

การจัดสมดุคที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน  
ด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์



นายณัฐชัย โยธาบริบาล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

MULTI-OBJECTIVE BALANCING ON MIXED-MODEL PARALLEL ASSEMBLY LINES  
WITH BIOGEOGRAPHY-BASED ALGORITHM

Mr. Nutthachai Yothaboriban



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจาย ตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์
โดย	นายณัฐชัย โยธาบริบาล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริง ปรีชานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามะเสริญวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ริจิรวณิช)

ณัฐชัย โยธาบริหาร : การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์. (MULTI-OBJECTIVE BALANCING ON MIXED-MODEL PARALLEL ASSEMBLY LINES WITH BIOGEOGRAPHY-BASED ALGORITHM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ปารเมศ ชูติมา, 147 หน้า.

สายการประกอบแบบขนานเป็นระบบการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบเส้นตรงจำนวนสองเส้นที่จัดวางขนานกันและได้รับการจัดสมดุลร่วมกัน โดยในการจัดสมดุลสถานีนงานบางส่วนจากทั้งสองสายการประกอบจะถูกยุบรวมกันไว้ ส่งผลให้ระบบการผลิตนี้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับสายการประกอบสองเส้นที่เป็นอิสระต่อกัน

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) เป็นเมตาฮิวริสติกเชิงวิวัฒนาการที่ได้รับแนวคิดมาจากพฤติกรรมการอพยพของสิ่งมีชีวิตระหว่างเกาะต่างๆ งานวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึม BBO เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ ทำให้จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีนงานน้อยที่สุด ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนงานสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของงานสูงที่สุด พร้อมกันนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของ BBO กับอัลกอริทึมอื่นๆ ที่เป็นที่ยอมรับจำนวน 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (NSGA-II) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK)

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลประเภทนี้สูงกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต การกระจายตัวของคำตอบ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5370232421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: MIXED-MODEL PARALLEL ASSEMBLY LINES / MULTI-OBJECTIVE LINE  
BALANCING / BIOGEOGRAPHY-BASED OPTIMIZATION

NUTTHACHAI YOTHABORIBAN: MULTI-OBJECTIVE BALANCING ON MIXED-MODEL PARALLEL ASSEMBLY LINES WITH BIOGEOGRAPHY-BASED ALGORITHM. ADVISOR: ASSOC. PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 147 pp.

Parallel assembly lines are the production system which consists of two straight lines located in parallel and balanced together. Some of workstations from both lines are combined when balancing. As a result, the production system has higher efficiency when compared with two independent straight lines.

Biogeography-based Optimization (BBO) is an evolutionary metaheuristic inspired by migration behavior of species among islands. This research presents a BBO algorithm for solving multi-objective mixed-model parallel assembly line balancing problem. Four objectives are optimized simultaneously in balancing; i.e. minimize number of workstations, minimize number of stations, maximize balance of workload between workstations, and maximize work relatedness. The performance of BBO is compared with other three well-known algorithms, namely Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO), and Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge (PSONK).

The results from experiments clearly show that BBO has better performances than all other algorithms in terms of convergence to the Pareto optimal set, spread of solutions, ratio of non-dominated solutions, and computation time to solution.

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

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

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้มอบความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณพิชญ์ เอกมหาชัย สำหรับความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ดังที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งอยู่เบื้องหลังความสำเร็จของผู้วิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ต
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	6
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย .....	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.1 ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน .....	8
2.2 วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล.....	13
2.3 สตรีงคำตอบและการถอดรหัส.....	22
2.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization).....	28
2.5 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ .....	30
2.6 การสร้างความหลากหลายของประชากรคำตอบด้วยวิธีการวัดระยะความหนาแน่น .....	33
2.7 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม.....	35
2.8 เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อ roulette .....	37
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	39

บทที่ 3 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัว ของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ใน การแก้ปัญหาการจัดสมดุล .....	43
3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์.....	43
3.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล.....	44
3.3 ตัวอย่างการใช้งาน BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล .....	49
บทที่ 4 อัลกอริทึมอื่นๆ ที่นำมาใช้ทดลองแก้ปัญหาการจัดสมดุล.....	65
4.1 อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ II.....	65
4.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง.....	69
4.3 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ.....	72
บทที่ 5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล.....	75
5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	75
5.2 วิธีการทดลอง .....	76
5.3 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่างๆ.....	76
5.4 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชิ้นงาน.....	77
5.4.1 เมื่อรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 หน่วยเวลา.....	77
5.4.2 รอบเวลาการผลิตขนาด 22 หน่วยเวลา .....	80
5.4.3 รอบเวลาการผลิตขนาด 30 หน่วยเวลา .....	83
5.5 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 104 (53+51) ชิ้นงาน .....	86
5.5.1 รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา.....	86
5.5.2 รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา.....	89
5.5.3 รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา.....	91
5.6 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 146 (75+71) ชิ้นงาน .....	93
5.6.1 รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา .....	93
5.6.2 รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา .....	96
5.6.3 รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา .....	99



5.7 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน.....	102
5.7.1 รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา.....	102
5.7.2 รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา.....	105
5.7.3 รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา.....	108
5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	111
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	114
6.1 บทสรุปงานวิจัย.....	114
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	116
รายการอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก.....	122
ภาคผนวก ก ข้อมูลพื้นฐานของปัญหาที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม.....	123
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	147

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม.....	6
ตารางที่ 2.1 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ A .....	10
ตารางที่ 2.2 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ B.....	11
ตารางที่ 2.3 เวลาชิ้นงานรวมที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่าง .....	20
ตารางที่ 2.4 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตร่วมกับเวลาชิ้นงานรวมที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ พร้อมค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย .....	20
ตารางที่ 2.5 รายละเอียดเครือข่ายงานในสถานีงานต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างสตริงคำตอบในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB..	22
ตารางที่ 2.7 แผนภาพลำดับก่อนหลังของชิ้นงานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB23	
ตารางที่ 2.8 เมตริกซ์ลำดับก่อนหลังที่ผ่านการปรับค่าหลังจากเลือกชิ้นงาน A1 เป็นชิ้นงานลำดับแรก .....	25
ตารางที่ 2.9 เมตริกซ์ลำดับก่อนหลังที่ผ่านการปรับค่าหลังจากเลือกชิ้นงาน A2 เป็นชิ้นงานลำดับที่ 2 .....	26
ตารางที่ 2.10 ลำดับที่ของชิ้นงานต่างๆ ในการถูกจัดลงสถานีงานที่ได้จากการถอดรหัสสตริงคำตอบ .....	26
ตารางที่ 2.11 ผลการจัดสรรชิ้นงานลงสู่สถานีงาน .....	26
ตารางที่ 2.12 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบตัวอย่าง .....	28
ตารางที่ 2.13 ตัวอย่างการจัดอันดับคำตอบของปัญหาในงานวิจัย .....	32
ตารางที่ 2.14 การคำนวณค่าต่างๆ ในการสร้างวงล้อคู่ .....	38
ตารางที่ 3.1 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ A .....	50
ตารางที่ 3.2 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ B.....	51
ตารางที่ 3.3 เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น $Y$ และเซตสตริงคำตอบชั่วคราว $Z$ ที่คัดลอกออกมา พร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ .....	52

ตารางที่ 3.4 ผลการกำหนดค่าความแข็งแกร่ง ค่าสปีชีส์เคาท์ และค่าต่างๆ ที่ใช้ในการอพยพ.....	52
ตารางที่ 3.5 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 4 เพื่อทำการอพยพ.....	54
ตารางที่ 3.6 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ.....	54
ตารางที่ 3.7 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ.....	55
ตารางที่ 3.8 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ.....	57
ตารางที่ 3.9 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 4.....	57
ตารางที่ 3.10 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 3.....	58
ตารางที่ 3.11 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2.....	58
ตารางที่ 3.12 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 1.....	59
ตารางที่ 3.13 เซตสตริงคำตอบชั่วคราว $Z$ หลังอพยพ.....	60
ตารางที่ 3.14 ค่าที่ใช้ประกอบการมีเวตชันของสตริงคำตอบชั่วคราว $Z$ หลังอพยพ.....	60
ตารางที่ 3.15 การมีเวตชันสตริง $z'_3$ .....	61
ตารางที่ 3.16 สตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการแก้ปัญหา.....	62
ตารางที่ 3.17 ผลการจัดอันดับสตริงคำตอบทั้งหมดในเจนเนอเรชันที่ 1.....	63
ตารางที่ 3.18 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาที่ผ่านมา (Elitist) สิ้นสุดที่เจนเนอเรชันที่ 1.....	63
ตารางที่ 3.19 เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น $Y$ ของเจนเนอเรชันที่ 2.....	63
ตารางที่ 3.20 คำตอบที่ดีที่สุดของเจนเนอเรชันที่ 2.....	64
ตารางที่ 3.21 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาที่ผ่านมา (Elitist) สิ้นสุดที่เจนเนอเรชันที่ 2.....	64
ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	75
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่างๆ.....	77
ตารางที่ 5.3 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา.....	78
ตารางที่ 5.4 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา.....	79

ตารางที่ 5.5 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา.....	79
ตารางที่ 5.6 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา.....	80
ตารางที่ 5.7 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา.....	82
ตารางที่ 5.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา.....	83
ตารางที่ 5.9 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา.....	84
ตารางที่ 5. 10 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา.....	85
ตารางที่ 5.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา.....	86
ตารางที่ 5.12 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา.....	87
ตารางที่ 5.13 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา.....	88
ตารางที่ 5.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา.....	88
ตารางที่ 5.15 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา.....	89
ตารางที่ 5.16 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา.....	90
ตารางที่ 5.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา.....	91
ตารางที่ 5.18 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา.....	92

ตารางที่ 5.19 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 4,676 หน่วยเวลา.....	93
ตารางที่ 5.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา.....	93
ตารางที่ 5.21 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา.....	94
ตารางที่ 5.22 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 29 หน่วยเวลา .....	95
ตารางที่ 5.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา.....	96
ตารางที่ 5.24 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา.....	97
ตารางที่ 5.25 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 34 หน่วยเวลา .....	98
ตารางที่ 5.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา.....	99
ตารางที่ 5.27 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา.....	100
ตารางที่ 5.28 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 43 หน่วยเวลา .....	101
ตารางที่ 5.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา.....	102
ตารางที่ 5.30 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา .....	103
ตารางที่ 5.31 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา.....	104
ตารางที่ 5.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา.....	105

ตารางที่ 5.33 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา .....	106
ตารางที่ 5.34 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา.....	107
ตารางที่ 5.35 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา.....	108
ตารางที่ 5.36 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา .....	109
ตารางที่ 5.37 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา.....	110
ตารางที่ 5.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา.....	111
ตาราง ก.1 ข้อมูลพื้นฐานของปัญหาที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม .....	123
ตาราง ก. 2 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 25-24 ชั้นงาน .....	123
ตาราง ก.3 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 25-24 ชั้นงาน .....	125
ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 53-51 ชั้นงาน.....	126
ตาราง ก.5 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 53-51 ชั้นงาน .....	129
ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน.....	131
ตาราง ก.7 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน .....	134
ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน .....	137
ตาราง ก.9 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน.....	143

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ A.....	10
รูปที่ 2.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ B.....	11
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างผลการจัดสมดุลที่เป็นไปได้บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้รอบเวลาการผลิตรวม 10 หน่วยเวลา.....	13
รูปที่ 2.4 ผังการจัดวางสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ที่ได้จากการถอดรหัสสตริง คำตอบตัวอย่าง .....	28
รูปที่ 2.5 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต.....	30
รูปที่ 2.6 การจัดอันดับคำตอบ 3-6.....	33
รูปที่ 2.7 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว.....	37
รูปที่ 2.8 วงล้อรูเล็ต .....	39
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO.....	48
รูปที่ 3.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ A.....	50
รูปที่ 3.3 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ B.....	51
รูปที่ 3.4 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงอพยพออก.....	53
รูปที่ 3.5 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงไปทำการมิวเทชัน .....	61
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II.....	68
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของ DPSSO.....	71
รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK.....	74
รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชิ้นงาน รอบ เวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา.....	79
รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชิ้นงาน รอบ เวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา.....	82

รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา.....	85
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา.....	87
รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา.....	90
รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา.....	92
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา.....	95
รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา.....	98
รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา.....	101
รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา.....	104
รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา.....	107
รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา.....	110



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สายการประกอบ (Assembly Lines) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มของสถานีงานที่จัดวางต่อเนื่องกัน และมีการเชื่อมโยงกันด้วยสายพานลำเลียงหรือระบบขนย้ายวัสดุอื่นๆ ที่คอยทำหน้าที่ลำเลียงชิ้นงานระหว่างสถานีงาน โดยชิ้นงานแต่ละชิ้นจะเริ่มถูกประกอบขึ้นที่สถานีงานแรกและถูกส่งไปประกอบต่อในสถานีงานถัดๆ ไปในทุกรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) พร้อมกับเริ่มประกอบชิ้นงานใหม่อย่างต่อเนื่องในทุกๆ รอบเวลาการผลิตนี้เช่นกัน เมื่อแต่ละสถานีงานรับชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าเข้ามา ก็จะทำการประกอบชิ้นงานนั้นตามชิ้นงาน (Task) ที่ได้รับมอบหมาย ซึ่งใช้เวลารวมไม่เกินรอบเวลาการผลิต จากนั้นเมื่อสิ้นสุดรอบเวลาการผลิตแล้วก็จะส่งชิ้นงานดังกล่าวไปยังสถานีงานถัดไป พร้อมกับรับชิ้นงานจากสถานีงานก่อนหน้าเข้ามาประกอบตามชิ้นงานเดิม วนซ้ำเป็นวงจรเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ชิ้นงานแต่ละชิ้นเมื่อได้ผ่านการประกอบจากทุกสถานีงานแล้วก็จะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จุดสิ้นสุดของสายการประกอบ ทั้งนี้ การจัดสรรชิ้นงานให้กับสถานีงานต่างๆ ในปริมาณที่เท่าๆ กันเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่กำหนดโดยที่ไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดต่างๆ เช่น รอบเวลาการผลิต ลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน เป็นต้น เรียกว่า การจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing)

เดิมทีนั้นสายการประกอบมีไว้ใช้สำหรับผลิตสินค้ารูปแบบมาตรฐานในปริมาณมากเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพด้านต้นทุน แต่ด้วยนวัตกรรมด้านการผลิตที่เกิดขึ้นในระยะหลังก็ได้ทำให้สายการประกอบสามารถรองรับการผลิตสินค้าตามคำสั่งในปริมาณที่ไม่มากได้ด้วยเช่นกัน รวมทั้งทำให้เกิดกลยุทธ์การผลิตสินค้าประเภทที่ถูกค้ำกำหนดรูปแบบเองในปริมาณมากตามมาอีกด้วย (Boysen, 2007) ขณะเดียวกัน หากพิจารณาในด้านของการจัดวาง สายการประกอบในยุคแรกมักมีการจัดวางในแนวเส้นตรงหรือที่เรียกว่าสายการประกอบเส้นตรง (Straight Line) เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการไหลของวัสดุ แต่ในภายหลังก็ได้มีการพัฒนาสายการประกอบรูปแบบใหม่ๆ อีกหลายประเภทเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านผลิตภาพ ความยืดหยุ่น และการตอบสนอง (Becker และ Scholl, 2003) ซึ่งสายการประกอบแต่ละประเภทต่างก็มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เช่น สายการประกอบรูปตัวยู (U-shaped Line) (Miltenburg และ Wijngaard, 1994) สายการประกอบแบบสองด้าน (Two-sided Line) (Bartholdi, 1993) สถานีงานขนาน (Parallel Workstations) (McMullen และ Frazier, 1998) รวมไปถึงสายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines) (Gökçen และคณะ, 2006) ที่ผู้วิจัยจะนำมาศึกษาต่อยอดในงานวิจัยนี้

ในองค์กรที่ใช้สายการประกอบเส้นตรงในการผลิตสินค้า เมื่อใดก็ตามที่ความต้องการสินค้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจนกำลังการผลิตที่มีอยู่ไม่เพียงพอ หากแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มสถานีนงานใหม่จำนวนหลายสถานีนงานขนานเข้ากับสถานีนงานที่เป็นคอขวดอาจทำให้เกิดความยุ่งยากในการจัดการพื้นที่ผลิต ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มสายการประกอบเส้นใหม่ขนานเข้ากับสายการประกอบเดิม (Gökçen และคณะ, 2006) ทั้งนี้ โดยปกติแล้วในอดีตที่ผ่านมาสายการประกอบที่จัดวางขนานกันก็จะมีภาระงานที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกันแต่อย่างใด จนกระทั่ง Süer (1998) ได้นำเสนอแนวคิดในการออกแบบสายการประกอบที่ขนานกันหลายๆ เส้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด รวมไปถึง Gökçen และคณะ (2006) ที่ได้เผยแพร่แนวคิดในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสายการประกอบที่ขนานกันอยู่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมให้สูงขึ้นกว่ากรณีที่สายการประกอบแต่ละเส้นเป็นอิสระต่อกัน

สายการประกอบเส้นตรงสองเส้นที่จัดวางขนานกัน หากได้รับการจัดสมดุลร่วมกันโดยนอกจากจะให้แต่ละสถานีนงานบรรจุชิ้นงานของสายการประกอบที่สถานีนงานนั้นตั้งอยู่ดังเช่นปกติแล้วยังอนุญาตให้มีสถานีนงานที่บรรจุชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบผสมกันด้วย จะทำให้มีโอกาสรวบรวมสถานีนงานที่ขนานกันอยู่บางส่วนให้เป็นสถานีนงานเดียวกันได้ และส่งผลให้จำนวนสถานีนงานรวมของทั้งสองสายการประกอบลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่แต่ละสายการประกอบได้รับการจัดสมดุลแยกออกจากกัน สายการประกอบเส้นตรงสองเส้นที่มีความสัมพันธ์กันผ่านทางสถานีนงานที่บรรจุชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบผสมกันเช่นนี้น้อยๆหนึ่งสถานีนงาน จะเรียกรวมกันเป็นระบบการผลิตที่มีชื่อว่า “สายการประกอบแบบขนาน” โดยสถานีนงานที่บรรจุชิ้นงานของสายการประกอบเดียวจะเรียกว่า “สถานีนงานแยก” ขณะที่สถานีนงานที่บรรจุชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบเรียกว่า “สถานีนงานร่วม” ในที่นี้กำหนดให้สถานีนงานทั้งสองประเภทมีพนักงานประจำอยู่สถานีนงานละ 1 คนพนักงานในสถานีนงานแยกจะทำงานอยู่บนสายการประกอบที่สถานีนงานนั้นตั้งอยู่โดยตลอด แต่สำหรับกรณีสถานีนงานร่วม พนักงานจะเริ่มต้นการทำงานในแต่ละรอบการผลิตด้วยการประกอบชิ้นงานบนสายการประกอบแรกจนเสร็จ แล้วหันไปประกอบชิ้นงานบนอีกสายการประกอบ และเมื่อเสร็จสิ้นแล้วก็หันกลับมาที่สายการประกอบแรกอีกครั้งเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานในรอบการผลิตถัดไป ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับสายการประกอบเส้นตรงหลายๆ เส้นที่ดำเนินงานอย่างเป็นอิสระต่อกันแล้ว สายการประกอบแบบขนานสามารถสร้างประโยชน์ให้กับองค์กรได้อย่างหลากหลาย เช่น ช่วยลดจำนวนสถานีนงาน จำนวนแรงงาน และเวลาสูญเสีย รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพและผลิตภาพเป็นต้น (Gökçen และคณะ, 2006; Kara และคณะ, 2010) อย่างไรก็ตาม ในการจัดวางสายการประกอบแบบขนานอาจจำเป็นต้องสร้างสถานีนงานว่างให้ชิ้นงานผ่านโดยไม่มีการประกอบใดๆ เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดต้นทุนเพิ่มเติมในด้านพื้นที่และอุปกรณ์ ดังนั้น สายการประกอบประเภทนี้จึงอาจไม่เหมาะแก่การใช้งานในกรณีที่ชิ้นงานและสถานีนงานมีขนาดใหญ่อย่างเช่นในอุตสาหกรรมยานยนต์ แต่

จะเหมาะกับการใช้เพื่อผลิตสินค้าที่มีขนาดเล็กและมีระบบขนย้ายวัสดุที่มีราคาไม่สูงมากนัก เช่น โทรศัพท่มือถือ คอมพิวเตอร์พกพา เป็นต้น (Scholl และ Boysen, 2009)

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานนั้นเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) ซึ่งแทบเป็นไปได้ที่จะหาคำตอบที่ดีที่สุดในระยะเวลานาน โดยเฉพาะกับปัญหาขนาดใหญ่ที่มีคำตอบที่เป็นไปได้เป็นจำนวนมากมายมหาศาล ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักอาศัยฮิวริสติกมาช่วยแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีในระดับที่น่าพอใจหรืออาจได้คำตอบที่ดีที่สุดในบางครั้งโดยที่ใช้เวลาไม่นานจนเกินไปนัก ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย Gökçen และคณะ (2006) พร้อมฮิวริสติกสำหรับจัดสมดุลเพื่อให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด และหลังจากนั้นเป็นต้นมาได้มีวิธีการแก้ปัญหาอีกหลายวิธีที่ได้รับการเผยแพร่ในงานวิจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโมเดลเครือข่าย (Network Model) (Benzer และคณะ, 2007) กระบวนการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch and Bound) (Scholl และ Boysen, 2009) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization) (Baykasoğlu และคณะ, 2009) ฮิวริสติกแบบการค้นหากระจาย (Scatter Search Based Heuristic) (Guo และ Tang, 2009) อัลกอริทึมการค้นหาแบบทาบู่ (Tabu Search Algorithm) (Özcan และคณะ, 2009; Ismail และคณะ, 2011) รวมไปถึงวิธีการโปรแกรมเป้าหมาย (Goal Programming Approach) (Kara และคณะ, 2010)

อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าวิธีการทั้งหมดข้างต้นล้วนมีไว้ใช้สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่สายการประกอบแต่ละเส้นเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว (Single-model Assembly Line) ซึ่งเป็นสายการประกอบรูปแบบพื้นฐานที่มีไว้สำหรับผลิตสินค้ามาตรฐานในปริมาณมากเพียงรุ่นเดียวเท่านั้น แต่ในปัจจุบัน สินค้าจำนวนมากในท้องตลาดเป็นสินค้าประเภทที่ลูกค้าสามารถกำหนดองค์ประกอบต่างๆ เช่น สี ลวดลาย ประเภทวัสดุ ฯลฯ ได้ด้วยตัวเอง สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-model Assembly Line) ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายสูงเหล่านี้แทนที่สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว โดยสายการประกอบประเภทนี้มีการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีความยืดหยุ่นสูง รวมทั้งใช้พนักงานที่มีทักษะหลากหลายคอยควบคุมดูแล ทำให้สามารถรองรับการผลิตสินค้าหลายรุ่นที่มีองค์ประกอบแตกต่างกันด้วยลำดับการผลิตที่ไม่เฉพาะเจาะจงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ทำให้ประโยชน์ของระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนสูญเสียไป (Boysen และคณะ, 2009) ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมหลายๆ เส้น ด้วยการดำเนินงานสายการประกอบเหล่านี้ภายใต้แนวคิดของสายการประกอบแบบขนาน และเรียกรวมกันเป็นระบบการผลิตที่มีชื่อว่า “สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน” (Mixed-model Parallel Assembly Lines)

นอกจากข้อสังเกตที่ว่าวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่ปรากฏในงานวิจัยต่างๆ ล้วนมีไว้สำหรับจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์เดี่ยวแล้ว ยังมีอีกประเด็นหนึ่งที่ น่าสนใจก็คือวิธีการแก้ปัญหาเหล่านั้นมักกำหนดวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลเพียงวัตถุประสงค์เดียวนั้นคือทำให้สายการประกอบมีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด แต่ในทางปฏิบัติอาจมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญอื่นๆ ที่ผู้แก้ปัญหาต้องการพิจารณาควบคู่ไปด้วย ซึ่งหากในการจัดสมดุลสามารถทำให้ทุกๆ วัตถุประสงค์มีความเหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กันได้ ย่อมสร้างความพึงพอใจให้กับผู้แก้ปัญหาได้มากกว่าการกำหนดเพียงวัตถุประสงค์เดียว ดังนั้น การศึกษาวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานภายใต้หลายวัตถุประสงค์จึงเป็นอีกแนวทางการการศึกษาที่น่าสนใจเช่นเดียวกัน

สายการประกอบแบบขนานมีการจัดวางอยู่ในรูปของสถานี (Station) ที่จัดเรียงต่อเนื่องกัน โดยแต่ละสถานีอาจประกอบไปด้วยสถานีงานแยกอย่างมาก 2 สถานีงาน หรือสถานีงานร่วม 1 สถานีงานอย่างใดอย่างหนึ่ง ด้วยเหตุนี้ ผลการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานหลายๆ แบบที่มีจำนวนสถานีงาน (Workstation) เท่ากัน จึงอาจมีความยาวของสายการประกอบที่ไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งจะแปรผันตามจำนวนสถานีที่มีอยู่ (Scholl และ Boysen, 2009) ดังนั้น ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน นอกจากจะพยายามทำให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุดแล้ว จึงควรมุ่งเน้นให้มีจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดควบคู่ไปด้วย เพื่อให้สายการประกอบที่ได้มีขนาดสั้นที่สุดหรือมีการใช้พื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุด ขณะเดียวกัน ความสมดุลของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีงานก็เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยหากสายการประกอบถูกจัดสมดุลภายใต้วัตถุประสงค์เพื่อให้แต่ละสถานีงานมีภาระงานในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ย่อมสร้างความเท่าเทียมและความพึงพอใจให้กับพนักงานทุกคนได้มากกว่า นอกจากนี้ วัตถุประสงค์ในด้านความสัมพันธ์ของงานก็เป็นอีกวัตถุประสงค์ที่น่าสนใจในการจัดสมดุล โดยหากสามารถทำให้ชิ้นงานในแต่ละสถานีงานเป็นชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์กันมากๆ จะทำสถานีงานเหล่านั้นอาศัยทักษะการทำงานหลักที่เกี่ยวข้องเพียงทักษะเดียวหรือรวมถึงทักษะรองอื่นๆ อีกเพียงไม่กี่ทักษะ ซึ่งจะสอดคล้องกับในด้านของพนักงาน ที่แต่ละคนย่อมมีทักษะที่ถนัดที่สุดและถนัดรองๆ ลงไปเช่นกัน วัตถุประสงค์นี้จะทำให้ผู้จัดการสายการประกอบสามารถมอบหมายให้พนักงานแต่ละคนทำงานในสถานีงานที่เหมาะสมตรงตามความถนัด ซึ่งจะทำให้พนักงานเกิดความพึงพอใจและทำให้การดำเนินงานของสายการประกอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่มาข้างต้น วิชยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน (Multi-objective Mixed-model Parallel Assembly Lines Problem) โดยวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลมีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามระดับความสำคัญในการทำให้เหมาะสมที่สุด วัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่งซึ่งประกอบไปด้วย 1 วัตถุประสงค์ ที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุดเป็นหลักมีจำนวน 1 วัตถุประสงค์ ได้แก่ การทำให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ตามด้วยวัตถุประสงค์ระดับที่สองจำนวน 1 วัตถุประสงค์ ได้แก่ การทำให้มี

จำนวนสถานีน้อยที่สุด และวัตถุประสงค์ระดับที่สาม ซึ่งประกอบไปด้วย 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ การทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด และการทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด พร้อมกันนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการอพยพย้ายที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิต เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดย BBO นั้นได้รับการคิดค้นเมื่อไม่กี่ปีผ่านมาโดย Simon (2008) และได้ถูกนำไปใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์อย่างหลากหลายดังที่ปรากฏในงานวิจัยต่างๆ ซึ่งบ่อยครั้งพบว่ามีความสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่เหนือกว่าอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมอื่นๆ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า BBO นั้นยังไม่เคยถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแต่อย่างใด การนำ BBO มาใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานในงานวิจัยนี้จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเพื่อเป็นการศึกษาสมรรถนะของ BBO ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ ผู้วิจัยจึงนำเอา BBO ไปใช้ในการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง เปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมอื่นๆ ได้แก่ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge: PSONK) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่า BBO รวมถึงอัลกอริทึมอื่นๆ นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหานี้มากน้อยเพียงใด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1. ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ทำการศึกษา เป็นปัญหาประเภทที่มีการกำหนดรอบเวลาการผลิตมาให้ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้เหมาะสมที่สุด 4 วัตถุประสงค์ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามระดับความสำคัญ ได้แก่
  - วัตถุประสงค์ระดับที่ 1: ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด
  - วัตถุประสงค์ระดับที่ 2: ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด และ
  - วัตถุประสงค์ระดับที่ 3: แบ่งออกเป็น 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ (1) ทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด และ (2) ทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด
 โดยในการแก้ปัญหาจะมุ่งเน้นให้วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 มีความเหมาะสมที่สุดเป็นหลัก ตามด้วยวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างมีจำนวน 4 อัลกอริทึม ได้แก่ BBO NSGA-II DPSO และ PSONK โดยแต่ละอัลกอริทึมจะได้รับการชี้วัดสมรรถนะด้วยตัวชี้วัด 4 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (Convergence to the Pareto Optimal Set) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread Measurement) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ (Computation Time to Solution)
3. การทดลองใช้งานอัลกอริทึมในแก้ปัญหาตัวอย่าง เป็นการทดลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนด้วยภาษา C++
4. ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึมมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ปัญหา แต่ละปัญหาแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกันดัง ตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม

ปัญหา	ที่มา	จำนวนชิ้นงาน บนสายการประกอบ 1 และ 2	จำนวนรุ่นสินค้า บนสายการประกอบ 1 และ 2	รอบเวลาการผลิต
1	Rosenberg และ Ziegler (1992)	25 และ 24 (รวม 49)	2 และ 2	14, 22, 30
2	Hahn (1972)	53 และ 51 (รวม 104)	2 และ 2	2338, 3507, 4676
3	Wee และ Magazine (1981)	75 และ 71 (รวม 146)	4 และ 4	29, 34, 43
4	Arcus (1965)	111 และ 107 (รวม 218)	3 และ 3	5785, 6540, 7162

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. คิดค้นวิธีการจัดสมดุคที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน และวิธีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม BBO NSGA-II DPSO และ PSONK ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคดังกล่าว
3. เขียนโปรแกรมอัลกอริทึมต่างๆ ด้วยภาษา C++
4. ทดลองใช้โปรแกรมอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง
5. ประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง
6. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้

1. ลดความยุ่งยากและระยะเวลาในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน
2. สามารถนำเอาวิธีการจัดสมดุคสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่นำเสนอ ไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายการประกอบในอุตสาหกรรมจริง
3. สามารถนำเอาผลที่ได้จากงานวิจัยไปเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการจัดสมดุครูปแบบใหม่ๆ รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งครอบคลุมถึงเนื้อหาส่วนต่างๆ ดังนี้

1. ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน
2. วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล
3. สตรีงคำตอบและการถอดรหัส
4. การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์
5. การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบำ
6. การสร้างความหลากหลายของประชากรคำตอบด้วยวิธีการวัดระยะความหนาแน่น
7. การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม
8. เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อรูเล็ต
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เป็นระบบการผลิตที่ประกอบไปด้วยสายการประกอบเส้นตรงสองเส้นที่จัดวางขนานกันและได้รับการจัดสมดุลร่วมกัน โดยที่แต่ละสายการประกอบเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งมีหน้าที่ผลิตสินค้าหลายรุ่นสลับไปมาได้อย่างอิสระ ไม่มีลำดับการผลิตที่เฉพาะเจาะจง

เนื่องจากแต่ละสายการประกอบมีการผลิตสินค้าหลายรุ่น ซึ่งสินค้าแต่ละรุ่นก็มีแผนภาพลำดับก่อนหลังที่แตกต่างกันไป ดังนั้น แผนภาพลำดับก่อนหลังของแต่ละสายการประกอบที่ใช้ประกอบการจัดสมดุล จะอยู่ในรูปของแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) ซึ่งเป็นแผนภาพตัวแทนของสายการประกอบที่สามารถใช้สื่อถึงแผนภาพของสินค้าทุกรุ่นได้ในแผนภาพเดียว และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละชิ้นงานอาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า เวลาชิ้นงานที่ใช้ในการจัดสมดุลจึงกำหนดให้อยู่ในรูปของเวลาชิ้นงานร่วม (Combined Task Time) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักมาจากเวลาชิ้นงานของสินค้าทุกรุ่น โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Sparling และ Miltenburg, 1998)



กำหนดให้

$M$  คือ จำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบเดี่ยวผลิตภัณฑ์ผสม

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

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

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

เวลาชิ้นงานรวม  $i$  ( $t_i$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

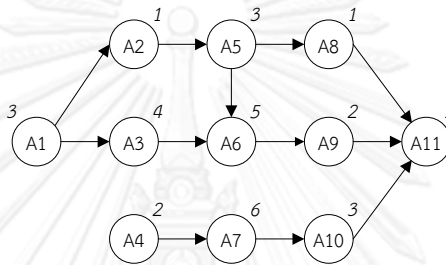
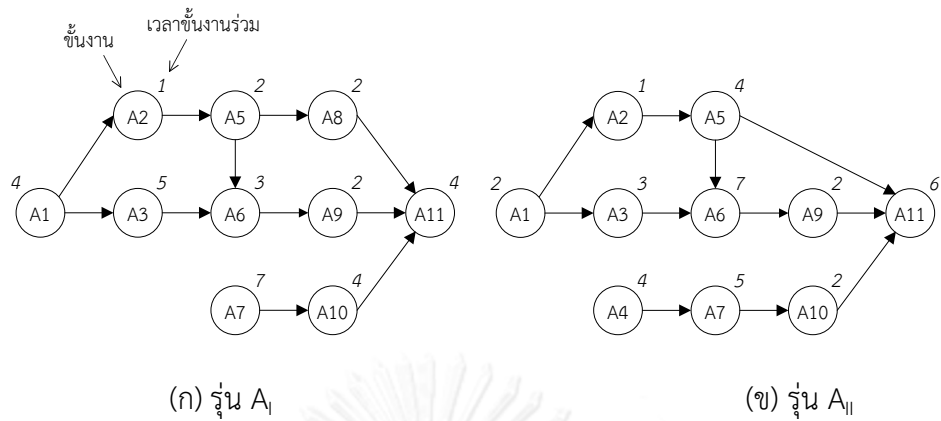
$$t_i = \sum_{m=1}^M q_m t_{im} \quad (1)$$

ในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ที่ขนานกันอยู่ สายการประกอบ A มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นได้แก่ รุ่น  $A_I$  และ  $A_{II}$  ซึ่งมีแผนภาพลำดับก่อนหลังดังรูปที่ 2.2 (ก) และ 2.2 (ข) ตามลำดับ และมีแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 2.2 (ค) สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น  $A_I$  ( $q_{A_I}$ ) และ  $A_{II}$  ( $q_{A_{II}}$ ) มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  เท่ากัน เวลาชิ้นงานของสินค้าแต่ละรุ่นและเวลาชิ้นงานร่วมแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

