงค์ซึ่งทุกตำแหน่งบนเส้นนี้ข่มจุดของคำตอบที่เหลือทั้งหมด เรียกว่า ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-Optimal Front) (Chutima and Chimklai, 2012) รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างจุดของคำตอบต่างๆ บนสเปซวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ 2 วัตถุประสงค์ คำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่มีการข่มซึ่งกันและกัน และต่างก็ไม่ถูกข่มจากคำตอบใดเลย ดังนั้นคำตอบที่ 1-4 จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต



รูปที่ 2.7 รูปคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Goldberg, 1989)

เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตแล้ว สำหรับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) นั้นจะต้องทำการวัดระยะความหนาแน่น (Crowding Distance Approach) (Deb et al., 2002) ของกลุ่มคำตอบที่ได้ เพื่อให้คำตอบนั้นมีความหลากหลาย มีการกระจายตัวบน Front ในกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อย่างสม่ำเสมอโดยที่ไม่

เกาะกลุ่มกันอยู่ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งโดยเฉพาะ และลดโอกาสคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่เกาะกลุ่มกันจะถูกเลือกไปเป็นประชากรรุ่นพ่อแม่ในรอบถัดไปของกระบวนการพัฒนาคำตอบ โดยการคำนวณนั้นจะพิจารณาเฉพาะในกลุ่มของคำตอบบน Front เดียวกัน คำตอบที่มีค่า Crowding Distance สูงแสดงว่าคำตอบอยู่ในตำแหน่งที่มีการกระจายตัวของคำตอบดี ในทางตรงกันข้าม คำตอบที่มีค่า Crowding Distance ต่ำแสดงว่าคำตอบอยู่ในตำแหน่งที่มีการเกาะกลุ่มของคำตอบสูง โดยมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

1. กำหนดให้ l คือจำนวนคำตอบทั้งหมดบน Front ที่ $j, j = 1, \dots, R$ และ $x_{[i,k]}$ คือคำตอบที่ i ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ที่ได้รับการเรียงลำดับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก $i = \{1, \dots, l\}$ โดยคำตอบที่มีลำดับที่ 1 (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด) และลำดับสุดท้าย (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด) จะถูกกำหนดให้มีค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์ (Infinity) เสมอ นั่นคือ $cd_k(x_{[1,k]}) = \infty$ และ $cd_k(x_{[l,k]}) = \infty$ ส่วนคำตอบที่เหลือสามารถคำนวณหา ค่า Crowding Distance ได้จากสมการ

$$cd_k(x_{[i,k]}) = \frac{f_k(x_{[i+1,k]}) - f_k(x_{[i-1,k]})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \quad (2.3)$$

เมื่อ $f_k(x_{[i+1,k]})$ และ $f_k(x_{[i-1,k]})$ คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบ

$x_{[i+1,k]}$ และ $x_{[i-1,k]}$ ตามลำดับ

f_k^{max} และ f_k^{min} คือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของ

กลุ่มคำตอบบน Front ตามลำดับ

2. ค่า Crowding Distance ของคำตอบ x คำนวณได้จากผลรวมของ Crowding Distance ทุก k ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการ

$$cd(x) = \sum_{k=1}^K cd_k(x_{[i,k]}) \quad (2.4)$$

2. วิธีการจำแนกค่าวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach)

วิธีการที่ใช้แก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยใช้หลักการจำแนกมีหลากหลายวิธี แต่ในงานวิจัยของ (Zhang and Li, 2007) ได้นำเสนอไว้ 3 วิธีดังต่อไปนี้ 1. วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weighted-Sum Approach) 2. วิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) 3. วิธีแยกขอบเขตและลงโทษ (Penalty-Based Boundary Intersection Approach)

ในวิจัยนี้จะใช้เพียงวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพราะเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการจัดการกับปัญหาที่เป็น Nonconvex Pareto Front และมีหลักการที่สามารถคำนวณที่ง่าย โดยมีสูตรตั้งสมการที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่งเป็นกรณีการหาคำตอบที่น้อยที่สุด (Minimize) และการหาคำตอบที่มากที่สุด (Maximize) ตามลำดับ

$$\text{minimize } g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq O} \{\lambda_{pi} |f_i(X) - z_i^*|\} \quad (2.5)$$

$$\text{maximize } g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq O} \{\lambda_{pi} |f_i(X) - z_i^*|\} \quad (2.6)$$

เมื่อ z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i โดย $i = 1, 2, \dots, O$

กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด $z_i^* = \min\{f_i(X)\}$

กรณีหาค่าของคำตอบที่มากที่สุด $z_i^* = \max\{f_i(X)\}$

λ_{pi} คือ ค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p โดย $p = 1, 2, \dots, P$ ของวัตถุประสงค์ i

โดย $\sum_{i=1}^O \lambda_{pi} = 1 \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$

O คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

P คือ จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือประชากรของสตริงคำตอบ

$g(x|\lambda_p, z^*)$ คือ ผลต่างที่มีค่ามากที่สุดของค่าวัตถุประสงค์ i กับค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i ที่ทำการถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของวัตถุประสงค์ i

ซึ่งการกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Lambda Set) หรือจำนวนของสตริงคำตอบ (Population Size) จะขึ้นอยู่กับกำหนดจำนวนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ ซึ่งมีสูตรคำนวณตามสมการที่ 2.7

$$\text{lambda set} = C_{O-1}^{H+O-1} \quad (2.7)$$

เมื่อ H คือ สัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์

โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะมีช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนี้ $\left\{\frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H}\right\}$

ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ $H+1$

ตัวอย่างการคำนวณ Number of Population

กำหนดให้ $O = 4$, $H = 2$

$$\text{lambda set} = C_{4-1}^{2+6-1} = C_3^5 = 10$$

ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีค่าดังต่อไปนี้ $\left\{\frac{0}{2}, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}\right\}$ คือ 0, 0.5 และ 1

โดยแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีค่าดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์

p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	1	0	0	0
2	0.5	0.5	0	0
3	0.5	0	0.5	0
4	0.5	0	0	0.5
5	0	1	0	0
6	0	0.5	0.5	0
7	0	0.5	0	0.5
8	0	0	1	0
9	0	0	0.5	0.5
10	0	0	0	1

วัตถุประสงค์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้แก่กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของสายการประกอบ และกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับปริมาณภาระงานในแต่ละสถานงาน จะถูกนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้จำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งการประเมินผลแต่ละวัตถุประสงค์จะทำการประเมินไปพร้อมๆกัน โดยวัตถุประสงค์ทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1: ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด (Number of Workstation : N_W)

คือการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงานให้เต็มหรือใกล้เคียงรอบเวลาการผลิตมากที่สุดเพื่อลดเวลาสูญเสียเปล่า หรืออาจหมายถึงจำนวนพนักงานที่ใช้ในระบบการผลิตน้อยที่สุดดังสมการที่ 2.8 กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การทำให้ค่าจ้างพนักงานมีค่าต่ำที่สุดนั่นเอง

$$\text{Minimize : } N_W \quad (2.8)$$

วัตถุประสงค์ที่ 2: ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด (Number of Station : N_S)

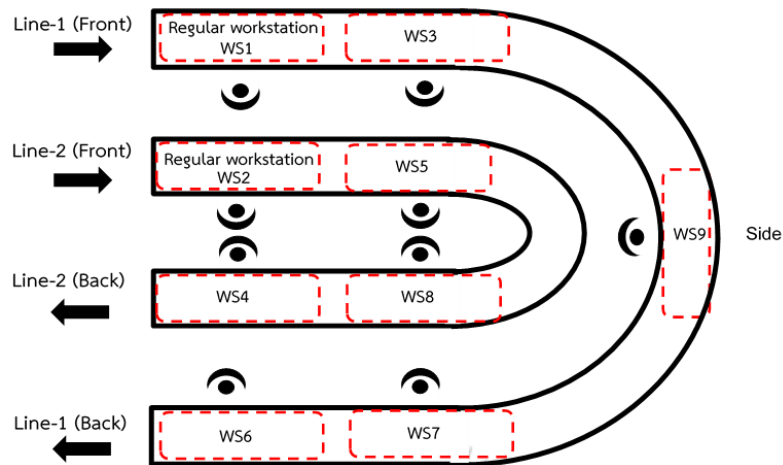
สายการประกอบแบบขนานหลายๆ สายการประกอบที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากัน อาจมีความยาวที่ไม่เท่ากันก็ได้ ดังนั้น นอกจากจะจัดสมดุลโดยมุ่งเน้นให้สายการประกอบมีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุดแล้ว จึงกำหนดให้มีวัตถุประสงค์ในการทำให้สายการประกอบมีจำนวนสถานี (Number of Station:) น้อยที่สุดด้วย ดังสมการที่ 2.9 เพื่อให้การจัดสมดุลสายการประกอบนั้นมีขนาดสั้นที่สุด หรือทำให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุดนั่นเอง

$$\text{Minimize : } N_S \quad (2.9)$$

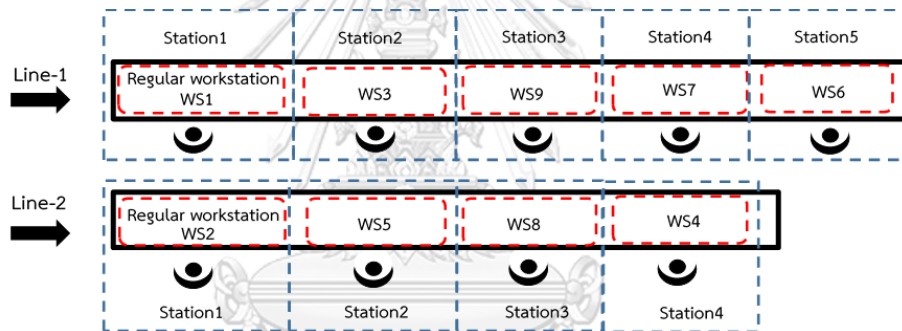
เนื่องจากการถอดรหัสสตริงคำตอบ (Decode) ของงานวิจัยนี้ การจัดสรรชิ้นงานลงสายการประกอบจะให้ความสำคัญกับค่าลำดับความสำคัญ (Priority) เป็นอันดับแรก จึงทำให้คำตอบของการจัดสมดุลสายการประกอบที่ได้มีความหลากหลาย กล่าวคือ สายการประกอบนั้นอาจจะไม่ใช่สายการประกอบลักษณะยูชานานอย่างแท้จริง เช่น สถานีงานบนสายการประกอบนั้นเป็นสถานีงานประเภทสถานีงานร่วมทั้งหมด เท่ากับว่าสายการประกอบนี้คือสายการประกอบขนาน ไม่ใช่สายการประกอบลักษณะตัวยูชานาน ดังนั้นการนับจำนวนสถานีงานบนสายการประกอบลักษณะตัวยูชานานจึงแบ่งเป็น 4 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 สถานีงานบนสายการประกอบเป็นสถานีงานปกติทั้งหมด

เมื่อทำการจัดสมดุลแล้ว สายการประกอบยูชานานทั้ง 2 สายการประกอบมีเพียงสถานีงานปกติประเภทเดียว ซึ่งหมายความว่า คำตอบที่ได้ในการจัดสมดุลนี้เป็นการนำสายการประกอบเส้นตรง 2 เส้นมาวางขนานกันในลักษณะตัวยูชานานรูปที่ 2.8 ดังนั้นวิธีการของการนับจำนวนสถานี จะทำการยึดสายการประกอบดังกล่าวให้เป็นสายการประกอบเส้นตรง 2 เส้นที่ขนานกัน ดังรูปที่ 2.9 และทำการนับจำนวนสถานี



รูปที่ 2.8 สายการประกอบยูชานานที่มีเฉพาะสถานีงานปกติทั้งหมด



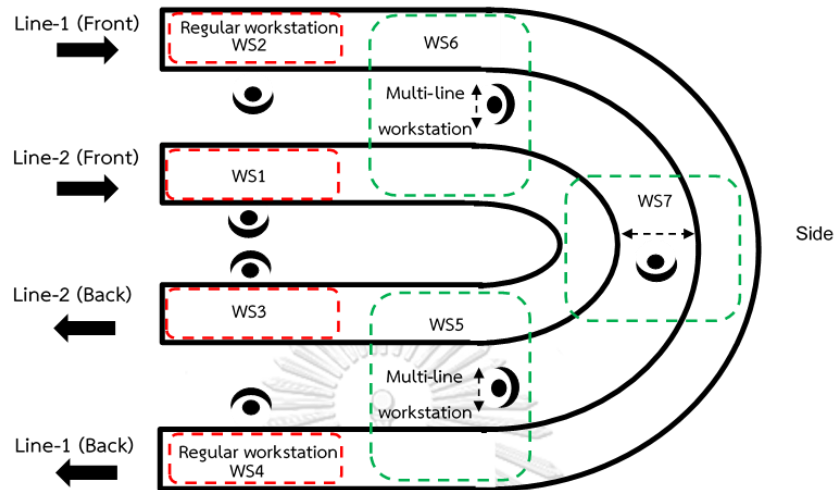
รูปที่ 2.9 สายการประกอบยูชานานที่ทำการยึดเป็นสายการประกอบเส้นตรงและการนับจำนวนสถานี

จากรูปที่ 2.9 เมื่อทำการยึดสายการประกอบทั้งสองแล้ว นับจำนวนสถานีบนสายการประกอบที่ 1 เท่ากับ 5 สถานี และจำนวนสถานีบนสายการประกอบที่ 2 เท่ากับ 4 สถานี โดยจำนวนสถานีในการจัดสมดุลสายการประกอบที่ได้ในลักษณะนี้จะเลือกสายการประกอบที่มีจำนวนสถานีมากที่สุด เป็นคำตอบของวัตถุประสงค์นี้

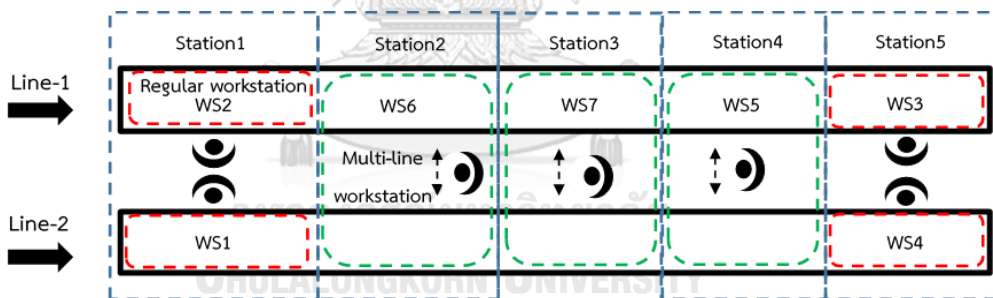
กรณีที่ 2 สถานีงานบนสายการประกอบเป็นสถานีงานปกติและสถานีงานร่วม

เมื่อทำการจัดสมดุลแล้ว สายการประกอบยูชานานทั้ง 2 สายการประกอบมีเพียงสถานีงานปกติและสถานีงานร่วม หมายความว่า คำตอบที่ได้ในการจัดสมดุลนี้เป็นการนำสายการประกอบขนานมาจัดวางในแนวโค้งให้เป็นลักษณะตัวยูดังรูปที่ 2.10 ดังนั้นวิธีการ

ของการนับจำนวนสถานี จะทำการยึดสายการประกอบดังกล่าวให้เป็นสายการประกอบขนานตามปกติ ดังรูปที่ 2.11 และทำการนับจำนวนสถานี



รูปที่ 2.10 สายการประกอบขบวนที่มีเฉพาะสถานีงานปกติและสถานีงานร่วม



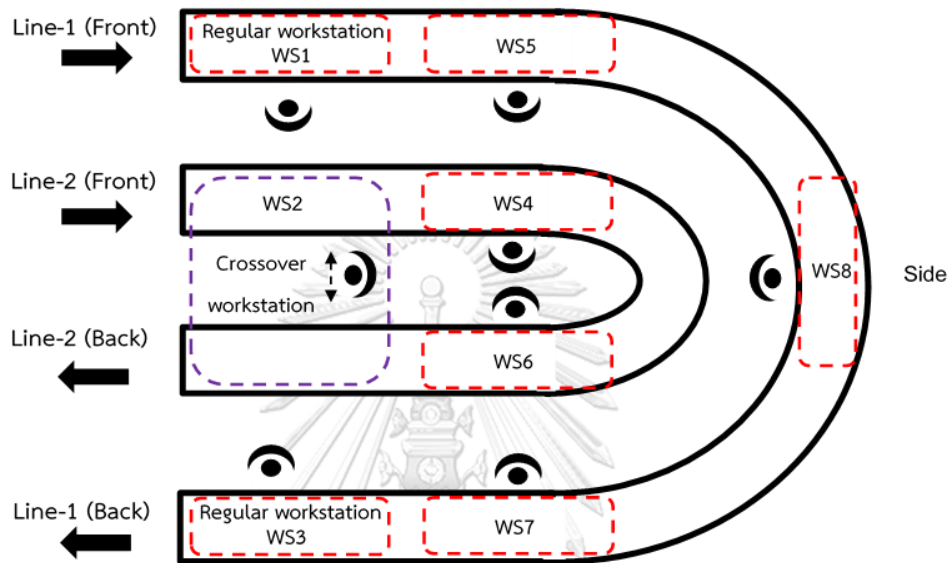
รูปที่ 2.11 สายการประกอบขบวนที่ทำการยึดเป็นสายการประกอบขนานแบบปกติและการนับจำนวนสถานี

จากรูปที่ 2.11 เมื่อทำการยึดสายการประกอบขนานให้อยู่ในแนวเส้นตรงแล้ว จึงทำการนับจำนวนสถานีบนสายการประกอบขนาน เท่ากับ 5 สถานี

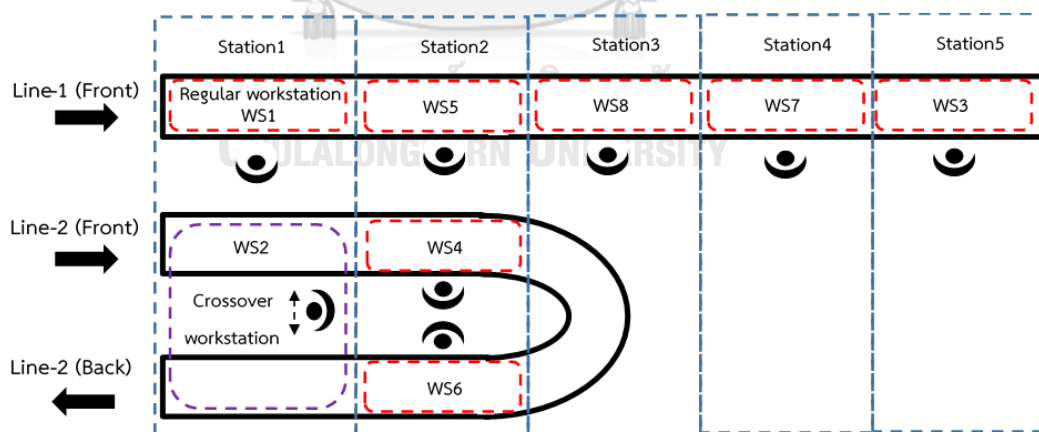
กรณีที่ 3 สถานีงานบนสายการประกอบมีเฉพาะสถานีงานปกติและสถานีจุดข้าม

เมื่อทำการจัดสมดุลแล้ว สายการประกอบขบวนทั้ง 2 สายการประกอบมีเพียงสถานีงานปกติและสถานีงานจุดข้าม หมายความว่า คำตอบที่ได้ในการจัดสมดุลนี้เป็นการนำ

สายการประกอบเส้นตรงมาจัดวางในแนวโค้งให้เป็นลักษณะตัวยูตามสายการประกอบด้านในที่เป็นสายการประกอบตัวยูดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นวิธีการของการนับจำนวนสถานี จะทำการยืดสายการประกอบด้านนอกให้เป็นสายการประกอบเส้นตรงตามปกติ ดังรูปที่ 2.13 และทำการนับจำนวนสถานี



รูปที่ 2.12 สายการประกอบยูชานานที่มีเฉพาะสถานีงานปกติและสถานีงานจุดข้าม

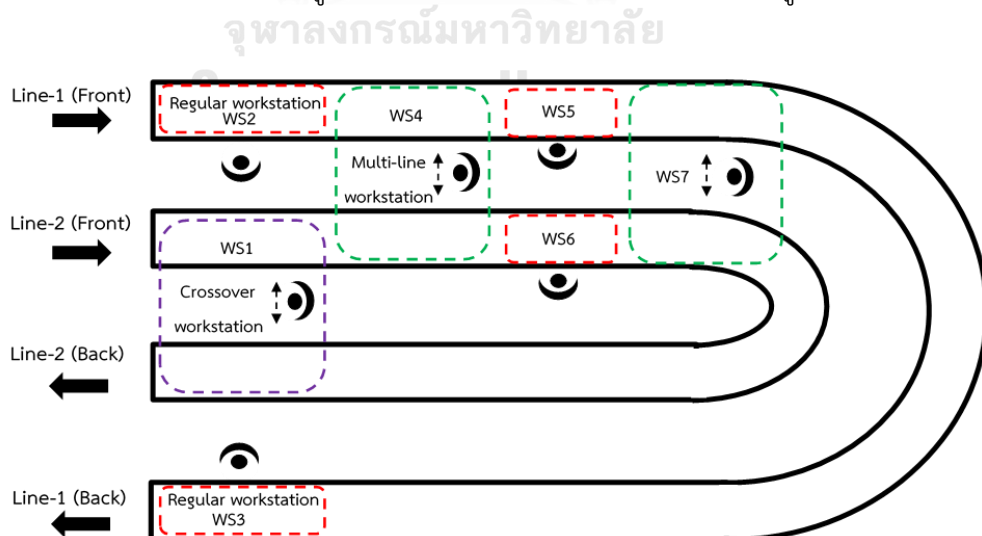


รูปที่ 2.13 สายการประกอบยูชานานที่ทำการยืดสายการประกอบด้านนอกเป็นสายการประกอบเส้นตรงและการนับจำนวนสถานี

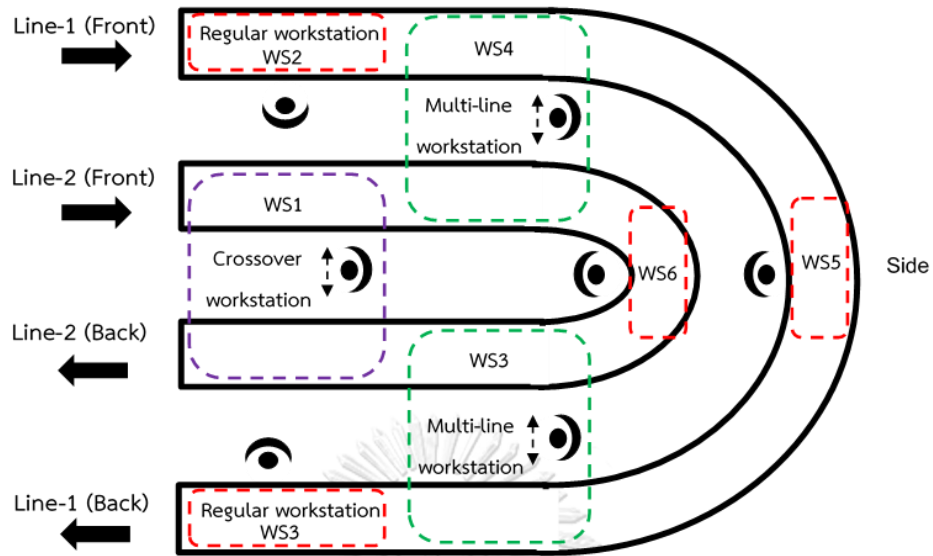
จากรูปที่ 2.13 เมื่อทำการยึดสายการประกอบด้านนอกให้อยู่ในแนวเส้นตรงแล้ว จึงทำการนับจำนวนสถานีบนสายการประกอบนี้ จะได้จำนวนสถานีที่แท้จริง เท่ากับ 5 สถานี

กรณีที่ 4 สถานีงานบนสายการประกอบมีสถานีงานปกติ สถานีจุดข้าม และสถานีงานร่วม

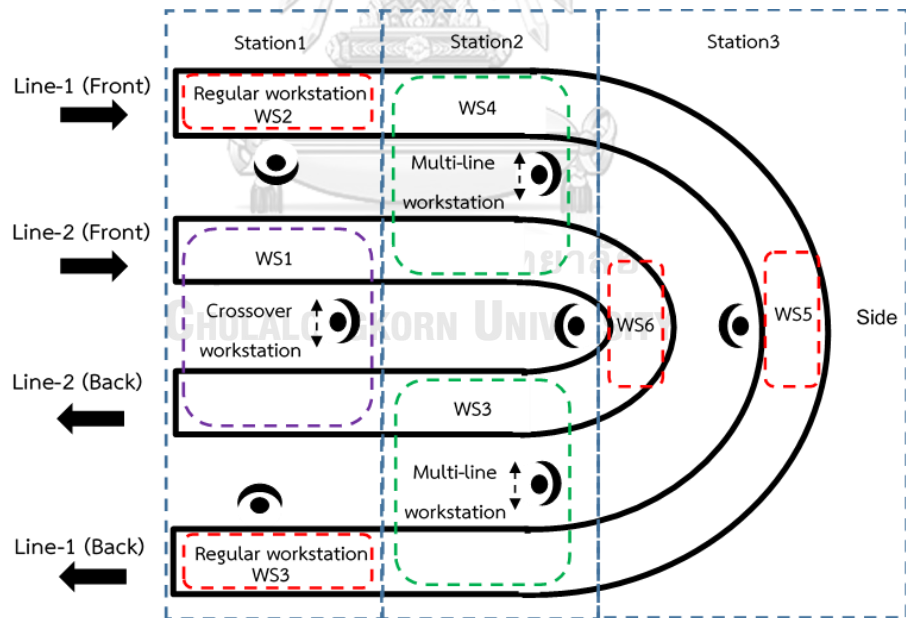
เมื่อทำการจัดสมดุลแล้ว สายการประกอบลักษณะยูชานานมีสถานีงานบนสายการประกอบครบทั้ง 3 ประเภท คือ สถานีงานปกติ สถานีงานจุดข้าม และสถานีงานร่วมซึ่งเป็นลักษณะของสายการประกอบยูชานานอย่างแท้จริง ดังนั้นการนับจำนวนสถานีสามารถนับได้ตามปกติไม่ต้องทำการยึดสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่งออก แต่เนื่องจากวิธีการในการถอดรหัสสตริงคำตอบของการจัดสมดุลสายการประกอบยูชานานสำหรับงานวิจัยนี้ มีอิสระในการจัดชั้นงานลงสายการประกอบแต่อยู่ภายใต้เงื่อนไข ค่าลำดับความสำคัญ (Priority) น้อยจัดลงก่อน ตำแหน่งที่ชั้นงานสามารถจัดลงได้ และอื่นๆที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงทำให้สตริงคำตอบบางคำตอบเมื่อทำการถอดรหัสคำตอบแล้ว สถานีงานที่ได้จะอยู่เพียงด้านใดด้านหนึ่งของสายการประกอบ กล่าวคือ สถานีงานส่วนใหญ่หรือทั้งหมดอยู่บนสายการประกอบลักษณะยูชานานที่ตำแหน่งด้านหน้าของทั้งสายการประกอบที่ 1 และ 2 หรือ สถานีงานส่วนใหญ่หรือทั้งหมดอยู่บนสายการประกอบลักษณะยูชานานที่ตำแหน่งด้านหลังของทั้งสายการประกอบที่ 1 และ 2 ซึ่งสตริงคำตอบนั้นอาจจะเป็นคำตอบที่ดี ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นจึงต้องมีการปรับการจัดเรียงสถานีงานใหม่ให้มาเต็มเต็ม ด้านทางเข้า และทางออกของสายการประกอบก่อน ดังรูปที่ 2.15 จึงทำการนับจำนวนสถานีได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.14 สายการประกอบยูชานานที่มีสถานีงานปกติ สถานีงานจุดข้าม และสถานีงานร่วม แต่สถานีงานเรียงไปด้านหน้าของสายการประกอบ



รูปที่ 2.15 สายการประกอบยูชนานที่มีการปรับการจัดเรียงสถานีงานใหม่ให้มาเต็มเต็ม ด้านทางเข้า และทางออกของสายการประกอบ



รูปที่ 2.16 การนับจำนวนสถานีของสายการประกอบยูชนานที่มีสถานีงานปกติ สถานีงานจุดข้าม และสถานีงานร่วม

จากรูปที่ 2.16 เมื่อทำการจัดเรียงสถานีงานใหม่แล้ว จึงทำการนับจำนวนสถานีบนสายการประกอบนี้ ได้จำนวนสถานีที่แท้จริง เท่ากับ 3 สถานี

วัตถุประสงค์ที่ 3: การทำให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimize Different Workload Between Workstations: B_b)

คือการทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมของสถานีงานต่างๆ มีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการผลิต และลดความแออัดบนสายการประกอบ รวมทั้งทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างพนักงาน (Kim et al., 2000) หรือ คือการทำให้เกิดความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานมากที่สุดซึ่งสามารถชี้วัดได้ด้วยค่า B_b ได้ โดยคำนวณจากสมการ (2.10) ที่ดัดแปลงมาจากสมการของ (Simaria and Vilarinho, 2009) ทั้งนี้ ค่าของ B_b จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยยิ่งมีค่าต่ำยิ่งแสดงถึงความสมดุลที่สูง ดังนั้น วัตถุประสงค์ในการทำให้สายการประกอบมีความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานมากที่สุด จึงเป็นการทำให้ค่า B_b มีค่าต่ำที่สุดนั่นเอง

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

- b คือ ประเภทของสถานีงาน ได้แก่
- 1 = สถานีงานปกติ (Regular Workstation)
 - 2 = สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation)
 - 3 = สถานีงานร่วม (Multi-line Workstation)

$S_{k,b}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตรวม กับเวลาชิ้นงานรวมที่สถานีงานที่ k ประเภท b

TAD คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (Total Absolute Deviation)

วัตถุประสงค์ที่ 4: การทำให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงาน มีค่าน้อยที่สุด (Minimize Index of Task Unrelatedness)

เนื่องจากพนักงานแต่ละคนในสายการประกอบนั้นมีทักษะการทำงานหลักที่ตน ถนัด และ มีทักษะอื่นๆ ที่ถนัดรองลงไป ดังนั้นหากจัดสรรให้ชิ้นงานในแต่ละสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากๆ กล่าวคือทำให้ชิ้นงานเหล่านั้นอาศัยทักษะการทำงานที่เกี่ยวข้องเพียงทักษะเดียวหรืออาจรวมถึงทักษะอื่นๆ อีกเล็กน้อย จะทำให้ผู้จัดการสายการประกอบสามารถจัดสรรพนักงานเข้าทำงาน ในสถานีงานต่างๆ ได้ตรงตามความถนัด ซึ่งย่อมสร้างความพึงพอใจให้กับพนักงานและ

ทำให้การดำเนินงานของสายการประกอบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ชั้นงานสองชั้นงานใดๆ จะถือว่ามีความสัมพันธ์กันก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมโยงกันโดยตรงใน แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลัง (Lee et al., 2001) การทำให้งานในสถานีนงานมีความสัมพันธ์กันมากๆ ทำได้โดยการจัดสรรให้ชั้นงานต่างๆ ในสถานีนงานเป็นชั้นงานที่ต้องทำให้เสร็จก่อนหน้าหรือทำตามหลังซึ่งกันและกัน โดยตรงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยความสัมพันธ์ของชั้นงานโดยรวมของสายการประกอบสามารถประเมินได้ด้วยตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของงาน (Index of Task Relatedness: ITR) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.11)

$$ITR = \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (2.11)$$

เมื่อ SN_k คือ จำนวนเครือข่ายของชั้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังโดยตรงในสถานีนงานที่ k ทั้งนี้ ITR คือค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ของงานทุกสถานีนงานบนสายการประกอบนั้นๆ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งยังมีค่ามากยิ่งขึ้นแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง ด้วยเหตุผลนี้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการทำให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุดจึง ทำการดัดแปลงตัวชี้วัด ITR ให้อยู่ในรูปของ $MITR$ (Modified Index of Task Relatedness) ซึ่งสามารถคำนวณได้สมการที่ 2.12 เพื่อให้การพิจารณาวัตถุประสงค์นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับวัตถุประสงค์อื่นๆ ดังนั้น วัตถุประสงค์ ระดับที่ 4 จึงเป็นการทำให้ $MITR$ มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } MITR = 1 - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (2.12)$$

2.6 การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน เป็นระบบการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบตัวขนานสองเส้นที่จัดวางขนานกันและได้รับการจัดสมดุลร่วมกัน โดยที่แต่ละสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งมีหน้าที่ผลิตสินค้าหลายรุ่นสลับไปมาได้อย่างอิสระ ไม่มีลำดับการผลิตที่เฉพาะเจาะจง และด้วยลักษณะของสายการประกอบตัวขนานนี้ ทำให้การจัดสมดุลสายการประกอบสามารถจัดได้ทั้งจากด้านหน้าไปด้านหลัง และจากด้านหลังมาด้านหน้า ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาในการจัดสมดุลจะต้องมีการพิจารณาแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังทั้งสองด้านพร้อมๆกันและพิจารณาเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆไปพร้อมกันด้วย

เนื่องจากแต่ละสายการประกอบมีการผลิตสินค้าหลายรุ่น ซึ่งสินค้าแต่ละรุ่นมีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังที่แตกต่างกันไป ดังนั้น แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของแต่ละสายการประกอบที่ใช้ประกอบการจัดสมดุล จะอยู่ในรูปของแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) ซึ่งเป็นแผนภาพตัวแทนของสายการประกอบที่สามารถใช้สื่อถึงแผนภาพของสินค้าทุกรุ่น ได้ในแผนภาพเดียว และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละชั้นงานอาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า เวลา ชั้นงานที่ใช้ในการจัดสมดุลจึงกำหนดให้อยู่ในรูปของเวลาชั้นงานร่วม (Combined Task Time) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักมาจากเวลาชั้นงานของสินค้าทุกรุ่น โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Sparling and Miltenburg, 1998)

2.6.1 การหาแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม และการหาเวลาชั้นงานร่วม

โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Sparling and Miltenburg, 1998)

กำหนดให้

M คือ จำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบเดียวผลิตภัณฑ์ผสม

D_m คือ ปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เมื่อ $m = \{1, \dots, M\}$

t_{im} คือ เวลาชั้นงาน i ของสินค้ารุ่น m เมื่อ $i = \{1, \dots, N\}$

$q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}$ คือ สัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เทียบกับปริมาณการผลิตรวมทุกรุ่น

$t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im}$ คือ เวลาชั้นงานร่วม i โดยเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักจากผลิตภัณฑ์ทุกรุ่น

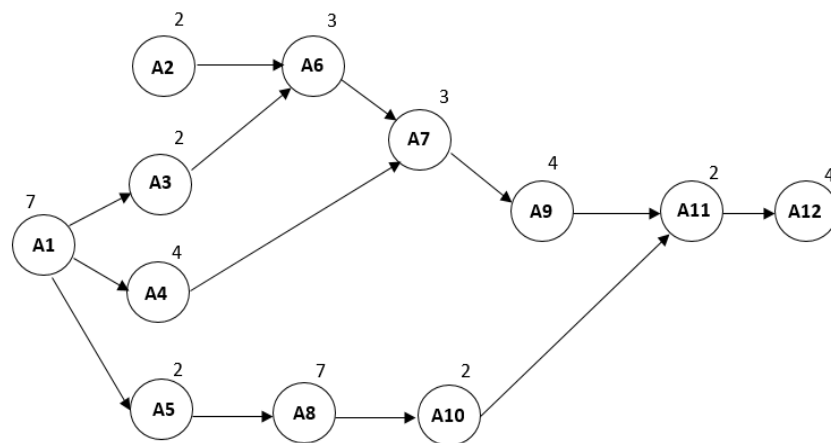
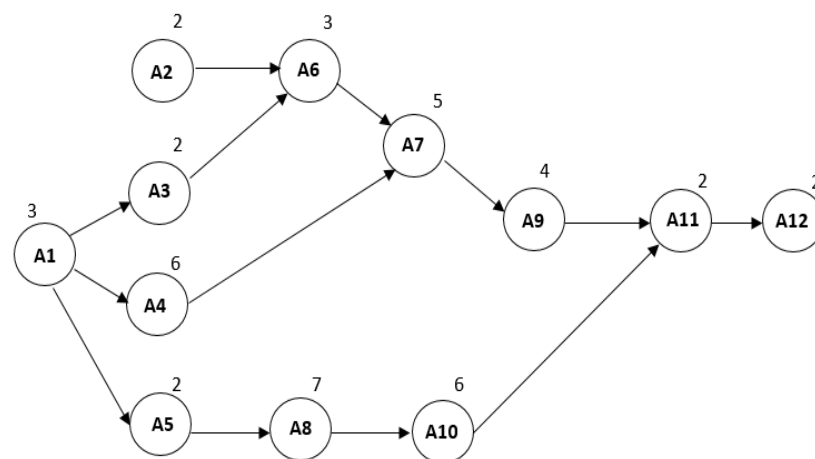
ในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีสายการประกอบลักษณะตัวยูขนานที่มีผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ถูกผลิตขนานกันอยู่ โดยสายการประกอบที่ 1 มีการผลิตสินค้าประเภท A จำนวน 2 รุ่น ได้แก่ รุ่น A_I และ A_{II} ซึ่งมีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.17 (ก) และ 2.17 (ข) ตามลำดับ และมีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 2.17 (ค) สัดส่วนการผลิต สินค้ารุ่น A_I (q_{A_I}) และ A_{II} ($q_{A_{II}}$) มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}$ เท่ากัน เวลาชั้นงานของสินค้าแต่ละรุ่นและเวลาชั้นงานร่วมแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2

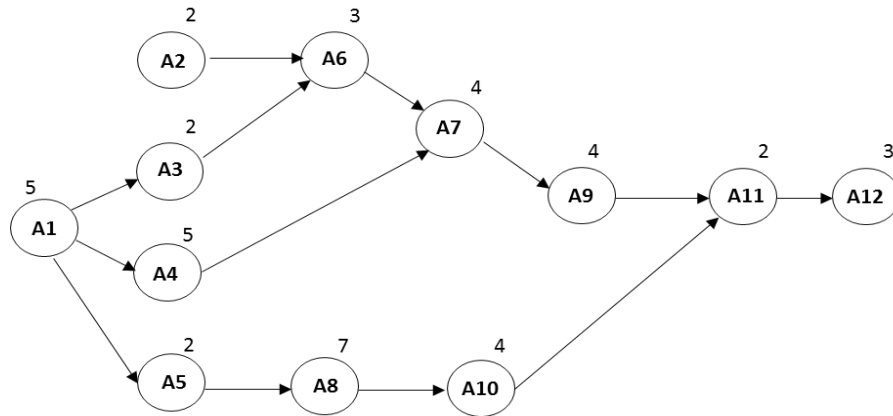
ตัวอย่างการคำนวณเวลาชั้นงานร่วมของชั้นงาน $A_1(t_{A_1})$

จากรูปที่ 2.17 (ก) และ 2.17 (ข) ชั้นงาน A_1 ของรุ่น $A_I = 7$ และ ของรุ่น $A_{II} = 3$ จะคำนวณค่า (t_{A_1}) ได้ดังนี้

$$t_{A_1} = \sum_{m=A_I}^{A_{II}} q_m t_{A_1,m} = q_{A_I} t_{A_1,A_I} + q_{A_{II}} t_{A_1,A_{II}} = \frac{1}{2}(7) + \frac{1}{2}(3) = 5$$

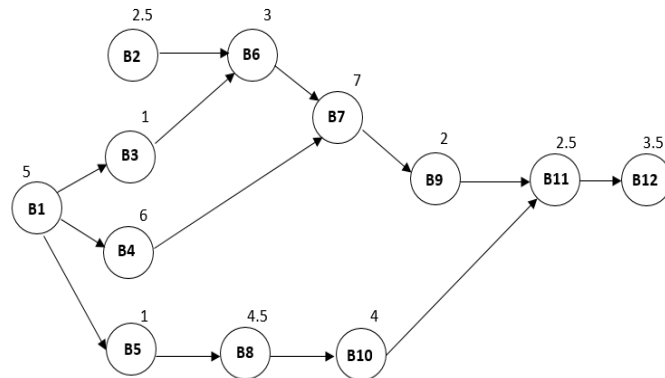
สำหรับสายการประกอบที่ 2 มีการผลิตสินค้าประเภท B จำนวน 2 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ รุ่น B_I และ B_{II} ซึ่งมีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.18 (ก) และ 2.18 (ข) ตามลำดับ และมีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังรวม ดังรูปที่ 2.18 (ค) สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น B_I (q_{B_I}) และ B_{II} ($q_{B_{II}}$) มีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่น และเวลาชิ้นงานรวมแสดงอยู่ในตารางที่ 2.3

(ก) รุ่น A_I(ข) รุ่น A_{II}



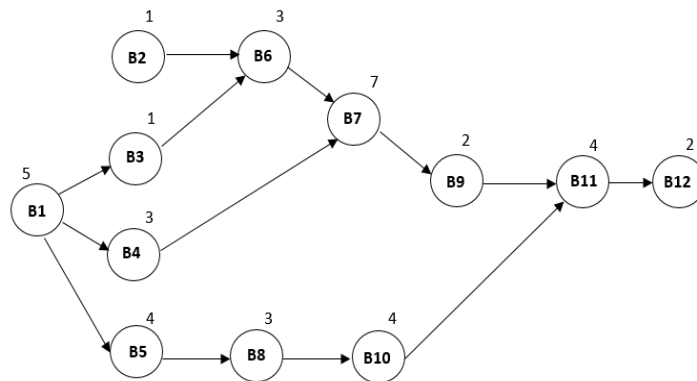
(ค) แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม

รูปที่ 2.17 แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A

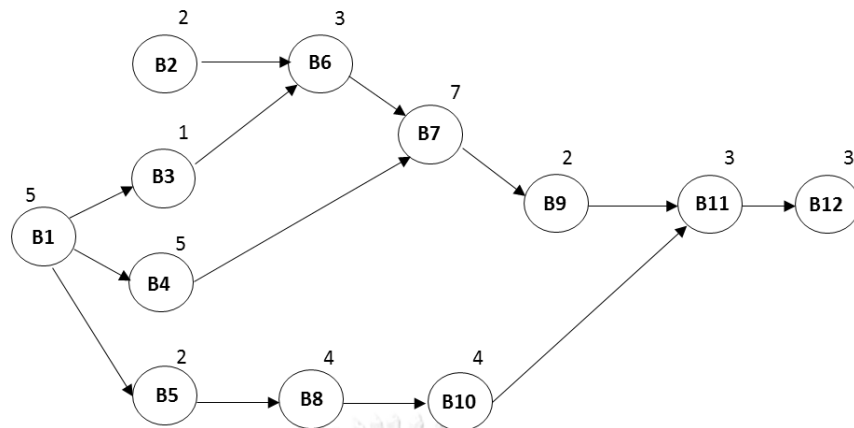


CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ก) รุ่น B_I



(ข) รุ่น B_{II}



(ค) แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม

รูปที่ 2.18 แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B

ตารางที่ 2.2 เวลาชั้นงานของผลิตภัณฑ์ A

ชั้นงาน	เวลาชั้นงาน		เวลาชั้นงานรวม ($q_{A_I} = q_{A_{II}} = \frac{1}{2}$)
	รุ่น A _I	รุ่น A _{II}	
A1	7	3	5
A2	2	2	2
A3	2	2	2
A4	4	6	5
A5	2	2	2
A6	3	3	3
A7	3	5	4
A8	7	7	7
A9	4	4	4
A10	2	6	4
A11	2	2	2
A12	4	2	3

ตารางที่ 2.3 เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ B

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน		เวลาชิ้นงานรวม ($q_{B_I} = \frac{2}{3}$), ($q_{B_{II}} = \frac{1}{3}$)
	รุ่นB _I	รุ่นB _{II}	
B1	5	5	5
B2	2.5	1	2
B3	1	1	1
B4	6	3	5
B5	1	4	2
B6	3	3	3
B7	7	7	7
B8	4.5	3	4
B9	2	2	2
B10	4	4	4
B11	2.5	4	3
B12	3.5	2	3

2.6.2 การคำนวณรอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time)

ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบลักษณะตัวยูขนาน สายการประกอบทั้งสองเส้นจะถูกจัดสมดุลร่วมกันภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกัน อย่างไรก็ตาม หากสายการประกอบทั้งสองมีรอบเวลาการผลิตไม่เท่ากัน จะอาศัยรอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time) ในการจัดสมดุล ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Gökçen et al., 2006)

- 1) คำนวณค่าคุณรวมน้อย (ค.ร.น.) ของรอบเวลาการผลิตของทั้งสองสายการประกอบ
- 2) นำค่า ค.ร.น. หารด้วยรอบเวลาการผลิตของสายการประกอบเส้นที่ 1 และ 2 จะได้ค่า D1 และ D2 ตามลำดับ
- 3) ปรับเวลาชิ้นงานรวมทั้งหมดของสายการประกอบที่ 1 และ 2 ด้วยการคูณกับค่า D1 และ D2 ตามลำดับ
- 4) ใช้ค่า ค.ร.น. เป็นรอบเวลาการผลิตร่วม โดยจะใช้รอบเวลาการผลิตร่วมนี้และเวลาชิ้นงานร่วมที่ผ่านการปรับค่าแล้วในการจัดสมดุล ทั้งนี้ ในแต่ละรอบเวลาการผลิตร่วมของสายการประกอบแบบลักษณะตัวยูขนาน ที่ผ่านการจัดสมดุลเรียบร้อยแล้ว จะมีสินค้าผลิตเสร็จออกจาก สายการประกอบที่ 1 และ 2 เป็นจำนวนเท่ากับ D1 และ D2 ตามลำดับ

2.6.3 สตริงคำตอบและการถอดรหัสสตริงคำตอบ

คำตอบหรือผลการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูชานานโดยอัลกอริทึมต่างๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยนี้จะอยู่ในรูปของสตริงที่ระบุค่าลำดับความสำคัญของชั้นงานต่างๆ บนสายการประกอบรูปตัวยูชานาน (Priority String) โดยค่าลำดับความสำคัญนี้มีไว้ใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าถ้าขณะกำลังจัดสมดุลนั้นมีชั้นงานหลายชั้นงานที่พร้อมถูกนำไปจัดสรรลงสถานีงานได้ ชั้นงานใดจะถูกนำไปจัดลงสถานีงานก่อน จะพิจารณาจากค่าลำดับความสำคัญของแต่ละชั้นงาน โดยค่าลำดับความสำคัญเป็นเลขจำนวนเต็มบวกที่ไม่ซ้ำกันตั้งแต่ 1, 2, ..., จนถึง N เมื่อ N คือจำนวนชั้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบตัวยูชานาน ซึ่งในการจัดสมดุลบนสายการประกอบรูปตัวยูชานานนั้นสามารถจัดชั้นงานลงบนสถานีงานจากด้านหน้าไปด้านหลัง และจากด้านหลังไปทางด้านหน้าพร้อมๆ กันได้ตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชั้นงาน เนื่องจากสายการประกอบรูปตัวยูชานานมีทางเข้าของวัตถุดิบ และทางออกของผลิตภัณฑ์อยู่ในแนวเดียวกัน และสถานีงานจุดข้ามที่ทำให้พนักงานสามารถทำงานจากด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบไปพร้อมกันได้ และสถานีงานร่วมที่ทำให้พนักงานสามารถทำงานจากด้านหน้าหรือด้านหลังของสายการประกอบ 2 สายพร้อมกันได้

ตัวอย่างสตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูชานาน แสดงดังตารางที่ 2.4 สตริงคำตอบของปัญหานี้มีจำนวนบิตทั้งสิ้น 24 บิตตามจำนวนชั้นงาน ซึ่งแต่ละชั้นงานก็จะมีค่าลำดับความสำคัญแตกต่างกันไปตั้งแต่ 1 ถึง 24

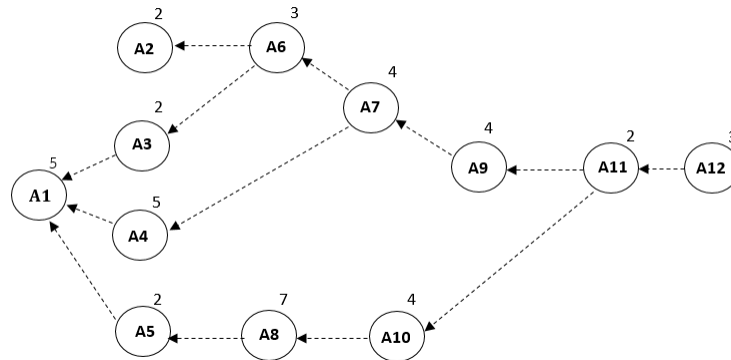
ตารางที่ 2.4 สตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะตัวยูชานาน

Task	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
String	1	13	14	12	22	15	24	19	23	9	8	7	2	16	5	17	6	18	11	20	10	21	4	3

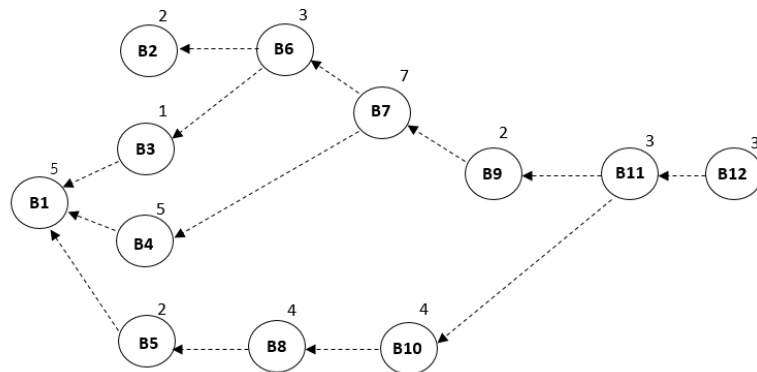
ในการจัดสมดุลแต่ละครั้ง การเลือกชั้นงานไปจัดลงสถานีงานโดยอาศัยสตริงคำตอบใดๆ ก็ตามประกอบการพิจารณา นอกจากผลการจัดสมดุลในด้านผังการจัดวางสายการประกอบแล้ว ยังมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่เฉพาะตัวสอดคล้องตามสตริงคำตอบนั้นๆ หรือกล่าวอีกมุมหนึ่งคือ สตริงคำตอบแต่ละสตริงสามารถถอดรหัสออกมาเพื่อสื่อถึงผลการจัดสมดุลที่เฉพาะเจาะจงสำหรับกระบวนการแก้ปัญหาการจัดสมดุลด้วยอัลกอริทึมต่างๆ ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งล้วนเป็นกระบวนการเชิงคณิตศาสตร์ จึงจัดเก็บผลการจัดสมดุลให้อยู่ในรูปสตริงคำตอบ (สตริงตัวเลข) เพื่อให้สามารถนำไปดำเนินการทางคณิตศาสตร์ได้นั่นเอง

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบนั้น มีวิธีการคือ การนำสตริงที่ได้พิจารณาร่วมกับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชั้นงาน (Precedence Diagram) โดยแผนภาพลำดับ

ความสัมพันธ์ของชั้นงานนั้น จะต้องพิจารณาสองด้านพร้อมๆกันคือ พิจารณาจากด้านหน้าไปด้านหลัง (รูปที่ 2.17 (ค) และ 2.18 (ค)) และด้านหลังมาด้านหน้า (รูปที่ 2.19 และ 2.20)



รูปที่ 2.19 แผนภาพลำดับความสัมพันธ์พิจารณาจากด้านหลังไปด้านหน้าของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1



รูปที่ 2.20 แผนภาพลำดับความสัมพันธ์พิจารณาจากด้านหลังไปด้านหน้าของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2

นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการถอดรหัสตรึงคำตอบ

ความเป็นไปได้ของสถานีงาน คือ ประเภทของสถานีงานที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยข้อจำกัดของลักษณะของสายการประกอบยูนิท ซึ่งได้อธิบายหลักการเลือกชั้นงานที่ทำให้เกิดประเภทสถานีงานต่างๆ ไว้ดังนี้

- 1) ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า และสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า ดังรูปที่ 2.21 (ก) เนื่องจาก พนักงานที่ทำงานบนสายการประกอบที่ 1 สามารถหันกลับมาทำงานบนสายการประกอบที่ 2 ได้ ชั้นงานจึงถูกเลือกได้ทั้งสองสายการประกอบ
- 2) ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า สายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า และสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง ดังรูปที่ 2.21 (ข) เนื่องจากชั้นงานแรกที่ถูกเลือกมีโอกาสเกิดสถานีงานทั้ง 3 แบบ คือสถานีงานจุดข้าม สถานีงานปกติ และสถานีงานร่วม
- 3) ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า สายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง และสายการประกอบที่ 1 ด้านหลังดังรูปที่ 2.21 (ค)
- 4) ถ้าชั้นงานก่อนหน้าที่ถูกจัดลงสถานีงาน คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหลัง ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกลงสถานีงานได้ คือ ชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง และสายการประกอบที่ 1 ด้านหลัง ดังรูปที่ 2.21 (ง)
- 5) ถ้าชั้นงานใดๆที่ถูกจัดลงสถานีงานมากกว่า 2 ชั้นงานแล้วเป็นการกำหนดประเภทสถานีงานแล้ว ชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกได้ คือชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่เป็นข้อกำหนดของลักษณะประเภทสถานีงานนั้นๆ เช่น ชั้นงานแรกที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า ชั้นงานที่ 2 ที่สามารถเลือกได้ จะอยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า สายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า สายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง จากนั้น ชั้นงานที่ 2 ที่เลือกลงสถานีงานคือ ชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง ดังนั้นชั้นงานที่ 3 ที่สามารถเลือกได้ จะเป็นชั้นงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า สายการประกอบที่ 2 ด้านหลัง เท่านั้น

ความเป็นไปได้ของระบบ คือ สถานีงานที่ถูกจัดสมดุลบนสายการประกอบนี้จะไม่ผิดข้อกำหนดของการถอดรหัสตรึงคำตอบของสายการประกอบลักษณะยูนาน ดังนี้

- 1) การเกิดสถานีงานจุดข้ามหรือสถานีงานร่วม จะมีการเรียงสถานีได้ไม่เกิน 1 สถานี ถ้าชิ้นงานที่เลือก ณ ขณะนั้นทำให้เกิดการเรียงสถานีเกิน 1 สถานี จะทำการตัดชิ้นงานนั้นออกแล้วทำการเลือกชิ้นงานใหม่ตามค่าลำดับความสำคัญ
- 2) ในสถานีสุดท้ายของสายการประกอบด้านในจะไม่มีการเกิดสถานีงานจุดข้าม (เนื่องจาก การที่ไม่มีสถานีงานอื่นมาคั่นกลางให้มีการเดินทางของพนักงานระหว่างด้านหน้าและด้านหลังจะเรียกสถานีงานประเภทนี้ว่าสถานีงานปกติ) ซึ่งถ้าโปรแกรมทำให้เกิดการเลือกลักษณะสถานีงานเช่นนี้ จะทำการซ่อมแซมสถานีงานนี้ใหม่ โดยพิจารณาว่าชิ้นงานแรกของสถานีงานนี้ที่เลือกอยู่ด้านหน้าหรือด้านหลังของสายการประกอบ จากนั้นกำหนดให้เป็นสถานีงานปกติด้านนั้นที่ชิ้นงานอาศัยอยู่ ถ้าสามารถเลือกได้ทั้งสองด้านให้ทำการสุ่ม

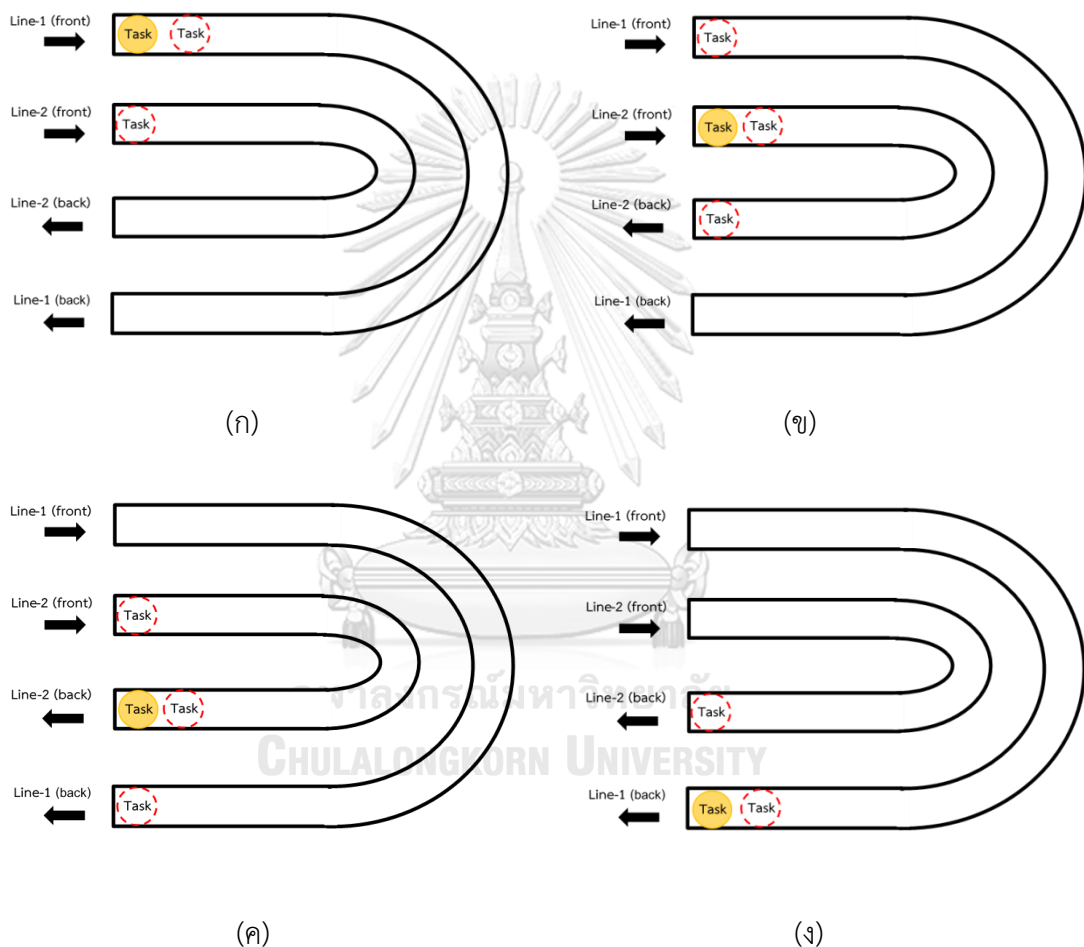
กระบวนการถอดรหัสตรึงคำตอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดทำรายการชิ้นงานทั้งหมด (Task List)
2. เปิดสถานีงาน โดยมีค่ารอบเวลาการผลิตตามที่กำหนด
3. จัดชิ้นงานแรกลงสถานีงาน โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - 1) จัดทำรายการชิ้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ (Set Of Assignable Tasks On Line) จากแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน (Precedence Diagram) และชิ้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ถูกเลือก
 - 2) เลือกชิ้นงานแรกจัดลงสถานีงานจากค่าลำดับความสำคัญ (Priority) โดยชิ้นงานที่มีค่าลำดับความสำคัญน้อยถูกเลือกก่อน
4. ปรับปรุงชิ้นงานที่ยังไม่ถูกเลือก แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน เวลาที่เหลือสำหรับจัดสรรชิ้นงานอื่นได้ ความเป็นไปได้ของสถานีงาน ความเป็นไปได้ของระบบ
5. จัดชิ้นงานถัดไปลงสถานีงาน โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - 1) จัดทำรายการชิ้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ (Set Of Assignable Tasks On Line) โดยพิจารณาจากแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน (Precedence Diagram) เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติชิ้นงาน ชิ้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ถูกเลือก ความเป็นไปได้ของสถานีงาน
 - 2) - ถ้ายังมีชิ้นงานที่สามารถเลือกได้ ให้เลือกชิ้นงานที่ค่าลำดับความสำคัญน้อยจัดลงสถานีงาน แล้วกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 (แต่ถ้าชิ้นงานที่เลือกนั้น เวลาในการปฏิบัติงาน

เกินกว่าเวลาที่เหลือให้ปฏิบัติงานในรอบเวลาการผลิต ให้ตัดชิ้นงานนี้ออกจากรายการชิ้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ แล้วทำการเลือกชิ้นงานใหม่ จากค่าลำดับความสำคัญที่น้อยที่สุด)

- ถ้าไม่มีชิ้นงานที่สามารถเลือกได้ ให้พิจารณาชิ้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ถูกเลือก ถ้ามีให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่ ถ้าไม่มีให้จบการทำงาน

6. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)



รูปที่ 2.21 แผนภาพ ลักษณะการพิจารณาในการเลือกชิ้นงานใด ๆ ลงสถานีงาน

ตัวอย่างการถอดรหัสสตริงคำตอบ

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการถอดรหัสสตริงคำตอบในตารางที่ 2.4 ของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะด้วยขนาน ซึ่งกำหนดให้มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 10 หน่วยเวลา และมีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานพิจารณาจากด้านหน้าไปด้านหลัง (รูปที่ 2.17 (ค) และ 2.18 (ค)) และด้านหลังไปด้านหน้า (รูปที่ 2.19

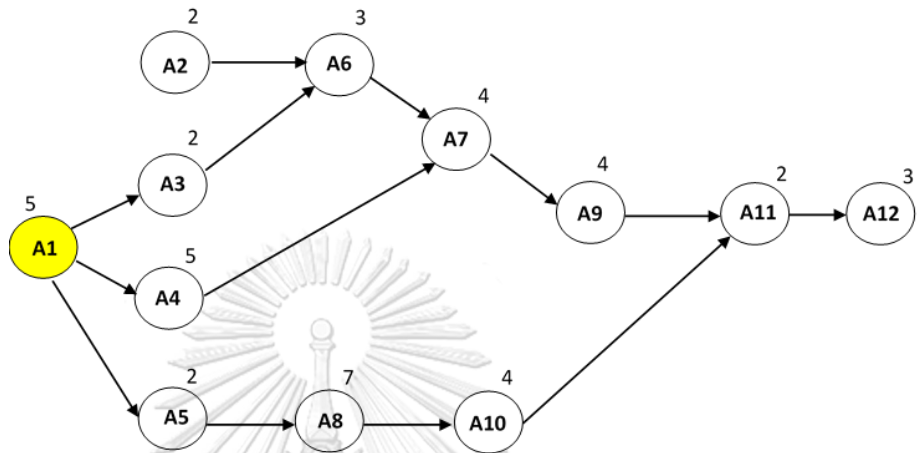
และ 2.20) โดยเริ่มต้นพิจารณาชั้นงานที่ไม่มีชั้นงานที่ต้องทำก่อนหน้า ได้แก่ ชั้นงาน A1, A2, A12 (line 1) และ B1, B2, B12 (line 2) ซึ่งมีค่าลำดับความสำคัญ คือ 1, 13, 7, 2, 16 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งวิธีการถอดรหัสตรงคำตอบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น จะลงรายการชั้นงานดังกล่าวตามตำแหน่งที่ชั้นงานนั้นสามารถถูกปฏิบัติงานบนสายการประกอบได้ (ตำแหน่ง Front Line1, Front Line1, Back Line2, Back Line1) และมีค่าลำดับความสำคัญของชั้นงานและเวลาในการปฏิบัติงานของชั้นงานนั้นๆกำกับไว้ (Processing Time) ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชั้นงานและค่าลำดับความสำคัญของชั้นงานที่สามารถนำมาจัดสมดุลได้อันดับแรก

Front Line1	Task	A1	A2	-	-
	Priority String	1	13	-	-
	Processing Time	5	2	-	-
Front Line2	Task	B1	B2	-	-
	Priority String	2	16	-	-
	Processing Time	5	2	-	-
Back Line2	Task	B12	-	-	-
	Priority String	3	-	-	-
	Processing Time	3	-	-	-
Back Line1	Task	A12	-	-	-
	Priority String	7	-	-	-
	Processing Time	3	-	-	-

จากตารางที่ 2.5 ชั้นงาน A1 มีค่าลำดับความสำคัญน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกชั้นงาน A1 เป็นชั้นงานแรกที่จะนำไปจัดลงสถานีงาน ซึ่งมีเวลาในการปฏิบัติงาน เท่ากับ 5 หน่วยเวลา เมื่อเลือกชั้นงาน A1 ลงสถานีงานแล้วซึ่งเป็นชั้นงานที่ทำจากด้านหน้าไปด้านหลัง ดังนั้นทำการปรับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ด้านหน้าไปด้านหลัง (รูปที่ 2.22) และทำการปรับปรุงเวลาคงเหลือของรอบเวลาการผลิต (Remaining Cycle Time) ที่ยังสามารถจัดสรรชั้นงานลงได้อีก ปรับปรุงรายการชั้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ถูกเลือก และรายการชั้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ก่อน ซึ่งชั้นงาน A1 เป็นชั้นงานที่ทำบนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า ดังนั้นชั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกได้ จะอยู่บนสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้า (Front Line1) และสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้า (Front Line2) (ดังรูปที่ 2.21 (ก))

เพราะฉะนั้นขั้นงานต่อไปที่สามารถเลือกได้เมื่อพิจารณาแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน (รูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.18 (ค)) รวมด้วยแล้ว จะได้ขั้นงาน ค่าลำดับความสำคัญของขั้นงาน และเวลาในการปฏิบัติงาน ดังตารางที่2.6

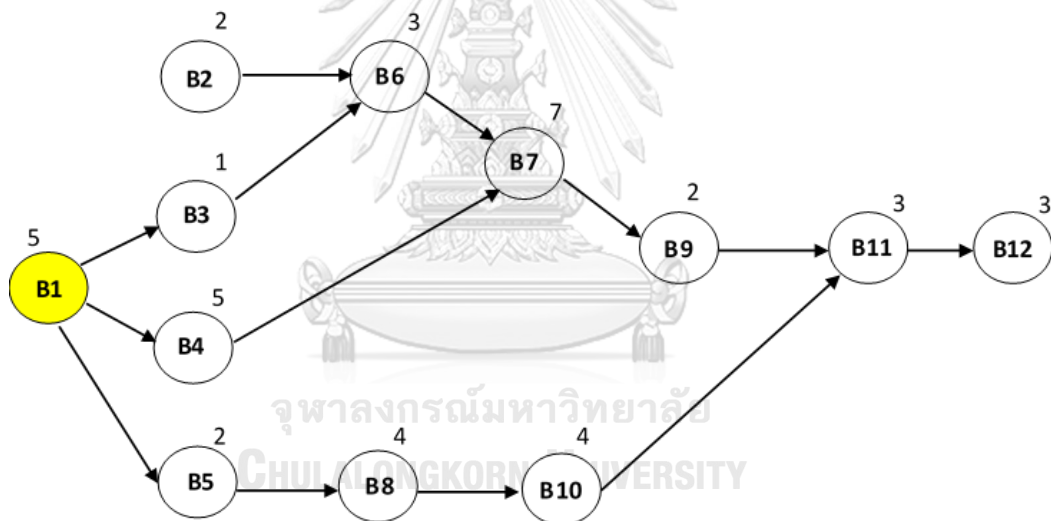


รูปที่ 2.22 แผนภาพลำดับความสัมพันธ์พิจารณาจากด้านหน้าไปด้านหลังผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 เมื่อมีขั้นงานถูกจัดสรรลงสถานีนงานแล้ว

ตารางที่ 2.6 ขั้นงานและค่าลำดับความสำคัญของขั้นงานที่สามารถนำมาจัดสมดุลได้เมื่อลงขั้นงาน A1 แล้ว

Front Line1	Task	<u>A2</u> <u>A3</u> <u>A4</u> <u>A5</u>
	Priority String	<u>13</u> <u>14</u> <u>12</u> <u>22</u>
	Processing Time	<u>2</u> <u>2</u> <u>5</u> <u>2</u>
Front Line2	Task	<u>B1</u> <u>B2</u>
	Priority String	<u>2</u> <u>16</u>
	Processing Time	<u>5</u> <u>2</u>
Back Line2	Task	
	Priority String	
	Processing Time	
Back Line1	Task	
	Priority String	
	Processing Time	

จากตารางที่ 2.6 ชั้นงาน B1 มีค่าลำดับความสำคัญน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกชั้นงาน B1 ไปจัดลงสถานีงานเป็นลำดับถัดไป และมีค่าเวลาปฏิบัติงานเท่ากับ 5 ซึ่งไม่เกินค่าเวลาคงเหลือของรอบเวลาการผลิตที่ลงชั้นงาน A1 ไปแล้ว ซึ่งรวมกันเท่ากับ 10 หน่วยเวลา เต็มรอบเวลาการผลิตพอดี จึงปิดสถานีงาน จากนั้นทำการเปิดสถานีงานใหม่ และทำการปรับแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ด้านหน้าไปด้านหลัง (รูปที่ 2.23) จากนั้นปรับปรุงรายการชั้นงานทั้งหมดที่ยังไม่ถูกเลือก และรายการชั้นงานที่สามารถจัดลงสายการประกอบได้ก่อน โดยชั้นงานทุกชั้นงานที่สามารถถูกเลือกมาจัดลงสถานีงานนั้นจะพิจารณาชั้นงานบนสายการประกอบทุกสายการประกอบ กล่าวคือ ทั้งสายการประกอบที่ 1 ด้านหน้าและด้านหลัง และสายการประกอบที่ 2 ด้านหน้าและด้านหลัง จะถูกนำมาพิจารณาพร้อมกันใหม่ทั้งหมด และเลือกชั้นงานที่ค่าลำดับความสำคัญน้อยจัดลงสถานีงานก่อนดังตารางที่ 2.7

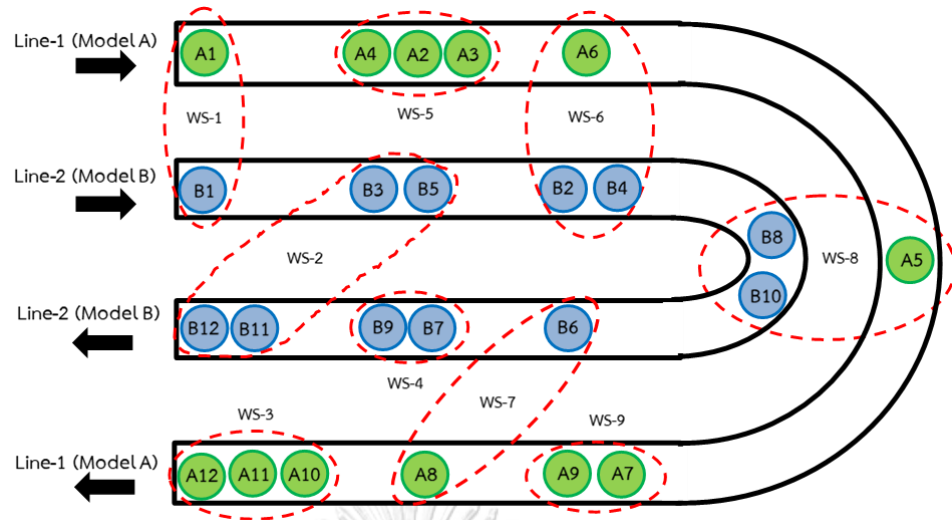


รูปที่ 2.23 แผนภาพลำดับความสัมพันธ์พิจารณาจากด้านหน้าไปด้านหลังผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 1 เมื่อมีชั้นงานถูกจัดสรรลงสถานีงานแล้ว

ตารางที่ 2.7 ชั้นงานและค่าลำดับความสำคัญของชั้นงานที่สามารถนำมาจัดสมดุลได้เมื่อลงชั้นงาน B1 แล้ว และทำการเปิดสถานีนงานใหม่

Front Line1	Task	A2	A3	A4	A5
	Priority String	13	14	12	22
	Processing Time	2	2	5	2
Front Line2	Task	B2	B3	B4	B5
	Priority String	16			
	Processing Time	2			
Back Line2	Task	B12			
	Priority String	3			
	Processing Time	3			
Back Line1	Task	A12			
	Priority String	7			
	Processing Time	3			

จากนั้นทำการจัดสรรชั้นงานลงสถานีนงานตามค่าลำดับความสำคัญน้อยที่สุดที่ได้ไปเรื่อยๆ ด้วยการเปิดสถานีนงานทีละสถานีนงานแล้วทยอยจัดสรรชั้นงานลงไปตามลำดับให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ トラบเท่าที่ยังไม่ทำให้ผลรวมเวลาชั้นงานรวมมีค่าเกินรอบเวลาการผลิตที่กำหนด โดยเมื่อใดก็ตามที่ไม่สามารถจัดสรรชั้นงานได้แล้วให้ทำการปิดสถานีนงานนั้น และเปิดสถานีนงานใหม่แล้วจัดสรรชั้นงานค่าที่มีลำดับความสำคัญน้อยที่สุดลงไปเป็นชั้นงานแรก และจัดสรรชั้นงานลำดับถัดๆ ไป ด้วยหลักการเดิมจนครบทุกชั้นงานได้ผลดังรูปที่ 2.24 โดยสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูชานานที่ถอดรหัสออกมาจากสตริงคำตอบนี้มีจำนวนสถานีนงานทั้งสิ้น 9 สถานีนงาน แบ่งเป็น 4 สถานีนงานปกติ 4 สถานีนงานร่วม และ 1 สถานีนงานจุดข้าม โดยมีรายละเอียดประเภทสถานีนงาน ชั้นงานที่จัดลงสถานีนงาน และเวลารวมในการปฏิบัติงานของแต่ละสถานีนงาน ดังตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.24 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูขนานที่ได้จากการถอดรหัส
สตริงคำตอบตัวอย่าง

ตารางที่ 2.8 ชั้นงานและเวลารวมในการปฏิบัติงานของแต่ละสถานีงาน

สถานีงาน ที่	ประเภทสถานีงาน	ชั้นงาน (เรียงตามลำดับในการทำงาน)	ผลรวมเวลา ชั้นงานรวม	เวลา สูญเสีย
1	ร่วม	A1, B1	10	0
2	จุดข้าม	B12, B11, B3, B5	9	1
3	แยก line 1	A12, A11, A10	9	1
4	แยก line 2	B9, B7	9	1
5	แยก line 1	A4, A2, A3	9	1
6	ร่วม	A6, B2, B4	10	0
7	ร่วม	B6, A8	10	0
8	ร่วม	B8, B10, A5	10	0
9	แยก line 1	A9, A7	8	2

2.6.4 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อทำการจัดสมดุลสายการประกอบรูปด้วยขนานแล้ว จะนำผลการจัดสมดุลที่ได้มา คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจากคำตอบที่ได้ของสตรึงตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.24 และตาราง ที่ 2.8 นำมาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แต่ละวัตถุประสงค์ได้

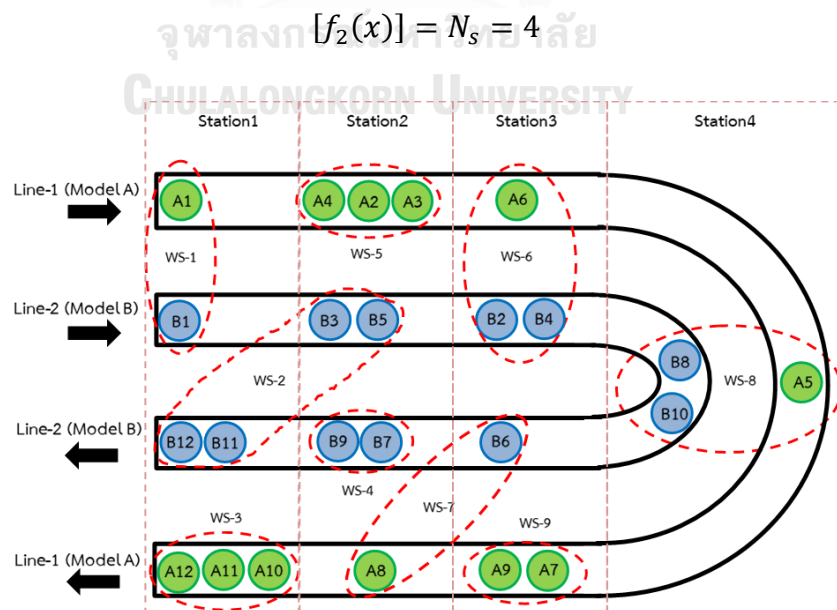
ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 $[f_1(x)]$: จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด (N_w)

สามารถพิจารณาจากการจัดสมดุลสายการประกอบในรูปที่ 2.24 หรือตารางที่ 2.8 ได้เลย พบว่ามีจำนวนสถานีงานทั้งหมด 9 สถานีงาน (แบ่งเป็น สถานีงานจุดข้าม 1 สถานีงาน สถานีงานร่วม 4 สถานีงาน และสถานีงานปกติ 4 สถานีงาน) ดังนั้นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ

$$[f_1(x)] = N_w = 9$$

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 $[f_2(x)]$: จำนวนสถานีน้อยที่สุด (N_s)

พิจารณาจากการจัดสมดุลสายการประกอบในรูปที่ 2.24 ซึ่ง 1 สถานี จะมีสถานีงาน ไม่เกิน 4 สถานีงาน และ พื้นที่ในการทำงานของสถานีงานต่างๆ จะไม่ซ้อนทับกัน ทั้งนี้ คำตอบในการจัดสมดุลที่ได้ในการถอดรหัสสตรึงคำตอบนี้ สถานีงานบนสายการประกอบ ลักษณะขนานมีสถานีงานครบทั้ง 3 ประเภท คือ สถานีงานปกติ สถานีงานจุดข้าม สถานีงานร่วม ดังนั้นวิธีการนับจำนวนสถานีจึงตรงกับกรณีที่ 4 โดยไม่ต้องมีการจัดเรียงสถานีงาน บนสายการประกอบใหม่อีกครั้งหนึ่ง จึงแบ่งจำนวนสถานีได้ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งจำนวนสถานีที่ ได้ คือ 4 สถานี



รูปที่ 2.25 การนับจำนวนสถานีของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะด้วยขนาน

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 [$f_3(x)$]: ค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2$$

ในการคำนวณค่า (B_b) ค่าต่างๆที่ใช้ประกอบการคำนวณมีดังนี้ ค่าเวลาในการปฏิบัติงานของชิ้นงาน (รูปที่ 2.17 (ค) และ รูปที่ 2.18 (ค)) สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ผสมแต่ละรุ่น และรอบเวลาการผลิต ในที่นี้เท่ากับ 10 หน่วยเวลา โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

1. คำนวณเวลาในการปฏิบัติงาน (Total Time, $TT_{k,b,m,L}$) แต่ละสถานีงาน โดยคิดทุกกรณีที่ผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่นจะเข้าสู่สายการประกอบ ซึ่งลักษณะสายการประกอบรูปตัวยูขนานนี้มีประเภทของสถานีงาน 3 รูปแบบคือ 1. สถานีงานปกติ 2. สถานีงานจุดข้าม 3. สถานีงานร่วม ดังนั้นจึงแบ่งวิธีการคิดเวลารวมในการปฏิบัติงานของสถานีงาน แต่ละประเภทได้ดังนี้

สถานีงานปกติ คือ สถานีงานที่พนักงานปฏิบัติภารกิจเฉพาะบนสายการประกอบ 1 หรือ 2 ไม่มีการข้ามสายการประกอบ ดังนั้นเวลาในการปฏิบัติงานของผลิตภัณฑ์ A และ B จะคิดเวลาปฏิบัติงานแยกกันอย่างชัดเจน

สถานีจุดข้าม คือ สถานีงานที่พนักงานปฏิบัติภารกิจบนสายการประกอบ 2 โดยพนักงานจะทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ ดังนั้น ความน่าจะเป็นของเวลาในการปฏิบัติงานของสถานีงานจุดข้าม จะเป็นไปได้ 4 กรณีเช่นเดียวกับสถานีงานร่วม แต่รูปแบบผลิตภัณฑ์จะเป็นผลิตภัณฑ์ B เพียงชนิดเดียว คือ B1 Front B1 Black, B1 Front B2 Black, B2 Front B1 Black และ B2 Front B2 Black

สถานีงานร่วม คือ สถานีงานที่พนักงานปฏิบัติภารกิจบนสายการประกอบ 1 และ 2 ร่วมกัน ดังนั้นความน่าจะเป็นของเวลาในการปฏิบัติงานของสถานีงานร่วม จะเป็นไปได้ 4 กรณี คือ โมเดล A1B1, A1B2, A2B1 และ A2B2

จากการคำนวณเวลาในการปฏิบัติงาน (Total Time, $TT_{k,b,m,L}$) ของสถานีงาน ทั้งหมดบนสายการประกอบลักษณะยูขนาน ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เวลาในการปฏิบัติงาน (Total Time, $TT_{k,b,m,L}$) ของสถานีงานทั้งหมดบนสายการประกอบลักษณะยูชานาน

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานีงาน (b)	TTk,RW,mA		TTk,RW,mB		TTk,MW,m(A,B)				TTk,CW,mB			
		A1	A2	B1	B2	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	B1front B1black	B1front B2black	B2front B1black	B2front B2black
1	รวม	-	-	-	-	12	12	8	8	-	-	-	-
2	จุดข้าม	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	11	11
3	แยก line A	8	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	แยก line B	-	-	9	9	-	-	-	-	-	-	-	-
5	แยก line A	8	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	รวม	-	-	-	-	11.5	7	11.5	7	-	-	-	-
7	รวม	-	-	-	-	10	10	10	10	-	-	-	-
8	รวม	-	-	-	-	10.5	9	10.5	9	-	-	-	-
9	แยก line A	7	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.หาค่าความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวมของเวลาว่างงาน (Total Absolute Deviation, TAD) โดยหาจากผลรวมของค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตร่วมกับเวลาขึ้นงานรวมที่สถานีงานที่ k สถานีงานประเภท b (S_{kb}) ของทุกสถานีงาน ซึ่งสถานีงานประเภท 1 หมายถึงสถานีงานปกติ (Regular Workstation) 2 หมายถึงสถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) และ 3 หมายถึงสถานีงานรวม (Multi-line Workstation) โดยมีสูตรการคำนวณที่ต่างกันดังต่อไปนี้

$$S_{k,1} = \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} S_{k,1,m_l,l} = \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} |C_T - TT_{k,1,m_l,l}| \quad \forall l \in \{1,2\} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} S_{k,2} &= \sum_{m_{F1}=1}^{M_l} \sum_{m_{B1}=1}^{M_l} q_{m_{F1}} q_{m_{B1}} S_{k,2,m_{(F1,B1)},(F1,B1)} \quad \forall l \in \{2\} \\ &= \sum_{m_{F2}=1}^{M_2} \sum_{m_{B2}=1}^{M_2} q_{m_{F2}} q_{m_{B2}} S_{k,3,m_{(F2,B2)},(F2,B2)} \\ &= \sum_{m_{F2}=1}^{M_2} \sum_{m_{B2}=1}^{M_2} q_{m_{F2}} q_{m_{B2}} |C_T - TT_{k,2,m_{F2},F2} - TT_{k,2,m_{B2},B2}| \quad (2.14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{k,3} &= \sum_{m_l=1}^{M_l} \sum_{m_{l+1}=1}^{M_{l+1}} q_{m_l} q_{m_{l+1}} S_{k,3,m_{(l,l+1)},(l,l+1)} \quad \forall l \in \{1\} \\ &= \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} q_{m_2} S_{k,3,m_{(1,2)},(1,2)} \\ &= \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} q_{m_2} |C_T - TT_{k,3,m_1,1} - TT_{k,3,m_2,2}| \quad (2.15) \end{aligned}$$

จากตารางที่ 2.9 นำค่า $TT_{k,b,m,L}$ ของแต่ละสถานีงานมาคำนวณหาค่า (S_{kb}) ได้ดังตัวอย่างคำนวณต่อไปนี้

สถานีงานที่ 1

สถานีงานที่ 1 เป็นสถานีงานประเภทสถานีงานร่วมมีชั้นงานที่ต้องทำ ได้แก่ A1 บนสายการประกอบที่ 1 และ B1 บนสายการประกอบที่ 2 ดังนั้น ค่า $k=1$, $b=3$,

$$\begin{aligned}
 \text{จะได้ } S_{1,3} &= \sum_{m_1=A_1}^{A_2} \sum_{m_2=B_1}^{B_2} q_{m_1} q_{m_2} S_{1,3,(m_1,m_2),(1,2)} \\
 &= q_{A_1} q_{B_1} S_{1,3,(A_1,B_1),(1,2)} + q_{A_1} q_{B_2} S_{1,3,(A_1,B_2),(1,2)} \\
 &\quad + q_{A_2} q_{B_1} S_{1,3,(A_2,B_1),(1,2)} + q_{A_2} q_{B_2} S_{1,3,(A_2,B_2),(1,2)} \\
 &= q_{A_1} q_{B_1} |C_T - TT_{1,3,(A_1,B_1),(1,2)}| + q_{A_1} q_{B_2} |C_T - TT_{1,3,(A_1,B_2),(1,2)}| \\
 &\quad + q_{A_2} q_{B_1} |C_T - TT_{1,3,(A_2,B_1),(1,2)}| + q_{A_2} q_{B_2} |C_T - TT_{1,3,(A_2,B_2),(1,2)}| \\
 &= \left(\frac{1}{2} \times \frac{2}{3} |10 - 12|\right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} |10 - 12|\right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{2}{3} |10 - 8|\right) \\
 &\quad + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} |10 - 8|\right) \\
 &= 0.66667 + 0.33333 + 0.66667 + 0.33333 \\
 &= 2
 \end{aligned}$$

สถานีงานที่ 2

สถานีงานที่ 2 เป็นสถานีงานประเภทสถานีงานจุดข้ามมีชั้นงานที่ต้องทำ ได้แก่ B3 B5 B12 B11 บนสายการประกอบที่ 2 ดังนั้น ค่า $k=2$, $b=2$

จะได้

$$\begin{aligned}
 S_{2,2} &= \sum_{m_{F_2}=B_1}^{B_2} \sum_{m_{B_2}=B_1}^{B_2} q_{m_{F_2}} q_{m_{B_2}} S_{2,2,m_{(F_2,B_2)},(F_2,B_2)} \\
 &= q_{B_1 F_2} q_{B_1 B_2} S_{2,2,(B_1,B_1),(F_2,B_2)} + q_{B_1 F_2} q_{B_2 B_2} S_{2,2,(B_1,B_2),(F_2,B_2)} \\
 &\quad + q_{B_2 F_2} q_{B_1 B_2} S_{2,2,(B_2,B_1),(F_2,B_2)} + q_{B_2 F_2} q_{B_2 B_2} S_{2,2,(B_2,B_2),(F_2,B_2)} \\
 &= q_{B_1 F_2} q_{B_1 B_2} |C_T - TT_{2,2,B_1 F_2,(F_2)} - TT_{2,2,B_1 B_2,(B_2)}| \\
 &\quad + q_{B_1 F_2} q_{B_2 B_2} |C_T - TT_{2,2,B_1 F_2,(F_2)} - TT_{2,2,B_2 B_2,(B_2)}| \\
 &\quad + q_{B_2 F_2} q_{B_1 B_2} |C_T - TT_{2,2,B_2 F_2,(F_2)} - TT_{2,2,B_1 B_2,(B_2)}| \\
 &\quad + q_{B_2 F_2} q_{B_2 B_2} |C_T - TT_{2,2,B_2 F_2,(F_2)} - TT_{2,2,B_2 B_2,(B_2)}|
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\frac{2}{3} \times \frac{2}{3} |10 - 2 - 6|\right) + \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{3} |10 - 2 - 6|\right) \\
&\quad + \left(\frac{1}{3} \times \frac{2}{3} |10 - 5 - 6|\right) + \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{3} |10 - 5 - 6|\right) \\
&= 0.8978 + 0.4422 + 0.2211 + 0.1089 \\
&= 1.67
\end{aligned}$$

สถานีงานที่ 3

สถานีงานที่ 3 เป็นสถานีงานประเภทสถานีงานปกติหรือสถานีงานแยกมีชั้นงานที่ต้องทำ ได้แก่ A12, A11, A10 บนสายการประกอบที่ 1 ดังนั้น ค่า $k=3$, $l=1$, $b=1$,

$$\begin{aligned}
\text{จะได้ } S_{3,1} &= \sum_{m_1=A_1}^{A_2} q_{m_1} S_{3,1,m_1,1} = q_{A_1} S_{3,1,A_1,1} + q_{A_2} S_{3,1,A_2,1} \\
&= q_{A_1} |C_T - TT_{3,1,A_1,1}| + q_{A_2} |C_T - TT_{3,1,A_2,1}| \\
&= \frac{1}{2} |10 - 8| + \frac{1}{2} |10 - 10| \\
&= 1 + 0 \\
&= 1
\end{aligned}$$

เมื่อทำการคำนวณค่า S_{kb} ของแต่ละสถานีงานจนครบทุกสถานีงานแล้ว แสดงดังตารางที่ 2.10 จะสามารถคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนสมบูรณ์รวม (TAD) ได้ดังนี้

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 S_{k,b} = 2 + 1.67 + 1 + 1 + 1 + 2 + 0 + 0.67 + 2 = 11.33$$

3. นำค่าที่ได้จากการคำนวณในข้อ 1 และ 2 มาทำการคำนวณหาค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b) ตามสมการด้านล่างนี้

$$B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2$$

$$\text{จะได้ } B_b = \frac{9}{9-1} \times 0.03075 = 0.0346$$

ดังนั้นค่าความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน (B_b) ของ string นี้ เท่ากับ 0.0346

ตารางที่ 2. 10 การหาค่าความแตกต่างของการงานระหว่างสถานีงาน (B_b)

สถานีงาน	ประเภทสถานีงาน	Sk,RW,ma		Sk,RW,mb		Sk,MW,m(A,B)				Sk,CW,mb				Skb	$\left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$
		A1	A2	B1	B2	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	B1front	B1black	B2front	B2black		
1	ร่วม	-	-	-	-	2	2	2	2	-	-	-	-	2.00	0.00428
2	crossover	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	1	1	1.67	0.00132
3	แยก line A	2	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.00052
4	แยก line B	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.00052
5	แยก line A	2	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	0.00052
6	ร่วม	-	-	-	-	1.5	3	1.5	3	-	-	-	-	2.00	0.00422
7	ร่วม	-	-	-	-	0	0	0	0	-	-	-	-	0.00	0.01235
8	ร่วม	-	-	-	-	0.5	1	0.5	1	-	-	-	-	0.67	0.00275
9	แยก line A	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00	0.00428
$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 S_{k,b} = 11.33$															
$B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$															
$B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$														0.03075	
$B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=1}^3 \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$														0.03460	

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 4 [$f_4(x)$]: ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีนงานสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$IWR = \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k}$$

มีวิธีการคำนวณดังนี้

1. นำชั้นงานที่ถูกจัดลงสถานีงานมาพิจารณาร่วมกับลำดับความสัมพันธ์ของชั้นงาน (Precedence Diagram) ถ้าชั้นงานที่ถูกจัดลงสถานีงาน มีความต่อเนื่องกันจะนับจำนวนเครื่องข่ายงาน เป็น 1 เครื่องข่ายงาน ตัวอย่างจากตารางที่ 2.11 ในสถานีงานที่ 2 ชั้นงานที่ต้องทำมี 4 ชั้นงาน เรียงตามลำดับก่อนหลัง ได้แก่ B12, B11, B3 และ B5 ซึ่งหมายถึงเริ่มทำชั้นงาน B12 ก่อนแล้วตามด้วยชั้นงาน B11 ดังนั้นจะเกิดความสัมพันธ์ของชั้นงาน เนื่องจากชั้นงาน B11 เป็นชั้นงานที่ต้องทำต่อจากชั้นงาน B12 (ชั้นงาน B11 มีลูกศรโยงไปหาชั้นงาน B12 ดังปรากฏ ในแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสายการประกอบรูปตัวยูนั้นงานสามารถทำได้ทั้งด้านหน้าไปด้านหลัง และด้านหลังไปด้านหน้า จึงทำให้แผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังสามารถพิจารณาย้อนกลับได้) แต่การทำชั้นงาน B11 แล้วต่อด้วยชั้นงาน B3 จะไม่เกิดความสัมพันธ์กัน เนื่องจากชั้นงาน B3 ไม่ได้เป็นชั้นงานที่ต้องทำต่อจากชั้นงาน B11 โดยตรง ดังนั้น เครื่องข่ายงานแรกจึงสิ้นสุดลงที่ชั้นงาน B11 ได้เป็นเครื่องข่ายงาน [B12-B11] นับเป็น 1 ความสัมพันธ์ จากนั้นเริ่มพิจารณาเครื่องข่ายงานถัดไปที่ชั้นงาน B3 พบว่าการทำชั้นงาน B3 ตามด้วยชั้นงาน B5 จะไม่เกิดความสัมพันธ์ของชั้นงาน ดังนั้นเครื่องข่ายงานที่ 2 จึงประกอบไปด้วยชั้นงาน B3 เพียงชั้นงานเดียว (เขียนเป็น สัญลักษณ์ได้ว่า [B3]) ลำดับต่อไป พบว่าเหลือชั้นงานในการพิจารณาเพียง 1 ชั้นงาน ได้แก่ ชั้นงาน B5 ดังนั้นเครื่องข่ายงานที่ 3 จึงประกอบไปด้วยชั้นงานนี้เพียงชั้นงานเดียว (เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ว่า [B5]) ดังนั้นจำนวนเครื่องข่ายของความสัมพันธ์ของชั้นงานภายในสถานีงานที่ 2 มีทั้งหมด 3 เครื่องข่ายงาน คือ ([B12-B11], [B3], [B5])

2. นำผลรวมจำนวนเครื่องข่ายงานของทุกสถานีงานมาหาค่าความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงาน ตามสมการที่ 2.10 คำตอบที่ได้ คือ 0.5

ตารางที่ 2.11 การหาความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกัน

สถานีงาน	ชั้นงาน	เครือข่ายงาน	จำนวนเครือข่ายงาน
1	A1, B1	[A1], [B1]	2
2	B12, B11, B3, B5	[B12-B11], [B3], [B5]	3
3	A12, A11, A10	[A12-A11-A10]	1
4	B9, B7	[B9-B7]	1
5	A4, A2, A3	[A4], [A2], [A3]	3
6	A6, B2, B4	[A6], [B2], [B4]	3
7	B6, A8	[B6], [A8]	2
8	B8, B10, A5	[B8-B10], [A5]	2
9	A9, A7	[A9-A7]	1
$\sum_{k=1}^{N_w} SN_k$			18
$MIWR = 1 - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k}$			0.5

2.7 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบเป็นการวัดคุณภาพของคำตอบที่ได้ เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดในกรณีที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งมีเป้าหมายที่สำคัญคือ กลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal) ต้องมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือกลุ่มคำตอบที่ได้ควรมีลักษณะการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจึงเป็นการวัดคุณภาพของคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

โดยตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 ตัวชี้วัด โดยที่งานวิจัยที่ผ่านมา (Kumar and Singh, 2007) ได้นำเสนอไว้ 3 ตัวชี้วัด คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต การกระจายตัว และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ และในงานวิจัยของ วัชรวิทย์ ถนนทอง (2558) ได้เพิ่มตัวชี้วัดด้านจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และ เวลาในการค้นหาคำตอบรวมทั้งสิ้นเป็น 6 ตัวชี้วัดดังนี้

1. ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to The Pareto-Optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดหรือกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.16

$$\text{Convergence} = \frac{1}{|S^*|} \min\{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (2.16)$$

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

S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม j

S^* คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$|S^*|$ คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

d_{xy} คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้จากอัลกอริทึม j (x) กับคำตอบที่แท้จริง (y)

$f_i^{\max} & f_i^{\min}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด

$f_i(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่หาได้

$f_i(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง นั่นคือ อัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่ดีกว่า

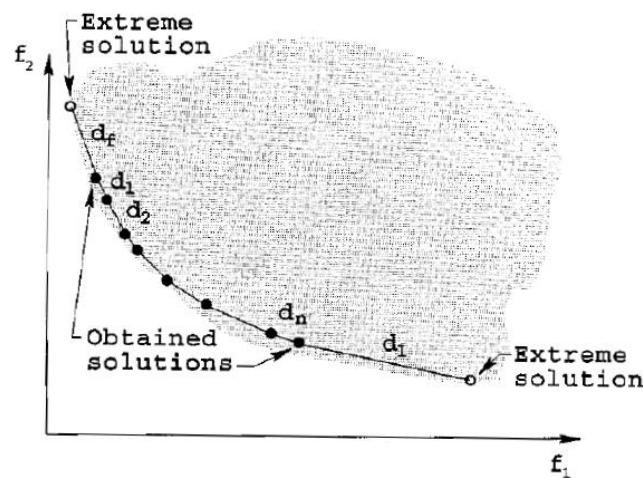
2. ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน (Li and Zheng, 2009) โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.17

$$\text{Spread} = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (2.17)$$

กำหนดให้ d_f & d_l คือระยะห่างระหว่างคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน

- \bar{d} คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i
 d_i คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน
 ในเซตคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N - 1$
 N คือ จำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้



รูปที่ 2.26 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว (Deb et al., 2002)

แต่สมการที่ 2.17 เป็นการคำนวณหาการกระจายตัวสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์เท่านั้น คือสามารถพิจารณาในรูปแบบกราฟ 2 แกนแล้วสามารถหาคำตอบได้ ดังรูปที่ 2.26 แต่งานวิจัยนี้เป็น การพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 วัตถุประสงค์พร้อมกัน ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงสมการในการคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ เพื่อให้เหมาะกับวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 3 วัตถุประสงค์ขึ้นไป ดังสมการที่ 2.18 โดยสามารถ คำนวณระยะห่างระหว่างคำตอบที่ตำแหน่งกลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ กับ คำตอบที่ตำแหน่ง กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม $d(e_m, S_j)$ ได้ดังสมการที่ 2.19 และ คำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่ x กับคำตอบตำแหน่งที่ x_2 ได้ดัง สมการที่ 2.20

$$\text{Spread}_j = \frac{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + \sum_{x=1}^{|S_j|} |d_x - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + |S_j| \bar{d}} \quad (2.18)$$

$$d(e_m, S_j) = \min_{s \in S_j} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(e_m) - f_i(s)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^2} \quad (2.19)$$

$$d_x = \min_{x_2 \in S_j, x_2 \neq x} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(x_2)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม j

S^* คือ กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

$|S_j|$ คือ จำนวนของกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม

d_x คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่ x กับคำตอบตำแหน่งที่ x_2

\bar{d} คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_x

$d(e_m, S_j)$ คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ตำแหน่ง e_m กับคำตอบที่ตำแหน่ง S_j

e_m คือ กลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแนววัตถุประสงค์ m ของคำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัววัดชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นมี

การกระจายตัวดี

3. ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio Of Non-Dominated Solution) นี้ไว้ใช้แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้นมีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำจากคำตอบที่อัลกอริทึมอื่น ๆ หามาได้ทั้งหมดคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด โดยแบ่งค่าชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนเป็น 2 ค่าชี้วัดสมรรถนะดังต่อไปนี้

3.1 Ratio Of Non-Dominated Solutions (Self-Comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (First Pareto Frontier Solution) ที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Approximated True Pareto Optimum) ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีในตัวเอง (Own First Pareto Frontier Solutions) โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.21

$$R_{NDS1} = \frac{|S_j - \{x \in S_j \mid \exists y \in S^* : y < x\}|}{|S_j|} \quad (2.21)$$

3.2 Ratio Of Non-Dominated Solutions (Pareto-Optimum Comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.22

$$R_{NDS2} = \frac{|S_j - \{x \in S_j \mid \exists y \in S^* : y < x\}|}{|S^*|} \quad (2.22)$$

กำหนดให้ S_j คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึม j หามาได้ทั้งหมด
เมื่อ $j = 1, 2, \dots, j$

S^* คือ เซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหามาได้ของทุก
อัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่ง $S^* = S_1 \cup S_2 \dots \cup S_j$

x คือ คำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y < x$ คือ คำตอบ x แย่กว่าคำตอบ y

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่า
กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

4. ตัวชี้วัดสมรรถนะของจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ

จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (The Number Of Non-Dominated Solution) คือจำนวนของ คำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดของตัวเอง (First Pareto Frontier Obtained)

5. ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

เวลาในการค้นหาคำตอบ คือ การพิจารณาเวลาในการค้นหากลุ่มคำตอบของแต่ละ
อัลกอริทึม โดยอัลกอริทึมที่ดีควรใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Askin and Zhou (1997) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับความต้องการในการผลิตของลูกค้า และการหาความยืดหยุ่นในสายการประกอบที่มีการผลิตแบบหลากหลาย สายการประกอบแบบดั้งเดิมจะมีลักษณะสายการประกอบแบบเดี่ยว และแบบผสม โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอสายการประกอบที่มีสถานีนงานแบบขนานซึ่งจะประกอบด้วยงานและสายการผลิตโดยมีรูปแบบเป็นการผลิตแบบผสมโดยจะใช้สถานีนงานแบบขนานในระบบการผลิต มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนเวลาในสถานีนงาน โดยใช้ฮิวริสติกในการสร้างสถานีนงานแบบขนานเพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในแต่ละสถานีนงาน

McMullen and Frazier (1997) บรรยายถึงการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสถานีงานขนานที่ผลิตผลิตภัณฑ์แบบผสม ซึ่งมีเวลาภารกิจแบบเฟ้นสุ่ม งานวิจัยนี้นำเสนออิทธิพลสำหรับเลือกภารกิจที่จะจัดสรรให้กับสถานีงาน แล้วใช้วิธีการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกลยุทธ์ต่างๆ ที่นำมาใช้งาน

Cheng et al. (2000) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบคุณภาพของสายการประกอบแบบเส้นตรงและสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการตรวจสอบประสิทธิภาพและคุณภาพของสายการผลิตทั้งสอง โดยทำการวัดคุณภาพการวางแผนการผลิต และคุณภาพการปรับปรุงของแต่ละสายการประกอบ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงข้อดีของสายการประกอบแบบตัวยู เช่น ปริมาณและปฏิบัติการจะมีความยืดหยุ่นกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง เนื่องจากการเดินทางของพนักงานมีระยะทางที่สั้นกว่าทำให้อัตราการผลิตมีอัตราที่สูงขึ้น จำนวนสถานีงานอาจมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับสายการประกอบแบบเส้นตรง วัสดุเครื่องมือสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกรวดเร็ว ทำให้เกิดความสามัคคีในการทำงานอย่างชัดเจน