ตัวอย่างการคำนวณเวลาชิ้นงานรวม A1 ( $t_{A1}$ )

$$t_{A1} = \sum_{m=A_I}^{A_{II}} q_m t_{A1,m} = q_{A_I} t_{A1,A_I} + q_{A_{II}} t_{A1,A_{II}} = \frac{1}{2}(4) + \frac{1}{2}(2) = 3$$

สำหรับสายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ รุ่น  $B_I$  และ  $B_{II}$  ซึ่งมีแผนภาพลำดับก่อนหลังดังรูปที่ 2.2 (ก) และ 1.2 (ข) ตามลำดับ และมีแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 1.2 (ค) สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น  $B_I$  ( $q_{B_I}$ ) และ  $B_{II}$  ( $q_{B_{II}}$ ) มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{3}$  และ  $\frac{2}{3}$  ตามลำดับ เวลาชิ้นงานของสินค้าแต่ละรุ่นและเวลาชิ้นงานร่วมแสดงอยู่ในตารางที่ 2.2

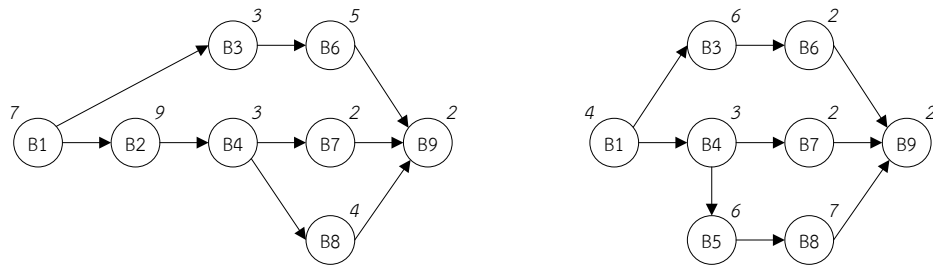


(ค) แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม

รูปที่ 2.1 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ A

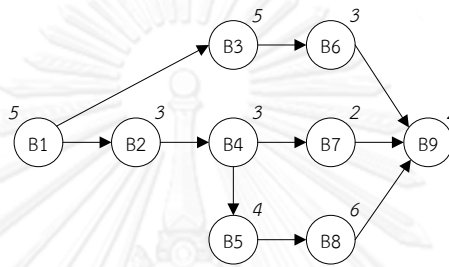
ตารางที่ 2.1 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ A

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน		เวลาชิ้นงานรวม ( $q_{A_I} = q_{A_{II}} = \frac{1}{2}$ )
	รุ่น $A_I$	รุ่น $A_{II}$	
A1	4	2	3
A2	1	1	1
A3	5	3	4
A4	0	4	2
A5	2	4	3
A6	3	7	5
A7	7	5	6
A8	2	0	1
A9	2	2	2
A10	4	2	3
A11	4	6	5



(ก) B<sub>I</sub>

(ข) รุ่น B<sub>II</sub>



(ค) แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม

รูปที่ 2.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ B

ตารางที่ 2.2 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ B

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน		เวลาชิ้นงานรวม ( $q_{B_I} = \frac{1}{3}, q_{B_{II}} = \frac{2}{3}$ )
	รุ่น B <sub>I</sub>	รุ่น B <sub>II</sub>	
B1	7	4	5
B2	9	0	3
B3	3	6	5
B4	3	3	3
B5	0	6	4
B6	5	2	3
B7	2	2	2
B8	4	7	6
B9	2	2	2

ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน สายการประกอบทั้งสองเส้นจะถูกจัดสมดุลร่วมกันภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกัน อย่างไรก็ตาม หากสายการประกอบทั้งสองมีรอบเวลาการ

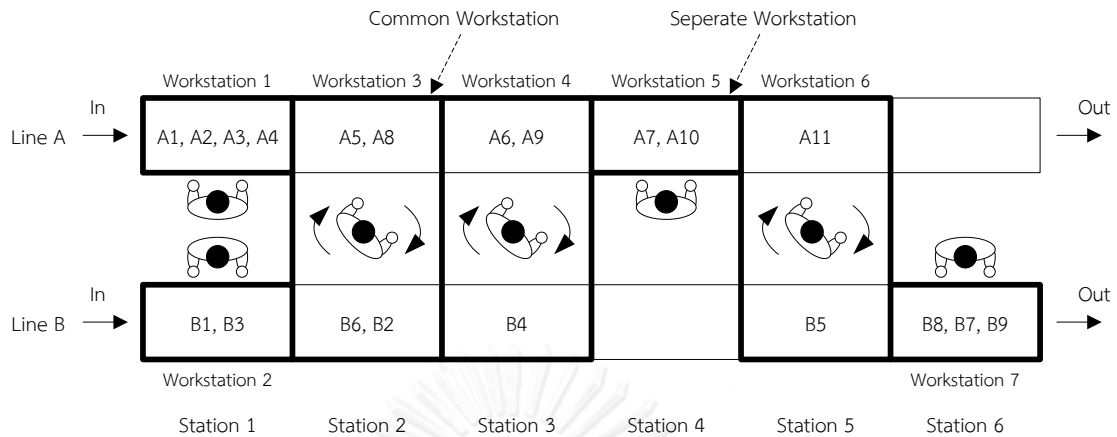
ผลิตไม่เท่ากัน จะอาศัยรอบเวลาการผลิตร่วม (Common Cycle Time) ในการจัดสมดุล ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Gökçen และคณะ, 2006)

1. คำนวณค่าคุณร่วมน้อย (ค.ร.น.) ของรอบเวลาการผลิตของทั้งสองสายการประกอบ
2. ทหารรอบเวลาการผลิตของสายการประกอบเส้นที่ 1 และ 2 ด้วยค่า ค.ร.น. ได้ค่า D1 และ D2 ตามลำดับ
3. ปรับเวลาชิ้นงานร่วมทั้งหมดของสายการประกอบที่ 1 และ 2 ด้วยการคูณเข้ากับค่า D1 และ D2 ตามลำดับ
4. ใช้ค่า ค.ร.น. เป็นรอบเวลาการผลิตร่วม โดยจะใช้รอบเวลาการผลิตร่วมนี้และเวลาชิ้นงานร่วมที่ผ่านการปรับค่าแล้วในการจัดสมดุล ทั้งนี้ ในแต่ละรอบการผลิตร่วมของสายการประกอบแบบขนานที่ผ่านการจัดสมดุลเรียบร้อยแล้ว จะมีสินค้าผลิตเสร็จออกจากสายการประกอบที่ 1 และ 2 เป็นจำนวนเท่ากับ D1 และ D2 ตามลำดับ

สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานมีการจัดวางอยู่ในรูปของสถานีที่จัดเรียงกันอย่างต่อเนื่อง ในแต่ละสถานีอาจประกอบไปด้วยสถานีงานแยกจำนวน 1 หรือ 2 สถานีงาน หรือสถานีงานร่วมจำนวน 1 สถานีงาน การจัดสมดุลสายการประกอบประเภทนี้ทำได้โดยจัดสรรชิ้นงานให้กับสถานีงานต่างๆ โดยผลการจัดสมดุลที่เป็นไปได้จะต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดดังต่อไปนี้

1. ชิ้นงานถูกจัดสรรลงสู่สถานีงานจนครบ โดยแต่ละชิ้นงานสามารถอยู่ในสถานีงานใดก็ได้เพียงหนึ่งสถานีงานเท่านั้น
2. ไม่มีการละเมิดลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน กล่าวคือ แต่ละชิ้นงานต้องไม่ถูกจัดสรรลงสู่สถานีงานให้อยู่ก่อนหน้าชิ้นงานอื่นๆ ที่ต้องทำให้เสร็จก่อนหน้า ดังความสัมพันธ์ที่แสดงอยู่ในแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม
3. ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมในแต่ละสถานีงานมีค่าไม่เกินรอบเวลาการผลิตร่วม

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างผลการจัดสมดุลที่เป็นไปได้บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตร่วมเท่ากับ 10 หน่วยเวลา โดยสายการประกอบนี้ประกอบไปด้วย 6 สถานี 7 สถานีงาน สถานีงานทั้งหมดแบ่งเป็นสถานีงานแยก 4 สถานีงาน และสถานีงานร่วมอีก 3 สถานีงาน ทั้งนี้ ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานอาจทำให้เกิดสถานีงานว่างที่มีไว้สำหรับให้ชิ้นงานเคลื่อนผ่านในแต่ละรอบการผลิตเท่านั้นโดยไม่มีการประกอบใดๆ ตัวอย่างเช่นในผลการจัดสมดุลที่กำลังพิจารณานี้ มีสถานีงานว่างบนสายการประกอบ B บริเวณสถานีที่ 4 ว่างอยู่ ซึ่งจำเป็นต้องปล่อยให้สถานีงานว่างเช่นนั้นและไม่สามารถย้ายสถานีงานที่ 7 มาจัดวางตรงบริเวณดังกล่าวได้ด้วย เพราะจะทำให้ผิดข้อกำหนดในด้านลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน (ชิ้นงานในสถานีงานที่ 7 จะทำได้ก็ต่อเมื่อชิ้นงานในสถานีงานที่ 6 ได้ถูกทำเสร็จเรียบร้อยแล้ว)



สถานีงานที่	ประเภท	ชิ้นงาน (เรียงตามลำดับในการทำงาน)	ผลรวม เวลาชิ้นงานร่วม	เวลาสูญเสียเปล่า
1	แยก (Line A)	A1, A2, A3, A4	10	0
2	แยก (Line B)	B1, B3	10	0
3	ร่วม	B6, B2, A5, A8	10	0
4	ร่วม	A6, A9, B4	10	0
5	แยก (Line A)	A7, A10	9	1
6	ร่วม	A11, B5	9	1
7	แยก (Line B)	B8, B7, B9	10	0

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างผลการจัดสมดุลที่เป็นไปได้บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้รอบเวลาการผลิตร่วม 10 หน่วยเวลา

## 2.2 วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล

การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่นำเสนอ กำหนดให้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำให้มีความเหมาะสมที่สุดจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามระดับความสำคัญ โดยจะมุ่งเน้นให้วัตถุประสงค์ระดับที่หนึ่งซึ่งมีจำนวน 1 วัตถุประสงค์มีความเหมาะสมที่สุดเป็นหลัก ตามด้วยวัตถุประสงค์ระดับที่สองจำนวน 1 วัตถุประสงค์ และวัตถุประสงค์ระดับที่สาม ซึ่งมีจำนวน 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้เหมาะสมที่สุดพร้อมกัน ตามลำดับวัตถุประสงค์ทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

### วัตถุประสงค์ระดับที่ 1: ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในการจัดสมดุล คือเพื่อให้สายการประกอบมีจำนวนสถานีงาน (Number of Workstation:  $N_W$ ) น้อยที่สุด หรือทำให้มีจำนวนพนักงานน้อยที่สุดนั่นเอง ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนด้านแรงงานมีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } N_W \quad (2)$$

ทั้งนี้ จำนวนสถานีงานรวมบนสายการประกอบ คือผลรวมระหว่างจำนวนสถานีงานแยก (Number of Separate Workstation:  $N_{SW}$ ) กับจำนวนสถานีงานร่วม (Number of Common Workstation:  $N_{CW}$ ) หรือเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ว่า  $N_W = N_{SW} + N_{CW}$

### วัตถุประสงค์ระดับที่ 2: ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด

สายการประกอบแบบขนานหลายๆ เส้นที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากันอาจมีความยาวที่ไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งจะแปรผันตรงตามจำนวนสถานีบนสายการประกอบ (Scholl และ Boysen, 2009) ดังนั้น นอกจากจะจัดสมดุลโดยมุ่งเน้นให้สายการประกอบมีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุดเป็นวัตถุประสงค์หลักแล้ว จึงกำหนดให้มีวัตถุประสงค์ในการทำให้สายการประกอบมีจำนวนสถานี (Number of Station:  $N_S$ ) น้อยที่สุดตามมาเป็นวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 วัตถุประสงค์นี้จะทำให้สายการประกอบที่ได้มีขนาดสั้นที่สุด หรือทำให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุดนั่นเอง

$$\text{Minimize } N_S \quad (3)$$

วัตถุประสงค์ระดับที่ 3: ทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด และทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด

วัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ประกอบไปด้วย 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ (1) ทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด และ (2) ทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด รายละเอียดของทั้งสองวัตถุประสงค์ย่อยมีดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ตัวย่อยที่ 1: ทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด

วัตถุประสงค์นี้คือการทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด หรือในอีกมุมหนึ่งก็คือการทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมของสถานีงานต่างๆ มีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์มให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มอัตราการผลิตและลดความแออัดบนสายการประกอบรวมทั้งทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างพนักงาน (Kim และคณะ, 2000)

กำหนดให้

$M_l$  และ  $M_{l+1}$  เป็นจำนวนรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบเส้นตรงผลิตภัณฑ์ผสม  $l$  และ  $l + 1$  ที่ขนานกันอยู่ ตามลำดับ

$m_l$  และ  $m_{l+1}$  เป็นรุ่นของสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบเส้นตรงผลิตภัณฑ์ผสม  $l$  และ  $l + 1$  ตามลำดับ เมื่อ  $m_l = \{1, \dots, M_l\}$  และ  $m_{l+1} = \{1, \dots, M_{l+1}\}$

$S_{k,b,m,L}$  คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตรวม ( $CCT$ ) กับเวลาชิ้นงานรวมที่สถานีงานที่  $k$  ซึ่งเป็นสถานีงานประเภท  $b$  โดยอาจเป็นประเภทสถานีงานแยก (Separate Workstation:  $SW$ ) หรือสถานีงานร่วม (Common Workstation:  $CW$ ) อย่างไม่อย่างหนึ่ง ใช้ในการประกอบสินค้ารุ่น  $m$  บนสายการประกอบ  $L$  ( $TT_{k,b,m,L}$ ) ค่า  $S_{k,b,m,L}$  ในกรณีสถานีงานแยก ( $b = SW$ ) ที่ตั้งอยู่บนสายการประกอบ  $l$  และ  $l + 1$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$S_{k,SW,m,l} = |CCT - TT_{k,SW,m,l}| \quad (4)$$

$$S_{k,SW,m_{l+1},(l+1)} = |CCT - TT_{k,SW,m_{l+1},(l+1)}| \quad (5)$$

ขณะที่ค่า  $S_{k,b,m,L}$  ในกรณีสถานีงานร่วม ( $b = CW$ ) ที่มีหน้าที่ประกอบชิ้นงานของทั้งสายการประกอบ  $l$  และ  $l + 1$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{k,CW,m_{(l,l+1)},(l,l+1)} = |CCT - TT_{k,CW,m_l,l} - TT_{k,CW,m_{(l+1)},(l+1)}| \quad (6)$$

กำหนดให้  $S_{k,b}$  คือค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นในสถานีงานที่  $k$  ประเภท  $b$  ซึ่งคำนวณได้จากการนำเอาค่าเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นในการประกอบสินค้าทุกรุ่นมาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนสินค้า ค่า  $S_{k,b}$  ในกรณีของสถานีงานแยก ( $b = SW$ ) ที่ตั้งอยู่บนสายการประกอบ ประกอบ  $l$  และ  $l + 1$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$S_{k,SW} = \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} S_{k,SW,m_l,l} \quad (7)$$

$$S_{k,SW} = \sum_{m_{l+1}=1}^{M_{l+1}} q_{m_{l+1}} S_{k,SW,m_{l+1},(l+1)} \quad (8)$$

และในกรณีสถานีงานร่วม ( $b = CW$ ) ค่า  $S_{k,b}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{k,CW} = \sum_{m_l=1}^{M_l} \sum_{m_{l+1}=1}^{M_{l+1}} q_{m_l} q_{m_{l+1}} S_{k,CW,m_{(l,l+1)},(l,l+1)} \quad (9)$$

จากนั้นสามารถคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (Total Absolute Deviation:  $TAD$ ) ทุกสถานีงานได้จากสมการ

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} S_{k,b} \quad (10)$$

ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานสามารถชี้วัดได้ด้วยค่า  $B_b$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (11) ที่ดัดแปลงมาจากสมการของ Simaria และ Vilarinho (2009) ทั้งนี้ ค่าของ  $B_b$  จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยยังมีค่าต่ำยิ่งแสดงถึงความสมดุลที่สูง ดังนั้น วัตถุประสงค์ในการทำให้สายการประกอบมีความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานมากที่สุด จึงเป็นการทำให้ค่า  $B_b$  มีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้นั่นเอง

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_W}{N_W - 1} \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} \left( \frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2 \quad (11)$$

### วัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ตัวอย่างที่ 2: ทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด

เนื่องจากพนักงานแต่ละคนในสายการประกอบนั้นย่อมมีทักษะการทำงานหลักที่ตนถนัดและมีทักษะอื่นๆ ที่ถนัดรองๆ ลงไป ดังนั้นหากจัดสรรให้บรรดาชิ้นงานในแต่ละสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากๆ กล่าวคือทำให้ชิ้นงานเหล่านั้นอาศัยทักษะการทำงานที่เกี่ยวข้องเพียงทักษะเดียวหรืออาจรวมถึงทักษะอื่นๆ อีกเล็กน้อย จะทำให้ผู้จัดการสายการประกอบสามารถจัดสรรพนักงานเข้าทำงานในสถานีงานต่างๆ ได้ตรงตามความถนัด ซึ่งย่อมสร้างความพึงพอใจให้กับพนักงานเองและทำให้การดำเนินงานของสายการประกอบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

ชิ้นงานสองชิ้นงานใดๆ จะถือว่ามีความสัมพันธ์กันก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมโยงกันโดยตรงในแผนภาพลำดับก่อนหลัง (Lee และคณะ, 2001) การทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากๆ จึงทำได้ด้วยการจัดสรรให้ชิ้นงานต่างๆ ในสถานีงานเป็นชิ้นงานที่ต้องทำให้เสร็จก่อนหน้าหรือทำตามหลังซึ่งกันและกันโดยตรงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยความสัมพันธ์ของชิ้นงานโดยรวมของสายการประกอบสามารถประเมินได้ด้วยตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของงาน (Index of Work Relatedness:  $IWR$ ) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ  $IWR = \frac{N_W}{\sum_{k=1}^{N_W} SN_k}$  เมื่อ  $SN_k$  คือจำนวนเครือข่ายของชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงานที่  $k$  ทั้งนี้  $IWR$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยยังมีค่ามากยิ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่า  $IWR$  นั้นมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามจำนวนสถานีงาน การเปรียบเทียบค่านี้ระหว่างผลการจัดสมดุลที่มีจำนวนสถานีงานต่างกันจึงไม่ได้ให้ความหมายใดๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำการดัดแปลงตัวชี้วัด  $IWR$  ให้อยู่ในรูปของ MIWR (Modified



Index of Work Relatedness: *MIWR*) ซึ่งสามารถคำนวณได้สมการ (12) (Chutima และ Chimklai, 2012) โดยค่า *MIWR* ของผลการจัดสมดุลที่มีจำนวนสถานีนงานน้อยจะมีค่าที่ดีกว่าผลการจัดสมดุลที่มีจำนวนสถานีนงานมากกว่าเสมอ (เนื่องจากในการจัดสมดุลมุ่งเน้นให้มีจำนวนสถานีนงานน้อยที่สุดเป็นวัตถุประสงค์หลัก ดังนั้นถึงแม้ว่าสายการประกอบที่มีสถานีนงานน้อยจะมีความสัมพันธ์ของงานที่แย่กว่าสายการประกอบที่มีสถานีนงานมากกว่าก็ตาม ก็จะได้ถือว่ามีความสัมพันธ์ของงานที่ดีกว่า) ทั้งนี้ ค่า *MIWR* ยิ่งน้อยยิ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง ดังนั้น วัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ต่ำย่อยที่ 2 จึงเป็นการทำให้ *MIWR* มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } MIWR = N_W - \frac{N_W}{\sum_{k=1}^{N_W} SN_k} \quad (12)$$

#### ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ในรูปที่ 2.3 (สายการประกอบ A และ B มีแผนภาพลำดับก่อนหลังดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ และมีรายละเอียดเวลาชิ้นงานดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ รอบเวลาการผลิตรวมของสายการประกอบแบบขนานนี้เท่ากับ 10 หน่วยเวลา) โดยมีรายละเอียดดังนี้

**ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 [ $f_1(x)$ ]** : จำนวนสถานีนงาน ( $N_W$ ) สามารถพิจารณาจากแผนผังของสายการประกอบดังรูปที่ 2.3 ได้เลย ซึ่งพบว่ามีจำนวนทั้งสิ้น 7 สถานีนงาน (แบ่งเป็น 4 สถานีนงานแยก และ 3 สถานีนงานร่วม)

$$f_1(x) = N_W = 7$$

**ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 [ $f_2(x)$ ]** : จำนวนสถานี ( $N_S$ ) สามารถพิจารณาจากแผนผังของสายการประกอบดังรูปที่ 2.3 ได้เลย ซึ่งพบว่ามีจำนวนทั้งสิ้น 6 สถานี

$$f_2(x) = N_S = 6$$

**ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ต่ำย่อยที่ 1 [ $f_{3.1}(x)$ ]** : ค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนงาน ( $B_b$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ  $B_b = \frac{N_W}{N_W - 1} \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} \left( \frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2$

ค่าต่างๆ ที่ใช้ประกอบการคำนวณมีดังนี้

- $N_W = 7$  (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1)
- $CCT = 10$

- $q_{A_I} = q_{A_I} = \frac{1}{2}, q_{B_I} = \frac{1}{3}, q_{B_{II}} = \frac{2}{3}$
- เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ A และ B ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ในขั้นแรกให้คำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตร่วมกับเวลาชิ้นงานรวมโดยเฉลี่ย ( $S_{kb}$ ) ของทุกสถานีงานเสียก่อน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม ( $TAD$ ) และนำไปสู่การคำนวณค่า  $B_b$  ต่อไป โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณค่า  $S_{kb}$  ของสถานีงานแยกและสถานีงานร่วมอย่างละ 1 สถานีงาน ได้แก่ สถานีงานที่ 1 และสถานีงานที่ 3 ตามลำดับ

### สถานีงานที่ 1

สถานีงานที่ 1 เป็นประเภทสถานีงานแยกบนสายการประกอบ A มีชิ้นงานที่ต้องทำได้แก่ A1 A2 A3 และ A4

$$\text{จากสูตร } S_{k,SW} = \sum_{m_l=1}^{M_l} q_{m_l} S_{k,SW,m_l,l} \text{ และ } S_{k,SW,m_l,l} = |CCT - TT_{k,SW,m_l,l}|$$

ค่า  $S_{k,SW}$  ของสถานีงานที่ 1 ( $S_{1,SW}$ ) มีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} S_{1,SW} &= \sum_{m_A=A_I}^{A_{II}} q_{m_A} S_{1,SW,m_A,A} = q_{A_I} S_{1,SW,A_I,A} + q_{A_{II}} S_{1,SW,A_{II},A} \\ &= q_{A_I} |CCT - TT_{1,SW,A_I,A}| + q_{A_{II}} |CCT - TT_{1,SW,A_{II},A}| \\ &= \frac{1}{2} |10 - (4 + 1 + 5 + 0)| + \frac{1}{2} |10 - (2 + 1 + 3 + 4)| \\ &= 0 + 0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

### สถานีงานที่ 3

สถานีงานที่ 3 เป็นประเภทสถานีงานร่วม มีชิ้นงานที่ต้องทำได้แก่ B6 B2 A5 และ A8

$$\text{จากสูตร } S_{k,CW} = \sum_{m_l=1}^{M_l} \sum_{m_{l+1}=1}^{M_{l+1}} q_{m_l} q_{m_{l+1}} S_{k,CW,m_{(l,l+1)},(l,l+1)} \text{ และ}$$

$$S_{k,CW,m_{(l,l+1)},(l,l+1)} = |CCT - TT_{k,CW,m_l,l} - TT_{k,CW,m_{(l+1)},(l+1)}|$$

ค่า  $S_{k,CW}$  ของสถานีงานที่ 3 ( $S_{3,CW}$ ) มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} S_{3,CW} &= \sum_{m_A=A_I}^{A_{II}} \sum_{m_B=B_I}^{B_{II}} q_{m_A} q_{m_B} S_{3,CW,m_{(A,B)},(A,B)} \\ &= q_{A_I} q_{B_I} S_{3,CW,(A_I,B_I),(A,B)} + q_{A_I} q_{B_{II}} S_{3,CW,(A_I,B_{II}),A,B} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + q_{A_{II}} q_{B_I} S_{3,CW,(A_{II},B_I),(A,B)} + q_{A_{II}} q_{B_{II}} S_{3,CW,(A_{II},B_{II}),(A,B)} \\
& = q_{A_I} q_{B_I} |CCT - TT_{3,CW,A_I,A} - TT_{3,CW,B_I,B}| \\
& \quad + q_{A_I} q_{B_{II}} |CCT - TT_{3,CW,A_I,A} - TT_{3,CW,B_{II},B}| \\
& \quad + q_{A_{II}} q_{B_I} |CCT - TT_{3,CW,A_{II},A} - TT_{3,CW,B_I,B}| \\
& \quad + q_{A_{II}} q_{B_{II}} |CCT - TT_{3,CW,A_{II},A} - TT_{3,CW,B_{II},B}| \\
& = \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} |10 - (5 + 9 + 2 + 2)| \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} |10 - (2 + 0 + 2 + 2)| \right] \\
& \quad + \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} |10 - (5 + 9 + 4 + 0)| \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} |10 - (2 + 0 + 4 + 0)| \right] \\
& = 1.33 + 1.33 + 1.33 + 1.33 \\
& = 5
\end{aligned}$$

ตารางที่ 2.3 แสดงเวลายังงานรวม ( $TT_{kbml}$ ) ที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ ในทุกกรณีที่เป็นไปได้ ซึ่งมีไว้ใช้ประกอบการคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย  $S_{kb}$  ทั้งนี้ ผลการคำนวณค่า  $S_{kb}$  ของแต่ละสถานีงานแสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม ( $TAD$ ) ได้ดังนี้

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} S_{k,b} = 0 + 0 + 5.33 + 2 + 2 + 2.33 + 1.33 = 13.00$$

สุดท้ายสามารถคำนวณค่า  $B_b$  หรือค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ตัวย่อยที่ 1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
f_{3.1}(x) = B_b & = \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} \left( \frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2 \\
& = \frac{N_W}{N_W - 1} \left[ \left( \frac{S_{1,sw}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2 + \left( \frac{S_{2,sw}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2 + \dots + \left( \frac{S_{7,sw}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2 \right] \\
& = \frac{7}{7-1} \left[ \left( \frac{0}{13} - \frac{1}{7} \right)^2 + \left( \frac{0}{13} - \frac{1}{7} \right)^2 + \dots + \left( \frac{1.33}{13} - \frac{1}{7} \right)^2 \right] \\
& = \frac{7}{6} \times 0.1155 = 0.1348
\end{aligned}$$

ตารางที่ 2.3 เวลาชิ้นงานรวมที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่าง

สถานีงาน (k)	ประเภท (b)	$TT_{k,SW,m_{A,A}}$		$TT_{k,SW,m_{B,B}}$		$TT_{k,CW,m_{(A,B),(A,B)}}$			
		A <sub>I</sub>	A <sub>II</sub>	B <sub>I</sub>	B <sub>II</sub>	A <sub>I</sub> B <sub>I</sub>	A <sub>I</sub> B <sub>II</sub>	A <sub>II</sub> B <sub>I</sub>	A <sub>II</sub> B <sub>II</sub>
1	แยก/SW (Line A)	10	10	-	-	-	-	-	-
2	แยก/SW (Line B)	-	-	10	10	-	-	-	-
3	ร่วม/CW	-	-	-	-	18	6	18	6
4	ร่วม/CW	-	-	-	-	8	8	12	12
5	แยก/SW (Line A)	11	7	-	-	-	-	-	-
6	ร่วม/CW	-	-	-	-	4	10	6	12
7	แยก/SW (Line B)	-	-	8	11	-	-	-	-

ตารางที่ 2.4 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตร่วมกับเวลาชิ้นงานรวมที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ พร้อมค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย

สถานีงานที่ (k)	ประเภท (b)	$S_{k,SW,m_{A,A}}$		$S_{k,SW,m_{B,B}}$		$S_{k,CW,m_{(A,B),(A,B)}}$				$S_{kb}$	$\left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_W}\right)^2$
		A <sub>I</sub>	A <sub>II</sub>	B <sub>I</sub>	B <sub>II</sub>	A <sub>I</sub> B <sub>I</sub>	A <sub>I</sub> B <sub>II</sub>	A <sub>II</sub> B <sub>I</sub>	A <sub>II</sub> B <sub>II</sub>		
1	แยก/SW (Line A)	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0.0204
2	แยก/SW (Line B)	-	-	0	0	-	-	-	-	0	0.0204
3	ร่วม/CW	-	-	-	-	8	4	8	4	5.33	0.0715
4	ร่วม/CW	-	-	-	-	2	2	2	2	2.00	0.0001
5	แยก/SW (Line A)	1	3	-	-	-	-	-	-	2.00	0.0001
6	ร่วม/CW	-	-	-	-	6	0	4	2	2.33	0.0013
7	แยก/SW (Line B)	-	-	2	1	2	1	2	1	1.33	0.0016
$TAD = \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} S_{kb} =$										13.00	
$\sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_W}\right)^2 =$											0.1155
$B_b = \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=SW}^{CW} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_W}\right)^2$											0.1348

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ตัวย่อยที่ 2 [ $f_{3.2}(x)$ ] : ค่าตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของงาน (MIWR) สามารถคำนวณได้จากสมการ  $MIWR = N_W - \frac{N_W}{\sum_{k=1}^{N_W} SN_k}$  โดยค่า  $N_W$  หรือจำนวนสถานีงานทั้งหมดบนสายการประกอบแบบขนานนั้นก็คือนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 ซึ่งในที่นี้ทราบแล้วแล้วว่าค่าเท่ากับ 7 ส่วนค่า  $SN$  หรือจำนวนเครือข่ายของชิ้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงานต่างๆ สามารถประเมินได้ดังตารางที่ 2.5

ในที่นี้จะอธิบายวิธีการประเมินค่า SN ของสถานีงานที่ 1 เป็นตัวอย่าง สถานีงานนี้มีชั้นงานที่ต้องทำจำนวนทั้งสิ้น 4 ชั้นงาน เรียงตามลำดับก่อนหลัง ได้แก่ A1 A2 A3 และ A4 จะเห็นได้ว่าการเริ่มทำชั้นงาน A1 แล้วตามด้วยชั้นงาน A2 นั้นจะเกิดความสัมพันธ์ของชั้นงาน เนื่องจากชั้นงาน A1 เป็นชั้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าชั้นงาน A2 โดยตรง (ชั้นงาน A1 มีลูกศรโยงไปหาชั้นงาน A2 ดังปรากฏในแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 2.1) แต่การทำชั้นงาน A2 แล้วต่อด้วยชั้นงาน A3 จะไม่เกิดความสัมพันธ์กัน เนื่องจากชั้นงาน A2 ไม่ได้เป็นชั้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าชั้นงาน A3 โดยตรง ดังนั้นเครือข่ายงานแรกจึงสิ้นสุดลงที่ชั้นงาน A2 ได้ออกมาเป็นเครือข่ายงาน [A1-A2] จากนั้นเริ่มพิจารณาเครือข่ายงานถัดไปที่ชั้นงาน A3 พบว่าการทำชั้นงาน A3 ตามด้วยชั้นงาน A4 จะไม่เกิดความสัมพันธ์ของชั้นงาน ดังนั้น เครือข่ายงานที่ 2 จึงประกอบไปด้วยชั้นงาน A3 เพียงชั้นงานเดียว (เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ว่า [A3]) ลำดับต่อไป ทำการพิจารณาเครือข่ายงานที่ 3 พบว่าเหลือชั้นงานในการพิจารณาเพียง 1 ชั้นงาน ได้แก่ ชั้นงาน A4 ดังนั้นเครือข่ายงานที่ 3 จึงประกอบไปด้วยชั้นงานนี้เพียงชั้นงานเดียว (เขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ว่า [A4]) และเป็นเครือข่ายงานสุดท้ายของสถานีงานที่ 1

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดเครือข่ายงานในสถานีงานต่างๆ

สถานีงานที่ ( $k$ )	ชั้นงาน (เรียงตามลำดับในการทำงาน)	เครือข่ายงาน	จำนวนเครือข่ายงาน ( $SN_k$ )
1	A1, A2, A3, A4	[A1-A2], [A3] และ [A4]	3
2	B1, B3	[B1-B3]	1
3	B6, B2, A5, A8	[B6], [B2] และ [A5-A8]	3
4	A6, A9, B4	[A6-A9] และ [B4]	2
5	A7, A10	[A7-A10]	1
6	A11, B5	[A11] และ [B5]	2
7	B8, B7, B9	[B8] และ [B7-B9]	2
$\sum_{k=1}^{N_W} SN_k =$			14

ทั้งนี้ เมื่อทราบค่า  $SN$  ของทุกสถานีงานแล้ว ให้ทำทราบค่า  $\sum_{k=1}^{N_W} SN_k = 14$  ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่า  $MWIR$  ได้ดังนี้

$$f_{3.2}(x) = MIWR = N_W - \frac{N_W}{\sum_{k=1}^{N_W} SN_k} = 7 - \frac{7}{14} = 6.5000$$

### 2.3 สตริงคำตอบและการถอดรหัส

คำตอบหรือผลการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานโดยอัลกอริทึมต่างๆ ที่ปรากฏในงานวิจัยนี้จะอยู่ในรูปของสตริงที่ระบุค่าสิทธิ์ของชิ้นงานต่างๆ บนสายการประกอบแบบขนาน (Priority String) โดยค่าสิทธิ์นี้มีไว้ใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่า หากขณะที่กำลังจัดสมดุลชิ้นงานหลายชิ้นงานที่พร้อมถูกนำไปจัดสรรลงสถานีงานได้ ชิ้นงานใดจะถูกนำไปจัดลงสถานีงานก่อน แต่ละชิ้นงานนั้นจะมีค่าสิทธิ์เป็นเลขจำนวนเต็มบวกที่ไม่ซ้ำกันตั้งแต่ 1, 2, ..., จนถึง P เมื่อ P คือจำนวนชิ้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบแบบขนาน ตัวอย่างสตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB (ข้อมูลสายการประกอบเป็นดังรูปที่ 2.1-2.2 และตารางที่ 2.1-2.2) แสดงดังตารางที่ 2.6 สตริงคำตอบของปัญหานี้มีจำนวนบิตทั้งสิ้น 20 บิตตามจำนวนชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานก็จะมีค่าสิทธิ์แตกต่างกันไปตั้งแต่ 1 ถึง 20

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างสตริงคำตอบในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB

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

ในการจัดสมดุลแต่ละครั้ง หากทำการเลือกชิ้นงานไปจัดลงสถานีงานโดยอาศัยสตริงคำตอบใดๆ ก็ตามประกอบการพิจารณา ก็จะทำให้ได้ผลการจัดสมดุลทั้งในด้านผังการจัดวางสายการประกอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่เฉพาะตัวสอดคล้องตามสตริงคำตอบนั้นๆ หรือกล่าวอีกมุมหนึ่งก็คือสตริงคำตอบแต่ละสตริงสามารถถอดรหัสออกมาเพื่อสื่อถึงผลการจัดสมดุลที่เฉพาะเจาะจงได้ กระบวนการแก้ปัญหการจัดสมดุลด้วยอัลกอริทึมต่างๆ ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ซึ่งล้วนเป็นกระบวนการเชิงคณิตศาสตร์ จึงจัดเก็บผลการจัดสมดุลให้อยู่ในรูปสตริงคำตอบ (สตริงตัวเลข) เพื่อให้สามารถนำไปดำเนินการทางคณิตศาสตร์ได้นั่นเอง