Miltenburg (2001) ได้อธิบายถึงสายการประกอบตัวยูที่มีลักษณะพิเศษที่มีการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดของเสียในการผลิตซึ่งอธิบายขั้นตอนตามวิธีการปฏิบัติดังนี้ สายการประกอบตัวยูจะมีทางเข้าการเริ่มต้นการทำงานและทางออกของสายงานการผลิตแยกออกจากกันทำให้คนงานสามารถทำงานได้อย่างอิสระ สายการประกอบตัวยูจะต้องทำการปรับความสมดุลเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงการผลิต สายการประกอบตัวยูที่มีลักษณะงานแบบผสมรูปแบบการทำงานจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ผลิตและเมื่อทำการตรวจสอบจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาพบว่าได้ผลผลิตดีขึ้น 76% สามารถลดเวลาการทำงานได้ 75% และยังลดของเสียลงไป 86%

Vilarinho and Simaria (2002) งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการคิดรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับสายการประกอบแบบผสมที่มีสถานีงานแบบขนานและมีเงื่อนไขในการทำงาน โดยจะทำการควบคุมการสร้างสถานีงานแบบขนานให้มีเป้าหมาย คือ จำนวนสถานีงานลดน้อยลงและงานในสถานีงานต้องมีความสมดุลกัน โดยทำการพัฒนาการจำลอง Annealing เพื่อแก้ปัญหาที่ซับซ้อนจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะทำการหาค่าที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์แรก ขั้นตอนที่สองจะทำการหาวัตถุประสงค์ที่สอง

Bukchin and Rubinovitz (2003) ศึกษาการออกแบบสายการประกอบที่มีการขนานสถานีงานและเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานสามารถเลือกได้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด และใช้ค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยที่สุด งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าปัญหาการออกแบบสายการประกอบสถานีงานขนานเป็นกรณีพิเศษของปัญหาการเลือกเครื่องมือสำหรับสายการประกอบ กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Linear Integer Programming) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัตถุประสงค์ที่กล่าวมาข้างต้น

Chiang and Urban (2006) ได้อธิบายถึงวิธีการจัดงานในสถานีงานบนสายการประกอบตัวยู โดยแต่ละสถานีงานจะมีการทำงานแบบข้างหน้า (Front) และการเข้ามาทำงานข้างหลัง (Back) ซึ่งมีผลทำให้สถานีงานในสายการประกอบตัวยูมีจำนวนน้อยกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง ซึ่งงานในแต่ละสถานีงานจะต้องทำงานควบคู่ระหว่างงานที่ทำข้างหน้าและข้างหลังในแต่ละสถานี และจะต้องไม่ผิดข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ก่อนหลังของแต่ละงาน

Gökçen et al. (2006) ได้นำเสนอขั้นตอนเชิงฮิวริสติกพร้อมโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบขนานภายใต้รูปแบบ Passive และ Active โดยแสดงให้เห็นว่า การเกิดขึ้นของสถานีงานร่วมภายในสายการประกอบแบบขนาน ซึ่งบรรจุชิ้นงานจาก สองสายการประกอบเดี่ยวที่อยู่ติดกัน จะทำให้การดำเนินงานทั้งระบบนั้นอาศัยจำนวนสถานีงานที่ น้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบการดำเนินงานในลักษณะสายการประกอบเดี่ยวที่เป็น อิสระต่อกันจำนวนหลายๆ สาย ลำดับต่อมา Benzer et al. (2007) ได้พัฒนาแบบจำลอง เครือข่าย (Network Model) สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่มี วัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด โดยแบบจำลองนี้พัฒนามาจากแบบจำลองเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-Route Model) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยว

Zhang and Li (2007) ได้นำเสนออัลกอริทึมในการเพิ่มประสิทธิภาพการหาวัตถุประสงค์ หลายๆ วัตถุประสงค์พร้อมๆ กัน โดยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการ จำแนก (Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) ซึ่ง อัลกอริทึมนี้ มีวิธีการอยู่ 3 วิธี คือ วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (The Weighted Sum Approach), วิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) และวิธีแยกขอบเขตและลงโทษ (The Boundary Intersection Methods) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกปัญหา เพิ่มประสิทธิภาพสเกลลา และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานได้พร้อมกัน พบว่า MOEA/D มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่มี 3 วัตถุประสงค์ ได้ดีกว่า วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)

Simon (2008) ได้นำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้แนวคิดการย้ายถิ่นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีความต้องการที่จะอยู่อาศัยในที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่ถ้าพื้นที่ที่อยู่อาศัยนั้นมีความหนาแน่นมาก สิ่งมีชีวิตจะเริ่มทำการย้ายถิ่นที่อยู่อาศัยไปสู่ที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อยกว่า และพัฒนาที่อยู่ใหม่ให้มีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ได้มีการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากปัญหาในภาคปฏิบัติ ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมหลายตัว

Scholl and Boysen (2009) ได้พิจารณาแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่ผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยการแก้ปัญหาย่อยสองปัญหาไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ (1) กำหนดชนิดผลิตภัณฑ์ลงสู่สายการประกอบแต่ละสาย และ (2) จัดสมดุลสายการประกอบ แบบขนาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดและมีการใช้พื้นที่ที่กระชับที่สุด ทั้งนี้แบบจำลองกำหนดสมการเชิงเส้นฐานสอง (Binary Linear Programming) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยอาศัยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch-and-Bound) สำหรับแก้ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลางเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ขณะเดียวกันได้พัฒนาวิธีการเชิงฮิวริสติกในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่

Hwang and Katayama (2009) นำเสนอแนวทางในการจัดการปัญหาการจัดสมดุลภาระงานให้กับสายการประกอบรูปตัวยู ซึ่งผลิตผลิตภัณฑ์แบบผสม แนวทางนี้มีรากฐานมาจากโครงสร้างการช่วยเหลือที่มีหลายการตัดสินใจของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อปรับปรุงความผันแปรของภาระงาน ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ใช้ประกอบด้วยการหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด และความผันแปรของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด

ปารเมศ ชูติมา และคณะ (2552) ได้นำอัลกอริทึมการบรรจบมาประยุกต์ใช้สำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบลักษณะตัวยูที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ซึ่งวัตถุประสงค์ที่พิจารณา คือ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความผันแปรของเวลาในสถานีงานทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการบรรจบกับอัลกอริทึม Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) ผลที่ได้ คือ อัลกอริทึมการบรรจบมีประสิทธิภาพดีกว่า เพราะคำตอบมีการลู่เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงคิดเป็น 45.145% เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง 100% และเวลาในการประมวลผลเร็วกว่า อัลกอริทึม NSGA-II

Ma (2010) ได้ศึกษาเรื่องรูปแบบการอพยพเคลื่อนย้ายชนิดต่างๆสำหรับนำไปใช้ในวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้ค่าของ Species Count ในการเลือกว่าควรจะมีการอพยพเข้ามากน้อยเท่าใด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบชนิดของรูปแบบการอพยพ 6 รูปแบบ และผลการวิจัยสรุปว่า การอพยพรูปแบบที่ไม่ใช่เส้นตรง (Nonlinear Migration Models) มีความเหมาะสมกว่ารูปแบบเส้นตรง (Linear Migration Models)

สุชาติ คัดอ่าน (2553) ได้เสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูที่มีสถานีนงานแบบขนานในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยมีวัตถุประสงค์ คือ จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด ความสมดุลระหว่างสถานีนงาน และความสมดุลภายในสถานีนงาน ซึ่งการเพิ่มสถานีนงานขนานนั้นจะเพิ่มเมื่อสถานีนงานนั้นมีค่าเวลาการทำงานเกินรอบเวลาที่กำหนด และจะเพิ่มได้ไม่เกิน 1 สถานีนงาน โดยการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมทั้ง 5 แบบ คือ COMSOAL NSGA-II วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการค้นหาค่าตอบสำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูที่มีสถานีนงานแบบขนาน พบว่าอัลกอริทึมวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่ใช้เวลาในการค้นหาค่าตอบนานกว่าอัลกอริทึมแบบอื่น

ณัฐชัย โยธาบริวาร (2556) ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม โดยได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์ทั้งหมด 4 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนงานสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของงานสูงที่สุด ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับมาเปรียบเทียบกับตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาราโต อัตราส่วนของค่าตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่าตอบ

รูปแบบสายการประกอบได้ถูกพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอีก 1 รูปแบบนั้นคือ รูปแบบสายการประกอบด้วยแบบขนาน (Parallel U-Shape Assembly Line) โดย Kucukkoc and Zhang (2015) ได้พัฒนา รูปแบบสายการประกอบแบบด้วยขนาน โดยการรวมข้อดีของรูปแบบสายการประกอบแบบขนานและสายการประกอบรูปตัวยูเข้าด้วยกัน คือ การมอบหมายงานไปยังสถานีงานที่อยู่ระหว่างสองสายการประกอบ (สายการประกอบด้านในและด้านนอก) ที่อยู่ติดกัน เกิดเป็น สถานีงานร่วม (Multi-Line Station) และสถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) ที่เป็นจุดเด่นของสายการประกอบด้วย เพื่อสร้างโอกาสในการมอบหมายงานไปยังสถานีงาน และเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทรัพยากร โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูขนานแบบผลิตภัณฑ์ชนิดเดียว คือ Parallel U-line Heuristic (PUH) พบว่า การจัดสมดุลสายการประกอบของรูปแบบด้วยขนาน มีจำนวนสถานีงานน้อยกว่า การจัดสมดุลสายการประกอบของรูปแบบด้วย

He and Yen (2016) เสนอวิธีใหม่ในการจัดการความท้าทายในการแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพวัตถุประสงค์จำนวนมาก (MaOPs) โดยตรง ซึ่งเป็นการพัฒนามาจากอัลกอริทึมพื้นฐานในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก (MOEA/D) โดยการออกแบบใหม่นี้ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ 1. การทำให้ประชากรทั้งหมดเข้าใกล้จุดเป้าหมายที่อยู่ใกล้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงได้อย่างรวดเร็ว 2. นำเสนอกลยุทธ์การปรับปรุงความหลากหลายที่ถูกนำไปใช้เพื่ออำนวยความสะดวกให้ประชากรมีระยะห่างและกระจายได้อย่างดี อัลกอริทึมที่นำเสนอนี้จะถูกเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่พัฒนามาจากอัลกอริทึมพื้นฐานห้าแบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีนี้แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นทั้งในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและความหลากหลายของคำตอบ

Cheng et al. (2017) ได้อธิบายถึงปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก (Many-Objective Optimization Problems) คือปัญหาที่มีวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งการแก้ปัญหานี้ทำให้เกิดการคิดค้นพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากหลายอัลกอริทึม แต่ยังคงได้รับความสนใจน้อยในการตรวจสอบประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงทำการส่งเสริมการวิจัยของวิวัฒนาการการเพิ่มประสิทธิภาพวัตถุประสงค์จำนวนมาก โดยนำปัญหา 15 ปัญหาการทดสอบที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายเพื่อสร้างชุดทดสอบมาตรฐาน สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาพัฒนางานวิจัยนี้ สามารถสรุปความแตกต่างระหว่างงานวิจัยที่ทำการศึกษากับงานวิจัยที่ผ่านมาดังตาราง 2.1 โดยงานวิจัยเดิมที่ใกล้เคียงที่สุด คือ งานวิจัยเรื่องการจัดสมดุลสายการประกอบด้วยแบบขนาน (Balancing of Parallel U-Shaped Assembly Lines) ของ (Kucukkoc and Zhang, 2015)

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างงานวิจัยที่ทำการศึกษากับงานวิจัย

งานวิจัย	รูปแบบสายการประกอบที่นำเสนอ	รูปแบบผลิตภัณฑ์	อัลกอริทึม	วัตถุประสงค์	วิธีการจัดสถานีงาน ลงบนสายการประกอบ
Kucukkoc and Zhang (2015)	สายการประกอบแบบตัวขนาน	ผลิตภัณฑ์ชนิดเดียว	Parallel U-line Heuristic (PUH)	จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด	- มีการกำหนดตำแหน่งแน่นอนในการจัดสถานีงานทุกๆ ครั้งที่ทำการจัดสมดุล
งานวิจัยที่จะศึกษา	สายการประกอบแบบตัวขนาน	ผลิตภัณฑ์ผสม	1.อัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) 2.วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEAD)	1.จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด 2. จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด 2.ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด 3.ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด	มีความหลากหลายในการจัดตำแหน่งของสถานีงานลงบนสายการประกอบ

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกในการจัดสมมูลสายการประกอบ

ในบทนี้อธิบายถึงเนื้อหาที่เกี่ยวกับทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการการเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์ บนพื้นฐานของการสลายตัว (A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA / D) วิธีการและขั้นตอนการทำงานของ MOEA / D การกำหนดค่าพารามิเตอร์ ตัวอย่างการนำวิธี MOEA / D มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน

3.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA / D)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก (A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA / D) เป็นวิธีการที่ใช้ในการพิจารณาวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ไปพร้อมๆกัน โดยมีวิวัฒนาการจากการสลายตัวของปัญหา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางสเกล และประสิทธิภาพการทำงานได้พร้อมกัน โดยวิธีการในการสลายตัวของปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพวัตถุประสงค์หลายๆวัตถุประสงค์นั้น จะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของแต่ละวัตถุประสงค์ i (λ_{pi}) ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight Point: λ_p) จนครบตามจำนวนจุดที่กำหนด หรือ ตามจำนวนของประชากร (Number of Population) จากนั้นทำการหาจุดข้างเคียง (Neighborhood Point) จากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidian Distance) ของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) เพื่อกำหนดประชากรย่อย (Sub-population) หรือ ปัญหาย่อย (Subproblem) ที่จะทำการพัฒนาคำตอบ โดยการพัฒนาคำตอบของประชากร จะใช้การสลับสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งเป็นวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อให้ได้คำตอบรุ่นใหม่ที่มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิมที่เป็นค่าที่ดี ซึ่งหลักการในการหาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยใช้หลักการจำแนกของอัลกอริทึมนี้คือวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) (Zhang and Li, 2007) โดยกระบวนการพัฒนาคำตอบนั้นจะมีการเก็บคำตอบเริ่มต้น และคำตอบที่ถูกพัฒนาให้ดีขึ้นตลอดกระบวนการเข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) เมื่อจบการทำงานแต่ละเจเนเรชัน จะทำการหาค่าความแข็งแรง (Fitness) ด้วยการจัดลำดับแบบไม่

ถูกครอบงำ (Non-dominate Sorting) เมื่อทำการพัฒนาครบตามจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนดแล้ว จะได้คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ ซึ่งเป็นคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D

3.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D

1. จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (Lattice : H)

จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเป็นตัวกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) หรือ จำนวนของประชากร (Number of Population) โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะมีช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 คำนวณได้ดังนี้ $\left\{\frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H}\right\}$ ซึ่งจำนวนของค่าถ่วงน้ำหนักจะเท่ากับ $H + 1$

2. จำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood Of Each Weight Vector: T)

จำนวนของจุดข้างเคียง จะเป็นตัวกำหนดประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา ซึ่งจำนวนของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T + 1$

3. ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง

ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง จะเป็นตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงนั้น ถ้าค่าร้อยละมีค่าสูงจะทำให้สตริงคำตอบในประชากรย่อยมีโอกาสเป็นสตริงเดียวกันหมดได้ไวขึ้น ซึ่งถ้าเป็นตามทีกล่าวมาจะส่งผลให้ไม่เกิดการพัฒนาคำตอบอีก

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียง เท่ากับ 30 และกำหนดให้จำนวนของจุดข้างเคียง (T) เท่ากับ 4 ดังนั้นจะทำการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ $\frac{30}{100} \times (4 + 1) = 1.5$ จุด แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการปัดเศษขึ้นเสมอ ดังนั้นจะต้องทำการสุ่ม 2 จุด เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

3.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบมาก วัตถุประสงคบนสายการประกอบผลิตภัณฑผสมแบบลักษณะตัวยูขนาน

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบนั้นจะมีขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล ขั้นตอนการพัฒนาและการเก็บคำตอบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ของแต่ละจุด ตามจำนวนของประชากรที่กำหนดโดยใช้ฟังก์ชันซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งมีลักษณะเป็นตารางเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (P) \times จำนวนวัตถุประสงคทั้งหมด (O) โดย $\sum_{i=1}^O \lambda_{pi} = 1 \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$
2. กำหนดจุดข้างเคียง เท่ากับ T ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p โดยวิธีการคือการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณากับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่นๆ ตามสมการที่ 3.1 และตัวอย่างตามตารางที่ 3.1 จากนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T

$$d_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^O (\lambda_{pi} - \lambda_{ji})^2} \quad \forall p \in P, \forall j \in P, p \neq j \quad (3.1)$$

เมื่อ d_{pj} คือ ระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก p กับ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก j
 O คือ จำนวนวัตถุประสงคทั้งหมด

ตารางที่ 3.1 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก p กับ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก j

$p \backslash j$	1	2	...	...	p
1		d_{12}	...	...	d_{1p}
2	d_{21}		...	...	d_{2p}
...
...
p	d_{p1}	d_{p2}	...	...

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด โดยการสุ่ม (Random) ซึ่งความยาวของสตริงคำตอบจะเท่ากับจำนวนชั้นงานของสองสายการประกอบรวมกัน
4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร
5. เก็บสตริงคำตอบ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น ไว้ในคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

6. กำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา (Initial Point) เริ่มจากการกำหนดค่า $p = p$ โดยค่า $p = \{1, 2, \dots, P\}$ เพื่อกำหนดประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อย คือ สตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับสตริงคำตอบ ณ จุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา
7. ทำการสุ่มเลือก 2 สตริงคำตอบ โดยสุ่มจากสตริงที่อยู่ในประชากรย่อย โดย 2 สตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน เพื่อนำไปทำการสลับสายพันธุ
8. ทำการพัฒนาสตริงคำตอบโดยการสลับสายพันธุ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้การสลับสายพันธุแบบ One-point Crossover คือการสลับสายพันธุระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง และทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยใช้ Mapping Relationship ของ Goldberg and Lingle (1985) ซึ่งมีการหลักพัฒนาดังต่อไปนี้
 - 1) สุ่มจุดที่จะสลับสายพันธุ โดยสุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง N-1 ซึ่ง N คือความยาวของสตริงคำตอบ
 - 2) ทำการสลับสายพันธุระหว่าง 2 สตริงคำตอบ จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก 2 สตริง
 - 3) สุ่มช่วงที่จะทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบ ได้แก่ ช่วงก่อนจุดสลับสายพันธุหรือหลังจุดสลับสายพันธุ โดยสุ่มค่า 0 กับ 1 ตามลำดับ
 - 4) ทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูกไม่ให้ค่าลำดับความสำคัญ (Priority) ซ้ำกัน โดยใช้วิธี Mapping Relationship
9. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก และปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์
10. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก เพื่อให้เปรียบเทียบค่าแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ โดยมีสูตรการนอร์มัลไล ดังสมการที่ 3.2

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.0001) - z_i^*} \quad (3.2)$$

เมื่อ z_i^* คือ $\min\{f_i(x)|x \in P\}$ โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_0^*)$
 z_i^{nad} คือ $\max\{f_i(x)|x \in P\}$ โดยที่ $z_i^{nad} = (z_1^{nad}, \dots, z_0^{nad})$
 0 คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

11. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดของค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_p ที่กำลังพิจารณา โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) โดยมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบดังต่อไปนี้ สามารถสรุปประกอบได้ตามรูปที่ 3.1

- 1) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาคุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา
- 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง และสตริงคำตอบอยู่ในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา
- 3) พิจารณาค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ที่ได้จากข้อที่ 2 ว่าค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง ดีกว่าสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาหรือไม่ ในงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด ดังนั้นค่าที่ดีกว่าคือคำตอบนั้นต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเทียบเท่า
- 4) ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกดีกว่าทุกสตริงคำตอบให้เลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด แต่ถ้ามีค่าเท่ากันให้สุ่มเลือกแบบอิสระ แล้วทำการแทนสตริงคำตอบนั้นพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลงในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา จากนั้นทำขั้นตอนที่ 12 ต่อ แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 13

เมื่อมีการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา (Initial Point) จะทำการเก็บคำตอบนั้นเข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

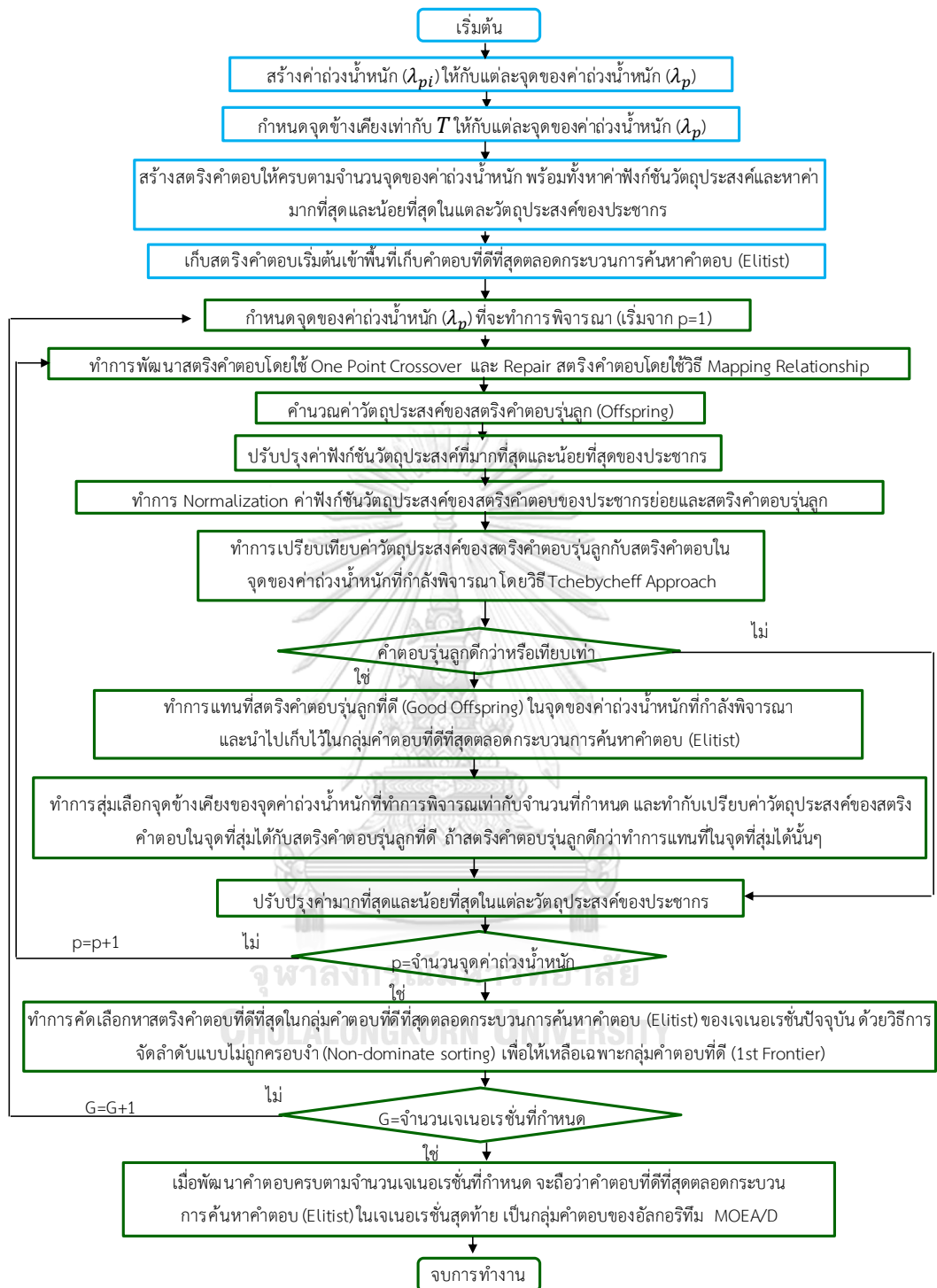
λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	f_1	f_2	f_3	f_4	$\lambda_{p1} \times f_1$	$\lambda_{p2} \times f_2$	$\lambda_{p3} \times f_3$	$\lambda_{p4} \times f_4$	max
p	0	0.5	0	0.5									$\lambda_{p2} \times f_2$
Crossover1	0	0.5	0	0.5									$\lambda_{p4} \times f_4$
Crossover2	0	0.5	0	0.5									$\lambda_{p2} \times f_2$

3
Compare
≤ is Good

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบ

12. สุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ระหว่างสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ได้แทนที่คำตอบในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้
หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบเหมือนกับขั้นตอนที่ 11 แต่จะทำการเปรียบเทียบค่าเทบปีเซฟโดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าดีกว่าทำการแทนสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้
13. ปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ถ้า $p < P$ ให้กำหนด $p = p + 1$ แล้วกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $p = P$ ให้ไปทำขั้นตอนที่ 14 ต่อ
14. ได้รับสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจนเนอเรชันปัจจุบัน เพื่อนำไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจนเนอเรชันถัดไป ถ้า $G < Genaretion$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ พร้อมทั้งทำการปรับปรุงพื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ด้วยการตัดคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกันออก (Remove Duplicates) แล้วนำมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting และเก็บเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุดที่อยู่ใน First Frontier แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $G = Genaretion$ ให้ทำขั้นตอนที่ 15
15. หยุดกระบวนการพัฒนาคำตอบ และแสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D

โดยขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D ในการแก้ปัญหาการจตุสมมูลสายการประกอบมาก วัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนิควาน สามารถเขียนเป็นแผนภาพกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

3.4 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการ จำแนกมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการ ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน

จากขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D ที่ได้อธิบายไปข้างต้นนั้น สามารถนำมา
ประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนานได้ดังตัวอย่างนี้ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบ 4
วัตถุประสงค์ ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบที่ 1 (สายการประกอบด้านนอก) คือผลิตภัณฑ์ A
จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น A_I และ A_{II} มีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.17 และสัดส่วนการ
ผลิตของแต่ละรุ่นและเวลาปฏิบัติงานของชิ้นงาน ตามตารางที่ 2.2 ขณะที่สายการประกอบที่ 2 (สาย
การประกอบด้านใน) ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบ คือผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น B_I และ
 B_{II} มีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.18 และสัดส่วนการผลิตของแต่ละรุ่นและเวลา
ปฏิบัติงานของชิ้นงาน ตามตารางที่ 2.3 โดยตัวอย่างนี้กำหนดรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 10
หน่วยเวลา และกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึม MOEA/D ดังนี้

- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (H) คือ 2
- จำนวนของจุดข้างเคียง (T) คือ 4
- ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง คือ ร้อยละ 30
- จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) เท่ากับ 4

ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากรได้ดังนี้
กำหนดให้ $H=2$, $O=4$

$$\begin{aligned} \lambda \text{ set} &= C_{O-1}^{H+O-1} \\ &= C_{4-1}^{2+4-1} \\ &= C_3^5 = 10 \end{aligned}$$

จะได้จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากร คือ 10

ตัวอย่างขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ของแต่ละจุด ตามจำนวนของประชากร (Population) ที่กำหนดโดยใช้
ฟังก์ชันซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นตารางเมทริกซ์
ขนาดเท่ากับ จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (P) x จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) ซึ่งตัวอย่างนี้

จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 10 และจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมดเท่ากับ 4 ดังนั้นจะได้ ตารางเมทริกซ์ขนาด 10×4 และมีค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p

λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	0	1	0	0
2	1	0	0	0
3	0	0.5	0.5	0
4	0.5	0	0.5	0
5	0	0	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0	0
7	0	0.5	0	0.5
8	0.5	0	0	0.5
9	0	0	0	1
10	0	0	1	0

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักในตารางนั้นจะมีเพียง 0, 0.5 และ 1 เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีวิธีคิดจาก $\left\{\frac{0}{H}, \dots, \frac{H}{H}\right\}$ ซึ่งจะได้ $\left\{\frac{0}{2}, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}\right\}$ คือ 0, 0.5 และ 1

- กำหนดจุดข้างเคียง เท่ากับ T ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p โดยเริ่มจากคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา (λ_p) กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่นๆ (λ_j) โดยที่ $p \neq j$ เริ่มจากกำหนดให้ $p = 1, j = 2$ จะได้ค่า $d_{12} = \sqrt{(0 - 1)^2 + (1 - 0)^2 + 0 + 0} = \sqrt{2} = 1.41$ และทำการคำนวณค่า d_{pi} ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆได้ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λ_p) กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่น (λ_j)

$j \backslash p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		1.41	0.71	1.22	1.22	0.71	0.71	1.22	1.41	1.41
2	1.41		1.22	0.71	1.22	0.71	1.22	0.71	1.41	1.41
3	0.71	1.22		0.71	0.71	0.71	0.71	1.00	1.22	0.71
4	1.22	0.71	0.71		0.71	0.71	1.00	0.71	1.22	0.71
5	1.22	1.22	0.71	0.71		1.00	0.71	0.71	0.71	0.71
6	0.71	0.71	0.71	0.71	1.00		0.71	0.71	1.22	1.22
7	0.71	1.22	0.71	1.00	0.71	0.71		0.71	0.71	1.22
8	1.22	0.71	1.00	0.71	0.71	0.71	0.71		0.71	1.22
9	1.41	1.41	1.22	1.22	0.71	1.22	0.71	0.71		1.41
10	1.41	1.41	0.71	0.71	0.71	1.22	1.22	1.22	1.41	

จากนั้นทำการกำหนดจุดข้างเคียง ซึ่งตัวอย่างนี้กำหนดให้ค่า T เท่ากับ 4 ดังนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pi} ที่มีค่าน้อยที่สุด 4 ค่า ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่พิจารณา ตามตารางที่ 3.4 โดยมีตัวอย่างการเลือกดังนี้ เมื่อพิจารณาที่จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) พบว่าค่า d_{pi} ที่น้อยที่สุดคือ 0.71 ซึ่งประกอบด้วยจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก 3 จุด คือ λ_3, λ_6 และ λ_7 แต่ในตัวอย่างนี้ต้องการ 4 จุด ดังนั้นจึงพิจารณาค่า d_{pi} ที่น้อยรองลงมา คือ 1.22 ซึ่งประกอบด้วยจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก 3 จุด คือ λ_4, λ_5 และ λ_8 จึงทำการสุ่มเพื่อเลือกเพียง 1 จุด ซึ่งสุ่มได้ λ_4 ดังนั้นจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_6$ และ λ_7

ตารางที่ 3.4 จุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p แต่ละจุด

Neighbourhood	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
1	λ_3	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_1	λ_2	λ_4	λ_3
2	λ_4	λ_4	λ_5	λ_3	λ_7	λ_3	λ_5	λ_5	λ_5	λ_4
3	λ_6	λ_6	λ_7	λ_8	λ_8	λ_4	λ_6	λ_7	λ_7	λ_5
4	λ_7	λ_8	λ_{10}	λ_{10}	λ_9	λ_7	λ_9	λ_9	λ_8	λ_7

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดโดยการสุ่ม

ทำการสร้างสตริงคำตอบของชิ้นงานคือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับชิ้นงาน (A1-A12 และ B1-B12) ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งจะเป็นการสุ่มเลือกแบบอิสระ และค่าลำดับความสำคัญจะต้องไม่ซ้ำกัน จำนวนสตริงคำตอบจะเท่ากับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดคือ 10 สตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.5 สตริงคำตอบเริ่มต้นของเซตค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด

λ_p	string	Task priority																							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19
2	2	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
3	3	19	14	4	22	21	20	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16
4	4	19	18	22	12	24	15	1	14	7	11	2	21	16	9	13	8	17	10	6	3	20	5	4	23
5	5	18	10	1	6	20	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	24	14	19	9	15	16
6	6	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
7	7	9	1	18	24	7	21	15	4	3	5	8	22	2	20	23	11	16	14	12	19	6	10	17	13
8	8	22	10	9	3	19	15	8	21	14	2	20	7	4	12	13	17	18	6	23	1	11	16	5	24
9	9	15	21	2	23	16	9	22	11	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6
10	10	11	17	4	3	21	12	20	13	15	9	19	23	5	24	22	2	7	6	1	16	10	8	18	14

4. ทำการถอดรหัสสตริงคำตอบเพื่อคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ตามตารางที่ 3.6 โดย f_1 คือ จำนวนสถานีงาน (Number of Workstation), f_2 คือ จำนวนสถานี (Number of Station), f_3 คือ ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน (Different Workload Between Workstations) และ f_4 คือ ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวข้องกันภายในสถานีงาน (Index of Task Unrelatedness)

ตารางที่ 3.6 ค่าวัตถุประสงค์ และค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

λ_p	String	Objective				Max objective				Min objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	1	9	6	0.042	0.357	10	7	0.094	0.545	9	4	0.016	0.357
2	2	10	4	0.047	0.412								
3	3	9	7	0.016	0.500								
4	4	10	6	0.094	0.412								
5	5	10	4	0.056	0.474								
6	6	10	5	0.061	0.545								
7	7	10	7	0.082	0.375								
8	8	10	6	0.079	9.375								
9	9	10	5	0.059	0.444								
10	10	9	7	0.029	0.400								

5. นำสตริงคำตอบ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้นเก็บไว้ในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การเก็บคำตอบของประชากรเริ่มต้นในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
1	9	6	0.042	0.357
2	10	4	0.047	0.412
3	9	7	0.016	0.500
4	10	6	0.094	0.412
5	10	4	0.056	0.474
6	10	5	0.061	0.545
7	10	7	0.082	0.375
8	10	6	0.079	9.375
9	10	5	0.059	0.444
10	9	7	0.029	0.400

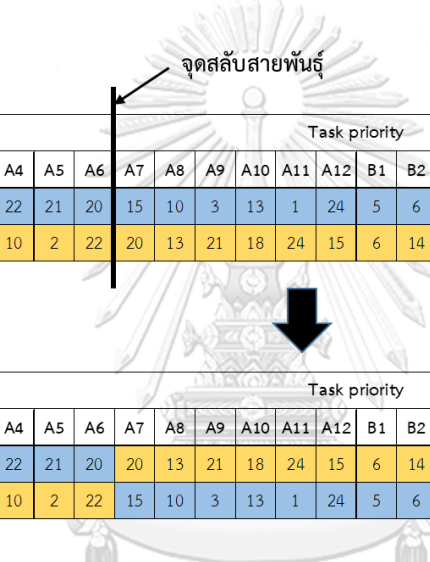
ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

6. เริ่มพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ($G=1$) โดยกำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา (Initial Point) ด้วยการกำหนดค่า p เริ่มจากการกำหนดค่า $p = 1$ โดยค่า $p = \{1, 2, \dots, 10\}$ เพื่อกำหนดประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ตัวอย่าง เริ่มพิจารณาจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดแรกคือ λ_1 และมีจุดข้างเคียง คือ $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_6$ และ λ_7 (จากตารางที่ 3.4) ซึ่งสตริงคำตอบที่ทำการสุ่มให้กับกลุ่มประชากรย่อย ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 สตริงคำตอบของประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาสำหรับการพัฒนาคำตอบ

λ_p	string	Task priority																							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19
3	3	19	14	4	22	21	20	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16
4	4	19	18	22	12	24	15	1	14	7	11	2	21	16	9	13	8	17	10	6	3	20	5	4	23
6	6	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
7	7	9	1	18	24	7	21	15	4	3	5	8	22	2	20	23	11	16	14	12	19	6	10	17	13

7. สุ่มเลือก 2 สตริงคำตอบจากประชากรย่อยในตารางที่ 3.8 โดย 2 สตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน เพื่อนำไปทำการสลับสายพันธุ์ ในที่นี้สุ่มได้ สตริงคำตอบที่ 3 และ 6
8. ทำการพัฒนาสตริงคำตอบโดยการสลับสายพันธุ์ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) แบบ One Point Cross-Over โดยนำสตริงคำตอบที่ 3 และ 6 มาทำการสลับสายพันธุ์ระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง โดยมีหลักการพัฒนาดังต่อไปนี้
- 1) สุ่มจุดที่จะสลับสายพันธุ์ โดยสุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง 23 เนื่องจาก N เท่ากับ 24 ซึ่งสุ่มได้ 6 ดังนั้นจุดที่จะต้องทำการสลับสายพันธุ์จะอยู่ระหว่าง A6 และ A7 ดังรูปที่ 3.3



string	Task priority																							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
3	19	14	4	22	21	20	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16
6	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4

string	Task priority																							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Offspring1	19	14	4	22	21	20	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
Offspring2	8	9	5	10	2	22	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16

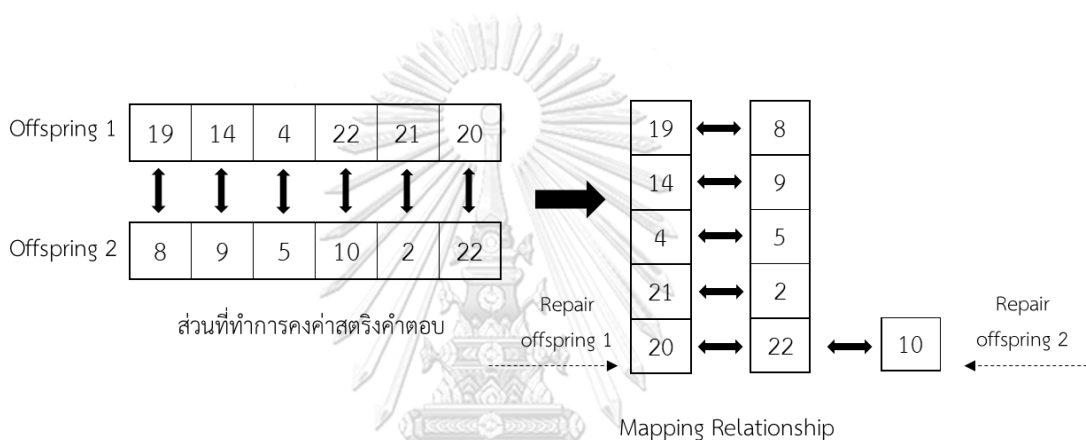
รูปที่ 3.3 การสลับสายพันธุ์ของสตริงคำตอบ

- 2) ทำการสุ่มว่าจะทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบช่วงก่อนหรือหลังจุดสลับสายพันธุ์ โดยตัวอย่างนี้สุ่มได้หลังจุดสลับสายพันธุ์ ดังนั้นจะทำการคงค่าสตริงคำตอบก่อนจุดสลับสายพันธุ์ และทำการพิจารณาว่าสตริงคำตอบหลังจุดสลับสายพันธุ์นั้นมีค่าบิตหรือค่าลำดับความสำคัญค่าไหนบ้างที่ซ้ำกับสตริงคำตอบก่อนจุดสลับสายพันธุ์ ซึ่งในสตริงคำตอบรุ่นลูกที่พัฒนาได้ตัวที่ 1 (Offspring 1) ค่าลำดับความสำคัญที่ซ้ำคือ 20, 21, 14, 19, และ 4 ส่วนสตริงคำตอบรุ่นลูกที่พัฒนาได้ตัวที่ 2 (Offspring 2) ค่าลำดับความสำคัญที่ซ้ำคือ 10, 5, 9, 2 และ 8 ดังรูปที่ 3.4

string	Task priority																							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Offspring1	19	14	4	22	21	20	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
Offspring2	8	9	5	10	2	22	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16

รูปที่ 3.4 การคงค่าสตริงคำตอบก่อนจุดสลับสายพันธุ์และค่าลำดับความสำคัญที่ต้องทำการซ่อมแซม

3) ทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบไม่ให้ซ้ำกัน โดยการสร้าง Mapping Relationship ให้กับสตริงคำตอบที่คงค่า (Fix) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การสร้าง Mapping Relationship

วิธีการคือ สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 (Offspring 1) จะทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบหลังจุดสลับสายพันธุ์โดยพิจารณา Mapping Relationship จากซ้ายไปขวา ซึ่งมีค่าลำดับความสำคัญ 5 ค่า ที่ต้องทำการซ่อมแซม ดังนี้ $19 \rightarrow 8, 14 \rightarrow 9, 4 \rightarrow 5, 21 \rightarrow 2$ และ $20 \rightarrow 10$ ส่วนสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 2 (Offspring 2) จะพิจารณา Mapping Relationship จากขวามาซ้าย ซึ่งมีค่าลำดับความสำคัญ 5 ค่า ที่ต้องทำการซ่อมแซมเช่นกัน ได้แก่ $8 \rightarrow 19, 9 \rightarrow 14, 5 \rightarrow 4, 2 \rightarrow 21$ และ $10 \rightarrow 20$ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าลำดับความสำคัญจนไม่มีค่าที่ซ้ำกัน จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริงคำตอบที่ผ่านการซ่อมแซม ตามตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 สตริงคำตอบที่รุ่นลูกทั้ง 2 สตริงที่ผ่านการซ่อมแซม

string	Task priority																							
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Offspring1	19	14	4	22	21	20	10	13	2	18	24	15	6	9	17	1	8	16	12	7	23	3	11	5
Offspring2	8	9	5	10	2	22	15	20	3	13	1	24	4	6	14	23	7	21	12	18	11	17	19	16

9. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่มีการซ่อมแซมแล้ว จากการนำไปถอดรหัสสตริงคำตอบ ได้ค่าวัตถุประสงค์ดังตารางที่ 3.10 พร้อมทั้งปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการซ่อมแซม

String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 1	9	4	0.060	0.550
Offspring 2	10	7	0.034	0.500

ตารางที่ 3.11 การปรับปรุงค่าวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดค่าใหม่

String	Objective				Max ใหม่				Min ใหม่			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Max เดิม	10	7	0.094	0.545	10	7	0.094	0.55	9	4	0.016	0.35
Min เดิม	9	4	0.016	0.357								
Offspring 1	9	4	0.060	0.550								
Offspring 2	10	7	0.034	0.500								

จากตารางที่ 3.11 มีเพียงค่ามากที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 4 เพียงตัวเดียวที่มีการเปลี่ยนค่าใหม่ คือ ค่ามากที่สุดจากเดิม คือ 0.545 เป็น 0.55

10. ทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก จากสมการ
$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.00001) - z_i^*}$$
 เมื่อ i คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ($i = 1, 2, 3, 4$) โดยที่ z_i^* และ z_i^{nad} คือค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการปรับปรุง

ตัวอย่าง สตริงคำตอบที่ 1 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

$$\text{เมื่อ } f_2 = 6, z_2^* = 4, z_2^{nad} = 7$$

$$\text{จะได้ } \bar{f}_2 = \frac{6-4}{(7+0.00001)-4} = 0.666664 \approx 0.6667$$

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการนอร์มัลไลซ์แล้วของสตริงคำตอบของประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก แสดงในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ทำการนอร์มัลไลซ์แล้ว

String	Objective			
	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4
1	0	0.6667	0.336	0.000
3	0	1	0.000	0.741
4	1	0.6667	0.996	0.283
6	1	0.3333	0.569	0.976
7	1	1	0.845	0.093
Offspring 1	0	0	0.566	1.000
Offspring 2	1	1	0.232	0.741

11. เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

โดยมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบดังต่อไปนี้

- นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 จากตารางที่ 3.12 คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ ณ จุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ตามตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการออร์มัลแล้วคูณกับค่าถ่วงน้ำหนัก

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$
1	1	0	1	0	0	0	0.667	0.336	0.000	0	0.667	0	0
1	Offspring 1	0	1	0	0	0	0.000	0.566	1.000	0	0	0	0
1	Offspring 2	0	1	0	0	1	1.000	0.232	0.741	0	1	0	0

- 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ ของสตริงคำตอบที่1 สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่1 (Offspring1) และสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่2 (Offspring 2) โดยเลือกค่า $\lambda_{1i} \times \bar{f}_i$ ที่มากที่สุดจากค่าทั้งหมดของสตริงคำตอบนั้น เช่น จากตารางที่ 3.15 สตริงคำตอบที่1 ค่า $\lambda_{12} \times \bar{f}_2$ เท่ากับ 0.667 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดจากทั้ง 4 ค่า ดังนั้นค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ คือ 0.667 และค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบอื่น แสดงดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริง

P	String	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$
1	1	0	0.667	0	0	0.667
1	Offspring 1	0	0	0	0	0
1	Offspring 2	0	1	0	0	1

- 3) ทำการปรับปรุงให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด โดยพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบที่ 1 สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่1 และสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 2 ตามตารางที่ 3.15 ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกน้อยกว่าหรือเท่ากับ ค่าของสตริงคำตอบที่1 จะทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในตำแหน่งจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1

ตารางที่ 3.15 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุด

P	String	$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$	Selection
1	1	0.667	
1	Offspring 1	0 (น้อยกว่า)	Good
1	Offspring 2	1 (มากกว่า)	Bad

- 4) จากตารางที่ 3.15 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 มีค่าน้อยกว่าสตริงคำตอบ 1 ดังนั้นจึงนำสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 แทนที่สตริงคำตอบ 1 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ตามตารางที่ 3.16 เมื่อมีการแทนที่สตริงคำตอบจะเก็บสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ดังตารางที่ 3.17 จากนั้นทำขั้นตอนที่ 12 ต่อไป

ตารางที่ 3.16 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 (Offspring 1) ในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
1	Offspring 1	0	1	0	0	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	9	4	0.06	0.55
3	3	0	0.5	0.5	0	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.02	0.50
4	4	0.5	0	0.5	0	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.09	0.41
6	6	0.5	0.5	0	0	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.06	0.55
7	7	0	0.5	0	0.5	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.08	0.38

ตารางที่ 3.17 การเก็บคำตอบของสตริงคำตอบที่นำไปแทนที่เข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
1	9	6	0.042	0.357
2	10	4	0.047	0.412
3	9	7	0.016	0.500
4	10	6	0.094	0.412
5	10	4	0.056	0.474
6	10	5	0.061	0.545
7	10	7	0.082	0.375
8	10	6	0.079	9.375
9	10	5	0.059	0.444
10	9	7	0.029	0.400
Offspring 1	9	4	0.060	0.550

12. สุ่มเลือกจุดข้างเคียงโดยสุ่มเท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของสตริงคำตอบในจุดข้างเคียง จะทำการแทนที่สตริงรุ่นลูกตัวที่ 1 พร้อมทั้งค่าวัตถุประสงค์ ในจุดข้างเคียงนั้น ซึ่งจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 คือ $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_6$ และ λ_7

โดยมีขั้นตอนการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อทำการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบดังต่อไปนี้ โดยทำร้อยละในกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงเท่ากับ 30 และ จำนวนของจุดข้างเคียงเท่ากับ 4

- 1) คำนวณจำนวนจุดข้างเคียงที่ต้องสุ่ม จะได้ $(30/100) \times (4+1) = 1.5$ ทำการปัดค่าขึ้นเสมอ ดังนั้นทำการสุ่มจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 จำนวน 2 จุด
- 2) ทำการสุ่มเลือกจุดข้างเคียง ซึ่งสุ่มได้ λ_3 และ λ_6
- 3) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นอร์มัลไลส์แล้วของสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3 คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของจุดถ่วงน้ำหนัก λ_3 ตามตารางที่ 3.18 และทำการหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ดังตารางที่ 3.19

ตารางที่ 3.18 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในเซตค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3

P	String	λ_{31}	λ_{32}	λ_{33}	λ_{34}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{31} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{32} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{33} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{34} \times \bar{f}_4$
3	3	0	0.5	0.5	0	0	1	0.000	0.74	0	0.5	0	0
3	Offspring1	0	0.5	0.5	0	0	0	0.566	1.00	0	0	0.283	0

ตารางที่ 3.19 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3

P	String	$\lambda_{31} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{32} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{33} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{34} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$
3	3	0	0.5	0	0	0.5
3	Offspring 1	0	0	0.283	0	0.283

จากตารางที่ 3.19 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 (Offspring 1) มีค่าเท่ากับ 0.283 ซึ่งน้อยกว่าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.5 ดังนั้นจึงทำการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3 ดังตารางที่ 3.22

จากนั้นพิจารณาที่จุดข้างเคียง λ_6 โดยทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ เช่นเดียวกันกับวิธีการที่อธิบายไปข้างต้นของจุดข้างเคียง λ_3 แต่ค่าถ่วงน้ำหนักที่จะนำมาคูณกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นเป็นค่า ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6 ตามตารางที่ 3.20 และทำการหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ดังตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.20 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6

P	String	λ_{61}	λ_{62}	λ_{63}	λ_{64}	f_1	f_2	f_3	f_4	$\lambda_{61} \times f_1$	$\lambda_{62} \times f_2$	$\lambda_{63} \times f_3$	$\lambda_{64} \times f_4$
6	6	0.5	0.5	0	0	1	0.333	0.569	0.976	0.5	0.1665	0	0
6	Offsp. 1	0.5	0.5	0	0	0	0.000	0.566	1.000	0	0	0	0

ตารางที่ 3.21 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่จุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6

P	String	$\lambda_{61} \times f_1$	$\lambda_{62} \times f_2$	$\lambda_{63} \times f_3$	$\lambda_{64} \times f_4$	$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times f_i\}$
6	6	0.5	0.1665	0	0	0.5
6	Offspring 1	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 3.21 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 เท่ากับ 0 ซึ่งน้อยกว่าค่าของสตริงคำตอบที่ 6 มีค่าเท่ากับ 0.5 ดังนั้นจึงทำการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6 ตามตารางที่ 3.22

ตารางที่ 3.22 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่ 1 และค่าวัตถุประสงค์ ลงในจุดข้างเคียง

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	Task Priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
1	Offspring 1	0	1	0	0	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	9	4	0.06	0.55
3	Offspring 1	0	0.5	0.5	0	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	9	4	0.06	0.55
4	4	0.5	0	0.5	0	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.09	0.41
6	Offspring 1	0.5	0.5	0	0	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	9	4	0.06	0.55
7	7	0	0.5	0	0.5	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.08	0.38

13. ปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร หลังจากทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่ค่าตอบที่ดีในประชากรย่อยแล้ว จะต้องทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรตามตารางที่ 3.23

ตารางที่ 3.23 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร

String	Objective				Max objective				Min objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 1	9	4	0.06	0.55	10	7	0.094	0.55	9	4	0.06	0.375
2	10	4	0.047	0.412								
Offspring 1	9	4	0.06	0.55								
4	10	6	0.094	0.412								
5	10	4	0.056	0.474								
Offspring 1	9	4	0.06	0.55								
7	10	7	0.082	0.375								
8	10	6	0.079	0.375								
9	10	5	0.059	0.444								
10	9	7	0.029	0.400								

หลังจากนั้น ตรวจสอบว่า $p < P$ ใหม่ถ้าใช่ให้กำหนด $p = p + 1$ โดยที่ $p = 1$ และ $P = 10$ ดังนั้น $1 < 10$ จึงกำหนดให้ $p = 1 + 1 = 2$ และวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 6 ทำวนจนกระทั่ง $p = P$ จึงไปทำขั้นตอนที่ 14 ต่อ

14. นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป ถ้า $G < \text{Generation}$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ พร้อมทั้งทำการปรับปรุงพื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ด้วย คือการตัดคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกันออก แล้วนำมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting และเก็บเฉพาะคำตอบที่ดีที่อยู่ใน First Frontier จากตัวอย่างนี้คำตอบหลังจบ 1 เจเนอเรชันแสดงดังตารางที่ 3.24 และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $G = \text{Generation}$ ให้ทำขั้นตอนที่ 15

ตารางที่ 3.24 การเก็บสตริงคำตอบที่นำไปแทนที่เข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	[15 8 9 5 24 18 14 20 7 6 4 11 1 13 16 17 23 21 10 12 2 3 22 19]	9	6	0.042	0.357
2	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
3	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500
4	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412
5	[18 10 1 6 20 11 2 7 22 17 12 4 13 5 21 23 3 8 24 14 19 9 15 16]	10	4	0.056	0.474
6	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.545
7	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
8	[22 10 9 3 19 15 8 21 14 2 20 7 4 12 13 17 18 6 23 1 11 16 5 24]	10	6	0.079	0.375
9	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
10	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
Offspring 1.1_G1	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	9	4	0.060	0.550
Offspring 2.2_G1	[22 24 15 23 1 9 12 20 18 16 4 19 13 2 21 17 7 6 5 10 14 3 8 11]	9	5	0.040	0.250
Offspring 3.1_G1	[21 10 3 22 23 9 2 4 24 20 1 15 19 7 13 16 12 18 14 6 5 11 17 8]	9	4	0.015	0.438
Offspring 4.1_G1	[23 4 12 9 7 20 24 15 18 3 22 13 21 8 16 19 14 1 2 10 6 17 11 5]	9	4	0.003	0.308

ตารางที่ 3.24 การเก็บสตริงคำตอบที่นำไปแทนที่เข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน (ต่อ)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 5.1_G1	[16 23 22 7 17 19 20 12 9 21 4 10 5 8 3 13 2 24 6 14 18 15 11 1]	9	4	0.009	0.471
Offspring 6.1_G1	[21 16 12 1 15 19 18 5 23 6 9 14 20 17 22 24 8 7 2 4 3 13 11 10]	9	4	0.035	0.250
Offspring 9.1_G1	[22 17 16 23 14 21 13 24 4 3 5 7 18 8 11 9 19 12 20 1 10 6 2 15]	10	4	0.027	0.286
Offspring 10.2_G1	[16 15 2 24 8 10 6 21 9 3 7 14 18 11 20 17 19 13 23 1 22 4 5 12]	10	4	0.031	0.231

หมายเหตุ : Offspring 1.1_G1 เลขตัวแรก หมายถึง สตริงคำตอบรุ่นลูกที่พัฒนามาจากสตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ใดๆ เลขตัวที่สอง หมายถึง สตริงคำตอบรุ่นลูกตัวที่เท่าไร และ G ตัวเลข หมายถึง คำตอบนี้มาจากเจเนอเรชันที่เท่าไร

จากตารางที่ 3.24 ไม่มีคำตอบใดเลยที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกัน ดังนั้นจึงนำคำตอบที่ได้มาหาค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Non-dominated Sorting ดังตารางที่ 3.25

ตารางที่ 3.25 การกำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)						
String	Task priority	Objective				Dummy
		f_1	f_2	f_3	f_4	Fitness
1	[15 8 9 5 24 18 14 20 7 6 4 11 1 13 16 17 23 21 10 12 2 3 22 19]	9	6	0.042	0.357	4
2	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412	3
3	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500	4
4	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412	6

ตารางที่ 3.25 การกำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน (ต่อ)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)						
String	Task priority	Objective				Dummy Fitness
		f_1	f_2	f_3	f_4	
5	[18 10 1 6 20 11 2 7 22 17 12 4 13 5 21 23 3 8 24 14 19 9 15 16]	10	4	0.056	0.474	5
6	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.545	6
7	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375	6
8	[22 10 9 3 19 15 8 21 14 2 20 7 4 12 13 17 18 6 23 1 11 16 5 24]	10	6	0.079	0.375	5
9	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444	4
10	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400	3
Offspring 1.1_G1	[19 14 4 22 21 20 10 13 2 18 24 15 6 9 17 1 8 16 12 7 23 3 11 5]	9	4	0.060	0.550	3
Offspring 2.2_G1	[22 24 15 23 1 9 12 20 18 16 4 19 13 2 21 17 7 6 5 10 14 3 8 11]	9	5	0.040	0.250	2
Offspring 3.1_G1	[21 10 3 22 23 9 2 4 24 20 1 15 19 7 13 16 12 18 14 6 5 11 17 8]	9	4	0.015	0.438	2
Offspring 4.1_G1	[23 4 12 9 7 20 24 15 18 3 22 13 21 8 16 19 14 1 2 10 6 17 11 5]	9	4	0.003	0.308	1
Offspring 5.1_G1	[16 23 22 7 17 19 20 12 9 21 4 10 5 8 3 13 2 24 6 14 18 15 11 1]	9	4	0.009	0.471	2
Offspring 6.1_G1	[21 16 12 1 15 19 18 5 23 6 9 14 20 17 22 24 8 7 2 4 3 13 11 10]	9	4	0.035	0.250	1
Offspring 9.1_G1	[22 17 16 23 14 21 13 24 4 3 5 7 18 8 11 9 19 12 20 1 10 6 2 15]	10	4	0.027	0.286	1
Offspring 10.2_G1	[16 15 2 24 8 10 6 21 9 3 7 14 18 11 20 17 19 13 23 1 22 4 5 12]	10	4	0.031	0.231	1

จากนั้นให้ตัดคำตอบที่ไม่ได้อยู่ในความแข็งแรงที่ 1 ออก เพื่อให้พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เก็บเฉพาะคำตอบที่อยู่ในความแข็งแรง 1 (Fitness 1)

15. หยุดกระบวนการพัฒนาคำตอบ เมื่อทำการพัฒนาครบตามจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด คือ 10 เจเนอเรชัน จะได้คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D ดังตารางที่ 3.26

ตารางที่ 3.26 คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D เมื่อสิ้นสุดตามเจเนอเรชันที่กำหนด

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)						
String	Task priority	Objective				Dummy
		f_1	f_2	f_3	f_4	Fitness
Offspring 4.1_G1	[23 4 12 9 7 20 24 15 18 3 22 13 21 8 16 19 14 1 2 10 6 17 11 5]	9	4	0.003	0.308	1
Offspring 4.2_G7	[22 18 16 21 1 7 10 14 24 6 8 13 20 2 15 3 17 12 23 11 19 9 5 4]	10	4	0.017	0.286	1
Offspring 6.2_G8	[18 21 20 1 17 9 11 12 7 24 15 22 4 5 23 3 19 10 6 16 13 2 8 14]	9	4	0.033	0.25	1
Offspring 1.2_G9	[22 5 11 3 21 15 6 17 23 12 8 9 20 2 13 24 19 7 4 16 1 18 14 10]	9	4	0.002	0.357	1
Offspring 3.1_G10	[18 21 20 1 8 2 11 12 7 24 15 13 19 3 10 6 14 22 23 4 5 9 17 16]	10	4	0.026	0.231	1
Offspring 10.1_G10	[22 16 9 21 3 11 6 15 24 12 8 13 20 2 7 18 23 19 17 1 14 5 10 4]	10	4	0.129	0.167	1

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

ในบทนี้อธิบายถึงเนื้อหาทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตทางภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) วิธีการและขั้นตอนการทำงานของ BBO พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และการยกตัวอย่างการนำวิธี BBO ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูชานาน

4.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) เป็นอัลกอริทึมที่คิดค้นโดย Simon (2008) มีแนวคิดมาจากพฤติกรรมการอพยพย้ายถิ่นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตระหว่างเกาะต่างๆ โดยแต่ละเกาะนั้นจะมีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกันออกไป กล่าวคือ เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์มากจะมีประชากรอาศัยอยู่อย่างแออัด (ค่าสปีชีส์เคาท์สูง) ส่งผลให้มีอัตราการอพยพออกของประชากรสูงและมีอัตราการอพยพเข้าต่ำ ขณะที่เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์ไม่มากนักจะมีประชากรอาศัยอยู่น้อย (ค่าสปีชีส์เคาท์ต่ำ) อัตราการอพยพออกจะต่ำและมีอัตราการอพยพเข้าสูง โดยแนวคิดจะมีการประยุกต์ใช้เข้ากับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลดังนี้

1. สตรีงคำตอบที่ได้จากการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเปรียบเสมือน “เกาะ” และคุณภาพของคำตอบเปรียบเสมือนความอุดมสมบูรณ์ของเกาะซึ่งจะวัดได้โดยค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัย (Habitat Suitability Index: HSI) หรือจำนวนสปีชีส์เคาท์ ซึ่งเปรียบได้กับความแข็งแรง (Fitness) ที่ใช้จัดอันดับคำตอบ โดยคำตอบที่ดีจะมีค่า HSI สูง เกาะที่มีค่า HSI สูงจะมีจำนวนชนิดของสิ่งมีชีวิต (สปีชีส์) อาศัยอยู่มาก ขณะที่เกาะที่มีค่า HSI ต่ำจะมีจำนวนสปีชีส์น้อย โดยในเกาะที่มีค่า HSI สูง เนื่องจากมีจำนวนสปีชีส์มากจนใกล้จุดอิ่มตัวแล้ว อัตราการอพยพออก (Emigration Rate) ของสปีชีส์ไปยังเกาะอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงจึงมีค่าสูง (การอพยพออกในที่นี้คือการที่ตัวแทนของสปีชีส์อพยพแพร่พันธุ์ออกไปยังเกาะอื่น โดยสปีชีส์บนเกาะเดิมยังคงอยู่ ไม่หายไป) ขณะที่อัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate) ของสปีชีส์จากเกาะอื่นจะต่ำเนื่องจากเกาะนี้มีความแออัดแล้ว และในทางตรงกันข้าม เกาะที่

มีค่า HSI ต่ำนั้นจะมีจำนวนสปีชีส์ที่น้อยมาก อัตราการอพยพออกของสปีชีส์ภายในเกาะจะต่ำ แต่จะมีอัตราการอพยพเข้าของสปีชีส์จากเกาะอื่นสูง ทั้งนี้ เกาะที่มีค่า HSI ต่ำจะมีค่า HSI สูงขึ้นเมื่อมีการอพยพของสปีชีส์ใหม่ๆ เข้ามา เนื่องจากค่า HSI นั้นจะแปรผันไปตามจำนวนสปีชีส์

2. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่า HSI คือ ตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variables: SIVs) ซึ่งมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ปริมาณฝน อุณหภูมิ ความหลากหลายของพืชพันธุ์ เป็นต้น โดยตัวแปร SIVs นั้นจะเปรียบเสมือนยีน (Gene) หรือบิต (Bit) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว ของสตรึงคำตอบ
3. Migration Rate หรืออัตราการอพยพของสิ่งมีชีวิตมายังเกาะ แบ่งเป็นอัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate; λ) และอัตราการอพยพออก (Emigration Rate; μ) โดยอัตราการอพยพเข้าเปรียบเสมือนอัตราหรือความน่าจะเป็นที่สตรึงคำตอบจะมีการอพยพเข้ามากน้อยเพียงใด โดยแต่ละสตรึงคำตอบจะมีความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า (P_{λ}) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก (P_{μ}) โดยจะรับคุณลักษณะจากสตรึงคำตอบอื่นเข้ามาเพื่อปรับปรุงสตรึงคำตอบของตนเอง ขณะที่อัตราการอพยพออกเปรียบเสมือนอัตราหรือความน่าจะเป็นที่สตรึงคำตอบจะถ่ายทอดคุณลักษณะของตนให้กับสตรึงคำตอบอื่น ทั้งนี้ สตรึงคำตอบที่ดีมีโอกาสน้อยที่จะรับคุณลักษณะจากสตรึงคำตอบอื่นเข้าสู่สตรึงคำตอบตนเอง แต่มีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น ในทางตรงกันข้าม สตรึงคำตอบที่แย่มิมีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น แต่มีโอกาสสูงที่จะรับคุณลักษณะจากสตรึงคำตอบอื่นเข้าสู่สตรึงคำตอบตนเอง

หลังจากทำการอพยพคุณลักษณะเข้าออกจากสตรึงคำตอบแล้วจะมีการมิวเตชันอีกขั้นตอนหนึ่ง กล่าวคือเป็นการเลือกคุณลักษณะของสตรึงคำตอบมาส่วนหนึ่งเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยหวังว่าความหลากหลายที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้คำตอบที่แย่มิเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น และทำให้สตรึงคำตอบที่มีคุณภาพดีอยู่แล้วดียิ่งขึ้นไปอีก

ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนานนั้น สตรึงคำตอบจะเปรียบเสมือนเกาะ ค่าความแข็งแรงของคำตอบเปรียบเสมือนค่า HSI และบิตต่างๆ ของคำตอบเปรียบเสมือนเป็น SIVs คำตอบที่ดีมีแนวโน้ม

สูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะ ให้กับคำตอบอื่นโดยเฉพาะกับคำตอบที่แย่ แต่จะมีโอกาสน้อยที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่น อย่างไรก็ตาม แม้คำตอบที่ดีอาจมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็คาดหวังว่าจะพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้นไปในทางตรงกันข้าม คำตอบที่แย่จะมีโอกาสสูงที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นโดยเฉพาะจากคำตอบที่ดีและพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้น แต่จะมีโอกาสน้อยในการถ่ายทอดคุณลักษณะของตัวเองให้กับคำตอบอื่นๆ

4.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO)

พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม BBO มี 1 ตัวแปรคือ ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) โดยเป็นตัวกำหนดการพัฒนาสตริงคำตอบเพื่อให้คำตอบที่ได้ถูกพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นไปอีก และมีวิธีการมิวเตชันเป็นแบบ Reciprocal Exchange

4.3 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสรรบุคลากรประกอบภาควัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน

อัลกอริทึม BBO เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่มีการเลียนแบบพฤติกรรมทางธรรมชาติที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย BBO มีขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการอพยพของคำตอบและขั้นตอนการมิวเตชัน เพื่อต้องการให้คำตอบมีการปรับปรุงไปในทิศทางที่ดีขึ้นและทำให้คำตอบมีความหลากหลายมากขึ้นจนนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุด โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนการทำงานของ BBO

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น $Y = \{y_1, \dots, y_P\}$ ด้วยการสุ่ม เมื่อ P คือจำนวนของประชากรคำตอบที่กำหนด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์
2. คัดลอกสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ทั้งหมดพร้อมทั้งค่าวัตถุประสงค์ออกมาเป็นสตริงคำตอบชั่วคราว Z โดย $Z = \{z_1, \dots, z_P\}$
3. กำหนดค่าความแข็งแรงของทุกสตริงคำตอบ y_i และ z_i ด้วยวิธี Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ k ซึ่งจะมีค่าน้อยเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง โดยค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเรียงจากสตริงที่ดีที่สุดไปแย่สุดจะเท่ากับ $1, \dots, F$ ขณะที่ค่าสปีชีส์เคาท์จะเท่ากับ $F, \dots, 1$

4. คำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของแต่ละสตริงคำตอบ y_i และ z_i ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสปีชีส์เคาท์ k ที่มีอยู่ พฤติกรรมของค่าในการอพยพต่างๆ ข้างต้นนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งมีสมการที่ใช้คำนวณแตกต่างกันออกไป แต่ในงานวิจัยนี้จะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal ซึ่งจากการทดลองของ (Ma, 2010) พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่สูงที่สุด โดยสมการที่ใช้มีดังนี้

$$\lambda_k = \frac{1}{2} \left(\cos \left(\frac{k\pi}{n} \right) + 1 \right) \quad (4.1)$$

$$\mu_k = \frac{E}{2} \left(-\cos \left(\frac{k\pi}{n} \right) + 1 \right) \quad (4.2)$$

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \quad (4.3)$$

$$P_{\mu,k} = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^K \mu_k} \quad (4.4)$$

เมื่อ K คือ ค่าสปีชีส์เคาท์ที่สูงที่สุด และ $n=K+1$

I และ E คือ อัตราการอพยพเข้าและออกที่มากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ กำหนดให้เท่ากับ 1

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

5. กำหนดให้

y_{k,n_k} คือ สตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชีส์เคาท์ k ตัวที่ n_k

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

$z_{k',n_{k'}}$ คือ สตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ k' ตัวที่ $n_{k'}$

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

$y_{k,n_k}(e)$ และ $y_{k',n_{k'}}(e)$ คือ ค่าของบิตในตำแหน่งที่ e ของสตริงคำตอบ y_{k,n_k} และ

$z_{k',n_{k'}}$ ตามลำดับ โดยที่ $e = 1, \dots, E$

6. ดำเนินการอพยพโดยมีขั้นตอนดังนี้

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

2) สร้างเลขสุ่ม r_1 ในช่วง 0 ถึง 1 ให้กับบิตที่ e ของคำตอบ $z_{k',n_{k'}}$

ถ้า $r_1 > P_{\lambda, k'}$ จะไม่มีการอพยพเข้าสู่บิตดังกล่าวและให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 6.6 แต่ถ้า $r_1 \leq P_{\lambda, k'}$ แสดงว่าบิตนั้นจะได้รับการอพยพเข้าหรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตริงอื่นให้ดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

- 3) พิจารณาเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y โดยสุ่มเลข r_2 ในช่วง 0 ถึง 1 เพื่อใช้เลือกสปีชีส์เคาท์ของคำตอบที่จะอพยพออกโดยอาศัยวงล้อรูเล็ตของค่า $P_{\mu, k}$ ถ้าสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์นั้นมีสตริงเดียว ให้เลือกสตริง y_{k, n_k} นั้นเป็นสตริงอพยพออก แต่ถ้ามีหลายสตริงให้สุ่มเลือกสตริงใดก็ได้
- 4) อพยพค่าบิต โดยแทนค่าของ $z_{k', n_{k'}}(e)$ ด้วยค่า $y_{k, n_k}(e)$
- 5) ซ่อมแซมสตริง $z_{k', n_{k'}}$ โดยเปลี่ยนค่าของบิตตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่ตำแหน่ง e ที่มีค่าเท่ากับ $y_{k, n_k}(e)$ ไปเป็นค่าเท่ากับ $z_{k', n_{k'}}(e)$ เดิมก่อนอพยพ (ถ้าใน ขั้นตอน 6.4 มีค่า $z_{k', n_{k'}}(e) = y_{k, n_k}(e)$ ไม่ต้องทำการซ่อมแซมใดๆ)
- 6) ถ้า $e < E$ ให้กำหนด $e = e + 1$ และกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า $e = E$ ให้ไปทำขั้นตอนถัดไป
- 7) ถ้า $n_{k'} < N_{k'}$ ให้กำหนดค่า $n_{k'} = n_{k'} + 1$ และ $e = 1$ แล้วกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า $n_{k'} = N_{k'}$ ให้ไปที่ขั้นตอนถัดไป
- 8) ถ้า $k > 1$ ให้กำหนดค่า $k = k - 1, n_{k'} - 1$ และ $e = 1$ แล้วกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า $k = 1$ ให้หยุดกระบวนการอพยพ

7. พิจารณาเฉพาะสตริงคำตอบภายในเซตคำตอบชั่วคราว Z (หลังอพยพ) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ z_i พร้อมกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ จากนั้นคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ $k(P_k)$ และความน่าจะเป็น ในการเลือกสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k ไปทำการมิวเตชัน (m_k) ด้วยสมการที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

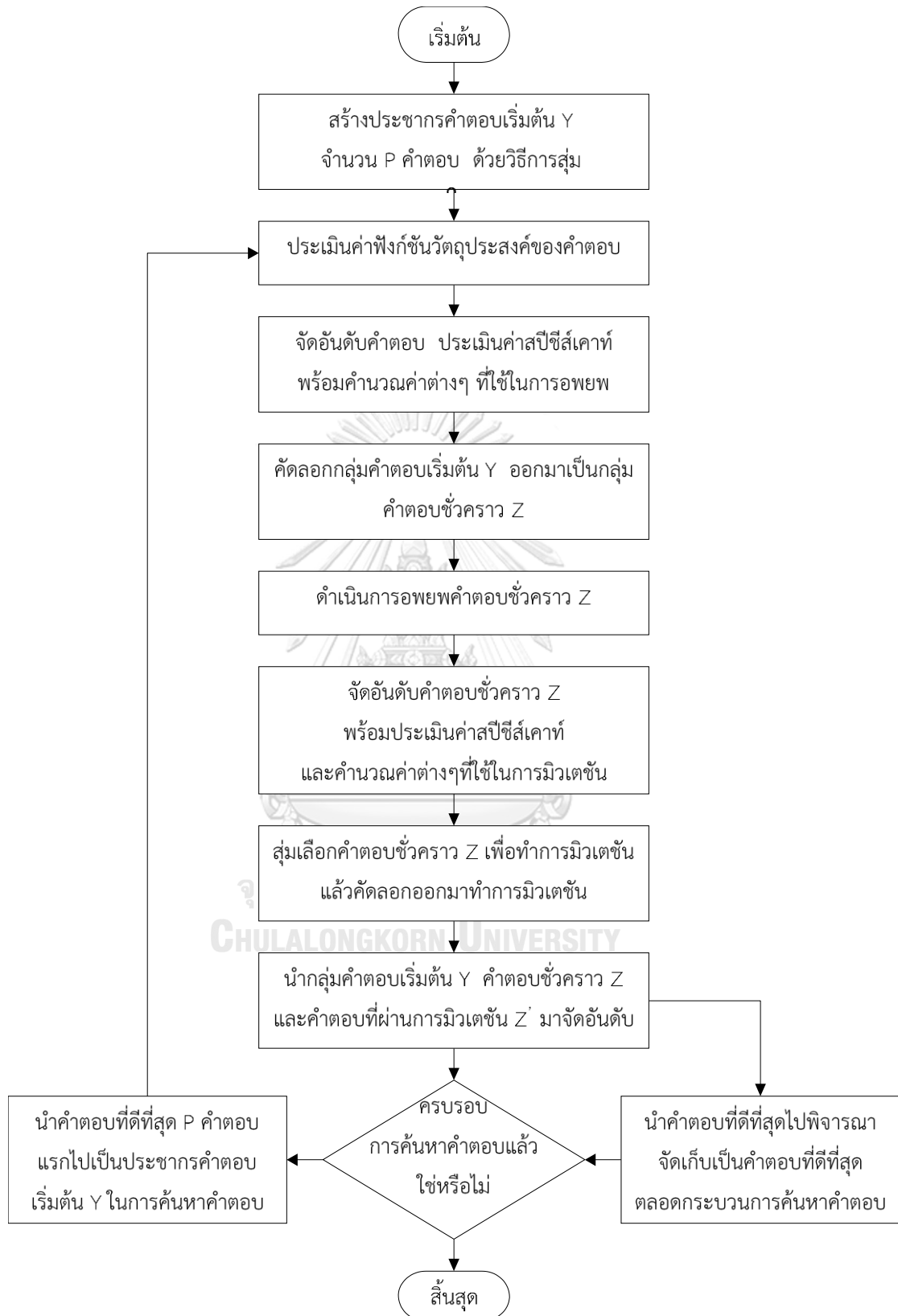
$$P_k = \frac{\prod_{j=1}^k \left(\frac{1}{E}\right)^k \left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \left(\frac{1}{E}\right)^i \left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \quad (4.5)$$

$$m_k = \frac{1 - P_k}{\sum_{k=1}^K (1 - P_k)} \quad (4.6)$$

8. สุ่มค่า r_3 ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมาหนึ่งค่า หากค่านี้ตกอยู่ในช่วงวงล้อรูเล็ตค่า m_k ของสปีชีส์เคาท์ใด ให้คัดลอกสตริงคำตอบ z_i ในสปีชีส์เคาท์นั้นทั้งหมดไปทำการมิวเตชันเป็นสตริง z'_i โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange (Kim et al., 1996)

ขั้นตอนการเก็บคำตอบ

9. นำเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y สตริงคำตอบชั่วคราว Z และสตริงที่ผ่านการมิวเตชัน Z' รวมเข้าด้วยกัน หากมีสตริงที่ซ้ำกันและให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เหมือนกันหลายสตริงให้ตัดออกเหลือสตริงเดียว จากนั้นทำการจัดอันดับสตริงทั้งหมดด้วยวิธี Non-Dominated Sorting พร้อมคำนวณค่า Crowding Distance
10. นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปพิจารณาจัดเก็บเป็นสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหา คำตอบ (Elitist) โดยรวมเข้ากับสตริงคำตอบที่อยู่ในพื้นที่จัดเก็บสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหา คำตอบในเจเนอเรชันก่อนหน้า แล้วทำการจัดอันดับร่วมกันด้วยวิธี Non-Dominated Sorting สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้คือ Elitist ล่าสุดเมื่อดำเนินการมาถึงเจเนอเรชันนี้นั่นเอง
11. เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหนึ่งเจเนอเรชัน หากยังไม่ครบตามจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด ให้เลือกสตริงคำตอบในข้อ 9 ที่ดีที่สุดจำนวน P สตริงแรกไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น ของเจเนอเรชันถัดไป ทั้งนี้ หากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวที่ P นั้นสามารถเลือกได้จากหลายสตริงในคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากัน ให้เลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance สูงที่สุด และหากสตริงเหล่านั้นมีค่า Crowding Distance เท่ากัน ให้ทำการสุ่มเลือก จากนั้นเริ่มการดำเนินการเจเนอเรชันถัดไปด้วย การกลับไปวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 2 ถึง 11 แต่ถ้าทำการพัฒนาคำตอบครบเจเนอเรชันที่กำหนดแล้วให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม BBO (ณัฐชัย โยธาภิบาล, 2556)

4.4 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึม BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน

จากขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ที่ได้อธิบายไปข้างต้นนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนานได้ดังตัวอย่างนี้ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาค่าตอบ 4 วัตถุประสงค์ ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบที่ 1 (สายการประกอบด้านนอก) คือผลิตภัณฑ์ A จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น A_1 และ A_2 มีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.17 และสัดส่วนการผลิตของแต่ละรุ่นและเวลาปฏิบัติงานของชิ้นงานตามตารางที่ 2.2 ขณะที่สายการประกอบที่ 2 (สายการประกอบด้านใน) ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบ คือผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น B_1 และ B_2 มีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.18 และสัดส่วนการผลิตของแต่ละรุ่นและเวลาปฏิบัติงานของชิ้นงาน ตามตารางที่ 2.3 โดยตัวอย่างนี้กำหนดรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 10 หน่วยเวลา และกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึม BBO ดังนี้

- จำนวนประชากรคำตอบ คือ 5
- รูปแบบการอพยพ คือ Sinusoidal (Ma, 2010)
- วิธีการมิวเทชัน คือ Reciprocal Exchange Method (Kim และคณะ, 1996)
- ความน่าจะเป็นในการมิวเทชัน (P_m) คือ 0.1

ตัวอย่างขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

ทำการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น Y จำนวน 5 สตริงโดยการสุ่ม พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นคัดลอกสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ทั้งหมดมาเป็นสตริงคำตอบชั่วคราว Z ตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 4.1

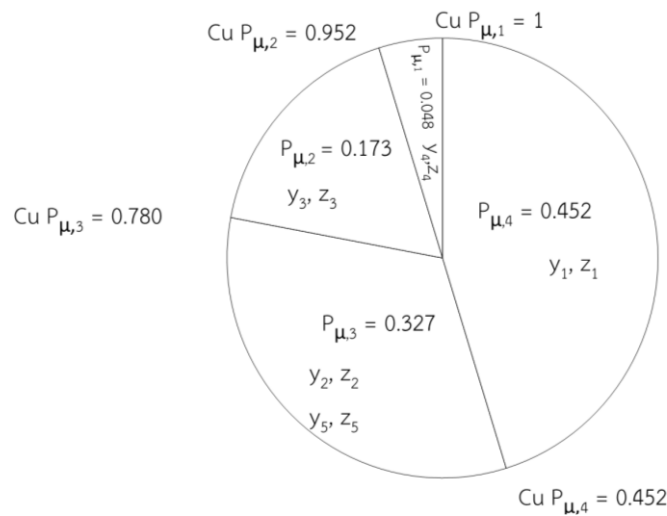
ตารางที่ 4.1 สตริงคำตอบเริ่มต้น Y และสตริงคำตอบชั่วคราว Z ที่คัดลอกออกมา พร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สตริง	คำตอบ	Task priority																				Objective function							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	f_1	f_2	f_3	f_4
Y	y_1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19	9	4	0.035	0.357
	y_2	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6	10	4	0.047	0.412
	y_3	18	10	1	6	20	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	24	14	19	9	15	16	10	4	0.056	0.474
	y_4	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4	10	5	0.061	0.545
	y_5	15	21	2	23	16	9	22	11	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6	9	5	0.046	0.500
Z	z_1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19	9	4	0.035	0.357
	z_2	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6	10	4	0.047	0.412
	z_3	18	10	1	6	20	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	24	14	19	9	15	16	10	4	0.056	0.474
	z_4	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4	10	5	0.061	0.545
	z_5	15	21	2	23	16	9	22	11	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6	10	5	0.059	0.444

2. กำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ของทุกสตริงคำตอบ y_i และ z_i ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ (k) และคำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ดังตารางที่ 4.2 และจัดทำวงล้อรูเล็ตของค่า $P_{\mu,k}$ ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ผลการกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท์ และค่าต่างๆในการอพยพ

Fitness	Species Count (k)	No.	String	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cumulative $P_{\mu,k}$
1	4	1	y_1, z_1	0.0955	0.9045	0.0477	0.4523	0.4523
2	3	1	y_2, z_2	0.3455	0.6545	0.1727	0.3273	0.7795
		2	y_5, z_5					
3	2	1	y_3, z_3	0.6545	0.3455	0.3273	0.1727	0.9523
4	1	1	y_4, z_4	0.9045	0.0955	0.4523	0.0477	1.0000



รูปที่ 4.2 วงล้อรูเล็ตสำหรับการสุ่มเลือกสตรีงอพยพออก

3. ดำเนินการอพยพสตรีงคำตอบชั่วคราว z_i ทีละสตรีง โดยเริ่มจากสตรีงที่มีค่าสปีชีส์เคาท์มาก แล้วค่อยลดลงเรื่อยๆ จนถึง 1 มีขั้นตอนการอพยพดังนี้

- 1) สุ่มเลือกบิตในสตรีงคำตอบชั่วคราว z_i เพื่อรับการอพยพเข้า หรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตรีงอื่น

โดยการสุ่มเลือกบิตจะพิจารณาทีละบิต ตั้งแต่บิตแรกจนถึงบิตสุดท้าย ซึ่งมีค่า r_1 เป็นตัวกำหนดว่าบิตนั้นจะได้รับการอพยพเข้าหรือไม่ จากตัวอย่างนี้ ค่าสปีชีส์เคาท์ที่มากที่สุด คือ 4 จึงเริ่มทำการอพยพก่อน โดยมีสตรีงคำตอบชั่วคราว คือ z_1 และมีความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า $P_{\lambda,4} = 0.0477$ (จากตารางที่ 4.2) เริ่มพิจารณาที่บิต A1 สุ่มค่า $r_1 = 0.856$ ซึ่งมีค่ามากกว่า $P_{\lambda,4}$ ดังนั้นไม่มีการรับการอพยพเข้าหรือถ่ายทอดค่าบิตสู่บิตนี้ จากนั้นเริ่มพิจารณาบิต A2, A3, ... ไปเรื่อยๆ จนถึง B12 ในสตรีง z_1 นี้ มีบิต B10 เพียงบิตเดียว ที่สุ่มได้ค่า $r_1 = 0.012$ ซึ่งค่าน้อยกว่า $P_{\lambda,4}$ จึงมีการรับการอพยพเข้าจากสตรีงอื่น จากนั้นพิจารณาว่าจะนำค่าบิต (Priority) จากสตรีงไหนมาแทนที่ โดยการสุ่มค่า r_2 แล้วนำค่าที่ได้พิจารณาว่าอยู่ช่วงใดในวงล้อรูเล็ตของค่า $P_{\mu,k}$ (รูปที่ 4.2) ในที่นี้สุ่มได้ค่า $r_2 = 0.53$ ซึ่งอยู่ในช่วงของวงล้อรูเล็ต Cumulative $P_{\mu,3} = 0.78$ ดังนั้นสตรีงในสปีชีส์เคาท์ที่จะถูกเลือกเพื่อทำการอพยพออกคือ y_2 และ y_5 (ถ้ามีหลายสตรีงให้ทำการสุ่มเลือก) ในที่นี้สุ่มได้สตรีง y_2 ซึ่ง ณ ตำแหน่ง B10 ค่าบิตของสตรีง y_2 คือ 20 จึงนำมาแทนที่ค่าบิต B10 ในสตรีง z_1 แสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อมีการนำค่าหนึ่งมาแทนที่ย่อมทำให้มีค่าซ้ำกันในสตรีงคำตอบชั่วคราว ดังนั้นจึงต้องทำการ

ซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว ดังตารางที่ 4.8 และผลการอพยพถ่ายทอดค่าบิตของสตริงคำตอบอื่นแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.7

ตารางที่ 4.3 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 4 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก					
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,4}$	r_2	สปีชีส์เคาท์	สตริงในสปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต (Priority)	
z_1	A1	0.856							
	A2	0.856							
	A3	0.146							
	A4	0.721							
	A5	0.111							
	A6	0.306							
	A7	0.798							
	A8	0.888							
	A9	0.184							
	A10	0.541							
	A11	0.697							
	A12	0.222							
	B1	0.918							
	B2	0.854							
	B3	0.524							
	B4	0.207							
	B5	0.196							
	B6	0.888							
	B7	0.213							
	B8	0.410							
	B9	0.464							
	B10	0.012	รับการอพยพเข้า		0.530	3	$\{y_2, y_5\}$	y_2	20
	B11	0.307							
	B12	0.800							

ตารางที่ 4.4 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_2 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก					
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,3}$	r_2	สปีชีส์ เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่ เลือก	ค่าบิต (Priority)	
z_2	A1	0.197							
	A2	0.908							
	A3	0.446							
	A4	0.377							
	A5	0.893							
	A6	0.212							
	A7	0.251							
	A8	0.803							
	A9	0.457							
	A10	0.373							
	A11	0.858							
	A12	0.522							
	B1	0.170	รับการอพยพเข้า		0.919	2	$\{y_3\}$	y_3	5
	B2	0.994							
	B3	0.211							
	B4	0.442							
	B5	0.455							
	B6	0.235							
	B7	0.005	รับการอพยพเข้า		0.373	4	$\{y_1\}$	y_1	12
	B8	0.820							
	B9	0.680							
	B10	0.719							
	B11	0.675							
	B12	0.676							

ตารางที่ 4.5 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_5 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก					
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,3}$	r_2	สปีชีส์ เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่ เลือก	ค่าบิต (Priority)	
z_5	A1	0.642							
	A2	0.564							
	A3	0.567							
	A4	0.561							
	A5	0.588							
	A6	0.901							
	A7	0.654							
	A8	0.012	รับการอพยพเข้า		0.291	4	$\{y_1\}$	y_1	20
	A9	0.240							
	A10	0.593							
	A11	0.381							
	A12	0.627							
	B1	0.577							
	B2	0.981							
	B3	0.074	รับการอพยพเข้า		0.734	3	$\{y_2, y_5\}$	y_2	5
	B4	0.594							
	B5	0.360							
	B6	0.353							
	B7	0.497							
	B8	0.157	รับการอพยพเข้า		0.385	4	$\{y_1\}$	y_1	12
B9	0.998								
B10	0.112	รับการอพยพเข้า		0.200	4	$\{y_1\}$	y_1	3	
B11	0.987								
B12	0.249								

ตารางที่ 4.6 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_3 ในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก					
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,2}$	r_2	สปีชีส์ เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่ เลือก	ค่าบิต (Priority)	
z_3	A1	0.697							
	A2	0.705							
	A3	0.609							
	A4	0.920							
	A5	0.254	รับการอพยพเข้า		0.280	4	$\{y_1\}$	y_1	24
	A6	0.525							
	A7	0.836							
	A8	0.340							
	A9	0.753							
	A10	0.871							
	A11	0.913							
	A12	0.398							
	B1	0.014	รับการอพยพเข้า		0.181	4	$\{y_1\}$	y_1	1
	B2	0.487							
	B3	0.179	รับการอพยพเข้า		0.557	3	$\{y_2, y_5\}$	y_5	7
	B4	0.980							
	B5	0.870							
	B6	0.079	รับการอพยพเข้า		0.285	4	$\{y_1\}$	y_1	21
	B7	0.662							
	B8	0.510							
	B9	0.413							
	B10	0.322	รับการอพยพเข้า		0.476	3	$\{y_2, y_5\}$	y_2	20
	B11	0.190	รับการอพยพเข้า		0.229	4	$\{y_1\}$	y_1	22
	B12	0.832							

ตารางที่ 4.7 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_4 ในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก				
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,1}$	r_2	สปีชีส์ เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่ เลือก	ค่าบิต (Priority)
z_4	A1	0.787						
	A2	0.341	รับการอพยพเข้า	0.095	4	$\{y_1\}$	y_1	8
	A3	0.920						
	A4	0.342	รับการอพยพเข้า	0.110	4	$\{y_1\}$	y_1	5
	A5	0.689						
	A6	0.602						
	A7	0.079	รับการอพยพเข้า	0.216	4	$\{y_1\}$	y_1	14
	A8	0.366	รับการอพยพเข้า	0.618	3	$\{y_2, y_5\}$	y_5	11
	A9	0.470						
	A10	0.919						
	A11	0.784						
	A12	0.341	รับการอพยพเข้า	0.889	2	$\{y_3\}$	y_3	4
	B1	0.441	รับการอพยพเข้า	0.416	4	$\{y_1\}$	y_1	1
	B2	0.871						
	B3	0.372	รับการอพยพเข้า	0.818	2	$\{y_3\}$	y_3	21
	B4	0.564						
	B5	0.447	รับการอพยพเข้า	0.902	2	$\{y_3\}$	y_3	3
	B6	0.521						
	B7	0.933						
	B8	0.976						
	B9	0.788						
	B10	0.733						
	B11	0.248	รับการอพยพเข้า	0.859	2	$\{y_3\}$	y_3	15
	B12	0.438	รับการอพยพเข้า	0.199	4	$\{y_1\}$	y_1	19

2) การซ่อมแซมสตริงคำตอบ

เนื่องจากค่าบิตแต่ละบิตของสตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกันดังนั้นเมื่อมีการอพยพหรือแทนที่ค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราว จะต้องทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบด้วย มีขั้นตอนดังนี้ พิจารณาตั้งแต่บิตแรกจนถึงบิตสุดท้ายว่ามีบิตไหนที่มีการแทนที่ค่าบิตบ้าง แล้วทำการซ่อมแซมไปที่ละบิตโดยเริ่มจากบิตแรกก่อน ซึ่งในตารางที่ 4.8 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 4 นั้นบิต B10 ถูกแทนที่ด้วยค่าบิต 20 ซึ่งค่าบิต 20นี้จะไปซ้ำกับค่าบิตของบิต A8 ดังนั้นทำการซ่อมแซมโดย นำค่าบิตเดิมของ B10 คือ 3 มาแทนที่ค่าบิตของ A8 จะได้สตริงคำตอบที่ทำการปรับปรุงและซ่อมแซมแล้ว แล้วนำสตริงนี้ไปเป็นสตริงเริ่มต้นในการซ่อมแซมบิตถัดไป ผลการอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราวอื่นๆแสดงในตารางที่ 4.9 ถึง 4.12

ตารางที่ 4.8 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 4

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
z_1	B10	3	20	เริ่มต้น	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19
				ปรับปรุง	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	20	22	19
				ซ่อมแซม	15	8	9	5	24	18	14	3	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	20	22	19

ตารางที่ 4.9 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_2 ในสปีชีส์เคาท์ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
z_2	B1	17	5	เริ่มต้น	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
				ปรับปรุง	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	5	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
				ซ่อมแซม	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	5	3	17	7	10	14	21	2	13	20	11	6
	B7	21	12	เริ่มต้น	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	5	3	17	7	10	14	21	2	13	20	11	6
				ปรับปรุง	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	5	3	17	7	10	14	12	2	13	20	11	6
				ซ่อมแซม	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	21	4	5	3	17	7	10	14	12	2	13	20	11	6

ตารางที่ 4.10 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_5 ในสปีชีส์เคาท์ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
z_5	A8	11	20	เริ่มต้น	15	21	2	23	16	9	22	11	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6
				ปรับปรุง	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6
				ซ่อมแซม	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	5	11	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6
	B3	7	5	เริ่มต้น	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	5	11	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6
				ปรับปรุง	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	5	11	17	5	13	18	8	1	10	19	14	3	6
				ซ่อมแซม	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	7	11	17	5	13	18	8	1	10	19	14	3	6
	B8	10	12	เริ่มต้น	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	7	11	17	5	13	18	8	1	10	19	14	3	6
				ปรับปรุง	15	21	2	23	16	9	22	20	4	12	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	14	3	6
				ซ่อมแซม	15	21	2	23	16	9	22	20	4	10	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	14	3	6
	B10	14	3	เริ่มต้น	15	21	2	23	16	9	22	20	4	10	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	14	3	6
				ปรับปรุง	15	21	2	23	16	9	22	20	4	10	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	3	3	6
				ซ่อมแซม	15	21	2	23	16	9	22	20	4	10	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	3	14	6

ตารางที่ 4.11 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_3 ในสปีชีส์เคาท์ 2

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
z_3	A5	20	24	เริ่มต้น	18	10	1	6	20	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	24	14	19	9	15	16
				ปรับปรุง	18	10	1	6	24	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	24	14	19	9	15	16
				ซ่อมแซม	18	10	1	6	24	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	20	14	19	9	15	16
	B1	13	1	เริ่มต้น	18	10	1	6	24	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	20	14	19	9	15	16
				ปรับปรุง	18	10	1	6	24	11	2	7	22	17	12	4	1	5	21	23	3	8	20	14	19	9	15	16
				ซ่อมแซม	18	10	13	6	24	11	2	7	22	17	12	4	1	5	21	23	3	8	20	14	19	9	15	16
	B3	21	7	เริ่มต้น	18	10	13	6	24	11	2	7	22	17	12	4	1	5	21	23	3	8	20	14	19	9	15	16
				ปรับปรุง	18	10	13	6	24	11	2	7	22	17	12	4	1	5	7	23	3	8	20	14	19	9	15	16
				ซ่อมแซม	18	10	13	6	24	11	2	21	22	17	12	4	1	5	7	23	3	8	20	14	19	9	15	16
	B6	8	21	เริ่มต้น	18	10	13	6	24	11	2	21	22	17	12	4	1	5	7	23	3	8	20	14	19	9	15	16
				ปรับปรุง	18	10	13	6	24	11	2	21	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	20	14	19	9	15	16
				ซ่อมแซม	18	10	13	6	24	11	2	8	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	20	14	19	9	15	16
B10	9	20	เริ่มต้น	18	10	13	6	24	11	2	8	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	20	14	19	20	15	16	
			ปรับปรุง	18	10	13	6	24	11	2	8	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	20	14	19	20	15	16	
			ซ่อมแซม	18	10	13	6	24	11	2	8	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	15	16	
B11	15	22	เริ่มต้น	18	10	13	6	24	11	2	8	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	15	16	
			ปรับปรุง	18	10	13	6	24	11	2	8	22	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	22	16	
			ซ่อมแซม	18	10	13	6	24	11	2	8	15	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	22	16	

ตารางที่ 4.12 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_4 ในสปีชีส์เคาท์ 1

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Z_4	A2	9	8	เริ่มต้น	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ปรับปรุง	8	8	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ซ่อมแซม	9	8	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
	A4	10	5	เริ่มต้น	9	8	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ปรับปรุง	9	8	5	5	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
	A7	20	14	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	13	21	18	24	15	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
	A8	13	11	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	13	21	18	24	15	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	15	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	15	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	13	4
	A12	15	4	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	15	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	13	4
				ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	13	4
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	13	15
	B1	6	1	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	6	20	17	1	19	16	12	7	23	3	13	15
				ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	1	20	17	1	19	16	12	7	23	3	13	15
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	1	20	17	6	19	16	12	7	23	3	13	15
	B3	17	21	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	1	20	17	6	19	16	12	7	23	3	13	15
				ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	21	18	24	4	1	20	21	6	19	16	12	7	23	3	13	15
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	19	16	12	7	23	3	13	15
	B5	19	3	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	19	16	12	7	23	3	13	15
				ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	3	13	15
				ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	19	13	15
B11	13	15	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	19	13	15	
			ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	19	15	15	
			ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	19	15	13	
B12	13	19	เริ่มต้น	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	19	15	13	
			ปรับปรุง	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	19	15	19	
			ซ่อมแซม	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	13	15	19	

4. หลังจากทำการอพยพและซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราวทั้งหมดเรียบร้อยแล้ว จะได้สตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพ พร้อมทั้งคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงในตารางที่ 4.13

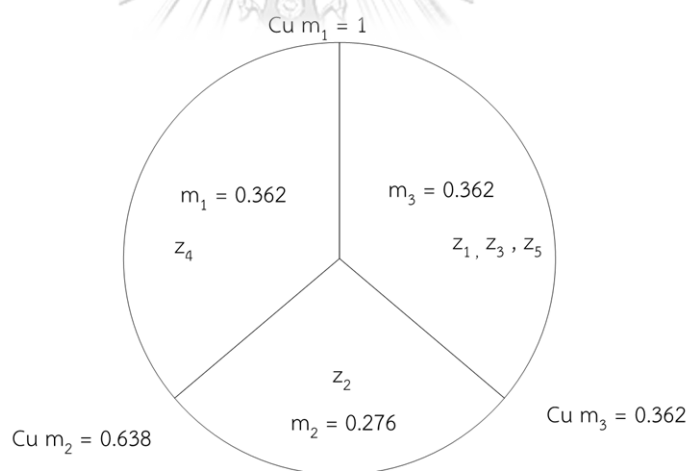
ตารางที่ 4.13 เซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพ

สตริง	คำตอบ	Task priority																				Objective function							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	f_1	f_2	f_3	f_4
Z	z_1	15	8	9	5	24	18	14	3	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	20	22	19	9	6	0.058	0.471
	z_2	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	21	4	5	3	17	7	10	14	12	2	13	20	11	6	10	5	0.069	0.500
	z_3	18	10	13	6	24	11	2	8	15	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	22	16	10	4	0.082	0.286
	z_4	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	13	15	19	10	7	0.072	0.5
	z_5	15	21	2	23	16	9	22	20	4	10	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	3	14	6	10	5	0.038	0.500

5. กำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท์ คำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ $k(P_k)$ และความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k ไปทำการมิวเตชัน (m_k) ดังตารางที่ 4.14 และวงล้อรูเล็ตของความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบไปทำการมิวเตชัน ดังรูปที่ 3.5

ตารางที่ 4.14 ค่าที่ใช้ประกอบการมิวเตชันของสตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพ

Fitness	Species Count (k)	No.	String	P_k	$1 - P_k$	m_k	Cumulative m_k
1	3	1	z_1	0.250	0.750	0.362	0.362
		2	z_3				
		3	z_5				
2	2	1	z_2	0.427	0.573	0.276	0.638
3	1	1	z_4	0.250	0.750	0.362	1



รูปที่ 4.3 วงล้อรูเล็ตสำหรับการสุ่มเลือกสตริงคำตอบไปทำการมิวเตชัน

6. การมิวเตชัน

หลังจากซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว Z ทุกสตริงเรียบร้อยแล้ว จะทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบชั่วคราว เพื่อนำมาทำมิวเตชัน โดยถ้าสุ่มค่า r_3 แล้วตกอยู่ในวงล้อรูเล็ตช่วงใดให้นำสตริงคำตอบชั่วคราวทั้งหมดในช่วงของรูเล็ตนั้น มาทำการมิวเตชัน โดยคัดลอกเป็นสตริงคำตอบ z'_i

ในตัวอย่างนี้ สุ่มค่า r_3 ได้เท่ากับ 0.526 ดังนั้นจึงนำสตริงคำตอบชั่วคราวในช่วง m_2 มาทำการมิวเตชัน ซึ่งในที่นี่มีสตริงเดียว คือ z_2

การมิวเตชันในงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange ซึ่งมีขั้นตอนคือ เริ่มพิจารณาบิตที่ละบิตเริ่มจากตำแหน่งแรก โดยสุ่มค่า r_4 ในช่วง $[0,1]$ หาก $r_4 > P_m$ (เมื่อ P_m คือความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1) จะไม่ทำการใดๆ กับบิตนี้และให้พิจารณาต่อไปที่บิตถัดไป แต่ถ้า $r_4 \leq P_m$ ให้สุ่มเลือกบิตใดก็ได้ในสตริงเดียวกันนี้ขึ้นมาอีกหนึ่งบิตแล้วสลับค่าบิตกัน จากนั้นให้พิจารณาการมิวเตชันด้วยการสุ่มเลข r_4 ให้กับบิตถัดๆ ไปจนครบ จากตัวอย่างนี้บิตที่ทำการมิวเตชัน (สุ่มได้ค่า $r_4 > 0.1$) ได้แก่บิต A3 และ B5 ซึ่งถูกสุ่มให้สลับค่าสิทธิ์กับบิตที่ B8 และ B1 ตามลำดับ ตามตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การมิวเตชันสตริง z'_2

ลำดับ	คู่มิวเตชัน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
	z'_2 ก่อนมิวเตชัน	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	21	4	5	3	17	7	10	14	12	2	13	20	11	6
1	A3 กับ B8	23	22	2	18	9	8	15	1	19	16	21	4	5	3	17	7	10	14	12	24	13	20	11	6
2	B5 กับ B1	23	22	2	18	9	8	15	1	19	16	21	4	10	3	17	7	5	14	12	24	13	20	11	6
	z'_2 หลังมิวเตชัน	23	22	2	18	9	8	15	1	19	16	21	4	10	3	17	7	5	14	12	24	13	20	11	6

ขั้นตอนการเก็บคำตอบ

- เมื่อจบกระบวนการพัฒนาคำตอบทั้งหมด (ตั้งแต่การอพยพ จนทำการมิวเตชัน) เรียบร้อยแล้วให้นำเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y เซตสตริงคำตอบชั่วคราว Z และเซตสตริงคำตอบชั่วคราวที่ผ่านการมิวเตชัน Z' มาพิจารณาร่วมกันว่ามีสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกันหรือไม่ ดังตารางที่ 4.16 (ถ้ามี ให้ตัดสตริงตัวที่ซ้ำออกให้เหลือเพียงสตริงเดียว) แล้วนำสตริงทั้งหมดนั้นมาจัดอันดับความแข็งแรง (Fitness) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting พร้อมหาค่า Crowding Distance ของแต่ละสตริงคำตอบดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.16 สตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการพัฒนาคำตอบ

สตริง	คำตอบ	Task priority																				Objective function							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	f_1	f_2	f_3	f_4
Y	y_1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19	9	4	0.035	0.357
	y_2	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6	10	4	0.047	0.412
	y_3	18	10	1	6	20	11	2	7	22	17	12	4	13	5	21	23	3	8	24	14	19	9	15	16	10	4	0.056	0.474
	y_4	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4	10	5	0.061	0.545
	y_5	15	21	2	23	16	9	22	11	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6	9	5	0.046	0.500
Z	z_1	15	8	9	5	24	18	14	3	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	20	22	19	9	6	0.06	0.47
	z_2	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	21	4	5	3	17	7	10	14	12	2	13	20	11	6	10	5	0.07	0.500
	z_3	18	10	13	6	24	11	2	8	15	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	22	16	10	4	0.08	0.286
	z_4	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	13	15	19	10	7	0.07	0.5
	z_5	15	21	2	23	16	9	22	20	4	10	24	7	11	17	5	13	18	8	1	12	19	3	14	6	10	5	0.04	0.500
z'	z'_2	23	22	2	18	9	8	15	1	19	16	21	4	10	3	17	7	5	14	12	24	13	20	11	6	9	5	0.06	0.53

ตารางที่ 4.17 ผลการจัดอันดับสตริงคำตอบทั้งหมดในเจเนอเรชันที่ 1

Fitness	String	$f_1(x): N_w$	$f_2(x): N_s$	$f_3(x): B_b$	$f_4(x): MIWR$	Crowding Distance
1	y_1	9	4	0.035	0.357	Infinity
1	z_3	10	4	0.082	0.286	1.7839
1	z_4	10	7	0.072	0.500	Infinity
2	y_2	10	4	0.047	0.412	Infinity
2	z_1	9	6	0.058	0.471	Infinity
2	z_5	10	5	0.038	0.500	3.3910
3	y_3	10	4	0.056	0.474	Infinity
3	y_5	9	5	0.046	0.500	Infinity
4	y_4	10	5	0.061	0.545	Infinity
4	z_2	10	5	0.069	0.500	Infinity
5	z'_2	9	5	0.057	0.526	Infinity

8. เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่อยู่ในความแข็งแรงที่ 1 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เข้าพื้นที่การจัดเก็บสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ดังตารางที่ 4.18 (จะเก็บคำตอบที่ดีที่สุดทุกๆเจเนอเรชัน และจะมีการหาค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Non-Dominated Sorting ทุกๆเจเนอเรชันเช่นกัน เพื่อให้พื้นที่การจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบมีเฉพาะคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรงที่ 1)

ตารางที่ 4.18 การเก็บคำตอบที่ดีที่สุดเข้าพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)				
String	Objective			
	$f_1(x): N_w$	$f_2(x): N_s$	$f_3(x): B_b$	$f_4(x): MIWR$
y_1	9	4	0.035	0.357
z_3	10	4	0.082	0.286
z_4	10	7	0.072	0.500

9. เมื่อจบหนึ่งเจเนอเรชัน ให้เลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น ไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป หากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดนั้นสามารถเลือกได้จากหลายสตริงในคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากัน ให้เลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance สูงที่สุด

ในตัวอย่างนี้ เริ่มต้นใช้สตริงคำตอบ เท่ากับ 5 ดังนั้นจะเลือก 5 สตริงคำตอบจากสตริงคำตอบทั้งหมด เพื่อไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ในเจเนอเรชันถัดไป โดยเลือกจากค่าความแข็งแรง 1 ก่อนถ้าไม่ครบ 5 สตริงให้เลือกจากค่าความแข็งแรง 2 หรือ 3 รองลงมาตามลำดับ ซึ่งในตัวอย่างนี้ได้สตริงคำตอบเริ่มต้น Y ในเจเนอเรชันถัดไปดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.19 เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ของเจเนอเรชันที่ 2

สตริงคำตอบ เจเนอเรชัน ปัจจุบัน	สตริงคำตอบ เริ่มต้นเจเนอ เรชันถัดไป	Task priority																							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
y_1	y_1	15	8	9	5	24	18	14	20	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	3	22	19
z_3	y_2	18	10	13	6	24	11	2	8	15	17	12	4	1	5	7	23	3	21	9	14	19	20	22	16
z_4	y_3	9	8	10	5	2	22	14	11	17	18	24	4	1	20	21	6	3	16	12	7	23	13	15	19
y_2	y_4	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
z_1	y_5	15	8	9	5	24	18	14	3	7	6	4	11	1	13	16	17	23	21	10	12	2	20	22	19

10. เมื่อทำการพัฒนาคำตอบครบตามเจเนอเรชันที่กำหนดจะได้คำตอบที่ดีที่สุดที่เก็บไว้ในพื้นที่การจัดเก็บสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ในการแก้ปัญหการจัดสมดุลสายการประกอบ

ในบทนี้อธิบายถึงเนื้อหาที่เกี่ยวกับทฤษฎีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (The Multi-Objective Evolutionary Optimisation Hybridised With The Biogeography-Based Optimisation Algorithm: MOEA / D-BBO) รวมถึงวิธีการและขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-BBO พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และตัวอย่างการนำวิธี MOEA/D-BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหการจัดสมดุลสายการประกอบมาวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน

5.1 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ เป็นการนำหลักการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยหลักการจำแนกปัญหาโดยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของแต่ละวัตถุประสงค์ i (λ_{pi}) และแบ่งกลุ่มสตริงคำตอบที่จะทำการพัฒนาคำตอบตามหลัก MOEA/D โดยใช้วิธีการพัฒนาคำตอบในกลุ่มประชากรย่อยตามหลัก BBO คือ นำสตริงคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 มาทำการอพยพเข้าออก และ มิวเตชัน เพื่อให้กระบวนการค้นหาคำตอบนั้นได้คำตอบที่ดีที่สุด และทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดที่พัฒนาได้เข้าพื้นที่จัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

5.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO นี้จะแบ่งเป็นพารามิเตอร์จากอัลกอริทึม MOEA/D คือ จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ จำนวนจุดข้างเคียง และร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง ส่วนพารามิเตอร์จากอัลกอริทึม BBO คือ ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน โดยแต่ละพารามิเตอร์มีรายละเอียดดังนี้

1. จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (Lattice : H)

จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักจะเป็นตัวกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Lambda Set) หรือจำนวนของสตริงคำตอบ (Number of Population) โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะมีช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ดังนี้ $\left\{\frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H}\right\}$ ซึ่งจำนวนของค่าถ่วงน้ำหนักจะเท่ากับ $H + 1$

2. จำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: T)

จำนวนของจุดข้างเคียง จะเป็นตัวกำหนดประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบของแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา ซึ่งจำนวนของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T + 1$

3. ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง

ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง จะเป็นตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบลงในจุดค่าข้างเคียงที่สุ่มได้ โดยมีวิธีการคำนวณคือ ค่าร้อยละ $\times (T + 1)$

4. ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน

ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันจะเป็นตัวกำหนดเพื่อปรับปรุงสตริงคำตอบที่ถูกพัฒนาที่ดีแล้วให้ดียิ่งขึ้นไปอีก ซึ่งถ้าค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันมากจะทำให้สตริงคำตอบที่ได้แย่มากกว่าเดิม เนื่องจากมีการสลับค่าบิตหลายค่า ทำให้สตริงคำตอบเปลี่ยนไปจากสตริงคำตอบเดิมที่ถูกพัฒนาที่ดีแล้วมากเกินไป โดยวิธีการมิวเตชันนั้นเป็นแบบ Reciprocal Exchange Method (Kim et al., 1996)

5.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูซูนาน

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบในงานวิจัยนี้ จะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล ขั้นตอนการพัฒนาและการเก็บคำตอบ และขั้นตอนการปรับปรุงคำตอบให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งการทำงานของขั้นตอนส่วนใหญ่จะคล้ายกับการทำงานของ MOEA/D ดังนี้

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-BBO

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ของแต่ละจุด ตามจำนวนของประชากรที่กำหนดโดยใช้ฟังก์ชันซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักที่ได้จะมีลักษณะเป็นตารางเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (P) \times จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) โดย $\sum_{i=1}^O \lambda_{pi} = 1 \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$
2. กำหนดจุดข้างเคียง เท่ากับ T ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p วิธีการคือคำนวณระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean Distances) ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณากับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่นๆ ตามสมการที่ 5.1 จากนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T

$$d_{pj} = \sqrt{\sum_{i=1}^O (\lambda_{pi} - \lambda_{ji})^2} \quad \forall p \in P, \forall j \in P, p \neq j \quad (5.1)$$

เมื่อ d_{pj} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของจุดถ่วงน้ำหนัก p กับ j
 O คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด โดยการสุ่ม (Random) ซึ่งความยาวของสตริงคำตอบจะเท่ากับจำนวนชิ้นงานของสองสายการประกอบรวมกัน
4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร
5. ทำการเก็บสตริงคำตอบ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น เข้าพื้นที่จัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

ขั้นตอนการพัฒนาและการเก็บคำตอบ

6. กำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา (Initial Point) ด้วยการกำหนดค่า $p = p$ โดยค่า $p = \{1, 2, \dots, P\}$ เพื่อกำหนดประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อยคือ สตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับสตริงคำตอบ ณ จุดข้างเคียง
7. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อย โดยมีสูตรการนอร์มัลไล ดังสมการที่ 5.2

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{z_i^{nad} - z_i^*} \quad (5.2)$$

เมื่อ z_i^* คือ $\min\{f_i(x)|x \in P\}$ โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_0^*)$
 z_i^{nad} คือ $\max\{f_i(x)|x \in P\}$ โดยที่ $z_i^{nad} = (z_1^{nad}, \dots, z_0^{nad})$
 0 คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

เมื่ออัลกอริทึมทำการพัฒนาค่าตอบไปเรื่อยๆเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดหรือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดแล้วนั้น อาจทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในประชากรเป็นค่าเดียวกัน เป็นผลให้สมการที่ 5.2 ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากทุกตัวแปรมีค่าเดียวกันหมด ดังนั้นจึงทำการเพิ่มค่าน้อยๆให้กับค่า z_i^{nad} ในที่นี้กำหนดค่าเท่ากับ 0.00001 เพื่อให้สมการสามารถคำนวณหาค่าได้เมื่อเกิดกรณีดังกล่าว ดังนั้นสมการการนอร์มัลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะได้ดังสมการที่ 5.3

$$\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.00001) - z_i^*} \quad (5.3)$$

8. ทำการหาค่าความแข็งแรง (Fitness) ของสตริงคำตอบในกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณา โดยมีขั้นตอนดังนี้ ตามรูปที่ 5.1

- 1) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์ของแต่ละสตริงคำตอบในประชากรย่อยคุณกับค่าถ่วงน้ำหนักของจุดถ่วงน้ำหนักที่กำลังทำการพิจารณา (λ_p)
- 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$ ของสตริงคำตอบในประชากรย่อยที่กำลังพิจารณา (จุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณากับจุดข้างเคียง)
- 3) กำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบในประชากรย่อย โดยพิจารณาจากค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ จากนั้นเรียงลำดับจากค่าที่น้อยที่สุดไปมากที่สุด ซึ่งจะมีค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเท่ากับ 1, ..., F พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ k โดยจะมีค่าจากมากไปน้อยเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง คือ เท่ากับ $F, \dots, 1$

λ_p	string	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$	Fitness	Species Count (k)
1	1	0	1	0	0											
1	3	0	1	0	0											
1	4	0	1	0	0											
1	6	0	1	0	0											
1	7	0	1	0	0											

รูปที่ 5.1 การหาค่าความแข็งแรง (Fitness) ของสตริงคำตอบในประชากรย่อยที่กำลังพิจารณา

9. คัดลอกสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มประชากรย่อยทั้งหมดมาเป็นสตริงคำตอบ y_i และคัดลอกสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 มาเป็นสตริงคำตอบชั่วคราว z_i เพื่อมาทำการอพยพเข้าออก

10. คำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของสตริงคำตอบ y_i และสตริงคำตอบชั่วคราว z_i ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสปีชีส์เคาท์ k ที่มีอยู่ โดยสมการที่ใช้คำนวณค่าในการอพยพต่างๆ ข้างต้นจะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ (Ma, 2010) ทั้งนี้สมการที่ใช้เป็นสมการเดียวกับที่แสดงใน บทที่ 4 คือ สมการที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4

11. ดำเนินการอพยพโดยมีขั้นตอนดังนี้

โดยกำหนดให้

y_{k,n_k} คือ สตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ k ตัวที่ n_k

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

$z_{k',n_{k'}}$ คือ สตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์ที่มากที่สุด (หรือสตริงคำตอบในฟิตเนส 1) ตัวที่ $n_{k'}$

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

$y_{k,n_k}(e)$ และ $z_{k',n_{k'}}(e)$ คือค่าของบิตในตำแหน่งที่ e ของสตริงคำตอบ y_{k,n_k} และ

$z_{k',n_{k'}}$ ตามลำดับ โดยที่ $e = 1, \dots, E$

1) สุ่มค่า r_1 ในช่วง 0 ถึง 1 ให้กับทุกๆบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_i

ถ้า $r_1 > P_{\lambda,k'}$ จะไม่มีการอพยพเข้าสู่บิตดังกล่าวและให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 11.6 แต่ถ้า

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

- 2) พิจารณาเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น y โดยสุ่มเลข r_2 ในช่วง 0 ถึง 1 เพื่อใช้เลือกสปีชีส์เคาท์ของคำตอบที่จะอพยพออกโดยอาศัยวงล้อรูเล็ตของค่า $P_{\mu,k}$ ถ้าสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์นั้นมีสตริงเดียว ให้เลือกสตริง y_{k,n_k} นั้นเป็นสตริงอพยพออก แต่ถ้ามีหลายสตริงให้สุ่มเลือกสตริงใดก็ได้
 - 3) อพยพค่าบิต โดยแทนค่าของ $z_{k',n_{k'}}(e)$ ด้วยค่า $y_{k,n_k}(e)$
 - 4) ซ่อมแซมสตริง $z_{k',n_{k'}}$ โดยเปลี่ยนค่าของบิตตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่ตำแหน่ง e ที่มีค่าเท่ากับ $y_{k,n_k}(e)$ ไปเป็นค่าเท่ากับ $z_{k',n_{k'}}(e)$ เดิมก่อนอพยพ (ถ้าใน ขั้นตอน 11.3 มีค่า $z_{k',n_{k'}}(e) = y_{k,n_k}(e)$ ไม่ต้องทำการซ่อมแซมใดๆ)
 - 5) ถ้า $e < E$ ให้กำหนด $e = e + 1$ และกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 11.2 แต่ถ้า $e = E$ ให้ไปที่ทำขั้นตอนถัดไป
 - 6) ถ้า $n_{k'} < N_{k'}$ ให้กำหนดค่า $n_{k'} = n_{k'} + 1$ และ $e = 1$ แล้วกลับไป เริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 11.1 แต่ถ้า $n_{k'} = N_{k'}$ ให้ไปที่ขั้นตอนถัดไป
12. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ)
 13. ปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร
 14. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในประชากรย่อย สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่หรือสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 (จะเป็นสตริงคำตอบเดียวกันกับสตริงในประชากรย่อยเนื่องจากการคัดลอกและเลือกเฉพาะสตริงที่อยู่ในความแข็งแรง 1 ออกมา) และสตริงคำตอบรุ่นลูกหรือสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ)
 15. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบดังนี้ 1. สตริงรุ่นลูกหรือสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) 2. สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่หรือสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 และ 3. สตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา (λ_p) โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ดังรูปที่ 5.2
 - 1) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วของสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) สตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 และสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_p ที่กำลังพิจารณา
 - 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$ ของสตริงคำตอบทั้ง 3 กลุ่มที่กล่าวมา
 - 3) พิจารณาค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ ในข้อที่ 2 ของสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) และสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 เทียบกับสตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก

λ_p ที่กำลังพิจารณา ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบไหนดีกว่า คือมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา ให้นำสตริงคำตอบนั้นพร้อมทั้งค่าวัตถุประสงค์แทนที่ลงในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา (ถ้ามีค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบที่ดีกว่า เท่ากันหลายสตริงคำตอบ ให้ทำการสุ่ม) พร้อมทั้งทำการเก็บสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แทนที่นั้นเข้าพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) และทำขั้นตอนที่ 16 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและข้ามไปขั้นตอนที่ 17

ประเภท สตริงคำตอบ	λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{p1} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{p2} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{p3} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{p4} \times \bar{f}_4$	$\max\{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$
สตริงที่กำลังพิจารณา (Initial string)	p	0	1	0	0									
สตริงที่อยู่ในความ แข็งแรง 1	y_i	0	1	0	0									
	y_i	0	1	0	0									
	...	0	1	0	0									
สตริงที่ทำการอพยพ แล้ว	z_i	0	1	0	0									
	z_i	0	1	0	0									
	...	0	1	0	0									
	z_i	0	1	0	0									

รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) สตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 และสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา

16. สุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ระหว่างสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) ที่ได้แทนที่คำตอบในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับสตริงคำตอบของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ โดยมีขั้นตอนการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อทำการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบดังต่อไปนี้
- 1) คำนวณจำนวนจุดข้างเคียงที่ต้องสุ่ม จากพารามิเตอร์ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง

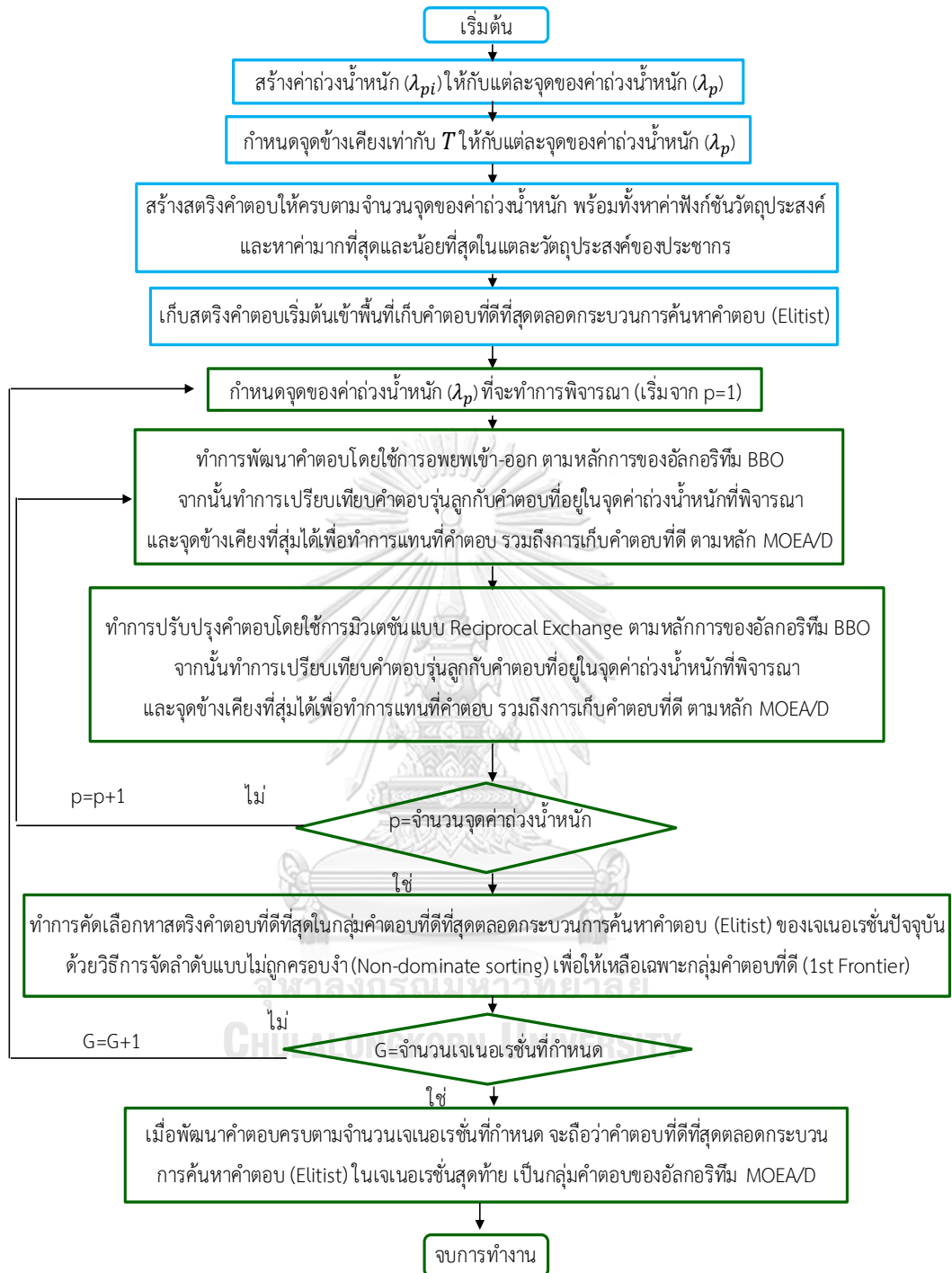
- 2) สุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา ตามจำนวนที่คำนวณได้
 - 3) ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยมีวิธีการเหมือนกับขั้นตอนที่ 15 แต่จะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้คูณกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าเทบปีเซฟฟ์ ถ้าค่าของสตริงคำตอบ z_i ดีกว่าค่าของสตริงคำตอบที่จุดข้างเคียง จะทำการแทนสตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์นั้นลงในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้
17. หาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร

ขั้นตอนการปรับปรุงคำตอบให้ดียิ่งขึ้น

18. คัดลอกสตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาที่ได้จากข้อ 15 มาทำมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange มีวิธีการดังนี้
 สุ่มค่า r_3 ในช่วง 0 ถึง 1 โดยเริ่มทำที่ลิตบิต ถ้า $r_3 > P_m$ (เมื่อ P_m คือความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน) จะไม่ทำการใดๆกับบิตนั้น และเริ่มพิจารณาที่บิตถัดไป แต่ถ้า $r_3 \leq P_m$ ให้สุ่มเลือกบิตใดก็ได้ในสตริงเดียวกันขึ้นมาหนึ่งบิต แล้วทำการสลับค่าบิตกัน ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบทุกบิต จะได้สตริงคำตอบที่ผ่านการมิวเตชัน (z')
19. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z' และปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร
20. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในประชากรย่อย และสตริงคำตอบที่ผ่านการมิวเตชัน (z')
21. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่มิวเตชันแล้ว (z') กับสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา โดยมีวิธีการเปรียบเทียบเหมือนขั้นตอนที่ 15 ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบ z' ดีกว่าค่าของสตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา ให้นำสตริงคำตอบนั้นพร้อมทั้งค่าวัตถุประสงค์แทนที่ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา พร้อมทั้งทำการเก็บสตริงคำตอบนั้นเข้าพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) และทำขั้นตอนที่ 22 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและข้ามไปขั้นตอนที่ 23
22. สุ่มเลือกจุดข้างเคียงเท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z' กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ โดยมีวิธีการเปรียบเทียบเหมือนขั้นตอนที่ 15 แต่ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบ z' ดีกว่าทำการแทนสตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์นั้นลงในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

23. ปรับปรุงคำตอบในประชากรและหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร และถ้า $p < P$ ให้กำหนด $p = p + 1$ แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $p = P$ ให้ ไปทำในขั้นตอนที่ 24 ต่อ
24. นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป พร้อมทั้งทำการปรับปรุงพื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ด้วย การตัดคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกันออก (Remove Duplicates) แล้วนำมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting และเก็บเฉพาะคำตอบที่ดีที่อยู่ใน First Frontier แล้วถ้า $G < Genaretion$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $G = Genaretion$ ให้ ไปทำในขั้นตอนที่ 25 ต่อ
25. หยุดกระบวนการพัฒนาคำตอบ และแสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

โดยขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน สามารถเขียนเป็นแผนภาพกระบวนการทำงานได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภาพการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

5.4 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน

จากขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ที่ได้อธิบายไปข้างต้นนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนานได้ดังตัวอย่างนี้ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบ 4 วัตถุประสงค์ ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบที่ 1 (สายการประกอบด้านนอก) คือผลิตภัณฑ์ A จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น A_1 และ A_2 มีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.17 และสัดส่วนการผลิตของแต่ละรุ่นและเวลาปฏิบัติงานของชิ้นงาน ตามตารางที่ 2.2 ขณะที่สายการประกอบที่ 2 (สายการประกอบด้านใน) ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบ คือผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่น B_1 และ B_2 มีแผนภาพลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังดังรูปที่ 2.18 และสัดส่วนการผลิตของแต่ละรุ่นและเวลาปฏิบัติงานของชิ้นงาน ตามตารางที่ 2.3 โดยตัวอย่างนี้กำหนดรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 10 หน่วยเวลา และกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ดังนี้

- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (H) คือ 2
- จำนวนของจุดข้างเคียง (T) คือ 4
- ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มเซตข้างเคียง คือ ร้อยละ 30
- ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) คือ 0.1
- จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) เท่ากับ 4

ดังนั้นจากสมการ $\lambda = C_{O-1}^{H+O-1}$ สามารถคำนวณจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากรได้เท่ากับ 10 เมื่อ $H=2, O=4$
ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-BBO

ตัวอย่างขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ของแต่ละจุด ตามจำนวนของประชากร (Population) ที่กำหนดโดยใช้ฟังก์ชันซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งมีลักษณะเป็นตารางเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (P) \times จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) ซึ่งตัวอย่างนี้จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 10 และจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมดเท่ากับ 4 ดังนั้นจะได้ตารางเมทริกซ์ขนาด 10×4 และมีค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.1 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p

λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	0	1	0	0
2	1	0	0	0
3	0	0.5	0.5	0
4	0.5	0	0.5	0
5	0	0	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0	0
7	0	0.5	0	0.5
8	0.5	0	0	0.5
9	0	0	0	1
10	0	0	1	0

2. กำหนดจุดข้างเคียง (Neighborhood) เท่ากับ T ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p โดยวิธีการคือคำนวณระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจกับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักอื่น (λ_j) ตามสมการที่ 5.1 โดยที่ $p \neq j$ เริ่มจากกำหนดให้ $p = 1, j = 2$ ดังนั้นค่า $d_{12} = \sqrt{(0-1)^2 + (1-0)^2 + 0 + 0} = \sqrt{2} = 1.41$ และทำการคำนวณค่า d_{pi} ของเซตค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆได้ ตามตารางที่ 5.2 จากนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T

ตารางที่ 5.2 ระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ (λ_p) กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักจุดอื่น (λ_j)

$\begin{matrix} j \\ p \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		1.41	0.71	1.22	1.22	0.71	0.71	1.22	1.41	1.41
2	1.41		1.22	0.71	1.22	0.71	1.22	0.71	1.41	1.41
3	0.71	1.22		0.71	0.71	0.71	0.71	1.00	1.22	0.71
4	1.22	0.71	0.71		0.71	0.71	1.00	0.71	1.22	0.71
5	1.22	1.22	0.71	0.71		1.00	0.71	0.71	0.71	0.71
6	0.71	0.71	0.71	0.71	1.00		0.71	0.71	1.22	1.22
7	0.71	1.22	0.71	1.00	0.71	0.71		0.71	0.71	1.22
8	1.22	0.71	1.00	0.71	0.71	0.71	0.71		0.71	1.22
9	1.41	1.41	1.22	1.22	0.71	1.22	0.71	0.71		1.41
10	1.41	1.41	0.71	0.71	0.71	1.22	1.22	1.22	1.41	

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด โดยการสุ่ม ซึ่งความยาวของสตริงคำตอบจะเท่ากับจำนวนชิ้นงานของสองสายการประกอบรวมกัน ตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สตริงคำตอบเริ่มต้นสำหรับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด

λ_p	string	Task priority																							
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
1	1	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
2	2	15	18	9	14	21	10	1	24	4	11	13	22	19	12	8	5	3	23	6	2	20	17	16	7
3	3	15	21	2	23	16	9	22	11	4	12	24	5	20	17	7	13	18	8	1	10	19	14	3	6
4	4	11	17	4	3	21	12	20	13	15	9	19	23	5	24	22	2	7	6	1	16	10	8	18	14
5	5	8	9	5	10	2	22	20	13	21	18	24	15	6	14	17	1	19	16	12	7	23	3	11	4
6	6	9	24	10	12	11	16	4	18	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
7	7	20	18	9	14	21	10	24	1	4	6	13	22	19	12	8	5	3	23	11	2	15	17	16	7
8	8	9	1	18	24	7	21	15	4	3	5	8	22	2	20	23	11	16	14	12	19	6	10	17	13
9	9	19	14	4	22	21	20	15	10	3	13	1	24	5	6	9	23	7	2	12	18	11	17	8	16
10	10	19	18	22	12	24	15	1	14	7	11	2	21	16	9	13	8	17	10	6	3	20	5	4	23

4. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่ามากที่สุดและค่าน้อยสุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร

λ_p	String	Objective				Max objective				Min objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	1	10	4	0.047	0.412	10	7	0.094	0.546	9	4	0.016	0.375
2	2	9	5	0.017	0.526								
3	3	10	5	0.059	0.444								
4	4	9	7	0.029	0.400								
5	5	10	5	0.061	0.546								
6	6	9	4	0.040	0.500								
7	7	9	5	0.030	0.471								
8	8	10	7	0.082	0.375								
9	9	9	7	0.016	0.500								
10	10	10	6	0.094	0.412								

5. ทำการเก็บสตริงคำตอบ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น เข้าพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การเก็บคำตอบของประชากรเริ่มต้นในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
2	[15 18 9 14 21 10 1 24 4 11 13 22 19 12 8 5 3 23 6 2 20 17 16 7]	9	5	0.017	0.526
3	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
4	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
5	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.546
6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471
8	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
9	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500
10	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412

ขั้นตอนการพัฒนาและการเก็บคำตอบ

6. กำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา (Initial Point) ด้วยการกำหนดค่า $p = p$ โดยค่า $p = \{1, 2, \dots, P\}$ เพื่อกำหนดประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อย คือ สตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียงตามตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 กลุ่มประชากรย่อยที่จะเริ่มทำการพัฒนาคำตอบ

λ_p	String	Task priority							λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
		A1	A2	A3	...	...	...	B(N)				
1	1	23	22	24	...	...	...	6	0	1	0	0
3	3	15	21	2	...	...	...	19	0	0.5	0.5	0
4	4	11	17	4	...	...	...	14	0.5	0	0.5	0
6	6	9	24	10	...	...	...	6	0.5	0.5	0	0
7	7	20	18	9	...	...	...	7	0	0.5	0	0.5

7. ทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ $\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.00001) - z_i^*}$ เมื่อ i คือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ($i = 1, 2, 3, 4$) โดยที่ z_i^* และ z_i^{nad} คือค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 5.4 ตามลำดับ ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากการนอร์มัลไลแล้วแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อย ที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4
1	1	0	1	0	0	1	0	0.395	0.216
3	3	0	0.5	0.5	0	1	0.333	0.55	0.407
4	4	0.5	0	0.5	0	0	1	0.161	0.147
6	6	0.5	0.5	0	0	0	0	0.311	0.733
7	7	0	0.5	0	0.5	0	0.333	0.172	0.561

8. ทำการหาค่าความแข็งแรง (Fitness) ของสตริงคำตอบในกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาโดยมีขั้นตอนดังนี้

- นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลของแต่ละสตริงคำตอบในประชากรย่อยคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของจุดถ่วงน้ำหนักที่กำลังทำการพิจารณา (λ_p) ตามตารางที่ 5.8 ซึ่งในตัวอย่างนี้จุดของค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นที่ทำการพิจารณา คือ จุดที่ 1 (λ_1) ซึ่งมีค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}$ คือ 0, 1, 0, 0 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.8 การคูณกันระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักของจุดถ่วงน้ำหนักที่กำลังทำการพิจารณา (λ_p)

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$
1	1	0	1	0	0	1	0	0.395	0.216	0	0	0	0
1	3	0	1	0	0	1	0.333	0.55	0.407	0	0.333	0	0
1	4	0	1	0	0	0	1	0.161	0.147	0	1	0	0
1	6	0	1	0	0	0	0	0.311	0.733	0	0	0	0
1	7	0	1	0	0	0	0.333	0.172	0.561	0	0.333	0	0

- 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$ ของสตริงคำตอบในกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณา ตามตารางที่ 5.9
- 3) กำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบในกลุ่มประชากรย่อย โดยพิจารณาจากค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ จากนั้นเรียงลำดับจากค่าที่น้อยที่สุดไปมากที่สุด ซึ่งจะมีค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเท่ากับ 1, ..., F พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ k โดยจะมีค่าจากมากไปน้อยเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง คือ เท่ากับ $F, \dots, 1$ จากตัวอย่างในตารางที่ 5.9 สตริงคำตอบที่ 1 และ 6 มีค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์น้อยที่สุด ดังนั้นจึงกำหนดค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 และ สตริงคำตอบที่ 3 และ 6 มีความแข็งแรง เท่ากับ 2 ส่วนสตริงคำตอบที่ 4 มีความแข็งแรงเท่ากับ 3 ตามลำดับค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ที่เพิ่มขึ้น และจะได้ค่าสปีชีส์เคาท์ k ตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 5.9 ค่าความแข็งแรงและสปีชีส์เคาท์ของประชากรย่อย

P	String	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$	Fitness	Species Count (k)
1	1	0	0	0	0	0	1	3
3	3	0	0.333	0	0	0.333	2	2
4	4	0	1	0	0	1	3	1
6	6	0	0	0	0	0	1	3
7	7	0	0.333	0	0	0.333	2	2

9. คัดลอกสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มประชากรย่อยทั้งหมดมาเป็นสตริงคำตอบ y_i และคัดลอกสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 มาเป็นสตริงคำตอบชั่วคราว z_i เพื่อมาทำการอพยพเข้าออก จากตัวอย่างสตริงคำตอบที่อยู่ในความแข็งแรง 1 คือสตริงคำตอบที่ 1 และ 6 ดังนั้นจึงคัดลอกสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ 4 และ 6 ออกมาเป็นสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 และ z_6 เพื่อทำการอพยพต่อไป ดังตารางที่ 5.10

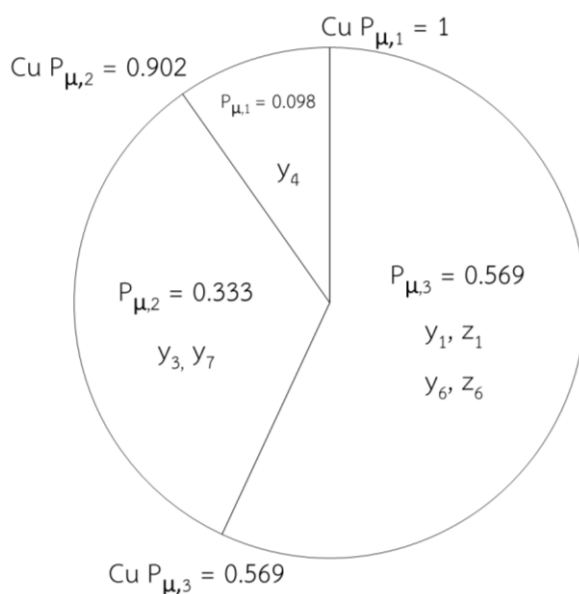
ตารางที่ 5.10 การคัดลอกสตริงคำตอบ y_i และสตริงคำตอบชั่วคราว z_i

สตริงคำตอบ	Task priority 24 tasks	Objective				
		f_1	f_2	f_3	f_4	
y	y_1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
	y_3	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
	y_4	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
	y_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
	y_7	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471
z	z_1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
	z_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500

10. คำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของสตริงคำตอบ y_i และสตริงคำตอบชั่วคราว z_i ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสปีชีส์เคาท k ที่มีอยู่ โดยสมการที่ใช้คำนวณค่าในการอพยพต่างๆ ข้างต้นจะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ (Ma, 2010) และสมการที่ใช้เป็นสมการเดียวกับที่แสดงใน บทที่ 4 คือ สมการที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 จะได้ค่าต่างๆตามตารางที่ 5.11 และจัดทำวงล้อรูเล็ตส์สำหรับใช้ในการสุ่มเลือกสตริงที่ไปทำการอพยพได้ดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.11 อัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของแต่ละสตริงคำตอบ

Fitness	Species Count (k)	No.	String	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cumulative $P_{\mu,k}$
1	3	1	y_1, z_1	0.1464	0.8536	0.0976	0.5690	0.5690
		2	y_6, z_6					
2	2	1	y_3	0.5	0.5	0.3333	0.3333	0.9023
		2	y_7					
3	1	1	y_4	0.8536	0.1464	0.5690	0.0976	1



รูปที่ 5.4 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตรีงที่ไปทำการอพยพ

11. ดำเนินการอพยพโดยมีขั้นตอนดังนี้

นำสตรีงคำตอบ z_1 และ z_6 มาดำเนินการอพยพทีละสตรีงโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) สุ่มค่า r_1 ในช่วง 0 ถึง 1 ให้กับทุกๆบิตของสตรีงคำตอบ z_i เพื่อรับการอพยพเข้า

การสุ่มเลือกบิตจะพิจารณาทีละบิต ตั้งแต่บิตแรกจนถึงบิตสุดท้าย โดยมีค่า r_1 เป็นตัวกำหนดว่าบิตนั้นจะได้รับการอพยพเข้าหรือไม่ อธิบายตามตัวอย่าง ในตารางที่ 5.12 ดังนี้ สตรีงคำตอบชั่วคราว z_1 ซึ่งอยู่ในสปีชีส์เคาท์ 3 หรือความแข็งแรง 1 มีค่า $P_{\lambda,3} = 0.0976$ (จากตารางที่ 5.11) เริ่มพิจารณาที่บิต A1 สุ่มค่า $r_1=0.535$ ซึ่งมีค่ามากกว่า $P_{\lambda,k}$ ดังนั้นไม่มีการรับการอพยพเข้าหรือถ่ายทอดค่าบิตสู่บิตนี้ จากนั้นเริ่มพิจารณาบิต A2 สุ่มค่า $r_1=0.014$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า $P_{\lambda,k}$ จึงมีการรับการอพยพเข้าจากสตรีงอื่น จากนั้นพิจารณาว่าจะนำค่าบิต (Priority) จากสตรีงไหนมาแทนที่ โดยการสุ่มค่า r_2 แล้วนำค่าที่ได้พิจารณาว่าอยู่ช่วงใดในวงล้อรูเล็ตของค่า $P_{\mu,k}$ (รูปที่ 5.4) ในที่นี้สุ่มได้ค่า $r_2=0.753$ ซึ่งอยู่ในช่วงของวงล้อรูเล็ต Cumulative $P_{\mu,2} = 0.9023$ ดังนั้นสตรีงในสปีชีส์เคาท์ที่จะถูกเลือกเพื่อทำการอพยพออก คือ y_3 และ y_7 (ถ้ามีหลายสตรีงให้ทำการสุ่มเลือก) ในที่นี้สุ่มได้สตรีง y_7 ซึ่ง ณ ตำแหน่ง A2 ค่าบิตของสตรีง y_7 คือ 18 จึงนำมาแทนที่ค่าบิต A2 ในสตรีง z_1 แสดงในตารางที่ 5.12 เมื่อมีการนำค่าหนึ่งมาแทนที่ย่อมทำให้มีค่าซ้ำกันในสตรีงคำตอบชั่วคราว ดังนั้นจึงต้องทำการซ่อมแซมสตรีงคำตอบชั่วคราว ดัง

ตารางที่ 5.14 และทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนถึง B12 และผลการอพยพการถ่ายทอดค่าบิตและการซ่อมแซมสตริงคำตอบ z_6 แสดงในตารางที่ 5.13 และ 5.15 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.12 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก				
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	r_2	สปีชีส์ เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่ เลือก	ค่าบิต (Priority)
z_1	A1	0.535						
	A2	0.014	รับการอพยพเข้า	0.753	2	$\{y_3, y_7\}$	y_7	18
	A3	0.362						
	A4	0.712						
	A5	0.104						
	A6	0.199						
	A7	0.876						
	A8	0.651						
	A9	0.678						
	A10	0.116						
	A11	0.346						
	A12	0.600						
	B1	0.970						
	B2	0.598						
	B3	0.595						
	B4	0.595						
	B5	0.794						
	B6	0.163						
	B7	0.224						
	B8	0.693						
	B9	0.215						
	B10	0.443						
	B11	0.327						
	B12	0.485						

ตารางที่ 5.13 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราว z_6 ในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

การอพยพเข้า				การอพยพออก				
สตริง	บิต	r_1	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	r_2	สปีชีส์ เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่ เลือก	ค่าบิต (Priority)
z_6	A1	0.243						
	A2	0.563						
	A3	0.512						
	A4	0.072	รับการอพยพเข้า	0.480	3	$\{y_1\}$	y_1	18
	A5	0.197						
	A6	0.589						
	A7	0.887						
	A8	0.783						
	A9	0.357						
	A10	0.386						
	A11	0.897						
	A12	0.975						
	B1	0.794						
	B2	0.561						
	B3	0.934						
	B4	0.982						
	B5	0.841						
	B6	0.678						
	B7	0.471						
	B8	0.128						
	B9	0.836						
	B10	0.031	รับการอพยพเข้า	0.926	1	$\{y_4\}$	y_4	8
	B11	0.438						
	B12	0.191						

2) การซ่อมแซมสตริงคำตอบ

เนื่องจากค่าบิตแต่ละบิตของสตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน ดังนั้นเมื่อมีการอพยพหรือแทนที่ค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราว จะต้องทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบด้วย โดยมี

ขั้นตอนดังนี้ พิจารณาตั้งแต่บิตแรกจนถึงบิตสุดท้ายว่ามีบิตไหนที่มีการแทนที่ค่าบิตบ้าง แล้วทำการซ่อมแซมไปที่ละบิตโดยเริ่มจากบิตแรกก่อน ซึ่งในตารางที่ 5.14 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 3 นั้นบิต A2 ถูกแทนที่ด้วยค่าบิต 18 ซึ่งค่าบิต 18 นี้จะไปซ้ำกับค่าบิตของบิต A4 ดังนั้นทำการซ่อมแซมโดย นำค่าบิตเดิมของ A2 คือ 22 มาแทนที่ค่าบิตของ A4 จะได้สตริงคำตอบที่ทำการปรับปรุงและซ่อมแซมแล้ว แล้วยนำสตริงนี้ไปเป็นสตริงเริ่มต้นในการซ่อมแซมบิตถัดไป ผลการอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบ z_6 แสดงในตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.14 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_1 ในสปีชีส์เคาท์ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
z_1	A2	22	18	เริ่มต้น	23	22	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
				ปรับปรุง	23	18	24	18	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6
				ซ่อมแซม	23	18	24	22	9	8	15	1	19	16	12	4	17	3	5	7	10	14	21	2	13	20	11	6

ตารางที่ 5.15 การอพยพค่าบิต และซ่อมแซมสตริงคำตอบชั่วคราว z_6 ในสปีชีส์เคาท์ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
z_6	A4	12	18	เริ่มต้น	9	24	10	12	11	16	4	18	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
				ปรับปรุง	9	24	10	18	11	16	4	18	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
				ซ่อมแซม	9	24	10	18	11	16	4	12	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
	B10	17	8	เริ่มต้น	9	24	10	18	11	16	4	12	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
				ปรับปรุง	9	24	10	18	11	16	4	12	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	8	5	6
				ซ่อมแซม	9	24	10	18	11	16	4	12	20	7	23	22	19	17	13	14	3	1	21	2	15	8	5	6

12. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ)

หลังจากทำการอพยพเรียบร้อยแล้ว จะได้สตริงคำตอบ z_1 และ z_6 พร้อมทั้งนำไปถอดรหัสสตริงคำตอบเพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ได้ดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 สตริงคำตอบชั่วคราว Z หลังอพยพพร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สตริงคำตอบ	Task priority 24 tasks	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
z_1	[23 18 24 22 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
z_6	[9 24 10 18 11 16 4 12 20 7 23 22 19 17 13 14 3 1 21 2 15 8 5 6]	10	5	0.063	0.333

13. หาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ตามตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของประชากร

λ_p	String	Objective				Max objective				Min objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	1	10	4	0.047	0.412	10	7	0.094	0.546	9	4	0.016	0.333
2	2	9	5	0.017	0.526								
3	3	10	5	0.059	0.444								
4	4	9	7	0.029	0.400								
5	5	10	5	0.061	0.546								
6	6	9	4	0.040	0.500								
7	7	9	5	0.030	0.471								
8	8	10	7	0.082	0.375								
9	9	9	7	0.016	0.500								
10	10	10	6	0.094	0.412								
1	z_1	10	4	0.047	0.412								
1	z_6	10	5	0.063	0.333								

14. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในประชากรย่อย สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่หรือสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 (จะเป็นสตริงคำตอบเดียวกันกับสตริงในประชากรย่อยเนื่องจากการคัดลอกและเลือกเฉพาะสตริงที่อยู่ในความแข็งแรง 1 ออกมา) และสตริงคำตอบรุ่นลูกหรือสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) ตามตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว

สตริงคำตอบ	String	Objective			
		\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4
สตริงในกลุ่มประชากรย่อย	1 (Initial)	1	0	0.397	0.371
	3	1	0.333	0.551	0.521
	4	0	1	0.167	0.315
	6	0	0	0.308	0.784
	7	0	0.333	0.179	0.648
สตริงคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 (y)	y_1	1	0	0.397	0.371
	y_6	0	0	0.308	0.784
สตริงคำตอบหลังอพยพ (z)	z_1	1	0	0.397	0.371
	z_6	1	0.333	0.603	0

15. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบดังนี้ 1. สตริงรุ่นลูกหรือสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) 2. สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่หรือสตริงคำตอบ y_i ที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 และ 3. สตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณา (λ_p) โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

- 1) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้วของสตริงคำตอบทั้ง 3 กลุ่มที่ได้กล่าวมา คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_p ที่กำลังพิจารณาตามตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 การคูณกันของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักของจุด λ_p ที่กำลังพิจารณา

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$
1	1	0	1	0	0	1	0	0.397	0.371	0	0	0	0
1	y_1	0	1	0	0	1	0	0.397	0.371	0	0	0	0
1	y_6	0	1	0	0	0	0	0.308	0.784	0	0	0	0
1	z_1	0	1	0	0	1	0	0.397	0.371	0	0	0	0
1	z_6	0	1	0	0	1	0.333	0.603	0	0	0.333	0	0

- 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{pi} \times \bar{f}_i\}$ ของสตริงคำตอบทั้ง 3 กลุ่ม โดยเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงตามตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงคำตอบ

P	String	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_p, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$
1	1	0	0	0	0	0
1	y_1	0	0	0	0	0
1	y_6	0	0	0	0	0
1	z_1	0	0	0	0	0
1	z_6	0	0.333	0	0	0.333

จากตารางที่ 5.20 นั้นสตริงคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 อาจเป็นตัวเดียวกันกับสตริงคำตอบเริ่มต้นได้ เมื่อทำการหาค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบทั้ง 3 กลุ่มแล้วพบว่า สตริงคำตอบ y_1 , y_6 และ z_1 มีค่าเท่ากับสตริงเริ่มต้นทั้งหมด (ค่าเทบปีเซฟฟ์น้อยกว่าเท่ากับจะทำการแทนที่) ดังนั้นจะทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบ 3 สตริงนั้นเพื่อทำการแทนที่ ซึ่งในที่นี้สุ่มได้สตริงคำตอบ y_6

- 3) นำสตริงคำตอบ y_6 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แทนที่ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา คือ λ_1 ตามตารางที่ 5.21 และเมื่อมีการแทนที่สตริงคำตอบเกิดขึ้น จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่แทนที่นั้นพร้อมทั้งค่าวัตถุประสงค์ เข้าพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ตามตารางที่ 5.22 และทำขั้นตอนที่ 16 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและข้ามไปขั้นตอนที่ 17

ตารางที่ 5.21 การแทนที่สตริงคำตอบหลังการพัฒนาคำตอบด้วยการอพยพลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
1	y_6	0	1	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
3	3	0	0.5	0.5	0	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
4	4	0.5	0	0.5	0	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
6	6	0.5	0.5	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	7	0	0.5	0	0.5	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471

ตารางที่ 5.22 การเก็บคำตอบที่มีการแทนที่เข้าในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
2	[15 18 9 14 21 10 1 24 4 11 13 22 19 12 8 5 3 23 6 2 20 17 16 7]	9	5	0.017	0.526
3	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
4	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
5	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.546
6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471
8	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
9	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500
10	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412
y_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500

16. สุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ที่กำลังพิจารณา ได้แก่ $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_6$ และ λ_7 เท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ระหว่างสตริงคำตอบ z_i (หลังอพยพ) ที่ได้แทนที่คำตอบในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับสตริงคำตอบของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

โดยมีขั้นตอนการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อทำการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบดังต่อไปนี้

- 1) คำนวณจำนวนจุดข้างเคียงที่ต้องสุ่ม จากพารามิเตอร์ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง ซึ่งตัวอย่างนี้กำหนดการสุ่มจุดข้างเคียง คือ 0.3 ดังนั้นจำนวนจุดข้างเคียงที่ต้องสุ่มเท่ากับ $0.3 \times (4+1) = 1.5$ ทำการปัดขึ้น เป็น 2 จุด
- 2) สุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ที่กำลังพิจารณา ได้แก่ λ_3 และ λ_7
- 3) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้วของสตริงคำตอบที่แทนที่ในตำแหน่งค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 (สตริงคำตอบ y_6) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียง λ_3 ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของจุดข้างเคียง λ_3 ตามตารางที่ 5.23 และทำการหาค่าเทบปีเซฟฟ์ ดังตารางที่ 5.24 และผลการเปรียบเทียบค่าเทบปีเซฟฟ์ของเซตข้างเคียง λ_7 แสดงดังตารางที่ 5.25 และ ตารางที่ 5.26

ตารางที่ 5.23 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_3

P	String	λ_{31}	λ_{32}	λ_{33}	λ_{34}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{31} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{32} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{33} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{34} \times \bar{f}_4$
3	3	0	0.5	0.5	0	1	0.333	0.551	0.521	0	0.1665	0.2755	0
3	y_6	0	0.5	0.5	0	0	0	0.308	0.784	0	0	0.154	0

ตารางที่ 5.24 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_3

P	String	$\lambda_{31} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{32} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{33} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{34} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{3i} \times \bar{f}_i\}$
3	3	0	0.1665	0.2755	0	0.2755
3	y_6	0	0	0.154	0	0.1540

ตารางที่ 5.25 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_7

P	String	λ_{71}	λ_{72}	λ_{73}	λ_{74}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{71} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{72} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{73} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{74} \times \bar{f}_4$
7	7	0	0.5	0	0.5	0	0.333	0.179	0.648	0	0.1665	0	0.324
7	y_6	0	0.5	0	0.5	0	0	0.308	0.784	0	0	0	0.392

ตารางที่ 5.26 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_7

P	String	$\lambda_{71} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{72} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{73} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{74} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{7i} \times \bar{f}_i\}$
7	7	0	0.1665	0	0.324	0.324
7	y_6	0	0	0	0.392	0.392

จากตารางที่ 5.24 เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบ y_6 มีค่าเท่ากับ 0.154 ซึ่งน้อยกว่าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.2755 จึงทำการแทนที่สตริงคำตอบ ในตารางที่ 5.27 และค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบ y_6 ในตารางที่ 5.26 มีค่าเท่ากับ 0.392 ซึ่งมากกว่าค่าของสตริงคำตอบที่ 7 จึงไม่มีการแทนที่

ตารางที่ 5.27 การแทนที่สตริงคำตอบหลังทำการพัฒนาคำตอบ และค่าวัตถุประสงค์ ในจุดข้างเคียง

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
1	y_6	0	1	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
3	y_6	0	0.5	0.5	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
4	4	0.5	0	0.5	0	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
6	6	0.5	0.5	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	7	0	0.5	0	0.5	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471

17. หาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ตามตารางที่ 5.28

ตารางที่ 5.28 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของประชากร

λ_p	String	Objective				Max objective				Min objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	y_6	9	4	0.040	0.500								
2	2	9	5	0.017	0.526								
3	y_6	9	4	0.040	0.500								
4	4	9	7	0.029	0.400								
5	5	10	5	0.061	0.546								
6	6	9	4	0.040	0.500	10	7	0.094	0.546	9	4	0.016	0.375
7	7	9	5	0.030	0.471								
8	8	10	7	0.082	0.375								
9	9	9	7	0.016	0.500								
10	10	10	6	0.094	0.412								

ขั้นตอนการปรับปรุงคำตอบให้ดียิ่งขึ้น

18. นำสตริงคำตอบในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาที่ได้จากข้อ 15 มาทำมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange โดยมีวิธีการดังนี้

สุ่มค่า r_3 ในช่วง 0 ถึง 1 ให้กับแต่ละบิต โดยเริ่มทำทีละบิต ถ้า $r_3 > P_m$ (เมื่อ P_m คือความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1) จะไม่ทำการใดๆกับบิตนั้น และ