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบสามารถทำได้ด้วยการนำไปประกอบการจัดสมดุลร่วมกับเมตริกซ์ลำดับก่อนหลัง (Precedence Matrix) โดยเมตริกซ์ลำดับก่อนหลังเป็นเมตริกซ์ขนาด  $P \times P$  จำนวนชิ้นงานทั้งหมดบนสายการประกอบแบบขนาน แต่ละแถวและหลักของเมตริกซ์มีชื่อกำกับตามชื่อของชิ้นงานต่างๆ เรียงตั้งแต่ชิ้นงานแรกถึงชิ้นงานสุดท้าย แต่ละช่องของเมตริกซ์ที่มีชิ้นงานประจำแถวเป็นชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าชิ้นงานประจำหลักโดยตรงจะมีค่าเท่ากับ 1 ขณะที่ช่องอื่นๆ ที่เหลือมีค่าเท่ากับ 0 (ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างเมตริกซ์ลำดับก่อนหลังของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB) กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



### ตัวอย่างการถอดรหัสสตริงคำตอบ

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการถอดรหัสสตริงคำตอบในตารางที่ 2.6 ของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม AB ซึ่งกำหนดให้มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 10 หน่วยเวลา และมีเมตริกซ์ลำดับก่อนหลังดังตารางที่ 2.7 เริ่มต้นด้วยการพิจารณาชิ้นงานที่มีผลรวมตลอดทั้งหลักเท่ากับ 0 พบว่ามีจำนวนทั้งสิ้น 3 ชิ้นงาน ได้แก่ A1, A4 และ B1 ซึ่งมีค่าสิทธิ์เท่ากับ 17, 9 และ 6 ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงาน A1 มีค่าสิทธิ์สูงสุด ดังนั้นจึงเลือกชิ้นงาน A1 เป็นชิ้นงานแรกที่จะนำไปจัดลงสถานีงาน และให้ทำการปรับค่าบนเมตริกซ์ตลอดทั้งแถวของชิ้นงานที่เพิ่งถูกเลือกไปซึ่งก็คือชิ้นงาน A1 ให้เท่ากับ 0 แล้วปรับค่าทุกช่องตลอดทั้งหลักของชิ้นงาน A1 เช่นกันให้เท่ากับ 1 ได้ผลดังตารางที่ 2.8

จากนั้นทำการเลือกชิ้นงานลำดับที่ 2 ที่จะนำไปจัดลงสถานีงาน ด้วยการพิจารณาชิ้นงานที่มีผลรวมตลอดทั้งหลักเท่ากับ 0 ซึ่งพบว่ามีจำนวนทั้งสิ้น 4 ชิ้นงาน ได้แก่ A2, A3, A4 และ B1 โดยมีค่าสิทธิ์เท่ากับ 11, 10, 9 และ 6 ตามลำดับ เนื่องจากชิ้นงาน A2 มีค่าสิทธิ์สูงสุดจึงเลือกชิ้นงานนี้เป็นชิ้นงานลำดับที่ 2 ที่จะนำไปจัดลงสถานีงาน ลำดับต่อไปทำการปรับค่าทุกช่องตลอดทั้งแถวของชิ้นงาน A2 ให้เท่ากับ 0 แล้วปรับค่าทุกช่องตลอดทั้งหลักของชิ้นงาน A2 ให้เท่ากับ 1 ได้ผลดังตารางที่ 2.9 จากนั้นให้ทำการเลือกชิ้นงานลำดับที่ 3 และวนซ้ำกระบวนการเหล่านี้เพื่อเลือกชิ้นงานลำดับถัดๆ ไปจนครบทุกชิ้นงาน สุดท้ายจะได้ผลสรุปว่าแต่ละชิ้นงานจะถูกจัดลงสถานีงานเป็นลำดับที่เท่าใดบ้าง ดังแสดงในตารางที่ 2.10

ลำดับต่อไปให้ทำการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงานตามลำดับที่ได้ ด้วยการเปิดสถานีงานที่ละสถานีงานแล้วทยอยจัดสรรชิ้นงานลงไปตามลำดับให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ トラบเท่าที่ยังไม่ทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานรวมมีค่าเกินรอบเวลาการผลิตรวม โดยเมื่อใดก็ตามที่ไม่สามารถจัดสรรได้แล้วก็ให้ทำการเปิดสถานีงานใหม่แล้วจัดสรรชิ้นงานถัดไปลงไปเป็นชิ้นงานแรก และจัดสรรชิ้นงานลำดับถัดๆ ไปด้วยหลักการเดิมจนครบทุกชิ้นงาน ทั้งนี้ สถานีงานที่เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นนั้นมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ สถานีงานที่บรรจุชิ้นงานเฉพาะของสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่งเท่านั้น หรือที่เรียกว่าสถานีงานแยก (แบ่งย่อยออกเป็นสถานีงานแยกของสายการประกอบเส้นที่ 1 และ 2) และสถานีงานที่บรรจุชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบผสมกัน หรือที่เรียกว่าสถานีงานร่วม จากกรณีตัวอย่างซึ่งมีลำดับของชิ้นงานในการจัดลงสถานีงานดังตารางที่ 2.10 สามารถจัดสรรชิ้นงานให้กับสถานีงานแรกได้จำนวน 4 ชิ้นงาน ได้แก่ A1, A2, A3 และ A4 ซึ่งมีเวลาชิ้นงานรวมเท่ากับ 3, 1, 4 และ 2 หน่วยเวลาตามลำดับ โดยทำให้มีผลรวมเวลาชิ้นงานรวมเท่ากับรอบเวลาการผลิตที่ 10 หน่วยเวลาพอดี (หากเพิ่มชิ้นงาน B1 ซึ่งเป็นชิ้นงานถัดไปที่มีเวลาชิ้นงานรวมเท่ากับ 5 หน่วยเวลาเข้าไปอีก จะทำให้ผลรวมเวลารวมเกินรอบเวลาการผลิต) ต่อไปทำการเริ่มต้นจัดสรรชิ้นงานให้กับสถานีงานที่ 2 ด้วยชิ้นงานลำดับถัดไป นั่นคือชิ้นงาน B1 พบว่าสามารถจัดสรรได้ 2 ชิ้นงาน ได้แก่ B1 และ B3 ซึ่งมีเวลาชิ้นงาน





ตารางที่ 2.9 เมตริกซ์ลำดับก่อนหลังที่ผ่านการปรับค่าหลังจากเลือกชั้นงาน A2 เป็นชั้นงานลำดับที่ 2

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
A1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A4	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A5	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A6	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
B2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
B3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
B4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
B5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
B6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B7	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 2.10 ลำดับที่ของชั้นงานต่างๆ ในการถูกจัดลงสถานีงานที่ได้จากการถอดรหัสสตริงคำตอบ

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

ตารางที่ 2.11 ผลการจัดสรรชั้นงานลงสู่สถานีงาน

สถานีงานที่	ประเภท	ชั้นงาน (เรียงตามลำดับในการทำงาน)	ผลรวม เวลาชั้นงานร่วม	เวลาสูญเสียเปล่า
1	แยก	A1, A2, A3, A4	10	0
2	แยก	B1, B3	10	0
3	ร่วม	B6, B2, A5, A8	10	0
4	ร่วม	A6, A9, B4	10	0
5	แยก	A7, A10	9	1
6	ร่วม	A11, B5	9	1
7	แยก	B8, B7, B9	10	0

ทำการจัดวางสถานีงานที่ละสถานีงานตามลำดับที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้า เพื่อให้ทราบแผนผังของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน รวมทั้งจำนวนสถานีซึ่งเป็นหนึ่งในค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องชี้วัด โดยวิธีการมีดังนี้

1. **กรณีสถานีงานแยก** ให้พิจารณาว่าเป็นสถานีงานแยกบนสายการประกอบใด เมื่อทราบแล้วให้ทำการจัดวางสถานีงานบนสายการประกอบดังกล่าว ถัดจากสถานีงานล่าสุดที่มีชิ้นงานจากสายการประกอบดังกล่าวบรรจุอยู่
2. **กรณีสถานีงานร่วม** ให้จัดวางลงบนสถานีใหม่ถัดจากสถานีปลายสุดที่ได้มีการจัดวางสถานีงานไปแล้ว

จากข้อมูลสถานีงานดังตารางที่ 2.11 ขั้นตอนในการจัดวางสถานีงานเป็นดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 2.4 ประกอบ)

**สถานีงานที่ 1** เป็นสถานีงานแยกบนสายการประกอบ A (บรรจุชิ้นงานของสายการประกอบ A เท่านั้น) เนื่องจากเป็นสถานีงานแรกจึงสามารถจัดวางลงบนสายการประกอบ A ในสถานีที่ 1 ของสายการประกอบแบบขนานได้เลย

**สถานีงานที่ 2** เป็นสถานีงานแยกบนสายการประกอบ B จากการพิจารณาไม่พบว่ามีสถานีงานก่อนหน้าที่บรรจุชิ้นงานของสายการประกอบ B ดังนั้นจึงจัดวางสถานีงานนี้ลงบนสายการประกอบ B ในสถานีที่ 1 ของสายการประกอบแบบขนาน

**สถานีงานที่ 3** เป็นสถานีงานร่วม จากการพิจารณาผลการจัดวางล่าสุดพบว่ามีภารกิจพื้นที่มาสิ้นสุดบนสถานีที่ 1 ดังนั้นจึงเปิดสถานีที่ 2 แล้วจัดวางสถานีงานนี้ลงไป

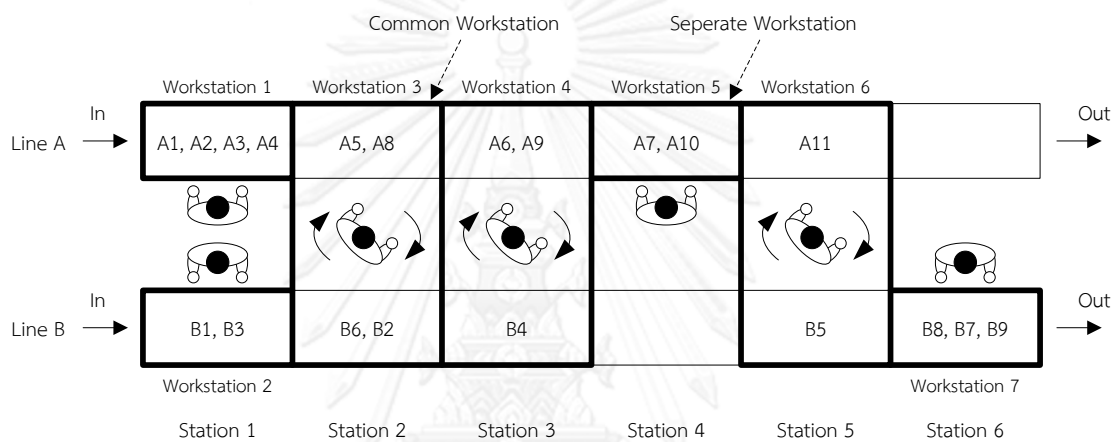
**สถานีงานที่ 4** เป็นสถานีงานร่วม จากการพิจารณาผลการจัดวางล่าสุดพบว่ามีภารกิจพื้นที่มาสิ้นสุดบนสถานีที่ 2 ดังนั้นจึงเปิดสถานีที่ 3 แล้วจัดวางสถานีงานนี้ลงไป

**สถานีงานที่ 5** เป็นสถานีงานแยกบนสายการประกอบ A จากการพิจารณาพบว่าสถานีงานล่าสุดที่มีการบรรจุชิ้นงานของสายการประกอบ A ได้แก่ สถานีงานที่ 4 ดังนั้นจึงจัดวางสถานีงานที่ 5 ลงบนสายการประกอบ A ถัดจากสถานีงานที่ 4 โดยตั้งอยู่ในสถานีที่ 4 ของสายการประกอบแบบขนาน

**สถานีงานที่ 6** เป็นสถานีงานร่วม จากการพิจารณาผลการจัดวางล่าสุดพบว่ามีภารกิจพื้นที่มาสิ้นสุดบนสถานีที่ 4 ดังนั้นจึงเปิดสถานีที่ 5 แล้วจัดวางสถานีงานนี้ลงไป

สถานีงานที่ 7 เป็นสถานีงานแยกบนสายการประกอบ B จากการพิจารณาพบว่าสถานีงาน  
 ล่าสุดที่มีการบรรจุชิ้นงานของสายการประกอบ B ได้แก่ สถานีงานที่ 6 ดังนั้นจึงจัดวางสถานีงานที่ 7  
 ลงบนสายการประกอบ B ถัดจากสถานีงานที่ 6 โดยตั้งอยู่ในสถานีที่ 7 ของสายการประกอบแบบ  
 ขนาน

รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่ได้ ซึ่งเมื่อการดำเนินการ  
 มาถึงขั้นตอนนี้แล้วก็จะทำให้สามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 ค่าออกมาได้ ดังตารางที่  
 2.14 ถือเป็นความสำเร็จสิ้นการถอดรหัสสตริงคำตอบที่กำลังพิจารณา



รูปที่ 2.4 แผนผังจัดวางสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB  
 ที่ได้จากการถอดรหัสสตริงคำตอบตัวอย่าง

ตารางที่ 2.12 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบตัวอย่าง

$f_1(x): N_W$	$f_2(x): N_S$	$f_{3.1}(x): B_b$	$f_{3.2}(x): MIWR$
7	6	0.1348	6.5000

## 2.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)

ปัญหาในชีวิตจริงหลายๆ ปัญหาอาจมีการกำหนดวัตถุประสงค์จำนวนมากกว่า 1  
 วัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญเท่ากันและต้องการให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน (เช่นเดียวกับ  
 ปัญหาในงานวิจัยนี้ที่มีวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 จำนวน 2 วัตถุประสงค์ย่อยซึ่งต้องการให้มีค่าที่

เหมาะสมที่สุดพร้อมกัน) โดยในกรณีที่ว่าวัตถุประสงค์ทุกวัตถุประสงค์เป็นประเภทการทำให้มีค่าน้อยที่สุด (Minimization) ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (13)$$

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

$k$  คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

$f_i(x)$  คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $i$  เมื่อ  $i = \{1, 2, \dots, k\}$

ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ทำได้ด้วยการหาคำตอบ  $x^*$  ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันของทุกวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อมๆ กันนั่นเอง

$$\text{Minimize } f(x^*) = \{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*)\} \quad (14)$$

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

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

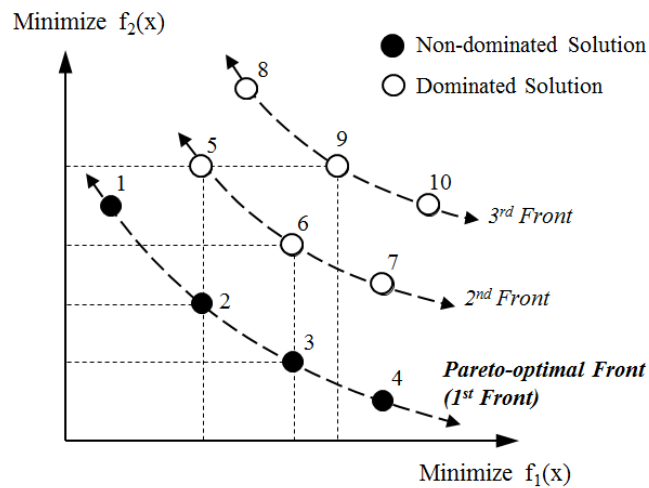
$$f_i(x) \leq f_i(y) \text{ สำหรับทุกค่า } i \in \{1, 2, \dots, k\} \text{ และ}$$

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

คำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นๆ ในสเปซคำตอบเลย เรียกว่า คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Solution) โดยในการแก้ปัญหาอาจพบเพียงคำตอบเดียวหรือหลายคำตอบก็ได้ อย่างไรก็ตาม การค้นพบจำนวนหลายๆ คำตอบนั้นเป็นที่พึงพอใจกว่าการค้นพบเพียง

คำตอบเดียว เนื่องจากทำให้ผู้แก้ปัญหาามีทางเลือกที่หลากหลายกว่า ทั้งนี้ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตทั้งหมดเมื่อนำมารวมกันเป็นเซตจะเรียกว่า เซตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Set) ขณะที่แนวเส้นโค้งที่ลากผ่านทุกจุดของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตบนสเปซวัตถุประสงค์ ซึ่งทุกตำแหน่งบนเส้นนี้ข่มจุดของคำตอบที่เหลือทั้งหมด เรียกว่า ขอบเซตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Front) (Chutima and Chimklai, 2012)

รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างจุดของคำตอบต่างๆ บนสเปซวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ 2 วัตถุประสงค์ คำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่มีการข่มซึ่งกันและกัน และต่างก็ไม่ถูกข่มจากคำตอบใดเลย ดังนั้นคำตอบที่ 1-4 จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บนขอบเซตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต



รูปที่ 2.5 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

## 2.5 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ

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

หลายวัตถุประสงค์อาจมีความยุ่งยากและใช้เวลานานกว่ากรณีปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากในระหว่างการทำหนดความแข็งแกร่งจะต้องพิจารณาว่าวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันไป

งานวิจัยนี้อาศัยวิธีการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการกำหนดความแข็งแกร่งของคำตอบ โดยคำตอบทั้งหมดที่พิจารณาจะถูกจัดอันดับภายใต้หลักการการครอบงำเชิงพาเรโต และความแข็งแกร่งของแต่ละคำตอบจะถูกกำหนดขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับอันดับที่ได้ ทั้งนี้ เนื่องจากความแข็งแกร่งไม่ได้ถูกประเมินจากค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบโดยตรง แต่ประเมินจากอันดับ จึงอาจเรียกความแข็งแกร่งที่ประเมินได้ว่าเป็น “ความแข็งแกร่งไม่แท้จริง” (Dummy Fitness) วิธีการกำหนดความแข็งแกร่งที่ใช้มีชื่อว่าวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg's Ranking) หรือการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) (Goldberg, 1989) มีขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการพิจารณาที่กราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบทั้งหมด คำตอบที่ไม่ได้ถูกครอบงำโดยคำตอบใดๆ เลยหรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน Pareto-optimal Front (Front ที่ 1) จะถูกจัดอันดับให้เป็นคำตอบอันดับที่ 1 จากนั้นให้ตัดคำตอบอันดับที่ 1 ออกจากการพิจารณา คำตอบในบรรดาคำตอบที่เหลือที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบใดเลยจะถูกจัดให้เป็นคำตอบอันดับที่ 2 (อยู่บน Front ที่ 2) ลำดับถัดไปก็ให้ตัดคำตอบอันดับที่ 2 ออกจากการพิจารณา และจัดอันดับคำตอบในอันดับถัดๆ ไปด้วยหลักการเดียวกันนี้จนครบ สุดท้ายให้ทำการกำหนดความแข็งแกร่งของแต่ละคำตอบ โดยให้ค่าเท่ากับเลขอันดับของคำตอบนั้นหรือเท่ากับเลขลำดับของ Front ที่คำตอบนั้นตั้งอยู่

จากกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มตัวอย่างคำตอบ 10 คำตอบดังรูปที่ 2.5 เนื่องจากคำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นเลย มีการตั้งอยู่บน Front ที่ 1 จึงกำหนดให้เป็นคำตอบที่ดีเป็นอันดับ 1 และมีค่าความแข็งแกร่งเท่ากับ 1 จากนั้นเมื่อตัดคำตอบที่ 1-4 ออกจากกราฟ จะพบว่าคำตอบที่ 5-7 เป็นคำตอบกลุ่มถัดไปที่ไม่ถูกงำโดยบรรดาคำตอบที่เหลือ นั่นคือตั้งอยู่บน Front ที่ 2 จึงถูกกำหนดให้เป็นคำตอบอันดับ 2 และมีค่าความแข็งแกร่งเท่ากับ 2 และในทำนองเดียวกันนี้ จะพบว่าคำตอบที่ 8-10 เป็นคำตอบอันดับ 3 มีค่าความแข็งแกร่งเท่ากับ 3

อย่างไรก็ตาม วิธีการจัดอันดับคำตอบ (กำหนดความแข็งแกร่ง) ดังที่อธิบายข้างต้นเป็นการจัดอันดับให้กับบรรดาคำตอบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายค่าซึ่งมีความสำคัญเท่ากัน แต่สำหรับคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ 4 ค่าซึ่งมีความสำคัญแตกต่างกันถึง 3 ระดับ เรียงตามระดับความสำคัญสูงสุดไปต่ำสุด ได้แก่

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1: จำนวนสถานีนงาน  $[f_1(x): N_w]$

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 2: จำนวนสถานี  $[f_2(x): N_S]$

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3: ประกอบไปด้วย 2 ค่า ได้แก่ ค่าความสมดุลของงานระหว่างสถานีงาน  $[f_{3.1}(x): B_b]$  และตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของงาน  $[f_{3.2}(x): MIWR]$

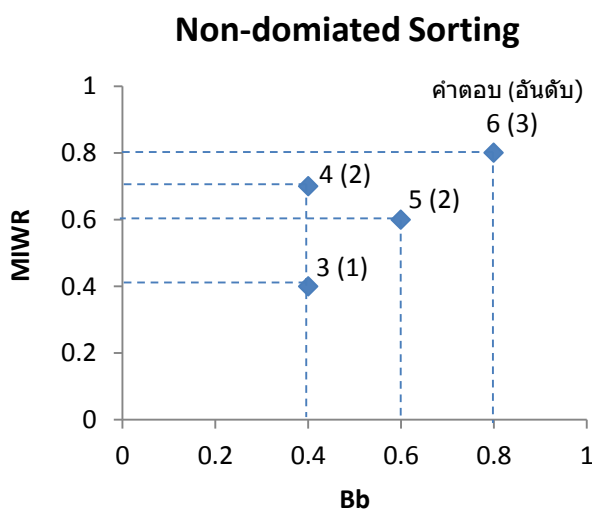
โดยในการแก้ปัญหาต้องการทำให้ทุกค่าฟังก์ชันมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ วิธีในการจัดอันดับคำตอบนั้นจะพิจารณาจากค่า  $f_1(x)$  เป็นลำดับแรก โดยคำตอบที่มีค่า  $f_1(x)$  ต่ำจะมีอันดับที่ดีกว่าคำตอบที่มีค่า  $f_1(x)$  สูงกว่าเสมอ ถ้าพบว่าหลายคำตอบที่มีค่า  $f_1(x)$  เท่ากันให้จัดอันดับภายในกลุ่มคำตอบเหล่านั้นแยกย่อยลงไปด้วยการพิจารณาที่ค่า  $f_2(x)$  โดยคำตอบที่มีค่า  $f_2(x)$  ต่ำจะมีอันดับที่ดีกว่าคำตอบที่มีค่า  $f_2(x)$  สูงกว่า (การพิจารณาค่า  $f_1(x)$  และ  $f_2(x)$  นั้นเป็นการพิจารณาแยกออกจากกันอย่างเป็นลำดับขั้น ไม่ได้อาศัยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ) และถ้ายังพบว่ามีหลายคำตอบที่มีทั้งค่า  $f_1(x)$  และ  $f_2(x)$  เท่ากัน ก็ให้พิจารณาจัดอันดับคำตอบเหล่านั้นแยกย่อยลงไปด้วยการพิจารณาค่า  $f_{3.1}(x)$  และ  $f_{3.2}(x)$  ร่วมกันตามวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำดังที่อธิบายข้างต้น

ตารางที่ 2.13 แสดงการกำหนดค่าความแข็งแรงหรือการจัดอันดับของคำตอบตัวอย่างในปัญหาการจัดสมดุลในงานวิจัยนี้จำนวน 8 คำตอบ เรียงลำดับตามความแข็งแรงที่ดีที่สุดไปแย่งที่สุด ทั้งนี้ เนื่องจากคำตอบที่ 3-6 มีค่า  $f_1(x)$  และ  $f_2(x)$  เท่ากัน จึงทำการจัดอันดับด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ ซึ่งมีกราฟค่าวัตถุประสงค์ประกอบการพิจารณาจัดอันดับดังตารางที่ 2.6 ขณะที่คำตอบอื่นๆ ที่เหลือสามารถจัดอันดับโดยพิจารณาจาก  $f_1(x)$  และ  $f_2(x)$  ได้เลยทันที เพราะต่างก็เป็นคำตอบที่มีค่า  $f_1(x)$  และ  $f_2(x)$  ไม่ซ้ำกับคำตอบใด

ตารางที่ 2.13 ตัวอย่างการจัดอันดับคำตอบของปัญหาในงานวิจัย

คำตอบ	$f_1(x): N_W$	$f_2(x): N_S$	$f_{3.1}(x): B_b$	$f_{3.2}(x): MIWR$	Fitness (อันดับ)
1	7	6	0.50	0.70	1
2	8	4	0.40	0.70	2
3	8	5	0.40	0.40	3
4	8	5	0.40	0.70	4
5	8	5	0.60	0.60	4
6	8	5	0.80	0.80	5
7	9	5	0.70	0.50	6





รูปที่ 2.6 การจัดอันดับคำตอบ 3-6

## 2.6 การสร้างความหลากหลายของประชากรคำตอบด้วยวิธีการวัดระยะความหนาแน่น

ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์นั้นนอกจากต้องการให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ยังต้องการให้คำตอบที่ได้มีความหลากหลาย หรือมีการกระจายตัวบน Front ในกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อย่างสม่ำเสมอโดยไม่เกาะกลุ่มกันอยู่ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งโดยเฉพาะอีกด้วย วิธีการสร้างความหลากหลายให้กับประชากรคำตอบนั้นทำได้โดยการลดทอนความแข็งแรงของบรรดาคำตอบบน Front เดียวกันที่เกาะกลุ่มกันอยู่ให้น้อยลง เพื่อลดบทบาทของคำตอบเหล่านั้นที่มีต่อกระบวนการแก้ปัญหา เช่น ลดโอกาสที่จะถูกเลือกไปเป็นประชากรคำตอบพ่อแม่ในแต่ละรอบของกระบวนการแก้ปัญหาหรือถูกเลือกไปเป็นดำเนินการอื่นๆ ระหว่างการค้นหาคำตอบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แม้คำตอบใดๆ ก็ตามจะถูกลดทอนความแข็งแรงให้ต่ำกว่าคำตอบอื่นๆ บน Front เดียวกัน แต่ถือว่าคำตอบนั้นยังคงมีความแข็งแรง (คุณภาพ) สูงกว่าคำตอบอื่นๆ ที่อยู่บน Front ที่แยกกว่า

วิธีการที่นำมาใช้ในการสร้างความหลากหลายให้กับคำตอบในงานวิจัยนี้มีชื่อว่าวิธีการวัดระยะความหนาแน่น (Crowding Distance Approach) (Dep et al., 2002) เป็นวิธีการที่มีความสามารถในการทำให้คำตอบที่ดีที่สุดบน Pareto-optimal Front มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากขึ้น วิธีการนี้มีไว้ใช้ในการชี้วัดว่าแต่ละคำตอบนั้นตั้งอยู่บนตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของคำตอบเพียงใดเมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มของคำตอบบน Front เดียวกัน คำตอบที่มีค่า Crowding Distance สูงแสดงว่าอยู่ในตำแหน่งที่มีการกระจายตัวของคำตอบดี ในทางตรงกันข้าม คำตอบที่มีค่า

Crowding Distance ต่ำแสดงว่าอยู่ในตำแหน่งที่มีการเกาะกลุ่มของคำตอบสูง การคำนวณค่า Crowding Distance ของคำตอบใดๆ ก็ตามจะมีความเกี่ยวข้องกับบรรดาคำตอบที่อยู่ Front เดียวกันเท่านั้น โดยขั้นตอนในการคำนวณมีดังนี้

1. กำหนดให้  $l$  คือจำนวนคำตอบทั้งหมดบน Front ที่กำลังพิจารณา  $x_{[i,k]}$  คือคำตอบ  $x$  ใดๆ บน Front นั้น ซึ่งเป็นคำตอบลำดับที่  $i$  เมื่อเรียงตามค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $k$  จากน้อยไปมาก โดย  $i = \{1, \dots, l\}$ ,  $i = \{1, \dots, l\}$  และ  $k = \{1, \dots, K\}$  และ กำหนดให้  $cd_k(x_{[i,k]})$  คือค่า Crowding Distance ในแนวค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $k$  ของคำตอบ  $x_{[i,k]}$

เมื่อพิจารณาในแนวค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $k$  ใดๆ คำตอบลำดับที่ 1 (มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด) และลำดับสุดท้ายหรือลำดับที่  $l$  (มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด) จะถูกกำหนดให้มีค่า Crowding Distance เท่ากับอนันต์เสมอ หรือเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ว่า  $cd_k(x_{[1,k]}) = \infty$  และ  $cd_k(x_{[l,k]}) = \infty$  ทั้งนี้ เนื่องจากคำตอบทั้งสองเป็นคำตอบที่กำหนดขอบเขตของ Front ซึ่งจะต้องถูกนำไปใช้ในกระบวนการค้นหาคำตอบอยู่เสมอ จึงต้องไม่ถูกลดทอนความแข็งแรงออกไป ส่วนค่า Crowding Distance ของคำตอบอื่นๆ สามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$cd_k(x_{[i,k]}) = \frac{f_k(x_{[i+1,k]}) - f_k(x_{[i-1,k]})}{f_k^{max} - f_k^{min}} \quad (15)$$

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  $k$  ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดของกลุ่มคำตอบบน Front ตามลำดับ

2. ค่า Crowding Distance ของคำตอบ  $x$  หรือ  $cd(x)$  สามารถคำนวณได้จากการรวมเอาค่า Crowding Distance ในทุกแนวค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $k$  ของคำตอบ  $x$  เองเข้าไว้ด้วยกัน หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$cd(x) = \sum_{k=1}^K cd_k(x_{[i,k]}) \quad (16)$$

## 2.7 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ค้นพบจากการแก้ปัญหาจะเป็นที่น่าพึงพอใจต่อผู้ใช้งานก็ต่อเมื่อมีจำนวนคำตอบที่มากเพียงพอ มีความหลากหลาย ตลอดจนมีความใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ดังนั้น ในการชี้วัดว่าสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในแก้ปัญหาจึงสามารถพิจารณาได้จากกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมเหล่านั้นค้นพบ ว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับที่กล่าวข้างต้นหรือไม่ งานวิจัยนี้อาศัยตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวชี้วัด ดังที่ Kumar and Singh (2007) ได้นำเสนอไว้ ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพारेโต การกระจายตัว และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ โดยแต่ละตัวชี้วัดมีรายละเอียดดังนี้

**ตัวชี้วัดที่ 1 การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพारेโต (Convergence to Pareto-optimal Set)**

ตัวชี้วัดนี้ใช้แสดงถึงความแตกต่างระหว่างกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพारेโตที่อัลกอริทึมหามาได้ ( $A$ ) กับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพारेโตที่แท้จริง ( $A^*$ ) โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้

$$Convergence(A) = \frac{\sum_{i=1}^{|A^*|} dt_i}{|A^*|} \quad (17)$$

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

โดยที่  $|A^*|$  คือจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพारेโตที่แท้จริง

$K$  คือจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

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

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

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

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

## ตัวชี้วัดที่ 2 การกระจายตัว (Spread)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้เพื่อประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึมหามาได้ (กลุ่มคำตอบ A) โดยพิจารณาจากระยะทางเฉลี่ยระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้ (ดูรูปที่ 2.7 ประกอบ)

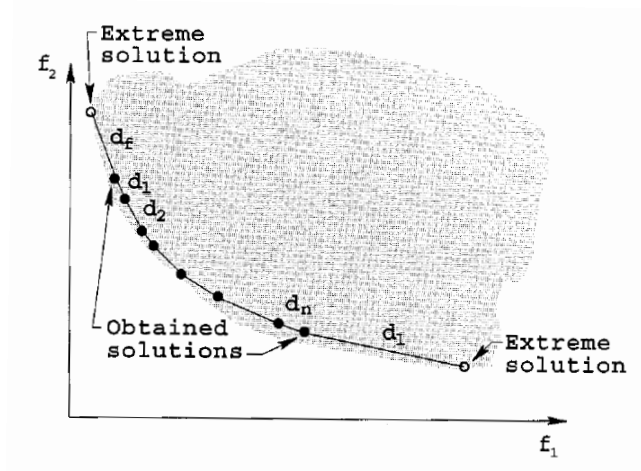
$$Spread(A) = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (18)$$

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

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

$\bar{d}$  คือระยะห่าง  $d_i$  เฉลี่ย

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



รูปที่ 2.7 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว

(Deb และคณะ, 2002)

### ตัวชี้วัดที่ 3 อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้ใช้แสดงว่าในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้น มีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบที่อัลกอริทึมอื่นๆ หามาได้ทั้งหมด คิดเป็นเป็นอัตราส่วนเท่าใด กำหนดให้  $A_j$  คือกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึม  $j$  หามาได้ โดย  $j = (1, \dots, J)$  และให้  $A$  คือเซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้ของทุกอัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน ( $A = A_1 \cup \dots \cup A_J$ ) อัตราส่วนคำตอบของเซต  $A_j$  ที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดๆ ในเซต  $A$  (หรืออีกมุมหนึ่งก็คืออัตราส่วนของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณในเซต  $A_j$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (x)

$$R_{NDS}(A_j) = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A_j|} \quad (19)$$

โดย  $y < x$  หมายถึงคำตอบ  $x$  ถูกครอบงำโดยคำตอบ  $y$

## 2.8 เทคนิคการเลือกด้วยวิธีการวงล้อมืด

กรณีที่เรามีทางเลือกหลายทางที่ต้องการสุ่มเลือกออกมาเพียงทางเลือกเดียว โดยแต่ละทางเลือกมีโอกาสที่จะถูกเลือกมาน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับค่าบางค่าที่กำหนด เช่น โอกาสที่

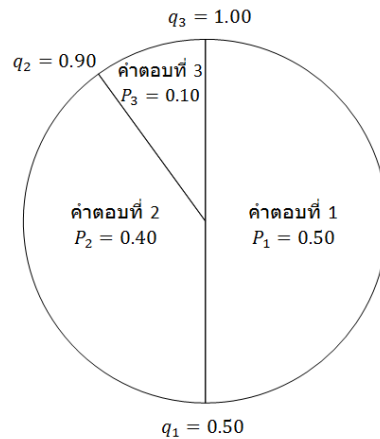
คำตอบจะถูกเลือกมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรง บิตในคำตอบมีโอกาสถูกเลือกมาดำเนินการบางอย่างมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราที่กำหนด เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะอาศัยวิธีการเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Selection) ของ Goldberg (1989) เป็นวิธีการสุ่มเลือกทางเลือกเหล่านั้น

วิธีการคือให้นำค่าที่บ่งชี้โอกาสในการถูกเลือกมาทำการ Normalized ให้ค่านั้นของทุกๆ ทางเลือกกลายเป็นค่าความน่าจะเป็นที่รวมกันแล้วเท่ากับ 1 พร้อมหาความน่าจะเป็นสะสมของแต่ละทางเลือก จากนั้นสร้างวงล้อรูเล็ตขึ้นมาโดยกำหนดให้มีพื้นที่ขนาดเท่ากับ 1 หน่วย ให้แบ่งพื้นที่วงล้อออกเป็นส่วนๆ ให้กับแต่ละทางเลือกโดยมีขนาดของพื้นที่แต่ละส่วนตามความน่าจะเป็นของทางเลือกนั้นๆ