เริ่มพิจารณาที่บิตถัดไป แต่ถ้า $r_3 \leq P_m$ ให้สุ่มเลือกบิตใดก็ได้ในสตริงเดียวกันขึ้นมาหนึ่งบิต แล้วทำการสลับค่าบิตกัน ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบทุกบิต จะได้สตริงคำตอบในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณาที่ผ่านการมิวเทชัน (z') จากตัวอย่างสตริงคำตอบที่จะนำมาทำมิวเทชัน คือ y_6 จึงคัดลอกมาเป็นสตริงคำตอบ z'_6 จากนั้นจึงสุ่มค่า r_3 ให้กับแต่ละบิต ซึ่ง บิต A9 และ B12 มีค่า $r_3 \leq 0.1$ จึงสุ่มค่าบิตที่จะมาทำการสลับค่า ได้แก่ ค่าของบิต A12 และ บิต B2 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.29

ตารางที่ 5.29 การมิวเทชันสตริงคำตอบ z'_6

ลำดับ	คู่มิวเทชัน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
	z'_6 ก่อนมิวเทชัน	9	24	10	12	11	16	4	18	20	7	23	22	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
1	A9 กับ A12	9	24	10	12	11	16	4	18	22	7	23	20	19	8	13	14	3	1	21	2	15	17	5	6
2	B12 กับ B2	9	24	10	12	11	16	4	18	22	7	23	20	19	6	13	14	3	1	21	2	15	17	5	8
	z'_6 หลังมิวเทชัน	9	24	10	12	11	16	4	18	22	7	23	20	19	6	13	14	3	1	21	2	15	17	5	8

19. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z'_6 ตามตารางที่ 5.30 และปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ตามตารางที่ 5.31

ตารางที่ 5.30 สตริงคำตอบ และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ z'_6

สตริงคำตอบ	Task priority 24 tasks	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
z'_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471

ตารางที่ 5.31 การปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของประชากร

String	Objective				Max ใหม่				Min ใหม่			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Max เดิม	10	7	0.094	0.546	10	7	0.094	0.546	9	4	0.016	0.375
Min เดิม	9	4	0.016	0.375								
z'_6	9	4	0.040	0.471								

20. ทำการนอร์มัลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในประชากรย่อย และสตริงคำตอบที่ผ่านการมิวเทชัน คือสตริงคำตอบ z'_6 ตามตารางที่ 5.32

ตารางที่ 5.32 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z'_6 และสตริงคำตอบในกลุ่มประชากรย่อยที่กำลังพิจารณาที่ทำการนอร์มัลไลซ์แล้ว

สตริงคำตอบ	λ_p	String	Objective			
			\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4
สตริงในกลุ่มประชากรย่อย	1	y_6	0	0	0.308	0.731
	3	y_6	0	0	0.308	0.731
	4	4	0	1	0.167	0.146
	6	6	0	0	0.308	0.731
	7	7	0	0.333	0.179	0.561
สตริงคำตอบหลังมีวเตชัน (z')	1	z'_6	0	0	0.308	0.561

21. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่มีวเตชันแล้ว (z') กับสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา โดยวิธีการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบ z' มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าของสตริงคำตอบ ณ จุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา ให้นำสตริงคำตอบนั้นพร้อมทั้งค่าวัตถุประสงค์แทนที่ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา พร้อมทั้งทำการเก็บสตริงคำตอบนั้นเข้าพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) และทำขั้นตอนที่ 22 แต่ถ้าไม่ดีกว่า จะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและข้ามไปขั้นตอนที่ 23

จากตัวอย่าง นำสตริงคำตอบที่มีวเตชันแล้ว z'_6 กับ สตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ที่กำลังพิจารณา คือ สตริงคำตอบ y_6 มาหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_1 ตามตารางที่ 5.33 และ 5.34 พบว่า ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้ขอทั้ง 2 สตริง มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงทำการแทนที่ สตริงคำตอบ z'_6 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลงในตำแหน่งจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 และเก็บคำตอบที่ทำการแทนที่เข้าพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

ตารางที่ 5.33 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้วคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_1

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$
1	y_6	0	1	0	0	0	0	0.308	0.731	0	0	0	0
1	z'_6	0	1	0	0	0	0	0.308	0.561	0	0	0	0

ตารางที่ 5.34 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่จุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1

P	String	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$
1	y_6	0	0	0	0	0
1	z'_6	0	0	0	0	0

จะได้กลุ่มประชากรย่อยที่มีการแทนที่สตริงคำตอบ z'_6 พร้อมทั้งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ที่กำลังพิจารณาตามตารางที่ 5.35 และเก็บสตริงคำตอบพร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 5.36

ตารางที่ 5.35 การแทนที่สตริงคำตอบที่ทำมิวเตชัน z'_6 และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลงในจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ที่กำลังพิจารณา

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
1	z'_6	0	1	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471
3	y_6	0	0.5	0.5	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
4	4	0.5	0	0.5	0	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
6	6	0.5	0.5	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	7	0	0.5	0	0.5	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471

ตารางที่ 5.36 การเก็บคำตอบที่มีการแทนที่เข้าในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
2	[15 18 9 14 21 10 1 24 4 11 13 22 19 12 8 5 3 23 6 2 20 17 16 7]	9	5	0.017	0.526
3	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
4	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400

ตารางที่ 5.36 การเก็บคำตอบที่มีการแทนที่เข้าในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) (ต่อ)

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
5	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.546
6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471
8	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
9	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500
10	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412
y_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
z'_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471

22. สุ่มเลือกจุดข้างเคียงเท่ากับจำนวนที่กำหนด ในขั้นตอนการสุ่มเลือกเซตข้างเคียงของขั้นตอนการอพยพ และทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบ z' ที่แทนที่คำตอบในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณากับค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนักของจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าดีกว่าทำการแทนสตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์นั้นในจุดข้างเคียง

ในตัวอย่างนี้ จำนวนจุดข้างเคียงที่ต้องสุ่ม คือ 2 จุด เท่ากับจำนวนที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการอพยพ ซึ่งสุ่มได้ จุดข้างเคียง λ_4 และ λ_6 จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ เช่นเดียวกันกับ ขั้นตอนการอพยพ โดย ณ ตำแหน่ง λ_4 แสดงดังตารางที่ 5.37 และ ตารางที่ 5.38 และ ตำแหน่ง λ_6 แสดงดังตารางที่ 5.39 และ ตารางที่ 5.40

ตารางที่ 5.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_4

P	String	λ_{41}	λ_{42}	λ_{43}	λ_{44}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{41} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{42} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{43} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{44} \times \bar{f}_4$
4	4	0.5	0	0.5	0	0	1	0.167	0.146	0	0	0.084	0
4	z'_6	0.5	0	0.5	0	0	0	0.308	0.561	0	0	0.154	0

ตารางที่ 5.38 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่ค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_4

P	String	$\lambda_{31} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{32} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{33} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{34} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{3i} \times \bar{f}_i\}$
4	4	0	0	0.084	0	0.084
4	z'_6	0	0	0.154	0	0.154

ตารางที่ 5.39 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลซ์แล้วคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของ λ_6

P	String	λ_{61}	λ_{62}	λ_{63}	λ_{64}	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	$\lambda_{61} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{62} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{63} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{64} \times \bar{f}_4$
6	6	0.5	0.5	0	0	0	0	0.308	0.731	0	0	0	0
6	z'_6	0.5	0.5	0	0	0	0	0.308	0.561	0	0	0	0

ตารางที่ 5.40 การเลือกค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละสตริงที่ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_6

P	String	$\lambda_{61} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{62} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{63} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{64} \times \bar{f}_4$	$g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \leq i \leq 4} \{\lambda_{7i} \times \bar{f}_i\}$
6	6	0	0	0	0	0
6	z'_6	0	0	0	0	0

จากตารางที่ 5.38 ที่ตำแหน่ง λ_4 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของ z'_6 มีค่าคือ 0.154 ซึ่งมากกว่าค่าของสตริงคำตอบ 4 คือ 0.084 จึงไม่มีการแทนที่สตริงคำตอบ และในตารางที่ 5.40 ณ ตำแหน่ง λ_6 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของ z'_6 คือ 0 ซึ่งมีค่าเท่ากับสตริงคำตอบ 6 จึงทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในตำแหน่ง λ_6 ดังตารางที่ 5.41

ตารางที่ 5.41 การแทนที่สตริงคำตอบที่ทำมิวเตชัน z'_6 และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลงในจุดข้างเคียง

P	String	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}	Task priority 24 Tasks	f_1	f_2	f_3	f_4
1	z'_6	0	1	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471
3	y_6	0	0.5	0.5	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
4	4	0.5	0	0.5	0	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
6	z'_6	0.5	0.5	0	0	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471
7	7	0	0.5	0	0.5	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471

23. ปรับปรุงคำตอบในประชากร และหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากร ตามตารางที่ 5.42

ตารางที่ 5.42 การหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

λ_p	String	Objective				Max objective				Min objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	z'_6	9	4	0.040	0.471								
2	2	9	5	0.017	0.526								
3	y_6	9	4	0.040	0.500								
4	4	9	7	0.029	0.400								
5	5	10	5	0.061	0.546								
6	z'_6	9	4	0.040	0.471	10	7	0.094	0.546	9	4	0.016	0.375
7	7	9	5	0.030	0.471								
8	8	10	7	0.082	0.375								
9	9	9	7	0.016	0.500								
10	10	10	6	0.094	0.412								

หลังจากนั้น เช็คว่า $p < P$ ใหม่ถ้าใช่ให้กำหนด $p = p + 1$ ซึ่ง $p = 1$ และ $P = 10$ ดังนั้น $1 < 10$ กำหนดให้ $p = 1 + 1 = 2$ และวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 6 ทำวนจนกระทั่ง $p = P$ จึงไปทำต่อในขั้นตอนที่ 24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

24. นำสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป พร้อมทั้งทำการปรับปรุงพื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ด้วย การตัดคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกันออก (Remove Duplicates) แล้วนำมาหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting และเก็บเฉพาะคำตอบที่ดีที่อยู่ใน First Frontier แล้วถ้า $G < Generation$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $G = Generation$ ให้ ไปทำในขั้นตอนที่ 25 ต่อ

25. หยุดกระบวนการพัฒนาคำตอบเมื่อสิ้นสุดกระบวนการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันสุดท้ายแล้ว ให้นำคำตอบที่เก็บในพื้นที่จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) มาเป็นคำตอบของ อัลกอริทึม MOEA/D-BBO

จากตัวอย่างเมื่อทำการพัฒนาครบตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว ได้คำตอบที่อยู่ในพื้นที่
จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ตามตารางที่ 5.43

ตารางที่ 5.43 คำตอบที่ได้จากการพัฒนาของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Task priority	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412
2	[15 18 9 14 21 10 1 24 4 11 13 22 19 12 8 5 3 23 6 2 20 17 16 7]	9	5	0.017	0.526
3	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444
4	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400
5	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.546
6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
7	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471
8	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375
9	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500
10	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412
y_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500
z'_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471
z_2	[18 2 13 20 15 6 24 19 23 7 9 17 14 16 1 21 22 10 3 5 4 12 8 11]	9	4	0.015	0.308
z_5	[20 2 11 5 23 22 3 1 21 7 4 17 19 13 9 24 16 8 12 14 6 18 10 15]	9	4	0.003	0.308
z'_7	[20 4 15 9 1 11 17 19 24 18 16 10 6 23 2 8 22 14 13 3 21 7 12 5]	9	4	0.002	0.357
z_8	[22 24 4 19 1 6 14 23 11 9 3 7 18 21 12 13 10 8 20 17 2 5 15 16]	10	4	0.060	0.231
z'_9	[18 12 24 11 15 2 22 3 17 1 23 6 4 20 8 16 7 14 9 21 5 10 13 19]	9	4	0.010	0.4
z_{10}	[11 20 18 5 16 17 3 4 2 24 15 14 6 12 21 9 22 1 13 7 8 19 23 10]	9	4	0.010	0.357

จากคำตอบที่ได้ในตาราง 5.43 ถ้ามีคำตอบที่ซ้ำกันให้ตัดออก ซึ่งในที่นี้คำตอบ 6 และ y_6 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซ้ำกัน จึงทำการตัดสตริงคำตอบ y_6 ออก และทำการหาค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Non-dominated Sorting ดังตารางที่ 5.44

ตารางที่ 5.44 การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธี Non-Dominated Sorting

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)						
String	Task priority	Objective				Dummy Fitness
		f_1	f_2	f_3	f_4	
1	[23 22 24 18 9 8 15 1 19 16 12 4 17 3 5 7 10 14 21 2 13 20 11 6]	10	4	0.047	0.412	5
2	[15 18 9 14 21 10 1 24 4 11 13 22 19 12 8 5 3 23 6 2 20 17 16 7]	9	5	0.017	0.526	5
3	[15 21 2 23 16 9 22 11 4 12 24 5 20 17 7 13 18 8 1 10 19 14 3 6]	10	5	0.059	0.444	6
4	[11 17 4 3 21 12 20 13 15 9 19 23 5 24 22 2 7 6 1 16 10 8 18 14]	9	7	0.029	0.400	5
5	[8 9 5 10 2 22 20 13 21 18 24 15 6 14 17 1 19 16 12 7 23 3 11 4]	10	5	0.061	0.546	7
6	[9 24 10 12 11 16 4 18 20 7 23 22 19 8 13 14 3 1 21 2 15 17 5 6]	9	4	0.040	0.500	5
7	[20 18 9 14 21 10 24 1 4 6 13 22 19 12 8 5 3 23 11 2 15 17 16 7]	9	5	0.030	0.471	4
8	[9 1 18 24 7 21 15 4 3 5 8 22 2 20 23 11 16 14 12 19 6 10 17 13]	10	7	0.082	0.375	3
9	[19 14 4 22 21 20 15 10 3 13 1 24 5 6 9 23 7 2 12 18 11 17 8 16]	9	7	0.016	0.500	3
10	[19 18 22 12 24 15 1 14 7 11 2 21 16 9 13 8 17 10 6 3 20 5 4 23]	10	6	0.094	0.412	3
z'_6	[9 24 10 12 11 16 4 18 22 7 23 20 19 6 13 14 3 1 21 2 15 17 5 8]	9	4	0.040	0.471	3
z_2	[18 2 13 20 15 6 24 19 23 7 9 17 14 16 1 21 22 10 3 5 4 12 8 11]	9	4	0.015	0.308	2
z_5	[20 2 11 5 23 22 3 1 21 7 4 17 19 13 9 24 16 8 12 14 6 18 10 15]	9	4	0.003	0.308	1
z'_7	[20 4 15 9 1 11 17 19 24 18 16 10 6 23 2 8 22 14 13 3 21 7 12 5]	9	4	0.002	0.357	1
z_8	[22 24 4 19 1 6 14 23 11 9 3 7 18 21 12 13 10 8 20 17 2 5 15 16]	10	4	0.060	0.231	1
z'_9	[18 12 24 11 15 2 22 3 17 1 23 6 4 20 8 16 7 14 9 21 5 10 13 19]	9	4	0.010	0.4	3
z_{10}	[11 20 18 5 16 17 3 4 2 24 15 14 6 12 21 9 22 1 13 7 8 19 23 10]	9	4	0.010	0.357	2

เมื่อทำการหาค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบในพื้นที่คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบแล้ว จะทำการเก็บเฉพาะคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรง 1 หรือคำตอบที่อยู่ใน First Frontier และตัดคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรงลำดับอื่นออก ซึ่งจะได้คำตอบที่ดีที่สุดของ อัลกอริทึม MOEA/D-BBO ตามตารางที่ 5.45

ตารางที่ 5.45 คำตอบที่ดีที่สุดของ อัลกอริทึม MOEA/D-BBO

พื้นที่เก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)						
String	Task priority	Objective				Dummy Fitness
		f_1	f_2	f_3	f_4	
Z_5	[20 2 11 5 23 22 3 1 21 7 4 17 19 13 9 24 16 8 12 14 6 18 10 15]	9	4	0.003	0.308	1
Z'_7	[20 4 15 9 1 11 17 19 24 18 16 10 6 23 2 8 22 14 13 3 21 7 12 5]	9	4	0.002	0.357	1
Z_8	[22 24 4 19 1 6 14 23 11 9 3 7 18 21 12 13 10 8 20 17 2 5 15 16]	10	4	0.060	0.231	1

บทที่ 6

การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบ

ในบทนี้จะนำอัลกอริทึม MOEA/D, BBO และ MOEA/D-BBO ไปทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างในการจัดสมดุสสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน จากนั้นนำผลที่ได้มาประเมินและเปรียบเทียบว่าอัลกอริทึมเหล่านี้ มีสมรรถนะในการหาคำตอบที่สูงหรือต่ำแตกต่างกันอย่างไร โดย ตัวชี้วัดที่นำมาใช้เปรียบเทียบมีจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัว ได้แก่ การเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) การกระจายตัว (Spread) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solutions (Self-Comparison)) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Ratio Of Non-Dominated Solutions (Pareto-Optimum Comparison)) จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (The Number Of Non-Dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time)

6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัย

ปัญหาที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย 7 ปัญหาใหญ่ โดยแต่ละปัญหานั้นแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน (รวมมีปัญหาในการทดลองทั้งสิ้น 21 ปัญหา) ขนาดของปัญหาเมื่อพิจารณาตามจำนวนชิ้นงานรวมของสายการประกอบแบบยูนานจะอยู่ในช่วง 32 ถึง 408 ชิ้นงาน ทั้งนี้ ข้อมูลของปัญหาทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของปัญหาที่นำมาศึกษาในงานวิจัย

N o .	Line1			Line2			รอบ เวลาการ ผลิตรวม	ลำดับ ก่อนหลัง ของชิ้นงาน	เวลา ชิ้นงาน
	Problem	M	MPS	Problem	M	MPS			
1	Mitchell (Mitchell, 1957)	3	2:1:2	Jackson (Jackson, 1956)	2	3:1	30	ตาราง ก.1 และ ก.2	ตาราง ก.10
							36		
							42		
2	Mitchell (Mitchell, 1957)	3	2:1:2	Roszige (Rosenberg and Ziegler, 1992)	3	1:2:1	34	ตาราง ก.1 และ ก.3	ตาราง ก.11
							42		
							50		
3	Warnecke (Warnecke, 1971)	2	2:1	Wee-mag (Wee and Magazine, 1981)	3	1:1:1	100	ตาราง ก.4 และ ก.5	ตาราง ก.12
							120		
							144		
4	Wee-mag (Wee and Magazine, 1981)	3	1:1:1	Tonge (Tonge, 1960)	2	3:1	210	ตาราง ก.5 และ ก.6	ตาราง ก.13
							252		
							303		
5	Arcus1 (Arucs, 1965)	3	2:2:1	Arcus2 (Arucs, 1965)	2	1:1	9200	ตาราง ก.7 และ ก.8	ตาราง ก.14
							11040		
							13248		
6	Scholl (Scholl, 1995)	3	3:1:2	Arcus1 (Arucs, 1965)	3	2:2:1	9360	ตาราง ก.9 และ ก.7	ตาราง ก.15
							11232		
							13500		
7	Scholl (Scholl, 1995)	3	3:1:2	Arcus2 (Arucs, 1965)	2	1:1	5400	ตาราง ก.9 และ ก.8	ตาราง ก.16
							6480		
							7776		

หมายเหตุ: M คือ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์, MPS คือ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด, C คือ รอบเวลาการผลิต (วินาที)

6.2 วิธีการทดลองของงานวิจัย

วิธีการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนานมีขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอัลกอริทึมที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาแต่ละโจทย์ปัญหา
2. ทำการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยอัลกอริทึมต่างๆ โดยทำการทดลองหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตลอดกระบวนการทำงานตามจำนวนรอบการทำงานที่กำหนด
3. นำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมมาหาได้ (Obtained Pareto-optimal Solution) ทั้งหมดมารวมกันแล้วจัดอันดับคำตอบด้วยวิธี Non-Dominated Sorting คำตอบ

ที่อยู่ในค่าความแข็งแรงที่ 1 คือคำตอบที่ดีที่สุด จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal Solution)

4. ประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึมทั้ง 6 ตัว และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านต่างๆ

การทดลองในการแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยอัลกอริทึมต่างๆเป็นการทดลองผ่านโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i7-6500U CPU@2.50GHz RAM 8.00 GB

6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในอัลกอริทึม

ในการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างแต่ละปัญหาที่แตกต่างกันนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาก็แตกต่างกัน เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหานั้นๆ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละโจทย์ปัญหา ทั้งนี้บางปัญหาที่นำมาเป็นปัญหาจากงานวิจัยก่อนหน้าการกำหนดค่าพารามิเตอร์บางตัวจะอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา และบางส่วนจากการทดลอง

6.3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองสำหรับอัลกอริทึมต่างๆ

6.3.1.1 พารามิเตอร์สำหรับทุกอัลกอริทึม

พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ จะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ค่าเดียวกันทั้งหมดในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบด้วยอัลกอริทึมต่างๆ

1) จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population)

จำนวนประชากรเบื้องต้นที่ใช้ในการทดลอง หมายถึง จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน โดยในงานวิจัยทั่วไปจะกำหนดจำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang et al., 2008) แต่สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D จำนวนของประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนของวัตถุประสงค์และสัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งคำนวณได้จาก ฟังก์ชันซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งงานวิจัยนี้มีจำนวนวัตถุประสงค์เท่ากับ 4 วัตถุประสงค์ เมื่อทำการคำนวณจำนวนของประชากรที่ใกล้เคียงกับ 100 นั้น คือ 120 ดังนั้นจำนวนของประชากรในงานวิจัยนี้จะใช้ 120 ประชากร ในทุกๆอัลกอริทึม เพื่อให้จำนวนประชากรเป็นค่าเดียวกัน

2) จำนวนเจเนอเรชัน (Generation Size)

จำนวนเจเนอเรชัน คือ จำนวนรอบของการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนถึงที่สุดกระบวนการในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดจำนวนเจเนอเรชันน้อยเกินไป จะทำให้คำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด และถ้าหากกำหนดจำนวนเจเนอเรชันมากเกินไป จะทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณโดยไม่จำเป็น ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดจำนวนเจเนอเรชันในแต่ละโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดลองไว้ตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 จำนวนเจเนอเรชันของโจทย์ปัญหา

ขนาด โจทย์	No.	Line1		Line2		จำนวน เจเนอเรชัน
		ปัญหา	จำนวนชั้นงาน	ปัญหา	จำนวนชั้นงาน	
เล็ก	1	Mitchell	21	Jackson	11	1500
	2	Mitchell	21	ROSZIEG	25	
กลาง	3	Warnecke	58	Wee-mag	75	2000
	4	Wee-mag	75	Tonge	70	
ใหญ่	5	Arcus1	83	Arcus2	111	2000
	6	Scholl	297	Arcus1	83	
	7	Scholl	297	Arcus2	111	

6.3.1.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D

เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบที่แตกต่างกันจะทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพต่างกัน ดังนั้นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูนาน สำหรับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก จะต้องทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

1) จำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: T)

จำนวนของจุดข้างเคียง จะเป็นตัวกำหนดประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ ซึ่งค่าของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T + 1$ ซึ่งการพัฒนา

คำตอบของ MOEA/D จะพิจารณาเป็นกลุ่มๆ ไปเรื่อยๆ ดังนั้นจำนวนจุดข้างเคียงจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาคำตอบให้ดียิ่งขึ้นไป สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาจำนวนจุดข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 2 ระดับ โดยอ้างอิงการเลือกจาก (Ishibuchi et al., 2013) ได้แก่

- ระดับที่ 1 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 4
- ระดับที่ 2 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9

2) ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อย

ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อยจะเป็นตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าค่าร้อยละมีค่าสูงจะทำให้สตริงคำตอบในประชากรย่อยมีโอกาสเป็นสตริงเดียวกันทั้งหมดไวขึ้น ซึ่งถ้าเป็นตามที่กล่าวมาจะส่งผลให้ไม่เกิดการพัฒนาคำตอบอีก ดังนั้นจึงนำค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อยมาเป็นปัจจัยในการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับแต่ละโจทย์ปัญหา โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 10
- ระดับที่ 2 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 30
- ระดับที่ 3 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 50

6.3.1.3 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม BBO

สำหรับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ BBO พารามิเตอร์ที่จะต้องทำการทดสอบหาค่าที่เหมาะสม คือ

1) ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน

ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเพื่อปรับปรุงสตริงคำตอบจะทำให้สตริงคำตอบที่ดีถูกปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นไปอีก สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.1
- ระดับที่ 2 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2
- ระดับที่ 3 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.3

2) รูปแบบการอพยพ

การอพยพมีอยู่หลายรูปแบบแตกต่างกันออกไป แต่ในงานวิจัยนี้จะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal ซึ่งจากการทดลอง(Ma, 2010) พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสูงที่สุด

6.3.1.4 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

สำหรับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนกประยุทธ์รวมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ จะต้องทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

1) จำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: T)

จำนวนของจุดข้างเคียง จะเป็นตัวกำหนดประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่สนใจ ซึ่งค่าของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T + 1$ สำหรับงานวิจัยนี้ จะทำการพิจารณาจำนวนของจุดข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 2 ระดับ ได้แก่ โดยอ้างอิงการเลือกจาก (Ishibuchi et al., 2013)

- ระดับที่ 1 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 4
- ระดับที่ 2 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9

2) ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อย

ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงในกลุ่มประชากรย่อยจะเป็นตัวกำหนดจำนวนจุดข้างเคียงที่จะนำมาเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาคำตอบในบริเวณใกล้เคียง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 10
- ระดับที่ 2 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 30
- ระดับที่ 3 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 50

3) ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน

ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเป็นตัวกำหนดการปรับปรุงสตริงคำตอบที่พัฒนาดีแล้วให้ดียิ่งขึ้นไปอีก โดยมีระดับปัจจัยในการทดลองทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.1
- ระดับที่ 2 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2
- ระดับที่ 3 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.3

4) รูปแบบการอพยพ

สำหรับงานวิจัยนี้จะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal ซึ่งจากการทดลองของ (Ma, 2010) พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสูงที่สุด

6.3.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น จะทำการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำตัวชี้วัดสมรรถนะในด้าน การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) และการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) มาเป็นตัวแปรตอบสนองกับระดับปัจจัยที่กำหนดข้างต้น เนื่องจากตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวชี้วัดหลักที่สำคัญในการประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้นั้นเป็นกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริงมากเพียงใด และตัวชี้วัดที่สำคัญรองลงมาคือ การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

6.3.2.1 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

โดยจะทำการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design
- 2) ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ
- 3) คำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมดในทุกุระดับปัจจัย เพื่อใช้เป็นค่าตัวแปรตอบสนอง
- 4) พิจารณาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ ด้วยโปรแกรม Minitab 17
- 5) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

6.3.2.2 รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบ

จากการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design และจำนวนพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน จะได้จำนวนทรีทเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองและแต่ละอัลกอริทึมดังนี้

- 1) อัลกอริทึม MOEA/D

สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D มีจำนวนพารามิเตอร์ หรือปัจจัย 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 2 ระดับ และ 3 ระดับ และมีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นในแต่ละปัญหาจะทำการทดลอง เท่ากับ $2 \times 3 \times 3 = 18$ การทดลอง ตามตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D

ปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนจุดข้างเคียง	2	4
		9
2. ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	3	10
		30
		50

2) อัลกอริทึม BBO

สำหรับอัลกอริทึม BBO มีจำนวนพารามิเตอร์ หรือปัจจัย 1 ปัจจัย 3 ระดับ และมีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นในแต่ละปัญหาจะทำการทดลอง เท่ากับ $3 \times 3 = 9$ การทดลอง ตามตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม BBO

ปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ระดับปัจจัย
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	3	0.1
		0.2
		0.3

3) อัลกอริทึม MOEA/D-BBO

สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีจำนวนพารามิเตอร์ หรือปัจจัย 3 ปัจจัย 1 ปัจจัยมี 2 ระดับ และอีก 2 ปัจจัยมี 3 ระดับ และมีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นในแต่ละปัญหาจะทำการทดลอง เท่ากับ $2 \times 3 \times 3 \times 3 = 54$ การทดลอง ตามตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

ปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนจุดข้างเคียง	2	4
		9
2. ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	3	10
		30
		50
3. ความน่าจะเป็นในการมิวเทชัน	3	0.1
		0.2
		0.3

6.3.2.3 โจทย์ปัญหาที่นำมาทดสอบพารามิเตอร์

ปัญหาที่ใช้ทดลองในการทดสอบพารามิเตอร์มีปัญหการทดลองทั้งหมด 7 ปัญหา โดยรอบเวลาการผลิตที่เลือกมาทำการทดสอบเป็นค่ากลางของโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 โจทย์ปัญหาสำหรับทดสอบพารามิเตอร์

ขนาด โจทย์	No.	Line1			Line2			จำนวน ชิ้นงาน รวม	รอบเวลา การผลิต รวม
		ปัญหา	จำนวนชิ้นงาน	MPS	ปัญหา	จำนวนชิ้นงาน	MPS		
เล็ก	1	Mitchell	21	2:1:2	Jackson	11	3:1	32	36
	2	Mitchell	21	2:1:2	ROSZIEG	25	1:2:1	46	42
กลาง	3	Warnecke	58	2:1	Wee-mag	75	1:1:1	133	120
	4	Wee-mag	75	2:1	Tonge	70	1:1:1	145	252
ใหญ่	5	Arcus1	83	2:2:1	Arcus2	111	1:1	194	11040
	6	Scholl	297	3:1:2	Arcus1	83	2:2:1	380	11232
	7	Scholl	297	3:1:2	Arcus2	111	1:1	408	6480

6.3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์และสรุปผลการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีขั้นตอนการพิจารณาดังนี้

1) ทำการวิเคราะห์ผลจากตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนองอันดับแรก ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดคือค่าที่เข้าใกล้ 0 มากที่สุด ซึ่งหมายความว่า กลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับของปัจจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง โดยมีการพิจารณาดังนี้

- วิเคราะห์ ANOVA เพื่อหาว่าปัจจัยใดบ้าง มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ค่า p-value น้อยกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$) ถ้ามีให้ดำเนินการวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป ถ้าไม่มีให้ไปทำการวิเคราะห์ผลจากตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบในลำดับถัดไป

- วิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยจากกราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect) หรือ กราฟอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) เพื่อเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าดีที่สุด ถ้าปัจจัยนั้นมีเพียง 2 ระดับ แต่ถ้ามีมากกว่า 2 ระดับจะทำการวิเคราะห์คู่ลำดับ (Mean Comparisons) ร่วมด้วย เพื่อหาว่าระดับของปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่แตกต่างจากระดับปัจจัยอื่นๆ โดยถ้ามีเพียงระดับเดียว จะกำหนดให้ระดับปัจจัยนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม ถ้ามีหลายระดับหรือยังไม่สามารถระบุค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้ชัดเจน จะนำปัจจัยนั้นไปทำการวิเคราะห์ต่อในข้อ 2

2) ทำการวิเคราะห์ผลจากตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบเป็นตัวแปรตอบสนอง โดยค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดคือค่าที่เข้าใกล้ 0 มากที่สุด ซึ่งหมายความว่า กลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองมีการกระจายสม่ำเสมอโดยจะวิเคราะห์ผลเช่นเดียวกับในขั้นตอนแรก

3) ถ้าทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ของตัวแปรตอบสนองใน 2 ขั้นตอนแรกแล้ว ยังไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยหรือค่าพารามิเตอร์ได้ ให้ทำการหาค่าพารามิเตอร์จากฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab เพื่อกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้มีค่าดีที่สุด

6.3.2.5 ตัวอย่างการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

1) อัลกอริทึม MOEA/D

ตัวอย่างในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D นี้ เป็นตัวอย่างของโจทย์ขนาดเล็ก โดยมีชิ้นงานจำนวน 32 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิตรวม เท่ากับ 36 หน่วยเวลา และจำนวนรอบในการทดสอบ 1500 รอบ โดยค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ

จำนวนจุดข้างเคียง	ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	การทำซ้ำ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	
			Convergence	Spread
4	10	1	0.037270	0.85752
		2	0.088807	0.84234
		3	0.108550	0.89033
	30	1	0.200180	0.84822
		2	0.043976	0.91496
		3	0.063861	0.87765
	50	1	0.141670	0.79480
		2	0.045966	0.97561
		3	0.049847	0.93742
9	10	1	0.016979	0.94799
		2	0.024165	0.80218
		3	0.060604	0.92844
	30	1	0.134000	0.88117
		2	0.070892	0.89773
		3	0.039088	0.97176
	50	1	0.128830	0.76026
		2	0.154820	0.92387
		3	0.135510	0.87626

จากนั้นนำค่าที่ได้ในตารางที่ 6.7 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับ โจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้าน การ ลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) แสดงดังรูปที่ 6.1

General Factorial Regression: Convergence versus Neighborhood, %Replace

Factor Information

Factor	Levels	Values
Neighborhood	2	4, 9
%Replace	3	10, 30, 50

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0.018017	0.003603	1.48	0.266
Linear	3	0.008903	0.002968	1.22	0.344
Neighborhood	1	0.000013	0.000013	0.01	0.943
%Replace	2	0.008890	0.004445	1.83	0.203
2-Way Interactions	2	0.009114	0.004557	1.88	0.196
Neighborhood*%Replace	2	0.009114	0.004557	1.88	0.196
Error	12	0.029163	0.002430		
Total	17	0.047180			

รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้าน Convergence ในปัญหา 32 ชั้นงาน

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยรวม มีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างจำนวนจุดข้างเคียง และค่าร้อยละในการสุ่มจุด ข้างเคียง ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ณ ระดับ นัยสำคัญ 0.05 จึงทำการพิจารณาที่ตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่ม คำตอบต่อไป ได้ดังรูปที่ 6.2

General Factorial Regression: Spread versus Neighborhood, %Replace

Factor Information

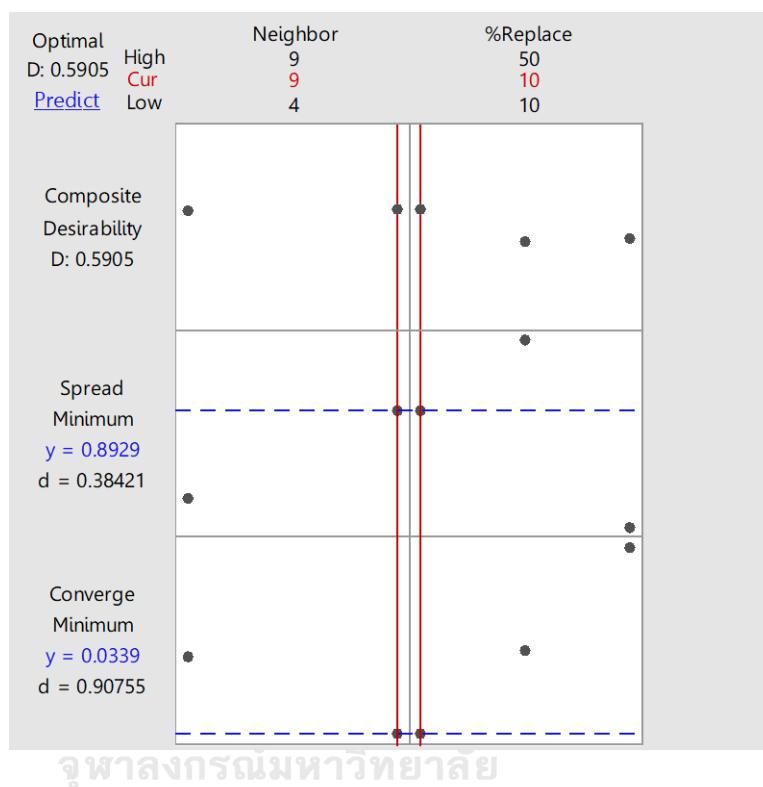
Factor	Levels	Values
Neighborhood	2	4, 9
%Replace	3	10, 30, 50

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0.008617	0.001723	0.39	0.846
Linear	3	0.001824	0.000608	0.14	0.936
Neighborhood	1	0.000143	0.000143	0.03	0.860
%Replace	2	0.001680	0.000840	0.19	0.829
2-Way Interactions	2	0.006793	0.003397	0.77	0.485
Neighborhood*%Replace	2	0.006793	0.003397	0.77	0.485
Error	12	0.052950	0.004413		
Total	17	0.061567			

รูปที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้าน Spread ในปัญหา 32 ชั้นงาน

จากรูปที่ 6.2 ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างจำนวนจุดข้างเคียง และค่าร้อยละในการสุ่มจุดข้างเคียง ไม่มีอิทธิพล ต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้น จึงทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยร่วมทั้งสอง ด้วยวิธี Response Optimizer ได้ดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยร่วมทั้งสอง ด้วยวิธี Response Optimizer

จากรูปที่ 6.3 จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโจทย์ปัญหานี้ที่ทำให้ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง และด้านการกระจายตัวมีค่าน้อยที่สุด คือ จำนวนจุดข้างเคียง เท่ากับ 9 และค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ ร้อยละ 10

2) อัลกอริทึม BBO

ตัวอย่างในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึม BBO นี้ เป็นตัวอย่างของโจทย์ขนาดกลาง โดยมีชิ้นงานจำนวน 145 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต

รวม เท่ากับ 252 หน่วยเวลา และจำนวนรอบในการทดสอบ 2000 รอบ โดยค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ

ค่าความน่าจะเป็นในการมีวเตชัน	การทำซ้ำ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	
		Convergence	Spread
0.1	1	0.000000	0.98966
	2	0.035027	0.59546
	3	0.107670	0.85085
0.2	1	0.093954	0.81225
	2	0.214300	0.86357
	3	0.123370	0.89442
0.3	1	0.156540	0.72588
	2	0.054975	0.98623
	3	0.018833	0.84633

จากนั้นนำค่าที่ได้ในตารางที่ 6.8 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้าน การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่แท้จริง (Convergence) แสดงดังรูปที่ 6.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

One-way ANOVA: Convergence versus Pm

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis At least one mean is different
Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Pm	3	0.1, 0.2, 0.3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pm	2	0.01463	0.007315	1.82	0.241
Error	6	0.02410	0.004017		
Total	8	0.03873			

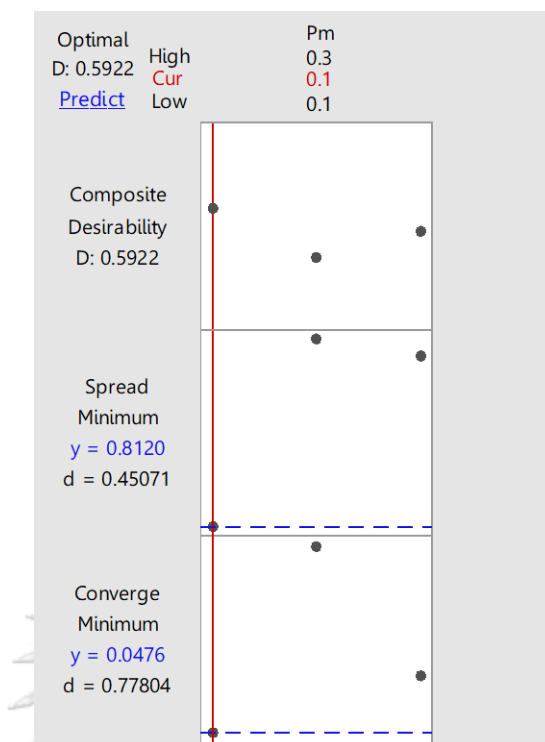
รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวชี้วัดด้าน Convergence ในปัญหา 145 ชิ้นงาน

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของ P_m มีค่าเท่ากับ 0.241 ซึ่งมากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ค่าความน่าจะเป็นในการมีเวตชันไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงทำการพิจารณาที่ตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบต่อไป ได้ดังรูปที่ 6.5

One-way ANOVA: Spread versus Pm						
Method						
Null hypothesis	All means are equal					
Alternative hypothesis	At least one mean is different					
Significance level	$\alpha = 0.05$					
Equal variances were assumed for the analysis.						
Factor Information						
Factor	Levels	Values				
Pm	3	0.1, 0.2, 0.3				
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Pm	2	0.003685	0.001843	0.09	0.911	
Error	6	0.117362	0.019560			
Total	8	0.121047				

รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของตัวชี้วัดด้าน Spread ในปัญหา 145 ชั้นงาน

จากรูปที่ 6.5 ค่า P-Value ของ P_m มีค่าเท่ากับ 0.911 ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ค่าความน่าจะเป็นในการมีเวตชัน ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงทำการหาค่าความน่าจะเป็นในการมีเวตชันที่เหมาะสมกับโจทย์ปัญหานี้ ด้วยวิธี Response Optimizer ได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ด้วยวิธี

Response Optimizer

จากรูปที่ 6.6 ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโจทย์ปัญหานี้ คือ 0.1 ที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง และการกระจายของคำตอบมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นจึงกำหนดค่านี้เป็นค่าของพารามิเตอร์ ในการแก้ปัญหาของอัลกอริทึม BBO

3) อัลกอริทึม MOEA/D-BBO

ตัวอย่างในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO นี้ เป็นตัวอย่างของโจทย์ขนาดเล็ก โดยมีชิ้นงานจำนวน 32 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิตรวม เท่ากับ 36 หน่วยเวลา และจำนวนรอบในการทดสอบ 1500 รอบ โดยค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ

จำนวนจุด ข้างเคียง	ค่าร้อยละในการ กำหนดจำนวนครั้งใน การสุ่มจุดข้างเคียง	ค่าความน่าจะเป็นในการ มีเวตชัน	การ ทำซ้ำ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	
				Convergence	Spread
4	10	0.1	1	0.13285	0.87100
			2	0.15274	0.66354
			3	0.31609	1.08610
		0.2	1	0.18319	0.84527
			2	0.15213	0.70401
			3	0.19327	1.03070
		0.3	1	0.10438	0.79115
			2	0.31589	0.69321
			3	0.26813	0.96538
	30	0.1	1	0.45733	0.96565
			2	0.17894	0.84952
			3	0.17273	0.83143
		0.2	1	0.17267	0.92588
			2	0.16239	0.86356
			3	0.31602	0.83265
		0.3	1	0.35723	0.82944
			2	0.33595	0.84949
			3	0.21889	0.96981
	50	0.1	1	0.23937	0.67100
			2	0.18505	0.76204
			3	0.33694	0.68756
		0.2	1	0.24126	0.86718
			2	0.16868	0.86438
			3	0.09406	0.89727
0.3		1	0.13128	0.86099	
		2	0.29976	0.77674	
		3	0.26264	0.83955	

ตารางที่ 6.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ (ต่อ)

จำนวนจุด ข้างเคียง	ค่าร้อยละในการ กำหนดจำนวนครั้งใน การสุ่มจุดข้างเคียง	ค่าความ น่าจะเป็นใน การมีวเตชัน	การ ทำซ้ำ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	
				Convergence	Spread
9	10	0.1	1	0.38399	0.94822
			2	0.40692	1.02420
			3	0.26992	0.62627
		0.2	1	0.39414	0.69756
			2	0.35727	0.80043
			3	0.13414	0.91864
		0.3	1	0.17902	0.98983
			2	0.22254	0.97049
			3	0.38224	0.92398
	30	0.1	1	0.11981	0.85536
			2	0.03180	0.83406
			3	0.38643	0.64710
		0.2	1	0.09708	0.95554
			2	0.12713	0.96869
			3	0.08030	0.70608
		0.3	1	0.06513	0.83982
			2	0.26964	0.83165
			3	0.32110	1.14800
	50	0.1	1	0.25884	0.69360
			2	0.04873	0.81919
			3	0.31951	0.82469
		0.2	1	0.13059	1.05360
			2	0.17279	0.84938
			3	0.15608	0.93916
0.3		1	0.19028	0.88045	
		2	0.33324	0.84289	
		3	0.10611	0.83329	

จากนั้นนำค่าที่ได้ในตารางที่ 6.9 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้าน การลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) แสดงดังรูปที่ 6.7

General Factorial Regression: Convergence versus Neighborhood, %Replace, Pm

Factor Information

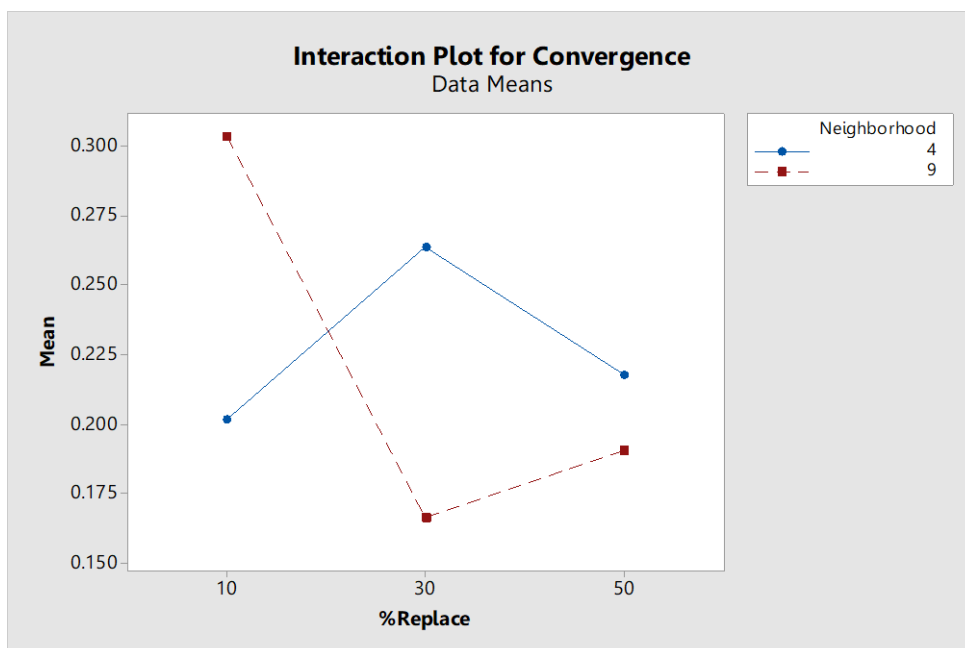
Factor	Levels	Values
Neighborhood	2	4, 9
%Replace	3	10, 30, 50
Pm	3	0.1, 0.2, 0.3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	0.183612	0.010801	0.95	0.529
Linear	5	0.064814	0.012963	1.14	0.358
Neighborhood	1	0.000779	0.000779	0.07	0.795
%Replace	2	0.023361	0.011680	1.03	0.369
Pm	2	0.040675	0.020337	1.79	0.182
2-Way Interactions	8	0.107796	0.013475	1.18	0.336
Neighborhood*%Replace	2	0.091069	0.045535	4.00	0.027
Neighborhood*Pm	2	0.002256	0.001128	0.10	0.906
%Replace*Pm	4	0.014471	0.003618	0.32	0.864
3-Way Interactions	4	0.011002	0.002750	0.24	0.913
Neighborhood*%Replace*Pm	4	0.011002	0.002750	0.24	0.913
Error	36	0.409696	0.011380		
Total	53	0.593308			

รูปที่ 6.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO กับตัวแปรตอบสนองด้าน Convergence ในปัญหา 32 ชั้นงาน

จากรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วมระหว่าง Neighborhood กับ %Replace เท่ากับ 0.027 ซึ่งน้อยกว่าที่ ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่าง จำนวนจุดข้างเคียง และค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียงมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้าน การลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงพิจารณาที่กราฟ Interaction Plot ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Plot) Neighborhood กับ %Replace ของตัวชี้วัดด้าน Convergence

จากรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่ากราฟของปัจจัยร่วม Neighborhood*%Replace มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction Effect) แต่เนื่องจากระดับของปัจจัยมากกว่า 2 ระดับ จึงไม่สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ชัดเจนจึงทำการวิเคราะห์คู่ลำดับ (Mean Comparisons) ร่วมด้วย ดังรูปที่ 6.9

Comparisons for Convergence

Tukey Pairwise Comparisons: Response = Convergence, Term = Neighborhood*%Replace

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Neighborhood*	%Replace	N	Mean	Grouping
9	10	9	0.303353	A
4	30	9	0.263572	A
4	50	9	0.217672	A
4	10	9	0.202074	A
9	50	9	0.190685	A
9	30	9	0.166489	A

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบคู่ลำดับระหว่างปัจจัย Neighborhood กับ %Replace ของตัวชี้วัดด้าน Convergence ของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ขนาดปัญหา 32 ชั้นงาน

จากรูปที่ 6.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบคู่ลำดับระหว่างปัจจัย Neighborhood กับ %Replace แล้ว ไม่มีระดับปัจจัยใดเลยที่แตกต่างอย่างชัดเจนที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองน้อยที่สุด ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยใช้ตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบเป็นลำดับถัดไป ดังรูปที่ 6.10

General Factorial Regression: Spread versus Neighborhood, %Replace, Pm

Factor Information

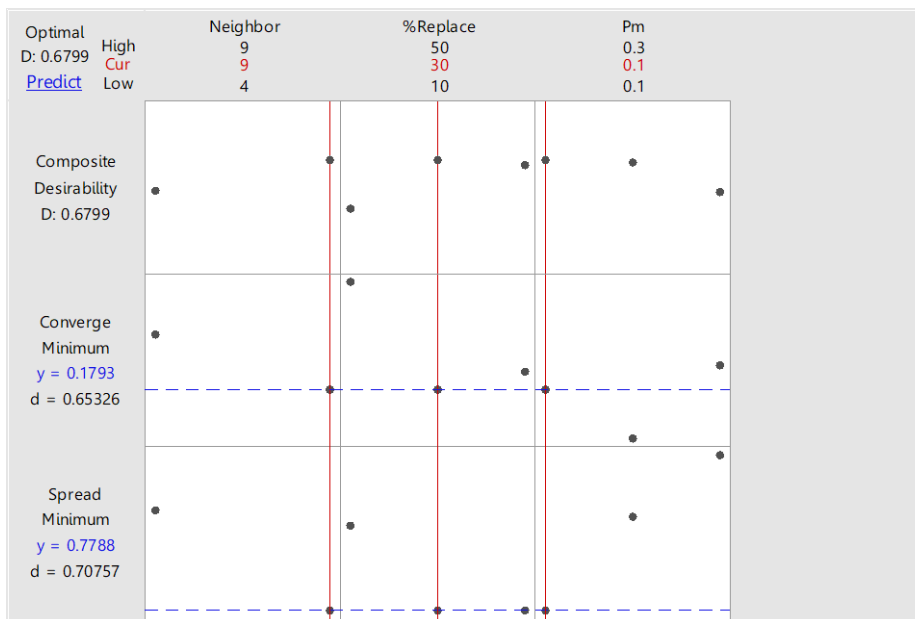
Factor	Levels	Values
Neighborhood	2	4, 9
%Replace	3	10, 30, 50
Pm	3	0.1, 0.2, 0.3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	0.205880	0.012111	0.87	0.610
Linear	5	0.070907	0.014181	1.02	0.421
Neighborhood	1	0.007296	0.007296	0.52	0.474
%Replace	2	0.016981	0.008490	0.61	0.549
Pm	2	0.046630	0.023315	1.67	0.202
2-Way Interactions	8	0.100106	0.012513	0.90	0.528
Neighborhood*%Replace	2	0.011535	0.005768	0.41	0.664
Neighborhood*Pm	2	0.019670	0.009835	0.71	0.500
%Replace*Pm	4	0.068901	0.017225	1.24	0.312
3-Way Interactions	4	0.034867	0.008717	0.63	0.647
Neighborhood*%Replace*Pm	4	0.034867	0.008717	0.63	0.647
Error	36	0.501142	0.013921		
Total	53	0.707023			

รูปที่ 6.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO กับตัวแปรตอบสนองด้าน Spread ในปัญหา 32 ชั้นงาน