ตารางที่ 2.14 แสดงตัวอย่างทางเลือกในรูปของคำตอบ  $i$  จำนวน 3 คำตอบ ที่มีค่าความแข็งแรงแตกต่างกันไป โดยคำตอบที่ดี (ค่าความแข็งแรงน้อย) จะมีโอกาสถูกเลือกสูง ส่วนคำตอบที่แย่ (ค่าความแข็งแรงมาก) จะมีโอกาสถูกเลือกต่ำ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าความแข็งแรงแปรผกผันกับโอกาส จึงให้ทำการปรับค่าความแข็งแรงไปในทางตรงกันข้ามเสียก่อน เพื่อให้ค่าความแข็งแรงกับโอกาสที่จะถูกเลือกแปรผันไปในทางเดียวกัน จากนั้นทำการ Normalized ค่าความแข็งแรงที่ปรับแล้วของแต่ละคำตอบได้ออกมาเท่ากับ  $P_i$  พร้อมทั้งหาค่า  $q_i$  หรือค่า  $P_i$  สะสมของแต่ละคำตอบ  $i$  (ค่า  $q_i$  ของคำตอบสุดท้ายจะเท่ากับ 1 พอดี) เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้แล้วสามารถวงล้อรูเล็ตของทางเลือกคำตอบได้ดังรูปที่ 2.8

ตารางที่ 2.14 การคำนวณค่าต่างๆ ในการสร้างวงล้อรูเล็ต

คำตอบ ( $i$ )	Fitness	Adjusted Fitness	$P_i$	$q_i$
1	1	5	0.50	0.50
2	2	4	0.40	0.90
3	5	1	0.10	1.00



รูปที่ 2.8 วงล้อรูเล็ต

การสุ่มเลือกทางเลือกจากวงล้อรูเล็ตมีขั้นตอนดังนี้

1. สุ่มตัวเลข  $r$  ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมา
2. ถ้า  $r \leq q_1$  ให้เลือกทางเลือกที่ 1
5. ถ้า  $q_{i-1} < r \leq q_i$  โดยที่  $i > 1$  ให้เลือกทางเลือกที่  $i$

จากกรณีตัวอย่างข้างต้น สมมติว่าสุ่มได้ค่า  $r = 0.723$  พบว่า  $q_1 < r \leq q_2$  ดังนั้นคำตอบที่ถูกสุ่มเลือกจึงเป็นคำตอบที่ 2

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แม้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบจะมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่โดยส่วนใหญ่มักจะมุ่งเน้นไปที่สายการประกอบเดี่ยว ที่ทำหน้าที่ผลิตสินค้าเพียงชนิดเดียวหรือสินค้าชนิดที่มีหลายรุ่นปะปนกันไป แต่ในทางตรงกันข้าม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหารูปแบบทั่วไป (Generalized Problem) ของการจัดสมดุลสายการประกอบ (Guo และ Tang, 2009) นั้นมีจำนวนค่อนข้างจำกัด โดยหนึ่งในนั้นคืองานวิจัยเชิงสำรวจของ Lusa (2008) ที่ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสายการประกอบแบบหลายสายหรือแบบขนานจากผลงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยได้แสดงถึงประเภทต่างๆ ของสายการประกอบแบบขนาน ตลอดจนข้อดีข้อเสียเมื่อเทียบกับสายการประกอบเดี่ยว อย่างไรก็ตาม นอกจากงานวิจัยชิ้นนี้แล้วยังมีงานวิจัยชิ้นอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในลำดับต่อไปนี้

ในด้านการออกแบบสายการประกอบแบบขนาน Sürer และ Dagli (1994) ได้นำเสนอขั้นตอนเชิงฮิวริสติกและอัลกอริทึมในการพิจารณาจำนวนสายการประกอบพร้อมลักษณะในการจัดวางสายการประกอบเหล่านั้น ต่อมา Sürer (1998) ได้แสดงให้เห็นถึงกลยุทธ์ทางเลือกในการออกแบบสายการประกอบแบบขนานเพื่อใช้สำหรับผลิตสินค้าชนิดเดียว ภายใต้สถานการณ์ที่ต้องใช้พนักงานในจำนวนที่มากกว่าจำนวนงานที่มีอยู่ในสายการประกอบ เพื่อรองรับความต้องการด้านกำลังการผลิตที่สูงมากๆ โดยกลยุทธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสายการประกอบที่อาศัยจำนวนพนักงานน้อยที่สุด ซึ่งในกระบวนการหาคำตอบประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) จัดสมดุลสายการประกอบ (2) พิจารณากำหนดสถานีงานแบบขนาน หรือ Parallel Stations และ (3) กำหนดสายการประกอบแบบขนาน ทั้งนี้ แต่ละสายการประกอบในสายการประกอบแบบขนานมีการดำเนินงานเป็นอิสระต่อกัน

Gökçen และคณะ (2006) ได้นำเสนอขั้นตอนเชิงฮิวริสติกพร้อมโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียวแบบขนานภายใต้รูปแบบ Passive และ Active โดยแสดงให้เห็นว่า การเกิดขึ้นของสถานีงานร่วมภายในสายการประกอบแบบขนาน ซึ่งบรรจุชิ้นงานจากสองสายการประกอบเดี่ยวที่อยู่ติดกัน จะทำให้การดำเนินงานทั้งระบบนั้นอาศัยจำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบการดำเนินงานในลักษณะสายการประกอบเดี่ยวที่เป็นอิสระต่อกันจำนวนหลายๆ สาย ลำดับต่อมา Benzer และคณะ (2007) ได้พัฒนาแบบจำลองเครือข่าย (Network Model) สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด โดยแบบจำลองนี้พัฒนามาจากแบบจำลองเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest-Route Model) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว

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

Baykasoğlu และคณะ (2009) ได้นำเสนออัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจากวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัด



สมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบขนาน ที่แต่ละสายการประกอบผลิตผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกัน (ในงานวิจัยระบุว่าเป็นสายการประกอบแบบขนานหลายผลิตภัณฑ์ หรือ Multi Product Assembly Lines) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานและเวลาสูญเสียเปล่าของสถานีงานน้อยที่สุด ผลปรากฏว่าอัลกอริทึมนี้นอกจากจะมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบขนาดเล็กและขนาดกลางเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมจากงานวิจัยอื่นๆ แล้ว ยังแสดงให้เห็นศักยภาพในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดีด้วย ลำดับต่อมา อัลกอริทึมเชิงฮิวริสติกโดยมีพื้นฐานจากการค้นหาแบบกระจาย (Scatter Search Based Algorithm) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Guo และ Tang (2009) เพื่อใช้สำหรับจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานสองสายการประกอบย่อย ให้ได้มาซึ่งจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ผลปรากฏว่าอัลกอริทึมนี้สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในบางปัญหาการจัดสมดุล เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมของ Gökçen และคณะ (2006)

Özcan และคณะ (2009) ได้นำเสนออัลกอริทึมค้นหาคำตอบแบบทาบ (Tabu Search Algorithm) ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานภายใต้หลายวัตถุประสงค์ อันได้แก่ ประสิทธิภาพของสายการประกอบสูงสุด (ซึ่งทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด) และความแตกต่างของปริมาณภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด โดยวัตถุประสงค์ทั้งสองถูกรวมเข้าด้วยกันเป็นวัตถุประสงค์เดียวด้วยกระบวนการส่วนเบี่ยงเบนน้อยที่สุด (Minimum Deviation Method: MDM) เพื่อให้ง่ายต่อการค้นหาคำตอบเชิงประนีประนอมที่ดีที่สุด (Best Compromise Solution) ที่ทำให้ผลรวม Fractional Deviation ของแต่ละวัตถุประสงค์ย่อยมีค่าต่ำที่สุดนั่นเอง

Kara และคณะ (2010) ได้แสดงวิธีการโปรแกรมเป้าหมาย (Goal Programming Approach) เพื่อใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานให้ได้ผลลัพธ์ตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นสองลักษณะ ได้แก่ เป้าหมายที่มีค่ากำหนดแน่นอน (Precise Goal) และเป้าหมายที่มีค่ากำหนดแบบคลุมเครือ (Fuzzy Goal) กล่าวคือเป็นเป้าหมายที่ผู้จัดสมดุลมีค่าที่ดีที่สุดที่ต้องการ แต่ก็มีช่วงผ่อนผันช่วงหนึ่งที่ยอมรับได้ โดยเป้าหมายที่ผู้จัดสมดุลจะต้องกำหนดค่าประกอบไปด้วยสามเป้าหมายที่ขัดแย้งกัน อันได้แก่ จำนวนสถานีงานที่ต้องการ (ไม่เกินกี่สถานี), รอบเวลาการผลิตที่ต้องการ (ไม่เกินกี่หน่วยเวลา) และจำนวนชิ้นงานต่อสถานีงาน (ไม่เกินกี่ชิ้นงานต่อสถานีงาน) พร้อมระบุระดับความสำคัญของแต่ละเป้าหมาย โดยในท้ายที่สุดจะได้ผลลัพธ์ในการจัดสมดุลสายการประกอบที่ดีที่สุดสอดคล้องตามเป้าหมายเหล่านั้น

Esmailian และคณะ (2009) ได้พัฒนาวิธีการเชิงฮิวริสติกเพื่อใช้ในการกำหนดชิ้นงานผลิตภัณฑ์ผสมลงสู่สถานีงานต่างๆ ในสายการประกอบแบบขนาน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะถูกใช้เป็นคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution) ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยวิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) ต่อไป ซึ่งในภายหลัง Ismaili และคณะ (2011) ได้คิดค้นอัลกอริทึมที่

ประกอบไปด้วยสองขั้นตอนในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เพื่อให้รอบเวลาการผลิตมีค่าต่ำที่สุด โดยขั้นตอนแรกของอัลกอริทึมมีไว้เพื่อหาคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีการเชิงฮิวริสติกของ Esmailian และคณะ (2009) ที่ได้นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ และในขั้นตอนที่สองเป็นการปรับปรุงรอบเวลาการผลิตให้มีค่าที่น้อยที่สุดโดยอาศัยอัลกอริทึมค้นหาคำตอบแบบทาบู่

ภายหลังจากทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบสิ่งที่น่าสนใจอยู่หลายประเด็น ได้แก่

1. ตามที่ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบเดี่ยวแบบธรรมดาเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก หรือ NP-Hard Problem (Scholl, 1995) ดังนั้น ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานซึ่งเป็นรูปแบบปัญหาทั่วไป (Generalized Problem) จึงเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยากเป็นอย่างน้อยด้วยเช่นกัน ส่งผลให้มีความจำเป็นต้องพัฒนาอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพอันเป็นกระบวนการเมตาฮิวริสติกที่เฉพาะตัว ไว้ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่มีขนาดปัญหาใหญ่
2. แม้ว่าจะงานวิจัยต่างๆ จะกล่าวว่าสายการประกอบที่ศึกษา เป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน แต่สายการประกอบย่อยแต่ละสายนั้นทำหน้าที่ผลิตผลิตภัณฑ์เพียงชนิดเดียว
3. งานวิจัยเกือบทั้งหมดมีจุดมุ่งหมายในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของค่าวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียว แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ผู้จัดการฝ่ายผลิตย่อมต้องการจัดสมดุลเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมๆ กันไป ด้วยเหตุนี้ แนวทางการในแก้ปัญหาการจัดสมดุลภายใต้หลายวัตถุประสงค์ที่อาจมีความขัดแย้งกัน จึงเป็นสิ่งที่สามารถสร้างความพึงพอใจได้มากกว่า
4. ความสัมพันธ์เชิงทักษะของชิ้นงานต่างๆ ที่ถูกกำหนดลงในแต่ละสถานีงาน เป็นปัจจัยที่ถูกตัดออกจากการพิจารณาจัดสมดุลอยู่เสมอ กล่าวคือ อาจเป็นไปได้ที่ในสถานีงานประกอบไปด้วยชิ้นงานหลายชิ้นที่ไม่ต่อเนื่องกัน ต้องอาศัยทักษะการทำงานที่มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ส่งผลให้การจัดวางพนักงานผลิตค่อนข้างมีความลำบากในทางปฏิบัติ

โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่สามารถแก้ไขบรรดาจุดอ่อนทั้งหมดข้างต้น

### บทที่ 3

## การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล

### 3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) เป็นอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการที่คิดค้นโดย Simon (2008) มีแนวคิดที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการอพยพย้ายที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตระหว่างเกาะต่างๆ โดยแต่ละเกาะนั้นก็จะมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสามารถขี้นได้ด้วยดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัย (Habitat Suitability: HSI) ตัวแปรที่ส่งผลให้เกาะมีค่า HSI สูงหรือต่ำนั้นเรียกว่า ตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variables: SIVs) ซึ่งมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ปริมาณฝน อุณหภูมิ ความหลากหลายของพืชพันธุ์ เป็นต้น

เกาะที่มีค่า HSI สูงจะมีจำนวนชนิดของสิ่งมีชีวิต (สปีชีส์) ที่อาศัยอยู่มาก ขณะที่เกาะที่มีค่า HSI ต่ำจะมีจำนวนสปีชีส์น้อย โดยในเกาะที่มีค่า HSI สูง เนื่องจากมีจำนวนสปีชีส์มากจนใกล้จุดอิ่มตัวอยู่แล้ว อัตราการอพยพออก (Emigration Rate:) ของสปีชีส์ไปยังเกาะอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงจึงมีค่าสูง (การอพยพออกในที่นี้คือการที่ตัวแทนของสปีชีส์อพยพแพร่พันธุ์ออกไปยังเกาะอื่น โดยสปีชีส์บนเกาะเดิมยังคงอยู่ ไม่หายไป) ขณะที่อัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate:) ของสปีชีส์จากเกาะอื่นจะต่ำ และในทางตรงกันข้าม เกาะที่มีค่า HSI ต่ำนั้นมีจำนวนสปีชีส์ที่น้อยมาก อัตราการอพยพออกของสปีชีส์ภายในเกาะจะต่ำ แต่จะมีอัตราการอพยพเข้าของสปีชีส์จากเกาะอื่นสูง ทั้งนี้ เกาะที่มีค่า HSI ต่ำจะมีค่า HSI ที่สูงขึ้นเมื่อมีการอพยพของสปีชีส์ใหม่ๆ เข้ามา เนื่องจากค่า HSI นั้นจะแปรผันไปตามจำนวนสปีชีส์

ในการนำ BBO มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานนั้น คำตอบ (สตริงคำตอบ) จะเปรียบเสมือนเกาะ ค่าความแข็งแรงของคำตอบเปรียบเสมือนค่า HSI และบิตต่างๆ ของคำตอบเปรียบเสมือนเป็น SIVs (ค่าของบิตต่างๆ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งส่งผลให้ค่า HSI มีความแตกต่างออกไป) คำตอบที่ดีมีแนวโน้มสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะ (ค่าสิทธิ์ของบิตต่างๆ) ให้กับคำตอบอื่นโดยเฉพาะกับคำตอบที่แย่ แต่จะมีโอกาสน้อยที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่น อย่างไรก็ตาม แม้คำตอบที่ดีอาจมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็คาดหวังว่าจะพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้นไปในทางตรงกันข้าม

คำตอบที่แย่งจะมีโอกาสสูงที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นโดยเฉพาะจากคำตอบที่ดีและพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้น แต่จะมีโอกาสน้อยในการถ่ายทอดคุณลักษณะของตัวเองให้กับคำตอบอื่นๆ

### 3.2 ขั้นตอนการทำงานของ BBO ในการแก้ปัญหาการจับสมดุล

ขั้นตอนของ BBO ในการแก้ปัญหาการจับสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่นำเสนอในงานวิจัยเป็นดังนี้ (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ)

1. นำเข้าข้อมูลต่างๆ ของปัญหา ได้แก่ แผนภาพลำดับก่อนหลัง เวลาขึ้นงาน จำนวนและสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของสายการประกอบที่ขนานกัน รอบเวลาการผลิต จำนวนประชากรคำตอบ ( $N$ ) และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ( $P_m$ )
2. สร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$  ด้วยวิธีการสุ่ม เมื่อ  $N$  คือขนาดของประชากรคำตอบที่กำหนด พร้อมคัดลอกออกมาเป็นเซตสตริงคำตอบชั่วคราว  $Z = \{z_1, \dots, z_N\}$
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ  $y_i$  และ  $z_i$
4. กำหนดค่าความแข็งแรงของทุกสตริงคำตอบ  $y_i$  และ  $z_i$  ด้วยวิธี Non-dominated Sorting (Goldberg, 1989) พร้อมกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์  $k$  ซึ่งจะมีค่าน้อยเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรง โดยค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบเรียงจากสตริงที่ดีที่สุดไปแย่งจะเท่ากับ  $1, \dots, F$  ขณะที่ค่าสปีชีส์เคาท์จะเท่ากับ  $F, \dots, 1$
5. คำนวณอัตราการอพยพเข้า ( $\lambda_k$ ) อัตราการอพยพออก ( $\mu_k$ ) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ( $P_{\lambda,k}$ ) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ( $P_{\mu,k}$ ) ของแต่ละสตริงคำตอบ  $y_i$  และ  $z_i$  ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสปีชีส์เคาท์  $k$  ที่มีอยู่ พฤติกรรมของค่าในการอพยพต่างๆ ข้างต้นนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งมีสมการที่ใช้คำนวณแตกต่างกันออกไป แต่ในงานวิจัยนี้จะอาศัยรูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal ซึ่งจากการทดลองของ Ma (2010) พบว่าเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสูงที่สุด โดยสมการที่ใช้มีดังนี้

$$\lambda_k = \frac{I}{2} \left( \cos \left( \frac{k\pi}{n} \right) + 1 \right) \quad (20)$$

$$\mu_k = \frac{E}{2} \left( -\cos \left( \frac{k\pi}{n} \right) + 1 \right) \quad (21)$$

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \quad (22)$$

$$P_{\mu,k} = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^K \mu_k} \quad (23)$$

เมื่อ  $K$  คือค่าสปีชีส์เคาท์ที่สูงที่สุด และ  $n = K + 1$   
 $I$  และ  $E$  คืออัตราการอพยพเข้าและออกที่มากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้  
กำหนดให้เท่ากับ 1

#### 6. กำหนดให้

$y_{k,n_k}$  คือสตริงคำตอบเริ่มต้นในสปีชีส์เคาท์  $k$  ตัวที่  $n_k$   
โดยที่  $k = 1, \dots, K$  และ  $n_k = 1, \dots, N_k$

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

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

ดำเนินการอพยพ โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) กำหนดให้  $k' = K'$ ,  $n_{k'} = 1$  และ  $e = 1$
- 2) สร้างเลขสุ่ม  $r_1$  ในช่วง 0 ถึง 1 ให้กับบิตที่  $e$  ของคำตอบ  $z_{k',n_{k'}}$  ถ้า  $r_1 > P_{\lambda,k'}$  จะไม่มีการอพยพเข้าสู่บิตดังกล่าวและให้ข้ามไปขั้นตอนที่ 6.6 แต่ถ้า  $r_1 \leq P_{\lambda,k'}$  แสดงว่าบิตนั้นจะได้รับการอพยพเข้าหรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตริงอื่น และให้ดำเนินการในขั้นตอนต่อไป
- 3) พิจารณาเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y$  สุ่มเลข  $r_2$  ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมา เพื่อใช้เลือกสปีชีส์เคาท์ของคำตอบที่จะอพยพออกโดยอาศัยวงล้อรูเล็ตต์ของค่า  $P_{\mu,k}$  ถ้าสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์นั้นมีสตริงเดียว ให้เลือกสตริง  $y_{k,n_k}$  นั้นเป็นสตริงอพยพออก แต่ถ้ามีหลายสตริงให้สุ่มเลือกสตริงใดก็ได้
- 4) อพยพค่าบิต โดยแทนค่าของ  $z_{k',n_{k'}}(e)$  ด้วยค่า  $y_{k,n_k}(e)$

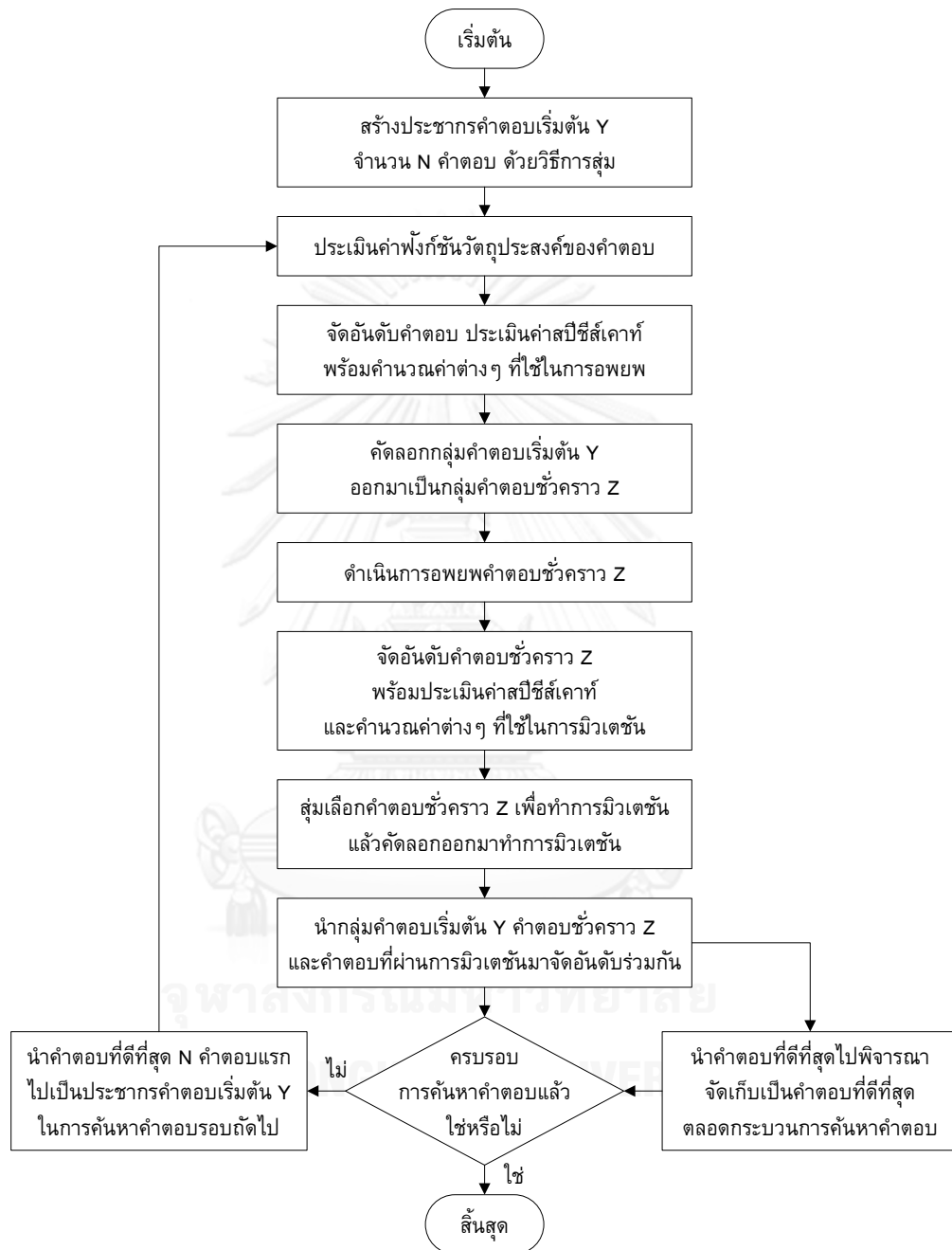
- 5) ซ่อมแซมสตริง  $z_{k',n_{k'}}$  โดยเปลี่ยนค่าของบิตตำแหน่งอื่นที่ไม่ใช่ตำแหน่ง  $e$  ที่มีค่าเท่ากับ  $y_{k,n_k}(e)$  ไปเป็นค่าเท่ากับ  $z_{k',n_{k'}}(e)$  เดิมก่อนอพยพ (ถ้าในขั้นตอน 6.4 มีค่า  $z_{k',n_{k'}}(e) = y_{k,n_k}(e)$  ไม่ต้องทำการซ่อมแซมใดๆ)
  - 6) ถ้า  $e < E$  ให้กำหนด  $e = e + 1$  และกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า  $e < E$  ให้ไปที่ขั้นตอนถัดไป
  - 7) ถ้า  $n_{k'} < N_{k'}$  ให้กำหนดค่า  $n_{k'} = n_{k'} + 1$  และ  $e = 1$  แล้วกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า  $n_{k'} = N_{k'}$  ให้ไปที่ขั้นตอนถัดไป
  - 8) ถ้า  $k > 1$  ให้กำหนดค่า  $k = k - 1, n_{k'} = 1$  และ  $e = 1$  แล้วกลับไปเริ่มทำซ้ำที่ขั้นตอน 6.3 แต่ถ้า  $k = 1$  ให้หยุดกระบวนการอพยพ
7. พิจารณาเฉพาะสตริงคำตอบภายในเซตคำตอบชั่วคราว  $Z$  (หลังอพยพ) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ  $z_i$  พร้อมกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ จากนั้นคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์  $k$  ( $P_k$ ) และความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาท์  $k$  ไปทำการมิวเตชัน ( $m_k$ ) ด้วยสมการที่ 24 และ 25 ตามลำดับ

$$P_k = \frac{\prod_{j=1}^k \left(\frac{I}{E}\right)^k \left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \left(\frac{I}{E}\right)^i \left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \quad (24)$$

$$m_k = \frac{1 - P_k}{\sum_{k=1}^K (1 - P_k)} \quad (25)$$

8. สุ่มเลข  $r_3$  ในช่วง 0 ถึง 1 ขึ้นมาหนึ่งค่า หากค่านี้ตกอยู่ในช่วงวงล้อรูเล็ตค่า  $m_k$  ของสปีชีส์เคาท์ใด ให้คัดลอกสตริง  $z_i$  ในสปีชีส์เคาท์นั้นทั้งหมดไปทำการมิวเตชันเป็นสตริง  $z'_i$  โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange (Kim และคณะ, 1996)
9. นำเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y$  สตริงคำตอบชั่วคราว  $Z$  และสตริงที่ผ่านการมิวเตชัน  $Z'$  มารวมเข้าไว้ด้วยกัน หากมีสตริงที่ซ้ำกันหลายสตริงให้ตัดออกเหลือสตริงเดียว จากนั้นทำการจัดอันดับสตริงทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting พร้อมคำนวณค่า Crowding Distance

10. นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปพิจารณาจัดเก็บเป็นสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) โดยนำสตริงที่ดีที่สุดไปรวมเข้ากับ Elitist จากเจนเนอเรชันก่อนหน้า แล้วจัดอันดับร่วมกันด้วยวิธี Non-dominated Sorting สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้คือ Elitist ล่าสุดเมื่อดำเนินการมาถึงเจนเนอเรชันนี้นั่นเอง
11. ลีนสุดกระบวนการของเจนเนอเรชันนี้ หากยังไม่ครบตามจำนวนเจนเนอเรชันที่กำหนด ให้เลือกสตริงคำตอบในข้อ 9 ที่ดีที่สุดจำนวน  $N$  สตริงแรกไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจนเนอเรชันถัดไป ทั้งนี้ หากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวที่  $N$  นั้นสามารถเลือกได้จากหลายสตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากัน ให้เลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance สูงที่สุด และหากสตริงเหล่านั้นมีค่า Crowding Distance ยังเท่ากันอีก ในที่นี้กำหนดให้เลือกสตริงที่มีค่า  $f_{3.1}(x)$  น้อยที่สุด จากนั้นเริ่มการดำเนินการเจนเนอเรชันถัดไปด้วยการกลับไปวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 3 ถึง 11 แต่ถ้าครบเจนเนอเรชันที่กำหนดแล้วให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ



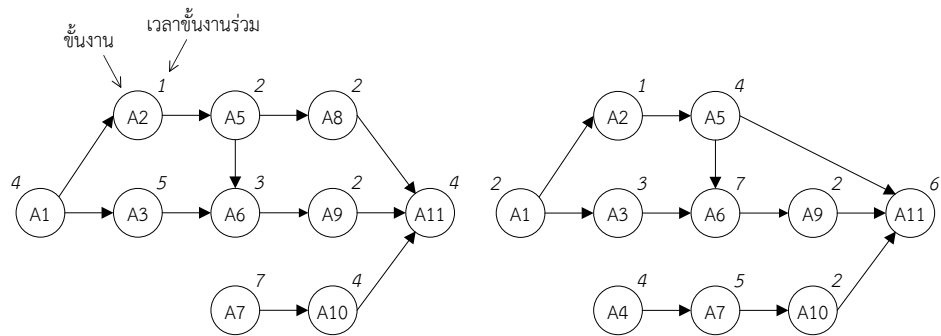
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ BBO



### 3.3 ตัวอย่างการใช้งาน BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุล

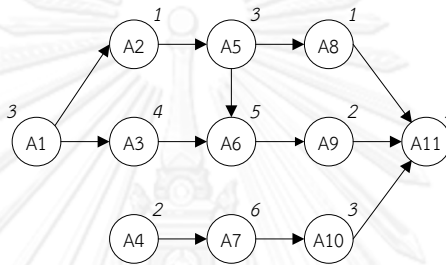
ในส่วนนี้จะยกตัวอย่างการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน AB ภายใต้วัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ดังที่เสนอในงานวิจัยนี้ (ดูรายละเอียดในบทที่ 2) โดยสายการประกอบ A มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นได้แก่ รุ่น  $A_I$  และ  $A_{II}$  ซึ่งมีแผนภาพลำดับก่อนหลังดังรูปที่ 3.2 (ก) และ 3.2 (ข) ตามลำดับ และมีแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 3.2 (ค) สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น  $A_I$  ( $q_{A_I}$ ) และ  $A_{II}$  ( $q_{A_{II}}$ ) มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  เท่ากัน เวลาชิ้นงานของสินค้าแต่ละรุ่นและเวลาชิ้นงานร่วมแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 ขณะที่สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นเช่นกัน ได้แก่ รุ่น  $B_I$  และ  $B_{II}$  ซึ่งมีแผนภาพลำดับก่อนหลังดังรูปที่ 3.3 (ก) และ 3.3 (ข) ตามลำดับ และมีแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมดังรูปที่ 3.3 (ค) สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น  $B_I$  ( $q_{B_I}$ ) และ  $B_{II}$  ( $q_{B_{II}}$ ) มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{3}$  และ  $\frac{2}{3}$  ตามลำดับ เวลาชิ้นงานของสินค้าแต่ละรุ่นและเวลาชิ้นงานร่วมแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2 การแก้ปัญหาการจัดสมดุลตัวอย่างนี้กำหนดให้มีรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 10 หน่วยเวลา และกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในอัลกอริทึม BBO ดังนี้

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



(ก) รุ่น A<sub>I</sub>

(ข) รุ่น A<sub>II</sub>

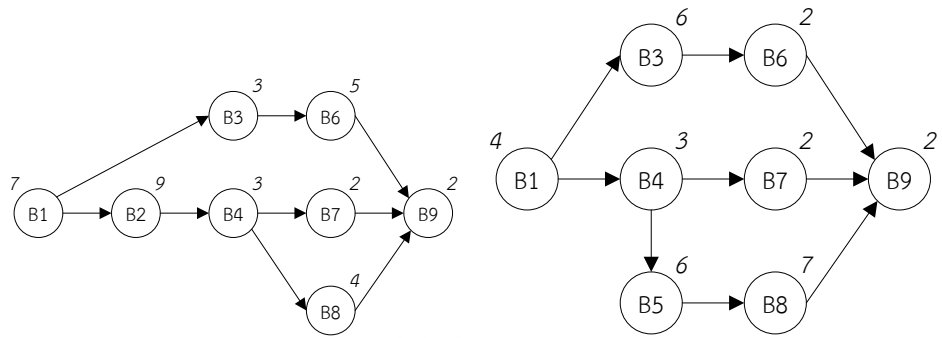


(ค) แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม

รูปที่ 3.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ A

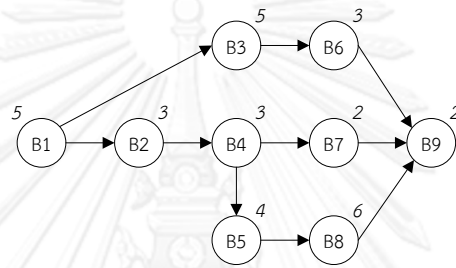
ตารางที่ 3.1 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ A

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน		เวลาชิ้นงานรวม ( $q_{A_I} = q_{A_{II}} = \frac{1}{2}$ )
	รุ่น A <sub>I</sub>	รุ่น A <sub>II</sub>	
A1	4	2	3
A2	1	1	1
A3	5	3	4
A4	0	4	2
A5	2	4	3
A6	3	7	5
A7	7	5	6
A8	2	0	1
A9	2	2	2
A10	4	2	3
A11	4	6	5



(ก) รุ่น B<sub>I</sub>

(ข) รุ่น B<sub>II</sub>



(ค) แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม

รูปที่ 3.3 แผนภาพลำดับก่อนหลังของสินค้าบนสายการประกอบ B

ตารางที่ 3.2 เวลาชิ้นงานของสินค้าบนสายการประกอบ B

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน		เวลาชิ้นงานรวม ( $q_{B_I} = \frac{1}{3}, q_{B_{II}} = \frac{2}{3}$ )
	รุ่น B <sub>I</sub>	รุ่น B <sub>II</sub>	
B1	7	4	5
B2	9	0	3
B3	3	6	5
B4	3	3	3
B5	0	6	4
B6	5	2	3
B7	2	2	2
B8	4	7	6
B9	2	2	2

ลำดับแรก ทำการสร้างเซตประชากรสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Z$  จำนวน 5 สตริงด้วยวิธีการสุ่ม และคัดลอกออกมาเป็นเซตสตริงคำตอบชั่วคราว  $Y$  ผลการสร้างสตริงคำตอบพร้อมผลการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงแสดงดังตารางที่ 3.3

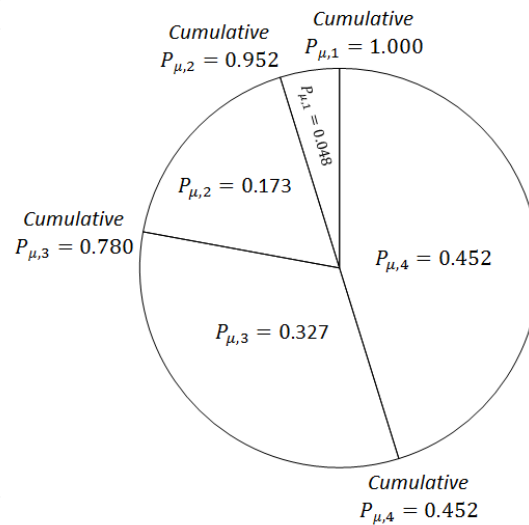
ตารางที่ 3.3 เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y$  และเซตสตริงคำตอบชั่วคราว  $Z$  ที่คัดลอกออกมา พร้อมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

สตริง คำตอบ	Priority of Task																			Objective function					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	1	2	3/1	3/2	
																					$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$	
$Y$	$y_1$	1	11	15	14	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6	8	5	0.028	7.333
	$y_2$	9	7	13	15	20	14	2	6	17	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8	8	7	0.058	7.385
	$y_3$	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3	16	18	19	13	7	6	0.143	6.462
	$y_4$	18	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	1	5	11	10	20	9	8	5	0.073	7.333
	$y_5$	19	17	16	9	7	20	2	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3	8	5	0.051	7.429
$Z$	$z_1$	1	11	15	14	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6	8	5	0.028	7.333
	$z_2$	9	7	13	15	20	14	2	6	17	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8	8	7	0.058	7.385
	$z_3$	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3	16	18	19	13	7	6	0.143	6.462
	$z_4$	18	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	1	5	11	10	20	9	8	5	0.073	7.333
	$z_5$	19	17	16	9	7	20	2	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3	8	5	0.051	7.429