จากรูปที่ 6.10 จะเห็นได้ว่าไม่มีปัจจัยใดเลยที่ ค่า P-Value น้อยกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นระดับของปัจจัย จึงไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของคำตอบ จึงทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ ด้วยวิธี Response Optimizer ได้ดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ด้วยวิธี Response Optimizer

จากรูปที่ 6.11 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ในการแก้โจทย์ปัญหานี้ คือ จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9 ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 30 และค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.1 ดังนั้นจึงกำหนดค่าดังกล่าวเป็นค่าของพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

6.3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง

จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาแต่ละโจทย์ปัญหาและสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D, BBO และ MOEA/D-BBO แสดงดังตารางที่ 6.10, 6.11 และ 6.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.10 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	(ณัฐชัย โยธาบริวาร, 2556)
รูปแบบการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation	(Kim et al., 1996)
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	โจทย์เล็ก , โจทย์กลาง และ โจทย์ใหญ่ $P_m = 0.1$	การทดลอง

ตารางที่ 6.11 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม MOEA/D

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
รูปแบบการสลับสายพันธุ	One Point Cross-over	-
จำนวนจุดข้างเคียง	โหนดเล็ก $T = 9$ โหนดกลาง $T = 9$ โหนดใหญ่ $T = 4$	การทดลอง
ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	โหนดเล็ก $\%Replace = 10$ โหนดกลาง $\%Replace = 50$ โหนดใหญ่ $\%Replace = 30$	การทดลอง

ตารางที่ 6.12 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึม MOEA/D-BBO

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิงจาก
รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal	(ณัฐชัย โยธาบริวาร, 2556)
รูปแบบการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation	(Kim et al., 1996)
จำนวนจุดข้างเคียง	โหนดเล็ก $T = 9$ โหนดกลาง $T = 9$ โหนดใหญ่ $T = 9$	การทดลอง
ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	โหนดเล็ก $\%Replace = 30$ โหนดกลาง $\%Replace = 50$ โหนดใหญ่ $\%Replace = 10$	การทดลอง
ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	โหนดเล็ก $P_m = 0.2$ โหนดกลาง $P_m = 0.1$ โหนดใหญ่ $P_m = 0.1$	การทดลอง

6.4 ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึม

ในการทดลองการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะยูขานานที่มีขนาดชิ้นงานต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น โดยการทำให้ค่าร้อยละ 3 รอบนั้น เมื่อได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว จะนำคำตอบทั้งหมดของทั้ง 3 อัลกอริทึมมาทำการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะด้านต่างๆ โดยจัดอันดับคำตอบร่วมกันด้วยวิธี Non-Dominated Sorting โดยนำคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มากำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการ

ประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมอื่นๆ โดยในส่วนนี้จะแสดงผลการทดลองและการวิเคราะห์ของโจทย์ปัญหาชุดที่ 1 ขนาด 32 ชิ้นงาน ส่วนอีก 6 โจทย์ปัญหาใหญ่ที่เหลือผลการทดลองด้านค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ และตัวชี้วัดสมรรถนะด้านต่างๆแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

6.4.1 ผลการทดลองการแก้โจทย์ปัญหา

ปัญหาชุดที่ 1 นี้ มีจำนวนชิ้นงาน 32 ชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้ สายการประกอบที่ 1 ประกอบผลิตภัณฑ์ A จำนวน 3 รุ่น สัดส่วนการผลิต 2:1:2 จำนวนชิ้นงาน 21 ชิ้นงาน และสายการประกอบที่ 2 ประกอบผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 รุ่น สัดส่วนการผลิต 3:1 จำนวนชิ้นงาน 11 ชิ้นงาน โดยมีรอบเวลาการผลิต 3 ชุด คือ

6.4.1.1 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 30 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการค้นหาคำตอบของทั้ง 3 อัลกอริทึมที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วนั้น โดยแสดงเฉพาะค่าน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แต่ละอัลกอริทึมหาได้ ตามตารางที่ 6.13 และคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.14 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

ตารางที่ 6.13 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	12	4	0.0273	0.3684
	2	12	4	0.0274	0.4286
	3	12	4	0.0266	0.3500
MOEA/D	1	11	4	0.0009	0.2353
	2	11	4	0.0012	0.2778
	3	11	4	0.0018	0.2353
MOEA/D-BBO	1	11	4	0.0015	0.2353
	2	11	4	0.0025	0.2353
	3	11	4	0.0026	0.2353

ตารางที่ 6.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.8556	0.8475	0	0	2	0.8880
MOEA/D	0.1853	0.7129	0.2173	0.2	23	4.4360
MOEA/D-BBO	0.1421	0.5589	0.2986	0.2267	24	7.7385

จากตารางที่ 6.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ BBO ตามลำดับ และจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ MOEA/D-BBO สามารถหาได้เทียบเท่าอัลกอริทึม MOEA/D แต่ในด้านเวลาในการค้นหาคำตอบ อัลกอริทึม MOEA/D จะใช้เวลามากที่สุด

6.4.1.2 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 36 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการค้นหาคำตอบของทั้ง 3 อัลกอริทึมที่กำหนด ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วนั้น โดยแสดงเฉพาะค่าน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอัลกอริทึมหาได้ ตามตารางที่ 6.15 และคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.16 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

ตารางที่ 6.15 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	11	4	0.0337	0.3529
	2	11	4	0.3529	0.0399
	3	11	4	0.0437	0.3125
MOEA/D	1	10	4	0.0063	0.3125
	2	10	4	0.0067	0.3125
	3	10	4	0.0061	0.3125

ตารางที่ 6.15 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D-BBO	1	10	4	0.0018	0.2667
	2	10	4	0.0030	0.2667
	3	10	4	0.0016	0.2143

ตารางที่ 6.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัด	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
	สมรรถนะ						
BBO		1.1823	0.9677	0	0	2	1.0717
MOEA/D		0.3433	0.9585	0	0	7	6.4853
MOEA/D-BBO		0.1377	0.8752	0.3783	0.3333	12	8.6683

จากตารางที่ 6.16 ตัวชี้วัดสมรรถนะทุกๆด้านยกเว้นด้านเวลาในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ BBO ถึงแม้ว่า MOEA/D-BBO จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานที่สุดแต่คำตอบที่ได้นั้นสำหรับการแก้ปัญหาถือว่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงเกือบทั้งหมด ในขณะที่ MOEA/D และ BBO ไม่มีคำตอบที่อยู่ในคำตอบที่แท้จริงเลย

6.4.1.3 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 42 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุด ที่ได้จากการค้นหาคำตอบของทั้ง 3 อัลกอริทึมที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วนั้น โดยแสดงเฉพาะค่าน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละอัลกอริทึมหาได้ ตามตารางที่ 6.17 และคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.18 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

ตารางที่ 6.17 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	8	3	0.0054	0.5
	2	8	3	0.0132	0.5
	3	8	3	0.0132	0.5
MOEA/D	1	8	3	0.0053	0.4000
	2	8	3	0.0053	0.4000
	3	8	3	0.0029	0.4118
MOEA/D-BBO	1	8	3	0.0004	0.3571
	2	8	3	0.0008	0.3333
	3	8	3	0.0016	0.3333

ตารางที่ 6.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.9165	NaN	0.3333	0.0278	1	0.9186
MOEA/D	0.4107	0.9010	0.0417	0.0278	8	6.8516	
MOEA/D-BBO	0.1834	0.8375	0.4167	0.3333	10	10.0683	

NaN : ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีเพียงคำตอบเดียว

จากตารางที่ 6.18 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงด้านการกระจายตัว อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีที่สุด รวมถึงมีจำนวนคำตอบที่หาได้ถึง 10 คำตอบแม้จะเป็นโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก แต่ด้านเวลาในการค้นหาคำตอบใช้เวลานานกว่าอัลกอริทึมอื่น ส่วนอัลกอริทึม MOEA/D นั้น ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ดีกว่า BBO

ถึงแม้ว่า อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} จะมีสมรรถนะต่ำกว่า คือมีจำนวนคำตอบของ อัลกอริทึมอยู่ในคำตอบที่แท้จริงน้อย แต่คำตอบที่ MOEA/D หาได้ทั้งหมดนั้น ก็เข้าใกล้กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากกว่า

6.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองโดยนำอัลกอริทึม 3 อัลกอริทึม คือ BBO, MOEA/D และ MOEA/D-BBO มา แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูชานาน สำหรับโจทย์ปัญหา ตัวอย่าง 7 ปัญหาใหญ่ 21 ปัญหาย่อย สรุปผลได้ดังตารางที่ 6.55 อัลกอริทึม MOEA/D-BBO สามารถ หาจำนวนสถานีนงาน ได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับอัลกอริทึม BBO และ MOEA/D และยังเท่ากับจำนวน สถานีนงานขั้นต่ำที่เป็นไปได้ในทุกโจทย์ปัญหา ขณะเดียวกันจำนวนสถานีนงานที่ได้มีค่าน้อยที่สุดในทุกโจทย์ ปัญหาเช่นเดียวกัน และในตารางที่ 6.56 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า MOEA/D-BBO มีสมรรถนะใน ด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง เหนือกว่าอัลกอริทึม BBO และ MOEA/D ในทุก ปัญหา ขณะที่ตัวชี้วัดด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบนั้น อัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะ ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ คือ ปัญหาที่ 6 จำนวน 380 ชั้นงาน และ ปัญหาที่ 7 จำนวน 408 ชั้นงาน BBO มีสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่ม คำตอบดีกว่า ทั้งนี้สำหรับปัญหาที่มีขนาดใหญ่สมรรถนะด้านการกระจายของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO ไม่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจนนั้น เนื่องจากการแบ่งจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักของ อัลกอริทึม MOEA/D-BBO อาจจะน้อยไปสำหรับการแก้ปัญหานี้ และจำนวนรอบในการค้นหา คำตอบอาจจะไม่เพียงพอ ทำให้มีการกระจายตัวของคำตอบน้อย

ในด้านตัวชี้วัดสมรรถนะอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ เปรียบเทียบระหว่างจำนวน คำตอบของอัลกอริทึมที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดของตัวเอง (R_{NDS1}) และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ เปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบของ อัลกอริทึมที่ดีที่สุดที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง เทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (R_{NDS2}) อัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะเหนือกว่าอัลกอริทึม BBO และ MOEA/D อย่างชัดเจน ในทุก โจทย์ปัญหา

ตัวชี้วัดด้านจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (NNDS) สำหรับโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก อัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจน ส่วนโจทย์ปัญหาขนาดกลาง คือปัญหาที่ 3 จำนวน 133 ชั้นงาน และปัญหาที่ 4 จำนวน 145 ชั้นงาน MOEA/D-BBO มีสมรรถนะ

ดีที่สุด ในขณะที่ MOEA/D และ BBO สามารถหา จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ ได้ใกล้เคียงกัน สำหรับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ ทั้ง 3 อัลกอริทึมมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน เพราะทั้ง 3 อัลกอริทึมนี้ สามารถหาจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำได้มากที่สุดแตกต่างกันไปขึ้นกับรอบเวลาการผลิตที่กำหนด โดยอัลกอริทึม MOEA/D-BBO หาจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำได้มากที่สุด ในโจทย์ปัญหาที่ 5 จำนวน 194 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 9200 หน่วยเวลา โจทย์ปัญหาที่ 6 จำนวน 380 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 9360 และ 13500 หน่วยเวลา

ในขณะที่ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาในการค้นหาคำตอบนั้น อัลกอริทึม MOEA/D-BBO ใช้เวลามากที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ BBO ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการพัฒนาคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีความซับซ้อน หลายขั้นตอน จึงทำให้ใช้เวลานานกว่าอัลกอริทึมอื่น ซึ่งมากกว่า BBO สำหรับโจทย์เล็ก ประมาณ 10 นาที โจทย์กลางประมาณ 30 นาที และโจทย์ใหญ่ 1 ชม. ซึ่งจากเวลาที่กล่าวไปนั้นไม่มากเกินไปที่จะยอมรับได้ที่จะเลือกใช้อัลกอริทึม MOEA/D-BBO ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาหลายๆขนาดปัญหา ที่ให้สมรรถนะตัวชี้วัดด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบ(ตัวชี้วัดที่สำคัญ) ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจน

ตารางที่ 6.19 สรุปจำนวนสถานีงานและจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	1	2	3	4	5	6	7
Number of Tasks	32	46	133	145	194	380	408
Line 1 (MPS)	21(2:1:2)	21(2:1:2)	58(2:1)	75(1:1:1)	83(2:2:1)	297(3:1:2)	297(3:1:2)
Line 2 (MPS)	11(3:1)	25(1:2:1)	75(1:1:1)	70(3:1)	111(1:1)	83(2:2:1)	111(1:1)
Cycle Time	30 36 42 34 42 50	100 120 144 210 252 303	9200 11040 13248 9360 11232 13500	5400 6480 7776			
workstation							
Optimize	11 9 8 8 9 8 7 26 21 18 36 30 25 30 25 30 21 39 33 27 48 40 33						
BBO	12 11 8 10 8 7 26 22 18 38 31 26 30 25 21 40 33 28 48 40 34						
MOEA/D	11* 10 8 10 8 7 26 22 18 37 31 26 30 25 21 40 33 28 48 40 34						
MOEA/D-BBO	11* 10 8 9* 8 7 26 22 18 37 31 26 30 25 21 40 33 28 48 40 34						
Station							
Optimize	4 4 3 4 3 3 8 7 6 10 9 8 8 9 8 7 11 10 8 13 11 10						
BBO	4 4 3 4 3 3 9 8 6* 11 9 8 9 8 7 12 10 8* 14 12 10						
MOEA/D	4 4 3 4 3 3 9 8 7 11 9 8 9 8 7 12 10 9 14 12 10						
MOEA/D-BBO	4 4 3 4 3 3 9 8 6* 11 9 8 9 8 7 12 10 8* 14 12 10						

ตารางที่ 6.20 สรุปผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	1	2	3	4	5	6	7			
Number of Tasks	32	46	133	145	194	380	408			
Line 1 (MPS)	21(2:1:2)	21(2:1:2)	58(2:1)	75(1:1:1)	83(2:2:1)	297(3:1:2)	297(3:1:2)			
Line 2 (MPS)	11(3:1)	25(1:2:1)	75(1:1:1)	70(3:1)	111(1:1)	83(2:2:1)	111(1:1)			
Cycle Time	30 36 42	34 42 50	100 120 144	210 252 303	9200 11040 13248	9360 11232 13500	5400 6480 7776			
Convergence										
BBO	0.8556 1.1823	0.9165 0.8908	0.9192 0.8982	0.2158 0.1448	0.3271 0.3866	0.3734 0.3895	0.3149 0.4902	0.3340 0.2606	0.5136 0.2629	0.2096 0.3188
MOEA/D	0.1853 0.3403	0.4107 0.3206	0.1813 0.3861	0.1621 0.1458	0.2890 0.2897	0.3673 0.1762	0.2056 0.2680	0.3014 0.2648	0.2708 0.2598	0.2330 0.3031
MOEA/D-BBO	0.1421 0.1372	0.1834 0.1720	0.1308 0.1058	0.0967 0.1890	0.1641 0.2227	0.1697 0.1703	0.2169 0.1343	0.1975 0.2483	0.1479 0.1424	0.2591 0.2591
Spread										
BBO	0.8475 0.9677	NaN NaN	0.7523 0.7708	0.9035 0.9175	0.9515 0.9363	0.8910 0.9478	1.0268 0.8112	0.9016 0.9051	0.8812 0.9051	0.936 0.9636
MOEA/D	0.7129 0.9585	0.901 0.8634	0.7845 0.8649	0.8568 0.9036	0.9223 1.0259	0.9268 0.9567	1.0586 1.0054	0.9157 1.1926	0.9335 0.9862	0.9758 0.9758
MOEA/D-BBO	0.5589 0.8752	0.8375 0.9342	0.7443 0.8478	0.8339 0.8559	0.9943 0.8557	0.9103 0.9280	1.0196 0.9785	1.0033 0.8936	0.9561 0.8964	0.8964 0.8964
RNDS1										
BBO	0 0	0.3333 0.3333	0 0.0322	0.0526 0.1454	0.0247 0.0444	0.0128 0.0444	0.2885 0.1333	0.0698 0.0476	0 0.0378	0 0.042
MOEA/D	0.2173 0	0.0417 0.1023	0.3519 0.0893	0.1817 0.0630	0.0650 0.0455	0.2222 0.1096	0 0.0385	0.1194 0.2064	0.0397 0.1449	0.1163 0.1163
MOEA/D-BBO	0.2986 0.3783	0.4167 0.4657	0.4048 0.5073	0.2645 0.4847	0.3479 0.3543	0.2443 0.5052	0.3898 0.2905	0.4212 0.3815	0.4390 0.3253	0.4140 0.5032
RNDS2										
BBO	0 0	0.0278 0.0175	0.0256 0	0.0194 0.0261	0.0504 0.008	0.0095 0.0111	0.1061 0.0889	0.0484 0.044	0 0.0324	0 0.012
MOEA/D	0.2 0	0.0278 0.0526	0.3077 0.0351	0.0874 0.0327	0.0310 0.0161	0.0222 0.0762	0.0556 0	0.0161 0.0755	0.0922 0.0231	0.0749 0.0723
MOEA/D-BBO	0.2267 0.3333	0.3333 0.3158	0.3077 0.3509	0.2745 0.2519	0.3092 0.2963	0.2476 0.2667	0.2273 0.2444	0.2688 0.2138	0.2411 0.2778	0.2584 0.249
NNDS										
BBO	2 2	1 1	3 51	34 25	9 23	11 23	11 23	30 47	12 63	31 63
MOEA/D	23 7	8 10	9 54	37 47	24 22	31 31	20 20	30 42	21 53	47 51
MOEA/D-BBO	24 12	10 14	13 20	48 52	27 38	24 24	14 14	41 41	34 63	55 37
CPU Time (min)										
BBO	0.888 1.0717	0.9186 1.24	1.1586 1.1633	5.56 4.482	5.6721 6.260	3.137 3.1859	4.8043 4.8043	8.835 8.8494	12.51 8.835	12.432 12.15
MOEA/D	4.436 6.4853	6.8516 6.0784	3.7008 5.1913	21.587 16.771	25.822 19.917	20.249 18.89	35.853 34.344	48.672 40.949	38.859 38.859	38.859 38.859
MOEA/D-BBO	7.7385 8.6683	10.068 13.611	7.3042 7.4107	27.366 26.200	28.823 46.839	41.947 43.886	20.523 40.573	55.677 59.042	54.573 71.975	59.293 62.435

จากการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปผลโดยรวมของงานวิจัยได้ดัง
ตารางที่ 6.21

ตารางที่ 6.21 สรุปผลภาพรวมของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านต่างๆในแต่ละอัลกอริทึม

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	โจทย์ปัญหาขนาดเล็ก			โจทย์ปัญหาขนาดกลาง			โจทย์ปัญหาขนาดใหญ่		
	BBO	MOEA/D	MOEA/D-BBO	BBO	MOEA/D	MOEA/D-BBO	BBO	MOEA/D	MOEA/D-BBO
Convergence			√			√			√
Spread			√			√	-		-
RNDS1			√			√			√
RNDS2			√			√			√
NNDS			√			√	-	-	-
CPU Times	√			√			√		

หมายเหตุ : √ หมายถึง ดีที่สุด

- หมายถึง ดีใกล้เคียงกัน

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย ผลการนำ MOEA/D-BBO มาใช้ในการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยเนื้อหามีดังต่อไปนี้

7.1 บทสรุปงานวิจัย

การแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน เป็นการแก้ปัญหาโดยพิจารณาวัตถุประสงค์ทั้งหมดไปพร้อมๆกัน ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) ดังนั้นในการหาคำตอบที่ดีที่สุด จึงต้องอาศัยฮิวริสติก (Heuristic) มาช่วยในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีที่สุด งานวิจัยนี้จึงนำเสนอ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกประยุกต์รวมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (The Multi-Objective Evolutionary Optimisation Hybridised With The Biogeography-Based Optimisation Algorithm: MOEA/D-BBO) เปรียบเทียบกับ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และ อัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 1 โดยมีวัตถุประสงค์ที่พิจารณา คือ จำนวนสถานีนงานที่น้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด และความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด

7.1.1 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน โดยแต่ละสายการประกอบจะมีผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบมากกว่า 2 รุ่นขึ้นไป และเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกัน ตามอัตราส่วนของรุ่นที่กำหนด ซึ่งปัญหาตัวอย่างที่ใช้ทั้งหมดจำนวน 21 ปัญหา ตามจำนวนชิ้นงานและรอบเวลาการผลิตที่กำหนด โดยมีจำนวนชิ้นงานของสองสายการประกอบรวมกันอยู่ในช่วง 32 ถึง 408 ชิ้นงาน และการจัดสมดุสสายการประกอบนั้นสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ลำดับก่อนหลังของชิ้นงานได้ทั้งจากด้านหน้าไปด้านหลัง และด้านหลังมาด้านหน้า

7.1.2 ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก

การแก้ปัญหาการจัดสมดุสหายการประกอบที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากให้มีประสิทธิภาพที่ดีไปพร้อมกัน เป็นเรื่องยาก เนื่องจากวัตถุประสงค์นั้นอาจมีความขัดแย้งระหว่างกันในการหาค่า น้อยที่สุดหรือค่าที่มากที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์ จึงยากที่จะบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Konak et al., 2006) ดังนั้นงานวิจัยนี้ นำวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) มาใช้ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่มีมากวัตถุประสงค์ คือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับคำตอบ โดยการกำหนดค่าความแข็งแรงนั้น จะใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดที่มีการจัดอันดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ซึ่งคำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front) คือกลุ่มคำตอบที่ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีกว่ากันหรือคำตอบนั้นไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่น (นพพล คำภิรมย์, 2551) ในงานวิจัยนี้เป็น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการหาค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์

7.1.3 อัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัย

อัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์ (BBO) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกประยุกต์ รวมกับอัลกอริทึมการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (MOEA/D-BBO) ซึ่งรายละเอียดทั้งหมด อยู่ในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5 ตามลำดับ และใช้ตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละ อัลกอริทึม 6 ตัวชี้วัด คือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต การกระจายตัวของกลุ่ม คำตอบ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบของอัลกอริทึมที่อยู่ใน จำนวนคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดของตัวเอง อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูก ครอบงำเปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบของอัลกอริทึมที่ดีที่สุดที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง เทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนของกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาในการค้นหา คำตอบ

7.1.4 ผลการนำอัลกอริทึม MOEA/D-BBO มาใช้ในการแก้ปัญหา

จากผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างสำหรับการจัดสมดุสหายการประกอบมาก วัตถุประสงค์บนสหายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูซูนานพบว่า อัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง เหนือกว่าอัลกอริทึม BBO

และ MOEA/D ในทุกโจทย์ปัญหา ด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบนั้น MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ในโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง สำหรับปัญหาขนาดใหญ่บางโจทย์ ปัญหา BBO มีสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบดีกว่า MOEA/D-BBO ในด้านตัวชี้วัดสมรรถนะอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ เปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบของอัลกอริทึมที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดของตัวเอง (RNDS1) และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ เปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบของอัลกอริทึมที่ดีที่สุดที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง เทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) อัลกอริทึม MOEA/D-BBO มีสมรรถนะเหนือกว่าอัลกอริทึม BBO และ MOEA/D อย่างชัดเจนในทุกโจทย์ปัญหา ด้านจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (NNDS) MOEA/D-BBO มีสมรรถนะดีกว่าอัลกอริทึมอื่น สำหรับโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลางบางโจทย์ ในขณะที่โจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ ทั้ง 3 อัลกอริทึมมีสมรรถนะใกล้เคียงกัน และ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาในการค้นหาคำตอบนั้น อัลกอริทึม BBO มีสมรรถนะดีที่สุดคือใช้เวลา น้อยที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ MOEA/D-BBO ตามลำดับ

7.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะมีดังต่อไปนี้

1. ในการแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่หรือจำนวนชิ้นงานมากๆ การแบ่งจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักของอัลกอริทึม MOEA/D-BBO อาจแบ่งให้มีจำนวนมากกว่าเดิมเพื่อให้คำตอบที่ได้จากการพัฒนาคำตอบของอัลกอริทึมมีจำนวนคำตอบมากขึ้น
2. ปัญหาเรื่องการจัดสมดุลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะยูซันานสามารถเพิ่มจำนวนวัตถุประสงค์ได้มากกว่า 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งจะช่วยให้การนำผลการจัดสมดุลสายการประกอบมาประยุกต์ใช้ในงานจริงมีทางเลือกหลากหลายตามเป้าหมายของวัตถุประสงค์ที่ต้องการ
3. สายการประกอบลักษณะยูซันานในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาสายการประกอบลักษณะยูซันานในรูปแบบอื่นๆต่อไปได้ เช่น สายการประกอบยูซันานแบบรูปตัวเอ็ม
4. จากผลการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะยูซันาน สามารถนำไปวิจัยต่อยอดในด้านของปัญหาการจัดลำดับการผลิต (Sequencing Problem) เพื่อให้ทราบลำดับการผลิตสินค้าที่ทำให้สายการประกอบมีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ณัฐชัย โยธาบริหาร. 2556. การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นพพล คำภิรมย์. 2551. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปารเมศ ชูติมา, ภาณุวัฒน์ โอฬารวิวัฒน์ชัย, วรินทร์ วัฒนพรพรหม & ประภาส จงสถิตย์วัฒนา. 2552. การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจบสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบลักษณะตัวยูที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี.
- วัชรวิทย์ ถนนทอง. 2558. การจัดลำดับผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึมการบรรจบร่วมกับฟิชชี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุชาดา คิตอ่าน. 2553. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยูที่มีสถานีงานแบบขนานในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- ARUCS, A. L. 1965. A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research*, 4, 259-277.
- ASKIN, R. G. & ZHOU, M. 1997. A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 35, 3095-3106.
- BECKER, C. & SCHOLL, A. 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168, 694-715.

- BENZER, R., GÖKÇEN, H., ÇETINYOKUS, T. & ÇERÇIOĞLU, H. 2007. A Network Model for Parallel Line Balancing Problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2007, 1-12.
- BROCKHOFF, D. & ZITZLER, E. 2009. Objective Reduction in Evolutionary Multiobjective Optimization: Theory and Applications. *Evolutionary Computation*, 17, 135-166.
- BUKCHIN, J. & RUBINOVITZ, J. 2003. A weighted approach for assembly line design with station paralleling and equipment selection. *IIE Transactions*, 35, 73-85.
- CHENG, C. H., MILTENBURG, J. & MOTWANI, J. 2000. The effect of straight- and u-shaped lines on quality. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 47, 321-334.
- CHENG, R., LI, M., TIAN, Y., ZHANG, X., YANG, S., JIN, Y. & YAO, X. 2017. A benchmark test suite for evolutionary many-objective optimization. *Complex & Intelligent Systems*, 3, 67-81.
- CHIANG, W.-C. & URBAN, T. L. 2006. The stochastic u-line balancing problem: A heuristic procedure. *European Journal of Operational Research*, 175, 1767-1781.
- CHUTIMA, P. & CHIMKLAI, P. 2012. Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 39-55.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S. & MEYARIVAN, T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 182-197.
- GÖKÇEN, H., AĞPAK, K. & BENZER, R. 2006. Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 103, 600-609.
- GOLDBERG, D. E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- GOLDBERG, D. E. & LINGLE, R. Alleles, loci, and the traveling salesman problem. Proceedings of an international conference on genetic algorithms and their applications, 1985. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 154-159.
- HÅKANSSON, J., SKOOG, E., ERIKSSON, K. & KRISTINA, M. A review of assembly line balancing and sequencing including line layouts. PLANs forsknings-och tillämpningskonferens, Chalmers Technical University, Gothenburg, Sweden, 2008.

- HE, Z. & YEN, G. G. 2016. Many-Objective Evolutionary Algorithm: Objective Space Reduction and Diversity Improvement. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20, 145-160.
- HWANG, R. & KATAYAMA, H. 2009. A multi-decision genetic approach for workload balancing of mixed-model u-shaped assembly line systems. *International Journal of Production Research*, 47, 3797-3822.
- HWANG, R. K., KATAYAMA, H. & GEN, M. 2008. U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46, 4637-4649.
- ISHIBUCHI, H., AKEDO, N. & NOJIMA, Y. Relation between neighborhood size and MOEA/D performance on many-objective problems. International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2013. Springer, 459-474.
- JACKSON, J. R. 1956. A Computing Procedure for a Line Balancing Problem. *Manage. Sci.*, 2, 261-271.
- KIM, Y. K., HYUN, C. J. & KIM, Y. 1996. Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach. *Computers & Operations Research*, 23, 1131-1145.
- KIM, Y. K., KIM, Y. & KIM, Y. J. 2000. Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach. *Production Planning & Control*, 11, 44-53.
- KONAK, A., COIT, D. W. & SMITH, A. E. 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91, 992-1007.
- KUCUKKOC, I. & ZHANG, D. Z. 2015. Balancing of parallel u-shaped assembly lines. *Computers & Operations Research*, 64, 233-244.
- KUMAR, R. & SINGH, P. K. 2007. Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP. In: ABRAHAM, A., GROSAN, C. & ISHIBUCHI, H. (eds.) *Hybrid Evolutionary Algorithms*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- LEE, T. O., KIM, Y. & KIM, Y. K. 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers & Industrial Engineering*, 40, 273-292.
- LI, M. & ZHENG, J. Spread assessment for evolutionary multi-objective optimization. International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2009. Springer, 216-230.

- MA, H. 2010. An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization. *Information Sciences*, 180, 3444-3464.
- MCMULLEN, P. R. & FRAZIER, G. V. 1997. A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, 51, 177-190.
- MILTENBURG, G. J. & WIJNGAARD, J. 1994. The u-line line balancing problem. *Management Science*, 40, 1378-1388.
- MILTENBURG, J. 2001. U-shaped production lines: A review of theory and practice. *International Journal of Production Economics*, 70, 201-214.
- MONDEN, Y. 1998. *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time*, CRC Press.
- ROSENBERG, O. & ZIEGLER, H. 1992. A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. *Zeitschrift für Operations Research*, 36, 477-495.
- SCHOLL, A. 1995. Data of assembly line balancing problems. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL).
- SCHOLL, A. & BOYSEN, N. 2009. Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure. *International Journal of Production Economics*, 119, 90-100.
- SIMARIA, A. S. & VILARINHO, P. M. 2009. 2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 489-506.
- SIMON, D. 2008. Biogeography-based optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 12, 702-713.
- SPARLING, D. & MILTENBURG, J. 1998. The mixed-model u-line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 36, 485-501.
- TONGE, F. M. 1960. A heuristic program for assembly line balancing.
- VILARINHO, P. M. & SIMARIA, A. S. 2002. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40, 1405-1420.

- WEE, T. S. & MAGAZINE, M. J. 1981. An efficient branch and bound algorithm for an assembly line balancing problem - part II: maximize the production rate. Working Paper No. 151, University of Waterloo, Waterloo.
- ZHANG, Q. & LI, H. 2007. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11, 712-731.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ข้อมูลโจทย์ปัญหาที่ใช้ในอัลกอริทึม

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะด้วยขนานที่นำมาใช้ในการทดลองมีข้อมูลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.1 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) ขนาด 21 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
1	2, 3	12	15
2	21	13	17, 18
3	4	14	19
4	5, 21	15	16, 18
5	6, 7	16	17
6	8	17	20
7	8, 14	18	19
8	9	19	-
9	10, 11, 12, 13	20	-
10	15	21	-
11	15		

ตารางที่ ก.2 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson (1956) ขนาด 11 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
1	2, 3, 4, 5	7	9
2	6	8	10
3	7	9	11
4	7	10	11
5	7	11	-
6	8		

ตารางที่ ก.3 ลำดับก่อนหลังของ Roszige (1992) ขนาด 25 ชั้นงาน

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

ตารางที่ ก.4 ลำดับก่อนหลังของ Warnecke (1971) ขนาด 58 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
1	9	12	17
2	25	13	17
3	21, 22	14	17
4	10	15	17
5	36	16	18
6	23, 24	17	20
7	43	18	19
8	44	19	23
9	11	20	21, 25
10	-	21	26, 44
11	13, 14, 15	22	27

ตารางที่ ก.4 ลำดับก่อนหลังของ Warnecke (1971) ขนาด 58 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ดีไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ดีไป
23	31	41	42
24	31	42	43
25	38	43	45
26	29	44	45
27	30	45	46, 48, 49
28	32, 33	46	47, 50
29	31	47	51
30	34	48	55
31	36	49	58
32	45	50	58
33	35	51	52
34	36	52	53
35	43	53	54
36	37, 38	54	55, 56
37	39, 40, 41	55	57
38	52	56	57
39	43	57	58
40	43	58	-

ตารางที่ ก.5 ลำดับก่อนหลังของ Wee-mag (1981) ขนาด 75 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ดีไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ดีไป
1	2, 3, 4, 5, 6, 7	7	-
2	15	8	-
3	13, 24	9	20, 24
4	8, 14, 16	10	18
5	12, 15	11	-
6	9, 10, 11, 13	12	19

ตารางที่ ก.5 ลำดับก่อนหลังของ Wee-mag (1981) ขนาด 75 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
13	22	40	46
14	-	41	-
15	17, 20, 23	42	47
16	21, 26	43	48, 50
17	30	44	-
18	26, 30	45	-
19	-	46	48, 51
20	27	47	49, 50, 52, 53
21	33	48	-
22	-	49	59, 61, 62
23	-	50	54, 55, 60, 62
24	25	51	-
25	28, 30, 33, 34	52	56, 57
26	31, 32, 41	53	58
27	29, 35, 36	54	-
28	-	55	63
29	-	56	-
30	-	57	-
31	37, 39	58	65
32	44, 45	59	64, 66
33	41	60	-
34	-	61	-
35	38, 42	62	67
36	40, 43	63	-
37	-	64	-
38	-	65	-
39	51	66	68

ตารางที่ ก.5 ลำดับก่อนหลังของ Wee-mag (1981) ขนาด 75 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
67	-	72	-
68	69, 70, 71, 72, 73, 74, 75	73	-
69	-	74	-
70	-	75	-
71	-		

ตารางที่ ก.6 ลำดับก่อนหลังของ Tonge (1960) ขนาด 70 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
1	2, 41, 69, 70	20	21
2	3	21	23
3	4, 68	22	23
4	6, 7	23	25, 31, 33
5	6, 24, 30	24	25
6	8	25	26, 27, 28, 29
7	8	26	35
8	12	27	35
9	10	28	35
10	11	29	35
11	12	30	31
12	13, 14	31	32
13	23	32	35
14	23	33	34
15	16	34	35
16	17, 18	35	36, 44, 48, 51, 53, 56, 60, 61, 62
17	19	36	37
18	19	37	38
19	20, 22, 57	38	39

ตารางที่ ก.6 ลำดับก่อนหลังของ Tonge (1960) ขนาด 70 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
39	40	55	-
40	42	56	-
41	42	57	58
42	43	58	59
43	50	59	60
44	45	60	-
45	46	61	65
46	47	62	63
47	50	63	64
48	49	64	65, 66, 67
49	50	65	-
50	-	66	-
51	52	67	-
52	54	68	-
53	54	69	-
54	55	70	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ลำดับก่อนหลังของ Arcus1 (1965) ขนาด 83 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
1	2	9	12
2	3, 4, 5	10	13, 14, 25
3	6	11	15
4	6, 7	12	16
5	8	13	17, 18, 20
6	9, 10	14	19
7	11	15	20, 39
8	77, 78	16	77, 78

ตารางที่ ก.7 ลำดับก่อนหลังของ Arcus1 (1965) ขนาด 83 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
17	21, 22, 28	44	46
18	23	45	47
19	24	46	48
20	26	47	49
21	27	48	50
22	27	49	69
23	74	50	51
24	28, 29	51	52
25	32	52	53
26	74	53	54
27	69	54	55
28	32	55	56
29	30	56	57
30	31	57	58
31	39	58	59
32	33, 34, 35, 36	59	60
33	37	60	61
34	77, 78	61	62
35	77, 78	62	63
36	38, 39	63	64
37	40	64	65
38	41	65	66
39	42, 43, 44, 75	66	67
40	77, 78	67	68
41	45	68	74, 75
42	77, 78	69	70, 71
43	77, 78	70	72

ตารางที่ ก.7 ลำดับก่อนหลังของ Arcus1 (1965) ขนาด 83 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
71	73	78	79
72	73	79	80, 81
73	74, 75	80	82
74	76	81	83
75	76	82	83
76	77, 78	83	-
77	79		

ตารางที่ ก.8 ลำดับก่อนหลังของ Arcus2 (1965) ขนาด 111 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
1	2	18	29
2	3	19	30
3	4	20	91
4	5, 6, 7, 8, 9, 10	21	111
5	39	22	31, 83
6	39	23	32, 33
7	83	24	69, 70
8	71	25	34
9	32	26	82
10	11, 12	27	35
11	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	28	36
12	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	29	37
13	71	30	38
14	22, 23, 24, 25	31	39
15	26	32	41
16	27	33	111
17	28	34	42

ตารางที่ 8 ลำดับก่อนหลังของ Arcus2 (1965) ขนาด 111 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
35	43	62	71
36	44, 91	63	111
37	45, 91	64	72
38	46, 91	65	111
39	40	66	111
40	111	67	111
41	69, 70	68	111
42	47	69	77, 78
43	48, 49	70	73
44	50	71	91
45	51	72	74
46	52	73	75
47	54, 55, 56, 57, 58, 59, 60	74	76
48	53	75	77, 78, 79
49	91	76	80, 81, 82
50	111	77	83
51	111	78	84
52	111	79	85
53	111	80	86, 91
54	69, 70	81	87, 91
55	61, 62, 63	82	111
56	63, 64	83	91
57	65, 91	84	88, 89, 91
58	66, 91	85	111
59	67, 91	86	111
60	68, 91	87	90
61	69, 70	88	105

ตารางที่ ก.8 ลำดับก่อนหลังของ Arcus2 (1965) ขนาด 111 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ได้ถอดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ได้ถอดไป
89	105	101	105
90	111	102	106, 107
91	92, 93, 94	103	107, 108
92	95	104	111
93	95	105	111
94	95	106	109
95	96, 97, 98, 99, 100, 104	107	111
96	101	108	110
97	102	109	111
98	103	110	111
99	111	111	-
100	111		

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ได้ถอดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ได้ถอดไป
1	2	12	17
2	3	13	18
3	4	14	19
4	5, 22, 26, 27, 40, 48, 56, 83, 86, 94, 105, 109, 111, 134, 221, 247, 259	15	21
5	6	16	23
6	7, 8, 9, 10	17	23
7	11, 12, 13, 14, 15, 20	18	23
8	11, 12, 13, 14, 15, 20	19	23
9	11, 12, 13, 14, 15, 20	20	23
10	11, 12, 13, 14, 15, 20	21	23
11	16	22	24, 25

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
23	28	50	54
24	29	51	55, 81
25	29	52	57
26	30	53	58
27	31	54	58, 296
28	32, 37	55	59
29	33, 44, 121	56	60 61
30	34, 297	57	62 63 71 76
31	34, 82, 172, 179	58	64
32	36	59	64, 99, 100
33	38	60	68
34	35	61	65
35	42	62	66
36	39	63	67
37	39	64	72
38	41	65	69
39	43	66	69
40	44, 84, 97	67	70
41	45	68	73
42	46	69	74
43	47	70	75
44	49	71	77
45	50	72	78
46	51 138	73	84, 97
47	52	74	84, 97
48	52	75	84, 97
49	53	76	84, 97

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
77	84, 97	104	108
78	79, 80, 125, 192	105	110
79	85	106	112
80	85	107	113
81	87	108	114, 115, 292
82	88, 89	109	119, 120
83	90	110	119, 120, 162
84	91	111	116
85	92	112	117
86	93	113	118
87	99, 100	114	119
88	99, 100	115	120
89	99, 100	116	122
90	95	117	123, 124, 257
91	96	118	126
92	98	119	127
93	98	120	127, 150
94	101	121	128
95	101	122	129
96	101	123	130, 145, 146, 147, 148, 149
97	101	124	130
98	102	125	130
99	103	126	130
100	104	127	130, 157
101	106	128	130
102	107	129	130, 141
103	108	130	131, 144

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
131	132, 133	158	166
132	135	159	166
133	135, 170	160	166
134	136	161	166
135	137	162	167
136	139	163	166
137	140	164	167
138	140, 191	165	168, 176
139	142, 253	166	170
140	143, 200	167	171
141	151	168	173
142	152	169	174
143	153, 169	170	174
144	154	171	174
145	155	172	175
146	156	173	177
147	158	174	178, 287, 288
148	159	175	180
149	160	176	181
150	161	177	181
151	163	178	181
152	164	179	181
153	165	180	181, 252
154	166	181	182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 196, 197, 295
155	166	182	190
156	166	183	193
157	166	184	194

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
185	195	213	214
186	195	214	215, 234
187	195	215	216
188	195	216	217
189	195	217	218
190	195	218	219
191	200	219	220
192	201	220	222
193	198	221	223
194	199	222	224
195	199, 203, 205, 227, 229	223	225
196	202	224	226
197	202	225	227
198	202	226	228
199	202	227	230
200	202	228	231
201	202	229	235, 236
202	204, 251	230	232, 271, 289
203	206, 208	231	233
204	207, 250	232	236
205	207	233	237
206	209	234	238, 256
207	210, 212	235	237
208	210	236	239
209	210, 211	237	240
210	213	238	240, 285
211	213	239	240, 279
212	214	240	241, 243

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
241	242	268	274
242	244	269	274
243	245, 246	270	274
244	245, 246, 255	271	274
245	248	272	275
246	248	273	276
247	278	274	277, 278, 282
248	249	275	280
249	254, 284	276	281
250	256	277	283
251	256	278	283
252	258	279	286
253	260	280	290
254	261	281	291
255	261, 262	282	293
256	263	283	293
257	264	284	294
258	265	285	294
259	266	286	294
260	267	287	293
261	268, 269	288	293
262	269	289	294
263	270	290	293
264	271	291	293
265	272	292	293
266	271	293	-
267	273	294	-

ตารางที่ ก.9 ลำดับก่อนหลังของ Scholl (1995) ขนาด 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป	ชั้นงาน	ชั้นงานที่ทำได้ถัดไป
295	-	297	-
296	-		

ตารางที่ ก.10 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ 1 ขนาด 32 (21-11) ชั้นงาน

ชั้นงาน	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:1:2)				เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชั้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชั้นงานรวม
1	8	6	8	7.6	18	15	17.25
2	6	4	2	4	6	3	5.25
3	18	12	16	16	15	12	14.25
4	10	14	8	10	21	18	20.25
5	18	26	16	18.8	3	3	3
6	8	10	10	9.2	6	3	5.25
7	16	8	8	11.2	9	6	8.25
8	14	12	12	12.8	18	18	18
9	10	6	6	7.6	15	15	15
10	2	0	2	1.6	15	12	14.25
11	6	4	4	4.8	12	9	11.25
12	2	0	2	1.6	-	-	-
13	10	4	6	7.2	-	-	-
14	6	2	6	5.2	-	-	-
15	10	12	4	8	-	-	-
16	6	4	6	5.6	-	-	-
17	26	28	20	24	-	-	-
18	10	12	8	9.6	-	-	-
19	4	2	4	3.6	-	-	-
20	6	8	4	5.6	-	-	-
21	14	8	16	13.6	-	-	-

ตารางที่ ก.11 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 2 ขนาด 46 (21-25) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
1	8	6	8	7.6	4	4	2	3.5
2	6	4	2	4	3	1	3	2
3	18	12	16	16	9	8	9	8.5
4	10	14	8	10	5	6	4	5.25
5	18	26	16	18.8	9	5	13	8
6	8	10	10	9.2	4	2	2	2.5
7	16	8	8	11.2	8	10	7	8.75
8	14	12	12	12.8	7	9	4	7.25
9	10	6	6	7.6	5	7	5	6
10	2	0	2	1.6	1	0	1	0.5
11	6	4	4	4.8	3	3	1	2.5
12	2	0	2	1.6	1	1	1	1
13	10	4	6	7.2	5	5	4	4.75
14	6	2	6	5.2	3	4	2	3.25
15	10	12	4	8	5	5	5	5
16	6	4	6	5.6	3	4	3	3.5
17	26	28	20	24	13	8	8	9.25
18	10	12	8	9.6	5	4	4	4.25
19	4	2	4	3.6	2	1	1	1.25
20	6	8	4	5.6	3	3	2	2.75
21	14	8	16	13.6	7	8	4	6.75
22	-	-	-	-	5	4	3	4
23	-	-	-	-	3	2	3	2.5
24	-	-	-	-	8	11	11	10.25
25	-	-	-	-	4	2	2	2.5

ตารางที่ ก.12 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 3 ขนาด 133 (58-75) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:1)			เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
1	10	12	10.67	21	14	14	16.33
2	53	76	60.67	22	17	15	18.00
3	41	45	42.33	23	7	10	13.33
4	36	18	30.00	24	15	7	15.33
5	35	27	32.33	21	17	15	17.67
6	17	13	15.67	20	10	7	12.33
7	34	43	37.00	5	3	4	4.00
8	23	33	26.33	20	14	6	13.33
9	14	20	16.00	21	13	8	14.00
10	52	41	48.33	19	15	8	14.00
11	33	34	33.33	20	15	15	16.67
12	34	23	30.33	14	5	6	8.33
13	12	15	13.00	5	1	3	3.00
14	52	77	60.33	21	14	15	16.67
15	12	16	13.33	4	2	1	2.33
16	33	37	34.33	24	10	19	17.67
17	44	40	42.67	19	7	16	14.00
18	7	8	7.33	5	2	2	3.00
19	15	17	15.67	22	17	14	17.67
20	13	17	14.33	23	8	16	15.67
21	29	26	28.00	24	9	17	16.67
22	37	46	40.00	24	19	19	20.67

ตารางที่ ก.12 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 3 ขนาด 133 (58-75) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:1)			เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
23	43	46	44.00	22	15	17	18.00
24	23	28	24.67	25	13	19	19.00
25	24	22	23.33	18	9	8	11.67
26	9	10	9.33	21	12	8	13.67
27	16	12	14.67	23	8	12	14.33
28	12	6	10.00	12	8	8	9.33
29	26	33	28.33	3	1	2	2.00
30	22	22	22.00	10	7	7	8.00
31	51	59	53.67	19	8	6	11.00
32	47	29	41.00	20	15	11	15.33
33	34	42	36.67	19	10	15	14.67
34	23	32	26.00	20	9	7	12.00
35	12	13	12.33	23	10	12	15.00
36	52	72	58.67	7	5	2	4.67
37	12	7	10.33	20	8	11	13.00
38	33	37	34.33	22	7	17	15.33
39	44	40	42.67	20	12	7	13.00
40	7	10	8.00	19	6	15	13.33
41	15	17	15.67	5	2	3	3.33
42	13	10	12.00	24	19	11	18.00
43	29	22	26.67	20	12	11	14.33

ตารางที่ ก.12 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 3 ขนาด 133 (58-75) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:1)			เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
44	37	24	32.67	5	4	2	3.67
45	43	24	36.67	19	6	6	10.33
46	23	31	25.67	23	13	10	15.33
47	24	26	24.67	10	8	3	7.00
48	9	5	7.67	20	14	10	14.67
49	16	23	18.33	19	8	11	12.67
50	12	7	10.33	23	11	7	13.67
51	26	21	24.33	20	6	13	13.00
52	12	11	11.67	20	11	15	15.33
53	52	36	46.67	21	9	12	14.00
54	12	17	13.67	20	6	13	13.00
55	33	30	32.00	20	16	15	17.00
56	44	29	39.00	23	18	12	17.67
57	7	10	8.00	21	9	14	14.67
58	15	19	16.33	19	6	6	10.33
59	-	-	-	20	6	8	11.33
60	-	-	-	20	14	13	15.67
61	-	-	-	20	11	15	15.33
62	-	-	-	20	12	8	13.33
63	-	-	-	19	11	7	12.33
64	-	-	-	25	14	19	19.33

ตารางที่ ก.12 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 3 ขนาด 133 (58-75) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:1)			เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
65	-	-	-	21	15	17	17.67
66	-	-	-	2	1	1	1.33
67	-	-	-	24	7	9	13.33
68	-	-	-	23	9	9	13.67
69	-	-	-	22	10	10	14.00
70	-	-	-	20	13	6	13.00
71	-	-	-	22	17	14	17.67
72	-	-	-	4	2	2	2.67
73	-	-	-	20	15	11	15.33
74	-	-	-	9	7	5	7.00
75	-	-	-	23	14	12	16.33

ตารางที่ ก.13 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 4 ขนาด 145 (75-70) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
1	63	76	76	71.67	17	15	16.5
2	65	93	82	80.00	66	62	65
3	68	35	52	51.67	54	54	54
4	71	79	35	61.67	52	49	51.25
5	63	90	79	77.33	6	5	5.75
6	60	55	38	51.00	88	83	86.75
7	16	14	22	17.33	21	22	21.25
8	60	76	30	55.33	128	130	128.5

ตารางที่ ก.13 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 4 ขนาด 145 (75-70) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
9	63	71	44	59.33	68	73	69.25
10	57	79	44	60.00	70	67	69.25
11	60	82	82	74.67	85	81	84
12	41	25	33	33.00	21	22	21.25
13	14	5	14	11.00	134	141	135.75
14	63	74	79	72.00	135	139	136
15	11	8	5	8.00	94	92	93.5
16	71	52	101	74.67	90	92	90.5
17	57	38	85	60.00	50	47	49.25
18	14	8	8	10.00	143	150	144.75
19	65	90	74	76.33	19	20	19.25
20	68	41	85	64.67	54	51	53.25
21	71	46	93	70.00	50	48	49.5
22	71	104	104	93.00	40	43	40.75
23	65	79	93	79.00	73	68	71.75
24	74	71	104	83.00	12	11	11.75
25	55	49	41	48.33	152	158	153.5
26	63	63	44	56.67	42	41	41.75
27	68	44	63	58.33	45	40	43.75
28	35	41	41	39.00	74	79	75.25
29	8	5	8	7.00	26	24	25.5
30	30	38	35	34.33	11	9	10.5
31	57	44	33	44.67	31	30	30.75
32	60	82	57	66.33	50	49	49.75
33	57	55	82	64.67	102	97	100.75

ตารางที่ ก.13 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 4 ขนาด 145 (75-70) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
34	60	49	35	48.00	46	44	45.5
35	68	52	65	61.67	35	32	34.25
36	22	27	11	20.00	40	41	40.25
37	60	41	60	53.67	2	1	1.75
38	65	38	90	64.33	1	1	1
39	60	65	38	54.33	3	2	2.75
40	57	30	79	55.33	13	14	13.25
41	16	8	14	12.67	16	17	16.25
42	71	104	57	77.33	25	24	24.75
43	60	65	60	61.67	21	20	20.75
44	16	19	8	14.33	43	40	42.25
45	57	30	33	40.00	30	28	29.5
46	68	68	52	62.67	83	88	84.25
47	30	44	16	30.00	89	89	89
48	60	76	55	63.67	56	56	56
49	57	41	60	52.67	59	62	59.75
50	68	57	35	53.33	43	44	43.25
51	60	30	71	53.67	11	12	11.25
52	60	57	82	66.33	26	23	25.25
53	63	46	65	58.00	44	41	43.25
54	60	33	68	53.67	121	121	121
55	60	85	79	74.67	38	40	38.5
56	68	98	65	77.00	68	72	69
57	63	46	74	61.00	22	23	22.25

ตารางที่ ก.13 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 4 ขนาด 145 (75-70) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
58	57	33	33	41.00	7	6	6.75
59	60	33	44	45.67	16	16	16
60	60	76	71	69.00	32	34	32.5
61	60	57	82	66.33	25	23	24.5
62	60	65	41	55.33	27	27	27
63	57	57	38	50.67	156	157	156.25
64	74	76	104	84.67	28	27	27.75
65	63	82	90	78.33	15	14	14.75
66	5	5	3	4.33	26	27	26.25
67	71	35	46	50.67	18	16	17.5
68	68	46	49	54.33	72	76	73
69	65	52	52	56.33	23	23	23
70	60	71	33	54.67	27	27	27
71	65	90	76	77.00	-	-	-
72	11	11	11	11.00	-	-	-
73	60	82	60	67.33	-	-	-
74	27	35	27	29.67	-	-	-
75	68	74	65	69.00	-	-	-

ตารางที่ ก.14 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 5 ขนาด 194 (83-111) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
1	3346	2610	2910	2964.40	1508	1297	1402.50
2	1970	2518	2038	2202.80	1319	1169	1244.00
3	3672	3428	4766	3793.20	565	545	555.00
4	1946	1544	1468	1689.60	1319	1091	1205.00
5	3400	4120	3376	3683.20	377	293	335.00
6	5762	7156	4124	5992.00	942	681	811.50
7	4462	4270	4218	4336.40	130	144	137.00
8	2080	1478	1712	1765.60	1732	1285	1508.50
9	3586	3974	3940	3812.00	942	762	852.00
10	2500	1928	2038	2178.80	1784	2151	1967.50
11	1400	1710	1016	1447.20	1319	1666	1492.50
12	928	1136	784	982.40	754	845	799.50
13	1000	814	1132	952.00	565	698	631.50
14	2266	2182	2358	2250.80	1755	1744	1749.50
15	1154	850	910	983.60	2115	2532	2323.50
16	966	1082	1026	1024.40	59	75	67.00
17	1760	2192	1754	1931.60	68	48	58.00
18	1334	1270	1728	1387.20	39	34	36.50
19	1200	1164	1326	1210.80	280	255	267.50
20	466	410	466	443.60	312	360	336.00
21	816	810	900	830.40	2354	2585	2469.50
22	1694	1614	2164	1756.00	96	118	107.00
23	1534	1522	1950	1612.40	2638	3170	2904.00
24	1700	1430	1238	1499.60	33	28	30.50
25	1560	1146	1182	1318.80	2638	2300	2469.00

ตารางที่ ก.14 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 5 ขนาด 194 (83-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
26	1824	1508	2230	1778.80	1508	1591	1549.50
27	1496	1898	1528	1663.20	22	18	20.00
28	3726	3622	4494	3838.00	21	18	19.50
29	1428	1314	1582	1413.20	12	14	13.00
30	2008	1542	1852	1790.40	93	105	99.00
31	1426	1498	1664	1502.40	1319	1596	1457.50
32	1284	1664	1198	1418.80	1636	2009	1822.50
33	1258	1580	1446	1424.40	1131	925	1028.00
34	2468	2118	2440	2322.40	3105	2704	2904.50
35	2286	2314	1780	2196.00	52	55	53.50
36	2532	2418	2214	2422.80	48	38	43.00
37	1584	1822	1188	1600.00	32	24	28.00
38	2502	3206	2652	2813.60	280	342	311.00
39	2620	2260	2998	2551.60	3845	4470	4157.50
40	1326	1226	1426	1306.00	1131	852	991.50
41	988	1226	940	1073.60	2279	1632	1955.50
42	2576	2916	1922	2581.20	4376	3806	4091.00
43	1584	1906	1422	1680.40	52	55	53.50
44	1156	1440	1082	1254.80	14	12	13.00
45	1188	1158	1360	1210.40	8	9	8.50
46	1156	1428	1166	1266.80	62	54	58.00
47	1244	1422	1566	1379.60	4000	4476	4238.00
48	1156	854	1126	1029.20	30	24	27.00
49	1128	856	850	963.60	52	38	45.00
50	1156	1264	1118	1191.60	21	15	18.00

ตารางที่ ก.14 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 5 ขนาด 194 (83-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
51	1156	1084	1150	1126.00	12	12	12.00
52	1156	994	1402	1140.40	93	92	92.50
53	1156	1442	946	1228.40	45	37	41.00
54	1156	894	1186	1057.20	1319	1283	1301.00
55	1156	1376	1406	1294.00	96	125	110.50
56	1156	1480	1470	1348.40	3085	2747	2916.00
57	1156	1250	1326	1227.60	1131	984	1057.50
58	1156	1002	816	1026.40	1131	1335	1233.00
59	1156	1450	968	1236.00	1772	2140	1956.00
60	1156	988	988	1055.20	1508	1831	1669.50
61	1156	1472	1136	1278.40	1696	1241	1468.50
62	1156	1310	1040	1194.40	3091	2725	2908.00
63	1156	1134	1168	1149.60	2111	2718	2414.50
64	1156	1314	1064	1200.80	2307	2111	2209.00
65	1156	822	1486	1088.40	565	541	553.00
66	1156	1318	822	1154.00	565	668	616.50
67	1156	1466	1344	1317.60	565	671	618.00
68	1156	1080	1458	1186.00	565	456	510.50
69	934	1116	910	1002.00	419	293	356.00
70	1774	2012	1784	1871.20	2605	1857	2231.00
71	792	738	586	729.20	2488	2105	2296.50
72	2592	3206	1894	2698.00	1696	1202	1449.00
73	2200	2424	1780	2205.60	1697	2199	1948.00
74	5086	5274	6276	5399.20	377	460	418.50
75	1528	1490	1974	1602.00	635	538	586.50

ตารางที่ ก.14 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 5 ขนาด 194 (83-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
76	714	878	908	818.40	2714	2332	2523.00
77	1402	1178	1792	1390.40	2745	3175	2960.00
78	2328	2842	2442	2556.40	923	706	814.50
79	572	660	458	584.40	475	502	488.50
80	4200	4710	4210	4406.00	1131	1449	1290.00
81	900	938	864	908.00	1319	1426	1372.50
82	2600	2978	2850	2801.20	565	704	634.50
83	7382	7648	7648	7541.60	1508	1749	1628.50
84	-	-	-	-	2222	1792	2007.00
85	-	-	-	-	475	452	463.50
86	-	-	-	-	377	379	378.00
87	-	-	-	-	565	602	583.50
88	-	-	-	-	377	308	342.50
89	-	-	-	-	708	613	660.50
90	-	-	-	-	251	274	262.50
91	-	-	-	-	4146	4551	4348.50
92	-	-	-	-	187	196	191.50
93	-	-	-	-	285	260	272.50
94	-	-	-	-	45	55	50.00
95	-	-	-	-	3892	4702	4297.00
96	-	-	-	-	942	867	904.50
97	-	-	-	-	592	709	650.50
98	-	-	-	-	591	590	590.50
99	-	-	-	-	1285	1205	1245.00
100	-	-	-	-	1285	1098	1191.50

ตารางที่ ก.14 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 5 ขนาด 194 (83-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
101	-	-	-	-	377	442	409.50
102	-	-	-	-	155	112	133.50
103	-	-	-	-	156	170	163.00
104	-	-	-	-	155	148	151.50
105	-	-	-	-	2111	2185	2148.00
106	-	-	-	-	125	118	121.50
107	-	-	-	-	249	285	267.00
108	-	-	-	-	125	137	131.00
109	-	-	-	-	93	118	105.50
110	-	-	-	-	125	114	119.50
111	-	-	-	-	70	74	72.00

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
1	810	831	825	818.50	3346	2610	2910	2964.40
2	810	780	768	791.00	1970	2518	2038	2202.80
3	390	426	393	397.00	3672	3428	4766	3793.20
4	444	426	465	448.00	1946	1544	1468	1689.60
5	570	561	612	582.50	3400	4120	3376	3683.20
6	879	939	882	890.00	5762	7156	4124	5992.00
7	1044	1047	1005	1031.50	4462	4270	4218	4336.40

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงาน รวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้น งานรวม
8	546	573	570	558.50	2080	1478	1712	1765.60
9	1470	1575	1539	1510.50	3586	3974	3940	3812.00
10	636	684	684	660.00	2500	1928	2038	2178.80
11	744	804	789	769.00	1400	1710	1016	1447.20
12	744	795	741	751.50	928	1136	784	982.40
13	744	726	672	717.00	1000	814	1132	952.00
14	744	693	747	736.50	2266	2182	2358	2250.80
15	744	807	771	763.50	1154	850	910	983.60
16	804	867	834	824.50	966	1082	1026	1024.40
17	804	855	759	797.50	1760	2192	1754	1931.60
18	804	783	744	780.50	1334	1270	1728	1387.20
19	864	897	924	889.50	1200	1164	1326	1210.80
20	744	753	681	724.50	466	410	466	443.60
21	804	810	795	802.00	816	810	900	830.40
22	180	165	162	171.50	1694	1614	2164	1756.00
23	804	852	843	825.00	1534	1522	1950	1612.40
24	720	696	735	721.00	1700	1430	1238	1499.60
25	720	774	726	731.00	1560	1146	1182	1318.80
26	513	483	480	497.00	1824	1508	2230	1778.80
27	1470	1473	1368	1436.50	1496	1898	1528	1663.20
28	546	531	504	529.50	3726	3622	4494	3838.00
29	510	462	528	508.00	1428	1314	1582	1413.20
30	918	990	843	905.00	2008	1542	1852	1790.40
31	324	342	312	323.00	1426	1498	1664	1502.40

ตารางที่ ก.15 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชั้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชั้นงานรวม
32	744	690	696	719.00	1284	1664	1198	1418.80
33	570	618	591	585.00	1258	1580	1446	1424.40
34	720	702	708	713.00	2468	2118	2440	2322.40
35	1017	1071	1059	1040.00	2286	2314	1780	2196.00
36	864	870	798	843.00	2532	2418	2214	2422.80
37	744	738	729	738.00	1584	1822	1188	1600.00
38	1365	1320	1416	1374.50	2502	3206	2652	2813.60
39	804	789	867	822.50	2620	2260	2998	2551.60
40	810	855	888	843.50	1326	1226	1426	1306.00
41	540	528	522	532.00	988	1226	940	1073.60
42	363	348	372	363.50	2576	2916	1922	2581.20
43	810	852	786	809.00	1584	1906	1422	1680.40
44	1320	1419	1389	1359.50	1156	1440	1082	1254.80
45	747	747	816	770.00	1188	1158	1360	1210.40
46	582	552	570	573.00	1156	1428	1166	1266.80
47	486	516	492	493.00	1244	1422	1566	1379.60
48	390	351	357	372.50	1156	854	1126	1029.20
49	1164	1110	1236	1179.00	1128	856	850	963.60
50	270	291	267	272.50	1156	1264	1118	1191.60
51	636	615	660	640.50	1156	1084	1150	1126.00
52	738	738	684	720.00	1156	994	1402	1140.40
53	564	561	585	570.50	1156	1442	946	1228.40
54	810	819	843	822.50	1156	894	1186	1057.20
55	480	483	522	494.50	1156	1376	1406	1294.00

ตารางที่ ก.15 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชั้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชั้นงานรวม
56	237	240	252	242.50	1156	1480	1470	1348.40
57	1398	1362	1404	1394.00	1156	1250	1326	1227.60
58	720	741	756	735.50	1156	1002	816	1026.40
59	411	444	414	417.50	1156	1450	968	1236.00
60	552	522	510	533.00	1156	988	988	1055.20
61	330	312	336	329.00	1156	1472	1136	1278.40
62	825	891	825	836.00	1156	1310	1040	1194.40
63	447	438	435	441.50	1156	1134	1168	1149.60
64	840	831	762	812.50	1156	1314	1064	1200.80
65	357	366	330	349.50	1156	822	1486	1088.40
66	552	594	531	552.00	1156	1318	822	1154.00
67	420	396	396	408.00	1156	1466	1344	1317.60
68	450	468	489	466.00	1156	1080	1458	1186.00
69	570	609	612	590.50	934	1116	910	1002.00
70	450	408	477	452.00	1774	2012	1784	1871.20
71	450	468	489	466.00	792	738	586	729.20
72	852	840	876	858.00	2592	3206	1894	2698.00
73	576	585	558	571.50	2200	2424	1780	2205.60
74	1041	990	1056	1037.50	5086	5274	6276	5399.20
75	696	720	657	687.00	1528	1490	1974	1602.00
76	420	456	441	433.00	714	878	908	818.40
77	1824	1962	1989	1902.00	1402	1178	1792	1390.40
78	240	249	246	243.50	2328	2842	2442	2556.40
79	120	111	111	115.50	572	660	458	584.40

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
80	390	423	375	390.50	4200	4710	4210	4406.00
81	330	360	306	327.00	900	938	864	908.00
82	1050	1149	1035	1061.50	2600	2978	2850	2801.20
83	420	417	432	423.50	7382	7648	7648	7541.60
84	720	735	714	720.50	-	-	-	-
85	720	693	669	698.50	-	-	-	-
86	270	261	282	272.50	-	-	-	-
87	162	156	174	165.00	-	-	-	-
88	882	963	915	906.50	-	-	-	-
89	609	588	549	585.50	-	-	-	-
90	450	474	432	448.00	-	-	-	-
91	810	879	792	815.50	-	-	-	-
92	465	426	471	460.50	-	-	-	-
93	570	621	519	561.50	-	-	-	-
94	234	213	249	235.50	-	-	-	-
95	420	402	447	426.00	-	-	-	-
96	723	759	744	736.00	-	-	-	-
97	1290	1413	1239	1293.50	-	-	-	-
98	270	261	252	262.50	-	-	-	-
99	330	300	330	325.00	-	-	-	-
100	27	27	24	26.00	-	-	-	-
101	1290	1368	1281	1300.00	-	-	-	-
102	390	399	414	399.50	-	-	-	-
103	867	888	795	846.50	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
104	330	315	300	317.50	-	-	-	-
105	480	516	504	494.00	-	-	-	-
106	1326	1356	1446	1371.00	-	-	-	-
107	477	444	498	478.50	-	-	-	-
108	750	783	762	759.50	-	-	-	-
109	570	570	612	584.00	-	-	-	-
110	552	588	576	566.00	-	-	-	-
111	2070	2088	1896	2015.00	-	-	-	-
112	216	195	216	212.50	-	-	-	-
113	570	600	534	563.00	-	-	-	-
114	570	534	582	568.00	-	-	-	-
115	270	270	264	268.00	-	-	-	-
116	2667	2718	2655	2671.50	-	-	-	-
117	510	465	534	510.50	-	-	-	-
118	465	468	474	468.50	-	-	-	-
119	570	582	603	583.00	-	-	-	-
120	390	420	360	385.00	-	-	-	-
121	1170	1131	1068	1129.50	-	-	-	-
122	903	825	978	915.00	-	-	-	-
123	162	156	168	163.00	-	-	-	-
124	681	726	675	686.50	-	-	-	-
125	426	435	408	421.50	-	-	-	-
126	552	549	579	560.50	-	-	-	-
127	2223	2247	2160	2206.00	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
128	2604	2346	2484	2521.00	-	-	-	-
129	690	690	708	696.00	-	-	-	-
130	363	360	390	371.50	-	-	-	-
131	960	975	930	952.50	-	-	-	-
132	378	369	414	388.50	-	-	-	-
133	1320	1263	1428	1346.50	-	-	-	-
134	381	378	384	381.50	-	-	-	-
135	402	393	429	409.50	-	-	-	-
136	450	483	405	440.50	-	-	-	-
137	420	378	435	418.00	-	-	-	-
138	330	327	336	331.50	-	-	-	-
139	960	918	1005	968.00	-	-	-	-
140	750	744	696	731.00	-	-	-	-
141	696	651	669	679.50	-	-	-	-
142	564	549	531	550.50	-	-	-	-
143	750	768	678	729.00	-	-	-	-
144	1131	1200	1053	1116.50	-	-	-	-
145	270	291	291	280.50	-	-	-	-
146	420	402	384	405.00	-	-	-	-
147	270	276	288	277.00	-	-	-	-
148	270	273	264	268.50	-	-	-	-
149	210	216	192	205.00	-	-	-	-
150	270	282	279	275.00	-	-	-	-
151	330	327	330	329.50	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
152	450	486	450	456.00	-	-	-	-
153	303	288	327	308.50	-	-	-	-
154	1131	1068	1053	1094.50	-	-	-	-
155	354	351	324	343.50	-	-	-	-
156	870	930	876	882.00	-	-	-	-
157	627	615	585	611.00	-	-	-	-
158	450	474	465	459.00	-	-	-	-
159	450	432	453	448.00	-	-	-	-
160	237	258	234	239.50	-	-	-	-
161	450	405	474	450.50	-	-	-	-
162	273	300	285	281.50	-	-	-	-
163	177	180	192	182.50	-	-	-	-
164	654	612	666	651.00	-	-	-	-
165	1053	957	1086	1048.00	-	-	-	-
166	2619	2634	2367	2537.50	-	-	-	-
167	390	375	399	390.50	-	-	-	-
168	204	207	201	203.50	-	-	-	-
169	378	414	378	384.00	-	-	-	-
170	360	327	390	364.50	-	-	-	-
171	681	687	663	676.00	-	-	-	-
172	594	612	546	581.00	-	-	-	-
173	396	393	393	394.50	-	-	-	-
174	363	396	375	372.50	-	-	-	-
175	450	408	450	443.00	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
176	300	291	318	304.50	-	-	-	-
177	114	120	114	115.00	-	-	-	-
178	210	195	207	206.50	-	-	-	-
179	1065	1026	1062	1057.50	-	-	-	-
180	852	792	810	828.00	-	-	-	-
181	366	378	363	367.00	-	-	-	-
182	225	213	222	222.00	-	-	-	-
183	480	453	516	487.50	-	-	-	-
184	420	408	417	417.00	-	-	-	-
185	1560	1485	1698	1593.50	-	-	-	-
186	297	267	276	285.00	-	-	-	-
187	546	501	528	532.50	-	-	-	-
188	240	258	234	241.00	-	-	-	-
189	1542	1470	1473	1507.00	-	-	-	-
190	288	279	273	281.50	-	-	-	-
191	150	156	159	154.00	-	-	-	-
192	816	798	897	840.00	-	-	-	-
193	678	696	684	683.00	-	-	-	-
194	582	630	591	593.00	-	-	-	-
195	492	483	441	473.50	-	-	-	-
196	288	285	291	288.50	-	-	-	-
197	321	327	339	328.00	-	-	-	-
198	324	318	300	315.00	-	-	-	-
199	501	522	528	513.50	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
200	294	309	300	298.50	-	-	-	-
201	246	222	249	243.00	-	-	-	-
202	1446	1509	1512	1478.50	-	-	-	-
203	216	198	204	209.00	-	-	-	-
204	150	141	162	152.50	-	-	-	-
205	390	411	369	386.50	-	-	-	-
206	690	720	720	705.00	-	-	-	-
207	150	150	162	154.00	-	-	-	-
208	720	648	714	706.00	-	-	-	-
209	570	528	582	567.00	-	-	-	-
210	570	612	609	590.00	-	-	-	-
211	720	747	663	705.50	-	-	-	-
212	222	207	234	223.50	-	-	-	-
213	417	420	438	424.50	-	-	-	-
214	1017	930	990	993.50	-	-	-	-
215	780	741	822	787.50	-	-	-	-
216	396	399	429	407.50	-	-	-	-
217	1650	1731	1707	1682.50	-	-	-	-
218	1260	1236	1281	1263.00	-	-	-	-
219	456	468	483	467.00	-	-	-	-
220	36	33	33	34.50	-	-	-	-
221	270	294	285	279.00	-	-	-	-
222	15	12	12	13.50	-	-	-	-
223	384	354	396	383.00	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
224	300	324	270	294.00	-	-	-	-
225	360	372	384	370.00	-	-	-	-
226	300	291	324	306.50	-	-	-	-
227	960	1038	954	971.00	-	-	-	-
228	2505	2661	2253	2447.00	-	-	-	-
229	2220	2145	2046	2149.50	-	-	-	-
230	669	672	729	689.50	-	-	-	-
231	300	321	300	303.50	-	-	-	-
232	1170	1212	1071	1144.00	-	-	-	-
233	420	447	426	426.50	-	-	-	-
234	912	828	906	896.00	-	-	-	-
235	360	360	351	357.00	-	-	-	-
236	1209	1263	1287	1244.00	-	-	-	-
237	63	57	57	60.00	-	-	-	-
238	738	741	663	713.50	-	-	-	-
239	480	501	495	488.50	-	-	-	-
240	3057	3192	2988	3056.50	-	-	-	-
241	102	90	99	99.00	-	-	-	-
242	360	366	393	372.00	-	-	-	-
243	204	198	222	209.00	-	-	-	-
244	2730	2505	2769	2705.50	-	-	-	-
245	906	912	921	912.00	-	-	-	-
246	2334	2496	2103	2284.00	-	-	-	-
247	303	324	321	312.50	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
248	3930	4029	3567	3825.50	-	-	-	-
249	60	57	63	60.50	-	-	-	-
250	834	837	846	838.50	-	-	-	-
251	243	264	225	240.50	-	-	-	-
252	870	813	900	870.50	-	-	-	-
253	300	327	306	306.50	-	-	-	-
254	1116	1008	1209	1129.00	-	-	-	-
255	216	219	207	213.50	-	-	-	-
256	84	75	90	84.50	-	-	-	-
257	270	288	285	278.00	-	-	-	-
258	750	771	759	756.50	-	-	-	-
259	432	432	456	440.00	-	-	-	-
260	909	879	978	927.00	-	-	-	-
261	660	627	720	674.50	-	-	-	-
262	174	180	171	174.00	-	-	-	-
263	672	636	738	688.00	-	-	-	-
264	633	618	651	636.50	-	-	-	-
265	297	273	279	287.00	-	-	-	-
266	132	138	120	129.00	-	-	-	-
267	360	324	336	346.00	-	-	-	-
268	210	219	222	215.50	-	-	-	-
269	1263	1287	1257	1265.00	-	-	-	-
270	693	741	645	685.00	-	-	-	-
271	642	639	699	660.50	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
272	588	591	537	571.50	-	-	-	-
273	840	870	888	861.00	-	-	-	-
274	1194	1245	1077	1163.50	-	-	-	-
275	216	216	222	218.00	-	-	-	-
276	840	852	912	866.00	-	-	-	-
277	1068	1089	993	1046.50	-	-	-	-
278	579	618	624	600.50	-	-	-	-
279	420	417	432	423.50	-	-	-	-
280	390	402	372	386.00	-	-	-	-
281	900	870	840	875.00	-	-	-	-
282	1368	1410	1473	1410.00	-	-	-	-
283	21	18	21	20.50	-	-	-	-
284	510	555	468	503.50	-	-	-	-
285	756	780	720	748.00	-	-	-	-
286	630	579	606	613.50	-	-	-	-
287	924	918	1005	950.00	-	-	-	-
288	924	864	885	901.00	-	-	-	-
289	363	333	375	362.00	-	-	-	-
290	156	144	141	149.00	-	-	-	-
291	1278	1176	1362	1289.00	-	-	-	-
292	312	312	339	321.00	-	-	-	-
293	4158	3999	4083	4106.50	-	-	-	-
294	1581	1647	1680	1625.00	-	-	-	-
295	2904	2712	2754	2822.00	-	-	-	-

ตารางที่ ก.15 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 6 ขนาด 380 (297-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:2:1)			
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม
296	3141	3429	3120	3182.00	-	-	-	-
297	1614	1488	1611	1592.00	-	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
1	540	554	550	545.67	1508	1297	1402.50
2	540	520	512	527.33	1319	1169	1244.00
3	260	284	262	264.67	565	545	555.00
4	296	284	310	298.67	1319	1091	1205.00
5	380	374	408	388.33	377	293	335.00
6	586	626	588	593.33	942	681	811.50
7	696	698	670	687.67	130	144	137.00
8	364	382	380	372.33	1732	1285	1508.50
9	980	1050	1026	1007.00	942	762	852.00
10	424	456	456	440.00	1784	2151	1967.50
11	496	536	526	512.67	1319	1666	1492.50
12	496	530	494	501.00	754	845	799.50
13	496	484	448	478.00	565	698	631.50
14	496	462	498	491.00	1755	1744	1749.50
15	496	538	514	509.00	2115	2532	2323.50
16	536	578	556	549.67	59	75	67.00

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
17	536	570	506	531.67	68	48	58.00
18	536	522	496	520.33	39	34	36.50
19	576	598	616	593.00	280	255	267.50
20	496	502	454	483.00	312	360	336.00
21	536	540	530	534.67	2354	2585	2469.50
22	120	110	108	114.33	96	118	107.00
23	536	568	562	550.00	2638	3170	2904.00
24	480	464	490	480.67	33	28	30.50
25	480	516	484	487.33	2638	2300	2469.00
26	342	322	320	331.33	1508	1591	1549.50
27	980	982	912	957.67	22	18	20.00
28	364	354	336	353.00	21	18	19.50
29	340	308	352	338.67	12	14	13.00
30	612	660	562	603.33	93	105	99.00
31	216	228	208	215.33	1319	1596	1457.50
32	496	460	464	479.33	1636	2009	1822.50
33	380	412	394	390.00	1131	925	1028.00
34	480	468	472	475.33	3105	2704	2904.50
35	678	714	706	693.33	52	55	53.50
36	576	580	532	562.00	48	38	43.00
37	496	492	486	492.00	32	24	28.00
38	910	880	944	916.33	280	342	311.00
39	536	526	578	548.33	3845	4470	4157.50
40	540	570	592	562.33	1131	852	991.50
41	360	352	348	354.67	2279	1632	1955.50

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
42	242	232	248	242.33	4376	3806	4091.00
43	540	568	524	539.33	52	55	53.50
44	880	946	926	906.33	14	12	13.00
45	498	498	544	513.33	8	9	8.50
46	388	368	380	382.00	62	54	58.00
47	324	344	328	328.67	4000	4476	4238.00
48	260	234	238	248.33	30	24	27.00
49	776	740	824	786.00	52	38	45.00
50	180	194	178	181.67	21	15	18.00
51	424	410	440	427.00	12	12	12.00
52	492	492	456	480.00	93	92	92.50
53	376	374	390	380.33	45	37	41.00
54	540	546	562	548.33	1319	1283	1301.00
55	320	322	348	329.67	96	125	110.50
56	158	160	168	161.67	3085	2747	2916.00
57	932	908	936	929.33	1131	984	1057.50
58	480	494	504	490.33	1131	1335	1233.00
59	274	296	276	278.33	1772	2140	1956.00
60	368	348	340	355.33	1508	1831	1669.50
61	220	208	224	219.33	1696	1241	1468.50
62	550	594	550	557.33	3091	2725	2908.00
63	298	292	290	294.33	2111	2718	2414.50
64	560	554	508	541.67	2307	2111	2209.00
65	238	244	220	233.00	565	541	553.00
66	368	396	354	368.00	565	668	616.50

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
67	280	264	264	272.00	565	671	618.00
68	300	312	326	310.67	565	456	510.50
69	380	406	408	393.67	419	293	356.00
70	300	272	318	301.33	2605	1857	2231.00
71	300	312	326	310.67	2488	2105	2296.50
72	568	560	584	572.00	1696	1202	1449.00
73	384	390	372	381.00	1697	2199	1948.00
74	694	660	704	691.67	377	460	418.50
75	464	480	438	458.00	635	538	586.50
76	280	304	294	288.67	2714	2332	2523.00
77	1216	1308	1326	1268.00	2745	3175	2960.00
78	160	166	164	162.33	923	706	814.50
79	80	74	74	77.00	475	502	488.50
80	260	282	250	260.33	1131	1449	1290.00
81	220	240	204	218.00	1319	1426	1372.50
82	700	766	690	707.67	565	704	634.50
83	280	278	288	282.33	1508	1749	1628.50
84	480	490	476	480.33	2222	1792	2007.00
85	480	462	446	465.67	475	452	463.50
86	180	174	188	181.67	377	379	378.00
87	108	104	116	110.00	565	602	583.50
88	588	642	610	604.33	377	308	342.50
89	406	392	366	390.33	708	613	660.50
90	300	316	288	298.67	251	274	262.50
91	540	586	528	543.67	4146	4551	4348.50

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
92	310	284	314	307.00	187	196	191.50
93	380	414	346	374.33	285	260	272.50
94	156	142	166	157.00	45	55	50.00
95	280	268	298	284.00	3892	4702	4297.00
96	482	506	496	490.67	942	867	904.50
97	860	942	826	862.33	592	709	650.50
98	180	174	168	175.00	591	590	590.50
99	220	200	220	216.67	1285	1205	1245.00
100	18	18	16	17.33	1285	1098	1191.50
101	860	912	854	866.67	377	442	409.50
102	260	266	276	266.33	155	112	133.50
103	578	592	530	564.33	156	170	163.00
104	220	210	200	211.67	155	148	151.50
105	320	344	336	329.33	2111	2185	2148.00
106	884	904	964	914.00	125	118	121.50
107	318	296	332	319.00	249	285	267.00
108	500	522	508	506.33	125	137	131.00
109	380	380	408	389.33	93	118	105.50
110	368	392	384	377.33	125	114	119.50
111	1380	1392	1264	1343.33	70	74	72.00
112	144	130	144	141.67	-	-	-
113	380	400	356	375.33	-	-	-
114	380	356	388	378.67	-	-	-
115	180	180	176	178.67	-	-	-
116	1778	1812	1770	1781.00	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
117	340	310	356	340.33	-	-	-
118	310	312	316	312.33	-	-	-
119	380	388	402	388.67	-	-	-
120	260	280	240	256.67	-	-	-
121	780	754	712	753.00	-	-	-
122	602	550	652	610.00	-	-	-
123	108	104	112	108.67	-	-	-
124	454	484	450	457.67	-	-	-
125	284	290	272	281.00	-	-	-
126	368	366	386	373.67	-	-	-
127	1482	1498	1440	1470.67	-	-	-
128	1736	1564	1656	1680.67	-	-	-
129	460	460	472	464.00	-	-	-
130	242	240	260	247.67	-	-	-
131	640	650	620	635.00	-	-	-
132	252	246	276	259.00	-	-	-
133	880	842	952	897.67	-	-	-
134	254	252	256	254.33	-	-	-
135	268	262	286	273.00	-	-	-
136	300	322	270	293.67	-	-	-
137	280	252	290	278.67	-	-	-
138	220	218	224	221.00	-	-	-
139	640	612	670	645.33	-	-	-
140	500	496	464	487.33	-	-	-
141	464	434	446	453.00	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
142	376	366	354	367.00	-	-	-
143	500	512	452	486.00	-	-	-
144	754	800	702	744.33	-	-	-
145	180	194	194	187.00	-	-	-
146	280	268	256	270.00	-	-	-
147	180	184	192	184.67	-	-	-
148	180	182	176	179.00	-	-	-
149	140	144	128	136.67	-	-	-
150	180	188	186	183.33	-	-	-
151	220	218	220	219.67	-	-	-
152	300	324	300	304.00	-	-	-
153	202	192	218	205.67	-	-	-
154	754	712	702	729.67	-	-	-
155	236	234	216	229.00	-	-	-
156	580	620	584	588.00	-	-	-
157	418	410	390	407.33	-	-	-
158	300	316	310	306.00	-	-	-
159	300	288	302	298.67	-	-	-
160	158	172	156	159.67	-	-	-
161	300	270	316	300.33	-	-	-
162	182	200	190	187.67	-	-	-
163	118	120	128	121.67	-	-	-
164	436	408	444	434.00	-	-	-
165	702	638	724	698.67	-	-	-
166	1746	1756	1578	1691.67	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
167	260	250	266	260.33	-	-	-
168	136	138	134	135.67	-	-	-
169	252	276	252	256.00	-	-	-
170	240	218	260	243.00	-	-	-
171	454	458	442	450.67	-	-	-
172	396	408	364	387.33	-	-	-
173	264	262	262	263.00	-	-	-
174	242	264	250	248.33	-	-	-
175	300	272	300	295.33	-	-	-
176	200	194	212	203.00	-	-	-
177	76	80	76	76.67	-	-	-
178	140	130	138	137.67	-	-	-
179	710	684	708	705.00	-	-	-
180	568	528	540	552.00	-	-	-
181	244	252	242	244.67	-	-	-
182	150	142	148	148.00	-	-	-
183	320	302	344	325.00	-	-	-
184	280	272	278	278.00	-	-	-
185	1040	990	1132	1062.33	-	-	-
186	198	178	184	190.00	-	-	-
187	364	334	352	355.00	-	-	-
188	160	172	156	160.67	-	-	-
189	1028	980	982	1004.67	-	-	-
190	192	186	182	187.67	-	-	-
191	100	104	106	102.67	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
192	544	532	598	560.00	-	-	-
193	452	464	456	455.33	-	-	-
194	388	420	394	395.33	-	-	-
195	328	322	294	315.67	-	-	-
196	192	190	194	192.33	-	-	-
197	214	218	226	218.67	-	-	-
198	216	212	200	210.00	-	-	-
199	334	348	352	342.33	-	-	-
200	196	206	200	199.00	-	-	-
201	164	148	166	162.00	-	-	-
202	964	1006	1008	985.67	-	-	-
203	144	132	136	139.33	-	-	-
204	100	94	108	101.67	-	-	-
205	260	274	246	257.67	-	-	-
206	460	480	480	470.00	-	-	-
207	100	100	108	102.67	-	-	-
208	480	432	476	470.67	-	-	-
209	380	352	388	378.00	-	-	-
210	380	408	406	393.33	-	-	-
211	480	498	442	470.33	-	-	-
212	148	138	156	149.00	-	-	-
213	278	280	292	283.00	-	-	-
214	678	620	660	662.33	-	-	-
215	520	494	548	525.00	-	-	-
216	264	266	286	271.67	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
217	1100	1154	1138	1121.67	-	-	-
218	840	824	854	842.00	-	-	-
219	304	312	322	311.33	-	-	-
220	24	22	22	23.00	-	-	-
221	180	196	190	186.00	-	-	-
222	10	8	8	9.00	-	-	-
223	256	236	264	255.33	-	-	-
224	200	216	180	196.00	-	-	-
225	240	248	256	246.67	-	-	-
226	200	194	216	204.33	-	-	-
227	640	692	636	647.33	-	-	-
228	1670	1774	1502	1631.33	-	-	-
229	1480	1430	1364	1433.00	-	-	-
230	446	448	486	459.67	-	-	-
231	200	214	200	202.33	-	-	-
232	780	808	714	762.67	-	-	-
233	280	298	284	284.33	-	-	-
234	608	552	604	597.33	-	-	-
235	240	240	234	238.00	-	-	-
236	806	842	858	829.33	-	-	-
237	42	38	38	40.00	-	-	-
238	492	494	442	475.67	-	-	-
239	320	334	330	325.67	-	-	-
240	2038	2128	1992	2037.67	-	-	-
241	68	60	66	66.00	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
242	240	244	262	248.00	-	-	-
243	136	132	148	139.33	-	-	-
244	1820	1670	1846	1803.67	-	-	-
245	604	608	614	608.00	-	-	-
246	1556	1664	1402	1522.67	-	-	-
247	202	216	214	208.33	-	-	-
248	2620	2686	2378	2550.33	-	-	-
249	40	38	42	40.33	-	-	-
250	556	558	564	559.00	-	-	-
251	162	176	150	160.33	-	-	-
252	580	542	600	580.33	-	-	-
253	200	218	204	204.33	-	-	-
254	744	672	806	752.67	-	-	-
255	144	146	138	142.33	-	-	-
256	56	50	60	56.33	-	-	-
257	180	192	190	185.33	-	-	-
258	500	514	506	504.33	-	-	-
259	288	288	304	293.33	-	-	-
260	606	586	652	618.00	-	-	-
261	440	418	480	449.67	-	-	-
262	116	120	114	116.00	-	-	-
263	448	424	492	458.67	-	-	-
264	422	412	434	424.33	-	-	-
265	198	182	186	191.33	-	-	-
266	88	92	80	86.00	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
267	240	216	224	230.67	-	-	-
268	140	146	148	143.67	-	-	-
269	842	858	838	843.33	-	-	-
270	462	494	430	456.67	-	-	-
271	428	426	466	440.33	-	-	-
272	392	394	358	381.00	-	-	-
273	560	580	592	574.00	-	-	-
274	796	830	718	775.67	-	-	-
275	144	144	148	145.33	-	-	-
276	560	568	608	577.33	-	-	-
277	712	726	662	697.67	-	-	-
278	386	412	416	400.33	-	-	-
279	280	278	288	282.33	-	-	-
280	260	268	248	257.33	-	-	-
281	600	580	560	583.33	-	-	-
282	912	940	982	940.00	-	-	-
283	14	12	14	13.67	-	-	-
284	340	370	312	335.67	-	-	-
285	504	520	480	498.67	-	-	-
286	420	386	404	409.00	-	-	-
287	616	612	670	633.33	-	-	-
288	616	576	590	600.67	-	-	-
289	242	222	250	241.33	-	-	-
290	104	96	94	99.33	-	-	-
291	852	784	908	859.33	-	-	-

ตารางที่ ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ 7 ขนาด 408 (297-111) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่1 (ผลิตภัณฑ์ 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 3:1:2)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่2 (ผลิตภัณฑ์ 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1)		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่1	รุ่นที่2	เวลาชิ้นงานรวม
292	208	208	226	214.00	-	-	-
293	2772	2666	2722	2737.67	-	-	-
294	1054	1098	1120	1083.33	-	-	-
295	1936	1808	1836	1881.33	-	-	-
296	2094	2286	2080	2121.33	-	-	-
297	1076	992	1074	1061.33	-	-	-



ภาคผนวก ข
ผลการทดลองของโจทย์ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึมของแต่ละโจทย์ปัญหา แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ข.1 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	11	4	0.0508	0.5217
	2	10	4	0.0253	0.0473
	3	10	4	0.0159	0.4444
MOEA/D	1	10	4	0.0026	0.4444
	2	10	4	0.0018	0.4500
	3	10	4	0.0026	0.4211
MOEA/D-BBO	1	9	4	0.0027	0.4211
	2	9	4	0.0040	0.4211
	3	9	4	0.0011	0.4211

ตารางที่ ข.2 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.8908	NaN	0.3333	0.0175	1	1.2400
MOEA/D	0.3206	0.8634	0.1023	0.0526	10	6.0784
MOEA/D-BBO	0.1720	0.9342	0.4657	0.3158	14	13.6105

NaN : ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีเพียงคำตอบเดียว

ตารางที่ ข.3 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	8	3	0.0047	0.6522
	2	9	4	0.1088	0.5909
	3	8	3	0.0104	0.5789
MOEA/D	1	8	3	0.0025	0.5294
	2	8	3	0.0006	0.5000
	3	8	3	0.0007	0.5000
MOEA/D-BBO	1	8	3	0.0005	0.3333
	2	8	3	0.0018	0.5000
	3	8	3	0.0010	0.4667

ตารางที่ ข.4 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO		0.9192	NaN	0.3333	0.0256	1	1.1586
MOEA/D		0.1813	0.8548	0.3519	0.3077	10	3.7008
MOEA/D-BBO		0.1243	0.7638	0.4048	0.3077	11	7.3042

NaN : ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีเพียงคำตอบเดียว

ตารางที่ ข.5 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 50 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	7	3	0.0255	0.6316
	2	7	3	0.0395	0.7200
	3	7	3	0.0984	0.5789
MOEA/D	1	7	3	0.0059	0.5333
	2	7	3	0.0076	0.5333
	3	7	3	0.0127	0.5333
MOEA/D-BBO	1	7	3	0.0032	0.5556
	2	7	3	0.0007	0.5294
	3	7	3	0.0007	0.5000

ตารางที่ ข.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 50 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.8982	0.9301	0	0	3	1.1633
MOEA/D	0.3861	0.9457	0.0893	0.0351	9	5.1913	
MOEA/D-BBO	0.1430	0.8891	0.5073	0.3509	13	7.4107	

ตารางที่ ข.7 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 100 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	26	9	0.0030	0.6184
	2	26	9	0.0027	0.6316
	3	26	9	0.0036	0.6456
MOEA/D	1	26	9	0.0035	0.5890
	2	26	9	0.0034	0.6164
	3	26	9	0.0032	0.5972
MOEA/D-BBO	1	26	9	0.0027	0.6027
	2	26	9	0.0026	0.5833
	3	26	9	0.0026	0.5821

ตารางที่ ข.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 100 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.2158	0.7523	0.0322	0.0194	51	5.8691
MOEA/D	0.1621	0.7845	0.1817	0.0874	54	21.5868	
MOEA/D-BBO	0.1308	0.7443	0.2645	0.2265	90	27.3661	

ตารางที่ ข.9 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 120 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	22	8	0.0026	0.6806
	2	22	8	0.0035	0.6757
	3	22	8	0.0033	0.6522
MOEA/D	1	22	8	0.0040	0.6571
	2	22	8	0.0025	0.6620
	3	22	8	0.0035	0.6667
MOEA/D-BBO	1	22	8	0.0014	0.6522
	2	22	8	0.0031	0.6418
	3	22	8	0.0039	0.6462

ตารางที่ ข.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 120 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.1448	0.7708	0.0526	0.0261	57	5.5600
MOEA/D	0.1458	0.8649	0.0630	0.0327	53	16.7705	
MOEA/D-BBO	0.1058	0.8478	0.4847	0.2745	58	26.2001	

ตารางที่ ข.11 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 144 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	18	7	0.0050	0.7286
	2	18	7	0.0032	0.7260
	3	18	6	0.0039	0.7308

ตารางที่ ข.11 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 144 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D	1	18	7	0.0035	0.7260
	2	18	7	0.0044	0.7206
	3	18	7	0.0045	0.7297
MOEA/D-BBO	1	18	6	0.0014	0.7059
	2	18	7	0.0013	0.6875
	3	18	7	0.0022	0.7077

ตารางที่ ข.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 133 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 144 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU
							TIME (min)
BBO		0.2088	0.9035	0.1454	0.0504	34	4.4820
MOEA/D		0.1600	0.8568	0.0650	0.0310	47	13.2236
MOEA/D-BBO		0.0967	0.7711	0.3479	0.2519	62	28.8233

ตารางที่ ข.13 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 210 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	38	12	0.0050	0.5402
	2	38	11	0.0047	0.5556
	3	38	11	0.0046	0.5238
MOEA/D	1	38	11	0.0047	0.5455
	2	38	11	0.0035	0.5233
	3	37	11	0.0042	0.5506

ตารางที่ ข.13 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 210 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D-BBO	1	37	11	0.0024	0.5176
	2	38	11	0.0023	0.5181
	3	38	11	0.0037	0.4938

ตารางที่ ข.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 210 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.3271	0.9175	0.0247	0.0080	25	6.5024
MOEA/D	0.2890	0.9036	0.0330	0.0161	37	26.4554	
MOEA/D-BBO	0.1890	0.8339	0.5454	0.3092	48	46.8389	

ตารางที่ ข.15 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 252 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	32	9	0.0032	0.5783
	2	32	10	0.0066	0.5952
	3	31	10	0.0045	0.5696
MOEA/D	1	31	10	0.0043	0.5802
	2	31	10	0.0059	0.5904
	3	31	9	0.0050	0.5769
MOEA/D-BBO	1	31	9	0.0025	0.5541
	2	31	10	0.0028	0.5641
	3	31	9	0.0026	0.5750

ตารางที่ ข.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 252 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.3866	0.9515	0.0444	0.0148	9	5.6721
MOEA/D	0.2897	0.9223	0.0455	0.0222	24	21.5501
MOEA/D-BBO	0.1641	0.8559	0.3543	0.2963	38	41.9470

ตารางที่ ข.17 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 303 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	27	8	0.0073	0.6538
	2	26	8	0.0038	0.6456
	3	26	8	0.0023	0.6316
MOEA/D	1	26	8	0.0055	0.6400
	2	26	8	0.0032	0.6410
	3	26	8	0.0028	0.6364
MOEA/D-BBO	1	26	8	0.0035	0.6543
	2	26	8	0.0012	0.6316
	3	26	8	0.0018	0.6027

ตารางที่ ข.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 303 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.3734	0.9363	0.0128	0.0095	23	6.2600
MOEA/D	0.3673	1.0259	0.2222	0.0762	22	25.8218
MOEA/D-BBO	0.2227	0.9943	0.2443	0.2476	27	43.8860

ตารางที่ ข.19 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 9200 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	30	10	0.0039	0.6593
	2	31	9	0.0021	0.6556
	3	31	10	0.0117	0.6768
MOEA/D	1	30	9	0.0036	0.6250
	2	30	10	0.0022	0.6207
	3	30	10	0.0027	0.6235
MOEA/D-BBO	1	30	9	0.0016	0.6279
	2	30	10	0.0021	0.6279
	3	31	9	0.0016	0.5976

ตารางที่ ข.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 9200 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.3895	0.8910	0.0444	0.0111	11	3.1370
MOEA/D	0.1762	0.9268	0.1096	0.0556	31	19.9172	
MOEA/D-BBO	0.1697	0.8557	0.5052	0.2667	34	20.5228	

ตารางที่ ข.21 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 11040 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	25	8	0.0023	0.6905
	2	25	8	0.0039	0.6786
	3	26	8	0.0026	0.7079

ตารางที่ ข.21 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 11040 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D	1	25	8	0.0021	0.6941
	2	25	8	0.0020	0.6706
	3	25	8	0.0022	0.6667
MOEA/D-BBO	1	25	8	0.0022	0.6538
	2	25	8	0.0028	0.6707
	3	25	8	0.0008	0.6747

ตารางที่ ข.22 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 11040 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.3149	0.9478	0.2885	0.1061	23	3.1859
MOEA/D	0.2056	0.9567	0.0000	0	31	20.2490	
MOEA/D-BBO	0.1703	0.9103	0.3898	0.2273	24	40.5725	

ตารางที่ ข.23 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 13248 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	21	7	0.0025	0.7631
	2	21	7	0.0038	0.7444
	3	21	7	0.0100	0.6974
MOEA/D	1	21	7	0.0017	0.7051
	2	21	7	0.0012	0.7215
	3	21	7	0.0033	0.7262

ตารางที่ ข.23 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 13248 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D-BBO	1	21	7	0.0010	0.7250
	2	21	7	0.0018	0.7051
	3	21	7	0.0014	0.7215

ตารางที่ ข.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 194 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 13248 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัด สมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO		0.4902	1.0268	0.1333	0.0889	11	4.8043
MOEA/D		0.2680	1.0586	0	0	20	18.8897
MOEA/D-BBO		0.2169	0.9280	0.2905	0.2444	14	32.4855

ตารางที่ ข.25 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 380 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 9360 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	40	12	0.0059	0.7092
	2	40	13	0.0062	0.7103
	3	40	12	0.0043	0.6794
MOEA/D	1	40	12	0.0065	0.7071
	2	40	12	0.0073	0.7172
	3	40	12	0.0055	0.7222
MOEA/D-BBO	1	40	12	0.0041	0.6917
	2	40	12	0.0052	0.6940
	3	40	12	0.0037	0.6889

ตารางที่ ข.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 380 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 9360 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.3340	0.8112	0.0698	0.0484	30	9.4915
MOEA/D	0.3014	1.0054	0.0385	0.0161	30	35.8525
MOEA/D-BBO	0.1343	1.0196	0.4212	0.2688	41	55.6771

ตารางที่ ข.27 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 380 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 11232 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	33	10	0.0053	0.7482
	2	33	10	0.0068	0.7619
	3	33	10	0.0039	0.7388
MOEA/D	1	33	10	0.0069	0.7444
	2	33	10	0.0054	0.7388
	3	33	10	0.0062	0.7405
MOEA/D-BBO	1	33	10	0.0084	0.7552
	2	33	10	0.0057	0.7405
	3	33	10	0.0046	0.7536

ตารางที่ ข.28 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 380 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 11232 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.2606	0.9016	0.0476	0.0440	47	8.8494
MOEA/D	0.2648	0.9157	0.1194	0.0755	42	34.3435
MOEA/D-BBO	0.1975	0.9785	0.3815	0.2138	41	59.0423

ตารางที่ ข.29 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 380 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 13500 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	28	9	0.0119	0.7836
	2	28	9	0.0309	0.7710
	3	28	8	0.0118	0.7710
MOEA/D	1	28	9	0.0065	0.7852
	2	28	9	0.0096	0.7910
	3	28	9	0.0132	0.7941
MOEA/D-BBO	1	28	9	0.0085	0.7647
	2	28	8	0.0100	0.7734
	3	28	8	0.0119	0.7752

ตารางที่ ข.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 380 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 13500 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
	BBO	0.5136	0.9051	0	0	12	8.8350
MOEA/D	0.2708	1.1926	0.2064	0.0922	21	35.3649
MOEA/D-BBO	0.2483	1.0033	0.4390	0.2411	34	54.5725

ตารางที่ ข.31 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5400 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	48	14	0.0053	0.7302
	2	48	14	0.0071	0.7045
	3	48	14	0.0067	0.7128

ตารางที่ ข.31 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 5400 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D	1	48	14	0.0065	07312
	2	48	14	0.0049	0.7228
	3	48	14	0.0059	0.7213
MOEA/D-BBO	1	48	14	0.0039	0.7095
	2	48	14	0.0045	0.7268
	3	48	14	0.0034	0.7079

ตารางที่ ข.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 5400 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.2629	0.8812	0.0378	0.0324	63	12.5100
MOEA/D	0.2598	0.9335	0.0397	0.0231	53	48.6716	
MOEA/D-BBO	0.1479	0.8936	0.3253	0.2778	63	71.9746	

ตารางที่ ข.33 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิตร 6480 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	40	12	0.0056	07596
	2	40	12	0.0053	0.7500
	3	40	12	0.0060	0.7543
MOEA/D	1	40	12	0.0056	0.7557
	2	40	12	0.0045	0.7528
	3	40	12	0.0041	07586

ตารางที่ ข.33 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6480 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
MOEA/D-BBO	1	40	12	0.0033	07440
	2	40	12	0.0051	0.7301
	3	40	12	0.0057	07556

ตารางที่ ข.34 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6480 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
		BBO	0.2096	0.9360	0	0	67	12.4315
MOEA/D	0.2330	0.9862	0.1449	0.0749	47	40.9492	
MOEA/D-BBO	0.1424	0.9561	0.4140	0.2584	55	59.2926	

ตารางที่ ข.35 คำตอบที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7776 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		N_w	N_s	B_b	MITR
BBO	1	34	10	0.0094	0.7870
	2	34	10	0.0187	0.7844
	3	34	10	0.0106	0.7811
MOEA/D	1	34	10	0.0093	0.7840
	2	34	10	0.0088	0.7933
	3	34	10	0.0109	0.7857
MOEA/D-BBO	1	34	10	0.0078	0.7931
	2	34	10	0.0054	0.7707
	3	34	10	0.0085	0.7917

ตารางที่ ข.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 408 ชั้นงาน รอบเวลาการ
ผลิต 7776 หน่วยเวลา

ตัวชี้วัด สมรรถนะ อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
BBO	0.3188	0.9636	0.0420	0.0120	31	12.1502
MOEA/D	0.3031	0.9758	0.1163	0.0723	51	38.8594
MOEA/D-BBO	0.2591	0.8964	0.5032	0.2490	37	62.4346



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเพ็ญนภัส จิรัชัย เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรม การอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ในปี พ.ศ. 2555 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าร่วมงานกับบริษัท โกลเด้นซีโพรเซ่นฟู้ด จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร ในตำแหน่งหัวหน้าแผนกการวางแผนการผลิตจนถึงปี พ.ศ.2556 รวมเป็นระยะเวลา 1 ปี และได้ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