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

ตารางที่ 3.4 ผลการกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท์ และค่าต่างๆ ที่ใช้ในการอพยพ

Fitness	Species Count ( $k$ )	No.	String	$\lambda_k$	$\mu_k$	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cumulative $P_{\mu,k}$
1	4	1	$y_3, z_3$	0.095	0.905	0.048	0.452	0.452
2	3	1	$y_1, z_1$	0.345	0.655	0.173	0.327	0.780
3	2	1	$y_4, z_4$	0.655	0.345	0.327	0.173	0.952
		2	$y_5, z_5$					
4	1	1	$y_2, z_2$	0.905	0.095	0.452	0.048	1.000



รูปที่ 3.4 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงอพยพออก

เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่ใช้ในการอพยพเรียบร้อยแล้วให้ดำเนินการอพยพสตริงคำตอบชั่วคราว  $z_i$  ที่ละสตริง ผลการสุ่มเลือกบิตในคำตอบชั่วคราว  $z_i$  เพื่อรับการอพยพเข้า เรียงจากสปีชีส์เคาท์ 4 ลดลงถึง 1 แสดงดังตารางที่ 3.5 ถึง 3.8 ตามลำดับ และผลการอพยพถ่ายทอดค่าบิตแสดงดังตารางที่ 3.9 ถึง 3.12 ตามลำดับ สตริงคำตอบชั่วคราวที่ผ่านการอพยพเรียบร้อยแล้วทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 3.13

ในที่นี้จะอธิบายการสุ่มเลือกบิตของสตริง  $z_1$  ซึ่งมีสปีชีส์เคาท์เท่ากับ 3 เป็นตัวอย่าง (ดูตารางที่ 3.6 ประกอบ) การสุ่มเลือกบิตทำได้โดยพิจารณาบิตที่ละบิตตั้งแต่บิตแรกถึงบิตสุดท้าย นั่นคือบิต  $A_1, A_2, \dots, B_9$  ตามลำดับ พิจารณาบิต  $A_1$  ผลการสร้างเลขสุ่ม  $r_1 = 0.299$  มีค่ามากกว่า  $P_{\lambda,3} = 0.173$  ดังนั้นจึงไม่มีการอพยพเข้าหรือถ่ายทอดค่าบิตเข้าสู่บิตนี้ จากนั้นเมื่อพิจารณาต่อที่บิต  $A_2$  และ  $A_3$  ตามลำดับ พบว่าผลการสุ่มค่า  $r_1$  แสดงให้เห็นว่าจะไม่มีการอพยพเข้าเช่นเดียวกัน แต่เมื่อมาถึงบิต  $A_4$  สุ่มได้ค่า  $r_1 = 0.064 \leq P_{\lambda,3}$  ดังนั้น บิตนี้จึงมีการอพยพเข้าหรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตริงในเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y$  โดยให้เลือกสตริงคำตอบเริ่มต้น  $z_i$  ที่จะถ่ายทอดค่าบิตมาให้ (อพยพออก) ด้วยการสุ่มค่า  $r_2$  ขึ้นมา ผลการสุ่มได้  $r_2 = 0.447$  ตกอยู่ในพื้นที่วงล้อรูเล็ตค่า  $P_{\mu,k}$  ของสปีชีส์เคาท์ 4 ซึ่งมีสตริงคำตอบ  $y_3$  เป็นสมาชิกเพียงสตริงเดียว ดังนั้นจึงเลือกสตริง  $y_3$  เป็นสตริงอพยพออก จากนั้นให้ทำการถ่ายทอดค่าบิต (ดูตารางที่ 3.10 ประกอบ) โดยเปลี่ยนค่าของบิต  $A_4$  ในสตริง  $z_1$  ซึ่งเท่ากับ 14 ให้เท่ากับค่าของบิต  $A_4$  ในสตริง  $y_3$  ซึ่งเท่ากับ 2 อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนค่านี้นำให้ค่าใหม่ของบิต  $A_4$  ไปซ้ำกับค่าบิต  $B_3$  จึงให้ซ่อมแซมสตริงคำตอบ  $z_1$  ด้วยการเปลี่ยนค่าของบิต  $B_3$  จาก 2 ให้เท่ากับ 14 แทน จากนั้นให้พิจารณาการอพยพในบิตถัดๆ ไปจนครบทั้งสตริง

ตารางที่ 3.5 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 4 เพื่อทำการอพยพ

อพยพเข้า				อพยพออก				
สตริง	บิต	$r_1$	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	$r_2$	สปีชีส์เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
$z_3$	A1	0.725						
	A2	0.061						
	A3	0.067						
	A4	0.803						
	A5	0.956						
	A6	0.571						
	A7	0.471						
	A8	0.557						
	A9	0.242						
	A10	0.848						
	A11	0.585						
	B1	0.859						
	B2	0.539						
	B3	0.030	อพยพเข้า	0.723	3	$\{y_1\}$	$y_1$	2
	B4	0.231						
	B5	0.802						
	B6	0.936						
	B7	0.614						
	B8	0.195						
B9	0.072							

ตารางที่ 3.6 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

อพยพเข้า				อพยพออก				
สตริง	บิต	$r_1$	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	$r_2$	สปีชีส์เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
$z_1$	A1	0.299						
	A2	0.932						
	A3	0.468						
	A4	0.064	อพยพเข้า	0.447	4	$\{y_3\}$	$y_3$	2
	A5	0.353						

ตารางที่ 3.6 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ (ต่อ)

อพยพเข้า				อพยพออก				
สตริง	บิต	$r_1$	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	$r_2$	สปีชีส์เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
	A6	0.601						
	A7	0.203						
	A8	0.654						
	A9	0.245						
	A10	0.810						
	A11	0.981						
	B1	0.141	อพยพเข้า	0.010	4	$\{y_3\}$	$y_3$	8
	B2	0.486						
	B3	0.862						
	B4	0.765						
	B5	0.496						
	B6	0.294						
	B7	0.028	อพยพเข้า	0.899	2	$\{y_4, y_5\}$	$y_5$	14
	B8	0.782						
	B9	0.963						

ตารางที่ 3.7 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ

อพยพเข้า				อพยพออก				
สตริง	บิต	$r_1$	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	$r_2$	สปีชีส์เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
$z_4$	A1	0.224	อพยพเข้า	0.501	3	$\{y_1\}$	$y_1$	1
	A2	0.376						
	A3	0.694						
	A4	0.357						
	A5	0.428						
	A6	0.269	อพยพเข้า	0.970	1	$\{y_2\}$	$y_2$	14
	A7	0.301	อพยพเข้า	0.636	3	$\{y_1\}$	$y_1$	4
	A8	0.731						
	A9	0.148	อพยพเข้า	0.383	4	$\{y_3\}$	$y_3$	1
	A10	0.712						
	A11	0.039	อพยพเข้า	0.190	4	$\{y_3\}$	$y_3$	7

ตารางที่ 3.7 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ (ต่อ)

สตริง	อพยพเข้า			อพยพออก				
	บิต	$r_1$	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	$r_2$	สปีชีส์เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
	B1	0.534						
	B2	0.999						
	B3	0.129	อพยพเข้า	0.814	2	$\{y_4, y_5\}$	$y_5$	18
	B4	0.506						
	B5	0.341						
	B6	0.303	อพยพเข้า	0.255	4	$\{y_3\}$	$y_3$	16
	B7	0.459						
	B8	0.498						
	B9	0.509						
$z_5$	A1	0.661						
	A2	0.828						
	A3	0.474						
	A4	0.008	อพยพเข้า	0.188	4	$\{y_3\}$	$y_3$	2
	A5	0.425						
	A6	0.314	อพยพเข้า	0.654	3	$\{y_1\}$	$y_1$	10
	A7	0.700						
	A8	0.966						
	A9	0.532						
	A10	0.913						
	A11	0.260	อพยพเข้า	0.795	2	$\{y_4, y_5\}$	$y_4$	13
	B1	0.775						
	B2	0.363						
	B3	0.071	อพยพเข้า	0.169	4	$\{y_3\}$	$y_3$	12
	B4	0.323	อพยพเข้า	0.398	4	$\{y_3\}$	$y_3$	17
	B5	0.844						
	B6	0.354						
	B7	0.816						
B8	0.006	อพยพเข้า	0.549	3	$\{y_1\}$	$y_1$	9	
B9	0.885							



ตารางที่ 3.8 ผลการสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ

สตริง	อพยพเข้า			อพยพออก				
	บิต	$r_1$	$r_1 \leq P_{\lambda,k}$	$r_2$	สปีชีส์เคาท์	สตริงใน สปีชีส์เคาท์	สตริงที่เลือก	ค่าบิต
$Z_2$	A1	0.582						
	A2	0.300	อพยพเข้า	0.930	2	$\{y_4, y_5\}$	$y_4$	17
	A3	0.370	อพยพเข้า	0.664	3	$\{y_1\}$	$y_1$	15
	A4	0.348	อพยพเข้า	0.129	4	$\{y_3\}$	$y_3$	2
	A5	0.551						
	A6	0.070	อพยพเข้า	0.639	3	$\{y_1\}$	$y_1$	10
	A7	0.491						
	A8	0.125	อพยพเข้า	0.388	4	$\{y_3\}$	$y_3$	14
	A9	0.790						
	A10	0.549						
	A11	0.911						
	B1	0.257	อพยพเข้า	0.103	4	$\{y_3\}$	$y_3$	8
	B2	0.682						
	B3	0.108	อพยพเข้า	0.732	3	$\{y_1\}$	$y_1$	2
	B4	0.261	อพยพเข้า	0.315	4	$\{y_3\}$	$y_3$	17
	B5	0.853						
	B6	0.827						
	B7	0.779						
	B8	0.666						
B9	0.321	อพยพเข้า	0.925	2	$\{y_4, y_5\}$	$y_5$	3	

ตารางที่ 3.9 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 4

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
				$Z_3$	A8	14	18	เริ่มต้น	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3
ปรับปรุง	6	15	20					2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	2	17	3	16	18	19	13
ซ่อมแซม	6	15	20					12	5	9	11	14	1	4	7	8	10	2	17	3	16	14	19	13

ตารางที่ 3.10 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Z <sub>1</sub>	A4	14	2	เริ่มต้น	1	11	15	14	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6
				ปรับปรุง	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6
				ซ่อมแซม	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	3	7	14	16	20	13	8	9	6
	B1	3	8	เริ่มต้น	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	3	7	14	16	20	13	8	9	6
				ปรับปรุง	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	14	16	20	13	8	9	6
				ซ่อมแซม	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	14	16	20	13	3	9	6
	B7	3	14	เริ่มต้น	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	14	16	20	13	3	9	6
				ปรับปรุง	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	14	16	20	13	14	9	6
				ซ่อมแซม	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	3	16	20	13	14	9	6

ตารางที่ 3.11 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Z <sub>4</sub>	A1	18	1	เริ่มต้น	18	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	1	5	11	10	20	9
				ปรับปรุง	1	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	1	5	11	10	20	9
				ซ่อมแซม	1	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	18	5	11	10	20	9
	A6	12	14	เริ่มต้น	1	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	18	5	11	10	20	9
				ปรับปรุง	1	17	16	7	19	14	6	2	3	4	13	8	14	15	18	5	11	10	20	9
				ซ่อมแซม	1	17	16	7	19	14	6	2	3	4	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
	A7	6	4	เริ่มต้น	1	17	16	7	19	14	6	2	3	4	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ปรับปรุง	1	17	16	7	19	14	4	2	3	4	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ซ่อมแซม	1	17	16	7	19	14	4	2	3	6	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
	A9	3	1	เริ่มต้น	1	17	16	7	19	14	4	2	3	6	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ปรับปรุง	1	17	16	7	19	14	4	2	1	6	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ซ่อมแซม	3	17	16	7	19	14	4	2	1	6	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
	A11	13	7	เริ่มต้น	3	17	16	7	19	14	4	2	1	6	13	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ปรับปรุง	3	17	16	7	19	14	4	2	1	6	7	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ซ่อมแซม	3	17	16	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	15	18	5	11	10	20	9
	B3	15	18	เริ่มต้น	3	17	16	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	15	18	5	11	10	20	9
				ปรับปรุง	3	17	16	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	11	10	20	9
				ซ่อมแซม	3	17	16	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	11	10	20	9
B6	11	16	เริ่มต้น	3	17	16	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	11	10	20	9	
			ปรับปรุง	3	17	16	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	16	10	20	9	
			ซ่อมแซม	3	17	11	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	16	10	20	9	
Z <sub>5</sub>	A4	9	2	เริ่มต้น	19	17	16	9	7	20	2	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3
				ปรับปรุง	19	17	16	2	7	20	2	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3
				ซ่อมแซม	19	17	16	2	7	20	9	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3
	A6	20	10	เริ่มต้น	19	17	16	2	7	20	9	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3
				ปรับปรุง	19	17	16	2	7	10	9	8	12	15	6	13	11	18	5	20	1	14	4	3
				ซ่อมแซม	19	17	16	2	7	10	9	8	12	15	6	13	11	18	5	20	1	14	4	3
	A11	6	13	เริ่มต้น	19	17	16	2	7	10	9	8	12	15	6	13	11	18	5	20	1	14	4	3
				ปรับปรุง	19	17	16	2	7	10	9	8	12	15	13	13	11	18	5	20	1	14	4	3
				ซ่อมแซม	19	17	16	2	7	10	9	8	12	15	13	6	11	18	5	20	1	14	4	3
B3	18	12	เริ่มต้น	19	17	16	2	7	10	9	8	12	15	13	6	11	18	5	20	1	14	4	3	

ตารางที่ 3.11 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2 (ต่อ)

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

ตารางที่ 3.12 การอพยพค่าบิตในสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 1

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Z <sub>2</sub>	A2	7	17	เริ่มต้น	9	7	13	15	20	14	2	6	17	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ปรับปรุง	9	17	13	15	20	14	2	6	17	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ซ่อมแซม	9	17	13	15	20	14	2	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
	A3	13	15	เริ่มต้น	9	17	13	15	20	14	2	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ปรับปรุง	9	17	15	15	20	14	2	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ซ่อมแซม	9	17	15	13	20	14	2	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
	A4	13	2	เริ่มต้น	9	17	15	13	20	14	2	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ปรับปรุง	9	17	15	2	20	14	2	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ซ่อมแซม	9	17	15	2	20	14	13	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
	A6	14	10	เริ่มต้น	9	17	15	2	20	14	13	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ปรับปรุง	9	17	15	2	20	10	13	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8
				ซ่อมแซม	9	17	15	2	20	10	13	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	14	8
	A8	6	14	เริ่มต้น	9	17	15	2	20	10	13	6	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	14	8
				ปรับปรุง	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	14	8
				ซ่อมแซม	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	6	8
	B1	4	8	เริ่มต้น	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	4	16	1	19	5	18	3	6	8
				ปรับปรุง	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	8	16	1	19	5	18	3	6	8
				ซ่อมแซม	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	8	16	1	19	5	18	3	6	4
	B3	1	2	เริ่มต้น	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	8	16	1	19	5	18	3	6	4
				ปรับปรุง	9	17	15	2	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	19	5	18	3	6	4
				ซ่อมแซม	9	17	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	19	5	18	3	6	4
	B4	19	17	เริ่มต้น	9	17	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	19	5	18	3	6	4
				ปรับปรุง	9	17	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	3	6	4
				ซ่อมแซม	9	19	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	3	6	4
	B9	4	3	เริ่มต้น	9	19	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	3	6	4
				ปรับปรุง	9	19	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	3	6	3
				ซ่อมแซม	9	19	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	4	6	3

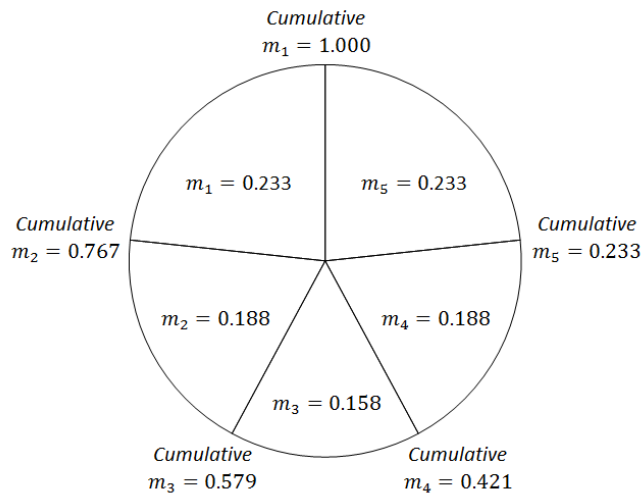
ตารางที่ 3.13 เซตสตริงคำตอบชั่วคราว  $Z$  หลังอพยพ

สตริง คำตอบ	Priority of Task																			Objective function				
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	1	2	3/1	3/2
																					$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
$z_1$	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	3	16	20	13	14	9	6	8	4	0.048	7.273
$z_2$	9	19	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	4	6	3	8	5	0.095	7.385
$z_3$	6	15	20	12	5	9	11	14	1	4	7	8	10	2	17	3	16	18	19	13	8	5	0.069	7.273
$z_4$	3	17	11	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	16	10	20	9	8	8	0.048	7.333
$z_5$	19	5	16	2	7	10	4	8	18	15	13	6	11	12	17	20	1	14	9	3	8	6	0.075	7.273

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

ตารางที่ 3.14 ค่าที่ใช้ประกอบการมิวเตชันของสตริงคำตอบชั่วคราว  $z$  หลังอพยพ

Fitness	Species Count ( $k$ )	No.	String	$P_k$	$1 - P_k$	$m_k$	Cumulative $m_k$
1	5	1	$z_1$	0.066	0.934	0.233	0.233
2	4	1	$z_3$	0.246	0.754	0.188	0.421
3	3	1	$z_2$	0.368	0.632	0.158	0.579
4	2	1	$z_5$	0.246	0.754	0.188	0.767
5	1	1	$z_4$	0.066	0.934	0.233	1.000



รูปที่ 3.5 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงไปทำการมิวเตชัน

ขั้นตอนต่อไปคือการสุ่มเลือกสตริงคำตอบชั่วคราวออกมาทำการมิวเตชัน สมมติว่าสุ่มค่า  $r_3$  ได้เท่ากับ 0.385 ตกอยู่ในวงล้อรูเล็ต  $m_k$  ของสปีชีส์เคาท์ 4 ดังนั้นจึงคัดลอกสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ดังกล่าวทั้งหมดออกมาทำการมิวเตชัน ซึ่งในที่นี้พบว่ามีสตริง  $z_3$  เพียงสตริงเดียว จึงคัดลอกออกมาเป็นสตริง  $z'_3$

การมิวเตชันในงานวิจัยนี้อาศัยวิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange ซึ่งมีขั้นตอนการทำโดยพิจารณาบิตที่ละบิตเริ่มจากตำแหน่งแรก สุ่มค่า  $r_4$  ในช่วง  $[0,1]$  ขึ้นมา 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 ทั้งนี้ จากปัญหาตัวอย่าง สมมติว่ามีบิตในสตริง  $z'_3$  ที่ได้รับการสุ่มได้เลข  $r_4 > 0.1$  ได้แก่บิต A4 และ B4 ซึ่งถูกสุ่มให้สลับค่าสัทธ์กับบิตที่ B1 และ A8 ตามลำดับ ผลการมิวเตชันแสดงดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 การมิวเตชันสตริง  $z'_3$

ลำดับ	คู่มิวเตชัน	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
	( $z'_3$ ก่อนมิวเตชัน)	6	15	20	12	5	9	11	14	1	4	7	8	10	2	17	3	16	18	19	13
1	A4 กับ B1	6	15	20	8	5	9	11	14	1	4	7	12	10	2	17	3	16	18	19	13
2	B4 กับ A8	6	15	20	8	5	9	11	17	1	4	7	12	10	2	14	3	16	18	19	13
	( $z'_3$ หลังมิวเตชัน)	6	15	20	8	5	9	11	17	1	4	7	12	10	2	14	3	16	18	19	13

ตารางที่ 3.16 แสดงสตริงคำตอบทั้งหมดจากเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y$  เซตสตริงคำตอบชั่วคราว  $Z$  และเซตสตริงคำตอบชั่วคราวที่ผ่านการมิวเทชัน  $Z'$  จากการพิจารณาพบว่าไม่สตริงซ้ำจึงไม่มีสตริงใดถูกตัดออกไป (ถ้ามี ให้ตัดสตริงตัวที่ซ้ำออกไปให้เหลือเพียงสตริงเดียว) ผลการจัดอันดับสตริงเหล่านี้รวมกันพร้อมค่า Crowding Distance ของแต่ละสตริงเป็นดังตารางที่ 3.17 คำตอบอันดับที่ 1 ทั้งหมดจะถูกนำไปพิจารณาจัดเก็บเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของกระบวนการค้นหาคำตอบ ซึ่งในที่นี้คือสตริงคำตอบ  $y_3$  เพียงคำตอบเดียว และเนื่องจากการดำเนินการค้นหาคำตอบเพ่งเสิร์จสันเป็นเจนเนอเรชันแรก สตริง  $y_3$  จึงเป็นสตริงที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบทั้งหมดที่ผ่านมา (Elitist) สิ้นสุดที่เจนเนอเรชันที่ 1 ด้วย (ตารางที่ 3.18)

ลำดับต่อไป พิจารณาตารางที่ 3.17 เพื่อเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด 5 สตริงแรกไปเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้น  $Y$  ของเจนเนอเรชันถัดไป (เจนเนอเรชันที่ 2) ซึ่งผลการเลือก 5 สตริงเรียงจากสตริงที่ดีที่สุดไปแย่สุด ได้แก่ สตริง  $y_3, z_1, y_1, y_1$  และ  $y_5$  ตามลำดับ ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าสตริงตัวที่ 5 นั้นจริงๆ แล้วสามารถเลือกสตริง  $y_4$  หรือ  $y_5$  ก็ได้ เพราะเป็นคำตอบที่มีความแข็งแรงเท่ากัน อีกทั้งยังมีค่า Crowding Distance เท่ากันอีก (ถ้าค่า Crowding Distance ต่างกัน จะเลือกสตริงที่มีค่า Crowding Distance สูง) แต่ในที่นี้ได้กำหนดไว้ว่าถ้าเกิดกรณีเช่นนี้ให้เลือกคำตอบที่มีค่า  $f_1(x)$  ต่ำที่สุด ดังนั้น จึงเลือกสตริง  $y_5$  เนื่องจากมีค่า  $f_1(x)$  ต่ำกว่าสตริง  $y_4$  ตารางที่ 3.19 แสดงสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจนเนอเรชันถัดไปที่ถูกเลือกมาข้างต้น ชื่อของสตริงจะถูกเปลี่ยนเป็นสตริง  $y_1 - y_5$

ตารางที่ 3.16 สตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการแก้ปัญหา

สตริง คำตอบ	Priority of Task																			Objective function					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	1	2	3/1	3/2	
																					$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$	
$Y$	$y_1$	1	11	15	14	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6	8	5	0.028	7.333
	$y_2$	9	7	13	15	20	14	2	6	17	11	12	4	16	1	19	5	18	3	10	8	8	7	0.058	7.385
	$y_3$	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3	16	18	19	13	7	6	0.143	6.462
	$y_4$	18	17	16	7	19	12	6	2	3	4	13	8	14	15	1	5	11	10	20	9	8	5	0.073	7.333
	$y_5$	19	17	16	9	7	20	2	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3	8	5	0.051	7.429
$Z$	$z_1$	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	3	16	20	13	14	9	6	8	4	0.048	7.273
	$z_2$	9	19	15	1	20	10	13	14	7	11	12	8	16	2	17	5	18	4	6	3	8	5	0.095	7.385
	$z_3$	6	15	20	2	5	9	11	18	1	4	7	8	10	12	17	3	16	14	19	13	7	6	0.143	6.462
	$z_4$	3	17	11	13	19	14	4	2	1	6	7	8	12	18	15	5	16	10	20	9	8	8	0.048	7.333
	$z_5$	19	5	16	2	7	10	4	8	18	15	13	6	11	12	17	20	1	14	9	3	8	6	0.075	7.273
$Z'$	$z'_3$	6	15	20	8	5	9	11	17	1	4	7	2	10	12	18	3	16	14	19	13	8	8	0.029	7.333

ตารางที่ 3.17 ผลการจัดอันดับสตริงคำตอบทั้งหมดในเจนเนอเรชันที่ 1

Fitness	String	$f_1(x): N_W$	$f_2(x): N_S$	$f_{3.1}(x): B_b$	$f_{3.2}(x): MIWR$	Crowding Distance
1	$y_3$	7	6	0.143	6.462	Infinity
2	$z_1$	8	4	0.048	7.273	Infinity
3	$y_1$	8	5	0.028	7.333	Infinity
3	$z_3$	8	5	0.069	7.273	Infinity
4	$y_5$	8	5	0.051	7.429	Infinity
4	$y_4$	8	5	0.073	7.333	Infinity
5	$z_2$	8	5	0.095	7.385	Infinity
6	$z'_3$	8	6	0.062	7.333	Infinity
6	$z_5$	8	6	0.075	7.273	Infinity
7	$y_2$	8	7	0.058	7.385	Infinity
8	$z_4$	8	8	0.048	7.333	Infinity

ตารางที่ 3.18 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาที่ผ่านมา (Elitist) สิ้นสุดที่เจนเนอเรชันที่ 1

String	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1-1*	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3	16	18	19	13	7	6	0.143	6.462

\* x-y หมายถึงสตริงคำตอบจากเจนเนอเรชันที่ x ตัวที่ y

ตารางที่ 3.19 เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น Y ของเจนเนอเรชันที่ 2

สตริงคำตอบ	Priority of Task																			Objective function					
	1	2	3/1	3/2																					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$	
Y	$y_1$	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3	16	18	19	13	7	6	0.143	6.462
	$y_2$	1	11	15	2	19	10	4	18	17	12	5	8	7	3	16	20	13	14	9	6	8	4	0.048	7.273
	$y_3$	1	11	15	14	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6	8	5	0.028	7.333
	$y_4$	6	15	20	12	5	9	11	14	1	4	7	8	10	2	17	3	16	18	19	13	8	5	0.069	7.273
	$y_5$	19	17	16	9	7	20	2	8	12	15	6	13	11	18	5	10	1	14	4	3	8	5	0.051	7.429

จากนั้นให้เริ่มต้นดำเนินการในเจนเนอเรชันที่ 2 ด้วยการวนซ้ำขั้นตอนเดิม และดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าจะครบจำนวนเจนเนอเรชันที่กำหนด ทั้งนี้ เมื่อสิ้นสุดแต่ละเจนเนอเรชันให้อัปเดตสตริงคำตอบ Elitist ทุกครั้ง ยกตัวอย่างเช่น สมมติว่าเมื่อสิ้นสุดเจนเนอเรชันที่ 2 มีสตริง

คำตอบที่ดีที่สุดจำนวน 1 สตริง ได้แก่ สตริงชื่อ  $z_1$  ดังตารางที่ 3.20 ให้นำสตริงนี้ไปพิจารณาจัดอันดับกับบรรดาสตริง Elitist ในเจเนเนอเรชันแรกๆ ที่แสดงอยู่ในตารางที่ 3.18 สตริงที่อยู่ในอันดับที่ 1 ทั้งหมด จะกลายเป็นเซตของสตริง Elitist ที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว สิ้นสุด ณ เจเนเนอเรชันที่ 2 นั้นเอง ผลการอัปเดตสตริง Elitist ในเจเนเนอเรชันที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.20 คำตอบที่ดีที่สุดของเจเนเนอเรชันที่ 2

String	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
$z_1$	1	11	15	14	19	10	4	18	17	12	5	3	7	2	16	20	13	8	9	6	8	5	0.028	7.333

ตารางที่ 3.21 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาที่ผ่านมา (Elitist) สิ้นสุดที่เจเนเนอเรชันที่ 2

String	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
1-1*	6	15	20	2	5	9	11	14	1	4	7	8	10	12	17	3	16	18	19	13	7	6	0.143	6.462
2-1	17	11	10	9	5	7	3	19	20	15	16	6	8	18	4	2	14	1	12	13	7	6	0.135	6.500

\* x-y หมายถึงสตริงคำตอบจากเจเนเนอเรชันที่ x ตัวที่ y



## บทที่ 4

### อัลกอริทึมอื่นๆ ที่นำมาใช้ทดลองแก้ปัญหาคาดสมมูล

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมต่างๆ ที่นำมาทดลองแก้ปัญหาคาดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน เพื่อเปรียบเทียบกับสมรรถนะร่วมกับอัลกอริทึม BBO โดยอัลกอริทึมอื่นๆ ที่นำมาใช้มีจำนวนทั้งสิ้น 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge: PSONK)

#### 4.1 อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ II

อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) เป็นอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมประเภทหนึ่งที่เสนอโดย Deb และ คณะ (2002) มีแนวคิดพื้นฐานเหมือนอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมทั่วไปที่มีแนวคิดมาจากการถ่ายทอดพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตจากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูกหลาน กระบวนการหลักของอัลกอริทึมก็คือการสุ่มจับคู่สร้างคำตอบ (เปรียบเสมือนโครโมโซม) แล้วทำการสุ่มแลกเปลี่ยนค่าบิตระหว่างกันหรือที่เรียกว่าการครอสโอเวอร์ (เสมือนการแลกเปลี่ยนยีนของพ่อแม่) ได้เป็นสตริงคำตอบรุ่นลูกออกมา ซึ่งสตริงรุ่นลูกส่วนหนึ่งจะถูกคัดลอกออกมาทำการมิวเตชันหรือการสุ่มสลับบิตส่วนหนึ่งในสตริงตัวเอง เพื่อให้เกิดความหลากหลายของคำตอบ เป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้ประชากรคำตอบติดอยู่ในกลุ่มคำตอบเฉพาะที่ ทั้งนี้ NSGA-II มีเอกลักษณ์ที่แตกต่างจากอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมต่างๆ ไปคือมีไว้สำหรับแก้ปัญหาคาดสมมูลแบบหลายวัตถุประสงค์ และอาศัยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำและหลักการวัดระยะความหนาแน่นในการเลือกประชากรคำตอบพ่อแม่ในแต่ละเจนเนอเรชัน

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม NSGA-II ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดังนี้ (ดูรูปที่ 4.1 ประกอบ)

กำหนดให้	$t$	คือหมายเลขของเจนเนอเรชัน
	$P_t$	คือประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ของเจนเนอเรชัน $t$
	$Q_t$	คือประชากรคำตอบรุ่นลูกของเจนเนอเรชัน $t$

$R_t$  คือประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกรวมกัน

$N$  คือจำนวนประชากรคำตอบ

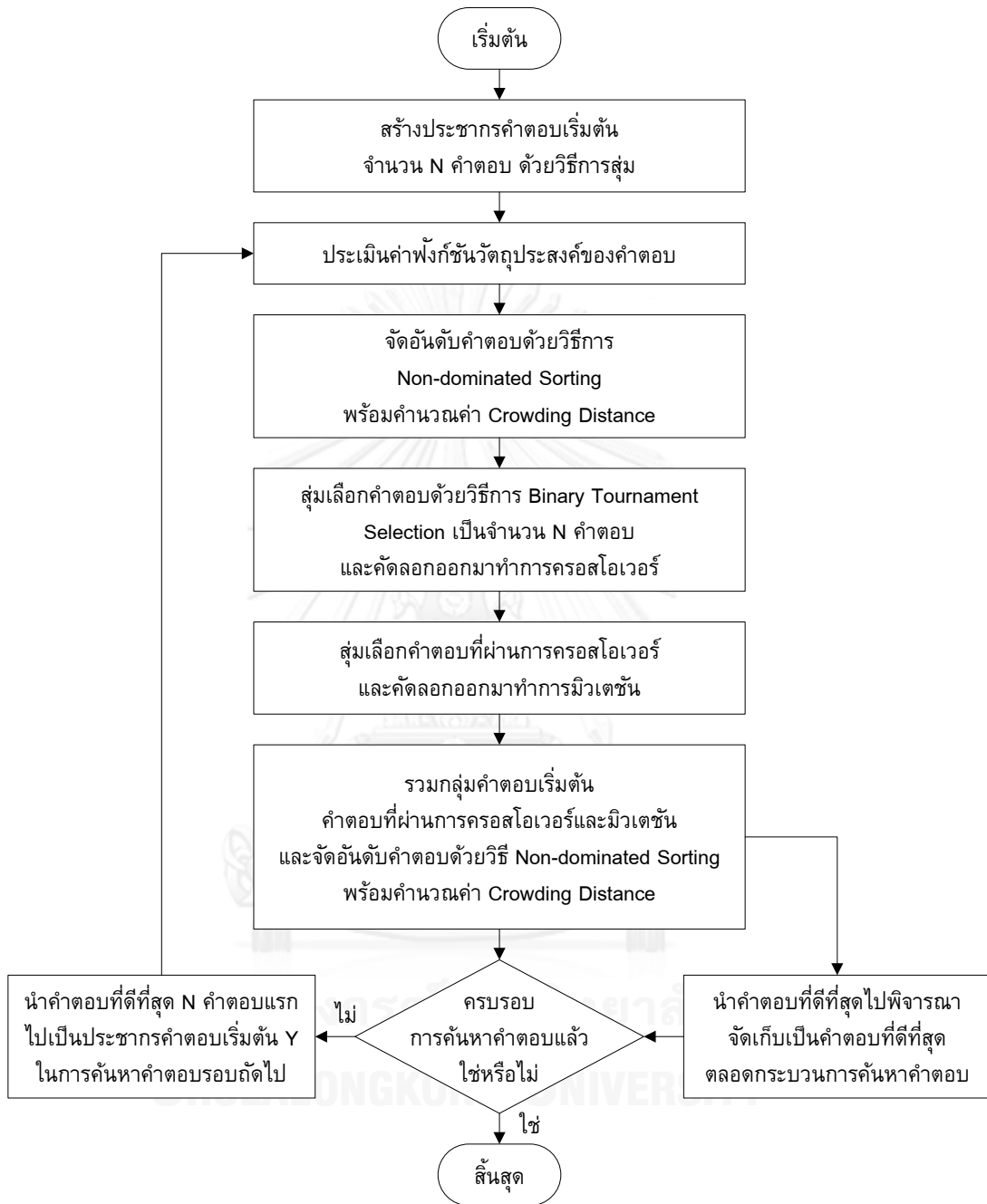
1. นำเข้าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ แผนภาพลำดับก่อนหลัง เวลาชิ้นงาน จำนวนและสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของสายการประกอบที่ขนานกัน และรอบเวลาการผลิต
2. สร้างประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่  $P_t$  จำนวน  $N$  ตัวด้วยวิธีการสุ่ม
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบ
4. กำหนดค่าความแข็งแรงให้แต่ละคำตอบโดยใช้วิธี Non-dominated Sorting
5. คำนวณค่า Crowding Distance ของแต่ละคำตอบ
6. คัดเลือกคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection โดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงและค่า Crowding Distance คำตอบที่มีความแข็งแรงและความหนาแน่นมากจะมีโอกาสในการถูกเลือกสูง
7. จับคู่คำตอบที่อยู่ใน Mating Pool เพื่อทำการครอสโอเวอร์แลกเปลี่ยนค่าบิตหรือตำแหน่งของบิตซึ่งกันและกัน ได้ออกมาเป็นประชากรคำตอบรุ่นลูก  $Q_t$  โดยโอกาสที่แต่ละคำตอบใน Mating Pool จะถูกเลือกไปจับคู่กับคำตอบอื่น มีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์  $P_C$
8. แต่ละคำตอบรุ่นลูกจะถูกสุ่มคัดลอกออกมาทำการมิวเตชันด้วยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน  $P_m$  โดยเมื่อมิวเตชันแล้วก็ได้ประชากรใหม่รุ่นลูกอีกส่วนหนึ่งที่ผ่านมาการมิวเตชัน
9. นำประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่มารวมเข้ากับรุ่นลูก ได้เป็นประชากรคำตอบ  $R_t$
10. ทำการคัดเลือกประชากรคำตอบจากประชากรคำตอบ  $R_t$  ที่ดีที่สุด  $N$  ตัวแรก โดยอาศัยหลักการ Non-dominated Sorting และ Crowding Distance เพื่อจะใช้เป็นประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชันถัดไปหรือ  $P_{t+1}$  (พิจารณาเลือกคำตอบจากเลขอันดับก่อน โดยกรณีที่มีคำตอบอันดับเดียวกันจำนวนหลายตัวเกินความต้องการ ให้เลือกคำตอบที่มี Crowding Distance มากที่สุดก่อน)
11. นำคำตอบที่ดีที่สุดประชากร  $R_t$  ไปอัปเดตคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ที่ผ่านมาจากจนถึงเจนเนอเรชันนี้

12. ดำเนินการเงินเนอเรชันถัดไปด้วยการวนซ้ำกระบวนการในข้อ 2 ถึง 11 และวนซ้ำจนครบเงินเนอเรชันที่กำหนดไว้ ถ้าครบจำนวนเงินเนอเรชันที่กำหนดแล้วให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบรูปแบบอื่น ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกับที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ สามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ เอื้อมพร จันทร์แซม (2555)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II

## 4.2 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ได้รับการคิดค้นโดย Eberhart และ Kennedy (1995) มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมของฝูงนกที่มักจดจำเส้นทางการบินหาอาหารที่ดีที่สุดไว้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบินหาอาหารในครั้งต่อไป ซึ่งทำให้เส้นทางที่ใช้บินในแต่ละครั้งเป็นเส้นทางที่ดีขึ้นเรื่อยๆ แนวคิดนี้เปรียบได้กับการแก้ปัญหาที่มีการจดจำลักษณะของคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ค้นพบเอาไว้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการค้นหาให้ได้มาซึ่งคำตอบใหม่ๆ ที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้ หลังจากที่ PSO ได้ถูกนำเสนอไป Liao และคณะ (2007) ได้พัฒนาการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization; DPSO) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางระบบผลิต ซึ่งเป็นปัญหาเชิงการจัดที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

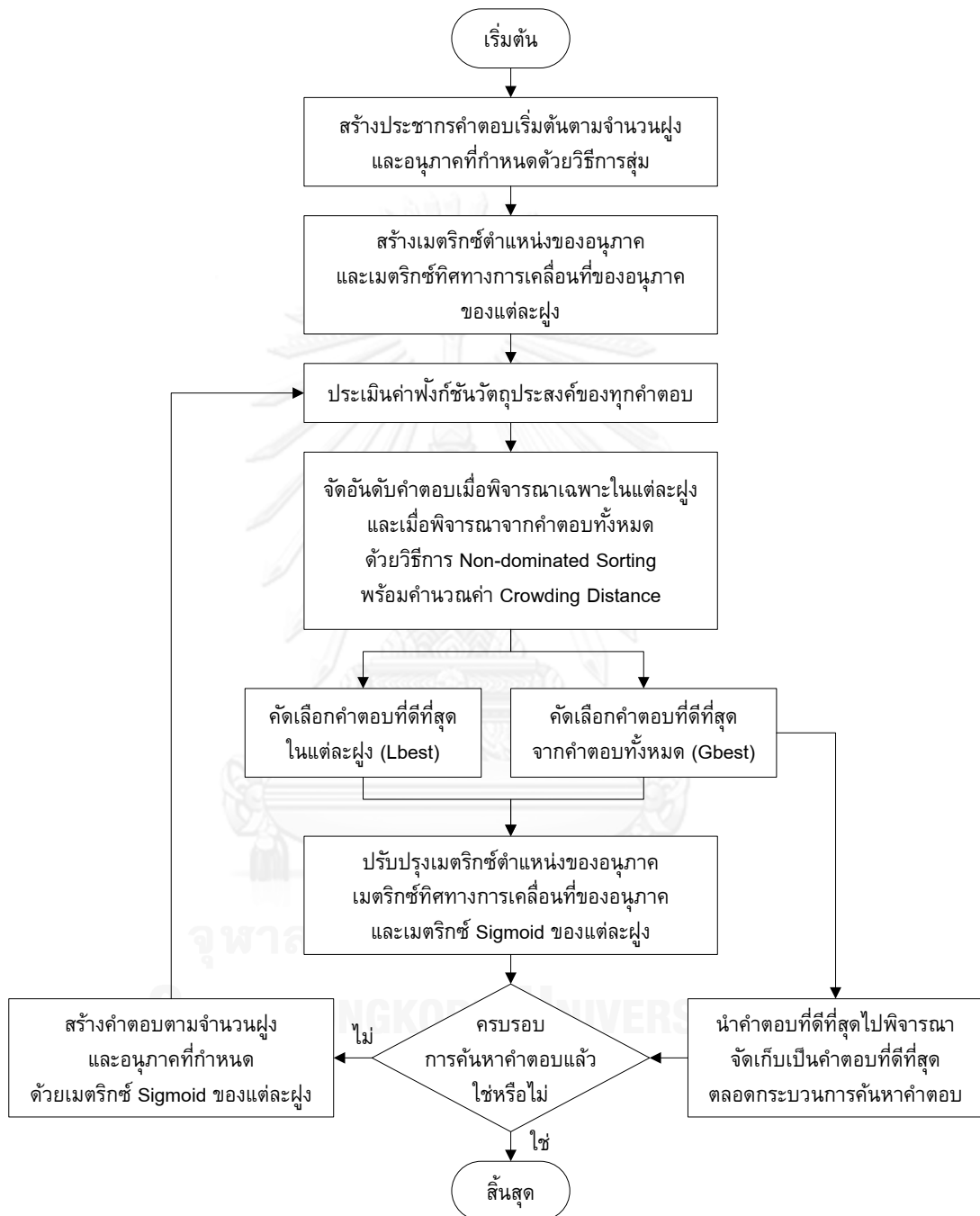
ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม DPSO ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดังนี้ (ดูรูปที่ 4.2 ประกอบ)

1. นำเข้าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ แผนภาพลำดับก่อนหลัง เวลาชิ้นงาน จำนวนและสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของสายการประกอบที่ขนานกัน รอบเวลาการผลิต และเมตริกซ์ทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)
2. สร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนฝูง (Swarm) ฝูงละอนุภาค (Particle) ตัว (อนุภาคในที่นี้หมายถึงคำตอบ ฝูงหมายถึงกลุ่มของคำตอบ)
3. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ
4. กำหนดค่าความแข็งแรงให้ประชากรคำตอบด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยให้กำหนดค่าความแข็งแรงใน 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่พิจารณาเฉพาะคำตอบภายในแต่ละฝูงเท่านั้น และกรณีที่พิจารณาคำตอบของทุกฝูงรวมกัน
5. วัดระยะห่างความหนาแน่นให้กับแต่ละคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance
6. คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงหรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution: Lbest) และคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมดหรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (Global Best Solution: Gbest)
7. ปรับปรุงเมตริกซ์ตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) และเมตริกซ์ทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จากค่า Lbest และ Gbest จากนั้นใช้

Sigmoid Function ในการปรับค่าเมตริกซ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคให้อยู่ในรูปของค่าความน่าจะเป็นซึ่งมีไว้สำหรับใช้สร้างสตริงคำตอบในรอบถัดไป

8. อัปเดตคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ที่ผ่านมา โดยนำคำตอบที่ดีที่สุดในเจนเนอเรชันนี้ (Gbest) ไปรวมกับ Elitist ของเจนเนอเรชันก่อนหน้า แล้วจัดอันดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting คำตอบที่ดีที่สุดทั้งหมดคือ Elitist ที่ได้รับการอัปเดตในเจนเนอเรชันนี้
9. ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันยังไม่ครบตามที่กำหนดไว้ ให้เริ่มเจนเนอเรชันถัดไปด้วยการวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 8 ใหม่ แต่ถ้าครบแล้วให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบรูปแบบอื่นซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกับที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ สามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ เอี่ยมพร จันทร์แซม (2555)



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO

#### 4.3 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge: PSONK) เป็นฮิวริสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย ปาลิดา ฉิมคล้าย (2553) โดยมีแนวคิดพื้นฐานเหมือน PSO แต่มีการนำเอาความรู้เชิงลบเข้ามาประยุกต์เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการนำไปสู่คำตอบที่แย่ กล่าวคือ นอกจากจะนำเอาคำตอบที่ดีที่สุดของฝูงและของประชากรทั้งหมด (Lbest และ Gbest ตามลำดับ) มาใช้ในการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของฝูงหรือการค้นหาคำตอบที่ดีตัวใหม่ๆ แล้ว ยังนำเอาคำตอบที่แย่ที่สุดของแต่ละฝูงหรือคำตอบที่แย่ที่สุดแบบเฉพาะที่ (Local Worst Solution: Lworst) และคำตอบที่แย่ที่สุดของประชากรคำตอบทั้งหมดหรือคำตอบที่แย่ที่สุดแบบวงกว้าง (Global Worst Solution: Gworst) เข้ามาร่วมใช้ในการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของฝูงด้วย โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้พฤติกรรมการเคลื่อนที่เกิดการจดจำลักษณะของคำตอบที่ไม่ดี ซึ่งเป็นการลดโอกาสที่ในการเกิดคำตอบใหม่ที่แย่และทำให้โอกาสที่จะเกิดคำตอบที่ดีเพิ่มสูงขึ้น

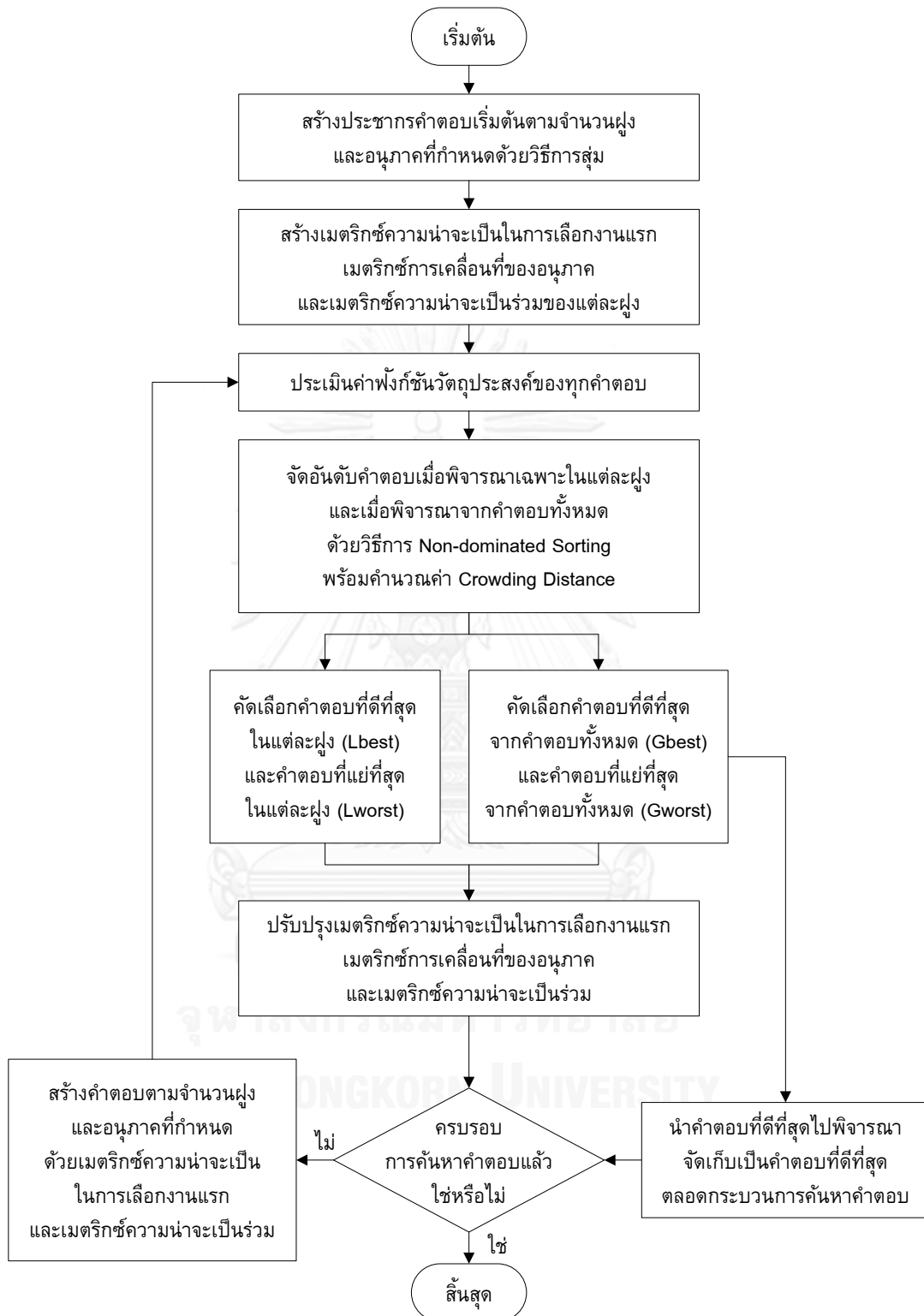
ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. นำเข้าข้อมูลต่างๆ ได้แก่ แผนภาพลำดับก่อนหลัง เวลาชิ้นงาน จำนวนและสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของสายการประกอบที่ขนานกัน รอบเวลาการผลิต เมตริกซ์ความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) เมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) และเมตริกซ์ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)
2. สร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวนฝูง (Swarm) ฝูงละอนุภาค (Particle) ตัว (อนุภาคในที่นี้หมายถึงคำตอบ ฝูงหมายถึงกลุ่มของคำตอบ)
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรคำตอบ
4. กำหนดค่าความแข็งแรงให้แก่ประชากรคำตอบด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยให้กำหนดค่าความแข็งแรงใน 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่พิจารณาเฉพาะคำตอบภายในแต่ละฝูงเท่านั้น และกรณีที่พิจารณาคำตอบของทุกฝูงรวมกัน
5. คำนวณระยะห่างความหนาแน่นให้กับทุกคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance
6. คัดเลือกคำตอบ Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst



7. ปรับปรุง First Walk Probability Matrix และ Velocity Matrix จากคำตอบ Lbest, Lworst, Gbest และ Gworst จากนั้นทำการปรับปรุง Joint Probability Matrix เพื่อใช้ในการสุ่มสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบถัดไป
8. อัปเดตคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ที่ผ่านมา โดยนำคำตอบที่ดีที่สุดในเจนเนอเรชันนี้ (Gbest) ไปรวมกับ Elitist ของเจนเนอเรชันก่อนหน้า แล้วจัดอันดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting คำตอบที่ดีที่สุดทั้งหมดคือ Elitist ที่ได้รับการอัปเดตในเจนเนอเรชันนี้
9. ถ้าจำนวนเจนเนอเรชันยังไม่ครบตามที่กำหนดไว้ ให้เริ่มเจนเนอเรชันถัดไปด้วยการวนซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง 8 ใหม่ แต่ถ้าครบแล้วให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ PSONK ในการแก้ปัญหาค่าการจัดสมดุลสายการประกอบรูปแบบอื่น ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกับที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้ สามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของ เอี่ยมพร จันทร์แซม (2555)



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการทำงานของ PSOK

## บทที่ 5

### การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุค

ในบทนี้จะนำเอาทุกอัลกอริทึมที่สนใจ ได้แก่ BBO NSGA-II DPSO และ PSONK ไปทดลองแก้ปัญหาการจัดสมดุคสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานตัวอย่าง แล้วนำผลที่ได้มาประเมินและเปรียบเทียบว่าอัลกอริทึมต่างๆ มีสมรรถนะในการหาคำตอบสูงหรือต่ำแตกต่างกันอย่างไร โดยตัวชี้วัดที่นำมาใช้เปรียบเทียบมีจำนวนทั้งสิ้น 4 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัว (Spread) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Time)

#### 5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย 4 ปัญหา โดยแต่ละปัญหานั้นแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน (รวมมีปัญหาในการทดลองทั้งสิ้น 12 ปัญหา) ขนาดของปัญหาเมื่อพิจารณาตามจำนวนชิ้นงานรวมของสายการประกอบแบบขนานจะอยู่ในช่วง 49 ถึง 218 ชิ้นงาน ทั้งนี้ ข้อมูลพื้นฐานของปัญหาทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหา	ที่มา	จำนวนชิ้นงาน		จำนวนรุ่นสินค้า (อัตราส่วนการผลิต)		รอบเวลาการผลิต	ลำดับก่อนหลัง ของชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน
		Line 1	Line 2	Line 1	Line 2			
1	Rosenberg และ Ziegler (1992)	25	24	2 (1:1)	2 (2:3)	14, 22, 30	ดูตารางที่ ก.2	ดูตารางที่ ก.3
2	Hahn (1972)	53	51	2 (1:2)	2 (1:2)	2338, 3507, 4676	ดูตารางที่ ก.4	ดูตารางที่ ก.5
3	Wee และ Magazine (1981)	75	71	4 (1:2:2:3)	4 (1:1:2:4)	29, 34, 43	ดูตารางที่ ก.6	ดูตารางที่ ก.7
4	Arcus (1965)	111	107	3 (1:1:1)	3 (1:1:3)	5785, 6540, 7162	ดูตารางที่ ก.8	ดูตารางที่ ก.9

## 5.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานมีขั้นตอนดังนี้

1. นำอัลกอริทึมไปใช้ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง โดยเมื่อใดที่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้ตลอดกระบวนการหาคำตอบเกิดการซ้ำเติม 30 เจนเนอร์ชันติดต่อกันให้หยุดการค้นหาคำตอบ เพราะถือว่าอัลกอริทึมไม่มีความสามารถในการหาคำตอบได้ต่อไปแล้ว
2. นำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้ (Obtained Pareto-optimal Solution) มารวมเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบด้วยวิธี Non-dominated Sorting คำตอบที่อยู่ในอันดับที่ 1 หรือคำตอบที่มีความแข็งแรงสูงสุด จะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-optimal Solution)
3. ประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึมทั้ง 4 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัว (Spread) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Time)
4. ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม

การทดลองใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาตัวอย่างเป็นการทดลองผ่านโปรแกรมที่เขียนโดยภาษา C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์พกพา Intel Core i5-3210M CPU 2.5 GHz RAM 8.0 GB

## 5.3 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่างๆ

ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 5.2 โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้รับการทดลองมาจากงานวิจัยอื่นแล้วว่าสามารถแก้ปัญหาลักษณะที่คล้ายคลึงกับปัญหาในงานวิจัยนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่างๆ

<b>BBO</b> (กรรณ จิตเมตตา, 2554; Ma, 2010)	
ขนาดประชากร :	100
รูปแบบการอพยพ :	Sinusoidal
รูปแบบการมิวเตชัน :	Reciprocal Mutation
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน :	0.01
<b>NSGA-II</b> (ปาลิตา ฉิมคล้าย, 2553)	
ขนาดประชากร :	100
ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ :	0.7
ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน:	0.3
รูปแบบการครอสโอเวอร์:	Weight Mapping Crossover
รูปแบบการมิวเตชัน :	Reciprocal Mutation
<b>DPSO</b> (ปาลิตา ฉิมคล้าย, 2553)	
ขนาดประชากร :	100
จำนวนฝูง :	10
จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง :	10
ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ ( $C_1, C_2$ )	0.1
น้ำหนักการหมุน ( $\omega$ )	1
<b>DPSO</b> (ปาลิตา ฉิมคล้าย, 2553)	
ขนาดประชากร :	100
จำนวนฝูง :	10
จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง :	10
ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ ( $C_1, C_2$ )	0.1
น้ำหนักการหมุน ( $\omega$ )	1

#### 5.4 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน

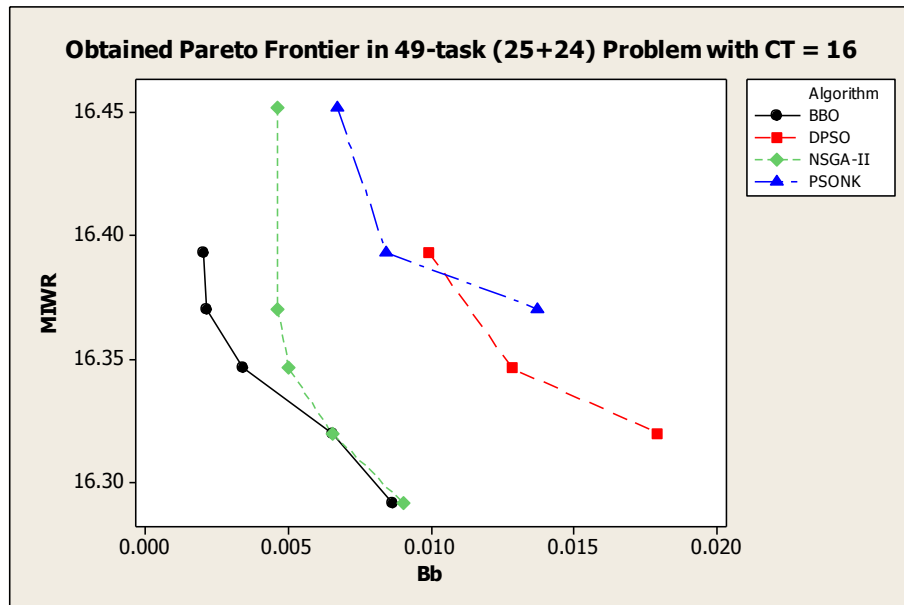
##### 5.4.1 เมื่อรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 16 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.3 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.1 และเมื่อนำ

คำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแรงที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.4 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.3 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	17	9	0.0020	16.3929
	2	17	9	0.0021	16.3704
	3	17	9	0.0034	16.3462
	4	17	9	0.0065	16.3200
	5	17	9	0.0086	16.2917
NSGA-II	1	17	9	0.0046	16.4516
	2	17	9	0.0046	16.3704
	3	17	9	0.0050	16.3462
	4	17	9	0.0065	16.3200
	5	17	9	0.0090	16.2917
DPSO	1	17	9	0.0099	16.3929
	2	17	9	0.0128	16.3462
	3	17	9	0.0179	16.3200
PSONK	1	17	9	0.0067	16.4516
	2	17	9	0.0084	16.3929
	3	17	9	0.0137	16.3704



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.4 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
1	17	9	0.0020	16.3929
2	17	9	0.0021	16.3704
3	17	9	0.0034	16.3462
4	17	9	0.0065	16.3200
5	17	9	0.0086	16.2917

ตารางที่ 5.5 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 16 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.0790	1.00	6
NSGA-II	0.0990	0.6457	0.20	6
DPSO	0.4731	0.5207	0.00	8
PSONK	0.4625	0.7897	0.00	9

จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.5 พบว่า BBO มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบในปัญหานี้ที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจน มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าคำตอบที่ BBO หามาได้ทั้งหมดล้วนเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง นอกจากนี้ยังมีการกระจายตัวของคำตอบที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจนเช่นกัน ขณะที่ในบรรดาอัลกอริทึมที่เหลือ พบว่า NSGA-II มีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ต่ำกว่า BBO เล็กน้อยและมีคำตอบบางส่วนเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงจากค่าอัตราส่วนๆ เท่ากับ 0.02 ขณะที่ DPSSO และ PSOK มีสมรรถนะที่ค่อนข้างแยบไถ่เคียงกัน

#### 5.4.2 รอบเวลาการผลิตขนาด 22 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 22 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.6 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.2 และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแรงที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.7 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.8

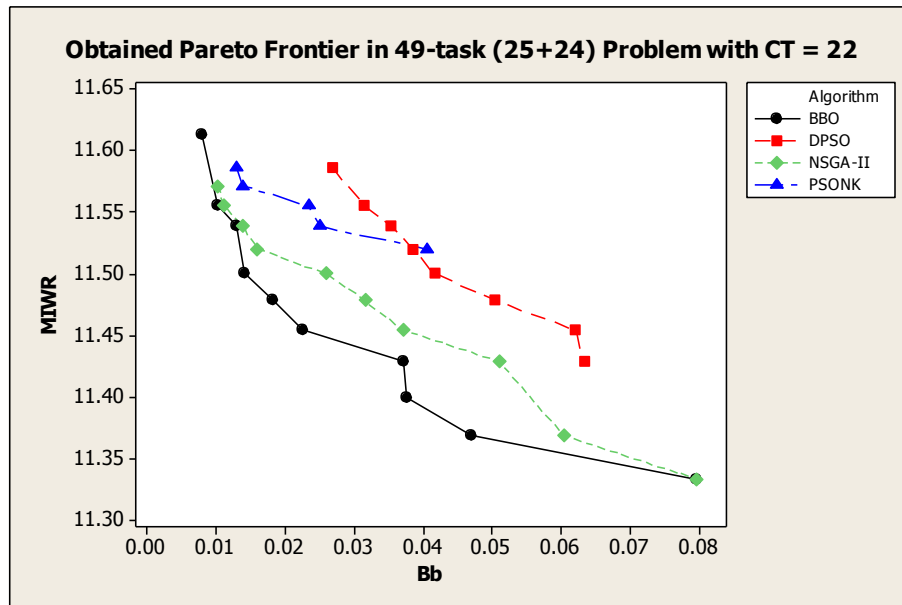
ตารางที่ 5.6 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	12	6	0.0080	11.6129
	2	12	6	0.0102	11.5556
	3	12	6	0.0129	11.5385
	4	12	6	0.0141	11.5000
	5	12	6	0.0182	11.4783
	6	12	6	0.0226	11.4545
	7	12	6	0.0371	11.4286
	8	12	6	0.0375	11.4000
	9	12	6	0.0468	11.3684
	10	12	6	0.0795	11.3333
NSGA-II	1	12	6	0.0102	11.5714



ตารางที่ 5.6 ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา (ต่อ)

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
	2	12	6	0.0111	11.5556
	3	12	6	0.0138	11.5385
	4	12	6	0.0160	11.5200
	5	12	6	0.0260	11.5000
	6	12	6	0.0315	11.4783
	7	12	6	0.0370	11.4545
	8	12	6	0.0510	11.4286
	9	12	6	0.0603	11.3684
	10	12	6	0.0795	11.3333
	DPSO	1	12	6	0.0268
2		12	6	0.0314	11.5556
3		12	6	0.0353	11.5385
4		12	6	0.0384	11.5200
5		12	6	0.0416	11.5000
6		12	6	0.0503	11.4783
7		12	6	0.0619	11.4545
8		12	6	0.0632	11.4286
PSONK	1	12	6	0.0129	11.5862
	2	12	6	0.0139	11.5714
	3	12	6	0.0233	11.5556
	4	12	6	0.0250	11.5385
	5	12	6	0.0406	11.5200



รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.7 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1	12	6	0.0080	11.6129
2	12	6	0.0102	11.5556
3	12	6	0.0129	11.5385
4	12	6	0.0141	11.5000
5	12	6	0.0182	11.4783
6	12	6	0.0226	11.4545
7	12	6	0.0371	11.4286
8	12	6	0.0375	11.4000
9	12	6	0.0468	11.3684
10	12	6	0.0795	11.3333

ตารางที่ 5.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.2968	1.00	6
NSGA-II	0.1014	0.4600	0.10	5
DPSO	0.3051	0.5339	0.00	19
PSO/NK	0.3227	0.7829	0.00	9

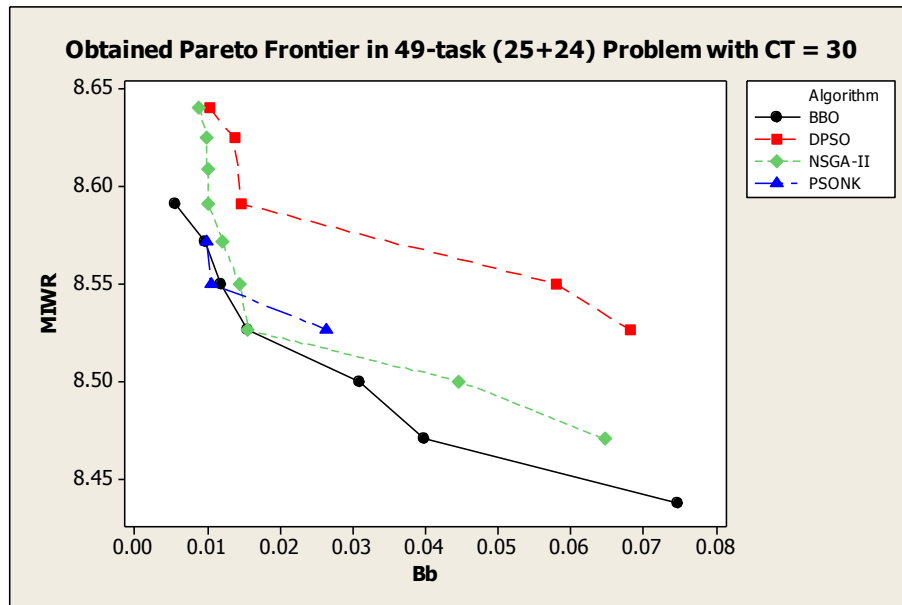
จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.8 พบว่า BBO มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบในปัญหานี้ที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจน มีค่าการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าคำตอบที่ BBO หามาได้ทั้งหมดล้วนเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงนั่นเอง ขณะที่ในบรรดาอัลกอริทึมที่เหลือพบว่า NSGA-II มีสมรรถนะในทุกๆ ด้านเหนือกว่า DPSO และ PSO/NK โดยเฉพาะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบฯ ส่วน DPSO และ PSO/NK นั้นมีสมรรถนะค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกๆ ด้าน ยกเว้นในด้านของเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ DPSO ใช้เวลานานกว่าอย่างเห็นได้ชัด

#### 5.4.3 รอบเวลาการผลิตขนาด 30 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 30 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.9 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.3 และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.10 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.9 ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
BBO	1	9	5	0.0056	8.5909
	2	9	5	0.0097	8.5714
	3	9	5	0.0118	8.5500
	4	9	5	0.0156	8.5263
	5	9	5	0.0310	8.5000
	6	9	5	0.0397	8.4706
	7	9	5	0.0746	8.4375
NSGA-II	1	9	5	0.0089	8.6400
	2	9	5	0.0099	8.6250
	3	9	5	0.0100	8.6087
	4	9	5	0.0102	8.5909
	5	9	5	0.0121	8.5714
	6	9	5	0.0144	8.5500
	7	9	5	0.0156	8.5263
	8	9	5	0.0445	8.5000
	9	9	5	0.0646	8.4706
DPSO	1	9	5	0.0103	8.6400
	2	9	5	0.0137	8.6250
	3	9	5	0.0147	8.5909
	4	9	5	0.0579	8.5500
	5	9	5	0.0682	8.5263
PSONK	1	9	5	0.0099	8.5714
	2	9	5	0.0105	8.5500
	3	9	5	0.0264	8.5263



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5. 10 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
1	9	5	0.0056	8.5909
2	9	5	0.0097	8.5714
3	9	5	0.0105	8.5500
4	9	5	0.0156	8.5263
5	9	5	0.0310	8.5000
6	9	5	0.0397	8.4706
7	9	5	0.0746	8.4375

ตารางที่ 5.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 49 (25+24) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0026	0.2510	0.86	4
NSGA-II	0.1046	0.5107	0.14	3
DPSO	0.3094	0.6983	0.00	9
PSONK	0.2232	0.7492	0.14	6

จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.11 โดยภาพรวมพบว่า BBO มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบในปัญหานี้ที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว และโดยเฉพาะในด้านสัดส่วนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่มีค่าสูงถึง 0.86 ขณะที่ NSGA-II มีสมรรถนะโดยรวมเป็นอันดับรองลงไป ส่วน DPSO และ PSONK มีสมรรถนะที่ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับ BBO และ NSGA-II อย่างไรก็ตาม PSONK มีสมรรถนะเหนือกว่า DPSO อย่างชัดเจนทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบฯ และสัดส่วนคำตอบฯ

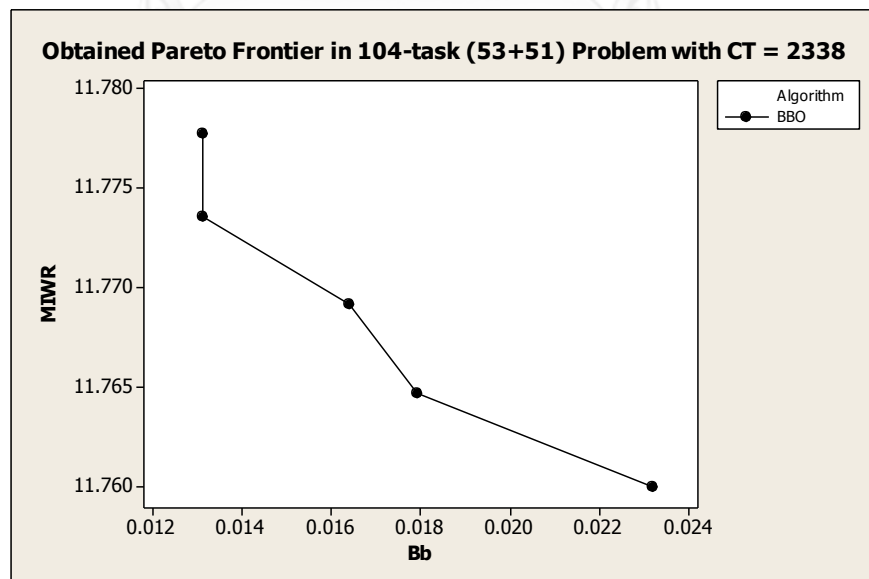
## 5.5 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน

### 5.5.1 รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 2,338 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.12 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.4 (กราฟแสดงคำตอบของ BBO เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงร่วมได้ เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.13 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.12 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
BBO	1	12	8	0.0131	11.7778
	2	12	8	0.0131	11.7736
	3	12	8	0.0164	11.7692
	4	12	8	0.0179	11.7647
	5	12	8	0.0232	11.7600
NSGA-II	1	12	9	0.0039	11.7647
	2	12	9	0.0058	11.7600
	3	12	9	0.0087	11.7551
	4	12	9	0.0124	11.7500
DPSO	1	12	12	0.0236	11.8065
	2	12	12	0.0452	11.7818
PSONK	1	12	9	0.0288	11.8033
	2	12	9	0.0281	11.8235



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.13 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	MIWR
1	12	8	0.0131	11.7778
2	12	8	0.0131	11.7736
3	12	8	0.0164	11.7692
4	12	8	0.0179	11.7647
5	12	8	0.0232	11.7600

ตารางที่ 5.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 2,338 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.1698	1.00	36
NSGA-II	n/a*	n/a*	n/a*	90
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	63
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	24

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

จากตารางที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ BBO หามาได้นั้นมีค่าฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นทั้งหมด ดังนั้น คำตอบของ BBO จึงเป็น  
คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยอัตโนมัติ และทำให้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่แสดงในตารางที่ 5.14  
มีเพียงของ BBO เพียงอัลกอริทึมเดียว ซึ่งมีค่าการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและ  
อัตราส่วนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ อีกทั้งมีการกระจายที่ค่อนข้างดี อย่งไร  
ก็ตาม ในส่วนของอัลกอริทึมอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.12 พบว่า NSGA-II และ PSONK มีค่า  
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 ที่ต่ำกว่า BBO เล็กน้อย นั่นคือมีจำนวนสถานีมากกว่า 1 สถานี แต่  
NSGA-II มีค่าฟังก์ชันระดับที่ 3 ที่เหนือกว่า PSONK ขณะที่ DPSO มีคำตอบที่แย่มากที่สุด

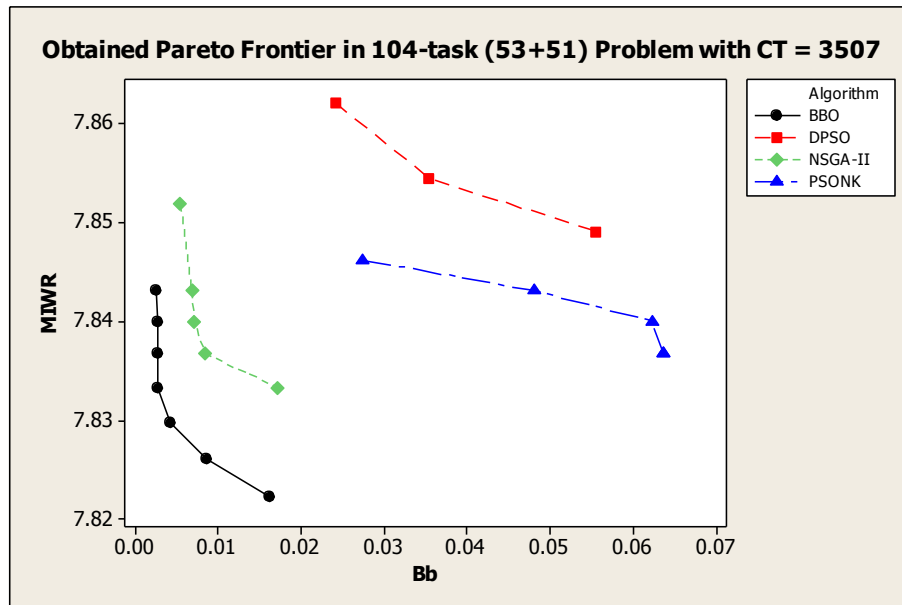


### 5.5.2 รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 104 (53+51) ชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 3,507 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.15 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.5 และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับรวมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.16 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.15 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	8	5	0.0025	7.8431
	2	8	5	0.0027	7.8400
	3	8	5	0.0027	7.8367
	4	8	5	0.0028	7.8333
	5	8	5	0.0042	7.8298
	6	8	5	0.0087	7.8261
	7	8	5	0.0162	7.8222
NSGA-II	1	8	5	0.0055	7.8519
	2	8	5	0.0069	7.8431
	3	8	5	0.0071	7.8400
	4	8	5	0.0085	7.8367
	5	8	5	0.0172	7.8333
DPSO	1	8	5	0.0241	7.8621
	2	8	5	0.0354	7.8545
	3	8	5	0.0554	7.8491
PSONK	1	8	5	0.0275	7.8462
	2	8	5	0.0480	7.8431
	3	8	5	0.0623	7.8400
	4	8	5	0.0637	7.8367
	5	8	5	0.0637	7.8367



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.16 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
1	8	5	0.0025	7.8431
2	8	5	0.0027	7.8400
3	8	5	0.0027	7.8367
4	8	5	0.0028	7.8333
5	8	5	0.0042	7.8298
6	8	5	0.0087	7.8261
7	8	5	0.0162	7.8222

ตารางที่ 5.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชิ้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 3,507 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.3567	1.00	66
NSGA-II	0.1511	0.7050	0.00	40
DPSO	0.7430	0.7540	0.00	64
PSONK	0.5154	0.9373	0.00	32

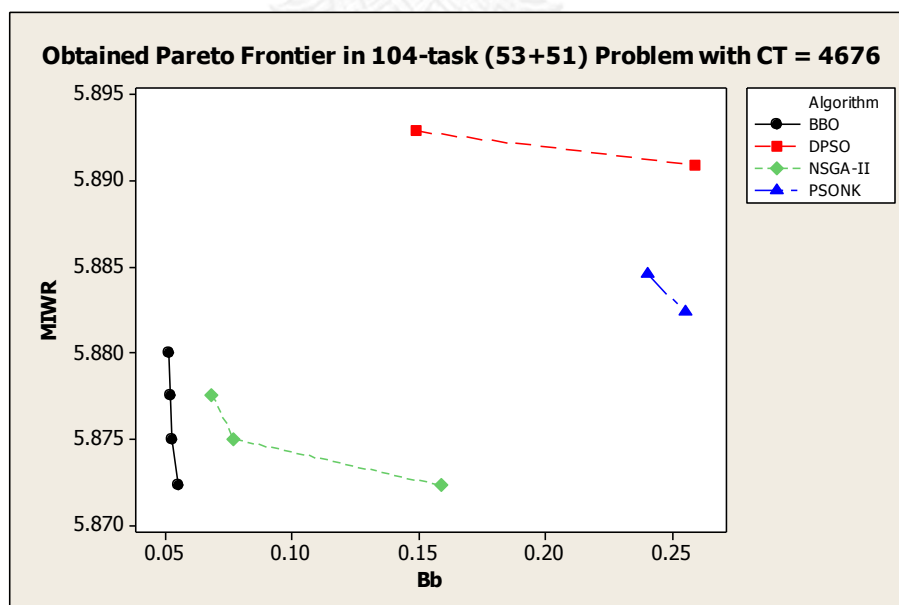
จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.17 โดยภาพรวมพบว่า BBO มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบในปัญหานี้ที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจนทั้งในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว และสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ ทั้งนี้เนื่องจากคำตอบของ BBO ทั้งหมดล้วนเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของปัญหา และเป็นอัลกอริทึมเดียวที่สามารถค้นพบคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ขณะที่ NSGA-II มีสมรรถนะโดยรวมเป็นอันดับรองลงไป ส่วน DPSO และ PSONK นั้นมีสมรรถนะที่ไม่ต่างกันมาก แต่ค่อนข้างแย่เมื่อเทียบกับ BBO และ NSGA-II

### 5.5.3 รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 104 (53+51) ชิ้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 4,676 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.18 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.6 และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.19 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.18 ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
BBO	1	6	4	0.0511	5.8800
	2	6	4	0.0515	5.8776
	3	6	4	0.0526	5.8750
	4	6	4	0.0551	5.8723
NSGA-II	1	6	4	0.0681	5.8776
	2	6	4	0.0768	5.8750
	3	6	4	0.1584	5.8723
DPSO	1	6	4	0.1486	5.8929
	2	6	4	0.2586	5.8909
PSONK	1	6	4	0.2398	5.8846
	2	6	4	0.2548	5.8824



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.19 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1	6	4	0.0511	5.8800
2	6	4	0.0515	5.8776
3	6	4	0.0526	5.8750
4	6	4	0.0551	5.8723

ตารางที่ 5.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 104 (53+51) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 4,676 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.1554	1.00	45
NSGA-II	0.1270	0.9138	0.00	44
DPSO	0.9356	0.7333	0.00	61
PSONK	0.9991	0.9623	0.00	20

จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.20 โดยภาพรวมพบว่า BBO มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบในปัญหานี้ที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจนทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว และสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ ทั้งนี้เนื่องจากคำตอบของ BBO ทั้งหมดล้วนเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของปัญหา และเป็นอัลกอริทึมเดียวที่สามารถค้นพบคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ขณะที่ในบรรดาอัลกอริทึมที่เหลือ พบว่า NSGA-II มีสมรรถนะที่โดดเด่นด้านในการเข้าสู่กลุ่มคำตอบฯ ส่วนอัลกอริทึม DPSO และ PSONK มีสมรรถนะแยบใกล้เคียงกันทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบฯ และการกระจายตัว

## 5.6 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน

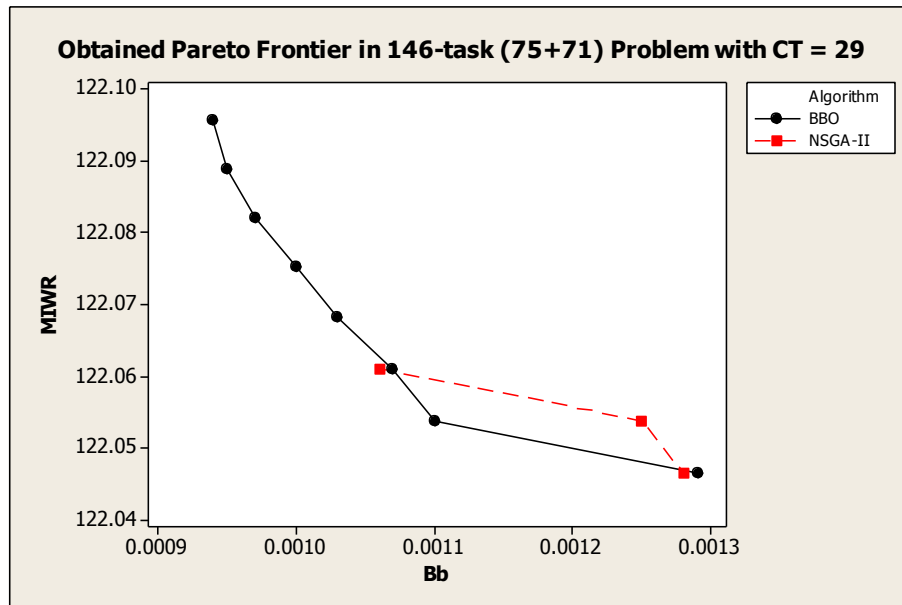
### 5.6.1 รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 29 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.21 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.7 (กราฟแสดง

คำตอบของ BBO และ NSGA-II เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงรวมได้ เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแรงที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.22 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.21 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	123	63	0.00094	122.0956
	2	123	63	0.00095	122.0889
	3	123	63	0.00097	122.0821
	4	123	63	0.00100	122.0752
	5	123	63	0.00103	122.0682
	6	123	63	0.00107	122.0611
	7	123	63	0.00110	122.0538
	8	123	63	0.00129	122.0465
NSGA-II	1	123	63	0.00106	122.0611
	2	123	63	0.00125	122.0538
	3	123	63	0.00128	122.0465
DPSO	1	125	64	0.00162	124.0741
	2	125	64	0.00198	124.0672
PSONK	1	123	76	0.00135	122.1214



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.22 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
1	123	63	0.00094	122.0956
2	123	63	0.00095	122.0889
3	123	63	0.00097	122.0821
4	123	63	0.00100	122.0752
5	123	63	0.00103	122.0682
6	123	63	0.00106	122.0611
7	123	63	0.00110	122.0538
8	123	63	0.00128	122.0465

ตารางที่ 5.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 29 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0071	0.0264	0.75	51
NSGA-II	0.3267	0.7058	0.25	70
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	106
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	35

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.23 พบว่า BBO มีสมรรถนะเหนือกว่าทุกอัลกอริทึมอย่างชัดเจนทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว และสัดส่วนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ โดยมี NSGA-II ที่มีสมรรถนะที่ดีในระดับรองลงไป ส่วน DPSO และ PSONK นั้นมีค่าฟังก์ชันระดับที่ 1 และ 2 ที่ไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด จึงไม่ได้ถูกนำมาคิดค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ใดๆก็ตาม จากการพิจารณาตารางที่ 5.21 พบว่า PSONK สามารถค้นพบคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับ 1 และ 2 เหนือกว่า DPSO อย่างชัดเจน

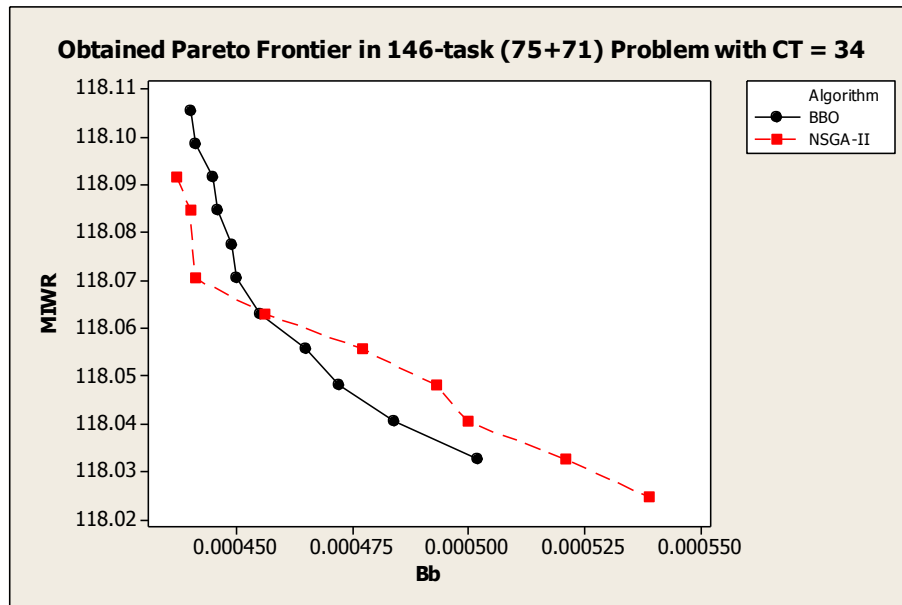
### 5.6.2 รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 34 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.24 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.8 (กราฟแสดงคำตอบของ BBO และ NSGA-II เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงรวมได้ เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.25 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.26



ตารางที่ 5.24 ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 146 (75+71)  
 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	119	61	0.000440	118.1053
	2	119	61	0.000441	118.0985
	3	119	61	0.000445	118.0916
	4	119	61	0.000446	118.0846
	5	119	61	0.000449	118.0775
	6	119	61	0.000450	118.0703
	7	119	61	0.000455	118.0630
	8	119	61	0.000465	118.0556
	9	119	61	0.000472	118.0480
	10	119	61	0.000484	118.0403
	11	119	61	0.000502	118.0325
NSGA-II	1	119	61	0.000448	118.0985
	2	119	61	0.000451	118.0916
	3	119	61	0.000460	118.0846
	4	119	61	0.000486	118.0775
	5	119	61	0.000494	118.0703
	6	119	61	0.000500	118.0630
	7	119	61	0.000503	118.0556
	8	119	61	0.000519	118.0480
	9	119	61	0.000530	118.0403
DPSO	1	119	77	0.000725	118.1250
PSONK	1	119	62	0.000659	118.1500
	2	119	62	0.000661	118.1377



รูปที่ 5.8 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชิ้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.25 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชิ้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	MIWR
1	119	61	0.000440	118.1053
2	119	61	0.000441	118.0985
3	119	61	0.000445	118.0916
4	119	61	0.000446	118.0846
5	119	61	0.000449	118.0775
6	119	61	0.000450	118.0703
7	119	61	0.000455	118.0630
8	119	61	0.000465	118.0556
9	119	61	0.000472	118.0480
10	119	61	0.000484	118.0403
11	119	61	0.000502	118.0325

ตารางที่ 5.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.0390	1.00	166
NSGA-II	0.2174	0.2253	0.00	186
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	170
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	44

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

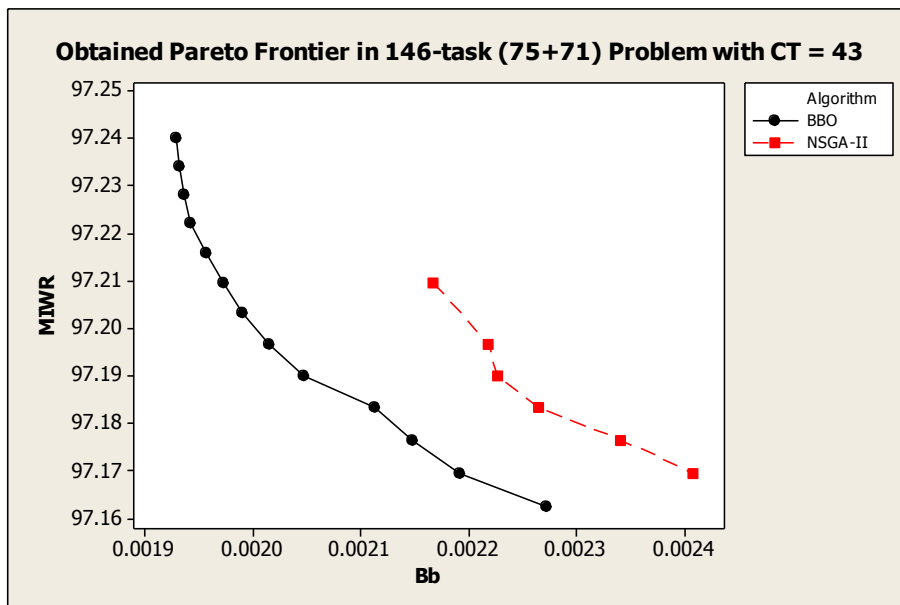
จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.26 พบว่า BBO มีสมรรถนะเหนือกว่าทุกอัลกอริทึมอย่างชัดเจนทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว และสัดส่วนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ เนื่องจากเป็นอัลกอริทึมเดียวที่สามารถหาคำตอบได้ตรงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง และยังครบทุกคำตอบด้วย ขณะที่ NSGA-II มีสมรรถนะที่ดิ่งลงไป ส่วน DPSO และ PSONK นั้นมีค่าฟังก์ชันระดับที่ 2 ที่ไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด จึงไม่ได้ถูกนำมาประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ใดๆก็ตาม จากการพิจารณาตารางที่ 5.24 พบว่า PSONK สามารถค้นพบคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับ 2 เหนือกว่า DPSO อย่างชัดเจน

### 5.6.3 รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 43 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.27 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.9 (กราฟแสดงคำตอบของ BBO และ NSGA-II เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงร่วมได้ เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.28 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.29

ตารางที่ 5.27 ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 146 (75+71)  
 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	98	50	0.001929	97.2403
	2	98	50	0.001932	97.2344
	3	98	50	0.001936	97.2283
	4	98	50	0.001942	97.2222
	5	98	50	0.001956	97.2160
	6	98	50	0.001972	97.2097
	7	98	50	0.001990	97.2033
	8	98	50	0.002014	97.1967
	9	98	50	0.002046	97.1901
	10	98	50	0.002112	97.1833
	11	98	50	0.002147	97.1765
	12	98	50	0.002191	97.1695
	13	98	50	0.002271	97.1624
NSGA-II	1	98	50	0.002167	97.2097
	2	98	50	0.002218	97.1967
	3	98	50	0.002226	97.1901
	4	98	50	0.002264	97.1833
	5	98	50	0.002341	97.1765
	6	98	50	0.002408	97.1695
DPSO	1	101	100	0.002036	100.2171
PSONK	1	98	76	0.002668	97.2899



รูปที่ 5.9 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.28 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1	98	50	0.001929	97.2403
2	98	50	0.001932	97.2344
3	98	50	0.001936	97.2283
4	98	50	0.001942	97.2222
5	98	50	0.001956	97.2160
6	98	50	0.001972	97.2097
7	98	50	0.001990	97.2033
8	98	50	0.002014	97.1967
9	98	50	0.002046	97.1901
10	98	50	0.002112	97.1833
11	98	50	0.002147	97.1765
12	98	50	0.002191	97.1695
13	98	50	0.002271	97.1624

ตารางที่ 5.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 146 (75+71) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 43 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.0489	1.00	375
NSGA-II	0.5199	0.6105	0.46	241
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	121
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	41

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.29 พบว่า BBO มีสมรรถนะเหนือกว่า  
ทุกอัลกอริทึมอย่างชัดเจนทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว  
และสัดส่วนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (คำตอบของ BBO ตรงตามคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด) โดยมี  
NSGA-II ที่มีสมรรถนะที่ดีในระดับรองลงไป ส่วน DPSO และ PSONK นั้นมีค่าฟังก์ชันระดับที่ 1 และ  
2 ที่ไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด จึงไม่ได้ถูกนำมาคิดค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ อย่างไรก็ตาม จากการพิจารณา  
ตารางที่ 5.27 พบว่า PSONK สามารถค้นพบคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับ 1 และ 2  
เหนือกว่า DPSO อย่างชัดเจน

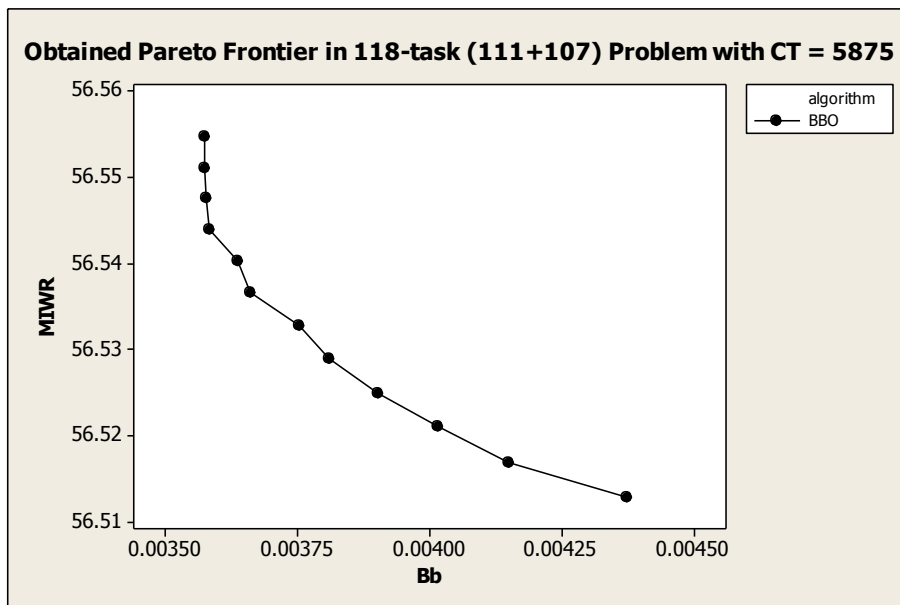
## 5.7 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน

### 5.7.1 รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 218  
(111+107) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 5,785 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.30  
โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.10 (กราฟ  
แสดงคำตอบของ BBO เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงรวมได้  
เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัด  
อันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.31  
ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่  
5.32

ตารางที่ 5.30 ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 218 (111+107)  
 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	57	29	0.003573	56.5547
	2	57	29	0.003573	56.5512
	3	57	29	0.003578	56.5476
	4	57	29	0.003582	56.5440
	5	57	29	0.003638	56.5403
	6	57	29	0.003659	56.5366
	7	57	29	0.003752	56.5328
	8	57	29	0.003808	56.5289
	9	57	29	0.003901	56.5250
	10	57	29	0.004015	56.5210
	11	57	29	0.004149	56.5169
	12	57	29	0.004372	56.5128
NSGA-II	1	57	30	0.003196	56.5839
	2	57	30	0.003276	56.5809
	3	57	30	0.003377	56.5778
	4	57	30	0.003391	56.5714
	5	57	30	0.003596	56.5649
	6	57	30	0.0037	56.5547
	7	57	30	0.003753	56.5512
	8	57	30	0.003813	56.5476
	9	57	30	0.004858	56.5440
DPSO	1	60	40	0.009302	59.5973
PSONK	1	58	51	0.006864	57.6813
	2	58	51	0.011655	57.6778



รูปที่ 5.10 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.31 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1	57	29	0.003573	56.5547
2	57	29	0.003573	56.5512
3	57	29	0.003578	56.5476
4	57	29	0.003582	56.5440
5	57	29	0.003638	56.5403
6	57	29	0.003659	56.5366
7	57	29	0.003752	56.5328
8	57	29	0.003808	56.5289
9	57	29	0.003901	56.5250
10	57	29	0.004015	56.5210
11	57	29	0.004149	56.5169
12	57	29	0.004372	56.5128



ตารางที่ 5.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 5,785 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.0449	1.00	842
NSGA-II	n/a*	n/a*	n/a*	1170
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	442
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	218

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

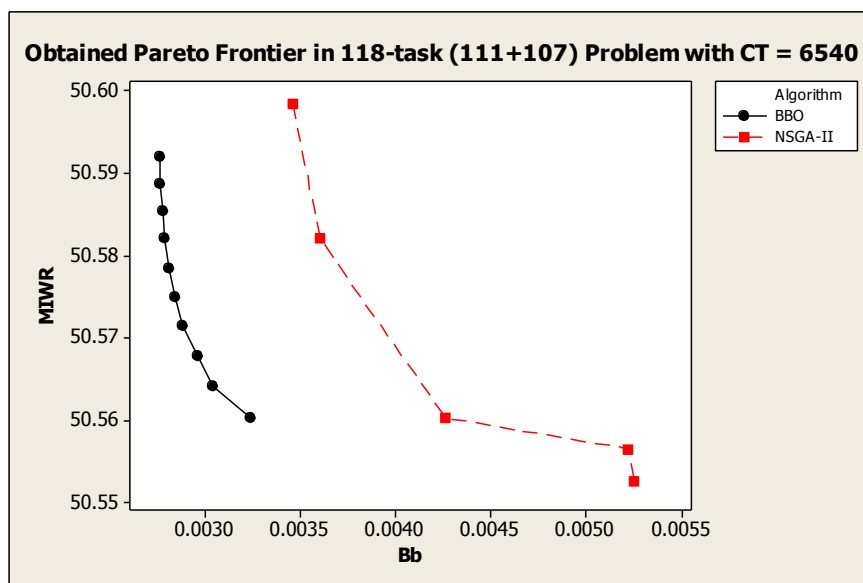
จากตารางที่ 5.30 จะเห็นได้ว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ BBO หามาได้นั้นมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นทั้งหมด ดังนั้น คำตอบของ BBO จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงทันที และทำให้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่แสดงในตารางที่ 5.32 มีเพียงของ BBO เพียงอัลกอริทึมเดียว ซึ่งมีค่าการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและอัตราส่วนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ อีกทั้งมีการกระจายที่ค่อนข้างดี อย่างไรก็ตาม ในส่วนของอัลกอริทึมอื่นๆ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.12 พบว่า NSGA-II และ PSONK มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 ที่ต่ำกว่า BBO เล็กน้อย นั่นคือมีจำนวนสถานีมากกว่า 1 สถานี แต่ NSGA-II มีค่าฟังก์ชันระดับที่ 3 ที่เหนือกว่า PSONK ขณะที่ DPSO มีคำตอบที่แย่มากที่สุด

### 5.7.2 รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 6,540 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.33 โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.11 (กราฟแสดงคำตอบของ BBO และ NSGA-II เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงรวมได้เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัดอันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแกร่งที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.34 ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 5.35

ตารางที่ 5.33 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 218 (111+107)  
 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_w$	$N_s$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	51	26	0.002760	50.5920
	2	51	26	0.002764	50.5887
	3	51	26	0.002774	50.5854
	4	51	26	0.002786	50.5820
	5	51	26	0.002807	50.5785
	6	51	26	0.002839	50.5750
	7	51	26	0.002883	50.5714
	8	51	26	0.002957	50.5678
	9	51	26	0.003039	50.5641
	10	51	26	0.003237	50.5603
NSGA	1	51	26	0.003459	50.5984
	2	51	26	0.003601	50.5820
	3	51	26	0.004259	50.5603
	4	51	26	0.005218	50.5565
	5	51	26	0.005252	50.5526
DPSO	1	53	36	0.005323	52.6294
PSONK	1	52	49	0.008026	51.7263



รูปที่ 5.11 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5. 34 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1	51	26	0.002760	50.5920
2	51	26	0.002764	50.5887
3	51	26	0.002774	50.5854
4	51	26	0.002786	50.5820
5	51	26	0.002807	50.5785
6	51	26	0.002839	50.5750
7	51	26	0.002883	50.5714
8	51	26	0.002957	50.5678
9	51	26	0.003039	50.5641
10	51	26	0.003237	50.5603
11	51	26	0.003459	50.5984
12	51	26	0.003601	50.5820
13	51	26	0.004259	50.5603
14	51	26	0.005218	50.5565
15	51	26	0.005252	50.5526

ตารางที่ 5.35 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 6,540 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.1361	0.2310	0.83	656
NSGA-II	0.3163	0.7010	0.17	990
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	488
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	129

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

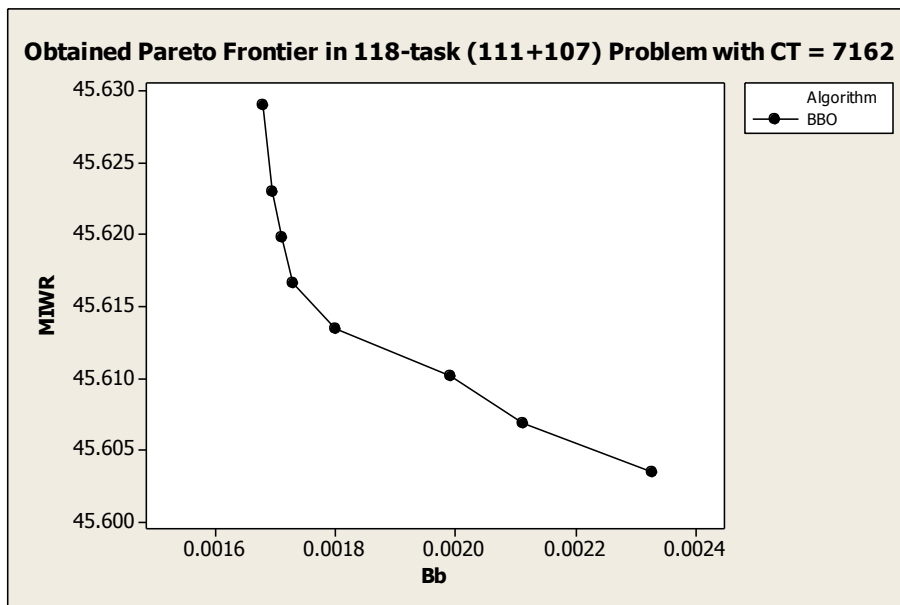
จากผลการประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 5.35 พบว่า BBO มีสมรรถนะเหนือกว่า  
ทุกอัลกอริทึมอย่างชัดเจนทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัว  
และสัดส่วนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ โดยมี NSGA-II ที่มีสมรรถนะที่ดีในระดับรองลงไป ส่วน DPSO  
และ PSONK นั้นมีค่าฟังก์ชันระดับที่ 1 และ 2 ที่ไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุด จึงไม่ได้ถูกนำมาร่วมคิดค่าตัวชี้วัด  
สมรรถนะต่างๆ ใดๆก็ตาม จากการพิจารณาตารางที่ 5.33 พบว่า PSONK สามารถค้นพบคำตอบ  
ที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับ 1 และ 2 เหนือกว่า DPSO

### 5.7.3 รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ สามารถหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 218  
(111+107) ชั้นงาน เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 7,162 หน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 5.36  
โดยสามารถนำมาแสดงให้อยู่ในรูปของกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 ได้ดังรูปที่ 5.12 (กราฟ  
แสดงคำตอบของ BBO เท่านั้น ส่วนคำตอบของอัลกอริทึมอื่นๆ ไม่สามารถนำมาแสดงร่วมได้  
เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 แย่กว่า) และเมื่อนำคำตอบเหล่านี้ทั้งหมดมาจัด  
อันดับร่วมกันจะได้คำตอบที่มีความแข็งแรงที่สุดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 5.37  
ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทำให้สามารถคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ของแต่ละอัลกอริทึมได้ดังตารางที่  
5.38

ตารางที่ 5.36 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หามาได้ในปัญหาขนาด 218 (111+107)  
 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
BBO	1	46	24	0.001678	45.6290
	2	46	24	0.001694	45.6230
	3	46	24	0.001710	45.6198
	4	46	24	0.001729	45.6167
	5	46	24	0.001800	45.6134
	6	46	24	0.001991	45.6102
	7	46	24	0.002111	45.6068
	8	46	24	0.002326	45.6034
NSGA-II	1	47	24	0.001873	46.6270
	2	47	24	0.001926	46.6240
	3	47	24	0.002073	46.6210
	4	47	24	0.002092	46.6179
	5	47	24	0.002172	46.6148
	6	47	24	0.002211	46.6116
	7	47	24	0.002219	46.6083
	8	47	24	0.002535	46.6050
	9	47	24	0.002637	46.5983
	10	47	24	0.002739	46.5948
	11	47	24	0.003091	46.5877
	12	47	24	0.003094	46.5841
	13	47	24	0.003625	46.5804
	14	47	24	0.003922	46.5766
DPSO	1	47	31	0.005173	46.6736
PSONK	1	47	44	0.005486	46.7459



รูปที่ 5.12 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา

ตารางที่ 5.37 True Pareto-optimal Solution ของปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา

คำตอบที่	$N_W$	$N_S$	$B_b$	$MIWR$
1	46	24	0.001678	45.629032
2	46	24	0.001694	45.622952
3	46	24	0.001710	45.619835
4	46	24	0.001729	45.616665
5	46	24	0.001800	45.613445
6	46	24	0.001991	45.610168
7	46	24	0.002111	45.606838
8	46	24	0.002326	45.603447

ตารางที่ 5.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 218 (111+107) ชั้นงาน  
รอบเวลาการผลิต 7,162 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	Convergence	Spread	Ratio	Time (s)
BBO	0.0000	0.1893	1.00	1053
NSGA-II	n/a*	n/a*	n/a*	1856
DPSO	n/a*	n/a*	n/a*	298
PSONK	n/a*	n/a*	n/a*	133

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ต่ำกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

จากตารางที่ 5.38 จะเห็นได้ว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ BBO หามาได้นั้นมีค่าฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นทั้งหมด ดังนั้น คำตอบของ BBO จึงเป็น  
คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงทันที และทำให้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่แสดงในตารางที่ 5.36 มีเพียง  
ของ BBO เพียงอัลกอริทึมเดียว ซึ่งมีค่าการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและอัตราส่วน  
คำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ อีกทั้งมีการกระจายที่ดี อย่างไรก็ตาม ในส่วนของ  
อัลกอริทึมอื่นๆ ซึ่งคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 5.36 พบว่า  
NSGA-II มีคำตอบที่ดีที่สุด ตามมาด้วย DPSO และ PSONK ตามลำดับ

## 5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ผลสรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการ  
ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานตัวอย่างทั้ง 12 ปัญหาดังตารางที่ 5.39 แสดงให้อย่างชัดเจนว่า  
BBO มีสมรรถนะในค้นหาคำตอบเชิงพาเรโตที่เหนือกว่าอัลกอริทึม NSGA-II DPSO และ PSONK ใน  
ทุกปัญหา ไม่ว่าจะเป็นการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to  
Pareto-optimal Set) การกระจายตัว (Spread) หรืออัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio  
of Non-dominated Solutions) โดยจากปัญหาทั้ง 12 ปัญหา พบว่ามีถึง 9 ปัญหาที่ BBO สามารถ  
สร้างคำตอบออกมาได้ตรงตามคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงทั้งหมด ดังจะเห็นได้จากการมีค่า  
สมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบฯ และอัตราส่วนฯ เท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการ  
กระจายตัวของคำตอบที่เหนือกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ในทุกปัญหาเช่นกัน

เมื่อพิจารณาตามขนาดของปัญหา จะพบว่าในปัญหาที่ 1 ขนาด 49 ชั้นงานซึ่งเป็นปัญหาขนาดเล็กที่สุดนั้น ทุกอัลกอริทึมสามารถหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ที่ดีที่สุดได้เท่ากัน โดยจากค่าตัวชี้วัดเชิงพาเรโตต่างๆ ซึ่งประเมินจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 3 จำนวน 2 วัตถุประสงค์ย่อยแสดงให้เห็นว่า NSGA-II มีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบฯ เป็นรอง BBO เล็กน้อย ขณะที่ DPSO และ PSONK นั้นมีการลู่เข้าสู่คำตอบฯ ที่ค่อนข้างแย้มไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในส่วนของ การกระจายตัวของคำตอบ พบว่าทั้ง NSGA-II DPSO และ NSGA-II มีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ NSGA-II มีสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบง่าอยู่บ้างในทุกๆ ปัญหาย่อยที่มีรอบเวลาการผลิตต่างกัน

เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น อัลกอริทึม DPSO และ PSONK จะมีสมรรถนะในการลู่เข้าสู่คำตอบฯ ที่แย้มลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ BBO และ NSGA-II โดยเฉพาะในปัญหาที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นปัญหาขนาดใหญ่ ทั้ง DPSO และ PSONK ไม่สามารถหาคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ที่ดีที่สุดออกมาได้เลย แสดงให้เห็นว่า DPSO และ PSONK อาจไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสลายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน โดยเฉพาะปัญหาขนาดใหญ่ตั้งแต่ 100 ชั้นงานเป็นต้นไป

ลำดับต่อไป เมื่อพิจารณาในปัญหาที่ 3 ซึ่งมีขนาด 146 ชั้นงาน พบว่านอกจากอัลกอริทึม BBO ซึ่งมีสมรรถนะในการหาคำตอบที่สูงที่สุดแล้ว ยังมี NSGA-II อีกอัลกอริทึมที่ยังคงสามารถหาคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ได้เท่าเทียมกับ BBO อย่างไรก็ตาม ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ที่ประเมินออกมาได้นั้นแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า BBO มีสมรรถนะในการหาคำตอบที่เหนือกว่า NSGA-II ขณะที่ปัญหาที่ 4 ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุด 218 ชั้นงาน พบว่ามีถึง 2 ใน 3 ปัญหาย่อยที่ NSGA-II ไม่สามารถหาคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ได้ดีเท่ากับ BBO ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า NSGA-II มีสมรรถนะที่แย้มกว่า BBO ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาใน ด้านของเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ พบว่า NSGA-II และ BBO ใช้เวลาค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับ DPSO และ PSONK โดย NSGA-II ใช้เวลานานที่สุด ตามด้วย BBO DPSO และ PSONK ขณะที่ปัญหา

จากการวิเคราะห์ข้างต้นทั้งหมดจึงสามารถสรุปได้ว่า BBO นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสลายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานในทุกขนาดปัญหาตั้งแต่ 49 ถึง 218 ชั้นงานเหนือกว่าอัลกอริทึม NSGA-II DPSO และ PSONK อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัญหาขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ที่ DPSO และ PSONK มีสมรรถนะค่อนข้างต่ำ และ NSGA-II ที่มีแนวโน้มที่จะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีเพียงพอได้เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่หลายๆ



ตารางที่ 5.39 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

Problem	1			2			3			4		
No. of Tasks (Line 1+Line 2)	49 (25+24)			104 (53+51)			146 (75+71)			218 (111+107)		
Cycle Time	16	22	30	2338	3507	4676	29	34	43	5785	6540	7162
<b>Convergence</b>												
BBO	0.0000	0.0000	0.0026	0.0000	0.0000	0.0000	0.0071	0.0000	0.0000	0.0000	0.1361	0.0000
NSGA-II	0.0990	0.1014	0.1046	n/a*	0.1511	0.1270	0.3267	0.2174	0.5199	n/a*	0.3163	n/a*
DPSO	0.4731	0.3051	0.3094	n/a*	0.7430	0.9356	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*
PSONK	0.4625	0.3227	0.2232	n/a*	0.5154	0.9991	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*
<b>Spread</b>												
BBO	0.0790	0.2968	0.2510	0.1698	0.3567	0.1554	0.0264	0.0390	0.0489	0.0449	0.2310	0.1893
NSGA-II	0.6457	0.4600	0.5107	n/a*	0.7050	0.9138	0.7058	0.2253	0.6105	n/a*	0.7010	n/a*
DPSO	0.5207	0.5339	0.6983	n/a*	0.7540	0.7333	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*
PSONK	0.7897	0.7829	0.7492	n/a*	0.9373	0.9623	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*
<b>Ratio</b>												
BBO	1.00	1.00	0.86	1.00	1.00	1.00	0.7500	1.00	1.00	1.00	0.83	1.00
NSGA-II	0.20	0.10	0.14	n/a*	0.00	0.00	0.2500	0.00	0.46	n/a*	0.17	n/a*
DPSO	0.00	0.00	0.00	n/a*	0.00	0.00	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*
PSONK	0.00	0.00	0.14	n/a*	0.00	0.00	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*	n/a*
<b>CPU time</b>												
BBO	6	6	4	36	66	45	51	166	375	842	656	1053
NSGA-II	6	5	3	90	40	44	70	186	241	1170	990	1856
DPSO	8	19	9	63	64	61	106	170	121	442	488	298
PSONK	9	9	6	24	32	20	35	44	41	218	129	133

n/a: ไม่สามารถประเมินได้ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมนั้นหามาได้มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ระดับที่ 1 และ 2 ดีกว่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยนี้

#### 6.1 บทสรุปงานวิจัย

สายการประกอบ (Line Balancing) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนประเภทหนึ่งที่เคยมีไว้สำหรับผลิตสินค้ารุ่นเดียวในปริมาณมาก แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตในระยะหลังก็ได้ทำให้สายการประกอบสามารถรองรับการผลิตสินค้าหลายรุ่นในปริมาณที่ไม่มากได้ด้วยเช่นกัน การจัดสรรชิ้นงานทั้งหมดในการประกอบสินค้าให้กับสถานีงานต่างๆ โดยที่ไม่ละเมิดบรรดาข้อจำกัดที่มีอยู่ เช่น ลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต เป็นต้น เรียกว่า การจัดสมดุลสายการประกอบ (Line Balancing) โดยสายการประกอบเส้นตรงจำนวนสองเส้นที่ตั้งอยู่ขนานกัน หากได้รับการจัดสมดุลร่วมกันโดยอนุญาตให้มีสถานีงานที่บรรจุชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบรวมกันอยู่ จะมีความเป็นไปได้ที่จะยุบรวมสถานีงานของทั้งสองสายการประกอบที่ตั้งอยู่ใกล้กันให้เป็นสถานีงานเดียวกันได้ ส่งผลให้จำนวนสถานีงานทั้งหมดของสายการประกอบทั้งสองเส้นนี้มีจำนวนน้อยกว่ากรณีที่แต่ละสถานีงานมีการดำเนินงานที่เป็นอิสระต่อกัน และจะเรียกสายการประกอบสองเส้นที่มีความสัมพันธ์กันในแนวขนานนี้ว่า “สายการประกอบแบบขนาน” (Parallel Assembly Lines)

งานวิจัยนี้นำเสนอปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนานที่สายการประกอบแต่ละเส้นภายในเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม ที่สามารถรองรับการผลิตสินค้าได้หลายรุ่นสลับไปมาได้ทันทีโดยไม่ต้องปรับตั้งเครื่องจักรซึ่งสามารถใช้รองรับการผลิตตามแนวคิดการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-in-time Production) โดยวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการจัดสมดุลมีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามระดับความสำคัญ ได้แก่

วัตถุประสงค์ระดับที่ 1: ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์ระดับที่ 2: ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

วัตถุประสงค์ระดับที่ 3: แบ่งออกเป็น 2 วัตถุประสงค์ย่อยที่จะทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ กัน ได้แก่ (1) ทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด และ (2) ทำให้งานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด

โดยในการจัดสมมูลจะให้วัตถุประสงค์ระดับต่างๆ มีค่าที่เหมาะสมที่สุดอย่างเป็นลำดับขั้น กล่าวคือจะมุ่งเน้นให้วัตถุประสงค์ระดับที่ 1 มีค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นหลัก ตามด้วยวัตถุประสงค์ระดับที่ 2 และระดับที่ 3 ตามลำดับ

เนื่องจากปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก จึงต้องอาศัยฮิวริสติกมาช่วยในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีในระดับที่ยอมรับได้ โดยที่ใช้เวลาไม่นานมากนัก งานวิจัยนี้ได้นำเอาอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยอัลกอริทึมนี้มีแนวคิดมาจากการลอกเลียนพฤติกรรมการอพยพของสิ่งมีชีวิตระหว่างเกาะต่างๆ ที่มีกอพพแพร่พันธุ์ออกจากเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงซึ่งมีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่นไปยังเกาะอื่นๆ โดยเฉพาะไปยังเกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และทำให้เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำนั้นมีความอุดมสมบูรณ์มากขึ้นกว่าเดิมจากการมีสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตที่หลากหลายกว่าเดิม “เกาะ” ในที่นี้เปรียบเสมือนคำตอบของปัญหา โดยคำตอบที่ดีมีแนวโน้มสูงที่จะถ่ายทอดคุณสมบัติให้กับคำตอบอื่นโดยเฉพาะกับคำตอบที่แย่ และทำให้คำตอบที่ได้รับการถ่ายทอดคุณสมบัติ นั้นมีคุณภาพที่สูงขึ้น ขณะเดียวกัน แม้คำตอบที่ดีอยู่แล้วอาจได้รับการถ่ายทอดคุณสมบัติไม่มากนัก แต่ก็คาดหวังว่าจะเกิดการพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้นไปอีก

เพื่อเป็นการชี้วัดสมรรถนะของ BBO ในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสม งานวิจัยนี้ได้นำ BBO ไปใช้ในการแก้ปัญหาตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 12 ปัญหา ซึ่งเป็นปัญหาที่มีจำนวนชั้นงานครอบคลุมอยู่ในช่วง 49 ถึง 218 ชั้นงาน พร้อมเปรียบเทียบสมรรถนะร่วมกับอัลกอริทึมอื่นๆ ที่เป็นที่ยอมรับใช้ในการแก้ปัญหาลักษณะนี้จำนวนทั้งสิ้น 3 อัลกอริทึม ได้แก่ อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge: PSONK) ทั้งนี้ ปัญหาการจัดสมมูลที่นำเสนอเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างอัลกอริทึมต่างๆ ข้างต้นจะอาศัยตัวชี้วัดที่อยู่ภายใต้หลักการการจัดอันดับเชิงพาเรโตจำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัว (Spread) และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions) พร้อมทั้งมีการพิจารณาในด้านของเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computational Time) ควบคู่ไปด้วย

จากผลการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างพบว่า BBO นั้นมีสมรรถนะการแก้ปัญหาที่เหนือกว่า NSGA-II DPSO และ PSONK อย่างชัดเจนในทุกขนาดปัญหา ทั้งในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต การกระจายตัว และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับว่า ขณะที่ NSGA-II นั้นมีสมรรถนะที่ดีเป็นอันดับรองลงไป แต่มีแนวโน้มที่จะมีสมรรถนะต่ำลงเมื่อถูกนำไปใช้แก้ปัญหาขนาดใหญ่ สำหรับในส่วนของ DPSO และ PSONK นั้นมีสมรรถนะที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับทั้ง BBO และ NSGA-II โดยเฉพาะในการปัญหาขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า BBO มีความเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการแก้ปัญหการจัดสมดุสลายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยมีดังนี้

1. งานวิจัยในอนาคตอาจกำหนดปัจจัยในทางปฏิบัติเข้าเพิ่มเติมในจัดสมดุสด้วย เช่น เวลาที่ใช้ในการเดินของพนักงานในสถานีนงานร่วม ผลกระทบจากการเรียนรู้ของพนักงาน เป็นต้น
2. อาจศึกษาการเพิ่มสมรรถนะให้กับอัลกอริทึม BBO ให้สูงยิ่งขึ้นไปอีกด้วยกระบวนการเสริมอื่นๆ เช่น กระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) เป็นต้น
3. นอกจากวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่ใช้ในการจัดสมดุสในงานวิจัยนี้แล้ว อาจมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญอื่นๆ ที่เหมาะแก่การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต
4. จากผลการจัดสมดุสลายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมที่ได้ สามารถนำไปวิจัยต่อยอดในด้านของปัญหาการจัดลำดับการผลิต (Sequencing Problem) เพื่อให้ทราบลำดับการผลิตสินค้าที่ทำให้สายการประกอบมีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กรรณ จิตเมตตา. การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

पालिता ฉิมคล้าย. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุคที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

เอี่ยมพร จันทร์แซม. การจัดสมดุคสายการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

### ภาษาอังกฤษ

Arcus, A. L. (1965). A computer method of sequencing operations for assembly lines. International Journal of Production Research. 4.4: 259-277.

Bartholdi, J. J. (1993). Balancing two-sided assembly lines: A case study. The international journal of production research. 31: 2447-2461.

Baykasoglu, A., Ozbakur, L., Gorkemli, L., & Gorkemli, B. (2009, July). Balancing parallel assembly lines via Ant Colony Optimization. Proceeding of Computers & Industrial Engineering. 2009. CIE 2009. International Conference on 39: 506-511.

- Becker, C., and 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., Çetinyokuş, T., & Cerçioğlu, H. (2007). A network model for parallel line balancing problem. Mathematical Problems in Engineering, 2007.
- Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. European Journal of Operational Research. 183: 674-693.
- Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. European Journal of Operational Research. 192: 349-373.
- Chutima, P., and 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. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on. 6: 182-197.
- Eberhart, R. C., and Kennedy, J. (1995, October). A new optimizer using particle swarm theory. Proceeding of Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science. 1: 39-43.
- Esmailian, G. R., Ismail, N., Sulaiman, S., Ahmad, M. M. H. M., and Hamed, M. (2009). Allocating and balancing of mixed model production through the parallel assembly lines. European Journal of Scientific Research. 31: 616-631.
- Gökçen, H., Ağpak, K., and 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. Boston, USA: Addison-Wesley Longman.

- Guo, Q., and Tang, L. (2009, December). A scatter search based heuristic for the balancing of parallel assembly lines. Proceeding of the combined 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and 28<sup>th</sup> Chinese Control Conference: 6256-6261.
- Hahn, R. (1972). Produktionsplanung bei Linienfertigung. de Gruyter.
- Ismail, N., Esmailian, G. R., Hamed, M., and Sulaiman, S. (2011, March). Balancing of parallel assembly lines with mixed-model product. Proceeding of International Conference on Management and Artificial Intelligence IPEDR 6: 120-124.
- Kara, Y., Gökçen, H., and Atasagun, Y. (2010). Balancing parallel assembly lines with precise and fuzzy goals. International Journal of Production Research. 48: 1685-1703.
- Kim, Y. K., Hyun, C. J., and Kim, Y. (1996). Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach. Computers & Operations Research. 23: 1131-1145.
- Kim, Y. K., Kim, Y., and Kim, Y. J. (2000). Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. Production Planning & Control. 11: 44-53.
- Kumar, R., and Singh, P. K. (2007). Pareto evolutionary algorithm hybridized with local search for biobjective tsp. In Handbook of Hybrid Evolutionary Algorithms. Springer Berlin Heidelberg.: 361-398.
- Lee, T. O., Kim, Y., and Kim, Y. K. (2001). Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. Computers & Industrial Engineering. 40: 273-292.
- Liao, C. J., Tseng, C. T., and Luarn, P. (2007). A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems. Computers & Operations Research. 34: 3099-3111.

- Lusa, A. (2008). A survey of the literature on the multiple or parallel assembly line balancing problem. European Journal of Industrial Engineering. 2: 50-72.
- Ma, H. (2010). An analysis of the equilibrium of migration models for biogeography-based optimization. Information Sciences. 180: 3444-3464.
- McMullen, P. R., and Frazier, G. V. (1998). Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. International Journal of Production Research. 36: 2717-2741.
- Miltenburg, G. J., and Wijngaard, J. (1994). The U-line line balancing problem. Management Science. 40: 1378-1388.
- Özcan, U., ÇERÇİOĞLU, H., Gökçen, H., and Toklu, B. (2010). A tabu search algorithm for the parallel assembly line balancing problem. Journal of Science. 22: 313-323.
- Rosenberg, O., and Ziegler, H. (1992). A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. Zeitschrift für Operations Research. 36.6: 477-495.
- Scholl, A., and 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., and 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. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on. 12: 702-713.
- Süer, G. A. (1998). Designing parallel assembly lines. Computers & industrial engineering. 35: 467-470.
- Süer, G. A., and Dagli, C. H. (1994). A knowledge-based system for selection of resource allocation rules and algorithms. In Handbook of Expert Systems



Applications in Manufacturing Structures and Rules. Springer Netherlands: 108-129.

Wee, T. S., and Magazine, M. J. (1981). An efficient branch and bound algorithm for an assembly line balancing problem. Part II: maximize the production rate. University of Waterloo, Waterloo.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลพื้นฐานของปัญหาที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม

ปัญหาการจัดสมดุสสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์ผสมที่นำมาใช้ในการทดลองอัลกอริทึมมีข้อมูลพื้นฐานดังตารางที่ ก.1

ตาราง ก.1 ข้อมูลพื้นฐานของปัญหาที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม

ปัญหา	ที่มา	จำนวนชิ้นงาน		จำนวนรุ่นสินค้า (อัตราส่วนการผลิต)		รอบเวลาการผลิต	ลำดับก่อนหลัง ของชิ้นงาน	เวลาชิ้นงาน
		Line 1	Line 2	Line 1	Line 2			
1	Rosenberg และ Ziegler (1992)	25	24	2 (1:1)	2 (2:3)	14, 22, 30	ดูตารางที่ ก.2	ดูตารางที่ ก.3
2	Hahn (1972)	53	51	2 (1:2)	2 (1:2)	2338, 3507, 4676	ดูตารางที่ ก.4	ดูตารางที่ ก.5
3	Wee และ Magazine (1981)	75	71	4 (1:2:2:3)	4 (1:1:2:4)	29, 34, 43	ดูตารางที่ ก.6	ดูตารางที่ ก.7
4	Arcus (1965)	111	107	3 (1:1:1)	3 (1:1:3)	5785, 6540, 7162	ดูตารางที่ ก.8	ดูตารางที่ ก.9

ตาราง ก.2 ลำดับก่อนหลังของชิ้นงานในปัญหาขนาด 25-24 ชิ้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชิ้นงานก่อนหน้า	ชิ้นงานตามหลัง	ชิ้นงานก่อนหน้า	ชิ้นงานตามหลัง
1	3	1	3
2	3	2	3
3	4	3	4
4	5	4	5
4	8	4	8
5	6	5	6
6	7	6	7
6	10	6	10

ตาราง ก.2 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 25-24 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
7	11	7	11
7	12	7	12
8	9	8	9
8	11	8	11
9	13	9	13
9	10	9	10
11	13	11	13
12	15	12	15
13	14	13	14
14	16	14	16
14	19	14	19
14	20	14	20
15	17	15	17
15	22	15	22
16	18	16	18
17	18	17	18
17	23	17	23
18	25	19	22
19	22	20	21
20	21	21	22
20	25	21	24
21	22	-	-
21	24	-	-
23	25	-	-

ตาราง ก.3 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 25-24 ชั้นงาน

ชั้นงาน	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 2:3)		
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาชั้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาชั้นงานรวม
1	0	8	4	7	2	4
2	6	0	3	0	5	3
3	9	9	9	6	11	9
4	4	6	5	8	3	5
5	11	7	9	6	11	9
6	4	4	4	10	0	4
7	6	10	8	5	10	8
8	10	4	7	7	7	7
9	3	7	5	2	7	5
10	0	2	1	1	1	1
11	4	2	3	0	5	3
12	2	0	1	1	1	1
13	5	5	5	5	5	5
14	2	4	3	6	1	3
15	3	7	5	8	3	5
16	0	6	3	0	5	3
17	13	13	13	13	13	13
18	7	3	5	2	7	5
19	0	4	2	5	0	2
20	6	0	3	3	3	3
21	5	9	7	10	5	7
22	3	7	5	8	3	5
23	6	0	3	0	5	3
24	8	8	8	11	6	8
25	4	4	4	-	-	-

ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 53-51 ชั้นงาน

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
1	3	1	3
1	4	1	4
1	5	1	5
1	6	1	6
1	7	1	7
2	36	2	36
3	36	3	36
4	9	4	9
5	9	5	9
6	9	6	9
7	9	7	9
8	9	8	9
9	10	9	10
10	11	10	11
11	12	11	12
12	13	12	13
12	14	12	14
12	15	12	15
13	16	13	16
13	17	13	17
13	18	13	18
14	22	14	22
15	16	15	16
15	17	15	17
16	29	16	29
16	30	16	30

ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 53-51 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
16	31	16	31
17	19	17	19
18	42	18	42
19	20	19	20
19	21	19	21
19	22	19	22
20	23	20	23
21	24	21	24
22	25	22	25
23	36	23	36
24	36	24	36
25	26	25	26
26	27	26	27
27	28	27	28
28	29	28	29
28	30	28	30
28	31	28	31
28	32	28	32
28	33	28	33
28	34	28	34
29	35	29	35
30	35	30	35
31	35	31	35
32	35	32	35
33	35	33	35
34	35	34	35
35	36	35	36
36	37	36	37

ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 53-51 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
37	38	37	38
37	39	37	39
37	40	37	40
38	41	38	41
39	41	39	41
40	41	40	41
41	42	41	42
42	43	42	43
42	44	42	44
42	45	42	45
42	46	42	46
42	47	42	47
43	48	43	48
44	49	44	49
45	51	45	51
45	52	46	50
46	50	47	51
47	51	48	51
47	52	49	51
48	51	50	51
48	52	-	-
49	51	-	-
49	52	-	-
50	51	-	-
50	52	-	-
51	53	-	-
52	53	-	-



ตาราง ก.5 เวลาชิ้นงานของปัญหาขนาด 53-51 ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)		
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาชิ้นงานรวม
1	1201	856	971	1045	934	971
2	142	142	142	142	142	142
3	142	142	142	142	142	142
4	142	142	142	142	142	142
5	125	92	103	153	78	103
6	0	144	96	50	119	96
7	21	138	99	135	81	99
8	877	1372	1207	1399	1111	1207
9	358	61	160	230	125	160
10	0	270	180	136	202	180
11	92	77	82	246	0	82
12	142	19	60	22	79	60
13	60	138	112	62	137	112
14	494	383	420	398	431	420
15	1556	1556	1556	1324	1672	1556
16	264	222	236	236	236	236
17	147	315	259	159	309	259
18	283	46	125	163	106	125
19	583	610	601	317	743	601
20	240	0	80	130	55	80
21	0	120	80	130	55	80
22	104	53	70	0	105	70
23	87	90	89	57	105	89
24	149	59	89	87	90	89
25	105	105	105	97	109	105
26	356	317	330	308	341	330

ตาราง ก.5 เวลาชิ้นงานของปัญหาขนาด 53-51 ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)			เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 2 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2)		
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	เวลาชิ้นงานรวม
27	124	136	132	0	198	132
28	31	88	69	151	28	69
29	63	117	99	163	67	99
30	0	105	70	70	70	70
31	0	105	70	70	70	70
32	226	124	158	474	0	158
33	389	92	191	225	174	191
34	108	51	70	210	0	70
35	43	58	53	89	35	53
36	150	0	50	62	44	50
37	87	144	125	175	100	125
38	353	353	353	235	412	353
39	90	60	70	70	70	70
40	84	150	128	122	131	128
41	35	80	65	49	73	65
42	1919	1703	1775	1775	1775	1775
43	91	91	91	109	82	91
44	91	91	91	47	113	91
45	193	73	113	51	144	113
46	337	562	487	383	539	487
47	414	0	138	82	166	138
48	34	103	80	240	0	80
49	76	82	80	240	0	80
50	57	69	65	53	71	65
51	26	47	40	28	46	40
52	690	768	742	-	-	-
53	367	1444	1085	-	-	-

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน

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

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
16	26	16	26
17	30	17	30
18	26	18	26
18	30	18	30
20	27	20	27
21	33	21	33
24	25	24	25
25	28	25	28
25	30	25	30
25	33	25	33
25	34	25	34
26	31	26	31
26	32	26	32
26	41	26	41
27	29	27	29
27	35	27	35
27	36	27	36
31	37	31	37
31	39	31	39
32	44	32	44
32	45	32	45
33	41	33	41
35	38	35	38
35	42	35	42
36	40	36	40
36	43	36	43
39	51	39	51
40	46	40	46

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
42	47	42	47
43	48	43	48
43	50	43	50
46	51	46	51
46	48	46	48
47	49	47	49
47	50	47	50
47	52	47	52
47	53	47	53
49	59	49	59
49	61	49	61
49	62	49	62
50	54	50	54
50	55	50	55
50	60	50	60
50	62	50	62
52	56	52	56
52	57	52	57
53	58	53	58
55	63	55	63
58	65	58	65
59	64	59	64
59	66	59	66
62	67	62	67
66	68	66	68
68	69	68	69
68	70	68	70
68	71	68	71



ตาราง ก.7 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)					เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:2:4)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลา ชั้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลา ชั้นงานรวม
23	18	25	26	24	24	23	25	24	24	24
24	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
25	16	24	15	22	20	17	23	22	19	20
26	26	21	22	24	23	23	23	23	23	23
27	25	25	25	25	25	24	22	25	26	25
28	10	19	19	6	13	4	10	17	14	13
29	6	0	0	6	3	4	0	6	2	3
30	0	20	9	10	11	14	12	9	11	11
31	15	24	21	21	21	23	25	22	19	21
32	23	17	25	23	22	18	24	19	24	22
33	25	19	18	23	21	20	24	16	23	21
34	18	20	23	24	22	17	25	23	22	22
35	25	25	25	25	25	27	21	26	25	25
36	21	0	11	7	8	5	3	6	11	8
37	24	22	21	22	22	25	19	22	22	22
38	26	25	22	24	24	25	17	25	25	24
39	24	25	21	20	22	18	24	23	22	22
40	21	22	14	25	21	14	20	23	22	21
41	2	10	4	6	6	21	9	9	0	6
42	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
43	25	19	22	23	22	15	21	18	26	22
44	0	2	10	8	6	9	13	13	0	6
45	23	21	26	17	21	0	24	24	24	21
46	25	25	25	25	25	23	21	26	26	25
47	17	16	15	3	11	12	14	15	8	11
48	20	23	25	20	22	26	20	23	21	22
49	14	22	25	20	21	23	25	22	19	21
50	25	25	25	25	25	24	22	25	26	25
51	17	22	23	23	22	17	21	21	24	22
52	24	20	20	24	22	23	21	26	20	22
53	22	25	23	22	23	23	23	23	23	23
54	23	21	21	23	22	14	16	23	25	22
55	25	25	22	19	22	20	20	24	22	22
56	25	25	25	25	25	27	23	25	25	25

ตาราง ก.7 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 75-71 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:2:2:3)					เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 4 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:2:4)				
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลา ชั้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	รุ่นที่ 4	เวลา ชั้นงานรวม
57	23	24	19	25	23	23	23	23	23	23
58	16	23	20	22	21	19	21	22	21	21
59	21	23	26	19	22	24	18	27	20	22
60	22	24	23	20	22	21	15	22	24	22
61	23	24	21	21	22	25	23	22	21	22
62	23	24	15	25	22	24	20	20	23	22
63	18	18	21	24	21	20	22	25	19	21
64	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
65	23	20	26	23	23	23	23	23	23	23
66	4	3	3	0	2	0	2	1	3	2
67	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
68	25	25	25	25	25	27	23	27	24	25
69	24	26	25	22	24	20	22	25	25	24
70	15	25	18	25	22	15	23	23	23	22
71	21	26	22	25	24	25	17	27	24	24
72	8	0	0	8	4	-	-	-	-	-
73	21	21	19	25	22	-	-	-	-	-
74	4	13	13	8	10	-	-	-	-	-
75	25	25	25	25	25	-	-	-	-	-



ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน

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

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน (ต่อ)

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

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
28	36	34	42
29	37	35	43
30	38	36	44
31	39	36	91
32	41	37	45
33	111	37	91
34	42	38	46
35	43	38	91
36	44	39	40
36	91	41	69
37	45	41	70
37	91	42	47
38	46	43	48
38	91	43	49
39	40	44	50
40	111	45	51
41	69	46	52
41	70	47	54
42	47	47	55
43	48	47	56
43	49	47	57
44	50	47	58
45	51	47	59
46	52	47	60
47	54	48	53
47	55	49	91
47	56	54	69
47	57	54	70

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
47	58	55	61
47	59	55	62
47	60	55	63
48	53	56	63
49	91	56	64
50	111	57	65
51	111	57	91
52	111	58	66
53	111	58	91
54	69	59	67
54	70	59	91
55	61	60	68
55	62	60	91
55	63	61	69
56	63	61	70
56	64	62	71
57	65	64	72
57	91	69	77
58	66	69	78
58	91	70	73
59	67	71	91
59	91	72	74
60	68	73	75
60	91	74	76
61	69	75	77
61	70	75	78
62	71	75	79
63	111	76	80

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
64	72	76	81
65	111	76	82
66	111	77	83
67	111	78	84
68	111	79	85
69	77	80	86
69	78	80	91
70	73	81	87
71	91	81	91
72	74	83	91
73	75	84	88
74	76	84	89
75	77	84	91
75	78	87	90
75	79	88	105
76	80	89	105
76	81	91	92
76	82	91	93
77	83	91	94
78	84	92	95
79	85	93	95
80	86	94	95
80	91	95	96
81	87	95	97
81	91	95	98
82	111	95	99
83	91	95	100
84	88	95	104

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
84	89	96	101
84	91	97	102
85	111	98	103
86	111	101	105
87	90	102	106
88	105	102	107
89	105	103	107
90	111	-	-
91	92	-	-
91	93	-	-
91	94	-	-
92	95	-	-
93	95	-	-
94	95	-	-
95	96	-	-
95	97	-	-
95	98	-	-
95	99	-	-
95	100	-	-
95	104	-	-
96	101	-	-
97	102	-	-
98	103	-	-
99	111	-	-
100	111	-	-
101	105	-	-
102	106	-	-
102	107	-	-

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานในปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
103	107	-	-
103	108	-	-
104	111	-	-
105	111	-	-
106	109	-	-
107	111	-	-
108	110	-	-
109	111	-	-
110	111	-	-

ตาราง ก.9 เวลาชั้นงานของปัญหาขนาด 111-107 ชั้นงาน

Task	เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชั้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาชั้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาชั้นงานรวม
1	2411	0	3469	1960	0	1703	2699	1960
2	776	2546	1823	1715	1253	2408	1638	1715
3	0	432	1773	735	1743	1932	0	735
4	2156	2267	722	1715	1502	1025	2016	1715
5	184	826	460	490	350	327	591	490
6	1512	0	2163	1225	1074	521	1510	1225
7	0	89	418	169	0	122	241	169
8	3586	1585	1585	2252	1210	0	3350	2252
9	1459	1108	1108	1225	4028	2097	0	1225
10	1652	3267	2038	2319	2319	2319	2319	2319
11	1309	2788	1048	1715	1732	975	1956	1715
12	1266	654	1020	980	1015	705	1060	980
13	920	574	711	735	583	1343	583	735
14	1637	2414	2792	2281	2281	2281	2281	2281
15	3680	2285	2285	2750	2750	2750	2750	2750
16	21	147	63	77	71	44	90	77

ตาราง ก.9 เวลาชิ้นงานของปัญหาขนาด 111-107 ชิ้นงาน (ต่อ)

Task	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาชิ้นงานรวม
17	132	91	44	89	113	113	73	89
18	21	41	91	51	36	90	43	51
19	770	77	245	364	628	262	310	364
20	347	521	347	405	260	361	468	405
21	1979	4665	2536	3060	3108	4821	2457	3060
22	169	182	24	125	144	103	126	125
23	3585	3902	2800	3429	3444	4923	2926	3429
24	22	85	22	43	31	46	46	43
25	2373	3464	4453	3430	3894	3314	3314	3430
26	2375	1453	2052	1960	2784	1592	1808	1960
27	26	15	46	29	22	63	20	29
28	36	45	0	27	0	0	45	27
29	14	23	8	15	17	7	17	15
30	0	0	363	121	126	128	117	121
31	1366	1240	2539	1715	2276	2048	1417	1715
32	2404	1590	2387	2127	2127	2127	2127	2127
33	1775	1775	860	1470	1491	1839	1340	1470
34	4037	4037	4037	4037	4037	4037	4037	4037
35	76	97	31	68	145	0	65	68
36	71	55	60	62	55	90	55	62
37	62	24	40	42	47	22	47	42
38	410	437	245	364	395	240	395	364
39	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998	4998
40	2184	1287	939	1470	1644	774	1644	1470
41	3816	1443	3630	2963	3369	3046	2800	2963
42	5689	5689	5689	5689	5689	5689	5689	5689
43	87	87	30	68	56	116	56	68
44	19	25	10	18	24	30	12	18
45	3	18	9	10	6	11	11	10
46	59	86	98	81	105	141	53	81
47	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200
48	85	16	16	39	16	53	42	39



ตาราง ก.9 เวลาชิ้นงานของปัญหาขนาด 111-107 ชิ้นงาน (ต่อ)

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

ตาราง ก.9 เวลาชิ้นงานของปัญหาขนาด 111-107 ชิ้นงาน (ต่อ)

Task	เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:1)				เวลาชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 2 (สินค้า 3 รุ่น อัตราส่วนการผลิต 1:1:3)			
	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาชิ้นงานรวม	รุ่นที่ 1	รุ่นที่ 2	รุ่นที่ 3	เวลาชิ้นงานรวม
81	2350	1301	1494	1715	2168	4226	727	1715
82	735	735	735	735	897	495	761	735
83	1441	3183	1256	1960	801	932	2689	1960
84	2889	2889	2889	2889	2889	2889	2889	2889
85	400	488	966	618	752	442	632	618
86	477	570	423	490	624	356	490	490
87	869	231	1105	735	712	542	807	735
88	486	199	785	490	934	160	452	490
89	841	815	1107	921	1600	557	816	921
90	156	156	666	326	422	422	262	326
91	5390	5390	5390	5390	5390	5390	5390	5390
92	219	256	254	243	0	1215	0	243
93	0	0	1113	371	185	251	473	371
94	38	61	75	58	39	83	56	58
95	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059	5059
96	1194	1460	1021	1225	1591	1624	970	1225
97	2307	0	0	769	3845	0	0	769
98	926	1378	0	768	1302	2538	0	768
99	985	2485	1540	1670	584	2285	1827	1670
100	1058	2894	1058	1670	1548	361	2147	1670
101	235	428	807	490	389	123	646	490
102	182	83	341	202	149	192	223	202
103	236	236	137	203	48	214	251	203
104	150	228	228	202	162	212	212	202
105	2561	2664	3007	2744	2744	2744	2744	2744
106	186	214	86	162	36	231	181	162
107	267	438	267	324	266	217	379	324
108	125	186	175	162	-	-	-	-
109	128	173	62	121	-	-	-	-
110	217	217	52	162	-	-	-	-
111	34	91	148	91	-	-	-	-

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐชัย โยธาบริบาล เกิดเมื่อวันที่ 24 ธันวาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) เกียรตินิยมอันดับ 2 จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าร่วมงานกับบริษัท โซนี่ ดีไวซ์ เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดปทุมธานี ในตำแหน่งหัวหน้างานฝ่ายผลิตจนถึงปี พ.ศ. 2553 รวมเป็นระยะเวลา 2 ปี และหลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY