

การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตฤประสงค์สำหรับการจัดสมตุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู



นางสาวสุชานันท์ ตันชนะประดิษฐ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF MULTI-
OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM BASED ON DECOMPOSITION FOR DOUBLE U-
SHAPED ASSEMBLY LINE BALANCING

Miss Suchanun Tanchanapradit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตฤประสงค์
สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

โดย

นางสาวสุชานันท์ ต้นชนะประดิษฐ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นระเกณท์ พุ่มชูศรี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธิวัตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สุชานันท์ ต้นชนะประดิษฐ์ : การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมาควัดฤประสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู (APPLICATION OF MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM BASED ON DECOMPOSITION FOR DOUBLE U-SHAPED ASSEMBLY LINE BALANCING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ปารเมศ ชูติมา, หน้า.

สายการประกอบรูปตัวยูเป็นส่วนที่สำคัญซึ่งถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบผลิตแบบทันเวลาพอดีในงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัญหาการจัดสมดุลของคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม โดยสายการประกอบรูปตัวยูสองสายถูกจัดวางในลักษณะขนานแบบประชิดกัน

ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในงานวิจัยนี้อยู่ในรูปแบบปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมาควัดฤประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ที่ต้องทำการหาค่าที่ดีที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความไม่สัมพันธ์ของชั้นงานน้อยที่สุด ความไม่สมดุลของภาระงานระหว่างสถานีน้อยที่สุด และความไม่สมดุลของภาระงานภายในสถานีน้อยที่สุด เนื่องจากปัญหาการจัดสมดุลเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) จึงใช้วิธีการทางฮิวริสติกในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Particle Swarm Optimization based on decomposition: MOPSO/D) และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับอัลกอริทึมที่สามารถแก้ปัญหามultiple วัตถุประสงค์ได้ดี ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm: MOPSO)

จากผลการทดลองพบว่า MOPSO/D มีสมรรถนะในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย และด้านอัตราส่วนที่ไม่ถูกรอบงำที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นสำหรับด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ MOPSO มีสมรรถนะที่ดีที่สุด

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5970340021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

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

SUCHANUN TANCHANAPRADIT: APPLICATION OF MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM BASED ON DECOMPOSITION FOR DOUBLE U-SHAPED ASSEMBLY LINE BALANCING. ADVISOR: PROF.PARAMES CHUTIMA, Ph.D., pp.

U-shaped production lines are important parts used in just-in-time production systems. Mixed Model Double-U shaped line balancing problem is studied in this research which two U-shaped lines are placed adjacently in parallel.

Double-U shaped balancing problem were considered five objectives including minimize the number of workstations, minimize the minimum number of workstations, minimum number of station, minimum work unrelatedness, minimum different workload between workstation and minimum different workload within workstation. According to the balancing problem is NP-Hard, Heuristic were used to find optimal solution. This research applied Multi-Objective Particle Swarm Optimization based on decomposition (MOPSO/D). The performance of MOPSO/D is compared with the algorithm that could solve multi-objective problem well which are Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition (MOEAD) and Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm (MOPSO)

The experiment results show that MOPSO/D performs better than the other algorithms in terms of convergence, diversity and convergence and ratio of non-dominated solutions. However, MOPSO achieved the best performance for spread among the two algorithms.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้มอบความรู้และคำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดการดำเนินงานวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วง ขอขอบคุณ นายตรัยรัตน์ เกิดโภคทรัพย์ สำหรับความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณ คุณเพ็ญนภัส จิรชัย และ นายชินวิชญ์ สิทธิเดชากุล ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้มอบกำลังใจ และการสนับสนุนในทุกด้าน



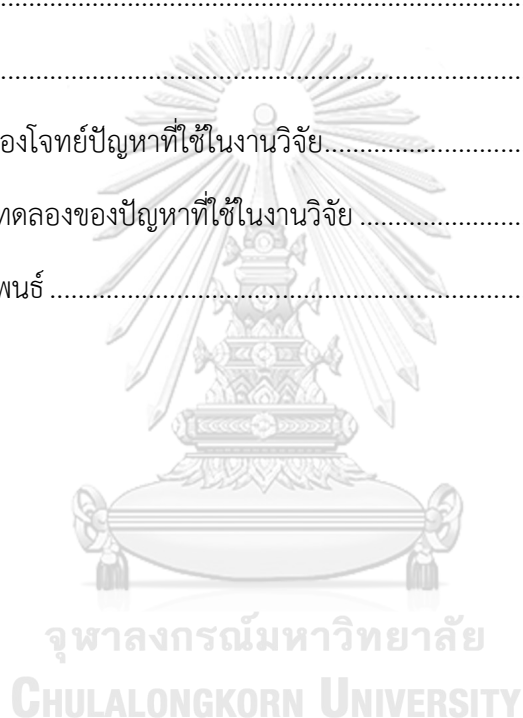
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฬ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	8
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ลักษณะของสายการประกอบ.....	9
2.1.1 สายการประกอบแบบเส้นตรง.....	9
2.1.2 สายการประกอบแบบขนาน.....	10
2.1.3 สายการประกอบรูปตัวยู.....	10
2.1.4 สายการประกอบรูปตัวยูขนาน.....	11
2.1.5 รูปแบบการจัดวางคู่ของสายการประกอบรูปตัวยู.....	12
2.2 ประเภทของจำนวนรูปแบบผลิตภัณฑ์บนสายงานการประกอบ.....	12
2.3 หลักการจัดสมดุลสายการประกอบ.....	13
2.4 ประเภทของวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ.....	14

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)	15
2.6 การแก้ปัญหาการจัดสมมูลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม	19
2.6.1. การคำนวณรอบเวลาการผลิตร่วม	20
2.6.2. การสร้างแผนภาพลำดับความสำคัญก่อนหลังร่วม และการคำนวณเวลาชิ้นงาน ร่วมบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม	22
2.6.3. การจัดสรรชิ้นงานภายในสถานีงานโดยการพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีงาน....	25
2.6.4. การถอดรหัสสตริงคำตอบ	29
2.6.5. ตัวอย่างการถอดรหัสสตริงคำตอบ	32
2.6.6. การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์	38
2.7 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ	61
2.8 วิธีการจำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach).....	61
2.9 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม	62
2.9.1 ตัวชี้วัดการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต	63
2.9.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics).....	64
2.9.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics)	64
2.9.4 ตัวชี้วัดอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions)	66
2.9.5 ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)	67
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	68
บทที่ 3 การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคในการแก้ปัญหาการจัดสมมูล คู่สายการประกอบรูปตัวยู	73
3.1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค	73

3.2 ขั้นตอนการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	74
3.3 ตัวอย่างการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (MOPSO) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	76
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	92
4.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก	92
4.2 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	96
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคร่วมกับวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบ	113
5.1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค	113
5.2 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนก (MOPSO/D) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	115
5.3 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	120
บทที่ 6 การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู	141
6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง	141
6.2 วิธีการทดลองของงานวิจัย	143
6.3 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม	144
6.3.1 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D	144
6.3.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOPSO	145

6.4 การทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม	146
6.5 ผลการทดลองแก้ปัญหาดังกล่าว	155
6.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง	159
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	164
7.1 บทสรุปงานวิจัย	164
7.2 ข้อเสนอแนะ	166
รายการอ้างอิง	167
ภาคผนวก ก ข้อมูลของโจทย์ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย.....	172
ภาคผนวก ข ผลการทดลองของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย	213
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	238



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง	6
ตารางที่ 2.1 เวลาชิ้นงานที่ปรับตามรอบเวลาการผลิตร่วมของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1.....	21
ตารางที่ 2.2 เวลาชิ้นงานที่ถูกปรับตามรอบเวลาการผลิตร่วมของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2.....	21
ตารางที่ 2.3 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1	24
ตารางที่ 2.4 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2	25
ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสตริงคำตอบของการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบผลิตภัณฑ์ผสม.....	29
ตารางที่ 2.6 สตริงคำตอบที่ใช้ในการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบผลิตภัณฑ์ผสม	33
ตารางที่ 2.7 รายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 1	33
ตารางที่ 2.8 รายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 2.....	34
ตารางที่ 2.9 รายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 3.....	35
ตารางที่ 2.10 รายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 4.....	36
ตารางที่ 2.11 กระบวนการจัดสรรชิ้นงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู.....	37
ตารางที่ 2.12 ตารางแสดงชิ้นงานในสถานีงานและประเภทของสถานีงาน	38
ตารางที่ 2.13 เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1 ที่รอบเวลาการผลิตร่วม 30 หน่วยเวลา	41
ตารางที่ 2.14 เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 ที่รอบเวลาการผลิตร่วม 30 หน่วยเวลา	41
ตารางที่ 2.15 ตารางแสดงชิ้นงานในสถานีงานและประเภทของสถานีงาน	44
ตารางที่ 2.16 เวลาในการปฏิบัติงานของสถานีงานทั้งหมดบนคู่สายการประกอบรูปตัว	45
ตารางที่ 2.17 ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของเวลาในการปฏิบัติงานของสถานีงานทั้งหมดบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู	Error! Bookmark not defined.

ตารางที่ 2.18	ผลลัพธ์การคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม	45
ตารางที่ 2.19	ค่า เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ ภายในสถานีนงาน.....	50
ตารางที่ 2.20	ค่าความเบี่ยงเบนของสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์	50
ตารางที่ 2.21	ค่าเวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ ภายในสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 2.....	51
ตารางที่ 2.22	ค่าความเบี่ยงเบนของสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์บนสายการ ประกอบที่ 2.....	51
ตารางที่ 2.23	ค่า เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ ภายในสถานีนงาน.....	53
ตารางที่ 2.24	ค่าความเบี่ยงเบนของสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์	53
ตารางที่ 2.25	เวลาในการปฏิบัติงานในสถานีนงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู	54
ตารางที่ 2.26	เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ในสถานีนงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู.....	55
ตารางที่ 2.27	เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ตามสัดส่วนการผลิต	55
ตารางที่ 2.28	สัดส่วนเวลาว่างงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ในสถานีนงานบนคู่สายการประกอบรูปตัว ยู	55
ตารางที่ 2.29	สัดส่วนเวลาว่างงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ในสถานีนงานบนคู่สายการประกอบรูปตัว ยู	56
ตารางที่ 2.30	ผลลัพธ์การจัดสมดุลของคู่สายการประกอบรูปตัวยู	56
ตารางที่ 2.31	การหาความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกัน.....	58
ตารางที่ 3.1	เวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคในรอบที่ 1	78
ตารางที่ 3.2	เวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นของแต่ละอนุภาคในรอบที่ 1	79
ตารางที่ 3.3	ตัวอย่างการเรียงลำดับค่าในพิกัดของเวกเตอร์ตามค่าที่ได้จากการสุ่ม	79
ตารางที่ 3.4	ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานของประชากรคำตอบเริ่มต้น	80
ตารางที่ 3.5	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น	80

ตารางที่ 3.6	การกำหนดคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Pbest) ในรอบที่ 1	81
ตารางที่ 3.7	การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Gbest) ในรอบที่ 1	82
ตารางที่ 3.8	เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Pbest) ในรอบที่ 1	82
ตารางที่ 3.9	เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ในรอบที่ 1	83
ตารางที่ 3.10	ประชากรคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นในรอบที่ 1 (Fitness1)	83
ตารางที่ 3.11	เวกเตอร์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับรอบที่ 2	84
ตารางที่ 3.12	เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบที่ 2	84
ตารางที่ 3.13	ตำแหน่งของอนุภาคเริ่มต้นในรอบที่ 2	85
ตารางที่ 3.14	ความเร็วในการเคลื่อนที่เริ่มต้นของอนุภาคในรอบที่ 2	85
ตารางที่ 3.15	ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานของประชากรคำตอบเริ่มต้น ในรอบที่ 2	86
ตารางที่ 3.16	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในรอบที่ 2	86
ตารางที่ 3.17	การกำหนดตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของอนุภาค (Pbest) ในรอบที่ 2	87
ตารางที่ 3.18	เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค ในรอบที่ 2	87
ตารางที่ 3.19	ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานเวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของอนุภาคใน รอบที่ 2	88
ตารางที่ 3.20	การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Gbest) ในรอบที่ 2	89
ตารางที่ 3.21	เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ในรอบที่ 2	89
ตารางที่ 3.22	ประชากรคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นในรอบที่ 1 (Fitness1)	89
ตารางที่ 3.23	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับใช้ในรอบที่ 3	90
ตารางที่ 3.24	ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับใช้ในรอบที่ 3	91
ตารางที่ 4.1	ค่าน้ำหนักของประชากร	97
ตารางที่ 4.2	ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร	99
ตารางที่ 4.3	ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ i กับประชากร j	99
ตารางที่ 4.4	ตารางแสดงชั้นงานและค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้น	99

ตารางที่ 4.5	ตารางค่าสิทธิ (priority) ในการเลือกงานของประชากรเริ่มต้น.....	100
ตารางที่ 4.6	การเรียงลำดับค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร.....	101
ตารางที่ 4.7	ประชากรข้างเคียง (Neighborhood).....	101
ตารางที่ 4.8	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น.....	105
ตารางที่ 4.9	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลดโมดูลไอซีในรอบการพิจารณาปัญหาย่อยที่ 1.....	106
ตารางที่ 4.10	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของสตริงข้างเคียง String 1.....	107
ตารางที่ 4.11	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟเดิมที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 1.....	108
ตารางที่ 4.12	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 1 ที่เกิดจากการ แทนค่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2.....	108
ตารางที่ 4.13	สตริงคำตอบใหม่ของ String 1 ที่เกิดจากการแทนที่โดย Offspring 3.....	109
ตารางที่ 4.14	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟเดิมที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 2.....	110
ตารางที่ 4.15	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 2 ที่เกิดจากการ แทนค่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2.....	110
ตารางที่ 4.16	ปัญหาข้างเคียงที่ถูกกำหนดให้พิจารณาสำหรับการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ของ Offspring 1-2 ในครั้งแรก.....	110
ตารางที่ 4.17	การสุ่มปัญหาข้างเคียงสำหรับการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Offspring 1-2.....	111
ตารางที่ 4.18	สตริงคำตอบหลังจากการแทนที่คำตอบในรอบการพิจารณาปัญหาย่อยที่ 1.....	111
ตารางที่ 4.19	การกำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ.....	112
ตารางที่ 4.20	การเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Fitness =1) ในเซตประชากรคำตอบภายนอก... ..	112
ตารางที่ 5.1	ค่าน้ำหนักของประชากร.....	121
ตารางที่ 5.2	ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร.....	123
ตารางที่ 5.3	ค่าระยะห่างระหว่างจุด d_{ij} ของประชากรตัวที่ i กับประชากร j	123
ตารางที่ 5.4	การเรียงลำดับค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร.....	124
ตารางที่ 5.5	ประชากรข้างเคียง (Neighborhood).....	124
ตารางที่ 5.6	เวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น.....	125

ตารางที่ 5.7	เวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้น	125
ตารางที่ 5.8	ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานของประชากรคำตอบเริ่มต้น	126
ตารางที่ 5.9	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น	126
ตารางที่ 5.10	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดของประชากรคำตอบเริ่มต้น	127
ตารางที่ 5.11	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดของประชากรคำตอบเริ่มต้น	127
ตารางที่ 5.12	ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวและตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของอนุภาคเริ่มต้น	127
ตารางที่ 5.13	สตริงคำตอบของเซตประชากรคำตอบภายนอก	128
ตารางที่ 5.14	ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานที่ได้จากการปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคที่ 1 ..	129
ตารางที่ 5.15	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคที่ถูกปรับปรุงในรอบที่ 1	129
ตารางที่ 5.16	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลังจากปรับปรุงคำตอบของอนุภาคที่ 1	130
ตารางที่ 5.17	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด หลังจากปรับปรุงคำตอบของอนุภาคที่ 1	130
ตารางที่ 5.18	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดหลังจากปรับปรุงคำตอบของอนุภาคที่ 1	130
ตารางที่ 5.19	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ของ X_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์	131
ตารางที่ 5.20	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ P_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์	131
ตารางที่ 5.21	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ G_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์	131
ตารางที่ 5.22	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)	134
ตารางที่ 5.23	สรุปการปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ของประชากรที่พิจารณา	134
ตารางที่ 5.24	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)	135
ตารางที่ 5.25	สรุปการปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ของประชากรที่พิจารณา	135
ตารางที่ 5.26	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)	136
ตารางที่ 5.27	สรุปการปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ของประชากรที่พิจารณา	137
ตารางที่ 5.28	ประชากรข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อยที่ 1	137

ตารางที่ 5.29 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล ของประชากรที่ถูกสุ่มเลือก ครั้งที่ 1	139
ตารางที่ 5.30 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคของประชากร ข้างเคียงที่ถูกสุ่มได้ในรอบที่ 1	139
ตารางที่ 5.31 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่โดยใช้ค่าน้ำหนัก ของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มได้ในรอบที่ 1.....	139
ตารางที่ 5.32 การปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดสากล (Gbest) ของประชากรที่ถูกสุ่มเลือก ครั้งที่1.....	139
ตารางที่ 5.33 สรุปการแทนที่สตริงคำตอบของประชากรข้างเคียงของประชากรตัวที่ 1	140
ตารางที่ 6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	142
ตารางที่ 6.2 จำนวนเงินเนอเรนซ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	143
ตารางที่ 6.3 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D	147
ตารางที่ 6.4 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOPSO และ MOPSO/D.....	148
ตารางที่ 6.5 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D.....	148
ตารางที่ 6.6 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOEA/D.....	150
ตารางที่ 6.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOPSO	150
ตารางที่ 6.8 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO.....	152
ตารางที่ 6.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOPSO/D.....	152
ตารางที่ 6.10 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO/D	153
ตารางที่ 6.11 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOEA/D	154
ตารางที่ 6.12 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO.....	154
ตารางที่ 6.13 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO/D	155
ตารางที่ 6.14 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วย เวลา.....	156

ตารางที่ 6.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา.....	156
ตารางที่ 6.16 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา.....	157
ตารางที่ 6.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา.....	157
ตารางที่ 6.18 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา.....	158
ตารางที่ 6.19 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา.....	158
ตารางที่ 6.20 จำนวนสถานีงานและจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ในปัญหาทดลอง 1-6.....	160
ตารางที่ 6.21 จำนวนสถานีงานและจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ในปัญหาทดลอง 7-12.....	161
ตารางที่ 6.22 ค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมหาในปัญหาทดลอง 1-6.....	162
ตารางที่ 6.23 ค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมหาในปัญหาทดลอง 7-12.....	163
ตาราง ก.1 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) และ ขนาด 21 ชั้นงาน และ ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson ขนาด 11 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	172
ตาราง ก.2 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson (1957) ขนาด 11 ชั้นงาน และ ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	173
ตาราง ก.3 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) ขนาด 21 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	174
ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	176
ตาราง ก.5 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	177

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Gunther ขนาด 35 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Sawyer ขนาด 30 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	178
ตาราง ก.7 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	180
ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	182
ตาราง ก.9 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2.....	185
ตาราง ก.10 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Wee-mag ขนาด 75 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2	186
ตาราง ก.11 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S1 ขนาด 32 (21-11) ชั้นงาน.....	190
ตาราง ก.12 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S2 ขนาด 36 (11-25) ชั้นงาน.....	191
ตาราง ก.13 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S3 ขนาด 46 (21-25) ชั้นงาน.....	192
ตาราง ก.14 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S4 ขนาด 50 (25-25) ชั้นงาน.....	193
ตาราง ก.15 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S5 ขนาด 56 (28-28) ชั้นงาน	194
ตาราง ก.16 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S6 ขนาด 65 (35-30) ชั้นงาน.....	195
ตาราง ก.17 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S7 ขนาด 73 (45-28) ชั้นงาน.....	196
ตาราง ก.18 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S8 ขนาด 90 (45-45) ชั้นงาน.....	198
ตาราง ก.19 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S9 ขนาด 115 (45-70) ชั้นงาน.....	200
ตาราง ก.20 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S10 ขนาด 140 (70-70) ชั้นงาน	203
ตาราง ก.21 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S11 ขนาด 145 (70-75) ชั้นงาน	206
ตาราง ก.22 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S12 ขนาด 166 (83-83) ชั้นงาน	209
ตาราง ข.1 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา	213
ตาราง ข.2 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา.....	213

ตาราง ข. 29 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 648 หน่วยเวลา.....	222
ตาราง ข.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 648 หน่วยเวลา	223
ตาราง ข.31 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 41 หน่วยเวลา.....	223
ตาราง ข.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 41 หน่วยเวลา	223
ตาราง ข.33 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 54 หน่วยเวลา.....	224
ตาราง ข.34 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 54 หน่วยเวลา	224
ตาราง ข. 35 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 81 หน่วยเวลา.....	224
ตาราง ข.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลา การผลิต 81 หน่วยเวลา	225
ตาราง ข.37 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 10902 หน่วยเวลา.....	225
ตาราง ข.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 10902 หน่วยเวลา.....	225
ตาราง ข.39 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 4510 หน่วยเวลา.....	226
ตาราง ข.40 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4510 หน่วยเวลา.....	226
ตาราง ข.41 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 11880 หน่วยเวลา.....	226

ตาราง ข.42 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 11880 หน่วยเวลา.....	227
ตาราง ข.43 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 4503 หน่วยเวลา.....	227
ตาราง ข.44 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบ เวลาการผลิต 4503 หน่วยเวลา.....	227
ตาราง ข.45 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 5060 หน่วยเวลา.....	228
ตาราง ข.46 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5060 หน่วยเวลา.....	228
ตาราง ข.47 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 110 หน่วยเวลา.....	228
ตาราง ข.48 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 110 หน่วยเวลา.....	229
ตาราง ข.49 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 32390 หน่วยเวลา.....	229
ตาราง ข.50 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 32390 หน่วยเวลา.....	229
ตาราง ข.51 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 25740 หน่วยเวลา.....	230
ตาราง ข.52 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 25740 หน่วยเวลา.....	230
ตาราง ข.53 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 57970 หน่วยเวลา.....	230
ตาราง ข.54 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 57970 หน่วยเวลา.....	231

ตาราง ข.68 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6842 หน่วยเวลา ปัญหาสุดท้าย.....	235
ตาราง ข.69 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 7571 หน่วยเวลา.....	236
ตาราง ข.70 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 7571 หน่วยเวลา.....	236
ตาราง ข.71 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้น งาน รอบเวลาการผลิต 6309 หน่วยเวลา.....	236
ตาราง ข.72 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6309 หน่วยเวลา.....	237



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	ลักษณะการจัดวางของสายการประกอบรูปตัวยูสองสาย	7
รูปที่ 2.1	สายการประกอบแบบเส้นตรง.....	9
รูปที่ 2.2	สายการประกอบแบบขนาน	10
รูปที่ 2.3	สายการประกอบรูปตัวยู.....	11
รูปที่ 2.4	สายการประกอบรูปตัวยูขนาน.....	11
รูปที่ 2.5	คู่สายการประกอบรูปตัวยู.....	12
รูปที่ 2.6	สายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Lines)	13
รูปที่ 2.7	สายงานการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Lines).....	13
รูปที่ 2.8	สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Lines)	13
รูปที่ 2.9	รูปคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Goldberg, 1989).....	16
รูปที่ 2.10	คู่สายการประกอบรูปตัวยู	19
รูปที่ 2.11	แผนภาพลำดับก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1 (Jaeschke 9-tasks).....	23
รูปที่ 2.12	แผนภาพลำดับก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 (Mertens 7-tasks).....	24
รูปที่ 2.13	ตำแหน่งและด้านของคู่สายการประกอบรูปตัวยู.....	26
รูปที่ 2.14	รูปแบบการจัดสรรชิ้นงานภายในสถานีงานที่เป็นไปได้.....	27
รูปที่ 2.15	รูปแบบการจัดสรรชิ้นงานภายในสถานีงานที่เป็นไปได้.....	28
รูปที่ 2.16	ขั้นตอนการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน	31
รูปที่ 2.17	แผนภาพความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A	32
รูปที่ 2.18	แผนภาพความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ B	32
รูปที่ 2.19	แผนภาพความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่ถูกปรับปรุงหลังจากรอบที่ 1.....	33

รูปที่ 2.20 ตำแหน่งชั้นงานถัดไปที่สามารถเลือกได้ในรอบที่ 2.....	34
รูปที่ 2.21 แผนภาพความสัมพันธ์ชั้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่ถูกปรับปรุงหลังจากรอบที่ 2.....	35
รูปที่ 2.22 ตำแหน่งชั้นงานถัดไปที่สามารถเลือกได้ในรอบที่ 3.....	35
รูปที่ 2.23 แผนภาพความสัมพันธ์ชั้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่ได้จากการปรับปรุงหลังจากรอบที่ 3	36
รูปที่ 2.24 คู่สายการประกอบรูปตัวยูที่ได้จากการถอดรหัสสตริงคำตอบตัวอย่าง.....	38
รูปที่ 2.25 แผนภาพความสัมพันธ์ของชั้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ B.....	57
รูปที่ 2.26 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีนงานปกติทั้งหมดและมีสถานีนงานร่วม	59
รูปที่ 2.27 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีนงานปกติทั้งหมดและมีสถานีนงานร่วม	59
รูปที่ 2.28 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีนงานปกติทั้งหมดและมีสถานีนงานร่วม	60
รูปที่ 2.29 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูของตัวอย่างคำตอบ	60
รูปที่ 2.30 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว (Deb et al., 2002)	65
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOPSO.....	76
รูปที่ 3.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมและเวลาชั้นงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1....	77
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D	95
รูปที่ 4.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมและเวลาชั้นงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1.....	96
รูปที่ 4.3 การสลับตำแหน่งค่าสิทธิในการเลือกงาน	100

รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการครอสโอเวอร์ที่ได้จากการสุ่มสำหรับวิธี Partial-Mapped Crossover.....	102
รูปที่ 4.5 การสลับส่วนของสตริงสำหรับวิธี Partial-Mapped Crossover	102
รูปที่ 4.6 การหาตำแหน่งสำหรับซ่อมแซมคำตอบของ Offspring2 (สำหรับค่าสัทธิเท่ากับ 15)....	103
รูปที่ 4.7 การแทนค่าสัทธิที่ขาดหายไป ใน Offspring 2 (สำหรับค่าสัทธิเท่ากับ 15).....	103
รูปที่ 4.8 การหาตำแหน่งสำหรับซ่อมแซมคำตอบของ Offspring2 (สำหรับค่าสัทธิเท่ากับ 11)....	103
รูปที่ 4.9 การแทนค่าสัทธิที่ขาดหายไป ใน Offspring 2 (สำหรับค่าสัทธิเท่ากับ 11).....	104
รูปที่ 4.10 คำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solution) หลังจากการปรับปรุง.....	104
รูปที่ 4.11 สตริงคำตอบรุ่นลูกของปัญหาย่อยที่1.....	104
รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOPSO/D	114
รูปที่ 5.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมและเวลาขึ้นงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1..	120
รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้การดูเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปร ตอบสนอง	149
รูปที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การดูเข้าและความหลากหลายเป็นตัวแปร ตอบสนอง	149
รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้การดูเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปร ตอบสนอง	151
รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การดูเข้าและความหลากหลายเป็นตัวแปร ตอบสนอง	151
รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้การดูเข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปร ตอบสนอง	153

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาและการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบมาทิวตฤประสงค์สำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีมาทิวตฤประสงค์ซึ่งเป็นปัญหาที่มีมากกว่า 3 วัตฤประสงค์ขึ้นไป ของคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่เป็นแบบผลิตภัณฑผสม รวมถึงรายละเอียดของวัตฤประสงค์ และขอบเขตปัญหา

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบการผลิตเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าที่มีความหลากหลายมากขึ้น การปรับปรุงสายการผลิตและการใช้ทรัพยากรสำหรับการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ สายการประกอบแบบผลิตภัณฑผสม (mixed-model assembly line) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยให้สามารถรองรับการผลิตตามความต้องการของลูกค้าที่มีความไม่แน่นอนได้ โดยผลิตสินค้าที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมากกว่า 1 ชนิดบนสายการประกอบเดียวกัน ทำให้ในระหว่างการผลิตจะไม่มีเวลาปรับตั้งเครื่องจักร ผลิตภัณฑหลายชนิดสามารถทำการประกอบพร้อมกันตามลำดับที่เข้าสู่สายการประกอบ จึงมีข้อดีคือ ผลิตได้หลากหลายผลิตภัณฑและเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับสายการผลิต

รูปแบบสายการประกอบสามารถแบ่งตามรูปแบบการจัดวางได้หลายประเภท เช่น สายการประกอบเส้นตรง สายการประกอบแบบขนาน สายการประกอบรูปตัวยู และสายการประกอบสองด้าน (SAIF et al 2014) สายการประกอบเป็นระบบผลิตที่ขึ้นส่วนถูกนำมาประกอบต่อเนื่องกันตามลำดับบนสถานีงานที่มีการเชื่อมโยงกันด้วยสายพานลำเลียงหรือระบบขนถ่ายวัสดุอื่น ทิศทางการไหลของงานเป็นทิศทางเดียวกันจนกระทั่งประกอบเป็นผลิตภัณฑและออกจากสายการประกอบ ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นชิ้นงานย่อยและจัดลงในแต่ละสถานีงานซึ่งมีเวลาดำเนินงานจำกัด เรียกว่ารอบเวลาการผลิต (Cycle time) ชิ้นงานที่ประกอบเสร็จในแต่ละรอบเวลาการผลิตจะถูกส่งไปที่สถานีงานถัดไป

ในกรณีที่โรงงานต้องการผลิตให้ทันตามความต้องการของลูกค้า สายการประกอบแบบขนานสามารถนำมาใช้เพิ่มกำลังการผลิตของโรงงาน สายการประกอบแบบขนานประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้นวางขนานกัน และมีพนักงานอยู่ระหว่างสายการประกอบ จากงานวิจัยของ Gökçen et al (2006) พบว่าการจัดสมดุลสายการประกอบเส้นตรงทั้งสองสายที่ขนานกันส่งผลให้เกิดสถานีงานร่วมซึ่งรวมชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบไว้ด้วยกัน ช่วยลดเวลาว่างงานของสถานีงาน และลด

จำนวนสถานีงานได้มากกว่าการจัดสมดุลสายการประกอบเส้นตรงเดี่ยวที่เป็นอิสระต่อกันจากปัญหาการมีรอบเวลาการผลิตที่เกินรอบเวลาการผลิตที่กำหนดหรือมีชิ้นงานที่ไม่สามารถแบ่งย่อยได้แล้วที่มีเวลาดำเนินงานเกินรอบเวลาการผลิต สามารถแก้ปัญหาโดยการสร้างสถานีงานขนาน (parallel station) ซึ่งช่วยลดรอบเวลาการผลิตได้ โดยสถานีงานขนานจะมีสถานีงานที่เหมือนกันสองสถานีหรือมากกว่า วางตัวขนานกันและทำชิ้นงานที่เหมือนกัน

ผลจากการนำระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-in-time) มาใช้ทำให้โรงงานเปลี่ยนรูปแบบการผลิตเป็นสายการประกอบรูปตัวยู ซึ่งมีข้อดีมากกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง เช่น มีความยืดหยุ่นเพราะสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการผลิตได้ง่ายในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี สายการประกอบมีระยะทางสั้นจึงลดระยะการเดินทางของพนักงาน ใช้จำนวนสถานีงานน้อยกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง ส่งเสริมให้พนักงานมีการทำงานร่วมกันเพราะรูปแบบการจัดวางใช้พื้นที่น้อยและสถานีงานอยู่ใกล้กัน และเมื่อเกิดปัญหาด้านคุณภาพสามารถปรับปรุงได้อย่างรวดเร็ว (Cheng et al 2000) สายการประกอบรูปตัวยูสามารถแบ่งออกเป็นสายการประกอบด้านหน้า และสายการประกอบด้านหลัง ซึ่งสายการประกอบด้านหน้าจะเป็นด้านที่วัสดุถูกลำเลียงเข้าสายการประกอบ ส่วนสายการประกอบด้านหลังจะลำเลียงชิ้นงานออกจากสายการประกอบ พนักงานสามารถทำงานบนสายการประกอบเพียงด้านใดด้านหนึ่ง หรือสามารถทำงานทั้งสองด้านพร้อมกันได้ ซึ่งชิ้นงานที่ทำบนสายการประกอบจะถูกจัดตามลำดับก่อนหลังของงาน

การพัฒนาของสายการประกอบรูปตัวยูมีหลายรูปแบบ เช่น สายการประกอบรูปตัวยูแบบสถานีงานขนาน (U-Shaped assembly line with parallel workstation) ซึ่งเป็นการเพิ่มสถานีงานแบบขนานบนสายการประกอบรูปตัวยู ถ้าสถานีงานนั้นมีรอบเวลาการผลิตเกินเวลารอบการผลิตที่กำหนด (สุชาติดา คิดอ่าน, 2533) สายการประกอบแบบสถานีงานขนานมีประสิทธิภาพที่ดีในการลดเวลาว่างงานในสถานีงานและลดจำนวนสถานีงาน และอีกรูปแบบหนึ่งของการพัฒนาสายการประกอบรูปตัวยูคือ สายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Parallel U-shaped assembly line) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Kucukkoc and Zang (2015) เป็นสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่ขนานกันในแนวรูปตัวยู ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของสายการประกอบรูปตัวยูและสายการประกอบแบบขนานไว้ด้วยกัน โดยทำให้เกิดสถานีงานร่วม (Multi-line station) ระหว่างสองสายการประกอบที่ขนานกัน และยังสามารถเกิดสถานีงานจุดข้าม (Crossover station) บนสายการประกอบรูปตัวยูเดียวกัน จึงสามารถลดจำนวนสถานีงานได้มากกว่าการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยวที่เป็นอิสระต่อกัน

การเพิ่มจำนวนสายการประกอบรูปตัวยูในโรงงานอุตสาหกรรมทำให้เกิดปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย (Multiple U-line balancing problem) ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี David Sparling (1998) นำเสนอการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย เมื่อจัดวางในระยะที่ใกล้กันทำให้เกิดโอกาสในการจัดสมดุลหลายการประกอบไปพร้อมกันและลดจำนวน

สถานีงาน พนักงานสามารถทำงานบนสองสายการประกอบรูปตัวยูที่เชื่อมต่อกันโดยสถานีงานร่วม (multi-line station) ที่รวมชั้นงานของสายการประกอบรูปตัวยูของหลายสายการประกอบเข้าด้วยกัน แต่จำกัดจำนวนสถานีงานร่วมระหว่างสายการประกอบให้มีไม่เกินสองสถานี นอกจากนี้สายการประกอบรูปตัวยูหลายสายสามารถจัดสมดุลแบบอิสระต่อกันซึ่งในงานวิจัยของ Chiang et al (2004) แสดงให้เห็นว่าสายการประกอบรูปตัวยูแบบหลายสายที่เป็นอิสระต่อกันสามารถลดจำนวนสถานีงานได้มากกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรงและรูปตัวยูแบบเดี่ยว

ในอุตสาหกรรมจริงมีการนำสายการประกอบรูปตัวยูมาใช้อย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ (Choudhary and Agrawal 2014) และ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Lam, Toi et al. 2016) เป็นต้น ในงานวิจัยของ (Miltenburg 2001) ศึกษาสายการประกอบรูปตัวยูซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีในด้านของประสิทธิภาพการผลิตที่เพิ่มขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรมจริง เช่น ในโรงงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีการเปลี่ยนจากสายการผลิตเดี่ยวซึ่งมีระยะทางที่ค่อนข้างมากมาเป็นสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายที่แต่ละสายสามารถผลิตสินค้าที่คล้ายกันได้จำนวนหลายรุ่น ซึ่งอยู่ในแต่ละสายทำการผลิตจนครบในทุกขั้นตอน โรงงานบางแห่งใช้ระบบผลิตแบบทันเวลาพอดีซึ่งมีการรวมกลุ่มของเครื่องมือที่ใช้ไว้ภายในสายการประกอบรูปตัวยู ในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการผลิตแบบกลุ่ม (batch flow production) ได้เปลี่ยนเป็นสายการผลิตรูปตัวยูเนื่องจากระบบผลิตเดิมทำให้เกิดชิ้นส่วนระหว่างกระบวนการผลิต (work-in-process) มาก การขนส่งล่าช้า และคุณภาพการผลิตไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ในบางโรงงานสามารถปรับปรุงด้านคุณภาพ ลดค่าใช้จ่าย และมีการเพิ่มความยืดหยุ่นในการส่งสินค้าด้วยการผลิตสินค้าในแต่ละรุ่นในปริมาณเท่า ๆ กันในแต่ละวันซึ่งช่วยลดการเก็บพัสดุคงคลังและส่งสินค้าได้เร็วขึ้น ซึ่งสายการประกอบรูปตัวยูสามารถถูกจัดสมดุลใหม่เป็นครั้งคราวเพื่อปรับอัตราการผลิต และสามารถถูกนำมาใช้ผลิตรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมซึ่งแต่ละสถานีงานสามารถผลิตสินค้ารุ่นใดก็ได้ในแต่ละรอบเวลาการผลิต เมื่อมีผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรมากสามารถลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรโดยจัดสายการผลิตในลักษณะของรูปตัวยูหลายสาย ผลจากการนำสายการผลิตรูปตัวยูไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉลี่ยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ 76% พักสต็อกคลังลดลง 86% ระยะเวลาในการรอคอยสินค้าลดลง 75% และอัตราการเกิดของเสียลดลง 86% จากประสิทธิภาพที่ดีของสายการประกอบรูปตัวยูในงานวิจัยที่ผ่านมา สายการประกอบรูปตัวยูหลายสายสามารถถูกนำมาใช้ในโรงงานที่มีการผลิตสินค้าจำนวนหลายรุ่น ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูขนานที่มีการแบ่งภาระงานจากด้านข้างของสายการประกอบแบบคู่สายการประกอบรูปตัวยู สามารถถูกนำไปใช้งานเมื่อสายการผลิตประกอบไปด้วยรูปสองสายขึ้นไป เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายการประกอบรูปตัวยู เนื่องจากในคู่สายการประกอบรูปตัวยูเป็นรูปแบบที่เชื่อมต่อกันระหว่างสองสายการประกอบสามารถช่วยลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในระบบ โดยสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่จัดวางใน

ระยะใกล้กันมีโอกาสในการแบ่งภาระงานร่วมกันทำให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการจัดตั้งสถานีนงาน เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนสายการประกอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการแก้ปัญหาการจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบผสมโดยนำเสนอรูปแบบการจัดวางสายการประกอบแบบยูนิทอนในลักษณะคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นรูปตัวยูสองสายที่วางตัวขนานกัน เป็นรูปแบบที่มีข้อจำกัดน้อยกว่าสายการประกอบรูปตัวยูสองสายแบบซ้อนกันเนื่องจากอีกสายการประกอบหนึ่งไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่มากกว่า เพื่อเป็นทางเลือกของรูปแบบที่นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

ในปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นปัญหา NP-Hard ในเชิง Combinatorial Optimization และในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาที่มีมากวัตถุประสงค์ซึ่งเป็นปัญหามีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ขึ้นไป ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Particle Swarm based on decomposition: MOPSO/D) ซึ่งนำหลักการหาค่าที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) (Zhang et al 2007) มาประยุกต์ใช้โดยแบ่งปัญหาหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาย่อยในเชิงสเกลาร์ และแต่ละปัญหาย่อยจะใช้ข้อมูลของปัญหาข้างเคียงจึงทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และจากการที่ในปัญหาหลายวัตถุประสงค์ส่วนใหญ่จะมีขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ (Pareto-optimal Frontier) เป็นจำนวนมาก และอาจมีไม่จำกัด วิธีการ MOEA/D สามารถช่วยในการหาขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและเป็นตัวแทนที่ดีของ Pareto-optimal Frontier จึงเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ และพบว่ามีประสิทธิภาพในการหาค่าตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึมเจเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมวัตถุประสงค์หลายอย่างแบบ MOGLs

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm: MOPSO) และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Particle Swarm Optimization based on decomposition: MOPSO/D) ในการแก้ปัญหาแบบมาก วัตถุประสงค์ของการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่ทำการศึกษาเป็นปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่หนึ่ง โดยมีการกำหนดรอบเวลาการผลิตมาให้ มีวัตถุประสงค์ที่ต้องทำให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่

- 1) ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด
- 2) ทำให้ภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุลกันมากที่สุด
- 3) ทำให้เกิดความสมดุลภายในสถานีงานมากที่สุด
- 4) ทำให้งานในสถานีมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด
- 5) ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด

2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง ได้แก่ อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย วัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Multi-Objective Particle Swarm Optimization: MOPSO) และการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคร่วมกับวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-objective Particle Swarm Optimization Based on Decomposition: MOPSO/D) โดยตัวชี้วัดที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม มี 5 ตัวชี้วัดได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (Convergence to the Pareto Optimal Set) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ค้นพบ (Spread measurement) อัตราส่วน ของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-dominated Solution) และเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ (Computational Time)

3. ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนด้วย MATLAB

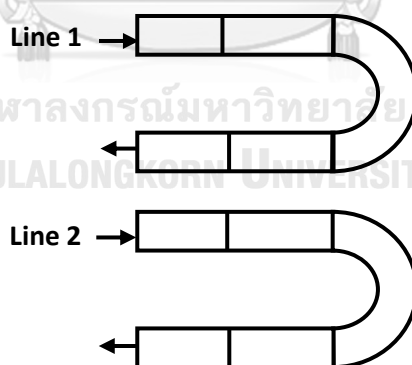
4. ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขนาด ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาย่อยดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

No.	Line1				Line2				Total Task	Common Cycle Time
	Problem	Model	MPS	Cycle Time	Problem	Model	MPS	Cycle Time		
1	Mitchell	3	2:1:2	15	Jackson	2	3:1	10	32	30
				18				12		36
				21				14		42
2	Jackson	3	1:2:1	9	Roziég	2	3:1	18	36	18
				11				22		22
				13				26		26
3	Mitchell	2	2:1:2	17	Roziég	3	1:2:1	34	46	34
				21				18		126
				21				21		21
4	Roziég	3	1:2:1	21	Roziég	3	2:1:2	42	50	42
				25				50		50
				16				32		32
5	Heskiaoff	3	1:1	138	Heskiaoff	2	1:1	205	56	28290
				205				216		44280
				216				324		648
6	Gunther	3	1:1	41	Sawyer	2	2:3	41	65	41
				54				54		54
				81				81		81
7	Killbridge	3	1:1	79	Heskiaoff	2	2:3	138	73	10902
				110				205		4510
				110				216		11880
8	Killbridge	2	1:1	57	Killbridge	2	1:3	79	90	4503
				92				110		5060
				110				110		110
9	Killbridge	3	2:1:2	79	Tonge	3	1:2:1	410	115	32390
				110				468		25740
				110				527		57970
10	Tonge	3	1:1:1	320	Tonge	2	3:1	320	140	320
				207				270		6210
				293				220		64460
11	Tonge	2	3:1	220	Wee-mag	3	1:1:1	270	145	5940
				252				84		252
				303				101		303
12	Arcus1	3	1:1:2	6842	Arcus1	3	1:2:1	6842	166	6842
				7571				7571		7571
				6309				6309		6309

7. ลักษณะปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู มีดังนี้

- 1) ทำการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่มีการกำหนดรูปแบบการจัดวางที่มีการจัดสมดุลร่วมกัน ดังรูปที่ 1.1
- 2) ข้อมูลที่มีการกำหนดไว้ชัดเจน ได้แก่ เวลาการทำงานของชิ้นงาน (task time) รอบเวลาการทำงาน (Cycle time) และ ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ (Precedence diagram)
- 3) แต่ละสายการประกอบมีการผลิตเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม
- 4) ไม่พิจารณาการเดินทางของพนักงาน
- 5) พนักงานที่ทำงานบนแต่ละสายการประกอบเป็นพนักงานที่มีหลากหลายทักษะ
- 6) พนักงานสามารถทำชิ้นงานที่อยู่บนสองสายการประกอบในจุดที่แต่ละด้านของสองสายการประกอบอยู่ติดกัน
- 7) สถานีงานจุดข้ามสามารถเกิดได้เฉพาะภายในสายการประกอบรูปตัวยูเดียว
- 8) ในการจัดชิ้นงานลงสถานีงานจะจัดเพื่อให้ครบรอบเวลาการผลิต หากไม่มีชิ้นงานที่สามารถจัดลงสถานีนี้ได้แล้วจะขึ้นสถานีงานใหม่ โดยจะจัดชิ้นงานให้เสร็จที่ละสถานี
- 9) ผลิตภัณฑ์ที่ถูกกำหนดให้เข้าสู่สายการประกอบในแต่ละสายการประกอบแล้วไม่สามารถข้ามสายการประกอบได้
- 10) ทั้งสองสายการประกอบสามารถมีรอบเวลาการผลิตที่ต่างกันได้



รูปที่ 1.1 ลักษณะการจัดวางของสายการประกอบรูปตัวยูสองสาย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ลดความยุ่งยากและระยะเวลาในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม แบบรูปตัววีสองสาย
2. สามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของสายการประกอบรูปตัววี
3. สามารถนำผลจากงานวิจัยไปเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการจัดสมดุลรูปแบบใหม่ที่เกี่ยวข้องในอนาคตได้
4. สามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับสายการประกอบในโรงงานอุตสาหกรรมจริงได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมและวิธีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม
3. เขียนโปรแกรมอัลกอริทึมด้วย MATLAB
4. ทดลองใช้โปรแกรมอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาตัวอย่าง
5. เปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม
6. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

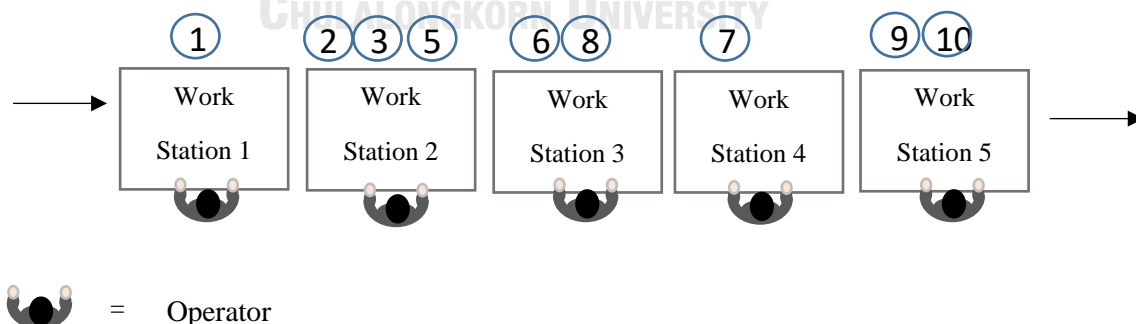
ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีลักษณะสายการผลิตแบบตัวยู เพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าที่เหมาะสม โดยมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 ลักษณะของสายการประกอบ

สายการประกอบ (Assembly line) เป็นระบบผลิตที่ชิ้นส่วนถูกนำมาประกอบต่อเนื่องกันบนสถานีงาน (workstation) ที่จัดเรียงต่อกันมีโดยมีสายพานลำเลียงหรือระบบขนถ่ายวัสดุอื่น ๆ ทำหน้าที่ส่งชิ้นงานระหว่างสถานีงาน ทิศทางการไหลของงานเป็นทิศทางเดียวกันเพื่อทำการประกอบตามชิ้นงานจนกระทั่งประกอบเป็นผลิตภัณฑ์และออกจากสายการประกอบ และในขณะเดียวกันสถานีงานเดิมจะมีชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ถัดไปเข้ามาแทน โดยในแต่ละสถานีงานจะมีเวลาดำเนินงานจำกัด เรียกว่ารอบเวลาการผลิต (Cycle time) เมื่อครบรอบเวลาการผลิตชิ้นงานจะถูกส่งไปที่สถานีงานถัดไป

2.1.1 สายการประกอบแบบเส้นตรง

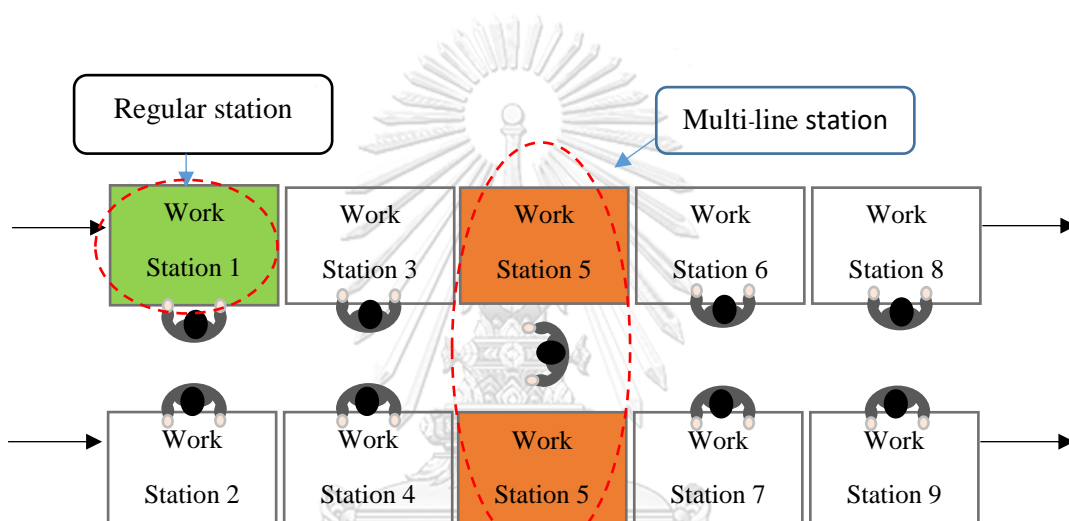
สายการประกอบแบบเส้นตรง (Straight line) เป็นสายการประกอบที่มีสถานีงานจัดเรียงอยู่ในแนวเส้นตรงที่มีสายพานลำเลียงเชื่อมระหว่างสถานีงาน มีทิศทางการไหลของงานเป็นเส้นตรงเริ่มจากสถานีงานแรกไปจนครบทุกสถานีงาน ซึ่งจะไม่มีการย้อนกลับมาทำงานก่อนหน้า พนักงานจะทำงานตามชิ้นงานที่แบ่งไว้ในแต่ละสถานีงาน ดังรูปที่ 2.1 โดยหมายเลขในวงกลมเป็นเลขที่บอกชิ้นงาน



รูปที่ 2.1 สายการประกอบแบบเส้นตรง

2.1.2 สายการประกอบแบบขนาน

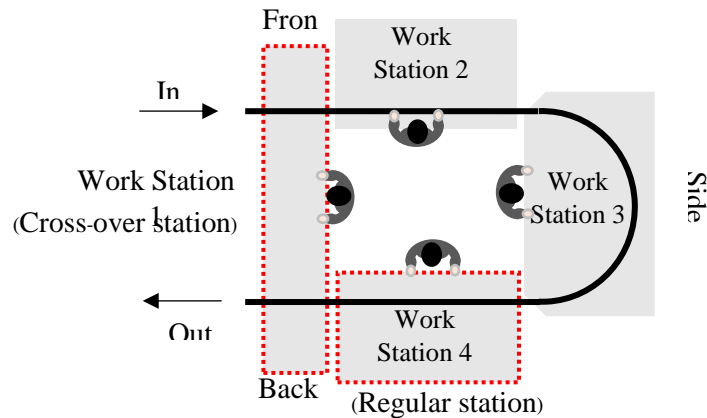
สายการประกอบแบบขนาน (Parallel Assembly Lines) คือระบบผลิตที่มีสายการประกอบเส้นตรงตั้งแต่ 2 สายการประกอบขึ้นไปวางตัวอยู่ในแนวขนานกัน มีสถานีงานที่จัดเรียงกัน โดยประเภทของสถานีงานจะแบ่งเป็น 2 แบบคือ สถานีงานแยก (Regular station) เป็นสถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบเดี่ยว และสถานีงานร่วม (Multi-line station) ที่รวมชิ้นงานของทั้งสองสายการประกอบไว้ด้วยกัน ซึ่งสถานีงานร่วมเกิดจากการจัดสมดุลของสายการประกอบร่วมกัน ทำให้สายการประกอบมีประสิทธิภาพ ลดเวลาว่างงานของสถานีงานและลดจำนวนสถานีงานได้



รูปที่ 2.2 สายการประกอบแบบขนาน

2.1.3 สายการประกอบรูปตัวยู

สายการประกอบรูปตัวยู (U-shaped Assembly line) เป็นสายการประกอบที่มีมีจุดทางเข้าและออกของสายการประกอบอยู่ใกล้กัน มีทิศการไหลของงานในลักษณะรูปตัวยู สายการประกอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือสายการประกอบด้านหน้า (front) และ หลัง (back) ที่อยู่ตรงกันทำให้สามารถเกิดสถานีงานที่สามารถทำงานได้ทั้งสองด้านพร้อมกัน เรียกว่าสถานีงานจุดข้าม (Crossover station) โดยพนักงานสามารถปฏิบัติงานที่ด้านหน้าและหมุนตัวกลับมาทำงานที่ด้านหลังได้ และอีกส่วนหนึ่งคือ ด้านข้างของสายการประกอบ (side) ซึ่งเป็นส่วนโค้งของรูปตัวยู สถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบเพียงด้านใดด้านหนึ่งเรียกว่า สถานีงานปกติ (Regular station) สายการประกอบรูปตัวยูสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบผลิตเพราะสามารถจัดสมดุลของภาระงานได้มีประสิทธิภาพมากกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง

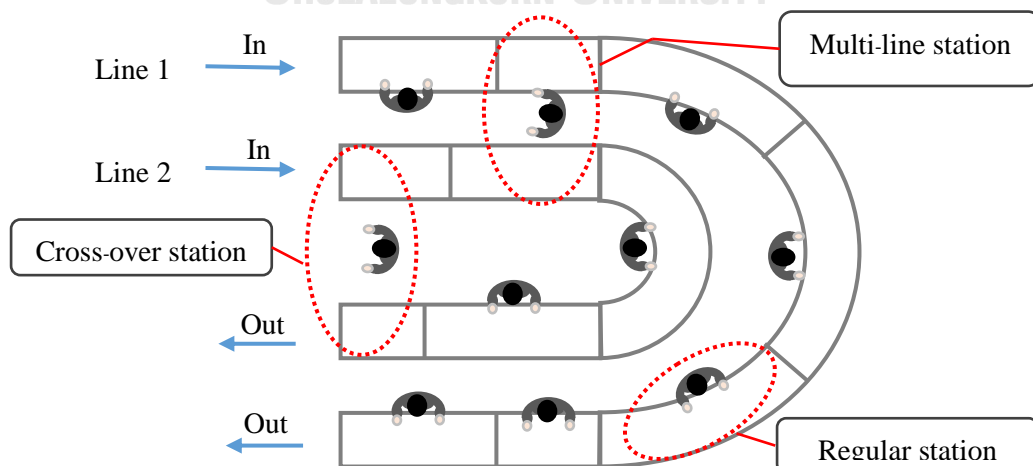


รูปที่ 2.3 สายการประกอบรูปตัวยู

2.1.4 สายการประกอบรูปตัวยูขนาน

สายการประกอบรูปตัวยูขนาน (Parallel U-shape Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่มีลักษณะเป็นรูปตัวยู 2 สายเรียงซ้อนกันอยู่ในแนวขนาน จากรูปแบบการจัดเรียงของสายการประกอบนี้ทำให้เกิดข้อดีของสายการประกอบถึง 2 รูปแบบคือ สายการประกอบแบบขนาน และสายการประกอบรูปตัวยู สถานะงานของสายการประกอบรูปตัวยูขนานสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

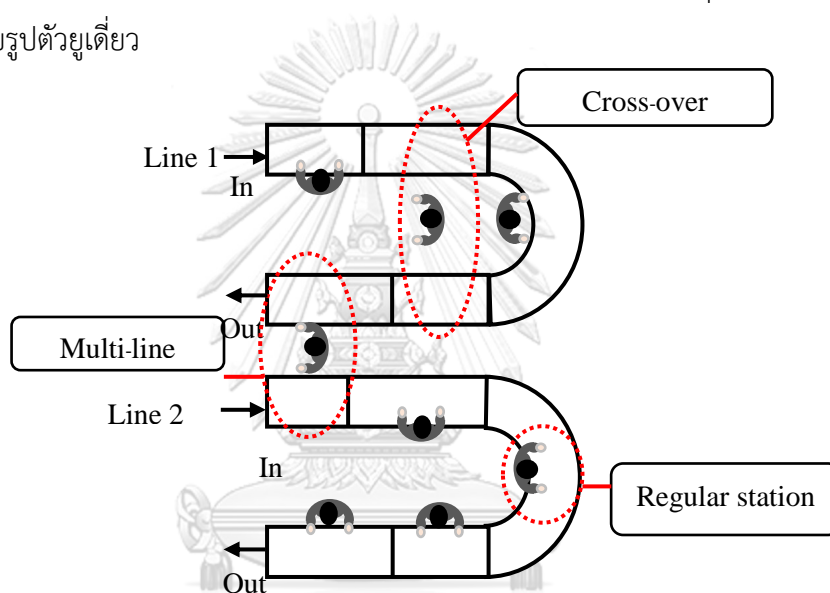
1. สถานะงานปกติ (Regular station) เป็นสถานะงานที่มีชิ้นงานภายในสถานะเป็นของสายการประกอบใดสายการประกอบหนึ่ง
2. สถานะงานร่วม (Multi-line Station) เป็นสถานะงานที่มีชิ้นงานที่ทำบนสองสายการประกอบ ซึ่งสถานะงานลักษณะนี้จะอยู่ระหว่างสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่ขนานกัน
3. สถานะงานจุดข้าม (Crossover station) จะเกิดขึ้นกับสายการประกอบรูปตัวยูที่อยู่ที่อยู่ด้านใน เพราะสามารถนำข้อดีของสายการประกอบรูปตัวยูมาใช้ การจัดสมดุลสายการประกอบในลักษณะนี้ทำให้ใช้งานสายการประกอบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (เพ็ญนภัส 2561)



รูปที่ 2.4 สายการประกอบรูปตัวยูขนาน

2.1.5 รูปแบบการจัดวางคู่ของสายการประกอบรูปตัวยู

สายการประกอบรูปตัวยูที่อยู่ในระยะใกล้กันทำให้มีโอกาสในการจัดสมดุลร่วมกัน ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบการจัดวางของสายการประกอบของรูปตัวยูสองสายให้วางข้างกัน และมีจุดทางเข้าและออกของผลิตภัณฑ์อยู่ในฝั่งเดียวกัน โดยการจัดวางลักษณะนี้จะสามารถเกิดสถานีงานที่บรรจุชิ้นงานของสองสายการประกอบได้ซึ่งสถานีงานประเภทนี้เรียกว่า สถานีงานร่วม (Multi-line station) จะเกิดระหว่างด้านหลังของสายการประกอบแรก และ ด้านหน้าของสายการประกอบที่สอง ดังรูปที่ 2.5 และในขณะเดียวกันจะสามารถเกิดสถานีงานจุดข้าม (Cross-over station) ที่พนักงานสามารถหมุนตัวกลับมาทำงานได้ทั้งสองฝั่งของสายการประกอบซึ่งสถานีงานจุดข้ามจะเกิดภายในสายการประกอบรูปตัวยูเดียว



รูปที่ 2.5 คู่สายการประกอบรูปตัวยู

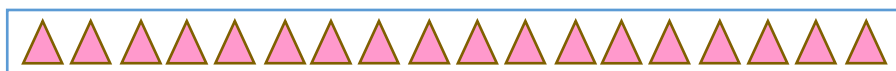
2.2 ประเภทของจำนวนรูปแบบผลิตภัณฑ์บนสายงานการประกอบ

สายการประกอบสามารถแบ่งประเภทตามรูปแบบของผลิตภัณฑ์ได้เป็น 3 ประเภท ได้ดังนี้

1. สายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Lines) คือสายการประกอบที่มีการผลิตเพียงผลิตภัณฑ์ชนิดเดียว โดยทุกชิ้นงานมีลักษณะเหมือนกันเป็นรูปแบบเดียวดังรูปที่ 2.6

2. สายงานการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Lines) คือสายการประกอบที่ใช้ผลิตภัณฑ์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยทำการประกอบทีละชุดผลิตภัณฑ์ (Batch) โดยมีการเรียงลำดับไว้ ในช่วงที่เปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตจะต้องมีการปรับตั้งเครื่องใหม่ (Set Up) ดังรูปที่ 2.7

3. สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Lines) คือสายการประกอบผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ทำให้ในระหว่างผลิตไม่มีการปรับตั้งเครื่องจักรและ ผลิตภัณฑ์หลายชนิดจะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกันและถูกประกอบตามลำดับที่เข้าสู่สายการประกอบ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.6 สายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Lines)



รูปที่ 2.7 สายงานการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Lines)



รูปที่ 2.8 สายงานการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Lines)

2.3 หลักการจัดสมดุลสายการประกอบ

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภท (Ghosh and Gahnon, 1989) ดังนี้

1. **Single Model Deterministic** เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว โดยมีการกำหนดเวลาของแต่ละชิ้นงานที่แน่นอน
2. **Single Model Stochastic** เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาของชิ้นงานที่ไม่แน่นอน ซึ่งตรงกับความเป็นจริงสำหรับสายการประกอบที่ใช้พนักงานทำงานแบบ Manual จึงใช้เวลาในการทำงานที่ไม่แน่นอน
3. **Multi Model Deterministic** เป็นปัญหาการจัดสมดุลที่มีเวลาของชิ้นงานที่แน่นอน มีการผลิตผลิตภัณฑ์ มากกว่า สองชนิดขึ้นไปแยกกันเป็นชุดผลิตภัณฑ์ (Batch)

4. Multi Model Stochastic เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด ซึ่งมากกว่า สองชนิดขึ้นไปแยกกันเป็นชุดผลิตภัณฑ์ (Batch) แต่มีเวลาของชิ้นงานที่ไม่แน่นอน

5. Mixed Model Deterministic เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบของผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่เข้าสู่สายการประกอบในรูปแบบซึ่งเป็นหน่วยของผลิตภัณฑ์หลายชนิดปะปนกันหรือตามลำดับ โดยมีเวลาชิ้นงานที่แน่นอน

6. Mixed Model Stochastic เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบของผลิตภัณฑ์หลายชนิดที่เข้าสู่สายการประกอบในรูปแบบซึ่งเป็นหน่วยของผลิตภัณฑ์หลายชนิดปะปนกันหรือตามลำดับ แต่มีเวลาชิ้นงานที่ไม่แน่นอน จึงเป็นปัญหาที่ซับซ้อนเพราะมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลกระทบของการเรียนรู้ ระดับความสามารถของพนักงาน การออกแบบชิ้นงานและความไม่แน่นอนของเวลาชิ้นงาน

2.4 ประเภทของวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบสามารถแบ่งรูปแบบของปัญหาตามวัตถุประสงค์และข้อจำกัดได้ดังต่อไปนี้ (Becker and Scholl, 2006)

1. Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) เป็นปัญหาการจัดสมดุลแบบง่ายเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์เดียว และเป็นสายการประกอบแบบเส้นตรงซึ่งมีเพียงแค่ข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน สามารถแบ่งรูปแบบของปัญหาได้ ดังนี้

(1) Type 1 (SALB-1) เป็นปัญหาการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด โดยมีกำหนดรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

(2) Type 2 (SALB-2) เป็นปัญหาการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน เพื่อให้มีรอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดจำนวนสถานีงาน (Work Station)

(3) Type E (SALB-E) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง Type 1 และ Type 2 ร่วมกัน คือเป็นปัญหาการจัดสรรชิ้นงานลงสถานีงาน เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานและรอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด

(4) Type F (SALB-F) เป็นปัญหาที่มีความเป็นไปได้ (Feasibility) หรือ การหาทางออกของปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ เมื่อมีการกำหนดจำนวนสถานีงานและรอบเวลาการทำงาน

2. General Assembly Line Balancing Problem (GALBP) เป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบทั่วไปที่มีการขยายขอบเขตของข้อจำกัดออกไปเพื่อให้สอดคล้องกับในทางปฏิบัติมากขึ้น เช่น การเลือกเครื่องมือ ทางเลือกของกระบวนการ ข้อจำกัดของการจัดสรรชิ้นงาน

โดยปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบทั่วไป ได้แก่ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem: MALBP) เป็นต้น

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)

ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ขึ้นไป ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ซึ่งในบางวัตถุประสงค์อาจมีความขัดแย้งกัน หรือเมื่อทำให้วัตถุประสงค์หนึ่งมีค่าที่เหมาะสมที่สุด อาจส่งผลให้คำตอบของอีกวัตถุประสงค์หนึ่งไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากที่จะมีเพียงคำตอบเดียวที่สามารถทำให้เกิดค่าที่เหมาะสมที่สุดในทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเวลาเดียวกัน แต่คำตอบที่ดีที่สุดจะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเรียกว่า คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal solution) ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีเทียบเท่ากันและเป็นคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นๆในสเปซคำตอบเลย

ในกรณีที่ต้องการหาค่าที่น้อยที่สุดของทุกวัตถุประสงค์ (Minimization) ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

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

k คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

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

ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ทำได้ด้วยการหาคำตอบ x^* ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อมๆกัน ดังสมการ 2.2

$$\text{Minimize } f(x^*) = \{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*)\} \quad (2.2)$$

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

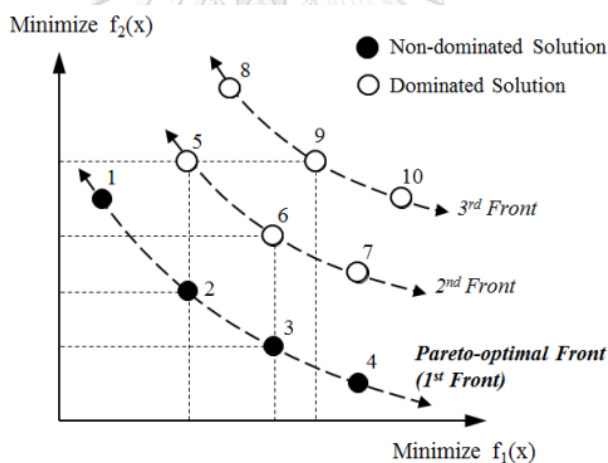
$$f_i(x) \leq f_i(y) \quad \text{สำหรับทุกค่า และ } i \in \{1, 2, \dots, k\}$$

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

ถ้าคำตอบ x^* ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่น และเป็นคำตอบที่ดีเท่าๆกัน จะถูกเรียกว่า กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกสมาชิกคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดว่า เซตกลุ่มคำตอบที่

ดีที่สุด (Pareto Optimal set) เซตคำตอบที่ได้นี้จะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ขอบเขตของคำตอบที่เรียกว่า ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด หรือ ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier)

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตทั้งหมดเมื่อนำมารวมกันเป็นเซตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Set) จะเป็นแนวเส้นโค้งที่ลากผ่านทุกจุดของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตบนสเปซวัตถุประสงค์ ทุกตำแหน่งบนเส้นนี้ข้มจุดของคำตอบที่เหลือทั้งหมด เรียกว่า ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Frontier) (Chutima and Chimklai, 2012) ดังรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างจุดของคำตอบต่างๆ บนสเปซวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ 2 วัตถุประสงค์ คำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่มี การข่มซึ่งกันและกัน และต่างก็ ไม่ถูกข่มจากคำตอบใดเลย ดังนั้นคำตอบที่ 1-4 จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต



รูปที่ 2.9 รูปคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Goldberg, 1989)

วัตถุประสงค์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้แก่กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของสายการประกอบ และกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับปริมาณภาระงานในแต่ละสถานีงาน (ณัฐชัย โยธาบริบาล, 2556) จะถูกนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้จำนวนทั้งสิ้น 5 วัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์ทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1 ทำให้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด (Number of Workstation : N_W)

คือการจัดสรรกลุ่มชิ้นงานในแต่ละสถานีให้ใช้เวลาดำเนินงานใกล้เคียงกับรอบเวลาการผลิตมากที่สุดเพื่อทำให้การผลิตมีประสิทธิภาพ และใช้จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

$$\text{Minimize : } N_w \quad (2.3)$$

วัตถุประสงค์ที่ 2 การทำให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

คือการทำให้ผลรวมเวลาชิ้นงานร่วมในแต่ละสถานีงานมีเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดภาระงานที่มากเกินไปในบางสถานีงานและทำให้เกิดความเท่าเทียมกันระหว่างพนักงาน ในสมการที่ (2.4) เป็นสมการที่ดัดแปลงมาจากสมการของ Simaria and Vilarinho (2009) ซึ่งค่า B_b จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยค่า B_b ที่ต่ำ หมายถึงภาระงานมีความสมดุลกันระหว่างสถานีงาน ซึ่งจะทำให้มีความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด

$$\text{Minimize } B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{CW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ N_w คือจำนวนสถานีงานทั้งหมด

- b คือ ประเภทของสถานีงาน ได้แก่
- RW = สถานีงานปกติ (Regular Workstation)
 - MW = สถานีงานร่วม (Multi-line Workstation)
 - CW = สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation)

$S_{k,b}$ คือค่าสัมบูรณ์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นในสถานีงานที่ k ประเภท b

TAD คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (Total Absolute Deviation)

วัตถุประสงค์ที่ 3 การทำให้เกิดความสมดุลภายในสถานีงานมากที่สุด

เป็นการหาค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงาน เนื่องจากการจัดปัญหาผลิตภัณฑ์ผสมจะมีเวลาดำเนินงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากันซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่สมดุลของภาระงานขึ้น โดยมีสมการดังสมการที่ (2.5)

$$f_3(X) = \text{Minimum } B_w = \frac{M}{N_w(M-1)} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{m=1}^M \left(S_{km} - \frac{1}{M} \right)^2 \quad (2.5)$$

กำหนดให้

N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

M คือ จำนวนผลิตภัณฑ์

D_m คือ ความต้องการของผลิตภัณฑ์ m

q_m คือ อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ m ในสายการประกอบ สามารถคำนวณได้จาก

สมการ 2.6

$$q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m}; 0 \leq q_m \leq 1 \text{ and } \sum_{m=1}^M q_m = 1 \quad (2.6)$$

s_{km} คือ เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ m ในสถานีนงาน k

S_{km} คือ สัดส่วนของเวลาว่างงานในสถานีนงาน k ในผลิตภัณฑ์ m คำนวณจาก

สมการ 2.7

$$S_{km} = \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_{m=1}^M q_m s_{km} \\ \frac{q_m s_{km}}{\sum_{m=1}^M q_m s_{km}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.7)$$

วัตถุประสงค์ที่ 4 การทำให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีนงานมีค่าน้อยที่สุด

การจัดสรรให้ชั้นงานในแต่ละสถานีนงานมีความสัมพันธ์กันมากๆ เป็นการจัดชั้นงานในสถานีนงานให้เป็นลำดับชั้นงานที่ต่อเนื่องกันมากที่สุดที่เชื่อมโยงตามลำดับก่อนหลัง เนื่องจากพนักงานแต่ละคนที่ทำงานในสายการประกอบจะมีงานหลักที่ตนถนัด การจัดสรรให้ชั้นงานมีความสัมพันธ์กันจะทำให้งานเหล่านั้นอาศัยทักษะที่เกี่ยวข้องเพียงทักษะเดียวหรือเพิ่มเติมทักษะอื่นอีกเล็กน้อย ทำให้สามารถเลือกจัดสรรพนักงานเข้าทำงานได้ตรงตามความถนัด และทำให้การดำเนินงานของสายการประกอบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ของชั้นงานโดยรวมของสายการประกอบสามารถประเมินได้ด้วยตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของงาน (Index of Work Relatedness: IWR) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$IWR = \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (2.8)$$

เมื่อ SN_k คือ จำนวนเครือข่ายของชั้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังโดยตรงในสถานีนงานที่ k

ทั้งนี้ IWR จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยยิ่งมีค่ามากยิ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่า IWR นั้นมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ตามจำนวนสถานีนงาน การเปรียบเทียบค่านี้ระหว่างผลการจัดสมดุลที่มีจำนวนสถานีนงานต่างกันจึง ไม่ได้ให้ความหมายใดๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำการดัดแปลงตัวชี้วัด IWR ให้อยู่ในรูปของ $MIWR$ (Modified Index of Work Relatedness:) ซึ่งสามารถคำนวณได้สมการ (2.9) (Chutima and Chimklai, 2012) โดยค่า $MIWR$ ของผลการจัดสมดุลที่มีจำนวนสถานีนงานน้อยจะมีค่าที่ดีกว่าผล การจัดสมดุลที่มีจำนวน สถานีนงานมากกว่าเสมอ (เนื่องจากในการจัดสมดุลมุ่งเน้นให้มีจำนวนสถานีนงานน้อยที่สุดเป็นวัตถุประสงค์หลัก ดังนั้นถึงแม้ว่าสายการประกอบที่มีสถานีนงานน้อยจะมี ความสัมพันธ์ของงานที่แย่กว่าสายการประกอบที่มีสถานีนงานมากกว่าก็ตาม ก็เชื่อว่าจะมีความสัมพันธ์ ของงานที่ดีกว่า) ทั้งนี้ ค่า $MIWR$ ยิ่งน้อยยิ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูง ดังนั้น วัตถุประสงค์ที่ 3 จึงเป็นการทำให้ $MIWR$ มีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Minimize } MIWR = N_w - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \quad (2.9)$$

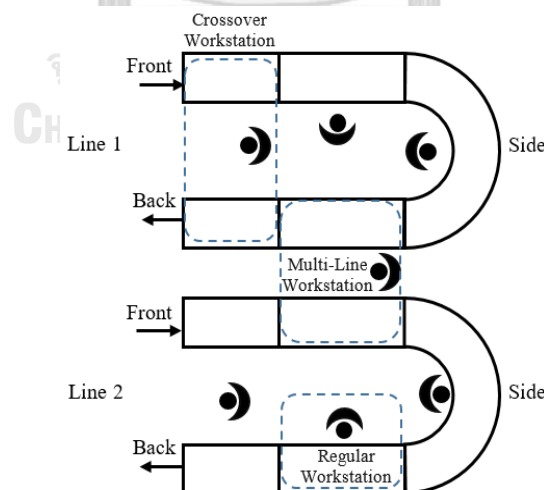
วัตถุประสงค์ที่ 5 ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด

สายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่จัดวางคู่กันจะสามารถหาความยาวของสายการประกอบ โดยนับเป็นจำนวนสถานีที่เรียงยาวต่อกันในแนวนอน ดังนั้นการทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุดจึงเป็นการทำให้สายการประกอบสั้นที่สุด หรือทำให้ใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

$$\text{Minimize : } N_s \quad (2.10)$$

2.6 การแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม

คู่สายการประกอบรูปตัวยูเป็นสายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่นำมาประยุกต์ให้มีการจัดวางในรูปแบบขนานกันตามรูปที่ 2.10 ด้านที่อยู่ติดกันสามารถจะแบ่งภาระงานร่วมกันทำโดยใช้วิธีจัดสมดุลร่วมกันเช่นเดียวกับสายการประกอบขนาน สายการประกอบรูปตัวยูทั้งสองสายมีจุดทางเข้าและออกของสายการประกอบเป็นจุดเดียวกัน สถานีงานที่อยู่ระหว่างสองสายการประกอบ เรียกว่า สถานีงานร่วม (Multi-line Workstation) พนักงานในสถานีจะทำชิ้นงานของสายการประกอบทั้งสองสาย สถานีที่อยู่ภายในรูปตัวยูซึ่งอยู่ระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ เรียกว่า สถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) ซึ่งพนักงานที่อยู่ในสถานีจะทำชิ้นงานทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ และสถานีงานปกติ (Regular Workstation) เป็นสถานีที่พนักงานทำงานบนสายการประกอบเดียว



รูปที่ 2.10 คู่สายการประกอบรูปตัวยู

ผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบรูปตัวยูแต่ละสายมีรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมซึ่งสายการประกอบหนึ่งสามารถผลิตสินค้าได้หลายรุ่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันและในระหว่างการผลิตไม่ต้องใช้เวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร และเนื่องจากสินค้าแต่ละรุ่นมีชิ้นงานที่ต้องทำและเวลาดำเนินการที่แตกต่างกันจึงอาศัยวิธีการสร้างแผนภาพลำดับก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) (Gökçen, Ağpak et al. 2006) และการคำนวณเวลาชิ้นงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (Combined Task Time) (ณัฐชัย โยธาภิบาล, 2556) (Sparling and Miltenburg 1998)

2.6.1. การคำนวณรอบเวลาการผลิตร่วม

ในการจัดสมดุลร่วมของคู่สายการประกอบรูปตัวยูเป็นการจัดสมดุลภายใต้รอบเวลาการผลิตเดียวกัน แต่ในกรณีที่ทั้งสองสายการผลิตมีรอบเวลาการผลิตไม่เท่ากัน จะใช้วิธีการหารอบเวลาการผลิตร่วม (Common cycle time) ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Kucukkoc and Zhang 2015)

- 1) หา ค่าคูณร่วมน้อย (Least Common Multiple: LCM) ของรอบเวลาการผลิตของทั้งสองสายการประกอบ
- 2) คำนวณค่าตัวหารของสายการประกอบ (line divisor) โดยนำค.ร.น. ของรอบเวลาการผลิตหารด้วยรอบเวลาการผลิตของแต่ละสายการประกอบ จะได้ค่า ld_1 และ ld_2 ตามลำดับ
- 3) ปรับเวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ทุกรุ่น บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 โดย นำเวลาชิ้นงานผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบที่ 1 มาคูณกับค่า ld_1 และ นำเวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบที่ 2 คูณกับ ld_2 ตามลำดับ
- 4) ใช้ค่า ค.ร.น. เป็นรอบเวลาการผลิตร่วม (Common cycle time) และใช้เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ที่ได้ปรับค่าแล้วในการจัดสมดุลโดยวิธีการหาเวลาชิ้นงานร่วมที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

จากเวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 เมื่อกำหนดให้รอบเวลาการผลิตในสายการประกอบที่ 1 (c_1) เท่ากับ 10 หน่วยเวลา และ รอบเวลาการผลิตของสายการประกอบที่ 2 (c_2) เท่ากับ 15 หน่วยเวลา รอบเวลาผลิตร่วม (Common cycle time) = ค.ร.น. (10,15) = 30 ดังนั้น $ld_1 = \frac{LCM}{c_1} = \frac{30}{10} = 3$, $ld_2 = \frac{LCM}{c_2} = \frac{30}{15} = 2$ เมื่อคูณค่า ld_1 กับเวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ AI และ AII จะได้เวลาชิ้นงานใหม่ ดังตารางที่ 2.1 และสำหรับสายการประกอบที่ 2 เมื่อคูณค่า ld_2 กับเวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ BI และ BII จะได้เวลาชิ้นงานที่ปรับแล้ว ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 เวลาชิ้นงานที่ปรับตามรอบเวลาการผลิตร่วมของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1

Task	Task Time		Task Time $\times ld_1$	
	AI	All	AI	All
A1	5	5	15	15
A2	3	3	9	9
A3	4	3	12	9
A4	5	4	15	12
A5	4	3	12	9
A6	5	5	15	15
A7	1	1	3	3
A8	4	4	12	12
A9	6	5	18	15

ตารางที่ 2.2 เวลาชิ้นงานที่ถูกปรับตามรอบเวลาการผลิตร่วมของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2

Task	Task Time		Task Time $\times ld_1$	
	BI	BII	BI	BII
B1	1	0	2	0
B2	5	5	10	10
B3	4	3	8	6
B4	3	3	6	6
B5	5	5	10	10
B6	6	6	12	12
B7	5	5	10	10

2.6.2. การสร้างแผนภาพลำดับความสำคัญก่อนหลังร่วม และการคำนวณเวลาขึ้นงาน ร่วมบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม เวลาที่ใช้ในแต่ละชั้นงานอาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า จึงใช้วิธีการคำนวณเวลาขึ้นงานเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทุกรุ่นที่ผลิตบนสายการประกอบเดียวกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นเวลาขึ้นงานรวมและทำการจัดสมดุลได้โดยใช้วิธีเดียวกับการจัดสมดุลแบบผลิตภัณฑ์เดียว เวลาขึ้นงานรวมซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของเวลาขึ้นงานที่ได้จากสินค้าแต่ละรุ่นมีวิธีการคำนวณดังนี้ (Sparling และ Miltenburg, 1998)

กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ A มีการผลิตสินค้าแบ่งออกเป็น 2 รุ่น (Model) คือ AI และ AII ซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้งสองรุ่นถูกผลิตบนสายการประกอบที่ 1 และสำหรับผลิตภัณฑ์ B จะผลิตสินค้า 2 รุ่นคือ BI และ BII ร่วมกันบนอีกสายการประกอบหนึ่ง กำหนดให้

M เป็นจำนวนรุ่นสินค้าที่ผลิตบนสายการประกอบเดี่ยว แบบผลิตภัณฑ์ผสม

D_m เป็นปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m

q_m เป็นสัดส่วนของปริมาณการผลิตสินค้ารุ่น m เมื่อเทียบกับปริมาณผลิตรวมทุกรุ่น

t_{im} คือเวลาขึ้นงาน (Task Time) ที่ i ของสินค้ารุ่น m

t_i คือเวลาขึ้นงานร่วม (Combined Task Time) ที่ i

$$q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^M D_m} ; 0 \leq q_m \leq 1 \text{ และ } \sum_{m=1}^M q_m = 1$$

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

เมื่อกำหนดให้ สายการประกอบ A ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ A_I และ A_{II} และโดยมีสัดส่วนการผลิต $q_{A_I} = \frac{1}{3}$ $q_{A_{II}} = \frac{2}{3}$ และกำหนดให้บนสายการประกอบ B ผลิตสินค้า 2 รุ่น ได้แก่ B_I และ B_{II} โดยมี $q_{B_I} = \frac{1}{2}$ $q_{B_{II}} = \frac{1}{2}$

สามารถหาแผนภาพขึ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A ได้ดังรูปที่ 2.11 และสามารถคำนวณเวลาขึ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A ได้ดังตารางที่ 2.3 สำหรับแผนภาพขึ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ B และเวลาขึ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ B สามารถหาได้ดังรูปที่ 2.12 และ ตารางที่ 2.4 ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณ: ผลิตภัณฑ์ A

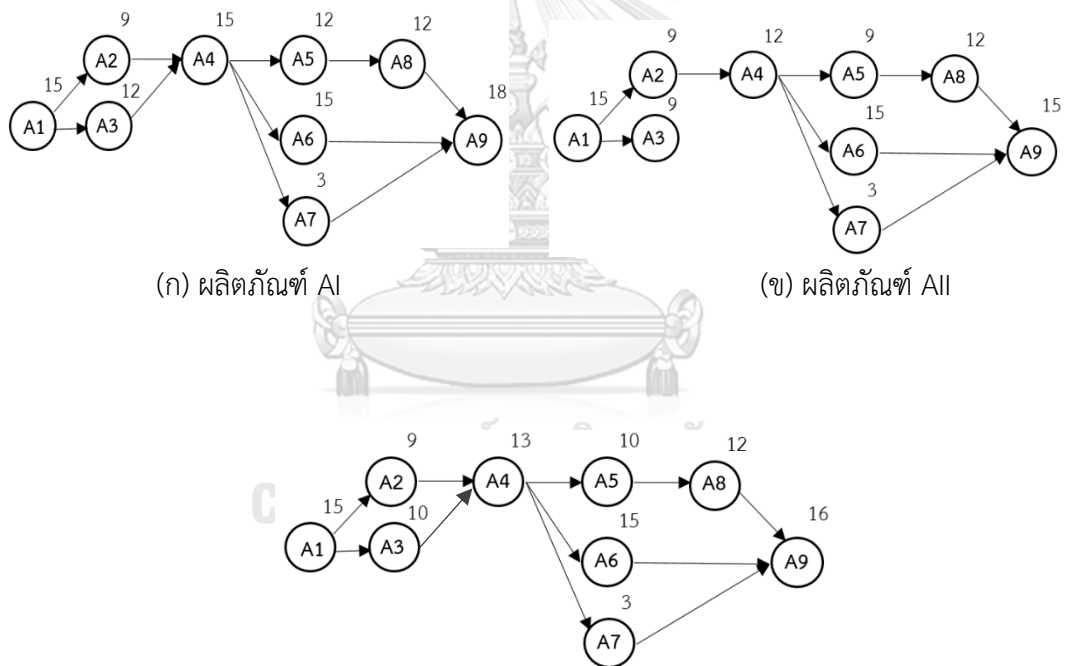
การหาเวลาชิ้นงานร่วม A3 ของผลิตภัณฑ์ A

จาก $t_i = \sum_{m=1}^M q_m \times t_{im}$ ชิ้นงานที่ A3 ของผลิตภัณฑ์ AI และ AII มีเวลาดำเนินงานเท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับ ดังนั้น เวลาชิ้นงานร่วม A3 หาได้จาก $t_{A3} = \sum_{m=1}^{M_A} q_m \times t_{A3,m} = q_{AI}t_{A3,AI} + q_{AII}t_{A3,AII} = \frac{1}{3}(12) \times \frac{2}{3}(9) = 10$ โดยที่ M_A คือจำนวนรุ่นสินค้าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ A

ตัวอย่างการคำนวณ: ผลิตภัณฑ์ B

การหาเวลาชิ้นงานร่วม B1 ของผลิตภัณฑ์ B

จาก $t_i = \sum_{m=1}^M q_m \times t_{im}$ ชิ้นงานที่ B1 ของผลิตภัณฑ์ BI และ BII มีเวลาดำเนินงานเท่ากับ 1 และ 0 ตามลำดับ ดังนั้น เวลาชิ้นงานร่วมที่ B1 หาได้จาก $t_{B1} = \sum_{m=1}^{M_B} q_m \times t_{B1,m} = q_{BI}t_{B1,BI} + q_{BII}t_{B1,BII} = \frac{1}{2}(2) \times \frac{1}{2}(0) = 1$ โดยที่ M_B คือจำนวนรุ่นสินค้าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ B



(ก) ผลิตภัณฑ์ AI

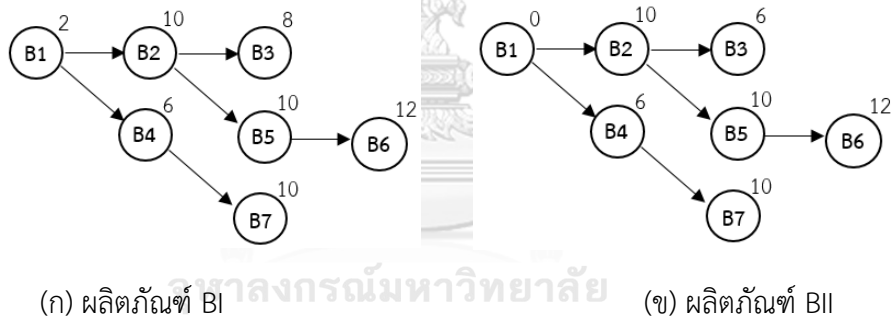
(ข) ผลิตภัณฑ์ AII

(ค) แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ AI และ AII

รูปที่ 2.11 แผนภาพลำดับก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1 (Jaeschke 9-tasks)

ตารางที่ 2.3 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1

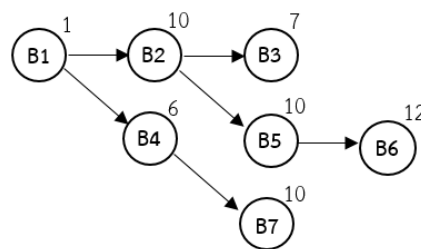
Task	Task Time		Combined Task Time ($q_{AI} = \frac{1}{3}$ $q_{AII} = \frac{2}{3}$)
	AI	AII	
A1	15	15	15
A2	9	9	9
A3	12	9	10
A4	15	12	13
A5	12	9	10
A6	15	15	15
A7	3	3	3
A8	12	12	12
A9	18	15	16



(ก) ผลิตภัณฑ์ BI

(ข) ผลิตภัณฑ์ BII

CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ค) แผนภาพลำดับก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ BI และ BII

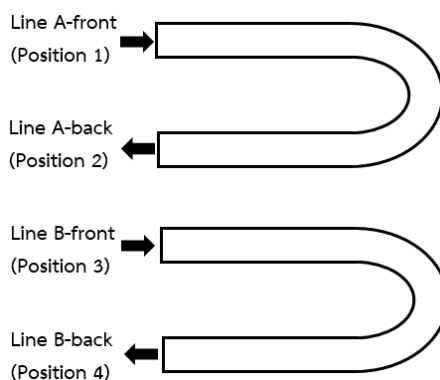
รูปที่ 2.12 แผนภาพลำดับก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 (Mertens 7-tasks)

ตารางที่ 2.4 เวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 (ต่อ)

Task	Task Time		Combined Task Time ($q_{B_I} = q_{B_{II}} = \frac{1}{2}$)
	BI	BII	
B1	2	0	1
B2	10	10	10
B3	8	6	7
B4	6	6	6
B5	10	10	10
B6	12	12	12
B7	10	10	10

2.6.3. การจัดสรรชิ้นงานภายในสถานีนงานโดยการพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีนงาน

ในการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยว เซตของชิ้นงานที่สามารถจัดสรรได้จะมาจากเซตของชิ้นงานที่ไม่มีชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้า และ ไม่มีชิ้นงานที่ต้องทำตามหลัง ดังนั้นการจัดชิ้นงานลงบนสายการประกอบรูปตัวยูจึงมีความอิสระในการจัดกลุ่มของชิ้นงานภายในสถานีนงานทั้งจากทางด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบ เมื่อนำสายการประกอบรูปตัวยูมาทำการจัดสมดุลพร้อมกัน การจัดสรรชิ้นงานจะเพิ่มความอิสระมากขึ้นและรูปตัวยูสองสายสามารถเกิดสถานีนงานร่วมกัน ทั้งนี้หากความอิสระของการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูมีมากเกินไปในบางกรณีจะทำให้เกิดสถานีนงานที่ไม่เป็นจริงได้ เช่นเกิดการรวมกลุ่มของชิ้นงานที่อยู่บนสายการประกอบด้านหน้าของทั้งสองสายการประกอบทำให้พนักงานต้องเดินทางข้ามสายการประกอบเพื่อทำชิ้นงานภายในสถานีน จึงต้องมีการกำหนดเงื่อนไขให้สอดคล้องกับความเป็นไปได้ของสถานีนงานที่จะเกิดขึ้น เพื่อลดความซับซ้อนจึงขอกำหนดแต่ละด้านของสายการประกอบที่ผลิตผลิตภัณฑ์ A และ B เป็นหมายเลขตำแหน่งดังรูปที่ 2.13 โดยเรียกสายการประกอบที่ 1 ซึ่งผลิต ผลิตภัณฑ์ A ว่า สายการประกอบ A และสำหรับสายการประกอบที่ 2 ทำการผลิต ผลิตภัณฑ์ B จะถูกเรียกว่าสายการประกอบ B



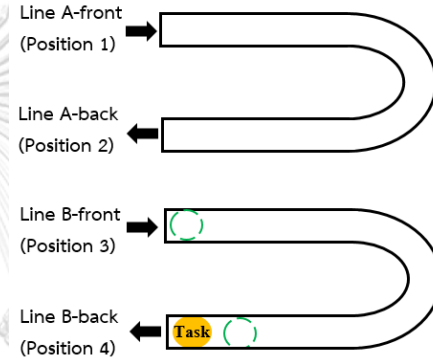
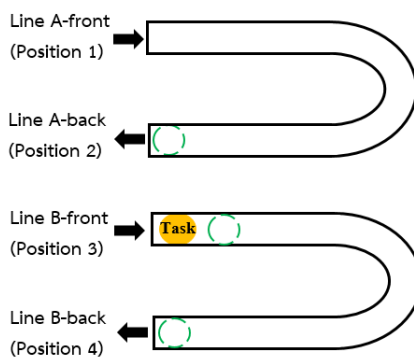
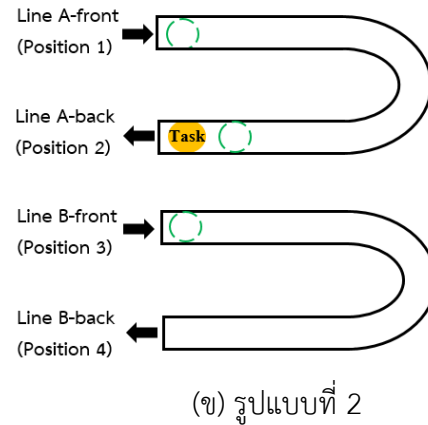
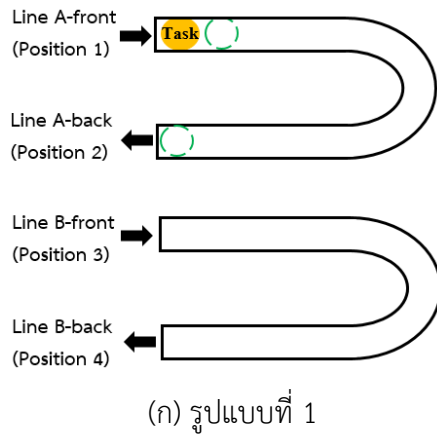
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งและด้านของคู่สายการประกอบรูปตัวยู

ตำแหน่งบนคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบ่งเป็น 4 ด้านดังนี้ 1) ด้านหน้าของสายการประกอบ A อยู่ในตำแหน่งที่ 1 2) ด้านหลังของสายการประกอบ A อยู่ในตำแหน่งที่ 2 3) ด้านหน้าของสายการประกอบ B อยู่ในตำแหน่งที่ 3 4) ด้านหลังของสายการประกอบ B อยู่ในตำแหน่งที่ 4 สำหรับเงื่อนไขของการจัดสรรชิ้นงานตามความเป็นไปได้ของสถานีงานสามารถแบ่งได้ตามสถานการณ์เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

1. ชิ้นงานหรือกลุ่มชิ้นงานที่ถูกจัดสรรแล้วอยู่บนด้านใดด้านหนึ่งของสายการประกอบ

สถานการณ์ที่ชิ้นงานอยู่บนสายการประกอบด้านเดียวเกิดจากการจัดชิ้นงานแรกลงในสถานีหรือการทยอยจัดสรรชิ้นงานบนสายการประกอบทีละ 1 ชิ้นงานแล้วมีชิ้นงานที่ถูกจัดสรรแล้วมารวมอยู่เฉพาะด้านใดด้านหนึ่งของสายการประกอบ ดังนั้นทางเลือกของชิ้นงานถัดไปที่จะถูกเลือกเพื่อนำมาจัดลงในสถานีงานจะต้องเป็นชิ้นงานที่สอดคล้องกับรูปแบบ 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.14 (ก)-(ง)

- 1) รูปแบบที่ 1: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 1 ทางเลือกของชิ้นงานที่จะถูกเลือกต่อจากนี้จะอยู่ในด้านที่ 1 หรือ 2
- 2) รูปแบบที่ 2: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 2 ทางเลือกของชิ้นงานที่จะถูกเลือกต่อจากนี้จะอยู่ในด้านที่ 1,2 หรือ 3
- 3) รูปแบบที่ 3: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 3 ทางเลือกของชิ้นงานที่จะถูกเลือกต่อจากนี้จะอยู่ในด้านที่ 2,3 หรือ 4
- 4) รูปแบบที่ 4: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 4 ทางเลือกของชิ้นงานที่จะถูกเลือกต่อจากนี้จะอยู่ในด้านที่ 3 หรือ 4



(ค) รูปแบบที่ 3

(ง) รูปแบบที่ 4

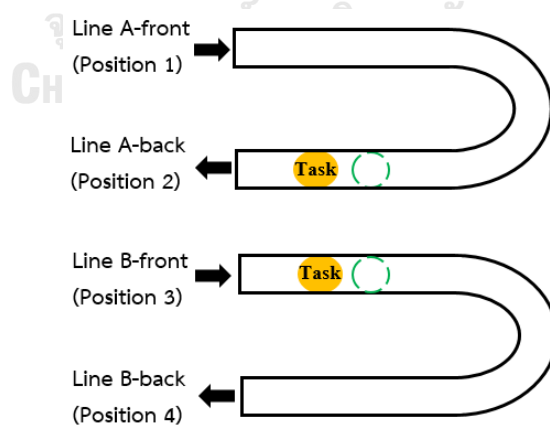
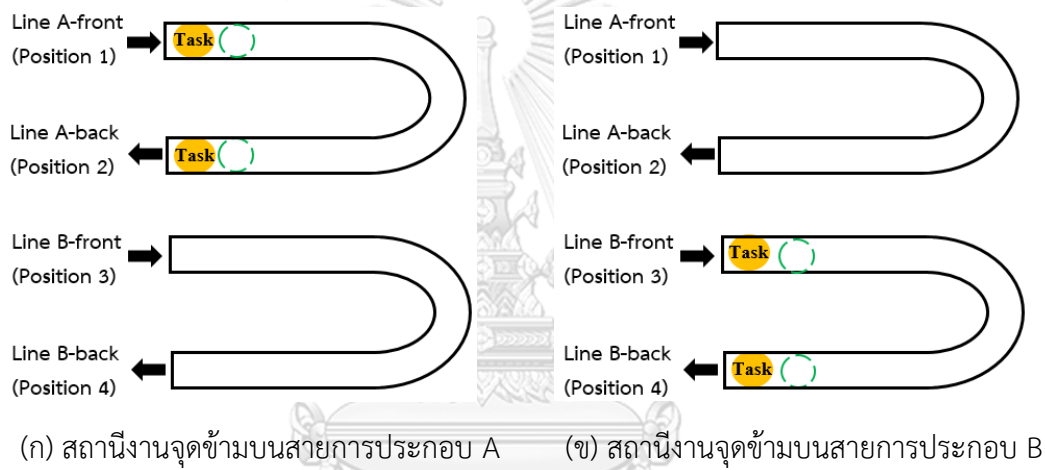
รูปที่ 2.14 รูปแบบการจัดสรรชั้นงานภายในสถานีนงานที่เป็นไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ชั้นงานหรือกลุ่มชั้นงานที่ถูกจัดสรรแล้วอยู่บนสองด้านของสายการประกอบ

หลังจากการจัดสรรชั้นงานตามรูปแบบที่เป็นไปได้ 4 รูปแบบในข้อที่ 1 แล้วพบว่าในสถานีนงานมีชั้นงานที่อยู่บนสองด้านของสายการประกอบซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะเป็นการกำหนดประเภทของสถานีนงานซึ่งคู่สายการประกอบรูปตัวยูสามารถเกิดสถานีนงานที่อยู่บน 2 ด้านของสายการประกอบได้ 3 รูปแบบได้แก่ 1) สถานีนงานจุดข้ามบนสายการประกอบ A 2) สถานีนงานจุดข้ามบนสายการประกอบ B และ 3) สถานีนงานร่วมระหว่างคู่สายการประกอบ เมื่อเกิดสถานการณ์ที่เป็นการกำหนดรูปแบบของสถานีนงานแล้วชั้นงานถัดไปที่จะเลือกมาจัดสรรได้จะต้องถูกจัดสรรลงในด้านที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบสถานีนงานแล้วเท่านั้น ดังนี้

- 1) สถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบ A: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 1 และ 2 ทางเลือกของชิ้นงานถัดไปจะถูกจัดลงสถานีงานในด้านที่ 1 หรือ 2 ดังรูป 2.15 (ก)
- 2) สถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบ B: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 3 และ 4 ทางเลือกของชิ้นงานถัดไปจะถูกจัดลงสถานีงานในด้านที่ 1,2 หรือ 3 ดังรูป 2.15 (ข)
- 3) สถานีงานร่วมระหว่างคู่สายการประกอบ: ชิ้นงานที่ได้รับการจัดสรรแล้วอยู่บนด้านที่ 2 และ 3 ทางเลือกของชิ้นงานถัดไปจะถูกจัดลงสถานีงานในด้านที่ 2,3 หรือ 4 ดังรูป 2.15 (ค)



รูปที่ 2.15 รูปแบบการจัดสรรชิ้นงานภายในสถานีงานที่เป็นไปได้

2.6.4. การถอดรหัสสตริงคำตอบ

ในแต่ละชั้นงานนั้นจะมีการระบุลำดับความสำคัญของชั้นงานหรือเรียกว่าค่าสัทธิในการเลือกงาน (Priority) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง n เมื่อ n เป็นจำนวนชั้นงานทั้งหมด โดยงานที่มีความสำคัญมากที่สุดจะมีค่าสัทธิที่น้อยที่สุด ดังนั้นสตริงคำตอบจะระบุค่าสัทธิของงานที่ในการถูกเลือกไปจัดสรรลงสถานีนงาน เช่น ถ้าในขณะที่กำลังพิจารณา มีงานที่สามารถจัดลงสถานีนงานได้หลายงาน งานที่มีค่าสัทธิน้อยกว่าจะถูกเลือกก่อน ตัวอย่างสตริงคำตอบเป็นดังตารางที่ 2.5 ซึ่งมีจำนวนชั้นงานทั้งหมด 16 ชั้นงานจึงแบ่งออกเป็น 16 บิต สตริงคำตอบเริ่มต้นจะสร้างโดยการสุ่มค่าสัทธิตั้งแต่ 1 ถึง 16 ให้กับแต่ละชั้นงาน ซึ่งแต่ละชั้นงานจะมีค่าสัทธิไม่ซ้ำกัน การจัดสรรชั้นงานลงสถานีนงานจะมีข้อจำกัดด้านตำแหน่งของชั้นงานที่จัดลงได้เพื่อให้พนักงานในสถานีนงานร่วมและสถานีนจุดข้ามสามารถทำงานได้บนสายการประกอบด้านที่อยู่ติดกันและสถานีนงานทั้งสองรูปแบบนี้จะอยู่ในตำแหน่งที่เอียงกันได้ไม่เกิน 1 สถานีนงาน

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสตริงคำตอบของการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบผลิตภัณฑ์ผสม

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12

กระบวนการถอดรหัสสตริงคำตอบในขั้นแรกจะพิจารณางานที่สามารถจัดลงสถานีนงานได้โดยไม่ผิดลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลัง ซึ่งจะทำโดยการพิจารณาประกอบกับแผนภาพชั้นงานรวม และหลังจากนั้นจะจัดชั้นงานให้เป็นไปตามข้อจำกัดต่างๆของชั้นงานโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) จัดทำรายการชั้นงานที่สามารถเริ่มได้ (Assignable Task List) โดยการหาเซตของชั้นงานที่สามารถเริ่มได้ก่อนจากทางด้านหน้าของสายการประกอบซึ่งเป็นชั้นงานที่ไม่มีชั้นงานก่อนหน้า และหาเซตของชั้นงานที่สามารถเริ่มได้จากทางด้านหลังของสายการประกอบโดยเป็นชั้นงานที่ไม่มีชั้นงานที่ต้องทำต่อจากนี้ ซึ่งในการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูไปพร้อมกันสามารถหาเซตของชั้นงานที่เริ่มได้ ดังนี้ กำหนดให้

S1 เป็นเซตของชั้นงานที่เริ่มได้จากทางด้านหน้า Line A

S2 เป็นเซตของชั้นงานที่เริ่มได้จากทางด้านหลัง Line A

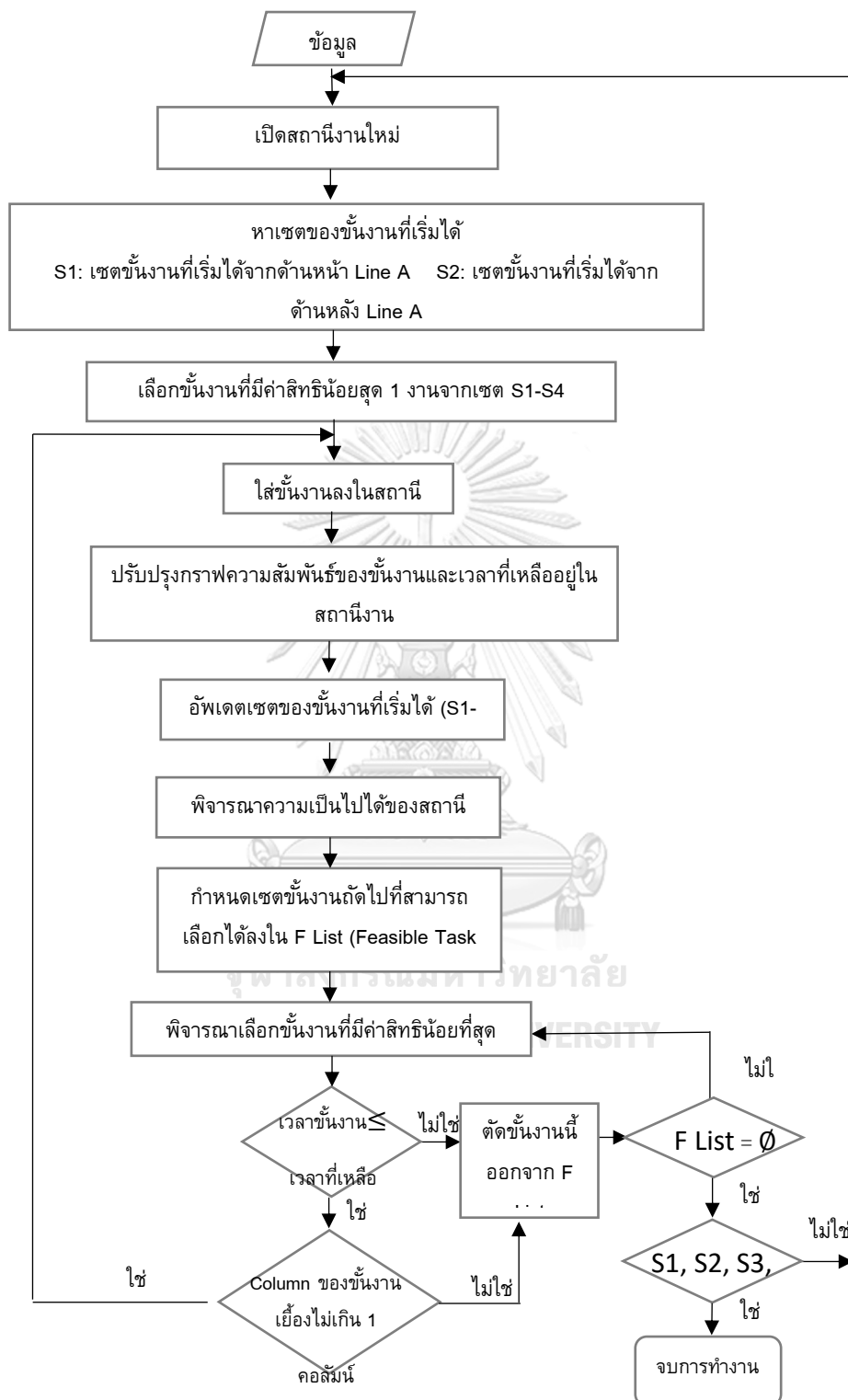
S3 เป็นเซตของชั้นงานที่เริ่มได้จากทางด้านหน้า Line B

S4 เป็นเซตของชั้นงานที่เริ่มได้จากทางด้านหลัง Line B

- 2) เปิดสถานีนงาน

- 3) เลือกชั้นงานแรกเพื่อจัดลงในสถานีจากเซตชั้นงานที่สามารถเริ่มได้ S1-S4 ในข้อที่ 1 โดยชั้นงานที่มีค่าสิทธิ (Priority) น้อยจะถูกเลือกจัดลงในสถานีงานก่อน
- 4) ปรับปรุงแผนภาพความสัมพันธ์ของชั้นงาน โดยการตัดชั้นงานที่ถูกเลือกแล้วออกจากแผนภาพความสัมพันธ์ชั้นงาน และคำนวณเวลาที่เหลือสำหรับจัดสรรชั้นงานในสถานีงาน
- 5) อัปเดตเซตของชั้นงานที่เริ่มได้ S1-S4 ตามข้อที่ 1
- 6) พิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีงานตามหัวข้อที่ 2.6.3 แล้วกำหนดเซตของชั้นงานถัดไปที่สามารถเลือกได้ลงในรายการ F List (Feasible Task List)
- 7) พิจารณาเลือกชั้นงานใน F List ที่มีค่าสิทธิ (Priority) น้อยที่สุด
- 8) ถ้าชั้นงานที่พิจารณาเลือกไม่ตรงตามเงื่อนไขข้อจำกัด ดังต่อไปนี้ให้ตัดชั้นงานนี้ออกจาก F List
 - 1) เวลาชั้นงานที่ถูกเลือกต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับเวลาที่เหลืออยู่ในสถานีงาน
 - 2) เมื่อจัดชั้นงานลงสถานีงานที่ถูกเลือกแล้วชั้นงานในสถานีงานจะต้องอยู่ห่างกันไม่เกิน 1 คอลัมน์

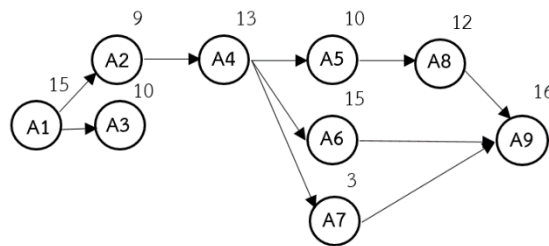
หากมีการตัดชั้นงานที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขแล้วจะกลับไปเลือกงานใหม่ใน F list ที่มีค่าสิทธิน้อยรองลงมาตามข้อ 7
- 9) ถ้าชั้นงานที่พิจารณาเลือกตรงตามเงื่อนไขข้อที่ 8 จะใส่ชั้นงานที่ถูกเลือกลงในสถานีและวนซ้ำกลับไปทำในข้อที่ 4
- 10) หากไม่มีชั้นงานที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนดในข้อที่ 8 แล้ว จะไม่มีงานที่สามารถจัดลงในสถานีงานได้ (F list = \emptyset) จะทำการขึ้นสถานีงานใหม่ตามข้อที่ 2
- 11) หากชั้นงานถูกจัดสรรจนครบแล้วจะจบการทำงาน
- 12) ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์



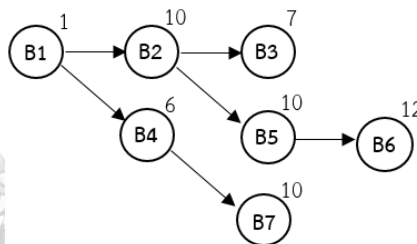
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนการจัดสรรชั้นงานลงสถานีนงาน

2.6.5. ตัวอย่างการถอดรหัสสตรึงคำตอบ

ในตัวอย่างนี้จะเป็นการถอดรหัสสตรึงคำตอบของคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งมีแผนภาพความลำดับความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมและเวลาชิ้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ A และ B เป็นดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แผนภาพความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A

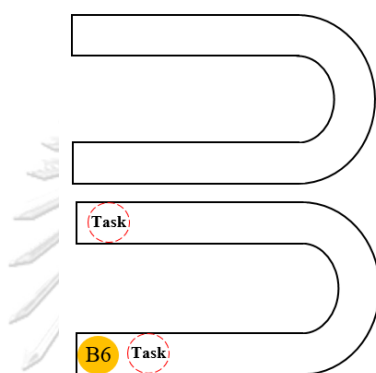


รูปที่ 2.18 แผนภาพความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ B

โดยในที่นี้จะเรียกสายการประกอบที่ 1 ซึ่งผลิต ผลิตภัณฑ์ A ว่า สายการประกอบ A และสำหรับสายการประกอบที่ 2 ทำการผลิต ผลิตภัณฑ์ B จะถูกเรียกว่าสายการประกอบ B กำหนดให้รอบเวลาการผลิตรวม เท่ากับ 30 หน่วยเวลา เริ่มต้นพิจารณาชิ้นงานที่ไม่มีชิ้นงานที่ต้องทำก่อนหน้าบนสายการประกอบ A ได้แก่ ชิ้นงาน A1 และ ชิ้นงานที่ไม่มีงานตามหลัง ได้แก่ A9 จากนั้นพิจารณาชิ้นงานบนสายการประกอบ B ในแบบเดียวกัน ซึ่งชิ้นงาน B1 เป็นชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้จากทางด้านหน้าของสายการประกอบ และชิ้นงาน B3 B6 B7 เป็นชิ้นงานที่เริ่มได้จากทางด้านหลังของสายการประกอบ B ดังนั้นรายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 1 มีค่าลำดับความสำคัญของชิ้นงาน (Priority) มีสตรึงคำตอบที่เป็นค่าสิทธิ และเวลาในการปฏิบัติงานดังตารางที่ 2.7

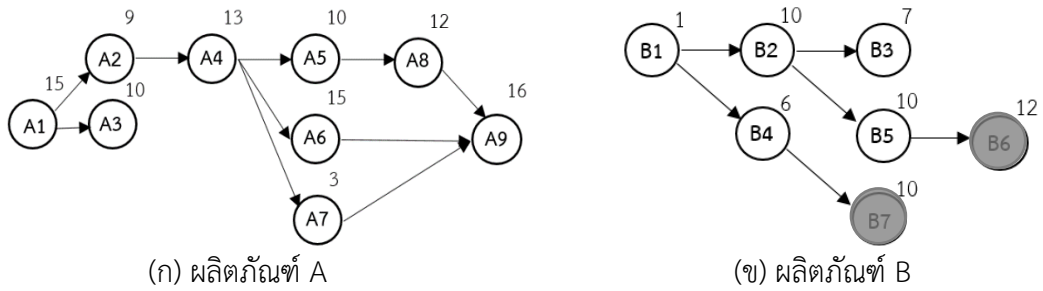
ตารางที่ 2.8 รายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 2

รอบที่	List	Assignable Task List			
		Line A		Line B	
		Front Line A	Back Line A	Front Line B	Back Line B
2	Task	A1	A9	B1	B3, B5, B7
	Priority	8	6	5	7 14 <u>3</u>
	Processing Time	15	16	1	7 10 <u>10</u>



รูปที่ 2.20 ตำแหน่งชิ้นงานถัดไปที่สามารถเลือกได้ในรอบที่ 2

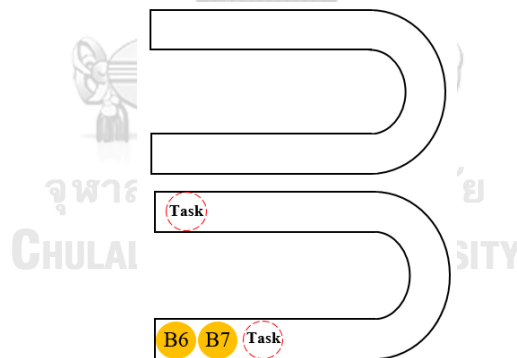
ในการเลือกชิ้นงานถัดไปหลังจากชิ้นงานแรกถูกจัดลงบนสายการประกอบจะพิจารณาเซตของชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 2 ตามตารางที่ 2.8 แล้วทำการพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีงาน จากรูปที่ 2.20 ตำแหน่งของชิ้นงานที่ถูกจัดสรรลงสถานีแล้ว ในที่นี้ B6 เป็นชิ้นงานที่ถูกจัดสรรแล้วอยู่ด้านหลังของสายการประกอบ B ดังนั้นทางเลือกของชิ้นงานถัดไปที่สามารถเลือกได้จะเป็นชิ้นงานที่จัดลงสายการประกอบ B ได้จากทางด้านหน้า หรือ ด้านหลังสายการประกอบ ซึ่งในที่นี้พบว่าชิ้นงาน B7 ซึ่งมีค่าสิทธิน้อยที่สุดจึงถูกพิจารณาจัดลงในสถานีงาน โดยมีเวลาดำเนินงานเท่ากับ 10 จากนั้นปรับปรุงเวลาคงเหลือของสถานีงาน ปรับปรุงแผนภาพความสัมพันธ์ของงานดังรูปที่ 2.21 และทำการอัปเดตรายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ตามตารางที่ 2.9 ด้านล่าง



รูปที่ 2.21 แผนภาพความสัมพันธ์ขึ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่ถูกปรับปรุงหลังจากรอบที่ 2

ตารางที่ 2.9 รายการขึ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 3

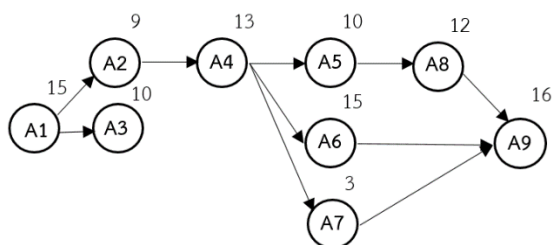
รอบที่	List	Assignable Task List			
		Line A		Line B	
		Front Line A	Back Line A	Front Line B	Back Line B
3	Task	A1	A9	B1	B3, B5, B4
	Priority	8	6	5	7 14 2
	Processing Time	15	16	1	7 10 10



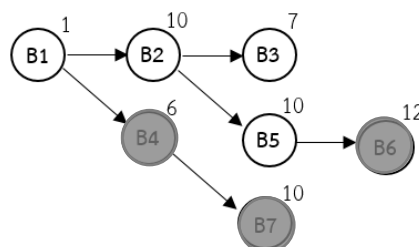
รูปที่ 2.22 ตำแหน่งขึ้นงานถัดไปที่สามารถเลือกได้ในรอบที่ 3

เลือกขึ้นงานถัดไปโดยการพิจารณาเซตของขึ้นงานที่สามารถเริ่มได้ดังตารางที่ 2.9 แล้วทำการพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีนางดังรูปที่ 2.22 โดยที่ขึ้นงานที่อยู่ในสถานีนางปัจจุบันคือ B6 และ B7 ซึ่งอยู่ด้านหลังของสายการประกอบ B ดังนั้นขึ้นงานถัดไปที่เป็นไปได้คือ ขึ้นงานที่สามารถจัดลงจากทางด้านหน้า หรือ หลังของสายการประกอบ B ดังนั้นขึ้นงานที่เป็นไปได้คือ B4 ซึ่งมีค่าสิทธิที่น้อยที่สุดจึงถูกพิจารณาจัดลงในสถานีนางโดยขึ้นงานมีเวลาดำเนินงานเท่ากับ 10 จากนั้นปรับปรุง

เวลาคงเหลือของสถานีงาน ปรับปรุงแผนภาพความสัมพันธ์ของงานดังรูปที่ 2.23 และทำการอัปเดตรายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 4 ตามตารางที่ 2.10 ด้านล่าง



(ก) ผลิตภัณฑ์ A



(ข) ผลิตภัณฑ์ B

รูปที่ 2.23 แผนภาพความสัมพันธ์ชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่ได้จากการปรับปรุงหลังจากรอบที่ 3

ตารางที่ 2.10 รายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ในรอบที่ 4

รอบที่	List	Assignable Task List			
		Line A		Line B	
		Front Line A	Back Line A	Front Line B	Back Line B
4	Task	A1	A9	B1	B3, B5
	Priority	8	6	5	7 14
	Processing Time	15	16	1	7 10

เลือกชิ้นงานถัดไปโดยการพิจารณาเซตของชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ดังตารางที่ 2.10 แล้วทำการพิจารณาความเป็นไปได้ของสถานีงานตามโดยที่ชิ้นงานที่อยู่ในสถานีงานปัจจุบันคือ B6, B7 และ B4 ซึ่งอยู่ด้านหลังของสายการประกอบ B ดังนั้นชิ้นงานถัดไปที่เป็นไปได้คือ ชิ้นงานที่สามารถจัดลงจากทางด้านหน้า หรือ หลังของสายการประกอบ B ดังนั้นชิ้นงานที่เป็นไปได้คือ B1 ซึ่งมีค่าสัทธิที่น้อยที่สุดจึงถูกพิจารณาจัดลงในสถานีงานโดยชิ้นงานมีเวลาดำเนินงานเท่ากับ 1

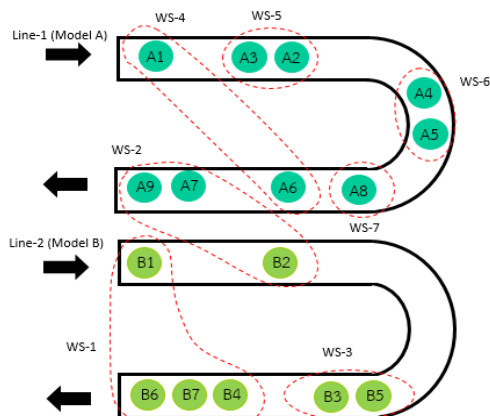
จากนั้นปรับปรุงเวลาคงเหลือของสถานีงาน ปรับปรุงแผนภาพความสัมพันธ์ของงาน และทำการอัปเดตรายการชิ้นงานที่สามารถเริ่มได้ แล้วทำการพิจารณาชิ้นงานถัดไปที่เป็นไปได้ตามหลักการเดิมโดยชิ้นงานต้องมีเวลาดำเนินงานน้อยกว่าหรือเท่ากับเวลาที่เหลืออยู่ในสถานีงาน และหากชิ้นงานนั้นถูกจัดลงสายการประกอบจะต้องอยู่ไม่ห่างจากชิ้นงานอื่นในสถานีงานเกิน 1 คอลัมน์ หากทำการพิจารณาชิ้นงานจากเซตของชิ้นงานถัดไปที่เป็นไปได้จนกระทั่งไม่มีชิ้นงานใดที่สามารถจัดลงสถานีงานได้แล้วจะทำการขึ้นสถานีงานใหม่ และจะทำซ้ำกระบวนการเดิม จากตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่าจะมีการ

จัดสมดุลงไปทีละสถานีงาน หากชั้นงานทั้งหมดถูกจัดลงสถานีงานครบแล้วจะจบการทำงาน และ
กระบวนการจัดสรรชั้นงานทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 2.11 ด้านล่าง

ตารางที่ 2.11 กระบวนการจัดสรรชั้นงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู

Work station	งานที่สามารถเริ่มได้				Select	เวลา ชั้น งาน	เวลา เหลือ
	ผลิตภัณฑ์ A		ผลิตภัณฑ์ B				
	ลำดับงาน ด้านหน้า	ลำดับงาน ด้านหลัง	ลำดับงาน ด้านหน้า	ลำดับงานด้านหลัง			
1	A1	A9	B1	B3, B6, B7	B6	12	18
	A1	A9	B1	B3, B5, B7	B7	10	8
	A1	A9	B1	B3, B5, B4	B4	6	2
	A1	A9	B1	B3, B5	B1	1	<u>1</u>
2	A1	A9	B2	B3, B5	B2	10	20
	A1	A9	B3, B5	B3, B5	A9	16	4
	A1	A8, A6, A7	B3, B5	B3, B5	A7	3	<u>1</u>
3	A1	A8, A6	B3, B5	B3, B5	B3	7	23
	A1	A6, A8	B5	B5	B5	10	13
4	A1	A8, A6	-	-	A1	15	15
	A2, A3	A8, A6	-	-	A6	15	<u>0</u>
5	A2, A3	A8	-	-	A3	10	20
	A2	A8	-	-	A2	9	11
6	A4	A8	-	-	A4	13	17
	A5	A8	-	-	A5	10	<u>7</u>
7	A8	A8	-	-	A8	12	18

โดยคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่ได้จากการถอดรหัสคำตอบนี้มีจำนวนชั้น
งานทั้งหมด 7 สถานีงานโดยแบ่งเป็น แบ่งเป็นสถานีงานปกติ 4 สถานีงานร่วม 1 สถานีงานจุดข้าม 2
สถานีได้ผลดังรูปที่ 2.24 โดยมีรายละเอียดประเภทสถานีงาน ชั้นงานที่จัดลงสถานีงาน และเวลารวม
ในการปฏิบัติงานของแต่ละสถานีงานและประเภทของสถานี ดังตารางที่ 2.12



รูปที่ 2.24 คู่มือสายการประกอบรูปตัวยูที่ได้จากการถอดรหัสสตริงคำตอบตัวอย่าง

ตารางที่ 2.12 ตารางแสดงชั้นงานในสถานีงานและประเภทของสถานีงาน

สถานีงาน	ชั้นงาน	ประเภทของสถานีงาน
1	B1(front), B6,B7,B4(back)	Crossover
2	B2,A9,A7	Multi-line
3	B3,B5	Regular on line2
4	A1(front),A6(back)	Crossover
5	A3,A2	Regular on line1
6	A4,A5	Regular on line1
7	A8	Regular on line1

2.6.6 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

หลังจากทำการถอดรหัสสตริงคำตอบในหัวข้อ 2.6.5 ได้ผลลัพธ์การจัดสมดุลแสดงดังรูปที่ 2.24 และมีชั้นงานและประเภทสถานีดังตารางที่ 2.13 สามารถนำผลลัพธ์การจัดสมดุลที่ได้มาคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แต่ละวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

ค่าวัตถุประสงค์ที่ 1 จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด (Number of Workstation : N_w)

จากตารางที่ 2.13 จำนวนสถานีบนสายการประกอบมีจำนวนทั้งหมด 7 สถานีงาน ดังนั้นจึงมีจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด N_w เท่ากับ 7

ค่าวัตถุประสงค์ที่ 2 การทำให้ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

ในการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้จะคำนวณเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานในแต่ละสถานีงานโดยคิดความน่าจะเป็นทุกกรณีที่ผลิตภัณฑ์ผสมจะเข้าสู่สายการประกอบซึ่งจะต่างกันตามประเภท

ของสถานี โดยคู่สายการประกอบรูปตัวยูสามารถแบ่ง ประเภทรูปแบบสถานีงานได้ 3 ประเภท คือ 1. สถานีงานปกติ 2. สถานีงานจุดข้าม 3. สถานีงานร่วม

สถานีงานปกติ คือ สถานีงานที่พนักงานปฏิบัติงานบนสายการประกอบเดี่ยว ดังนั้นเวลาในการปฏิบัติงานบนสายการประกอบจะมาจากความน่าจะเป็นของแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ปฏิบัติงานบนสายการประกอบเดียวกัน

สถานีงานร่วม คือ สถานีงานที่พนักงานปฏิบัติงานได้ทั้งสองสายการประกอบ ความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สถานีงานจะมาจากผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสองสายการประกอบ โดยจะมีความน่าจะเป็น 4 กรณีคือ AI_{BI} , AI_{BII} , AII_{BI} และ AII_{BII}

สถานีงานจุดข้าม คือ สถานีที่พนักงานปฏิบัติงานทั้งด้านหน้า (front) และด้านหลัง (Back) ของสายการประกอบ ซึ่งโอกาสที่ผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สถานีจะเป็นผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบเดี่ยว เช่น บนสายการประกอบที่ 1 จะมีผลิตภัณฑ์ AI และ AII แต่สามารถทำงานได้ทั้งด้าน front และ back ของสายการประกอบ ดังนั้น สถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบที่ 1 จะมีความเป็นไปได้ 4 กรณีคือ $AI_{front}AI_{back}$, $AI_{front}AII_{back}$, $AII_{front}AI_{back}$, $AII_{front}AII_{back}$ และในสถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบที่ 2 จะมี 4 กรณีคือ $BI_{front}BI_{back}$, $BI_{front}BII_{back}$, $BII_{front}BI_{back}$, $BII_{front}BII_{back}$ กำหนดให้

m_h และ m_{h+1} คือ รุ่นของสินค้าบนสายการประกอบ h , และ $h + 1$ ซึ่งเป็นคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่

วางตัวขนานกัน

M_h คือ จำนวนรุ่นผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h ,

CCT คือรอบเวลาการผลิตร่วม

TT_{k,b,m_h} คือเวลาชิ้นงานทั้งหมดในสถานีงานที่ k ซึ่งเป็นประเภท b ที่ประกอบสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ h

S_{k,b,m_h} คือค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของเวลารอบเวลาการผลิตร่วม (CCT) และเวลาชิ้นงานร่วม (TT_{k,b,m_h})

ซึ่งแบ่งตามสถานีงานประเภท b ได้แก่ สถานีงานปกติ (RW), สถานีงานร่วม (MW) และสถานี

งานจุดข้าม (CW) ตามสมการ 2.11, 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ

สถานีงานปกติ

$$S_{kbm_h} = |CCT - TT_{kbm_h}| \quad (2.11)$$

สถานีนงานร่วม

$$S_{k,b,m_h,m_{h+1}} = |CCT - TT_{k b m_h} - TT_{k b m_{h+1}}| \quad (2.12)$$

สถานีนงานจุดข้าม

$$S_{k,CW,m_{(h(front))},m_{(h(back))}} = |CCT - TT_{k b m_h(front)} - TT_{k b m_h(back)}| \quad (2.13)$$

S_{kb} คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ยที่เกิดขึ้นในสถานีนงานที่ k ประเภทที่ b ได้แก่ RW, MW, CW ซึ่ง

คำนวณได้จากนำค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในการประกอบสินค้าทุกรุ่น ($S_{k b m_h}$) จากสมการ 2.11, 2.12 และ 2.13 มาเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนสินค้าตามประเภท โดยการแทนค่าลงในสมการ 2.14, 2.15 และ 2.16 ตามประเภทของสถานีนงานจะได้ค่า

 S_{kb} สถานีนงานปกติ

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} q_{m_h} \times S_{k,RW,m_h} \quad (2.14)$$

สถานีนงานร่วม

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{k b m_{(h)} m_{(h+1)}} \quad (2.15)$$

สถานีนงานจุดข้าม

$$S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_h=1}^{M_h} q_{m_h} \times q_{m_h} \times S_{k,CW,m_{h(front)},m_{h(back)}} \quad (2.16)$$

ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) สามารถหาได้จากสมการ (2.17) เมื่อ N_w คือจำนวนสถานีนงานทั้งหมด

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} \quad (2.17)$$

ค่าความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีนงาน B_b สามารถหาได้จากสมการ (2.18) ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Vilarinho และ Simaria (2009) โดย B_b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่าที่น้อยจะแสดงถึงความสมดุลที่มาก

$$Minimize B_b = \frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \quad (2.18)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

จากตัวอย่างการถอดรหัสสตริงคำตอบ จะใช้ข้อมูลเวลาชิ้นงานที่มีการปรับตามรอบเวลาการผลิตพร้อมแล้ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 หน่วยเวลา ตามหัวข้อ 2.6.1 ดังตารางที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.13 เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบที่ 1 ที่รอบเวลาการผลิตร่วม 30 หน่วยเวลา

Task	Task Time	
	AI	All
A1	15	15
A2	9	9
A3	12	9
A4	15	12
A5	12	9
A6	15	15
A7	3	3
A8	12	12
A9	18	15

ตารางที่ 2.14 เวลาชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบที่ 2 ที่รอบเวลาการผลิตร่วม 30 หน่วยเวลา

Task	Task Time	
	BI	BII
B1	2	0
B2	10	10
B3	8	6
B4	6	6
B5	10	10
B6	12	12
B7	10	10

ค่าที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ $N_W=7$, $CCT = 30$ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A ได้แก่ $q_{A_I} = \frac{1}{3}$ $q_{A_{II}} = \frac{2}{3}$ และ สัดส่วนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B ได้แก่ $q_{B_I} = \frac{1}{2}$ จากข้อมูลการจัดสมดุลจากตัวอย่างข้างต้นจะยกตัวอย่างการคำนวณตามประเภทสถานีงาน

ได้แก่ สถานีงานปกติ สถานีงานร่วม และ สถานีงานจุดข้าม ได้แก่สถานีงานที่ 3 สถานีงานที่ 2 และ สถานีงานที่ 1ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1. คำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาผลิตและเวลาชิ้นงานรวมโดยเฉลี่ย (S_{kb}) ของสถานีงาน

สถานีงานที่ 3 (สถานีงานปกติ)

จากสถานีงานที่ 3 ($k=3$) เป็นสถานีงานปกติ ($b = RW$) มีชิ้นงานที่ต้องทำได้แก่ B3 และ B5 บนสายการประกอบที่ 2 ($h=2$)

จากสูตรค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ $S_{kbm_h} = |CCT - TT_{k,b,m_h}|$

ผลิตภัณฑ์ BI : $S_{3,RW,BI_2} = |CCT - TT_{3,RW,BI_2}| = |30 - (8 + 10)| = 12$

ผลิตภัณฑ์ BII : $S_{3,RW,BII_2} = |CCT - TT_{3,RW,BII_2}| = |30 - (6 + 10)| = 14$

นำค่า S_{kbm_h} ที่คำนวณได้มาใช้ในการคำนวณค่า S_{kb} ดังนี้

จาก ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย $S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} q_{m_h} \times S_{k,RW,m_h}$

$$S_{kb} = S_{3,CW} = q_{BI} \times S_{3,RW,BI_2} + q_{BII} \times S_{3,RW,BII_2} = \frac{1}{2} \times 12 + \frac{1}{2} \times 14 = 13$$

สถานีงานที่ 2 (สถานีงานร่วม)

จากสถานีงานที่ 2 ($k=2$) เป็นสถานีงานร่วม ($b = MW$) มีชิ้นงานที่ต้องทำบนสายการประกอบที่ 2 ($h=2$) ได้แก่ B2 และชิ้นงานที่ต้องทำบนสายการประกอบที่ 1 ($h=1$) ได้แก่ A9 และ A7

จากสูตรค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ที่ $S_{k,b,m_{(h)},m_{(h+1)}} = |CCT - TT_{kbm_h} - TT_{kbm_{h+1}}|$ ดังนั้นหาค่า

เบี่ยงเบนสัมบูรณ์โดยคิดจากความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สถานีงานจะมาจากผลิตภัณฑ์ที่อยู่บน

สองสายการประกอบ โดยจะมีความน่าจะเป็น 4 กรณีคือ $AI BI$, $AI BII$, $AII BI$ และ $AII BII$

ดังนี้

ผลิตภัณฑ์ AI, BI : $S_{2,MW,AI_1,BI_2} = |CCT - TT_{2,MW,AI_1} - TT_{2,MW,BI_2}|$

$$= |30 - (18 + 3) - (10)| = 1$$

ผลิตภัณฑ์ AI, BII : $S_{2,MW,AI_1,BII_2} = |CCT - TT_{2,MW,AI_1} - TT_{2,MW,BII_2}|$

$$= |30 - (18 + 3) - (10)| = 1$$

ผลิตภัณฑ์ AII, BI : $S_{2,MW,AII_1,BI_2} = |CCT - TT_{2,MW,AII_1} - TT_{2,MW,BI_2}|$

$$= |30 - (15 + 3) - (10)| = 2$$

ผลิตภัณฑ์ AII, BII : $S_{2,MW,AII_1,BII_2} = |CCT - TT_{2,MW,AII_1} - TT_{2,MW,BII_2}|$

$$= |30 - (15 + 3) - (10)| = 2$$

นำค่า $S_{k,b,m_{(h)},m_{(h+1)}}$ ที่คำนวณได้มาใช้ในการคำนวณค่า S_{kb} ดังนี้

จาก ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย $S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{k,b,m_{(h)},m_{(h+1)}}$

$$\begin{aligned}
S_{kb} = S_{2,MW} &= (q_{AI}q_{BI} \times S_{2,MW,AI_1,BI_2}) + (q_{AI}q_{BII} \times S_{2,MW,AI_1,BII_2}) \\
&\quad + (q_{AII}q_{BI} \times S_{2,MW,AII_1,BI_2}) + (q_{AII}q_{BII} \times S_{2,MW,AII_1,BII_2}) \\
&= \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 1\right) + \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 1\right) + \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times 2\right) + \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times 2\right) \\
&= 1.67
\end{aligned}$$

สถานีงานที่ 1 (สถานีงานจุดข้าม)

จากสถานีงานที่ 1 ($k=1$) เป็นสถานีงานจุดข้าม ($b = CW$) มีชั้นงานที่ต้องทำบนสายการประกอบที่ 2 ($h=2$) ด้านหน้า (front) ได้แก่ B1 และมีชั้นงานที่ต้องทำบนสายการประกอบที่ 2 ($h=2$) ด้านหลัง ได้แก่ชั้นงาน B6, B7 และ B4 ผลิตรถยนต์ที่จะเข้าสู่สายการประกอบคือ ผลิตรถยนต์ BI และ BII แต่สามารถทำงานได้ทั้งด้าน front และ back ของสายการประกอบ ดังนั้น สถานีงานจุดข้ามบนสายการประกอบที่ 2 จะมีความเป็นไปได้ 4 กรณีคือ $BI_{front}BI_{back}$, $BI_{front}BII_{back}$, $BII_{front}BI_{back}$, $BII_{front}BII_{back}$ และสามารถหาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ได้

$$\text{จาก } S_{k,CW,m(h(front)),m(h(back))} = |CCT - TT_{k b m_h(front)} - TT_{k b m_h(back)}|$$

$$\begin{aligned}
BI_{front}BI_{back}: S_{1,CW,BI_2(front),BI_2(back)} &= |CCT - TT_{1,CW,BI_2(front)} - TT_{1,CW,BI_2(back)}| \\
&= |30 - (2) - (12 + 10 + 6)| = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
BI_{front}BII_{back}: S_{1,CW,BI_2(front),BII_2(back)} &= |CCT - TT_{1,CW,BI_2(front)} - TT_{1,CW,BII_2(back)}| \\
&= |30 - (2) - (12 + 10 + 6)| = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
BII_{front}BI_{back}: S_{1,CW,BII_2(front),BI_2(back)} &= |CCT - TT_{1,CW,BII_2(front)} - TT_{1,CW,BI_2(back)}| \\
&= |30 - (0) - (12 + 10 + 6)| = 2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
BII_{front}BII_{back}: S_{1,CW,BII_2(front),BII_2(back)} &= |CCT - TT_{1,CW,BII_2(front)} - TT_{1,CW,BII_2(back)}| \\
&= |30 - (0) - (12 + 10 + 6)| = 2
\end{aligned}$$

นำค่า $S_{k,CW,m(h(front)),m(h(back))}$ ที่คำนวณได้มาใช้ในการคำนวณค่า S_{kb} ดังนี้

$$\text{จาก ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย } S_{kb} = \sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_h=1}^{M_h} q_{m_h} \times q_{m_h} \times S_{k,CW,m_h(front),m_h(back)}$$

$$\begin{aligned}
S_{kb} = S_{2,CW} &= (q_{BI}q_{BI} \times S_{1,CW,BI_2(front),BI_2(back)}) + (q_{BI}q_{BII} \times \\
&\quad S_{1,CW,BI_2(front),BII_2(back)}) \\
&\quad + (q_{BII}q_{BI} \times S_{1,CW,BII_2(front),BI_2(back)}) + (q_{BII}q_{BII} \times \\
&\quad S_{1,CW,BII_2(front),BII_2(back)}) \\
&= \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 0\right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 0\right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 2\right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 2\right)
\end{aligned}$$

$$= 1$$

2. คำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD)

หลังจากคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (S_{kb}) ตามประเภทสถานีงานจนครบทุกสถานีแล้วจะสามารถหาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวมทุกสถานีงานได้ดังตารางที่ 2.15 โดยมีวิธีการคำนวณ ดังนี้

ตารางที่ 2.15 ตารางแสดงชั้นงานในสถานีงานและประเภทของสถานีงาน

สถานีงาน	ชั้นงาน	ประเภทของสถานีงาน	ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (S_{kb})
1	B1(front), B6,B7,B4(back)	Crossover	1
2	B2,A9,A7	Multi-line	1.67
3	B3,B5	Regular on line2	13
4	A1(front),A6(back)	Crossover	0
5	A3,A2	Regular on line1	11
6	A4,A5	Regular on line1	7
7	A8	Regular on line1	18

ดังนั้น สามารถหาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) ได้ดังนี้

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b} = 1+1.67+13+0+11+7+18 = 51.67$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } B_b &= \frac{N_w}{N_w-1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{CW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \\
 &= \frac{N_w}{N_w-1} \left[\left(\frac{S_{1,CW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 + \left(\frac{S_{2,MW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 + \left(\frac{S_{3,RW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 + \left(\frac{S_{4,CW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{S_{5,RW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 + \left(\frac{S_{6,RW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 + \left(\frac{S_{7,RW}}{TAD} - \frac{1}{N_w} \right)^2 \right] \\
 &= \frac{7}{7-1} \left[\left(\frac{1}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{1.67}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{13}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{0}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{11}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{7}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{18}{50} - \frac{1}{7} \right)^2 \right] \\
 &= \frac{7}{6} \times 0.07567 \\
 &= 0.088
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.18 ผลลัพธ์การคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานีงาน (b)	$S_{k,b}$	$\left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$
1	จุดข้าม line B	1	0.00137
2	รวม	1.67	0.01286
3	ปกติ line B	13	0.00749
4	จุดข้าม line A	0	0.02041
5	ปกติ line A	11	0.00263
6	ปกติ line A	7	0.00037
7	ปกติ line A	18	0.03054
$TAD = \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{MW} S_{k,b}$		51.67	
$\sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{CW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$			0.07567
$\frac{N_w}{N_w - 1} \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{b=RW}^{CW} \left(\frac{S_{k,b}}{TAD} - \frac{1}{N_w}\right)^2$			0.088

คำวิฤตประสงค์ที่ 3 การทำให้ความแตกต่างของภาระงานภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม ในแต่ละผลิตภัณฑ์อาจมีเวลาดำเนินงานไม่เท่ากัน จึงสามารถทำให้เกิดภาระงานที่แตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานีงานเดียวกัน ดังนั้นการทำให้เกิดความสมดุลภายในสถานีงานจึงควรมีการแบ่งภาระงานที่เท่ากันในแต่ละผลิตภัณฑ์ สำหรับคู่สายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นรูปตัวยู 2 สาย รูปแบบผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่สายการประกอบทั้งสองมีความแตกต่างกัน และแตกต่างกันไปตามประเภทสถานีงาน โดยสามารถแบ่งการคำนวณความสมดุลภายในสถานีงานออกเป็น 3 รูปแบบ คือการคำนวณความสมดุลภายในสถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 สายการประกอบที่ 2 และ ความสมดุลภายในสถานีงานที่อยู่บนสองสายการประกอบ (สถานีงานร่วม)

กำหนดให้

CCT คือรอบเวลาการผลิตร่วม

TT_{k,b,m_h} คือเวลาชิ้นงานทั้งหมดในสถานีงานที่ k ซึ่งเป็นประเภท b ที่ประกอบสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ h

M_h คือจำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h

N_h คือจำนวนสถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบ h เท่านั้น,

S_{km} คือ เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ m ในสถานีงาน k

S_{km} คือ สัดส่วนเวลาว่างงานของสินค้ารุ่น m ภายในสถานีงาน k

$B_{w,h}$ คือ ค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงานบนสายการประกอบ h

$s_{km(h)m(h+1)}$ คือ เวลาว่างงานที่เกิดจากรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m ที่อยู่บนสายการประกอบ h และ ผลิตภัณฑ์ m ที่อยู่บนสายการประกอบ $h + 1$

$S_{km(h)m(h+1)}$ คือสัดส่วนเวลาว่างงาน ในสถานีงาน k ที่เกิดจากรูปแบบการทำงานร่วมกันของสินค้ารุ่น m บนสายการประกอบ h และรุ่น m ที่อยู่บนสายการประกอบ $h + 1$

MC คือ จำนวนรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h และ $h + 1$

$(B_{w,(h,h+1)})$ คือ ค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงานบนสายการประกอบ h และ $h + 1$

$(B_{w(avg)})$ คือ ความสมดุลภายในสถานีงานเฉลี่ย $(B_{w(avg)})$

W คือจำนวนสถานีรวม

โดยเมื่อสถานีงานอยู่บนสายการประกอบเดียวซึ่ง ได้แก่ สถานีงานปกติ และสถานีงานจุดข้ามจะมีวิธีการคำนวณค่าความสมดุลภายในสถานีงาน $(B_{w,h})$ ดังนี้
หาค่า s_{km} และ S_{km} ได้จากสมการ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ

$$s_{km} = \max(0, CCT - TT_{k,b,m_h}) \quad (2.19)$$

$$S_{km} = \frac{q_m \times s_{km}}{\sum_{m=1}^{M_h} q_m \times s_{km}} \quad (2.20)$$

จากนั้นสามารถหาค่า $B_{w,h}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงานบนสายการประกอบ h ได้จากสมการ (2.21)

$$B_{w,h} = \frac{M_h}{N_h(M_h-1)} \sum_{k=1}^{N_h} \sum_{m=1}^{M_h} \left(s_{km} - \frac{1}{M_h} \right)^2 \quad (2.21)$$

สำหรับในสถานีงานร่วมจะมีผลิตภัณฑ์ที่มาจากสองสายการประกอบ ดังนั้นสามารถหาความสมดุลภายในสถานีงานร่วม $(B_{w,(h,h+1)})$ โดยคำนวณค่า $s_{km(h)m(h+1)}$ ซึ่งเป็นเวลาว่างงานที่เกิดจาก

รูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m ที่อยู่บนสายการประกอบ h และ $h + 1$ ได้จากสมการ (2.22) เมื่อ MC คือ จำนวนรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h และ $h + 1$, $S_{km(h)m(h+1)}$ คือสัดส่วนเวลาว่างงาน ในสถานีนงาน k ที่เกิดจากรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ m บนสายการประกอบ h และ $h + 1$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.23)

$$S_{km(h)m(h+1)} = \max(0, CCT - TT_{kbm_h} - TT_{kbm_{h+1}}) \quad (2.22)$$

$$S_{km(h)m(h+1)} = \frac{q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{km(h)m(h+1)}}{\sum_{m_h=1}^{M_h} \sum_{m_{h+1}=1}^{M_{h+1}} q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{km(h)m(h+1)}} \quad (2.23)$$

จากนั้นสามารถหาค่า $B_{w,(h,h+1)}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีนงานร่วม (Multi-workstation) บนสายการประกอบ h และ $h + 1$ ได้จากสมการ (2.24) เมื่อ W คือจำนวนสถานีนงานร่วม

$$B_{w,(h,h+1)} = \frac{MC}{W(MC-1)} \sum_{k=1}^W \sum_{m_h}^{M_h} \sum_{m_{h+1}}^{M_{h+1}} \left(S_{km(h)m(h+1)} - \frac{1}{MC} \right)^2 \quad (2.24)$$

เมื่อนำค่าความสมดุลของทุกสถานีนงานมาเฉลี่ย จะสามารถคำนวณวัตถุประสงค์ที่หา ได้ตามสมการที่ 2.25 ซึ่งเป็นการทำให้ความสมดุลภายในสถานีนงานเฉลี่ย ($B_{w(avg)}$) มากที่สุด

$$\text{Minimize } B_{w(avg)} = \frac{1}{T_1 + T_2 + T_{1,2}} (B_{w,h} + B_{w,h+1} + B_{w,(h,h+1)}) \quad (2.25)$$

โดยที่ $T_1 = 1 \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 1} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 1} \end{cases}$
 $T_2 = 1 \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 2} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 2} \end{cases}$
 $T_{1,2} = 1 \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีนงานร่วมบนสายการประกอบที่ 1,2} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีนงานร่วมบนสายการประกอบที่ 1,2} \end{cases}$

ตัวอย่างการคำนวณ

จากตัวอย่างการถอดรหัสตรงคำตอบ ค่าที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ $N_W=7$, $CCT = 30$ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A ได้แก่ $q_{A_I} = \frac{1}{3}$ $q_{A_{II}} = \frac{2}{3}$ และ สัดส่วนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B ได้แก่ $q_{B_I} = q_{B_{II}} = \frac{1}{2}$ เวลาชิ้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์จะใช้เวลาชิ้นงานที่มีการปรับตามรอบเวลาการผลิตพร้อมแล้ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 หน่วยเวลา ตามหัวข้อ 2.6.1 ดังตารางที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

จากข้อมูลการจัดสมดุลจากตัวอย่างข้างต้นมีขั้นตอนในการคำนวณหาค่าความสมดุลของสถานีน ได้แก่ ความสมดุลภายในสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 1 ความสมดุลภายในสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 2 ความสมดุลภายในสถานีนงานร่วมระหว่าง 2 สายการประกอบ และ หาค่าความสมดุลภายในสถานีนงานเฉลี่ย โดยตัวอย่างการคำนวณมีดังนี้

1. หาค่าความสมดุลภายในสถานีนงานบนสายการประกอบที่ 1

จากผลลัพธ์การจัดสมดุล สถานีนงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 เท่านั้น มีดังนี้

- สถานีนงานปกติ ได้แก่ สถานีนงานที่ 5,6 และ 7
- สถานีนงานจุดข้าม ได้แก่ สถานีนงานที่ 4

สถานีนงานที่ 5 (สถานีนงานปกติ)

จากสถานีนงานที่ 5 ($k=5$) อยู่บนสายการประกอบที่ 1 ($h=1$) เป็นสถานีนงานปกติ ($b = RW$)

ผลิตภัณฑ์สินค้ารุ่น AI และ AII มีชันงานที่ต้องทำได้แก่ A3 และ A2 สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$s_{km} = \max(0, CCT - TT_{k,m}) \text{ ดังนี้}$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AI: } s_{5AI} = \max(0, CCT - TT_{5,AI}) = \max(0, 30 - (12 + 9)) = 9$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AII: } s_{5AII} = \max(0, CCT - TT_{5,AII}) = \max(0, 30 - (9 + 9)) = 12$$

จากนั้นคำนวณหาค่าเวลาว่างงานตามสัดส่วนของแต่ละผลิตภัณฑ์จาก $q_m \times s_{km}$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AI: } q_{AI} \times s_{5AI} = \frac{1}{3} \times 9 = 3$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AII: } q_{AII} \times s_{5AII} = \frac{2}{3} \times 12 = 8$$

$$\text{ผลรวมของเวลาว่างงานภายในสถานีนงาน} = \sum_{m=1}^{M_h} q_m \times s_{km} = 3+8 = 11$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสัดส่วนเวลาว่างงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ (S_{km}) จาก $S_{km} = \frac{q_m \times s_{km}}{\sum_{m=1}^{M_h} q_m \times s_{km}}$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AI: } S_{km} = S_{5,AI} = \frac{3}{11}$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AII: } S_{5,AII} = \frac{8}{11}$$

จากนั้นคำนวณค่า $(S_{km} - \frac{1}{M_h})^2$ โดยที่ M_h คือจำนวนรุ่นของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h ดังนั้น

$M_1 = 2$ (จำนวนรุ่นของสินค้าบนสายการประกอบที่ 1 มี 2 รุ่น ได้แก่ AI, AII)

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AI: } (S_{5,AI} - \frac{1}{M_1})^2 = (\frac{3}{11} - \frac{1}{2})^2 = 0.0517$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AII: } (S_{5,AII} - \frac{1}{M_1})^2 = (\frac{8}{11} - \frac{1}{2})^2 = 0.0517$$

$\sum_{m=1}^{M_1} (S_{km} - \frac{1}{M_1})^2 = 0.0517+0.0517 = 0.1033$ จากนั้นทำการคำนวณค่าในสถานีนงาน 6,7 และ 4 เช่นเดียวกับสถานีนงานที่ 5 จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 2.19 และ 2.20

ตารางที่ 2.19 ค่า เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์
ภายในสถานีนงาน

Station	Cycle Time	Task	Time		Total Time		S_{km}		$q_m S_{km}$		$\sum_{m=1}^{M_1} q_m S_{km}$	$\frac{S_{km}}{\sum_{m=1}^{M_1} q_m S_{km}} = \frac{q_m S_{km}}{\sum_{m=1}^{M_1} q_m S_{km}}$	
			AI	AII	AI	AII	AI	AII	AI	AII		AI	AII
5	30	A3	12	9	21	18	9	12	3	8	11	0.0517	0.0517
		A2	9	9									
6	30	A4	15	12	27	21	3	9	1	6	7	0.1276	0.1276
		A5	12	9									
7	30	A8	12	12	12	12	18	18	6	12	18	0.0278	0.0278
4	30	A1	15	15	30	30	0	0	0	0	0**	-	-
		A6	15	15									

**หมายเหตุ ถ้า $\sum_{m=1}^{M_1} q_m S_{km} = 0$ ดังนั้น $S_{km} = \frac{0}{0}$ จึงไม่สามารถหาค่าได้ และค่า

$(S_{km} - \frac{1}{M_1})^2$ จะมีค่าเท่ากับ 0

ตารางที่ 2.20 ค่าความเบี่ยงเบนของสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์

Station	$(S_{km} - \frac{1}{M_1})^2$		$\sum_{m=1}^{M_1} (S_{km} - \frac{1}{M_1})^2$
	AI	AII	
5	0.0517	0.0517	0.1033
6	0.1276	0.1276	0.2551
7	0.0278	0.0278	0.0556
4	0	0	0
$\sum_{k=1}^{N_1} \sum_{m=1}^{M_1} (S_{km} - \frac{1}{M_1})^2$			0.4140

จากนั้นสามารถหาค่า $B_{w,h}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีนงานบนสายการประกอบ h ได้จาก $B_{w,h} = \frac{M_h}{N_h(M_h-1)} \sum_{k=1}^{N_h} \sum_{m=1}^{M_h} (S_{km} - \frac{1}{M_h})^2$ เนื่องจากจำนวนสถานีนงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 เท่านั้น มี 4 สถานีได้แก่ สถานีงานที่ 5,6,7 และ 4 ดังนั้น $N_h = N_1 = 4$ โดยมีผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 จำนวน 2 รุ่น ดังนั้น $M_1 = 2$

$$B_{w,1} = \frac{M_1}{N_1(M_1-1)} \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{m=1}^{M_1} (S_{km} - \frac{1}{M_1})^2 = \frac{2}{4(2-1)} [0.4140] = 0.2070$$

2. หาค่าความสมดุลภายในสถานีงานบนสายการประกอบที่ 2

จากผลลัพธ์การจัดสมดุล สถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 เท่านั้น มีดังนี้

- สถานีงานปกติ ได้แก่ สถานีงานที่ 2
- สถานีงานจุดข้าม ได้แก่ สถานีงานที่ 1

สำหรับการคำนวณความสมดุลภายในสถานีงานบนสายการประกอบที่ 2 จะใช้วิธีเช่นเดียวกับการคำนวณค่าความสมดุลภายในสถานีงานบนสายการประกอบที่ 1 โดยมีค่าเวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ (s_{km}) และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ (S_{km}) ดังตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.21 ค่าเวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ภายในสถานีงานบนสายการประกอบที่ 2

Station	Cycle Time	Task	Time		Total Time		S_{km}		$q_m S_{km}$		$\sum_{m=1}^{M_2} q_m S_{km}$	$\frac{S_{km}}{\sum_{m=1}^{M_2} q_m S_{km}} = \frac{q_m S_{km}}{\sum_{m=1}^{M_2} q_m S_{km}}$	
			BI	BII	BI	BII	BI	BII	BI	BII		BI	BII
1	30	B6	12	12	30	28	0	2	0	1	1	0.0000	1.0000
		B7	10	10									
		B4	6	6									
		B1	2	0									
3	30	B3	8	6	18	16	12	14	6	7	13	0.4615	0.5385
		B5	10	10									

ตารางที่ 2.22 ค่าความเบี่ยงเบนของสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบที่ 2

Station	$\left(S_{km} - \frac{1}{M_2}\right)^2$		$\sum_{m=1}^{M_2} \left(S_{km} - \frac{1}{M_2}\right)^2$
	AI	AII	
5	0.2500	0.2500	0.5000
6	0.0015	0.0015	0.0030
$\sum_{k=1}^{N_1} \sum_{m=1}^{M_1} \left(S_{km} - \frac{1}{M_1}\right)^2$			0.5030

จากนั้นสามารถหาค่า $B_{w,h}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงานบนสายการประกอบ

$$h \text{ ได้จาก } B_{w,h} = \frac{M_h}{N_h(M_h-1)} \sum_{k=1}^{N_h} \sum_{m=1}^{M_h} \left(S_{km} - \frac{1}{M_h}\right)^2$$

โดยที่ N_h คือจำนวนสถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบ h เท่านั้น ดังนั้น $N_h = N_2 = 2$ เนื่องจากจำนวนสถานีงานที่อยู่บนสายการประกอบที่ 2 เท่านั้นที่มีจำนวน 2 สถานีงาน ได้แก่ สถานีงานที่ 1 และ 3 โดยจำนวนรุ่นสินค้าบนสายการประกอบมี 2 รุ่น ($M_2 = 2$)

$$B_{w,2} = \frac{M_2}{N_2(M_2-1)} \sum_{k=1}^{N_2} \sum_{m=1}^{M_2} \left(S_{km} - \frac{1}{M_2} \right)^2 = \frac{2}{2(2-1)} [0.5030] = 0.5030$$

3. หาค่าความสมดุลภายในสถานีงานร่วมระหว่าง 2 สายการประกอบ

จากตัวอย่างนี้ สถานีงานที่ 2 คือสถานีงานร่วมที่อยู่บนสายการประกอบ 1 และ 2 สามารถคำนวณค่าความสมดุลภายในสถานีงาน ดังนี้

สถานีงานที่ 2 (สถานีงานร่วม)

จากสถานีงานที่ 2 ($k=2$) เป็นสถานีงานร่วมที่อยู่บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 ($h=1, h+1=2$) สายการประกอบที่ 1 ผลิตสินค้า 2 รุ่นคือ AI และ AII มีชิ้นงานที่ต้องทำคือ A9 A7 และสายการประกอบที่ 2 ผลิตสินค้ารุ่น BI และ BII และทำชิ้นงาน B2 ความน่าจะเป็นที่ผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สถานีงานจะมาจากผลิตภัณฑ์ที่อยู่บน 2 สายการประกอบ โดยจะมีความน่าจะเป็น 4 กรณีคือ AI BI, AI BII, AII BI และ AII BII

$$\text{คำนวณ ค่าจาก } S_{km(h)m(h+1)} = \max(0, CCT - TT_{k b m_h} - TT_{k b m_{h+1}})$$

$$\text{และ } q_{m_h} \times q_{m_{h+1}} \times S_{km(h)m(h+1)} \quad \text{ดังนี้}$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AI, BI: } S_{2,AI,BI} = \max(0, CCT - TT_{2,MW,AI_1} - TT_{2,MW,BI_2})$$

$$= \max(0, 30 - (18 + 3) - (10)) = 0$$

$$q_{AI} \times q_{BI} \times S_{2,AI,BI} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 0 = 0$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AI, BII: } S_{2,AI,BII} = \max(0, CCT - TT_{2,MW,AI_1} - TT_{2,MW,BII_2})$$

$$= \max(0, 30 - (18 + 3) - (10)) = 0$$

$$q_{AI} \times q_{BII} \times S_{2,AI,BII} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \times 0 = 0$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AII, BI: } S_{2,AII,BI} = \max(0, CCT - TT_{2,MW,AII_1} - TT_{2,MW,BI_2})$$

$$= \max(0, 30 - (15 + 3) - (10)) = 2$$

$$q_{AI} \times q_{BII} \times S_{2,AII,BI} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times 2 = \frac{2}{3} = 0.667$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ AII, BII: } S_{2,AII,BII} = \max(0, CCT - TT_{2,MW,AII_1} - TT_{2,MW,BII_2})$$

$$= \max(0, 30 - (15 + 3) - (10)) = 2$$

$$q_{AII} \times q_{BII} \times S_{2,AII,BII} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times 2 = \frac{2}{3} = 0.667$$

$$\text{ดังนั้น } \sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} \times q_{m_2} \times S_{km_1 m_2} = q_{AI} \times q_{BI} \times S_{2,AI,BI} + q_{AI} \times q_{BII} \times S_{2,AI,BII} +$$

$$q_{AII} \times q_{BI} \times S_{2,AII,BI} + q_{AII} \times q_{BII} \times S_{2,AII,BII} = 0 + 0 + 0.667 + 0.667 = 1.333$$

$$S_{2,AI,BI} = \frac{q_{AI} \times q_{BI} \times S_{2,AI,BI}}{\sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} \times q_{m_2} \times S_{km_1 m_2}} = \frac{0}{1.333} = 0$$

$$S_{2,AI,BII} = \frac{0}{1.333} = 0$$

$$S_{2,AII,BI} = \frac{0.667}{1.333} = 0.5$$

$$S_{2,AII,BII} = \frac{0.667}{1.333} = 0.5$$

หาค่า $(S_{km(h)m(h+1)} - \frac{1}{MC})^2$ โดยที่ MC คือ จำนวนรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ h และ $h + 1$ ซึ่งมี 4 รูปแบบดังการคำนวณข้างต้น ดังนั้น $MC = 4$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ } AI, BI: (S_{2,AI,BI} - \frac{1}{MC})^2 = (0 - \frac{1}{4})^2 = 0$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ } AI, BII: (S_{2,AI,BII} - \frac{1}{MC})^2 = (0 - \frac{1}{4})^2 = 0$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ } AII, BI: (S_{2,AII,BI} - \frac{1}{MC})^2 = (0.5 - \frac{1}{4})^2 = 0.0625$$

$$\text{ผลิตภัณฑ์ } AII, BII: (S_{2,AII,BII} - \frac{1}{MC})^2 = (0.5 - \frac{1}{4})^2 = 0.0625$$

$$\sum_{m_1}^{M_1} \sum_{m_2}^{M_2} (S_{km_1m_2} - \frac{1}{MC})^2 = 0 + 0.0625 + 0.0625 = 0.25 \text{ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 2.23 และ 2.24}$$

ตารางที่ 2.23 ค่า เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์และค่าสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์ภายในสถานีงาน

Station	Cycle Time	Task	Time Model A		Time Model B	
			AI	AII	BI	BII
2	30	B2	-	-	10	10
		A9	18	15	-	-
		A7	3	3	-	-
		Total Time	21	18	10	10

ตารางที่ 2.24 ค่าความเบี่ยงเบนของสัดส่วนของเวลาว่างงานในแต่ละผลิตภัณฑ์

Station 2	Total Time of Model combination			
	AI BI	AI BII	AII BI	AII BII
Cycle Time	30	30	30	30
Total Time	31	31	28	28
$S_{km(h)m(h+1)}$	0	0	2	2
$q_{m_1} \times q_{m_2} \times S_{km_1m_2}$	0	0	0.667	0.667
$\sum_{m_1=1}^{M_1} \sum_{m_2=1}^{M_2} q_{m_1} \times q_{m_2} \times S_{km_1m_2}$	1.333			
$S_{km_1m_2}$	0	0	0.5	0.5
$(S_{km_1m_2} - \frac{1}{MC})^2$	0	0	0.0625	0.0625
$\sum_{m_1}^{M_1} \sum_{m_2}^{M_2} (S_{km_1m_2} - \frac{1}{MC})^2$	0.25			

จากนั้นสามารถหาค่า $B_{w,(h,h+1)}$ ซึ่งเป็นค่าความสมดุลของภาระงานภายในสถานีงานร่วม (Multi-workstation) บนสายการประกอบ h และ $h + 1$ จาก

$$B_{w,(h,h+1)} = \frac{MC}{W(MC-1)} \sum_{k=1}^W \sum_{m(h)}^{M_h} \sum_{m(h+1)}^{M_{h+1}} \left(S_{km(h)m(h+1)} - \frac{1}{MC} \right)^2$$

โดยที่ W คือจำนวนสถานีงานในตัวอย่างนี้มี 1 สถานีคือ สถานีงานที่ 2 ดังนั้น $W = 1$, และมีจำนวนรูปแบบการทำงานร่วมกันของผลิตภัณฑ์ (MC) = 4 ดังนั้น

$$B_{w,(1,2)} = \frac{MC}{W(MC-1)} \sum_{k=1}^W \sum_{m(h)}^{M_h} \sum_{m(h+1)}^{M_{h+1}} \left(S_{km(h)m(h+1)} - \frac{1}{MC} \right)^2 = \frac{4}{1(4-1)} [0.25] = 0.333$$

4. หาค่าความสมดุลภายในสถานีงานงานเฉลี่ย

จากวัตถุประสงค์ที่ห้าคือ การทำให้ความสมดุลภายในสถานีงานเฉลี่ย ($B_{w(avg)}$) มากที่สุดซึ่งคำนวณ

$$\text{จาก } B_{w(avg)} = \frac{1}{T_1 + T_2 + T_{1,2}} (B_{w,h} + B_{w,h+1} + B_{w,(h,h+1)})$$

$$\text{โดยที่ } \begin{aligned} T_1 &= 1 \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีงานบนสายการประกอบที่ 1} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีงานบนสายการประกอบที่ 1} \end{cases} \\ T_2 &= 1 \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีงานบนสายการประกอบที่ 2} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีงานบนสายการประกอบที่ 2} \end{cases} \\ T_{1,2} &= 1 \begin{cases} 1, & \text{เมื่อเกิดสถานีงานร่วมบนสายการประกอบที่ 1,2} \\ 0, & \text{คือไม่เกิดสถานีงานร่วมบนสายการประกอบที่ 1,2} \end{cases} \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าความสมดุลภายในสถานีงานบนสายการประกอบที่ 1,2 และ สายการประกอบร่วม จะได้ $B_{w,1} = 0.2070$, $B_{w,2} = 0.5030$, $B_{w,(1,2)} = 0.333$ เมื่อ $T_1, T_2, T_3 = 1$ และ มีค่าความสมดุลภายในสถานีงานเฉลี่ย $B_{w(avg)} = \frac{1}{3} (0.2070 + 0.5030 + 0.333) = 0.3477$ ซึ่งมีตารางสรุปผลการคำนวณดังตารางที่ 2.25-2.26

ตารางที่ 2.25 เวลาในการปฏิบัติงานในสถานีงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานี งาน (b)	TT_{k,RW,m_1}		TT_{k,RW,m_2}		$TT_{k,MW,m_{1,2}}$			
		AI	AII	BI	BII	AI BI	AI BII	AII BI	AII BII
1	จุดข้าม line B	-	-	30	28	-	-	-	-
2	ร่วม	-	-	-	-	31	31	28	28
3	ปกติ line B	-	-	18	16	-	-	-	-
4	จุดข้าม line A	30	30	-	-	-	-	-	-
5	ปกติ line A	21	18	-	-	-	-	-	-
6	ปกติ line A	27	21	-	-	-	-	-	-
7	ปกติ line A	12	12	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2.26 เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ในสถานีนงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานีงาน (b)	S_{k,m_1}		S_{k,m_2}		S_{k,m_1,m_2}			
		AI	AII	BI	BII	AI BI	AI BII	AII BI	AII BII
1	จุดข้าม line B	-	-	0	2	-	-	-	-
2	รวม	-	-	-	-	0	0	2	2
3	ปกติ line B	-	-	12	14	-	-	-	-
4	จุดข้าม line A	0	0	-	-	-	-	-	-
5	ปกติ line A	9	12	-	-	-	-	-	-
6	ปกติ line A	3	9	-	-	-	-	-	-
7	ปกติ line A	18	18	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2.27 เวลาว่างงานของผลิตภัณฑ์ตามสัดส่วนการผลิต

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานีงาน (b)	$q_{m_1} S_{k,m_1}$		$q_{m_2} S_{k,m_2}$		$q_{m_1} q_{m_2} \times S_{k,m_1,m_2}$				Total
		AI	AII	BI	BII	AI BI	AI BII	AII BI	AII BII	
1	จุดข้าม line B	-	-	0	1	-	-	-	-	1
2	รวม	-	-	-	-	0	0	0.6667	0.6667	1.333
3	ปกติ line B	-	-	6	7	-	-	-	-	13
4	จุดข้าม line A	0	0	-	-	-	-	-	-	0
5	ปกติ line A	3	8	-	-	-	-	-	-	11
6	ปกติ line A	1	6	-	-	-	-	-	-	7
7	ปกติ line A	6	12	-	-	-	-	-	-	18

ตารางที่ 2.28 สัดส่วนเวลาว่างงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ในสถานีนงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานีงาน (b)	S_{k,m_1}		S_{k,m_2}		S_{k,m_1,m_2}			
		AI	AII	BI	BII	AI BI	AI BII	AII BI	AII BII
1	จุดข้าม line B	-	-	0.0000	1.0000	-	-	-	-
2	รวม	-	-	-	-	0	0	0.5	0.5
3	ปกติ line B	-	-	0.4615	0.5385	-	-	-	-
4	จุดข้าม line A	-	-	-	-	-	-	-	-
5	ปกติ line A	0.27	0.73	-	-	-	-	-	-
6	ปกติ line A	0.14	0.86	-	-	-	-	-	-
7	ปกติ line A	0.33	0.67	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 2.29 สัดส่วนเวลาว่างงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ในสถานีงานบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู

สถานีงาน (k)	ประเภทสถานีงาน (b)	$\left(S_{k,m_1} - \frac{1}{M_1}\right)^2$		$\left(S_{k,m_2} - \frac{1}{M_2}\right)^2$		$\left(S_{km_1m_2} - \frac{1}{MC}\right)^2$				Total
		AI	AII	BI	BII	AI BI	AI BII	AII BI	AII BII	
1	จุดข้าม line B	-	-	0.2500	0.2500	-	-	-	-	0.500
2	ร่วม	-	-	-	-	0.062	0.062	0.062	0.062	0.25
3	ปกติ line B	-	-	0.0015	0.0015	-	-	-	-	0.003
4	จุดข้าม line A	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	ปกติ line A	0.0517	0.0517	-	-	-	-	-	-	0.103
6	ปกติ line A	0.1276	0.1276	-	-	-	-	-	-	0.255
7	ปกติ line A	0.0278	0.0278	-	-	-	-	-	-	0.055
$B_{w,1} = \frac{M_1}{N_1(M_1-1)} \sum_{k=1}^{N_1} \sum_{m=1}^{M_1} \left(S_{km} - \frac{1}{M_1}\right)^2$										0.207
$B_{w,2} = \frac{M_2}{N_2(M_2-1)} \sum_{k=1}^{N_2} \sum_{m=1}^{M_2} \left(S_{km} - \frac{1}{M_2}\right)^2$										0.503
$B_{w,(1,2)} = \frac{MC}{W(MC-1)} \sum_{k=1}^W \sum_{m^{(h)}}^{M_h} \sum_{m^{(h+1)}}^{M_{h+1}} \left(S_{km^{(h)}m^{(h+1)}} - \frac{1}{MC}\right)^2$										0.333
$B_{w(avg)} = \frac{1}{T_1+T_2+T_{1,2}} (B_{w,h} + B_{w,h+1} + B_{w,(h,h+1)})$										0.347

คำจำกัดความที่ 4 การทำให้ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด

จากตัวอย่างการจัดสมดุลมีชิ้นงานที่เรียงต่อกันตามลำดับดังตารางที่ 2.30 และมีแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ B ดังรูปที่ 2.25

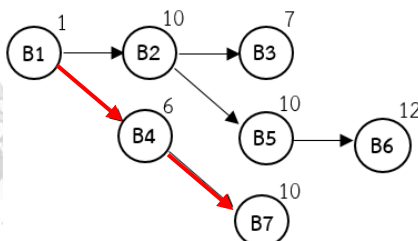
ตารางที่ 2.30 ผลลัพธ์การจัดสมดุลของคู่สายการประกอบรูปตัวยู

workstation	Select	Processing Time	Remaining Cycle Time
1	B6	12	18
	B7	10	8
	B4	6	2
	B1	1	1
2	B2	10	20
	A9	16	4
	A7	3	1
3	B5	7	23
	B5	10	13
4	A1	15	15

ตารางที่ 2.30 ผลลัพธ์การจัดสมดุลของคู่สายการประกอบรูปถ้วย

workstation	Select	Processing Time	Remaining Cycle Time
	A6	15	0
5	A3	10	20
	A2	9	11
6	A4	13	17
	A5	10	7
7	A8	12	18

ในที่นี้ สถานีงานที่ 1 มี งานต้องทำทั้งสิ้น 4 งาน เรียงลำดับก่อนหลังได้แก่ B6, B7, B4, B1 จะเห็นได้ว่าการเริ่มทำงาน B6 แล้วตามด้วย B7 นั้นไม่เกิดความสัมพันธ์ของชิ้นงาน เนื่องจาก B6 ไม่ได้เป็นชิ้นงานที่มีลูกศรเชื่อมโยงกันกับ B7 โดยตรง ดังแผนภาพความสัมพันธ์ของชิ้นงานบนสายการประกอบ B ในรูปที่ 2.25 ดังนั้นจึงไม่เกิดเครือข่ายงานซึ่งประกอบไปด้วยการทำชิ้นงาน B6 เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ [B6]



รูปที่ 2.25 แผนภาพความสัมพันธ์ของชิ้นงานรวมของผลิตภัณฑ์ B

จากนั้น พิจารณา เครือข่ายงานถัดไปที่ชิ้นงาน B7 กับชิ้นงานถัดไปคือ B4 พบว่ามีลูกศรเชื่อมต่อกันโดยตรง ดังนั้น จึงเกิดความสัมพันธ์ชิ้นงานและได้เครือข่ายงาน [B7-B4] และจากนั้น พิจารณาการทำชิ้นงาน B4 และ B1 เกิดความสัมพันธ์ของงาน เนื่องจากมีลูกศรเชื่อมโยงระหว่าง B4 และ B1 โดยตรง ดังนั้นเครือข่ายงาน จะกลายเป็น [B7-B4-B1] เนื่องจาก B1 เป็นงานสุดท้ายในสถานีงาน จึงไม่มีงานให้พิจารณาต่อ เครือข่ายงานจึงสิ้นสุดลงและได้เครือข่ายงานทั้งหมด คือ [B6] [B7-B4-B1] นับเป็นจำนวน 2 เครือข่าย เมื่อทำการพิจารณาเครือข่ายงานในสถานีงานอื่นเช่นเดียวกับสถานีงานที่ 1 จะได้เครือข่ายงาน ดังตารางที่ 2.32

ตารางที่ 2.31 การหาความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกัน

สถานีงาน	ชั้นงาน	เครือข่ายงาน	จำนวนเครือข่ายงาน
1	B6, B7, B4, B1	[B6] [B7-B4-B1]	2
2	B2, A9, A7	[B2] [A9-A7]	2
3	B3, B5	[B3-B5]	1
4	A1, A6	[A1], [A6]	2
5	A3, A2	[A3], [A2]	2
6	A4, A5	[A4-A5]	1
7	A8	[A8]	1
			$\sum_{k=1}^{N_w} SN_k$
			11
			$MIWR = N_w - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k}$
			6.3636

วัตถุประสงค์ที่ 5 ทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุด

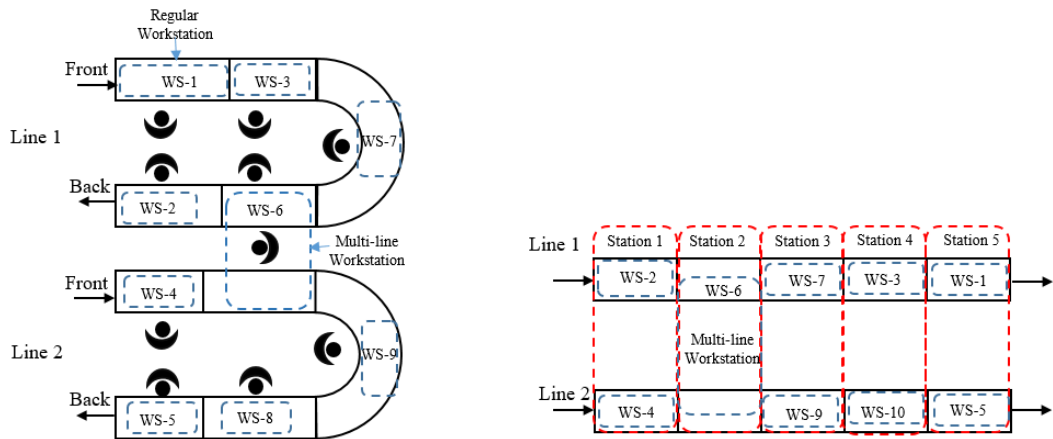
สายการประกอบรูปตัวยูสองสายที่จัดวางคู่กันจะสามารถหาความยาวของสายการประกอบโดยนับเป็นจำนวนสถานีที่เรียงยาวต่อกันในแนวนอน

ดังนั้นในวัตถุประสงค์ที่ 5 นี้จะเป็นการทำให้จำนวนสถานีน้อยที่สุดตามสมการที่ 2.26

$$\text{Minimize} : N_s \quad (2.26)$$

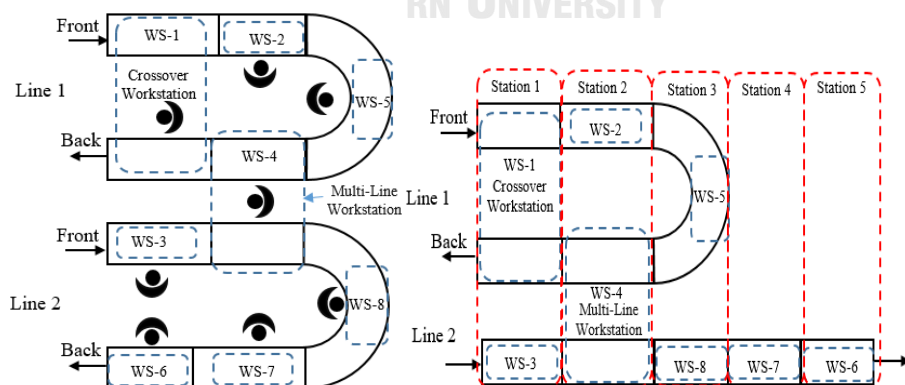
ในการจัดสมดุลทำให้เกิดคำตอบของการจัดสมดุลได้หลายรูปแบบจึงแบ่งประเภทการนับสถานีงานแบ่งเป็น 3 กรณีหลัก ดังนี้

1. สถานีงานบนสายการประกอบทั้ง 2 สายมีสถานีงานปกติ (Regular Workstation) และมีสถานีงานร่วม (Multi-line Workstation) ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.26 ซึ่งในลักษณะนี้ไม่ใช้สายการประกอบยูชานานที่แท้จริง เพราะหากทำการยึดสายการประกอบจะได้สายการประกอบเส้นตรงชานาน ดังนั้นการหาความยาวสายการประกอบจะนับจำนวนสถานีที่เรียงต่อกันในแนวนอนในลักษณะของสายการประกอบเส้นตรงชานาน จากนั้นเลือกค่าความยาวของสายการประกอบที่มากที่สุดระหว่าง 2 สายการประกอบเป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ถ้าหากสายการประกอบตามรูปที่ 2.26 ไม่มีสถานีงานร่วมเกิดขึ้นจะกลายเป็นสายการประกอบเส้นตรงสองสายซึ่งยังคงนับความยาวสถานีเหมือนเดิมดังรูปที่ 2.26



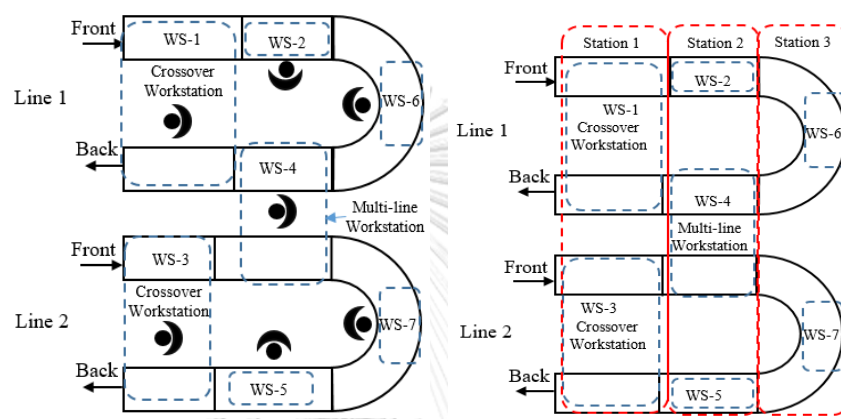
รูปที่ 2.26 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีงานปกติทั้งหมดและมีสถานีงานร่วม

- เกิดสถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) เพียงสายการประกอบเดียว และมีสถานีงานร่วม (Multi-line Workstation) ระหว่าง 2 สายการประกอบ ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 2.27 สายการประกอบลักษณะนี้จะไม่ใช่ยูชานาน แต่จะเป็นสายการประกอบรูปตัวยู ที่วางขนานกับสายการประกอบเส้นตรง ดังนั้นการหาความยาวสายการประกอบจะนับจำนวนสถานีที่เรียงต่อกันในแนวนอนในลักษณะของสายการประกอบรูปตัวยู วางคู่กับ สายการประกอบเส้นตรง จากนั้นเลือกค่าความยาวของสายการประกอบที่มากที่สุดระหว่าง 2 สายการประกอบเป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ถ้าหากสายการประกอบตามรูปที่ 2.27 ไม่มีสถานีงานร่วมเกิดขึ้นจะกลายเป็นสายการประกอบรูปตัวยูคู่กับสายการประกอบเส้นตรงซึ่งยังคงนับความยาวสถานีเหมือนเดิมดังรูปที่ 2.27

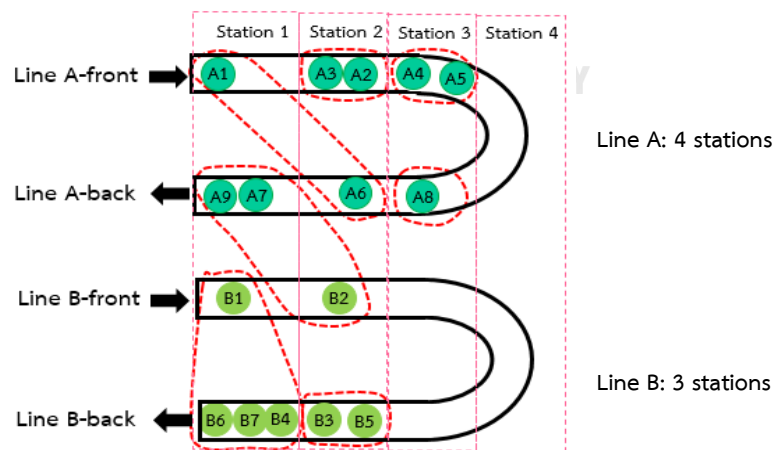


รูปที่ 2.27 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีงานปกติทั้งหมดและมีสถานีงานร่วม

3. สถานีงานบนสายการประกอบมีสถานีงานจุดข้าม (Crossover Workstation) ทั้ง 2 สายการประกอบ และมีสถานีงานร่วม (Multi-line Workstation) เป็นไปตามรูปที่ 2.28 สายการประกอบลักษณะนี้เป็นยูชานานที่แท้จริง การหาความยาวสายการประกอบจะนับจำนวนสถานีที่เรียงต่อกันในแนวนอนในลักษณะของคู่สายการประกอบรูปตัวยู จากนั้นเลือกค่าความยาวของสายการประกอบที่มากที่สุดระหว่าง 2 สายการประกอบเป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยที่ถ้าหากสายการประกอบตามรูปที่ 2.28 ไม่มีสถานีงานร่วมเกิดขึ้นจะกลายเป็นสายการประกอบรูปตัวยูสองสายซึ่งยังคงนับความยาวสถานีเช่นเดิมดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2 28 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูที่มีสถานีงานปกติทั้งหมดและมีสถานีงานร่วม ซึ่งจากผลลัพธ์การจัดสมดุลที่ได้จากตัวอย่างการถอดรหัสสตรึงคำตอบอยู่ในรูปแบบของยูชานานที่แท้จริงตามกรณีที่ 3 ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 4 Station



รูปที่ 2.29 การนับความยาวคู่สายการประกอบรูปตัวยูของตัวอย่างคำตอบ

2.7 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ

การกำหนดความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับคำตอบนั้นกล่าวอีกมุมหนึ่งก็คือการชี้วัดคุณภาพของคำตอบ มีเป้าหมายเพื่อให้ทราบว่าแต่ละคำตอบที่พิจารณาเป็นคำตอบที่ดีหรือแย่มากเพียงใดเมื่อเทียบกับคำตอบอื่นๆ ความแข็งแรงมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในหลายๆ ขั้นตอน เช่น ใช้พิจารณาจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบ ใช้การคัดเลือกประชากรคำตอบพ่อแม่ในแต่ละรอบการดำเนินการค้นหาคำตอบ ใช้เพื่อแปลงเป็นความน่าจะเป็นของแต่ละคำตอบที่จะถูกเลือกไปดำเนินการต่างๆ ระหว่างกระบวนการค้นหาคำตอบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์อาจมีความยุ่งยากและใช้เวลานานกว่ากรณีปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากในระหว่างการกำหนดความแข็งแรงจะต้องพิจารณาว่าวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกัน งานวิจัยนี้อาศัยวิธีการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการกำหนด ความแข็งแรงของคำตอบ โดยคำตอบทั้งหมดที่พิจารณาจะถูกจัดอันดับภายใต้หลักการการครอบงำเชิงพาเรโต และความแข็งแรงของแต่ละคำตอบจะถูกกำหนดขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับอันดับที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงไม่ได้ถูกประเมินจากค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบโดยตรง แต่ ประเมินจากอันดับ จึงอาจเรียกความแข็งแรงที่ประเมินได้ว่าเป็น “ความแข็งแรงไม่แท้จริง” (Dummy Fitness) วิธีการกำหนดความแข็งแรงที่ใช้นี้ชื่อว่าวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg's Ranking) หรือการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated Sorting) (Goldberg, 1989) มีขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการพิจารณาที่กราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบ ทั้งหมด คำตอบที่ไม่ได้ถูกรอบงำโดยคำตอบใดๆ เลยหรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน Pareto-optimal Front (Front ที่ 1) จะถูกจัดอันดับให้เป็นคำตอบอันดับที่ 1 จากนั้นให้ตัด คำตอบอันดับที่ 1 ออกจากการพิจารณา คำตอบในบรรดาคำตอบที่เหลือที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบใดเลยจะถูกจัดให้เป็นคำตอบอันดับที่ 2 (อยู่บน Front ที่ 2) ลำดับถัดไปก็ให้ตัดคำตอบอันดับที่ 2 ออกจากการพิจารณา และจัดอันดับคำตอบในอันดับถัดๆ ไปด้วยหลักการเดียวกันนี้จนครบ สุดท้ายแล้วให้ทำการกำหนดความแข็งแรงของแต่ละคำตอบ โดยให้มีค่าเท่ากับเลขอันดับของคำตอบนั้นหรือ เท่ากับเลขลำดับของ Front ที่คำตอบนั้นตั้งอยู่

2.8 วิธีการจำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach)

ในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ส่วนใหญ่ของอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (Evolutionary multi-objective optimization: EMO) จะอาศัยหลักการจัดอันดับคำตอบเชิงพาเรโตเป็นตัวชี้วัดด้านคุณภาพของคำตอบ ซึ่งสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในรูป

กลุ่มคำตอบที่ดี เพื่อใช้ในการประมาณของเซตของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แต่วิธีนี้จะหาคำตอบได้มีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อนำมาใช้กับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ซึ่งมีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ (Zheng et al.,2017) จึงมีการนำหลักการจำแนกวัตถุประสงค์มาประยุกต์ใช้ (Zheng and Li,2007) โดยวิธีที่นิยมใช้มี 3 วิธี ได้แก่ 1) วิธีการผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weight sum) 2) วิธีการเทบีเชฟฟ์ (Tchebycheff) 3) วิธีแยกขอบเขตและลงโทษ (Penalty-based boundary intersection) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทบีเชฟฟ์เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งหาได้พร้อมอยู่ในรูปแบบ non-convex ได้ (ในกรณีปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุด) มีหลักการคำนวณ ดังนี้

$$\text{minimize } g^{te}(x|\lambda, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_i | f_i(X) - z_i^* | \} \quad (2.27)$$

เมื่อ m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)^T$

และ $i = 1, 2, \dots, m$ กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด $z_i^* = \min\{f_i(X)\}$

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

λ คือ เวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก โดยที่ $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$

λ_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักในวัตถุประสงค์ที่ i

$$\lambda_i \geq 0 \text{ และ } \sum_i^m \lambda_i = 1$$

ซึ่งสามารถกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_j) โดยใช้วิธีการซิมเพลกแลตทิสตีไซนส์ จำนวนของเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับ ค่า H ซึ่งเป็นจำนวนช่วงในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักให้มีระยะห่างเท่าๆ ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ดังนี้ $\left\{ \frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H} \right\}$ และจำนวนเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักสำหรับ m วัตถุประสงค์ จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.28

$$N = C_{m-1}^{H+m-1} \quad (2.28)$$

2.9 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

คำตอบที่ได้จากปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์จะเป็นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบจะยอมรับได้ว่าเป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีก็ต่อเมื่อสามารถวัดสมรรถนะของคำตอบว่าใกล้เคียงกับขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือขอบเขตกลุ่มคำตอบอ้างอิง (Reference Pareto Optimal) โดยจะสามารถเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบที่หาได้จากหลายอัลกอริทึมด้วยตัววัดสมรรถนะในด้านต่างๆ เช่น การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measure) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Spread Measure) เป็นต้น (เพ็ญพัทธ์ ปันภูมิ, 2551)

งานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ การกระจายตัว อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ และเวลาในการหาคำตอบ โดยแต่ละตัวชี้วัดมีรายละเอียดดังนี้

2.9.1 ตัวชี้วัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบใช้ในการประมาณระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Pareto Front) กับคำตอบที่แท้จริง (True Pareto Front) ซึ่งถ้าหากค่า GD มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าทุกจุดของคำตอบที่อัลกอริทึมค้นพบนั้นอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (True Pareto Front) (Coello and Cortés 2005) ดังนั้นค่า GD จึงเป็นค่าที่บอกว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้อยู่ไกลจากกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากแค่ไหน

$$GD(S_j, S^*) = \frac{1}{|S_j|} \sum_{x=1}^{|S_j|} \min\{d_{xy} | y \in S^*\} \quad (2.29)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (2.30)$$

- โดยที่
- GD คือ ระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Pareto Front) กับคำตอบที่แท้จริง
 - S_j คือ กลุ่มคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
 - S^* คือ กลุ่มคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Front)
 - $|S_j|$ คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
 - $|S^*|$ คือ จำนวนคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง
 - d_{xy} คือ ระยะห่างยูคลิดีเนียนระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้กับคำตอบที่แท้จริง
 - x คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึมหาได้ โดยที่ $x = 1, 2, \dots, |S_j|$
 - y คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True Pareto) โดยที่ $y = 1, 2, \dots, |S^*|$
 - $f_k(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตัวที่ x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
 - $f_k(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่แท้จริงตัวที่ y
 - f_k^{max} และ f_k^{min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดในกลุ่มคำตอบที่

แท้จริงและกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

ทั้งนี้ ยิ่งกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่หาได้มีค่า Generational Distance ต่ำจะแสดงให้เห็นว่ามีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แท้จริง และเนื่องจากกลุ่มคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงอาจไม่สามารถหาออกมาได้ จึงอาศัยกลุ่มคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณแทน ซึ่งหาได้จากการนำเอากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของ ทุกอัลกอริทึมมารวมกัน แล้วจัดอันดับด้วยวิธีของ Goldberg โดยกลุ่มคำตอบที่อยู่บน Front ที่ 1 จะ ถูกกำหนดให้เป็นคำตอบเชิงพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ

2.9.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics)

การหาค่าระยะห่างจากคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงไปยังกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ แสดงได้ด้วยค่า IGD (Inverted Generational Distance) กำหนดให้ S^* เป็นกลุ่มคำตอบที่แท้จริง S_j เป็นกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (fitness 1) ที่ได้จากอัลกอริทึม ค่า IGD จาก P^* ไปยัง P เป็นไปตามสมการ 2.31

$$IGD(S^*, S_j) = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y=1}^{|S^*|} \min\{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (2.31)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{K=1}^K \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (2.32)$$

ซึ่ง d_{xy} เป็นระยะห่างยูคลิดีเนียนที่น้อยที่สุดระหว่าง x ซึ่งเป็นสมาชิกบนกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้และ y ซึ่งเป็นสมาชิกกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งถ้ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงมีขอบเขตที่มากพอสมควร ค่า IGD จะสามารถบอกถึงการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ ค่า IGD ที่มีค่าน้อยจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบ S_j อยู่ใกล้กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง S^* มากและเกือบจะครอบคลุมขอบเขตทั้งหมดบนกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

2.9.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้เพื่อประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึม หามาได้ (กลุ่มคำตอบ A) โดยพิจารณาจากระยะทางเฉลี่ยระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน สมการที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้ (2.33) (ดูรูปที่ 2.30 ประกอบ)

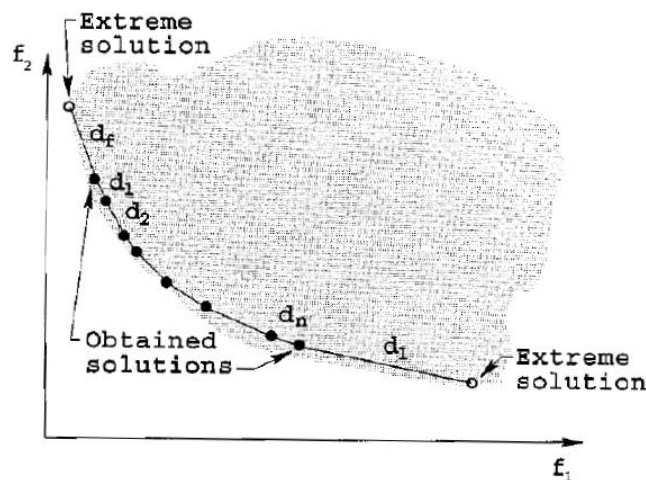
$$Spread(A) = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (2.33)$$

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

d_i คือระยะห่างเชิงยูคลีเดียน ระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้ที่อยู่ ต่อเนื่องกัน ลำดับที่ โดย $i = 1, \dots, (N - 1)$ เมื่อ N คือจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่หามาได้

\bar{d} คือระยะห่าง d_i เฉลี่ย

ค่า Spread ที่ดีที่สุดนั้นมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นได้ โดยจะเกิดขึ้นในกรณีที่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หาได้ มีคำตอบปลายสุดทั้งสองข้างอยู่บนตำแหน่งเดียวกันกับคำตอบปลายสุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ($d_f = d_l = 0$) หรือมีขอบเขตครอบคลุมขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงนั่นเอง รวมทั้งมีระยะห่างระหว่างคู่คำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันเท่ากันในทุกๆ คู่หรืออาจกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของคำตอบ ในรูปแบบยูนิฟอร์ม ทั้งนี้ ค่า Spread อาจสูงกว่า 1 ในกรณีที่กลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวที่แย่



รูปที่ 2.30 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว (Deb et al., 2002)

แต่สมการที่ 2.33 เป็นการคำนวณหาการกระจายตัวสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์เท่านั้น เมื่อทำการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 5 วัตถุประสงค์พร้อมกันจึงต้องทำการปรับปรุงสมการการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้โดยสามารถคำนวณระยะห่างระหว่างคำตอบที่ตำแหน่งกลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ กับคำตอบที่ตำแหน่งกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม $d(e_m, S_j)$ ได้ดังสมการที่ 2.34 และ คำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่ x กับคำตอบตำแหน่งที่ x_2 ได้ดังสมการที่ 2.36

$$Spread_j = \frac{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + \sum_{x=1}^{|S_j|} |d_x - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + |S_j| \bar{d}} \quad (2.34)$$

$$d(e_m, S_j) = \min_{s \in S_j} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(e_m) - f_i(s)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.35)$$

$$d_x = \min_{x_2 \in S_j, x_2 \neq x} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(x_2)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.36)$$

- เมื่อ S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม j
 S^* คือ กลุ่มคำตอบที่แท้จริง
 $|S_j|$ คือ จำนวนของกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม
 d_x คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่ x กับคำตอบตำแหน่งที่ x_2
 \bar{d} คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_x
 $d(e_m, S_j)$ คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ตำแหน่ง e_m กับคำตอบที่ตำแหน่ง S_j
 e_m คือ กลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแนววัตถุประสงค์ m ของคำตอบที่แท้จริง
 ถ้าตัววัดชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นมี

การกระจายตัวดี

2.9.4 ตัวชี้วัดอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-dominated Solutions)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้ใช้แสดงว่าในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้น มีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ คิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด โดยแบ่งค่าชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนเป็น 2 ค่าดังต่อไปนี้

1. Ratio of non-dominated solutions (self-comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (First Pareto frontier solution) ของอัลกอริทึมที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Approximated True Pareto optimum) ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Own first Pareto frontier solutions) โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.37

$$R_{NDS1} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A_j|} \quad (2.37)$$

2. Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ว่าอยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริงมีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.38

$$R_{NDS2} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A|} \quad (2.38)$$

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

A คือ เซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหามาได้ของทุกอัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน

ซึ่ง $A = A_1 \cup A_2 \dots \cup A_j$

x คือ คำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y < x$ คือ คำตอบ x ถูกครอบงำโดยคำตอบ y

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

2.9.5 ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

เวลาในการค้นหาคำตอบ คือ การพิจารณาเวลาในการค้นหากลุ่มคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยอัลกอริทึมที่ดีควรใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Askin & Zhou (1997) ได้ศึกษาการจัดสายการประกอบแบบเส้นตรงที่มีสถานีนงานขนาน โดยมีรูปแบบการผลิตเป็นแบบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรงโดยมีการเพิ่มสถานีนงานขนานในแต่ละชั้นของสายการประกอบแบบเส้นตรงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสายการประกอบได้แต่มีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นในด้านเครื่องมือหรืออุปกรณ์ งานวิจัยนี้จึงนำค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือสำหรับการเพิ่มสถานีนงานแบบขนานมาพิจารณาด้วย ซึ่งนำมาเป็นวัตถุประสงค์ของการสร้างสมการไม่เชิงเส้น และมีการใช้ฮิวริสติกช่วยในการตัดสินใจสร้างสถานีนงานขนานโดยวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายการประกอบในแต่ละสถานีนงาน

Gökçen et al. (2006) ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการทางฮิวริสติกและโมเดลทางคณิตศาสตร์ สำหรับปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบแบบขนานที่มีรูปแบบผลิตภัณฑ์เดียว ซึ่งเป็นสายการประกอบแบบเส้นตรงสองเส้นขนานกัน มีจุดประสงค์เพื่อช่วยลดเวลาว่างงานของสถานีนงานและลดจำนวนสถานีนงาน วิธีการจัดสมดุลของสายการประกอบแบ่งเป็น สองรูปแบบคือ Passive case และ Active case ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีการจัดสมดุลของสองสายการประกอบเดี่ยวร่วมกัน ทำให้สามารถรวมสถานีนงานของทั้งสองสายการประกอบเป็นสถานีนงานร่วมได้ ส่งผลให้ใช้จำนวนสถานีนงานที่น้อยกว่าการจัดสมดุลสายการประกอบเดี่ยวที่เป็นอิสระต่อกัน และยังสามารถลดเวลาว่างงานของสถานีนงานได้จึงทำให้ประสิทธิภาพของสายการประกอบเพิ่มขึ้น

Ugur Özcan et al. (2010) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองการอบอ่อน (simulated annealing) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบและจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบแบบขนานที่มีรูปแบบเป็นผลิตภัณฑ์ผสม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนสถานีนงานหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งคือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของสายการประกอบ และ เพื่อจัดสมดุลของงานภาระงานระหว่างสถานีนงาน ผลจากการจัดสมดุลสายการประกอบเส้นตรงขนานโดยการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบและการจัดลำดับการผลิตพร้อมกันส่งผลให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพที่ดี

Ming Li et al. (2017) งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการทางฮิวริสติก rules-based heuristic และกำหนดการเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม เพื่อใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูสำหรับปัญหาประเภทที่สอง (UALBP-2) ซึ่งเป็นการหารอบเวลาการผลิต เมื่อกำหนดจำนวนสถานีนงาน วิธีการทางฮิวริสติกที่ได้นำเสนอมีกฎสามข้อในการแก้ปัญหาซึ่งประกอบด้วย การเลือกงาน การจัดสรรชั้นงาน และ การสลับเปลี่ยนงาน โดยในกฎการเลือกงานสำหรับสถานีนงานจะประยุกต์ใช้วิธี

ranked positional weight ต่อมาในขั้นตอนการจัดสรรงานลงสถานีจะใช้ข้อจำกัดเพื่อให้เกิดการจัดสมดุลที่ดี เช่น การทำให้มีรอบเวลาการผลิต ใกล้เคียงกับรอบเวลาผลิตเฉลี่ยมากที่สุด หลังจากนั้นในกฎข้อที่สามจะสลับเปลี่ยนงานระหว่างสถานีปัจจุบัน และสถานีที่อยู่ถัดมาเพื่อจัดสมดุลภาระงานในแต่ละสถานีงานเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น ซึ่งกฎการสลับเปลี่ยนชั้นงานมีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากเป็นขั้นตอนปรับปรุงคำตอบให้มีประสิทธิภาพ

Cheng et al. (2000) ศึกษาผลของรูปแบบสายการผลิตในด้านคุณภาพตามปรัชญาการบริหารคุณภาพของจูนัน ได้แก่ การวางแผนคุณภาพ การควบคุมคุณภาพ และการปรับปรุงคุณภาพ เกี่ยวกับการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการสร้างตัวชี้วัดประสิทธิภาพของสายการผลิตในการเปรียบเทียบ สายการผลิตแบบเส้นตรงและแบบรูปตัวยู ตัวชี้วัดในด้านการวางแผนคุณภาพเกี่ยวข้องกับระยะทางที่ใช้ในการขนย้ายวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์รวมถึงจำนวนจุดที่เชื่อมระหว่างพนักงานในแต่ละสถานีงาน ในขั้นของการควบคุมคุณภาพจะการวัดจำนวนชั้นงานที่จะถูกตรวจสอบและโอกาสที่พนักงานจะเจอปัญหาด้านคุณภาพ สำหรับในด้านการปรับปรุงคุณภาพ ตัวชี้วัดที่ใช้ได้แก่ จำนวนพนักงานเฉลี่ยที่อยู่ติดกัน ระยะทางเฉลี่ยระหว่างสถานีงานที่อยู่ติดกัน และเวลาที่เหลือจากกระบวนการผลิตเพื่อทำกิจกรรมปรับปรุงคุณภาพ ผลจากการเปรียบเทียบชี้ให้เห็นว่าสายการผลิตแบบรูปตัวยู มีสมรรถนะเหนือกว่าสายการผลิตแบบเส้นตรงเพราะรูปแบบสายการประกอบรูปตัวยูมีความยืดหยุ่นในการผลิตมากกว่า สามารถใช้จำนวนสถานีงานน้อยกว่าแบบเส้นตรง นอกจากนี้ยังเพิ่มโอกาสในการสื่อสารระหว่างพนักงาน และมีการตรวจสอบที่มากกว่าสายการผลิตแบบเส้นตรง

Masoud Rabbani et al. (2016) งานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 1 บนสายการประกอบที่มีรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมโดยพิจารณาการจัดสรรชั้นงานลงสถานีงานในช่วงเวลาไม่คงที่ เนื่องจากมีการพิจารณาผลของแต่ละช่วงเวลาที่มิต่อช่วงเวลาถัดมา และสามารถมีสถานีงานขนานได้เมื่อชั้นงานมีเวลาดำเนินงานเกินรอบเวลาการผลิต วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบคือ เพื่อลดจำนวนสถานีงาน และเพิ่มความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงาน อัลกอริทึมที่ได้นำมาใช้ในการแก้ปัญหาคือ non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) และ Multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพบว่า NSGA-II และ MOPSO มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาและมีข้อดีที่แตกต่างกัน

Scholl and Boysen (2009) ได้สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบขนาน (PALBP) ซึ่งเป็นรูปแบบหลายผลิตภัณฑ์ โดยมีปัญหาย่อย 2 ปัญหาคือ (1) การจัดผลิตภัณฑ์ที่มีหลายรูปแบบลงบนสายการประกอบเส้นตรงขนาน (2) การจัดสมดุลสายการ

ประกอบแบบขนานมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด และจัดรูปแบบสายการประกอบในรูปแบบที่ทำให้กระชับมากที่สุดโดยเมื่อสายการประกอบอยู่ในรูปแบบ active จะมีประสิทธิภาพมากกว่า นอกจากนี้ยังได้นำเสนอวิธีการหาคำตอบโดยวิธีการแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch-and-Bound) ร่วมกับวิธีการค้นหาเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ผลจากวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถแก้ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยฮิวริสติกสามารถหาคำตอบในปัญหาขนาดใหญ่ได้ดี

David Sparling (1998) นำเสนอการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายสำหรับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี สายการประกอบรูปตัวยูจำนวน N สายที่อยู่ใกล้กันทำให้มีโอกาสในการจัดสมดุลของสายการประกอบรูปตัวยูสองสายหรือมากกว่าไปพร้อมกัน ทำให้เกิดสถานีงานร่วมระหว่างสายการประกอบ งานวิจัยนี้สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์และอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายร่วมกันโดยพิจารณาระยะเวลาการเดิน ข้อจำกัดแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบทั่วไปซึ่งไม่มีข้อจำกัดด้านตำแหน่งของสายการประกอบ และ อีกแบบหนึ่งคือสายการประกอบจะถูกกำหนดตำแหน่งไว้ ทำให้การจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายร่วมกันมีประสิทธิภาพและลดจำนวนสถานีงานได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายที่เป็นอิสระต่อกัน

Chiang et al (2004) ศึกษาการจัดสมดุลของสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายที่เป็นอิสระต่อกัน โดยสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ และใช้อัลกอริทึมการแตกกิ่งและจำกัดเขตสำหรับปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 1 (หาจำนวนสถานีงานเมื่อกำหนดรอบเวลาการผลิต) ประเภทที่ 2 (หารอบเวลาการผลิตเมื่อกำหนดจำนวนสถานีงาน) และ การลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือสำหรับการจัดสมดุลสายการประกอบ ซึ่งมีข้อจำกัดในกรณีที่สายการประกอบหลายสายมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ และกรณีที่จำนวนสถานีงานไม่เท่ากัน ผลจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายการประกอบแสดงให้เห็นว่าสายการประกอบรูปตัวยูแบบหลายสายที่เป็นอิสระต่อกันสามารถลดจำนวนสถานีงานได้มากกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรงและรูปตัวยูแบบเดี่ยวรวมถึงสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือได้มากกว่า

Kucukkoc and Zang (2015) ศึกษาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูแบบขนาน (Parallel U-shaped assembly line) ที่มีรูปแบบผลิตภัณฑ์เดียว ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสองสายการประกอบเป็นคนละชนิดกัน ซึ่งเป็นการรวมข้อดีของสายการประกอบรูปตัวยูและสายการประกอบแบบขนานไว้ด้วยกัน โดยทำให้เกิดสถานีงานร่วม (Multi-line station) ระหว่างสองสายการประกอบ

ที่ขนานกัน และยังสามารถเกิดสถานีงานจุดข้าม (Crossover station) บนสายการประกอบรูปตัวยูเดียวกัน มีวัตถุประสงค์คือ เพื่อลดจำนวนสถานีงาน โดยสร้างฮิวริสติกในการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวแบบขนานซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้วิธี Ranked positional weight และวิธี Maximum number of immediate successors ในการหาคำตอบ ผลที่ได้คือสามารถลดจำนวนสถานีงานได้มากกว่าการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวแบบเดี่ยวที่เป็นอิสระต่อกัน

Miltenburg and Wijngaard (1994) ศึกษาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้วิธี Dynamic programming ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด และฮิวริสติกที่ใช้คือ Modification maximum ranked positional weight สำหรับจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยู และใช้ Standard ranked positional weight ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบเส้นตรงส่งผลให้สายการประกอบรูปตัวยูใช้สถานีงานน้อยกว่า

Gökçen et al. (2005) ศึกษาการจัดลำดับงานที่ดีที่สุด (shortest route formulation) สำหรับสายการประกอบรูปตัวยู ใช้วิธีการสร้าง Shortest route model โดยพัฒนาจากอัลกอริทึม Shortest route in direct network ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบเส้นตรง โดยพิจารณาทางเลือกของการจัดลำดับชั้นงานสำหรับแต่ละสถานีงานเพื่อให้มีเวลารอว่างงานน้อยที่สุด รวมถึงมีสถานีงานน้อยที่สุด โดยมีการหากลุ่มของชั้นงานที่เป็นไปได้ในแต่ละชั้นของการจัดลำดับงาน ซึ่งสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solution) จากปัญหา 7 ชั้นงาน โดยได้จำนวน 4 สถานีงาน

Liao, Tseng and Luarn (2007) งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (A discrete version of particle swarm optimization : DPSO) ซึ่งอัลกอริทึมใช้หลักการที่เลียนแบบพฤติกรรมของฝูงนก โดยใช้แก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตสำหรับระบบผลิตแบบไหลเลื่อนซึ่งใช้หลักการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการสร้างลำดับงานใหม่ โดยซึ่งมีการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมโดยเปรียบเทียบกับ อัลกอริทึมฝูงอนุภาคแบบต่อเนื่อง (Continuous PSO algorithm) และ เจนเนติกอัลกอริทึม (GA) นอกจากนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาเฉพาะที่สำหรับ PSO ซึ่งเรียกว่า PSO-LS งานวิจัยชี้ให้เห็นว่า DPSO มีประสิทธิภาพมากกว่า GA และ PSO-LS ดีกว่า PSO ในบางปัญหา

Zhang et al. (2007) นำเสนอ Genetic Evolutionary Multi-objective Optimization Algorithm Based on Decomposition (MOEA/D) ที่จำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ให้เป็น

ปัญหาย่อยๆ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MOEA/D กับ MOGLs และ NSGA-II ในปัญหาหลายวัตถุประสงค์ในรูปแบบปัญหา 0/1 Knapsack Problem (Multi-objective 0-1 Knapsack Problem : MOKP) และ ปัญหาหลายวัตถุประสงค์แบบต่อเนื่อง (Continuous multi-objective problem) พบว่า MOEA/D มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่า NSGA-II และ MOGLs และได้คำตอบที่ดีกว่าในปัญหาส่วนใหญ่



บทที่ 3

การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคในการแก้ปัญหาการจัดสมดุกลุ่มสายการประกอบรูปตัวยู

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมและตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุกลุ่มสายการประกอบรูปตัวยู

3.1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm: PSO) ถูกคิดค้นโดย Kennedy and Eberhart (1995) เป็นอัลกอริทึมที่เลียนแบบพฤติกรรมการเคลื่อนที่และรวมฝูงของนก หรือ ปลา ในการหาอาหาร นกแต่ละตัวจะพยายามบินไปในตำแหน่งที่มีอาหาร โดยอาศัยประสบการณ์ของตนเองและจากสมาชิกในฝูง เมื่อสมาชิกตัวหนึ่งเจอทิศทางที่มีอาหารจะสื่อสารกันเพื่อให้ฝูงที่เหลือสามารถบินตามไปได้อย่างรวดเร็ว ในวิธีการ PSO นกจะเปรียบเสมือนอนุภาค (Particle) ที่มีตำแหน่ง (Position) และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ (Velocity) ในการหาค่าตำแหน่งที่ดีที่สุด แต่ละอนุภาคจะปรับทิศทางในการเคลื่อนที่โดยการมุ่งไปยังตำแหน่งที่ดีที่สุดโดยใช้ประสบการณ์ของตนเอง รวมทั้งใช้ข้อมูลตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ได้จากอนุภาคทั้งหมด ซึ่งตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค เรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution : Lbest หรือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว Personal Best Solution: Pbest) สำหรับตำแหน่งคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมด เรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution : Gbest) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำอัลกอริทึมนี้มาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดสมดุกลุ่มสายการประกอบรูปตัวยูซึ่งเป็นปัญหาหลายวัตถุประสงค์ จึงเรียกวิธีนี้ว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Particle Swarm Optimization: MOPSO) ซึ่งขั้นตอนของ MOPSO มีดังนี้

3.2 ขั้นตอนการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบ มากวัตถุประสงคสำหรับการจัดสมตุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. **สร้างเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น:** สร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค (X_j) ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ $1 \times d$ เมื่อ d คือจำนวนชิ้นงานทั้งหมด โดยการสุ่มค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับในแต่ละพิกัดเวกเตอร์
2. **สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้น:** สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นให้กับแต่ละอนุภาค โดยให้มีจำนวนพิกัดในเวกเตอร์เท่ากับจำนวนชิ้นงานทั้งหมด และทำการสุ่มเลขที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับค่าในแต่ละพิกัดของเวกเตอร์

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

3. **ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์:** ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยวิธีการถอดรหัสเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคให้เป็นสตริงคำตอบซึ่งเป็นลำดับค่าสีของแต่ละชิ้นงาน
4. **คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค:** คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Personal Best Solution: Pbest) โดยในการคัดเลือกคำตอบจะใช้เทคนิคเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดเป็นการกำหนดค่าฟิตเนสของคำตอบโดยวิธี Non-Dominated Sorting
5. **คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร:** นำคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Personal Best Solution: Pbest) ที่ได้มาคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดจากประชากรทั้งหมด (Global Best Solution: Gbest)
6. **เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในประชากรคำตอบภายนอก:** เพิ่มค่าสตริงคำตอบที่ทำให้เกิดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดโดยไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นในเซตของประชากรคำตอบภายนอก (External population: EP) เมื่อเซตของ EP ไม่มีสตริงคำตอบใดอยู่ แต่ในกรณีที่มีสตริงคำตอบเดิมอยู่ต้องทำการเก็บค่าเฉพาะสตริงคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นเท่านั้น
7. **ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งในการเคลื่อนที่:** ปรับปรุงความเร็วในการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค โดยนำคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) และคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) มาแทนค่าตาม สมการที่ 3.1

$$V_j(t+1) = wV_j(t) + c_1r_1(P_j(t) - X_j(t)) + c_2r_2(G - X_j(t)) \quad (3.1)$$

จากนั้นปรับตำแหน่งของอนุภาค โดยนำเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากสมการที่ 3.1 มาแทนในสมการ 3.2 เพื่อหาตำแหน่งอนุภาคตั้งต้นในรอบถัดไป

$$X_j(t + 1) = X_j(t) + V_j(t + 1) \quad (3.2)$$

เมื่อ $V_j(t)$ คือ ความเร็วของอนุภาคที่ j ใน รอบที่ t

$X_j(t)$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ j รอบที่ t

$P_j(t)$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคที่ j ในรอบที่ t (Pbest)

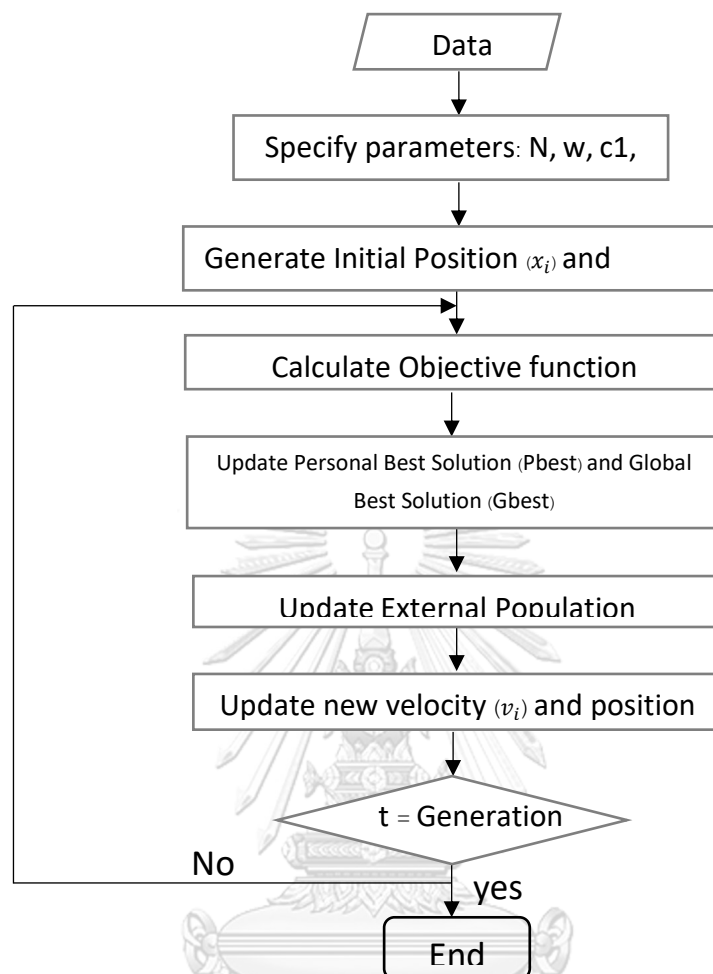
G คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมด (Gbest)

$r1, r2$ คือ ค่าสุ่มในช่วง (random number) $[0,1]$

$c1, c2$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor)

w คือ น้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight)

8. **ทำการวนซ้ำในรอบถัดไป:** เมื่อคำนวณตามขั้นตอนครบแล้ว ถ้าหากยังไม่ครบเงื่อนไขที่กำหนดให้วนซ้ำจนกว่าจะครบแล้วจึงนำคำตอบที่ได้จากเซตของประชากรคำตอบภายนอกมาเป็นคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOPSO

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ตัวอย่างการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (MOPSO) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมกวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบ จะเป็นข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายการประกอบทั้งสอง ประกอบไปด้วย จำนวนผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานของชิ้นงาน แผนภาพความสัมพันธ์ลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

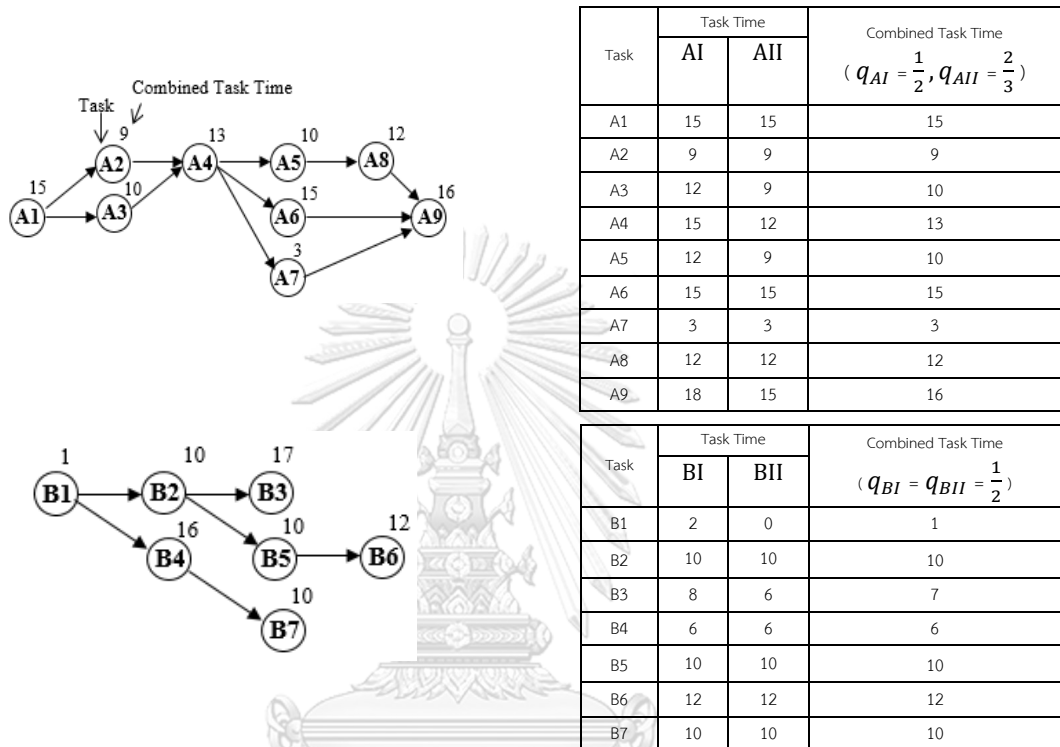
จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A มี 2 รุ่น ได้แก่ AI และ AII

สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น AI และ AII : $q_{AI} = \frac{1}{3}$ $q_{AII} = \frac{2}{3}$

จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B มี 2 รุ่น ได้แก่ BI และ BII

สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น BI และ BII : $q_{BI}, q_{BII} = \frac{1}{2}$

มีเวลาดำเนินงานของชิ้นงานแต่ละผลิตภัณฑ์และแผนภาพลำดับก่อนหลังรวมดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังรวมและเวลาชิ้นงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 (Jaeschke 9-tasks) และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 (Mertens 7-tasks)

การกำหนดพารามิเตอร์ในวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

- จำนวนประชากรเบื้องต้น (N) 11 ตัว
- ค่าน้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight : w 1.0)
- ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor : $c1, c2$) = 0.1

ตัวอย่างขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

3.2.1. สร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร

สร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นตามจำนวนประชากร โดยสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค (X_i) ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดเท่ากับ $1 \times d$ เมื่อ d คือจำนวนชิ้นงานทั้งหมด โดยการสุ่มค่าจำนวนจริงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับในแต่ละพิกัดเวกเตอร์ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคในรอบที่ 1

$X_j(1)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.49	0.26	0.28	0.15	0.69	0.61	0.58	0.58	0.61	0.51	0.76	0.99	0.66	0.76	0.5	0.91
2	0.86	0.79	1	0.62	0.55	0.3	0.64	0.03	0.19	0.13	0.25	0.1	0.09	0.82	0.16	0.27
3	0.65	0.96	0.98	0.82	0.75	0.44	0.29	0.01	0.17	0.06	0.03	0.3	0.77	0.92	0.13	0.16
4	0.01	0.07	0.1	0.12	0.21	0.22	0.24	0.38	0.46	0.48	0.75	0.76	0.83	0.85	0.86	0.94
5	0.01	0.13	0.16	0.21	0.32	0.39	0.42	0.44	0.49	0.54	0.63	0.69	0.7	0.71	0.75	0.82
6	0.02	0.09	0.1	0.11	0.15	0.16	0.46	0.58	0.62	0.71	0.78	0.8	0.87	0.91	0.92	0.96
7	0.04	0.06	0.08	0.09	0.33	0.34	0.69	0.71	0.74	0.75	0.76	0.78	0.79	0.83	0.93	0.94
8	0.28	0.31	0.44	0.46	0.52	0.53	0.54	0.66	0.68	0.74	0.83	0.85	0.86	0.91	0.96	0.99
9	0.07	0.13	0.18	0.19	0.33	0.34	0.4	0.43	0.45	0.46	0.57	0.71	0.83	0.91	0.92	0.99
10	0.02	0.03	0.15	0.17	0.18	0.31	0.37	0.39	0.51	0.53	0.58	0.68	0.7	0.89	0.91	0.96
11	0.02	0.05	0.11	0.13	0.14	0.18	0.22	0.36	0.47	0.56	0.6	0.79	0.81	0.87	0.98	1

3.2.2. สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้น

สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นให้กับแต่ละอนุภาค โดยให้มีจำนวนพิกัดในเวกเตอร์เท่ากับจำนวนชิ้นงานทั้งหมด และทำการสุ่มเลขจำนวนจริงที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับค่าในแต่ละพิกัดของเวกเตอร์จนครบทุกอนุภาค ดังตาราง 3.1 โดย $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id})$ เมื่อ d คือ จำนวนชิ้นงานทั้งหมด

ตารางที่ 3.2 เวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นของแต่ละอนุภาคในรอบที่ 1

$V_j(1)$	พิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.84	0.76	0.29	0.11	0.48	0.27	0.5	0.51	0.49	0.38	0.59	0.74	0.61	0.83	0.49	0.53
2	0.83	0.99	0.91	0.31	0.24	0.84	0.12	0.41	0.06	0.16	0.21	0.86	0.83	0.69	0.39	0.6
3	0.87	0.02	0.33	0.45	0.96	0.13	0.37	0.19	0.26	0.78	0.38	0.31	0.7	0.46	0.42	0.26
4	0.2	0.74	0.82	0.12	0.41	0.75	0.78	0.7	0.17	0.99	0.12	0.43	0.15	0.95	0.56	0.46
5	0.34	0.34	0.32	0.12	0.25	0.63	0.53	0.3	0.5	0.46	0.7	0.84	0.99	0.7	0.21	0.64
6	0.28	0.42	0.81	0.34	0.8	0.15	0.63	0.4	0.73	0.13	0.78	0.64	0.54	0.29	0.28	0.48
7	0.24	0.97	0.25	0.4	0.95	0.95	0.44	0.06	0.2	0.29	0.05	1	0.09	0.14	0.09	0.85
8	0.28	0.96	0.41	0.16	0.27	0.89	0.09	0.14	0.87	0.74	0.82	0.09	0.76	0.15	0.87	0.09
9	0.68	0.65	0.12	0.73	0.59	0.81	0.34	0.95	0.41	0.49	0.06	0.94	0.87	0.01	0.33	0.31
10	0.31	0.35	0.15	0.69	0.97	0.97	0.96	0.41	0.97	0.91	0.75	0.14	0.96	0.46	0.47	0.62
11	0.74	0.61	0.81	0.93	0.41	0.21	0.89	0.36	0.51	0.22	0.22	0.81	0.79	0.78	0.58	0.29

3.2.3. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยทำการถอดรหัสเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคให้เป็นค่าสีทิจของชิ้นงานโดยวิธีเรียงลำดับค่าในพิกัดของเวกเตอร์จากน้อยไปหามาก พร้อมสลับตำแหน่งของลำดับพิกัดในเวกเตอร์ เช่น ถ้าค่าตำแหน่งคือ $X = (0.25, 0.15, 0.9, 0.01)$ ซึ่ง X มีจำนวน 4 มิติ เมื่อเรียงลำดับค่าพิกัดจากน้อยไปหามากจะเกิดการสลับของตำแหน่งพิกัด ซึ่งได้ลำดับพิกัดดังตารางที่ 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการเรียงลำดับค่าในพิกัดของเวกเตอร์ตามค่าที่ได้จากการสุ่ม

ลำดับพิกัดใหม่	4	2	1	3
ค่าในพิกัด	0.01	0.15	0.25	0.9

เมื่อนำวิธีการนี้มาใช้กับปัญหาการจัดสมดุกลุ่มสายการประกอบรูปตัวยูซึ่งมีชิ้นงานทั้งหมด 16 ชิ้นงาน ค่าในพิกัดของตำแหน่งอนุภาคในตารางที่ 3.1 เมื่อถูกเรียงลำดับจากน้อยไปมากค่าลำดับพิกัดใหม่ที่ได้จะเป็นค่าสีทิจของชิ้นงานดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานของประชากรคำตอบเริ่มต้น

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1,1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
2,1	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
3,1	8	11	10	15	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
4,1	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
5,1	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12
6,1	9	12	6	3	11	1	16	8	15	5	13	2	10	7	14	4
7,1	12	16	14	11	5	13	6	9	7	8	10	15	1	3	2	4
8,1	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
9,1	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
10,1	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
11,1	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

หลังจากที่ได้ค่าสิทธิแล้วจะทำการจัดสมดุลสายการประกอบ โดยที่รอบเวลาการผลิตของทั้งสองสายการประกอบถูกปรับให้เท่ากัน และมีค่าเท่ากับ 30 จากนั้นทำการประเมินหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงาน จำนวนสถานี ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานี ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานี และความสมดุลภายในสถานีงาน ซึ่งได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874
2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
4*	7	6	6.4615	0.0645	0.5447
5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255
6	7	4	6.3636	0.0750	0.3571
7	7	5	6.3000	0.1316	0.5328
8*	7	5	6.3000	0.1029	0.4548
9*	7	3	6.3636	0.1129	0.3438
10*	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571

3.2.4. คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค

คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Personal Best Solution: Pbest) โดยใช้เทคนิคเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยเปรียบเทียบตำแหน่งของอนุภาคปัจจุบันกับตำแหน่งของอนุภาคในรอบก่อนหน้า ตำแหน่งที่มีค่าฟิตเนสที่ดีกว่าจะถูกเลือกเป็น Pbest แต่ในการดำเนินการรอบที่ 1 ตำแหน่งของแต่ละอนุภาคยังคงมีเพียงตำแหน่งเริ่มต้นเท่านั้น ดังนั้นตำแหน่งเริ่มต้นในรอบแรกจึงถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 การกำหนดคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Pbest) ในรอบที่ 1

$P_i(1)$	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
$P_1 = X_1$	1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874
$P_2 = X_2$	2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
$P_3 = X_3$	3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
$P_4 = X_4$	4	7	6	6.4615	0.0645	0.5447
$P_5 = X_5$	5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255
$P_6 = X_6$	6	7	4	6.3636	0.0750	0.3571
$P_7 = X_7$	7	7	5	6.3000	0.1316	0.5328
$P_8 = X_8$	8	7	5	6.3000	0.1029	0.4548
$P_9 = X_9$	9	7	3	6.3636	0.1129	0.3438
$P_{10} = X_{10}$	10	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
$P_{11} = X_{11}$	11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571

3.2.5. คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดสากลของแต่ละอนุภาค

คัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Global Best Solution: Gbest) โดยนำคำตอบ Pbest ที่ได้มาเปรียบเทียบค่าฟิตเนส ซึ่งคำตอบที่อยู่ใน Fitness1 จะถูกกำหนดเป็น Gbest ในกรณีที่ มี Gbest หลายคำตอบจะทำการสุ่มเลือกเพียงคำตอบเดียว และได้ค่า Gbest ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Gbest) ในรอบที่ 1

$P_i(1)$	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	Fitness	Random
P_1	1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874	3	
P_2	2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435	3	
P_3	3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333	3	
P_4	4	7	6	6.4615	0.0645	0.5447	2	
P_5	5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255	1	
P_6	6	7	4	6.3636	0.0750	0.3571	2	
P_7	7	7	5	6.3000	0.1316	0.5328	2	
P_8	8	7	5	6.3000	0.1029	0.4548	1	
P_9	9	7	3	6.3636	0.1129	0.3438	1	Gbest
P_{10}	10	7	3	6.4167	0.0492	0.2918	1	
P_{11}	11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571	1	

จากการดำเนินงานในรอบที่ 1 เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Pbest) และ เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) จะเป็นไปตามตารางที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8 เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Pbest) ในรอบที่ 1

$P_j(1)$	พิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.49	0.26	0.28	0.15	0.69	0.61	0.58	0.58	0.61	0.51	0.76	0.99	0.66	0.76	0.50	0.91
2	0.86	0.79	1.00	0.62	0.55	0.30	0.64	0.03	0.19	0.13	0.25	0.10	0.09	0.82	0.16	0.27
3	0.65	0.96	0.98	0.82	0.75	0.44	0.29	0.01	0.17	0.06	0.03	0.30	0.77	0.92	0.13	0.16
4	0.01	0.07	0.10	0.12	0.21	0.22	0.24	0.38	0.46	0.48	0.75	0.76	0.83	0.85	0.86	0.94
5	0.01	0.13	0.16	0.21	0.32	0.39	0.42	0.44	0.49	0.54	0.63	0.69	0.70	0.71	0.75	0.82
6	0.02	0.09	0.10	0.11	0.15	0.16	0.46	0.58	0.62	0.71	0.78	0.80	0.87	0.91	0.92	0.96
7	0.04	0.06	0.08	0.09	0.33	0.34	0.69	0.71	0.74	0.75	0.76	0.78	0.79	0.83	0.93	0.94
8	0.28	0.31	0.44	0.46	0.52	0.53	0.54	0.66	0.68	0.74	0.83	0.85	0.86	0.91	0.96	0.99
9	0.07	0.13	0.18	0.19	0.33	0.34	0.40	0.43	0.45	0.46	0.57	0.71	0.83	0.91	0.92	0.99
10	0.02	0.03	0.15	0.17	0.18	0.31	0.37	0.39	0.51	0.53	0.58	0.68	0.70	0.89	0.91	0.96
11	0.02	0.05	0.11	0.13	0.14	0.18	0.22	0.36	0.47	0.56	0.60	0.79	0.81	0.87	0.98	1.00

ตารางที่ 3.9 เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ในรอบที่ 1

G	พิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$P_9(1)$	0.07	0.13	0.18	0.19	0.33	0.34	0.40	0.43	0.45	0.46	0.57	0.71	0.83	0.91	0.92	0.99

3.2.6. เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในประชากรคำตอบภายนอก

ทำการเก็บคำตอบที่ได้จากการคัดเลือกตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล ไว้ในประชากรภายนอก (External Population : EP) ถ้าคำตอบที่ได้เป็นไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นที่อยู่ใน EP

ตารางที่ 3.10 ประชากรคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นในรอบที่ 1 (Fitness1)

P(1)	String	Task															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
P_5	5,1	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12
P_8	8,1	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
P_9	9,1	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
P_{10}	10,1	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
P_{11}	11,1	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

3.2.7. ปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งในการเคลื่อนที่

ปรับปรุงทิศทางในการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค โดยนำคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Pbest) และคำตอบที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) มาแทนค่าตาม สมการที่ 3.1 และ 3.2

ตัวอย่าง การปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ 1 ในรอบที่ 1

ใช้พารามิเตอร์ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ $w = 1.0$, $c_1, c_2 = 0.1$ กำหนดให้ค่า r_1 และ r_2 มีค่า 0.2463 และ 0.8372 ตามลำดับ ค่าที่นำมาใช้ในการปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ 1 ได้แก่ ค่า $X_1(1)$, $V_1(1)$, $P_1(1)$ และ G จากตารางที่ 3.1, 3.7 และ 3.8 มีค่า ดังนี้

$$X_1(1) = (0.49, 0.26, 0.28, 0.15, 0.69, 0.61, 0.58, 0.58, 0.61, 0.51, 0.76, 0.99, 0.66, 0.76, 0.50, 0.91)$$

$$P_1(1) = (0.49, 0.26, 0.28, 0.15, 0.69, 0.61, 0.58, 0.58, 0.61, 0.51, 0.76, 0.99, 0.66, 0.76, 0.50, 0.91)$$

$$V_1(1) = (0.84, 0.76, 0.29, 0.11, 0.48, 0.27, 0.50, 0.51, 0.49, 0.38, 0.59, 0.74, 0.61, 0.83, 0.49, 0.53)$$

$$G = (0.07, 0.13, 0.18, 0.19, 0.33, 0.34, 0.40, 0.43, 0.45, 0.46, 0.57, 0.71, 0.83, 0.91, 0.92, 0.99)$$

เมื่อแทน X_1, P_1, V_1 และ G ค่าลงในสมการ 3.1 จะได้เวกเตอร์ความเร็ว $V_1(2)$ ซึ่งเป็นเวกเตอร์ความเร็วใหม่ของอนุภาคที่ 1 ในรอบที่ 2

$$V_1(2) = wV_1(1) + c_1r_1(P_1(1) - X_1(1)) + c_2r_2(G - X_1(1))$$

$V_1(2) = (0.84, 0.76, 0.29, 0.11, 0.48, 0.27, 0.50, 0.51, 0.49, 0.38, 0.59, 0.74, 0.61, 0.83, 0.49, 0.53)$
 จากนั้นปรับปรุงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยนำเวกเตอร์ความเร็ว $V_1(2)$ ที่ได้เข้ามาแทนลงใน
 สมการ 3.2 จะได้ตำแหน่งของอนุภาคเพื่อนำไปใช้ในรอบถัดไป $X_1(2) = X_1(1) + V_1(2)$
 $X_1(2) = (1.33, 1.02, 0.57, 0.26, 1.17, 0.88, 1.08, 1.09, 1.10, 0.89, 1.35, 1.73, 1.27, 1.59, 0.99, 1.44)$
 ซึ่งเมื่อทำการหาค่าความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคจนครบทุกอนุภาคจะได้เวกเตอร์ความเร็วใหม่
 และ เวกเตอร์ตำแหน่งใหม่ดังตารางที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.11 เวกเตอร์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับรอบที่ 2

$V_i(2)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.84	0.76	0.29	0.11	0.48	0.27	0.50	0.51	0.49	0.38	0.59	0.74	0.61	0.83	0.49	0.53
2	0.83	0.99	0.91	0.31	0.24	0.84	0.12	0.41	0.06	0.16	0.21	0.86	0.83	0.69	0.39	0.60
3	0.87	0.02	0.33	0.45	0.96	0.13	0.37	0.19	0.26	0.78	0.38	0.31	0.70	0.46	0.42	0.26
4	0.20	0.74	0.82	0.12	0.41	0.75	0.78	0.70	0.17	0.99	0.12	0.43	0.15	0.95	0.56	0.46
5	0.34	0.34	0.32	0.12	0.25	0.63	0.53	0.30	0.50	0.46	0.70	0.84	0.99	0.70	0.21	0.64
6	0.28	0.42	0.81	0.34	0.80	0.15	0.63	0.40	0.73	0.13	0.78	0.64	0.54	0.29	0.28	0.48
7	0.24	0.97	0.25	0.40	0.95	0.95	0.44	0.06	0.20	0.29	0.05	1.00	0.09	0.14	0.09	0.85
8	0.28	0.96	0.41	0.16	0.27	0.89	0.09	0.14	0.87	0.74	0.82	0.09	0.76	0.15	0.87	0.09
9	0.68	0.65	0.12	0.73	0.59	0.81	0.34	0.95	0.41	0.49	0.06	0.94	0.87	0.01	0.33	0.31
10	0.31	0.35	0.15	0.69	0.97	0.97	0.96	0.41	0.97	0.91	0.75	0.14	0.96	0.46	0.47	0.62
11	0.74	0.61	0.81	0.93	0.41	0.21	0.89	0.36	0.51	0.22	0.22	0.81	0.79	0.78	0.58	0.29

ตารางที่ 3.12 เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับรอบที่ 2

$X_i(2)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.33	1.02	0.57	0.26	1.17	0.88	1.08	1.09	1.10	0.89	1.35	1.73	1.27	1.59	0.99	1.33
2	1.69	1.78	1.91	0.93	0.79	1.14	0.76	0.44	0.25	0.29	0.46	0.96	0.92	1.51	0.55	1.69
3	1.52	0.98	1.31	1.27	1.71	0.57	0.66	0.20	0.43	0.84	0.41	0.61	1.47	1.38	0.55	1.52
4	0.21	0.81	0.92	0.24	0.62	0.97	1.02	1.08	0.63	1.47	0.87	1.19	0.98	1.80	1.42	0.21
5	0.35	0.47	0.48	0.33	0.57	1.02	0.95	0.74	0.99	1.00	1.33	1.53	1.69	1.41	0.96	0.35
6	0.30	0.51	0.91	0.45	0.95	0.31	1.09	0.98	1.35	0.84	1.56	1.44	1.41	1.20	1.20	0.30
7	0.28	1.03	0.33	0.49	1.28	1.29	1.13	0.77	0.94	1.04	0.81	1.78	0.88	0.97	1.02	0.28
8	0.56	1.27	0.85	0.62	0.79	1.42	0.63	0.80	1.55	1.48	1.65	0.94	1.62	1.06	1.83	0.56
9	0.75	0.78	0.30	0.92	0.92	1.15	0.74	1.38	0.86	0.95	0.63	1.65	1.70	0.92	1.25	0.75
10	0.33	0.38	0.30	0.86	1.15	1.28	1.33	0.80	1.48	1.44	1.33	0.82	1.66	1.35	1.38	0.33
11	0.76	0.66	0.92	1.06	0.55	0.39	1.11	0.72	0.98	0.78	0.82	1.60	1.60	1.65	1.56	0.76

การแก้ปัญหาในรอบถัดไปจะเหมือนกับในรอบแรก โดยกำหนดให้ตำแหน่งและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคในรอบที่ 2 ได้มาจากตำแหน่งของอนุภาคที่ได้จากการปรับปรุงในรอบที่ 1 (ตารางที่ 3.11) และ ความเร็วของอนุภาคที่ได้จากการปรับปรุงในรอบที่ 1 (ตารางที่ 3.12) ดังตารางที่ 3.13 และ 3.14

ตารางที่ 3.13 ตำแหน่งของอนุภาคเริ่มต้นในรอบที่ 2

$X_i(2)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.33	1.02	0.57	0.26	1.17	0.88	1.08	1.09	1.10	0.89	1.35	1.73	1.27	1.59	0.99	1.33
2	1.69	1.78	1.91	0.93	0.79	1.14	0.76	0.44	0.25	0.29	0.46	0.96	0.92	1.51	0.55	1.69
3	1.52	0.98	1.31	1.27	1.71	0.57	0.66	0.20	0.43	0.84	0.41	0.61	1.47	1.38	0.55	1.52
4	0.21	0.81	0.92	0.24	0.62	0.97	1.02	1.08	0.63	1.47	0.87	1.19	0.98	1.80	1.42	0.21
5	0.35	0.47	0.48	0.33	0.57	1.02	0.95	0.74	0.99	1.00	1.33	1.53	1.69	1.41	0.96	0.35
6	0.30	0.51	0.91	0.45	0.95	0.31	1.09	0.98	1.35	0.84	1.56	1.44	1.41	1.20	1.20	0.30
7	0.28	1.03	0.33	0.49	1.28	1.29	1.13	0.77	0.94	1.04	0.81	1.78	0.88	0.97	1.02	0.28
8	0.56	1.27	0.85	0.62	0.79	1.42	0.63	0.80	1.55	1.48	1.65	0.94	1.62	1.06	1.83	0.56
9	0.75	0.78	0.30	0.92	0.92	1.15	0.74	1.38	0.86	0.95	0.63	1.65	1.70	0.92	1.25	0.75
10	0.33	0.38	0.30	0.86	1.15	1.28	1.33	0.80	1.48	1.44	1.33	0.82	1.66	1.35	1.38	0.33
11	0.76	0.66	0.92	1.06	0.55	0.39	1.11	0.72	0.98	0.78	0.82	1.60	1.60	1.65	1.56	0.76

ตารางที่ 3.14 ความเร็วในการเคลื่อนที่เริ่มต้นของอนุภาคในรอบที่ 2

$V_i(2)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.84	0.76	0.29	0.11	0.48	0.27	0.50	0.51	0.49	0.38	0.59	0.74	0.61	0.83	0.49	0.53
2	0.83	0.99	0.91	0.31	0.24	0.84	0.12	0.41	0.06	0.16	0.21	0.86	0.83	0.69	0.39	0.60
3	0.87	0.02	0.33	0.45	0.96	0.13	0.37	0.19	0.26	0.78	0.38	0.31	0.70	0.46	0.42	0.26
4	0.20	0.74	0.82	0.12	0.41	0.75	0.78	0.70	0.17	0.99	0.12	0.43	0.15	0.95	0.56	0.46
5	0.34	0.34	0.32	0.12	0.25	0.63	0.53	0.30	0.50	0.46	0.70	0.84	0.99	0.70	0.21	0.64
6	0.28	0.42	0.81	0.34	0.80	0.15	0.63	0.40	0.73	0.13	0.78	0.64	0.54	0.29	0.28	0.48
7	0.24	0.97	0.25	0.40	0.95	0.95	0.44	0.06	0.20	0.29	0.05	1.00	0.09	0.14	0.09	0.85
8	0.28	0.96	0.41	0.16	0.27	0.89	0.09	0.14	0.87	0.74	0.82	0.09	0.76	0.15	0.87	0.09
9	0.68	0.65	0.12	0.73	0.59	0.81	0.34	0.95	0.41	0.49	0.06	0.94	0.87	0.01	0.33	0.31
10	0.31	0.35	0.15	0.69	0.97	0.97	0.96	0.41	0.97	0.91	0.75	0.14	0.96	0.46	0.47	0.62
11	0.74	0.61	0.81	0.93	0.41	0.21	0.89	0.36	0.51	0.22	0.22	0.81	0.79	0.78	0.58	0.29

จากนั้นจะประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยทำการถอดรหัสเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคเป็นค่าสิทธิ เมื่อได้ลำดับค่าสิทธิของประชากรดังตารางที่ 3.15 แล้วนำมาใช้ในการจัดสมดุสหายการประกอบ ที่รอบเวลาการผลิตของทั้งสองสายการประกอบมีค่าเท่ากับ 30 เพื่อประเมินหาค่าฟังก์ชันทั้ง 5 วัตถุประสงค์ได้แก่ จำนวนสถานีนงาน ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานี ความสมดุสภายในสถานีนงาน และ ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีนงาน ดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.15 ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานของประชากรคำตอบเริ่มต้น ในรอบที่ 2

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1,2	4	3	6	10	15	2	7	8	9	5	13	1	11	16	14	12
2,2	9	10	8	11	15	7	5	16	13	4	12	6	14	1	2	3
3,2	8	11	16	9	15	6	12	7	10	2	4	3	14	13	1	5
4,2	1	4	5	9	2	11	3	6	13	7	8	12	16	15	10	14
5,2	4	1	2	3	5	8	7	15	9	10	6	11	14	16	12	13
6,2	1	6	4	2	10	3	5	8	7	14	15	9	13	12	16	11
7,2	1	3	4	8	11	13	9	14	15	2	10	7	5	6	12	16
8,2	1	4	7	5	8	3	12	14	16	2	6	10	9	13	11	15
9,2	3	11	7	1	2	9	4	5	14	10	6	15	16	8	12	13
10,2	3	1	2	8	12	4	5	6	7	11	14	15	10	9	16	13
11,2	6	5	2	8	1	10	11	3	9	4	7	16	15	12	13	14

ตารางที่ 3.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในรอบที่ 2

$X_i(2)$	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	1	7	6	6.4615	0.1090	0.1452
2	2	6	5	5.5385	0.0673	0.6104
3	3	7	4	6.4615	0.1187	0.3275
4	4	7	5	6.3636	0.0647	0.4156
5	5	6	5	5.5000	0.0476	0.5434
6	6	7	4	6.3000	0.0740	0.2889
7	7	7	4	6.2222	0.0939	0.3274
8	8	7	4	6.3000	0.0939	0.3274
9	9	7	5	6.2222	0.0769	0.3765
10	10	6	3	5.5000	0.0609	0.3900
11	11	7	5	6.3000	0.0778	0.4043

หลังจากการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะทำการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค (Personal Best Solution: Pbest) โดยวิธี Non-dominated sorting ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบตำแหน่งของอนุภาคปัจจุบันกับตำแหน่งของอนุภาคในรอบก่อนหน้า ตำแหน่งที่มีค่าฟิตเนสที่ดีกว่าจะถูกเลือกเป็น Pbest ในรอบปัจจุบัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้นในรอบที่ 2 ($X_i(2)$) กับตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัวในรอบที่ 1 ($P_i(1)$) สามารถกำหนดตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ในรอบที่ 2 ได้ดังตารางที่ 3.17 ซึ่งหากคำตอบที่ทำการเปรียบเทียบมีค่าฟิตเนสเท่ากันจะทำการสุ่มเพื่อกำหนดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาค ดังนั้นจะได้ Pbest ของอนุภาคในรอบที่ 2 ดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 การกำหนดตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของอนุภาค (Pbest) ในรอบที่ 2

i	$P_i(1)$					$P_i(1)$ Fitness	$X_i(2)$					$X_i(2)$ Fitness	Selected for $P_i(2)$
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5		
1	7	4	6.417	0.139	0.387	1	7	6	6.462	0.109	0.145	1	P_1
2	7	4	6.417	0.114	0.444	1	6	5	5.538	0.067	0.610	1	P_2
3	7	4	6.462	0.137	0.433	2	7	4	6.462	0.119	0.327	1	$X_3(2)$
4	7	6	6.462	0.065	0.545	2	7	5	6.364	0.065	0.416	1	$X_4(2)$
5	6	3	5.455	0.076	0.526	1	6	5	5.500	0.048	0.543	1	$X_5(2)$
6	7	4	6.364	0.075	0.357	2	7	4	6.300	0.074	0.289	1	$X_6(2)$
7	7	5	6.300	0.132	0.533	2	7	4	6.222	0.094	0.327	1	$X_7(2)$
8	7	5	6.300	0.103	0.455	2	7	4	6.300	0.094	0.327	1	$X_8(2)$
9	7	3	6.364	0.113	0.344	1	7	5	6.222	0.077	0.376	1	P_9
10	7	3	6.417	0.049	0.292	1	6	3	5.500	0.061	0.390	1	$X_{10}(2)$
11	7	3	6.364	0.064	0.357	1	7	5	6.300	0.078	0.404	1	$X_{11}(2)$

ตารางที่ 3.18 เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค ในรอบที่ 2

$P_j(2)$	พิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.49	0.26	0.28	0.15	0.69	0.61	0.58	0.58	0.61	0.51	0.76	0.99	0.66	0.76	0.5	0.91
2	0.86	0.79	1	0.62	0.55	0.3	0.64	0.03	0.19	0.13	0.25	0.1	0.09	0.82	0.16	0.27
3	1.52	0.98	1.31	1.27	1.71	0.57	0.66	0.20	0.43	0.84	0.41	0.61	1.47	1.38	0.55	0.42
4	0.21	0.81	0.92	0.24	0.62	0.97	1.02	1.08	0.63	1.47	0.87	1.19	0.98	1.80	1.42	1.40
5	0.35	0.47	0.48	0.33	0.57	1.02	0.95	0.74	0.99	1.00	1.33	1.53	1.69	1.41	0.96	1.46
6	0.30	0.51	0.91	0.45	0.95	0.31	1.09	0.98	1.35	0.84	1.56	1.44	1.41	1.20	1.20	1.44
7	0.28	1.03	0.33	0.49	1.28	1.29	1.13	0.77	0.94	1.04	0.81	1.78	0.88	0.97	1.02	1.79
8	0.56	1.27	0.85	0.62	0.79	1.42	0.63	0.80	1.55	1.48	1.65	0.94	1.62	1.06	1.83	1.08

ตารางที่ 3.18 เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค ในรอบที่ 2 (ต่อ)

$P_j(2)$	พิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9	0.07	0.13	0.18	0.19	0.33	0.34	0.4	0.43	0.45	0.46	0.57	0.71	0.83	0.91	0.92	0.99
10	0.33	0.38	0.30	0.86	1.15	1.28	1.33	0.80	1.48	1.44	1.33	0.82	1.66	1.35	1.38	1.58
11	0.76	0.66	0.92	1.06	0.55	0.39	1.11	0.72	0.98	0.78	0.82	1.60	1.60	1.65	1.56	1.29

ตารางที่ 3.19 ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานเวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของอนุภาคในรอบที่ 2

$P_j(2)$	String	Task															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
P_1	1,1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
P_2	2,1	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
P_3	3,2	8	11	16	9	15	6	12	7	10	2	4	3	14	13	1	5
P_4	4,2	1	4	5	9	2	11	3	6	13	7	8	12	16	15	10	14
P_5	5,2	4	1	2	3	5	8	7	15	9	10	6	11	14	16	12	13
P_6	6,2	1	6	4	2	10	3	5	8	7	14	15	9	13	12	16	11
P_7	7,2	1	3	4	8	11	13	9	14	15	2	10	7	5	6	12	16
P_8	8,2	1	4	7	5	8	3	12	14	16	2	6	10	9	13	11	15
P_9	9,1	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
P_{10}	10,2	3	1	2	8	12	4	5	6	7	11	14	15	10	9	16	13
P_{11}	11,2	6	5	2	8	1	10	11	3	9	4	7	16	15	12	13	14

เมื่อกำหนด Pbest ของแต่ละอนุภาคในรอบที่ 2 แล้วจะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคในรอบที่ 2 ($P_j(2)$) มาเปรียบเทียบกับค่าฟิตเนสเพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากประชากรทั้งหมด (Global Best Solution: Gbest) คำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จะถูกเลือกเป็น Gbest แต่ถ้าหากค่าความแข็งแรงมีค่าเท่ากัน จะทำการสุ่มเลือกคำตอบ และได้ค่า Gbest ดังตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.20 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Gbest) ในรอบที่ 2

$P_i(2)$	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness	Random
P_1	7	4	6.417	0.139	0.387	2	
P_2	7	4	6.417	0.114	0.444	2	
P_3	7	4	6.462	0.119	0.327	3	
P_4	7	5	6.364	0.065	0.416	1	
P_5	6	5	5.500	0.048	0.543	1	Gbest
P_6	7	4	6.300	0.074	0.289	1	
P_7	7	4	6.222	0.094	0.327	1	
P_8	7	4	6.300	0.094	0.327	2	
P_9	7	3	6.364	0.113	0.344	1	
P_{10}	6	3	5.500	0.061	0.390	1	
P_{11}	7	5	6.300	0.078	0.404	2	

จากการดำเนินงานในรอบที่ 2 เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากรตัวที่ 5 ถูกกำหนดให้เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ดังตารางที่ 3.20

ตารางที่ 3.21 เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดของประชากร (Gbest) ในรอบที่ 2

G	พิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$P_5(2)$	0.35	0.47	0.48	0.33	0.57	1.02	0.95	0.74	0.99	1.00	1.33	1.53	1.69	1.41	0.96	1.46

จากนั้นทำการเก็บคำตอบที่อยู่ในฟิตเนส 1 ในเซตของประชากรคำตอบภายนอกโดยคำตอบที่เก็บต้องไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบที่อยู่ EP

ทำการเก็บคำตอบที่ได้จากการคัดเลือกตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล ไว้ในประชากรภายนอก (External Population : EP) ถ้าคำตอบที่ได้เป็นไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นที่อยู่ใน EP

ตารางที่ 3.22 ประชากรคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นในรอบที่ 1 (Fitness1)

$P(1)$	String	Task															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
$P_5(1)$	5,1	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12

ตารางที่ 3.22 ประชากรคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นในรอบที่ 1 (Fitness1) (ต่อ)

$P(1)$	String	Task															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
$P_9(1)$	9,1	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
$P_{10}(1)$	10,1	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
$P_{11}(1)$	11,1	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8
$P_5(2)$	5,2	4	1	2	3	5	8	7	15	9	10	6	11	14	16	12	13
$P_9(2)$	6,2	1	6	4	2	10	3	5	8	7	14	15	9	13	12	16	11
$P_{10}(2)$	7,2	1	3	4	8	11	13	9	14	15	2	10	7	5	6	12	16
$P_{11}(2)$	10,2	3	1	2	8	12	4	5	6	7	11	14	15	10	9	16	13

การปรับปรุงความเร็วในการเคลื่อนที่จะใช้ พารามิเตอร์ ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ $w = 1.0$, $c_1, c_2 = 0.1$ ในรอบการดำเนินงานที่ 1 ทำการสุ่มค่า r_1 และ r_2 ได้เท่ากับ 0.4732 และ 0.2149 ตามลำดับ โดยใช้ ตำแหน่งของอนุภาคในรอบที่ 2 ($X_i(2)$), ตำแหน่งของอนุภาคที่ดีที่สุดในรอบที่ 2 ($P_i(2)$), ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรอบที่ 2 ($V_i(2)$) และ เวกเตอร์ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากรในรอบที่ 2 (G) ในการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 โดยแทนค่าดังนี้ $V_j(3) = wV_j(2) + c_1r_1(P_j(2) - X_j(2)) + c_2r_2(G - X_j(2))$ และ $X_j(3) = X_j(2) + V_j(3)$ ซึ่งได้ความเร็วและตำแหน่งของอนุภาคใหม่ดังตารางที่ 3.22 และ 3.23

ตารางที่ 3.23 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสำหรับใช้ในรอบที่ 3

$V_i(3)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.80	0.73	0.28	0.11	0.46	0.27	0.49	0.49	0.48	0.37	0.58	0.72	0.61	0.81	0.48	0.52
2	0.78	0.94	0.86	0.29	0.23	0.82	0.12	0.41	0.07	0.17	0.22	0.85	0.83	0.67	0.39	0.56
3	0.84	0.01	0.31	0.43	0.94	0.14	0.38	0.20	0.27	0.78	0.40	0.33	0.70	0.46	0.43	0.24
4	0.20	0.73	0.81	0.12	0.41	0.75	0.78	0.69	0.18	0.98	0.13	0.44	0.17	0.94	0.55	0.51
5	0.34	0.34	0.32	0.12	0.25	0.63	0.53	0.30	0.50	0.46	0.70	0.84	0.99	0.70	0.21	0.69
6	0.28	0.42	0.80	0.34	0.79	0.17	0.63	0.39	0.72	0.13	0.78	0.64	0.55	0.29	0.27	0.53
7	0.24	0.96	0.25	0.40	0.93	0.94	0.44	0.06	0.20	0.29	0.06	0.99	0.11	0.15	0.09	0.91
8	0.28	0.94	0.40	0.15	0.27	0.88	0.10	0.14	0.86	0.73	0.81	0.10	0.76	0.16	0.85	0.12
9	0.66	0.63	0.12	0.70	0.57	0.79	0.34	0.92	0.40	0.48	0.07	0.92	0.85	0.02	0.32	0.33
10	0.31	0.35	0.15	0.68	0.96	0.96	0.95	0.41	0.96	0.90	0.75	0.16	0.96	0.46	0.46	0.67
11	0.73	0.61	0.80	0.91	0.41	0.22	0.89	0.36	0.51	0.22	0.23	0.81	0.79	0.77	0.57	0.32

ตารางที่ 3.24 ตำแหน่งของอนุภาคสำหรับใช้ในรอบที่ 3

$X_i(3)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	2.13	1.75	0.85	0.37	1.63	1.15	1.57	1.58	1.58	1.26	1.93	2.45	1.88	2.40	1.47	1.85
2	2.47	2.72	2.77	1.22	1.02	1.96	0.88	0.85	0.32	0.46	0.68	1.81	1.75	2.18	0.94	2.25
3	2.36	0.99	1.62	1.70	2.65	0.71	1.04	0.40	0.70	1.62	0.81	0.94	2.17	1.84	0.98	1.76
4	0.41	1.54	1.73	0.36	1.03	1.72	1.80	1.77	0.81	2.45	1.00	1.63	1.15	2.74	1.97	0.72
5	0.69	0.81	0.80	0.45	0.82	1.65	1.48	1.04	1.49	1.46	2.03	2.37	2.68	2.11	1.17	1.04
6	0.58	0.93	1.71	0.79	1.74	0.48	1.72	1.37	2.07	0.97	2.34	2.08	1.96	1.49	1.47	0.83
7	0.52	1.99	0.58	0.89	2.21	2.23	1.57	0.83	1.14	1.33	0.87	2.77	0.99	1.12	1.11	1.19
8	0.84	2.21	1.25	0.77	1.06	2.30	0.73	0.94	2.41	2.21	2.46	1.04	2.38	1.22	2.68	0.68
9	1.41	1.41	0.42	1.62	1.49	1.94	1.08	2.30	1.26	1.43	0.70	2.57	2.55	0.94	1.57	1.08
10	0.64	0.73	0.45	1.54	2.11	2.24	2.28	1.21	2.44	2.34	2.08	0.98	2.62	1.81	1.84	1.00
11	1.49	1.27	1.72	1.97	0.96	0.61	2.00	1.08	1.49	1.00	1.05	2.41	2.39	2.42	2.13	1.08

เมื่อคำนวณตามขั้นตอนครบแล้ว ถ้าหากยังไม่ครบเงื่อนไขที่กำหนดให้วนซ้ำจนกว่าจะครบแล้วจึงนำคำตอบที่ได้จากเซตของประชากรคำตอบภายนอกมาเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากรวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยู

4.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการแบ่งเป็นปัญหาย่อยที่มีหลายปัญหาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน แต่ละปัญหาย่อยจะมีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ข้อมูลจากปัญหาย่อยอื่นที่อยู่ใกล้เคียง (Neighborhood) ซึ่งความสัมพันธ์ของปัญหาข้างเคียงจะถูกกำหนดโดยระยะทางของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก (Weight vector : λ_j) ของแต่ละปัญหาย่อย สตรีงคำตอบของปัญหาย่อยที่มีระยะทางของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ใกล้กันจะถูกสุ่มเลือกเพื่อนำมาพัฒนาคำตอบโดยวิธีพัฒนาเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อให้ได้คำตอบที่จะพัฒนาไปสู่รุ่นถัดไป โดยหลักการทำงานของอัลกอริทึมจะสุ่มสตรีงคำตอบมาสองสตรีงจากปัญหาข้างเคียง (Neighborhood) เพื่อนำมาครอสโอเวอร์ (Crossover) แล้วทำการประเมินหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หากสตรีงคำตอบรุ่นใหม่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าจะทำการนำสตรีงคำตอบรุ่นใหม่ที่ได้ไปแทนที่สตรีงคำตอบในปัญหาย่อยที่อยู่ข้างเคียง จากนั้นจะประเมินค่าโดยใช้วิธีเทบปีเซฟ หากเมื่อแทนค่าแล้วทำให้ได้ปัญหาย่อยมีค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟที่ดีกว่าเดิมจะทำการแทนคำตอบโดยสตรีงรุ่นใหม่ ซึ่งจะมีการดำเนินการที่เหมือนกันจนครบทุกปัญหาย่อยจึงจบงานเนอร์ชัน ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D มีดังนี้

1. กำหนดค่าน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละประชากร: กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m)

2. **คำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนัก:** คำนวณระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distance) ระหว่างค่าน้ำหนักของทุกประชากร λ_{jk} ดังสมการที่ 4.1

$$d_{jk} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} - \lambda_{ik})^2} \text{ เมื่อ } j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N \text{ และ } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.1)$$

เมื่อ d_{jk} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าน้ำหนักของสตริงที่ j กับสตริงที่ k และ เมื่อ $j, k = 1, 2, \dots, N$ โดยที่ N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด และ i คือ จำนวนวัตถุประสงค์ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$ โดยที่ m คือจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

3. **การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น:** สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของแต่ละประชากร (x_i) โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระให้มีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนชิ้นงานทั้งหมด

4. **กำหนดเซตของประชากรภายนอก:** กำหนดเซตของประชากรภายนอก (External population: EP) โดยกำหนดให้ $EP = \emptyset$

5. **กำหนดปัญหาข้างเคียงให้กับปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา:** กำหนดปัญหาข้างเคียงให้กับแต่ละปัญหาย่อย (N) ซึ่งปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยแต่ละตัวมีได้มากที่สุดจำนวน T ปัญหา การพิจารณาว่าปัญหาใดจะเป็นปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา จะดูจากระยะห่างยูคลิดีเนียนของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักระหว่างปัญหาย่อย ซึ่งระยะห่างที่มีค่าน้อยจะเป็นปัญหาข้างเคียง

6. **ครอสโอเวอร์:** พิจารณาปัญหาย่อยแรก และสุ่มเลือกสตริงคำตอบจากปัญหาข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อยนี้ มาจำนวน 2 สตริงเพื่อนำมาสร้างเป็นสตริงรุ่นต่อไปโดยการครอสโอเวอร์ (Crossing over) โดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

7. **ปรับปรุงคำตอบ:** ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ที่ได้ให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution) โดยวิธีการซ่อมแซมคำตอบ (repair method)

8. **ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด:** คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงคำตอบทั้งหมด จากนั้นปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (z_i^*) เมื่อ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดหรือ $z_i^* = \max\{f_i(x)\}$ ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่มากที่สุด

9. ประเมินค่าวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์: นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณาและปัญหาข้างเคียง มาคำนวณค่าวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ โดยทำการการนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการ 4.3

$$\text{minimize } g_j(\mathbf{x}) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \lambda_{ij} |f_i(\mathbf{x}) - z_i^*| \} \text{ เมื่อ } i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.2)$$

เมื่อ $g_j(\mathbf{x})$ คือ ผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าเป้าหมายที่คูณกับค่าน้ำหนักของสตริง j

z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i

กรณีหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุด $z_i^* = \min\{f_i(\mathbf{x})\}$

และกรณีค่าที่เหมาะสมที่สุด $z_i^* = \max\{f_i(\mathbf{x})\}$

λ_{ij} คือ ค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ i ของปัญหาย่อย j

สำหรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถใช้วิธีการนอมอลไลซ์ตามสมการ 4.3

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} \quad (4.3)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า \bar{f}_i ลงในสมการเทบปีเซฟฟ์จะได้ตามสมการที่ 4.4

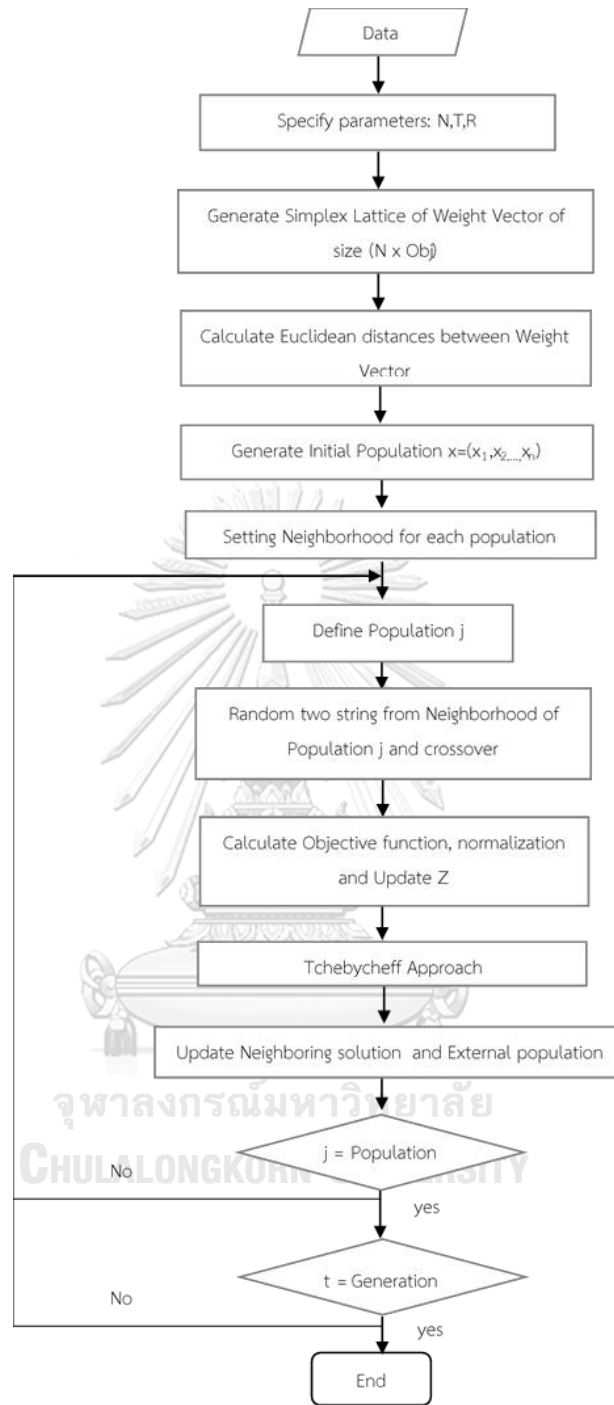
$$\text{minimize } g_j(\mathbf{x}) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \lambda_{ij} | \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} | \} \quad (4.4)$$

เมื่อ f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i

$f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดในรอบปัจจุบันในวัตถุประสงค์ที่ i

10. ปรับปรุงสตริงคำตอบของปัญหาข้างเคียง: นำค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกมาแทนที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงตามสมการ 4.4 เพื่อหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ หากค่า $g_j(\mathbf{x})$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกได้ค่าที่น้อยกว่าของสตริงคำตอบเดิม จะกำหนดให้สตริงคำตอบ j ของประชากรข้างเคียงเท่ากับสตริงรุ่นลูก ซึ่งกำหนดให้การแทนที่สตริงคำตอบได้ไม่เกิน R ครั้งในหนึ่งกลุ่มปัญหาข้างเคียง

11. เก็บค่าสตริงคำตอบของประชากรที่ดีที่สุดของประชากรคำตอบภายนอก: เพิ่มค่าสตริงคำตอบที่ทำให้เกิดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดโดยไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นในเซตของประชากรคำตอบภายนอก (External population : EP) เมื่อเซตของ EP ไม่มีสตริงคำตอบใดอยู่ แต่ในกรณีที่มีสตริงคำตอบเดิมอยู่ต้องทำการเก็บค่าเฉพาะสตริงคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่นเท่านั้น จากนั้นพิจารณาปัญหาย่อยถัดมา และทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 6-11 จนครบทุกประชากรคำตอบ เป็นการจบเงื่อนไขและดำเนินการจนครบตามจำนวนเงื่อนไขที่กำหนด



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

4.2 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

4.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบ

จะเป็นข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายการประกอบทั้งสอง ประกอบไปด้วย จำนวนผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานของชั้นงาน แผนภาพความสัมพันธ์ลำดับก่อนหลังของชั้นงาน ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

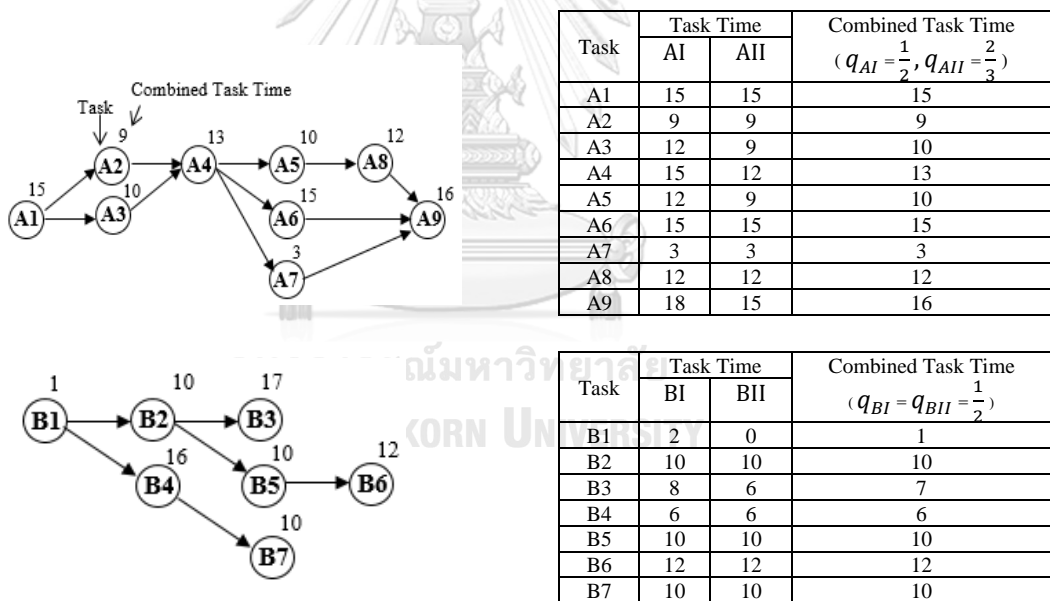
จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A มี 2 รุ่น ได้แก่ AI และ AII

สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น AI และ AII : $q_{AI} = \frac{1}{3}$, $q_{AII} = \frac{2}{3}$

จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B มี 2 รุ่น ได้แก่ BI และ BII

สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น BI และ BII : $q_{BI}, q_{BII} = \frac{1}{2}$

มีเวลาดำเนินงานของชั้นงานแต่ละผลิตภัณฑ์และแผนภาพลำดับก่อนหลังรวมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังรวมและเวลาชั้นงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 (Jaeschke 9-tasks) และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 (Mertens 7-tasks)

การกำหนดพารามิเตอร์ในวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

จำนวนประชากรเบื้องต้น 11 ตัว

จำนวนปัญหาข้างเคียง (Neighborhood) 5 ตัว

วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Partially Mapping Crossover (PMX)

จำนวนครั้งในการแทนที่ค่าตอบสูงสุด = 2 ครั้ง/กลุ่มปัญหาข้างเคียง

4.2.2 กำหนดค่าน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละประชากร

กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างค่าน้ำหนัก λ_j ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ในรูปของเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m) มีค่าดังตารางที่ 4.1 โดยค่าในแถวที่ 1 จะเป็นค่าในพิกัดของเวกเตอร์น้ำหนัก λ_1 ซึ่งจำนวนพิกัดจะเท่ากับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 4.1 ค่าน้ำหนักของประชากร

λ_j	ค่าน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์				
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5
1	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1
2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6
3	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
4	1	0	0	0	0
5	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
6	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	1
8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
9	0	1	0	0	0
10	0	0	1	0	0
11	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1

จากตารางที่ 4.1 $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})^T$ คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อย j และ λ_{ij} คือค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ i ของปัญหาย่อยที่ j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\lambda_{ij} \geq 0$ และ $\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 วัตถุประสงค์ ($m = 5$) ดังนั้น $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{51})^T = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)^T$

ดังนั้น จาก ตารางที่ 4.1 เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของแต่ละประชากรจะมีค่า เท่ากับ

$$\lambda_1 = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$$

$$\lambda_2 = (0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6)$$

$$\begin{aligned}\lambda_3 &= (0.1, 0.6, 0.1, 0.1, 0.1) \\ \lambda_4 &= (1, 0, 0, 0, 0) \\ \lambda_5 &= (0.6, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1) \\ \lambda_6 &= (0, 0, 0, 1, 0) \\ \lambda_7 &= (0, 0, 0, 0, 1) \\ \lambda_8 &= (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2) \\ \lambda_9 &= (0, 1, 0, 0, 0) \\ \lambda_{10} &= (0, 0, 1, 0, 0) \\ \lambda_{11} &= (0.1, 0.1, 0.1, 0.6, 0.1)\end{aligned}$$

4.2.3 คำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนัก

คำนวณระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distance) ระหว่างค่าน้ำหนักของทุกประชากร

$$\text{โดยที่ } d_{jk} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} - \lambda_{ik})^2} \text{ เมื่อ } j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N \text{ และ } i = 1, 2, \dots, m$$

เมื่อ d_{jk} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าน้ำหนักของสตริงที่ j กับสตริงที่ k และ เมื่อ $j, k = 1, 2, \dots, N$ โดยที่ N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด และ i คือ จำนวนวัตถุประสงค์ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$ โดยที่ m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดจะพิจารณาทีละประชากร เพื่อหาระยะของประชากรที่กำลังพิจารณากับประชากรทั้งหมด เริ่มต้นให้ประชากรที่กำลังพิจารณาเป็นประชากรตัวที่ 1 ค่าระยะห่าง Euclidean distance ของประชากรตัวที่ 1 จากประชากรตัวอื่นๆ จะสามารถหาได้ดังนี้

ตัวอย่างเช่น

ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับ ประชากรตัวที่ 2 = d_{12}

$$\text{จาก } \lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$$

$$\lambda_2 = (\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}, \lambda_{42}, \lambda_{52}) = (0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6)$$

$$\begin{aligned}d_{12} &= \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{i1} - \lambda_{i2})^2} \\ &= \sqrt{(\lambda_{11} - \lambda_{12})^2 + (\lambda_{21} - \lambda_{22})^2 + (\lambda_{31} - \lambda_{32})^2 + (\lambda_{41} - \lambda_{42})^2 + (\lambda_{51} - \lambda_{52})^2} \\ &= \sqrt{(0.1 - 0.1)^2 + (0.1 - 0.1)^2 + (0.6 - 0.1)^2 + (0.1 - 0.1)^2 + (0.1 - 0.6)^2} \\ &= 0.7071\end{aligned}$$

ทำการคำนวณหาค่าระยะห่างของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากรจะได้ค่าดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร

d_{jk}	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}	d_{17}	d_{18}	d_{19}	$d_{1,10}$	$d_{1,11}$
ค่าระยะห่าง	0.00	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.45	1.10	0.45	0.71

จากนั้นพิจารณาประชากรตัวถัดไปคือ ประชากรตัวที่ 2 และทำการหาค่าระยะห่างจากประชากรตัวอื่นๆ และพิจารณาจนกระทั่งครบทุกจำนวนประชากรจะได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากร ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ i กับประชากร j

ประชากร $j \setminus k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.00	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.45	1.10	0.45	0.71
2	0.71	0.00	0.71	1.10	0.71	1.10	0.45	0.45	1.10	1.10	0.71
3	0.71	0.71	0.00	1.10	0.71	1.10	1.10	0.45	0.45	1.10	0.71
4	1.10	1.10	1.10	0.00	0.45	1.41	1.41	0.89	1.41	1.41	1.10
5	0.71	0.71	0.71	0.45	0.00	1.10	1.10	0.45	1.10	1.10	0.71
6	1.10	1.10	1.10	1.41	1.10	0.00	1.41	0.89	1.41	1.41	0.45
7	1.10	0.45	1.10	1.41	1.10	1.41	0.00	0.89	1.41	1.41	1.10
8	0.45	0.45	0.45	0.89	0.45	0.89	0.89	0.00	0.89	0.89	0.45
9	1.10	1.10	0.45	1.41	1.10	1.41	1.41	0.89	0.00	1.41	1.10
10	0.45	1.10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	0.89	1.41	0.00	1.10
11	0.71	0.71	0.71	1.10	0.71	0.45	1.10	0.45	1.10	1.10	0.00

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.4 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

สร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นแบบสุ่มจะเป็นการสร้างสตริงคำตอบโดยการสุ่มค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) ให้กับแต่ละชิ้นงาน โดยมีขั้นตอนวิธีการสุ่มดังนี้

1. สร้างค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority Number) เริ่มแรกให้มีค่าเท่ากับชิ้นงานทั้งหมด

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงชิ้นงานและค่าสิทธิในการเลือกงานเริ่มต้น

Task ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Priority	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

2. สุ่มเลือกค่าตำแหน่งของค่าสิทธิ มา 2 จุดเพื่อทำการสลับค่า โดยจำนวนครั้งที่ทำการสลับตำแหน่งเท่ากับจำนวนครึ่งหนึ่งของงาน $= m / 2 = 16 / 2 = 8$ ครั้ง เมื่อกำหนดให้ $m =$ จำนวนชิ้น

งานทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.3 จากนั้นทำการสร้างลำดับค่าสัทธิให้ครบตามจำนวนประชากรเริ่มต้นจะได้ดังตารางที่ 4.5

Task ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Priority	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

สลับตำแหน่ง ครั้งที่ 1

Priority 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

สลับตำแหน่งครั้งที่ 2

Priority 2	4	2	3	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

สลับตำแหน่งครั้งที่ 3

Priority 3	4	2	3	1	5	10	7	8	9	6	11	12	13	14	15	16
------------	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

⋮
⋮
⋮
สลับตำแหน่งครั้งที่ 8

Priority 8	2	4	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
------------	---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	----	---	----	----	----	----

String 1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
----------	---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	----	---	----	----	----	----

รูปที่ 4.3 การสลับตำแหน่งค่าสัทธิในการเลือกงาน

ตารางที่ 4.5 ตารางค่าสัทธิ (priority) ในการเลือกงานของประชากรเริ่มต้น

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
2	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
3	8	11	10	15	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
4	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
5	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12
6	9	12	6	3	11	1	16	8	15	5	13	2	10	7	14	4
7	12	16	14	11	5	13	6	9	7	8	10	15	1	3	2	4
8	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
9	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
10	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
11	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

4.2.5 กำหนดปัญหาข้างเคียง (Neighborhood) ให้กับแต่ละปัญหาย่อย

การกำหนดปัญหาข้างเคียงให้กับแต่ละปัญหาย่อย จะทำการพิจารณาค่าระยะห่างระหว่างจุดของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณากับปัญหาย่อยตัวอื่นๆ ถ้าหากมีระยะห่างระหว่างจุดที่น้อยก็就会被กำหนดให้เป็นปัญหาข้างเคียง ซึ่งปัญหาย่อยหนึ่งจะสามารถมีปัญหาข้างเคียงที่อยู่ใกล้ที่สุดจำนวน T ตัวอย่างการกำหนดปัญหาข้างเคียงให้กับปัญหาย่อยที่ 1

1. หาค่าระยะห่างระหว่างจุดของปัญหาย่อยที่ 1 และ ปัญหาย่อยตัวอื่น
2. เรียงลำดับค่าระยะห่างระหว่างจุดระหว่างปัญหาย่อยที่พิจารณากับปัญหาย่อยอื่น (d_{jk})

จากน้อยไปมาก ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเรียงลำดับค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร

d_{jk}	d_{11}	d_{18}	$d_{1,10}$	d_{12}	d_{13}	d_{15}	$d_{1,11}$	d_{16}	d_{14}	d_{17}	d_{19}
ค่าระยะห่าง	0.00	0.45	0.45	0.71	0.71	0.71	0.71	1.10	1.10	1.10	1.10

3. ในที่นี้กำหนดพารามิเตอร์ $T = 5$ ดังนั้นปัญหาย่อยที่มีค่าระยะห่างน้อยที่สุด 5 อันดับแรก จึงถูกกำหนดเป็นปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 จากตารางที่ 4.6 ค่า d_{jk} ที่น้อยที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ d_{11} , d_{18} , $d_{1,10}$, d_{12} และ d_{13} ดังนั้นปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 คือปัญหาย่อยที่ 1, 8, 10, 2 และ 3 สังเกตได้ว่าประชากรที่อยู่ใกล้ประชากรตัวที่ 1 มากที่สุดคือตัวเอง ซึ่งมีระยะห่าง Euclidean distance เท่ากับ 0 และปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยตัวอื่นจะหาได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ประชากรข้างเคียง (Neighborhood)

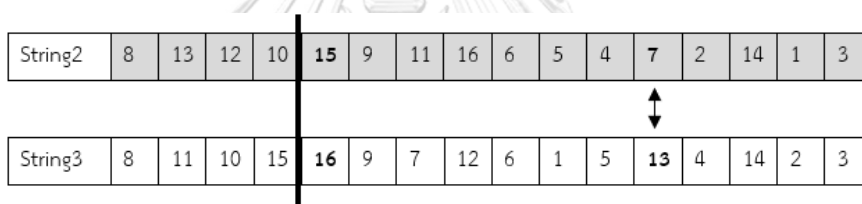
ปัญหาย่อย	ปัญหาข้างเคียง (Neighborhood)
1	1, 8, 10, 2, 3
2	2, 8, 7, 1, 3
3	7, 4, 6, 2, 8
4	4, 5, 8, 3, 11
5	5, 8, 4, 1, 2
6	6, 11, 8, 1, 3
7	7, 2, 8, 1, 3
8	8, 1, 2, 3, 5
9	9, 3, 8, 5, 11
10	10, 1, 8, 11, 2
11	11, 8, 6, 1, 2

4.2.6 ครอสโอเวอร์

พิจารณาปัญหาย่อยที่ 1 จากนั้นทำการครอสโอเวอร์ (Crossing over) โดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยสุ่มเลือก ปัญหาข้างเคียง (Neighborhood) มาจำนวน 2 ตัว โดยแต่ละสตริงจะมีความน่าจะเป็นในการถูกสุ่มเลือกเท่าๆกัน สตริงที่นำมาจับคู่เพื่อครอสโอเวอร์นี้จะถูกเรียกว่า สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) และสตริงคำตอบที่ได้หลังจากการแลกเปลี่ยนองค์ประกอบของสตริงคำตอบจะเป็น สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วิธีการครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Partial-Mapped Crossover (PMX)

มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. จาก ปัญหาข้างเคียงของ ปัญหาย่อยที่ 1 ได้แก่ String1, 8, 10, 2 และ 3 จากนั้นสุ่มสตริงคำตอบของปัญหาข้างเคียงมาจำนวน 2 สตริง ในที่นี้สุ่มได้ Sting 2 และ String 3
2. ทำการสุ่มตำแหน่ง 1 ตำแหน่งในสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ เพื่อกำหนดจุดที่ครอสโอเวอร์ โดยส่วนย่อยของสตริงที่อยู่หลังจากตำแหน่งนี้ (ส่วนหาง) จะถูกสลับกับส่วนหางของอีกสตริงหนึ่ง ซึ่งส่วนที่จะถูกสลับ เรียกว่า Mapping section ในตัวอย่างนี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งการครอสโอเวอร์ที่ได้จากการสุ่มสำหรับวิธี Partial-Mapped Crossover

2. ทำการแลกเปลี่ยน ส่วนย่อยของสตริง (Mapping section) ที่อยู่หลังตำแหน่งครอสโอเวอร์ ระหว่างสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (parent) จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ดังรูปที่ 4.5

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

รูปที่ 4.5 การสลับส่วนของสตริงสำหรับวิธี Partial-Mapped Crossover

3. ปรับปรุงคำตอบของ สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) จากตัวอย่างด้านบน

เมื่อพิจารณา Offspring 2 พบว่ายังขาดค่า 15 และ 11 และเมื่อพิจารณา Offspring 3 พบว่ายังขาดค่า 12 และ 13 จึงต้องทำการปรับปรุงคำตอบ

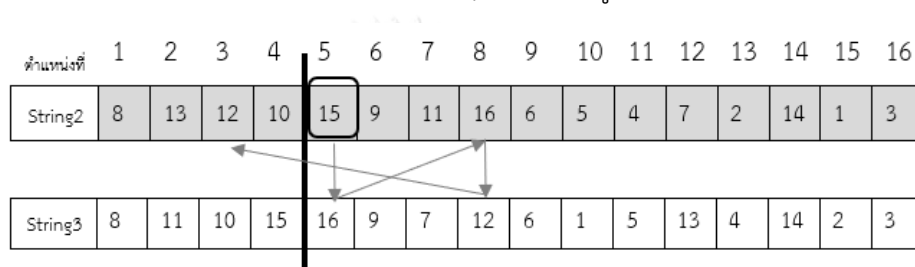
เริ่มจาก การปรับปรุงคำตอบของ Offspring 2 โดยการหาตำแหน่งให้ ค่าสิทธิ 15 กลับมาอยู่ใน Offspring2 จึงต้องกลับไปพิจารณาค่าสิทธิ ที่เท่ากับ 15 ใน สตริงรุ่นพ่อแม่เดิมคือ string2 โดยทำตามขั้นตอนดังนี้ ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 4.6

- พิจารณาค่าสิทธิ 15 ใน String 2: ตรงกับค่าสิทธิ 16 ของ String 3

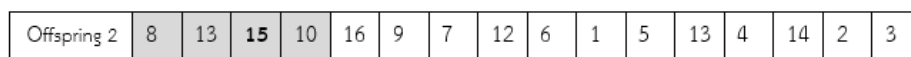
ซึ่งค่าสิทธิ 16 อยู่ในตำแหน่งที่ 8 ของ String 2 แต่เป็นส่วนที่อยู่ใน Mapping section จึงพิจารณาต่อ

- พิจารณาค่าสิทธิ 16 ของString 2 : ตรงกับค่าสิทธิ 12 ใน String3 ซึ่งค่าสิทธิ 12 จะอยู่ในตำแหน่งที่ 3 ของ String 2

ดังนั้นจึงแทนค่าสิทธิ 15 ลงในตำแหน่งที่ 3 ของ Offspring 2 ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การหาตำแหน่งสำหรับซ่อมแซมคำตอบของ Offspring2 (สำหรับค่าสิทธิเท่ากับ 15)



เปลี่ยนจาก 12 เป็น 15

รูปที่ 4.7 การแทนค่าสิทธิที่ขาดหายไป ใน Offspring 2 (สำหรับค่าสิทธิเท่ากับ 15)

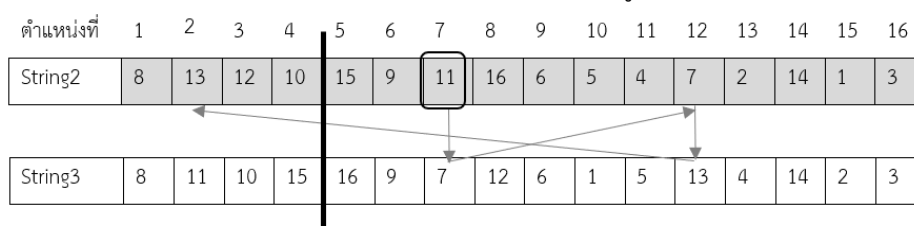
จากนั้น Offspring 2 ยังขาดค่าสิทธิเท่ากับ 11 จึงต้องกลับไปพิจารณาค่าสิทธิในสตริงรุ่นพ่อแม่เดิมคือ string2 โดยทำตามขั้นตอนดังนี้ ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 4.8

- พิจารณาค่าสิทธิ 11 ใน String 2: ตรงกับค่าสิทธิ 7 ของ String 3

ซึ่งค่าสิทธิ 7 อยู่ในตำแหน่งที่ 12 ของ String 2 แต่เป็นส่วนที่อยู่ใน Mapping section จึงพิจารณาต่อ

- พิจารณาค่าสิทธิ 7 ของString 2: ตรงกับค่าสิทธิ 13 ใน String3 ซึ่งค่าสิทธิ 13 จะอยู่ในตำแหน่งที่ 2 ของ String 2

ดังนั้นจึงแทนค่าสิทธิ 11 ลงในตำแหน่งที่ 2 ของ Offspring 2 ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การหาตำแหน่งสำหรับซ่อมแซมคำตอบของ Offspring2 (สำหรับค่าสิทธิเท่ากับ 11)

Offspring 2	8	11	15	10	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
-------------	---	----	----	----	----	---	---	----	---	---	---	----	---	----	---	---

↑
เปลี่ยนจาก 13 เป็น 11

รูปที่ 4.9 การแทนค่าสัทธิที่ขาดหายไป ใน Offspring 2 (สำหรับค่าสัทธิเท่ากับ 11)

หลังจากแทนค่าสัทธิที่ไม่มีใน Offspring2 จนครบแล้ว จะได้สตริงคำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solution) จากนั้นทำการซ่อมแซมคำตอบ ของ Offspring 3 โดยใช้หลักการเดียวกันกับ Offspring 2 โดยพิจารณาค่าสัทธิที่ Offspring 3 ไม่มี จากนั้นกลับไปหาค่าสัทธิในสตริงรุ่นพ่อแม่ เดิมของ Offspring 3 คือ String 3 (parent) และทำการดูค่าที่อยู่ตำแหน่งเดียวกับค่าสัทธิใน String 2 (parent) จากนั้นดูว่าค่านั้นอยู่ใน String 3 (parent) ที่ตำแหน่งใด จะได้ตำแหน่งที่จะนำค่า สัทธิที่ขาดไปแทน คำตอบของสตริงรุ่นลูกที่ทำการปรับปรุงแล้วจะได้ดังรูปที่ 4.10

Offspring 2	8	11	15	10	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
-------------	---	----	----	----	----	---	---	----	---	---	---	----	---	----	---	---

Offspring 3	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
-------------	---	----	----	----	----	---	----	----	---	---	---	---	---	----	---	---

รูปที่ 4.10 คำตอบที่เป็นไปได้ (feasible solution) หลังจากการปรับปรุง

หลังจากนั้นกำหนดให้ offspring 2 เป็น offspring ของปัญหาย่อยที่ 1 ตัวที่ 1 เขียนแทนด้วย Offspring 1-1 และ กำหนดให้ Offspring 3 เป็น ของปัญหาย่อยที่ 1 ตัวที่ 2 เขียนแทนด้วย Offspring 1-2 ตามรูปที่ 4.11

Offspring 1-1	8	11	15	10	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
Offspring 1-2	8	11	15	10	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3

รูปที่ 4.11 สตริงคำตอบรุ่นลูกของปัญหาย่อยที่ 1

4.2.7 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับค่าสัทธิของประชากรเริ่มต้นแล้ว จะทำการจัดสมดุลสายการประกอบโดยการ เลือกชิ้นงานที่มีค่าสัทธิต่อก่อน เพื่อจัดชิ้นงานลงสู่ทั้งสองสายการประกอบไปพร้อมกัน โดยที่รอบ เวลาการผลิตของทั้งสองสายการประกอบถูกปรับให้เท่ากัน และมีค่าเท่ากับ 30 จากนั้นทำการ ประเมินหาค่าฟังก์ชันทั้ง 5 วัตถุประสงค์ได้แก่ จำนวนสถานีนงาน ความแตกต่างของภาระงานระหว่าง

สถานี ความสมดุลภายในสถานีงาน และ ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานี ซึ่งได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874
2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
4*	7	6	6.4615	0.0645	0.5447
5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255
6	7	4	6.3636	0.0750	0.3571
7	7	5	6.3000	0.1316	0.5328
8*	7	5	6.3000	0.1029	0.4548
9*	7	3	6.3636	0.1129	0.3438
10*	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571
Offspring 1-1	7	4	6.4167	0.1298	0.4388
Offspring 1-2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435

4.2.8 ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด

หาค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (z_i^*) เมื่อ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, m$ จากตาราง 4.8 ซึ่งค่าที่ดีที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าดังนี้ $z_1^* = 6$, $z_2^* = 3$, $z_3^* = 5.4546$, $z_4^* = 0.0492$, $z_5^* = 0.2918$ หากในรอบดำเนินงานของปัญหาอยู่ตัวถัดไปกรณีที่มีค่า z_i^* ที่ดีกว่าค่าเดิม จะทำการอัปเดตค่า z_i^* ให้เป็นค่าที่ดีที่สุด

4.2.9 นอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

นอมอลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามสมการ 4.5

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} \quad (4.5)$$

โดยที่ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดตามข้อ 4.2.8 และหาค่า $f_{i(\max)}$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดในรอบปัจจุบัน ซึ่งในรอบการพิจารณาปัญหาอยู่ที่ 1 สามารถหาค่า $f_{i(\max)}$ โดยดูจากตารางที่ 4.8 $f_{1(\max)} = 7$, $f_{2(\max)} = 6$, $f_{3(\max)} = 6.4615$, $f_{4(\max)} = 0.1394$ และ $f_{5(\max)} = 0.5447$ ดังนั้นจะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นอมอลไลซ์ตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์ในรอบการพิจารณาปัญหาย่อยที่ 1

String	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
1	1.0000	0.3333	0.9555	1.0000	0.3780
2	1.0000	0.3333	0.9555	0.7151	0.5998
3	1.0000	0.3333	1.0000	0.9734	0.5595
4*	1.0000	1.0000	1.0000	0.1696	1.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2971	0.9241
6	1.0000	0.3333	0.9028	0.2860	0.2582
7	1.0000	0.6667	0.8396	0.9135	0.9529
8*	1.0000	0.6667	0.8396	0.5953	0.6445
9*	1.0000	0.0000	0.9028	0.7062	0.2056
10*	1.0000	0.3333	0.9555	0.0000	0.0000
11	1.0000	0.0000	0.9028	0.1685	0.2582
Offspring 1-1	1.0000	0.3333	0.9555	0.8936	0.5813
Offspring 1-2	1.0000	0.3333	0.9555	0.7151	0.5998

4.2.10 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟ

ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ด้วยวิธีเทบปีเซฟของปัญหาข้างเคียงโดยการนอมอลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟโดยการนอมอลไลซ์ของ String 1

จาก String 1 มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก คือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$ จากตาราง 4.9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ String 1 ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่ $\bar{f}_1 = 1.0000$, $\bar{f}_2 = 0.3333$, $\bar{f}_3 = 0.9555$, $\bar{f}_4 = 1.0000$ และ $\bar{f}_5 = 0.3780$ แทนค่าลงในสมการที่ 4.4 ดังนี้

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0.1|0.3333| = 0.0333$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0.6|0.9555| = 0.5733$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.1|0.3780| = 0.0378$$

ดังนั้น String 1 มีค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟเท่ากับ $g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(max)} - z_i^*}\} = 0.5733$

และสามารถคำนวณหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 ได้ตามตารางที่

4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของสตริงข้างเคียง String 1

Neighborhood String (j)	$\lambda_{ij} \left \frac{f_j - z_j^*}{f_{j(max)} - z_j^*} \right $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \lambda_{ij} \left \frac{f_j - z_j^*}{f_{j(max)} - z_j^*} \right \}$
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
1	0.1000	0.0333	0.5733	0.1000	0.0378	0.5733
8	0.2000	0.1333	0.1679	0.1191	0.1289	0.2000
10	0.0000	0.0000	0.9555	0.0000	0.0000	0.9555
2	0.1000	0.0333	0.0956	0.0715	0.3599	0.3599
3	0.1000	0.2000	0.1000	0.0973	0.0560	0.2000

4.2.11 ปรับปรุงสตริงคำตอบของปัญหาข้างเคียง

ในขั้นตอนนี้จะแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกลงใน ฟังก์ชันเทบปีเซฟของปัญหาข้างเคียงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สุ่มสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อเลือกใช้เพียง 1 คำตอบโดยใช้ความน่าจะเป็นเท่ากัน ในที่นี้สุ่มได้ Offspring 2-1

2. แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ที่สุ่มได้ ในที่นี้คือ Offspring 2-1 ลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา ในที่นี้คือ ปัญหาย่อยที่ 1 โดยการแทนฟังก์ชันเทบปีเซฟของสตริงข้างเคียงใดจะใช้ค่า λ ของสตริงข้างเคียงนั้น

3. สุ่มปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 มา 1 ปัญหา (ปัญหาที่ยังไม่ถูกสุ่ม) โดยให้มีความน่าจะเป็นในการสุ่มเลือกเท่ากันจากนั้นแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟของปัญหาข้างเคียงนั้น

4. เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ที่ได้จากการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟเดิม สามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี

- ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ได้ค่าที่มากกว่าค่าเดิม ($\text{New } g(x) > g(x)$) ในกรณีนี้แสดงว่าคำตอบใหม่ที่ได้จากสตริงคำตอบรุ่นลูกเป็นคำตอบที่ไม่ดีสำหรับปัญหาข้างเคียงนั้นจึงไม่ทำการแทนที่สตริงคำตอบ

- ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ได้ค่าที่น้อยกว่าค่าเดิม ($\text{New } g(x) < g(x)$) จะทำการแทนที่สตริงคำตอบเดิมของปัญหาย่อยด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก

- ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ได้เท่ากับค่าเดิม ($\text{New } g(x) = g(x)$) จะทำการหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของวัตถุประสงค์อื่นที่มีค่า $g(x)$ น้อยรองลงมา ในทุกกรณีเมื่อได้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟใหม่ที่ดีกว่าจะทำการแทนที่คำตอบของปัญหาข้างเคียงนั้นด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก

5. ทำขั้นตอน 3,4 ซ้ำโดยสุ่มปัญหาข้างเคียงตัวอื่นๆเพื่อแทนค่าโดยสตริงคำตอบรุ่นลูกและหยุดกระบวนการสุ่มเพื่อแทนค่าเมื่อเกิดการแทนที่คำตอบครบจำนวน R ครั้ง ในที่นี้กำหนดให้ R = 2 (R คือ จำนวนครั้งในการแทนที่สูงสุด/กลุ่มปัญหาข้างเคียง) หรือจนกว่าจะสุ่มสตริงข้างเคียงจนหมด ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของ String 1 โดยการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2

String 1 : มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก คือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$

Offspring 1-2 : มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 5 ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่ $\bar{f}_1 = 1.0000$, $\bar{f}_2 = 0.3333$, $\bar{f}_3 = 0.9555$, $\bar{f}_4 = 0.7151$ และ $\bar{f}_5 = 0.5998$ ตามลำดับโดยแทนค่าลงในสมการที่ 4.4 ดังนี้

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0.1|0.3333| = 0.0333$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0.6|0.9555| = 0.5733$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.1|0.7151| = 0.0715$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.1|0.5998| = 0.0600$$

ดังนั้น ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2 ทำให้ String 1 มีค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่

เท่ากับ New $g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \lambda_{ij} \frac{f_i - z_i^*}{f_i(\max) - z_i^*} \} = 0.5733$ ซึ่งเท่ากับค่า $g_1(x)$ เดิมในข้อ

ที่ 4.2.10 ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบในวัตถุประสงค์อื่นที่มีค่า $g_1(x)$ น้อยรองลงมา ตามตารางที่ 4.11 โดยปกติค่า $g_1(x)$ จะหมายถึงผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าเป้าหมายที่คูณกับค่าน้ำหนักของสตริง j แต่จากตาราง 4.11 ค่า $g_1(x)^{(max2nd)}$ หมายถึง ค่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าเป้าหมายที่มีค่ามากเป็นอันดับสอง (รองจากผลต่างที่มีค่ามากที่สุด) เป็นต้น

ตารางที่ 4.11 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์เดิมที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 1

String	$g_1(x)^{(max1st)}$	$g_1(x)^{(max2nd)}$	$g_1(x)^{(max3rd)}$	$g_1(x)^{(max4th)}$	$g_1(x)^{(max5th)}$
1	0.5733	0.1000	0.1000	0.0378	0.0333

ตารางที่ 4.12 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 1 ที่เกิดจากการแทนค่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2

String	$g_1(x)^{(max1st)}$	$g_1(x)^{(max2nd)}$	$g_1(x)^{(max3rd)}$	$g_1(x)^{(max4th)}$	$g_1(x)^{(max5th)}$
1	0.5733	0.1000	0.0715	0.0600	0.0333

จากตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์เดิมและ 4.12 เป็นค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ของ String 1 ซึ่งเกิดจากการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 2-1 เมื่อทำการพิจารณา ค่า $g(x)$ เรียงลำดับจากมากไปน้อยจะพบว่าค่า $g(x)$ ใหม่มีแตกต่างจากเดิมคือ $g(x)$ ที่มีค่ามากเป็นอันดับที่ 3 จะมี $g(x)$ เดิมเท่ากับ 0.1000 และค่า $g(x)$ ใหม่เท่ากับ 0.0715 เมื่อค่าค่า $g(x)$ ใหม่มีค่าน้อยกว่าค่าเดิม ดังนั้นจึงทำการแทนค่าตอบเดิมของ String 1 ด้วยคำตอบของ Offspring 1-2 ดังตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบใหม่ของ String 1 ที่เกิดจากการแทนที่โดย Offspring 3

String	Priority															
	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
Offspring 3	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
New String 1	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3

ซึ่งขณะนี้เกิดการแทนที่คำตอบเพียง 1 ครั้งคือ การแทนที่คำตอบของ String 1 ดังนั้นจึงทำการสุ่มปัญหาข้างเคียงตัวอื่น ในที่นี้สุ่มได้ String 2 จึงทำการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2 ลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของ String 2 ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของ String 1 โดยการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2

String 2 : มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก คือ $\lambda_1 = (\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}, \lambda_{42}, \lambda_{52}) = (0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6)$

Offspring 1-2 : มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 5 ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่ $\bar{f}_1 = 1.0000$, $\bar{f}_2 = 0.3333$, $\bar{f}_3 = 0.9555$, $\bar{f}_4 = 0.7151$ และ $\bar{f}_5 = 0.5998$ ตามลำดับโดยแทนค่าลงในสมการที่ 4.4 ดังนี้

$$\lambda_{12}|\bar{f}_1| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{22}|\bar{f}_2| = 0.1|0.3333| = 0.0333$$

$$\lambda_{32}|\bar{f}_3| = 0.6|0.9555| = 0.0956$$

$$\lambda_{42}|\bar{f}_4| = 0.1|0.7151| = 0.0715$$

$$\lambda_{52}|\bar{f}_5| = 0.1|0.5998| = 0.3599$$

ดังนั้น ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2 ทำให้ String 2 มีค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่

เท่ากับ New $g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \lambda_{ij} \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} \right\} = 0.3599$ ซึ่งเท่ากับค่า $g_1(x)$ เดิมในข้อ

ตารางที่ 4.10 ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบในวัตถุประสงค์อื่นที่มีค่า $g_1(x)$ น้อยรองลงมา ตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซบเดิมที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 2

String	$g_2(x)^{(max1st)}$	$g_2(x)^{(max 2nd)}$	$g_2(x)^{(max 3rd)}$	$g_2(x)^{(max 4th)}$	$g_2(x)^{(max 5th)}$
1	0.3599	0.1000	0.0956	0.0715	0.0333

ตารางที่ 4.15 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ที่เรียงลำดับจากมากไปน้อยของสตริง 2 ที่เกิดจากการแทนค่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2

String	$g_2(x)^{(max1st)}$	$g_2(x)^{(max 2nd)}$	$g_2(x)^{(max 3rd)}$	$g_2(x)^{(max 4th)}$	$g_2(x)^{(max 5th)}$
1	0.3599	0.1000	0.0956	0.0715	0.0333

จากตารางที่ 4.14 ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์เดิมและ 4.15 เป็นค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ของ String 2 ซึ่งเกิดจากการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2 เมื่อทำการพิจารณา ค่า $g(x)$ เรียงลำดับจากมากไปน้อยจะพบว่าค่า $g(x)$ ใหม่มีค่าเท่ากับ $g(x)$ เดิมในทุกวัตถุประสงค์ ดังนั้นจึงไม่เกิดการแทนที่คำตอบ

ดังนั้นจึงทำการสุ่มปัญหาข้างเคียงตัวอื่นๆจนกว่าจะเกิดการแทนที่ครบ 2 ครั้ง ตามที่กำหนด หรือหยุดการสุ่มเมื่อสุ่มจนครบตามจำนวนปัญหาข้างเคียง ดังตารางที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าไม่เกิดการแทนที่คำตอบจึงทำการสุ่มต่อจนครบตามจำนวนปัญหาข้างเคียง และจากตัวอย่างนี้เกิดการแทนที่เพียงครั้งเดียวคือ ในครั้งแรกซึ่งเป็นการกำหนดให้แทนค่าในปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา (String 1)

ตารางที่ 4.16 ปัญหาข้างเคียงที่ถูกกำหนดให้พิจารณาสำหรับการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Offspring 1-2 ในครั้งแรก

สตริงที่ถูกกำหนดให้พิจารณาการแทนค่าครั้งแรก	การแทนที่คำตอบ
String 1	เกิดการแทนที่คำตอบ

ตารางที่ 4.17 การสุ่มปัญหาข้างเคียงสำหรับการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Offspring 1-2

การสุ่มครั้งที่	สตริงข้างเคียง	การแทนที่คำตอบ
1	String 2	ไม่เกิดการแทนที่
2	String 8	ไม่เกิดการแทนที่
3	String 3	ไม่เกิดการแทนที่
4	String 10	ไม่เกิดการแทนที่

ตารางที่ 4.18 สตริงคำตอบหลังจากการแทนที่คำตอบในรอบการพิจารณาปัญหาย่อยที่ 1

String	Task															
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
2	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
3	8	11	10	15	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
8	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
10	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
Offspring 1-2	8	13	10	12	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3

4.2.12 การเก็บสตริงคำตอบของประชากรที่ดีที่สุดในแต่ละประชากรคำตอบภายนอก

เก็บค่าสตริงคำตอบของประชากรที่ดีที่สุดในแต่ละประชากรคำตอบภายนอก (External population :EP) จะทำการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดจาก Fitness 1 เมื่อเซต EP ไม่มีสตริงคำตอบใดอยู่ จะทำการเพิ่มคำตอบที่เข้าไปในเซตนี้ แต่กรณีที่มีคำตอบเดิมอยู่จะเก็บค่าเฉพาะสตริงคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำจากคำตอบที่อยู่ในเซตนี้เท่านั้น

จากในรอบดำเนินงานที่ 1 กำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบได้ดังตารางที่ 4.18 และเก็บคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 การกำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	Fitness
1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874	3
2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435	3
3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333	3
4	7	6	6.4615	0.0645	0.5447	2
5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255	1
6	7	4	6.3636	0.0750	0.3571	2
7	7	5	6.3000	0.1316	0.5328	2
8	7	5	6.3000	0.1029	0.4548	1
9	7	3	6.3636	0.1129	0.3438	1
10	7	3	6.4167	0.0492	0.2918	1
11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571	1
Offspring 2	7	4	6.4167	0.1298	0.4388	3
Offspring 3	7	4	6.4167	0.1137	0.4435	3

ตารางที่ 4.20 การเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Fitness =1) ในเซตประชากรคำตอบภายนอก

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	Fitness
5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255	1
8*	7	5	6.3000	0.1029	0.4548	1
9*	7	3	6.3636	0.1129	0.3438	1
10*	7	3	6.4167	0.0492	0.2918	1
11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571	1

4.2.13 กระบวนการทำงานในรอบถัดไป

ทำขั้นตอนเดิมซ้ำตั้งแต่ขั้นที่ 6 โดยพิจารณาปัญหาหลักตัวถัดไป และปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยนั้น และทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนครบตามจำนวนประชากร คำตอบที่เกิดจากการแทนที่จาก Offspring ในรอบการพิจารณาปัญหาย่อยก่อนหน้าจะถูกนำมาใช้ในรอบ เมื่อครบตามจำนวนประชากรแล้วทำการวนซ้ำตามเงื่อนไขที่กำหนด

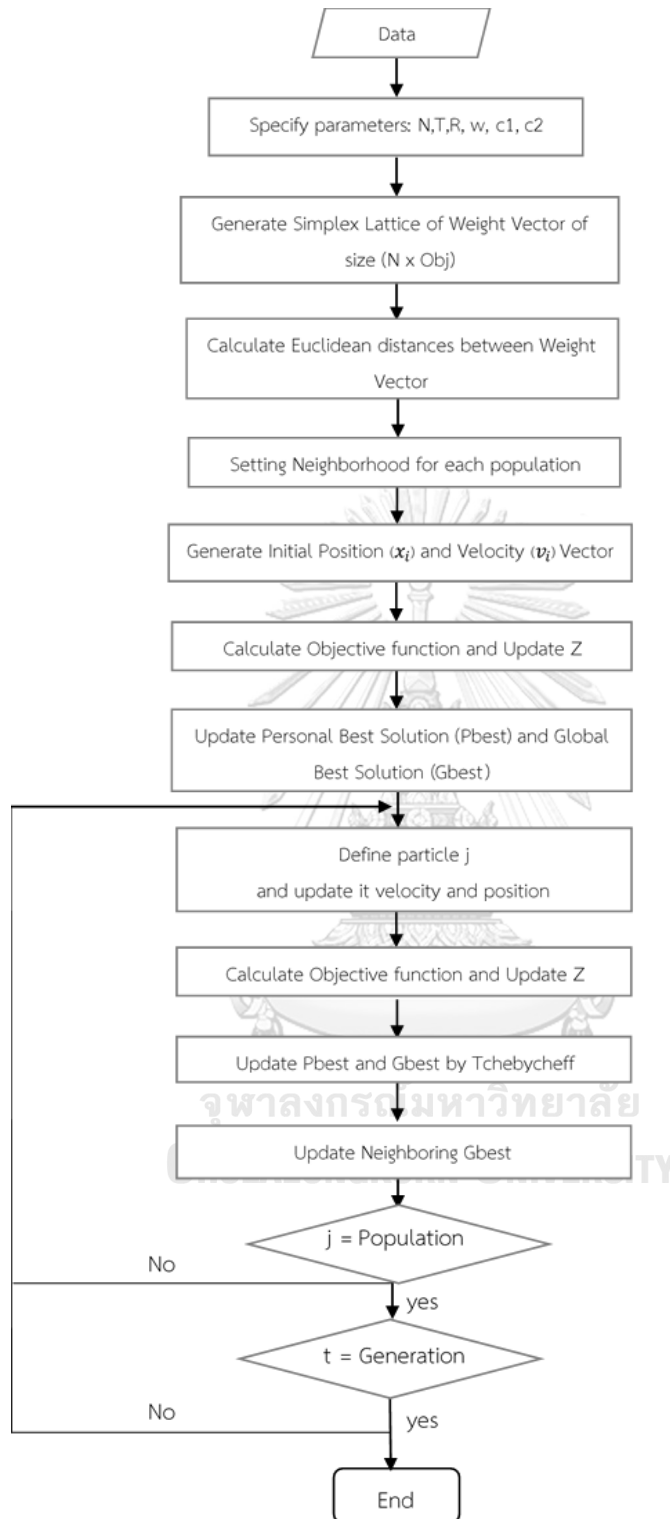
บทที่ 5

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคร่วมกับวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ หลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคสายการ ประกอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการทำงานและพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุคสายการประกอบรูปตัวยู

5.1 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Particle swarm optimization based on Decomposition : MOPSO/D) (Peng and Zhang 2008) จะใช้วิธีการแบ่งปัญหาหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาย่อยและทำการแก้ปัญหาโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกันตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของ MOEA/D ซึ่งจะใช้การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักให้กับแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทำให้ในแต่ละปัญหาย่อยมีค่าน้ำหนักของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป ซึ่งวิธีการนี้ถูกค้นพบว่าเป็นวิธีการที่ดีสำหรับการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ โดยจากเดิมอัลกอริทึมส่วนใหญ่จะใช้วิธีการคัดเลือกคำตอบโดยวิธีเชิงพาเรโตซึ่งจะไม่สามารถทำให้เกิดการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์เพราะเมื่อจำนวนวัตถุประสงค์มีมากขึ้นจะทำให้คำตอบโดยส่วนใหญ่ที่ได้จากการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเทียบเท่ากัน (Zheng, Tan et al. 2017) ค่าน้ำหนักของของปัญหาย่อยจะอยู่ในรูปของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนประชากร จากนั้น MOPSO/D จะใช้ข้อมูลจากประชากรข้างเคียงตามจำนวนที่ได้ถูกกำหนดไว้และทำการพัฒนาคำตอบโดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOPSO) โดยเมื่อแต่ละอนุภาคค้นพบตำแหน่งที่ดีกว่าเดิมจะถูกนำมาใช้เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว. ในวิธี MOPSO/D แต่ละอนุภาคจะมีตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล ซึ่งในระหว่างการพัฒนาคำตอบเมื่ออนุภาคหนึ่งมีการค้นพบตำแหน่งอนุภาคที่เหมาะสมกับตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดสากลของอนุภาคอื่นๆในกลุ่มประชากรข้างเคียงแล้ว ตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดสากลของประชากรข้างเคียงในแต่ละกลุ่มจะถูกพัฒนาไปพร้อมๆกัน



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ MOPSO/D

5.2 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนก (MOPSO/D) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวย

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

1. **สร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร:** กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก λ_j โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m)
2. **คำนวณระยะห่างยูคลิดีเนียนของเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก:** คำนวณระยะห่างระหว่างจุดระหว่างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักระหว่างประชากร d_{jk} จนครบทุกประชากร

$$\text{จาก } d_{jk} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} - \lambda_{ik})^2} \text{ เมื่อ } j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N \text{ และ } i = 1, 2, \dots, m$$

เมื่อ d_{jk} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร j กับประชากร k

λ_{ij} คือค่าน้ำหนักวัตถุประสงค์ที่ i ของประชากร j

N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด

m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

จากนั้นกำหนดปัญหาข้างเคียง ให้กับแต่ละปัญหาย่อย หรือประชากรย่อย (N) ซึ่งปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยแต่ละตัวมีได้มากที่สุดจำนวน T ปัญหา การพิจารณาว่าปัญหาใดจะเป็นปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณา จะดูจากระยะห่างยูคลิดีเนียนของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักระหว่างปัญหาย่อย ซึ่งระยะห่างที่มีค่าน้อยจะเป็นปัญหาข้างเคียง

3. **สร้างเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น:** สร้างเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาค (X_j) ซึ่งมีจำนวนพิกัดเท่ากับจำนวนชิ้นงานทั้งหมดโดยวิธีสุ่มค่าจำนวนจริงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับในแต่ละพิกัดของเวกเตอร์
4. **สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้น:** สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นให้กับแต่ละอนุภาค (V_i) โดยที่จำนวนพิกัดเวกเตอร์เท่ากับจำนวนชิ้นงานทั้งหมด ซึ่งเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นจะมีค่าความเร็วเป็น 0
5. **ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์:** คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยการแปลงตำแหน่งของอนุภาคให้เป็นสตริงคำตอบซึ่งอยู่ในรูปแบบของค่าสิทธิในการเลือกงาน
6. **เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด:** เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด (z_i^*) และค่ามากที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์

7. กำหนดตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว และ ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล: กำหนดให้ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค (Personal Best Solution (Pbest) : P_j) เป็นตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น (X_j) ($P_j = X_j$) และกำหนดให้ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร (Global best solution (Gbest) : G_j) สำหรับแต่ละอนุภาคเป็นตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น (X_j) ($G_j = X_j$)
8. เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในประชากรคำตอบภายนอก: เก็บสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นโดยเลือกเก็บคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งจะเป็นคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่น ไว้ในเซตของประชากรคำตอบภายนอก (External Population)

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

9. กำหนดประชากรที่พิจารณาและปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุด: กำหนดประชากรที่จะทำการพิจารณา แล้วนำสตริงคำตอบของประชากรที่พิจารณาทำการพัฒนาคำตอบ โดยที่วิธีการพัฒนาคำตอบจะใช้การหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคซึ่งจะใช้ตำแหน่งของอนุภาค (X_j), ความเร็วของอนุภาค (V_j), ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest : P_j) และ ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest : G_j) ของประชากรที่กำลังพิจารณาในการปรับปรุงความเร็วตามสมการ ที่ 5.1

$$V_j(t) = wV_j(t) + c_1r_1(P_j(t) - X_j(t)) + c_2r_2(G_j(t) - X_j(t)) \quad (5.1)$$

จากนั้นปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาค โดยนำเวกเตอร์ความเร็วที่ได้จากสมการที่ 5.2 มาแทนในสมการ 5.2 เพื่อหาตำแหน่งอนุภาคใหม่

$$X_j(t) = X_j(t) + V_j(t) \quad (5.2)$$

10. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์: คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรที่พิจารณา (X_j)
11. ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด: ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (z_i^*) เมื่อ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ เป็นค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดจากประชากรทั้งหมดและปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุด ($f_{i(max)}$)
12. นอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากสตริงคำตอบของประชากร: นอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของประชากรทั้งหมด ซึ่งได้จากตำแหน่งของอนุภาค (X_j) ตามสมการที่ 5.3 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าของแต่ละวัตถุประสงค์ที่มีค่าแตกต่างกันมากในแต่ละฟังก์ชันได้ดีขึ้น

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(\max)} - z_i^*} \quad (5.3)$$

- เมื่อ f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i
 $f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดในวัตถุประสงค์ที่ i ที่ได้จากสตริงคำตอบของประชากรทั้งหมดในเจนเนอเรชันปัจจุบัน
 z_i^* คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดในวัตถุประสงค์ที่ i ในประชากรทั้งหมด

13. ปรับปรุงตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest : P_j):

ปรับปรุงตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest : P_j) ของประชากรที่พิจารณาโดยเปรียบเทียบตำแหน่งใหม่ที่ได้ในรอบปัจจุบัน (X_j) กับตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_j) โดยใช้ฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ดังนี้

- 1) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_j) ของประชากรที่พิจารณาแล้วนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตามสมการที่ 5.3 จากนั้นแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ตามสมการที่ 5.4 ซึ่งจะเป็นการคูณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 5 วัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้วกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร λ_j ในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยค่าผลคูณของ $\lambda_{ij} |\bar{f}_i|$ ที่มากที่สุดจะเป็นค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์

$$\text{minimize } g_j(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} |\bar{f}_i|\} \quad (5.4)$$

เมื่อ λ_{ij} คือ ค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ i ของประชากร j

\bar{f}_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่ถูกนอมอลไลซ์

$g_j(x)$ คือ ค่าผลต่างที่มากที่สุดระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าเป้าหมายที่คูณกับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของประชากร j

- 2) แทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่ถูกนอมอลไลซ์แล้วมาแทนในสมการที่ 5.4 โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร (λ_j) ที่พิจารณา เพื่อหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์
 - 3) เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากการแทนค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_j) และตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ต่ำกว่าจะทำการกำหนดให้ ตำแหน่งของอนุภาคใหม่เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว ($P_j = X_j$)
- ### 14. ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_j) ของประชากรที่พิจารณา:
- ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_j) ของอนุภาคในประชากรที่พิจารณา ดังนี้

- 1) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จาก G_j ของประชากรที่พิจารณาแล้วนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากนั้นแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ตามสมการที่ 5.4 โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากรที่พิจารณา (λ_j)
 - 2) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่พิจารณามาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ตามสมการที่ 5.4 โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากรที่พิจารณา (λ_j)
 - 3) ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) จากประชากรที่พิจารณา กับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (G_j) ของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือก หากค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) มีค่าที่ดีกว่าจะทำการแทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือก (G_j) ด้วยสตริงคำตอบของตำแหน่งของอนุภาคใหม่ (X_j)
15. **ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_j) ของประชากรข้างเคียง:** ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_j) ของอนุภาคในประชากรข้างเคียง ดังนี้
- 1) คำนวณค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของแต่ละอนุภาค (G_j) โดย คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จาก G_j ของประชากรข้างเคียงแล้วนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากนั้นแทนลงตามสมการที่ 5.4 โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากรข้างเคียง (λ_j)
 - 2) สุ่มเลือกประชากรข้างเคียง 1 ปัญหา เพื่อนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่พิจารณามาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ตามสมการที่ 5.4 โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากรข้างเคียง (λ_j) ที่ถูกสุ่มเลือก
 - 3) ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) จากประชากรที่พิจารณาในข้อที่ 1 กับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (G_j) ของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือกในข้อที่ 2 หากค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) มีค่าที่ดีกว่าจะทำการแทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือก (G_j) ด้วยสตริงคำตอบของตำแหน่งของอนุภาคใหม่ (X_j)
 - 4) สุ่มประชากรข้างเคียงตัวถัดไปโดยประชากรข้างเคียงที่สุ่มได้จะต้องไม่ซ้ำกับตัวที่ถูกสุ่มแล้ว จากนั้นวน กลับไปทำซ้ำในข้อ 2 และจะหยุดกระบวนการสุ่มเมื่อมีการแทนที่สตริงคำตอบครบตามจำนวนที่ครั้งที่กำหนด (NR) หรือทำการสุ่มประชากรข้างเคียงจนครบทุกตัวแล้ว

16. **เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในประชากรคำตอบภายนอก:** ทำการเก็บคำตอบที่ได้จากประชากรที่พิจารณาไว้ในเซตคำตอบของประชากรภายนอก(External Population : EP) ในแต่ละรอบที่มีการพัฒนาคำตอบ ถ้าคำตอบที่ได้เป็นไม่ถูกรอรับโดยคำตอบอื่นที่อยู่ใน EP
17. **พิจารณาประชากรตัวถัดไป:** พิจารณาประชากรตัวถัดไปโดยวนกลับไปทำซ้ำรอบถัดไปตามขั้นตอนที่ 9 จนกว่าจะพิจารณาครบทุกจำนวนประชากรและเมื่อวนซ้ำครบทุกจำนวนประชากรแล้วจะจบเงื่อนไขแล้วทำการวนซ้ำจนครบตามจำนวนเงื่อนไขที่กำหนด



5.3 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยู

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบ จะเป็นข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่อยู่บนสายการประกอบทั้งสอง ประกอบไปด้วย จำนวนผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานของชิ้นงาน แผนภาพความสัมพันธ์ลำดับก่อนหลังของชิ้นงาน ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

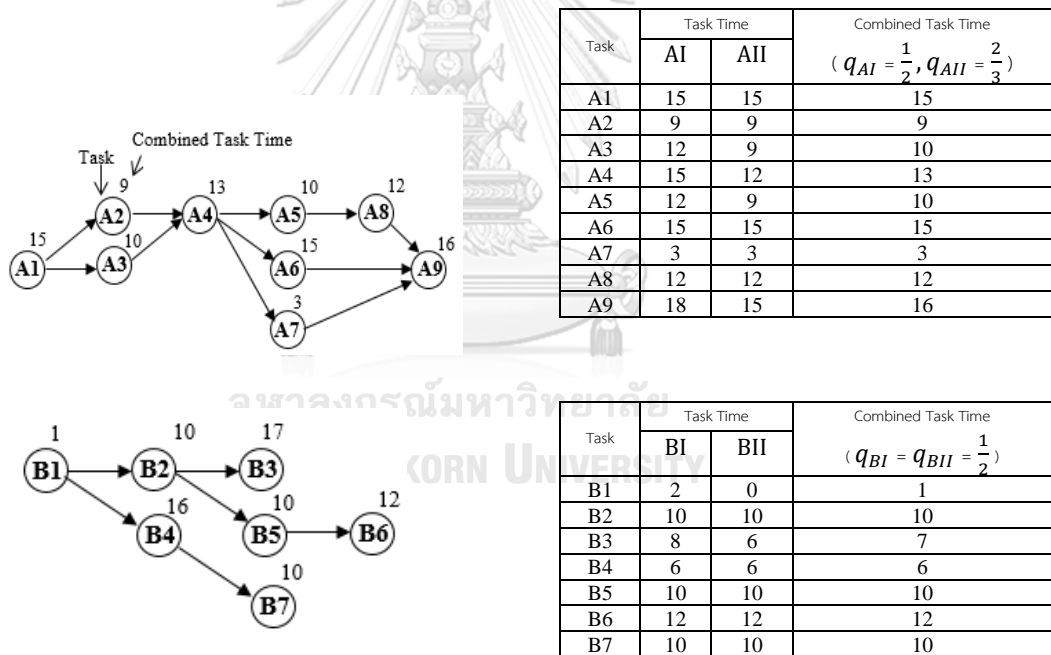
จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A มี 2 รุ่น ได้แก่ AI และ AII

สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น AI และ AII : $q_{AI} = \frac{1}{3}$ $q_{AII} = \frac{2}{3}$

จำนวนผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B มี 2 รุ่น ได้แก่ BI และ BII

สัดส่วนการผลิตสินค้ารุ่น BI และ BII : $q_{BI}, q_{BII} = \frac{1}{2}$

มีเวลาดำเนินงานของชิ้นงานแต่ละผลิตภัณฑ์และแผนภาพลำดับก่อนหลังรวมดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนภาพลำดับก่อนหลังรวมและเวลาชิ้นงาน (ก) ผลิตภัณฑ์ A บนสายการประกอบ 1 (Jaeschke 9-tasks) และ (ข) ผลิตภัณฑ์ B บนสายการประกอบ 2 (Mertens 7-tasks)

การกำหนดพารามิเตอร์ในวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

- จำนวนประชากรเบื้องต้น (N) 11 ตัว
- จำนวนปัญหาข้างเคียง (Neighborhood: T) 5 ตัว
- จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด = 2 ครั้ง/กลุ่มปัญหาข้างเคียง (หรือคิดเป็นจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด เท่ากับ $2/5 = 40$ เปอร์เซ็นต์จากประชากรข้างเคียง)
- ค่าน้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight : w) = 1.0
- ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor : $c1$, $c2$) = 0.1

ตัวอย่างขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

5.3.1. สร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร

กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก λ_j โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซ ดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m)

มีค่าดังตารางที่ 5.1 ซึ่งเวกเตอร์น้ำหนัก λ_j จะมีจำนวนพิกัดเท่ากับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ตารางที่ 5.1 ค่าน้ำหนักของประชากร

N	ค่าน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ λ_{ij}				
	Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5
1	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1
2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6
3	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
4	1	0	0	0	0
5	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
6	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	1
8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
9	0	1	0	0	0
10	0	0	1	0	0
11	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1

จากตารางที่ 5.1 $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})$ คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อย j และ λ_{ij} คือค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ i ของปัญหาย่อยที่ j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, \dots, m, \lambda_{ij} \geq 0$ และ $\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 วัตถุประสงค์ ($m = 5$) ดังนั้น $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$

ดังนั้น จาก ตารางที่ 5.1 เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของแต่ละประชากรจะมีค่า ดังนี้

$$\lambda_1 = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$$

$$\lambda_2 = (0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6)$$

$$\lambda_3 = (0.1, 0.6, 0.1, 0.1, 0.1)$$

$$\lambda_4 = (1, 0, 0, 0, 0)$$

$$\lambda_5 = (0.6, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1)$$

$$\lambda_6 = (0, 0, 0, 1, 0)$$

$$\lambda_7 = (0, 0, 0, 0, 1)$$

$$\lambda_8 = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$$

$$\lambda_9 = (0, 1, 0, 0, 0)$$

$$\lambda_{10} = (0, 0, 1, 0, 0)$$

$$\lambda_{11} = (0.1, 0.1, 0.1, 0.6, 0.1)$$

5.3.2 คำนวณระยะห่างยูคลิเดียนของเวกเตอร์น้ำหนัก

คำนวณระยะห่างระหว่างจุดระหว่างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักระหว่างประชากร d_{jk} จนครบทุกประชากร

$$d_{jk} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} - \lambda_{ik})^2} \text{ เมื่อ } j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N \text{ และ } i = 1, 2, \dots, m$$

เมื่อ d_{jk} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากร j กับประชากร k

λ_{ij} คือค่าน้ำหนักวัตถุประสงค์ที่ i ของประชากร j

N คือ จำนวนประชากรทั้งหมด

m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

เมื่อกำหนดให้ประชากรที่กำลังพิจารณาเป็นประชากรตัวที่ 1 ค่าระยะห่าง Euclidean distance ของประชากรตัวที่ 1 จากประชากรตัวอื่นๆ จะสามารถหาได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับ ประชากรตัวที่ 2 = d_{12}

จาก $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= (\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}, \lambda_{42}, \lambda_{52}) = (0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.6) \\ d_{12} &= \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{i1} - \lambda_{i2})^2} \\ &= \sqrt{(\lambda_{11} - \lambda_{12})^2 + (\lambda_{21} - \lambda_{22})^2 + (\lambda_{31} - \lambda_{32})^2 + (\lambda_{41} - \lambda_{42})^2 + (\lambda_{51} - \lambda_{52})^2} \\ &= \sqrt{(0.1 - 0.1)^2 + (0.1 - 0.1)^2 + (0.6 - 0.1)^2 + (0.1 - 0.1)^2 + (0.1 - 0.6)^2} \\ &= 0.7071 \end{aligned}$$

ทำการคำนวณหาค่าระยะห่างของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากรจะได้ค่าดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร

d_{jk}	d_{11}	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{15}	d_{16}	d_{17}	d_{18}	d_{19}	$d_{1,10}$	$d_{1,11}$
ค่าระยะห่าง	0.00	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.45	1.10	0.45	0.71

จากนั้นพิจารณาประชากรตัวอื่นจนกระทั่งครบทุกจำนวนประชากรจะได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากร ดังตาราง 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าระยะห่างระหว่างจุด d_{ij} ของประชากรตัวที่ i กับประชากร j

ประชากร	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.00	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.45	1.10	0.45	0.71
2	0.71	0.00	0.71	1.10	0.71	1.10	0.45	0.45	1.10	1.10	0.71
3	0.71	0.71	0.00	1.10	0.71	1.10	1.10	0.45	0.45	1.10	0.71
4	1.10	1.10	1.10	0.00	0.45	1.41	1.41	0.89	1.41	1.41	1.10
5	0.71	0.71	0.71	0.45	0.00	1.10	1.10	0.45	1.10	1.10	0.71
6	1.10	1.10	1.10	1.41	1.10	0.00	1.41	0.89	1.41	1.41	0.45
7	1.10	0.45	1.10	1.41	1.10	1.41	0.00	0.89	1.41	1.41	1.10
8	0.45	0.45	0.45	0.89	0.45	0.89	0.89	0.00	0.89	0.89	0.45
9	1.10	1.10	0.45	1.41	1.10	1.41	1.41	0.89	0.00	1.41	1.10
10	0.45	1.10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	0.89	1.41	0.00	1.10
11	0.71	0.71	0.71	1.10	0.71	0.45	1.10	0.45	1.10	1.10	0.00

หลังจากการคำนวณระยะห่างระหว่างประชากรแล้วจะทำการกำหนดประชากรข้างเคียงให้กับแต่ละปัญหาย่อย หรือประชากรย่อย (N) การกำหนดประชากรข้างเคียงจะคัดเลือกจากประชากรที่มีระยะห่างยูคลีเดียนระหว่างประชากรที่กำลังพิจารณาน้อยที่สุดจำนวน T ตัวอย่างการกำหนดปัญหาข้างเคียงให้กับประชากรตัวที่ 1

- 1) หาค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวแรก และ ประชากรอื่น

- 2) เรียงลำดับค่าระยะห่างระหว่างจุดระหว่างปัญหาย่อยที่พิจารณากับปัญหาย่อยอื่น (d_{jk}) จากน้อยไปมาก ดังตารางที่ 5.4
- 3) ในที่นี้กำหนดพารามิเตอร์ $T = 5$ ดังนั้นประชากรที่มีค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักที่น้อยที่สุด 5 อันดับแรกจึงถูกกำหนดเป็นประชากรข้างเคียงของประชากรตัวที่ 1 จากตารางที่ 5.4 ค่า d_{jk} ที่น้อยที่สุด 5 อันดับแรก ได้แก่ $d_{11}, d_{18}, d_{1,10}, d_{12}$ และ d_{13} ดังนั้นปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 คือปัญหาย่อยที่ 1, 8, 10, 2 และ 3 สังเกตได้ว่าประชากรที่อยู่ใกล้ประชากรตัวที่ 1 มากที่สุดคือตัวเอง ซึ่งมี Euclidean distance เท่ากับ 0 จากนั้นพิจารณาปัญหาข้างเคียงของปัญหาย่อยตัวอื่นจะสามารถหาได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 การเรียงลำดับค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร

d_{jk}	d_{11}	d_{18}	$d_{1,10}$	d_{12}	d_{13}	d_{15}	$d_{1,11}$	d_{16}	d_{14}	d_{17}	d_{19}
ค่าระยะห่าง	0.00	0.45	0.45	0.71	0.71	0.71	0.71	1.10	1.10	1.10	1.10

ตารางที่ 5.5 ประชากรข้างเคียง (Neighborhood)

ปัญหาย่อย	ปัญหาข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อย
1	1, 8, 10, 2, 3
2	2, 8, 7, 1, 3
3	7, 4, 6, 2, 8
4	4, 5, 8, 3, 11
5	5, 8, 4, 1, 2
6	6, 11, 8, 1, 3
7	7, 2, 8, 1, 3
8	8, 1, 2, 3, 5
9	9, 3, 8, 5, 11
10	10, 1, 8, 11, 2
11	11, 8, 6, 1, 2

5.3.3. สร้างสตริงคำตอบเบื้องต้นตามจำนวนประชากร

สร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค (X_i) ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาด $1 \times d$ เมื่อ d คือจำนวนชิ้นงานทั้งหมด โดยการสุ่มค่าจำนวนจริงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับในแต่ละพิกัดของเวกเตอร์ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.6 เวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น

$X_i(0)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.49	0.26	0.28	0.15	0.69	0.61	0.58	0.58	0.61	0.51	0.76	0.99	0.66	0.76	0.50	0.91
2	0.86	0.79	1.00	0.62	0.55	0.30	0.64	0.03	0.19	0.13	0.25	0.10	0.09	0.82	0.16	0.27
3	0.65	0.96	0.98	0.82	0.75	0.44	0.29	0.01	0.17	0.06	0.03	0.30	0.77	0.92	0.13	0.16
4	0.01	0.07	0.10	0.12	0.21	0.22	0.24	0.38	0.46	0.48	0.75	0.76	0.83	0.85	0.86	0.94
5	0.01	0.13	0.16	0.21	0.32	0.39	0.42	0.44	0.49	0.54	0.63	0.69	0.70	0.71	0.75	0.82
6	0.02	0.09	0.10	0.11	0.15	0.16	0.46	0.58	0.62	0.71	0.78	0.80	0.87	0.91	0.92	0.96
7	0.04	0.06	0.08	0.09	0.33	0.34	0.69	0.71	0.74	0.75	0.76	0.78	0.79	0.83	0.93	0.94
8	0.28	0.31	0.44	0.46	0.52	0.53	0.54	0.66	0.68	0.74	0.83	0.85	0.86	0.91	0.96	0.99
9	0.07	0.13	0.18	0.19	0.33	0.34	0.40	0.43	0.45	0.46	0.57	0.71	0.83	0.91	0.92	0.99
10	0.02	0.03	0.15	0.17	0.18	0.31	0.37	0.39	0.51	0.53	0.58	0.68	0.70	0.89	0.91	0.96
11	0.02	0.05	0.11	0.13	0.14	0.18	0.22	0.36	0.47	0.56	0.60	0.79	0.81	0.87	0.98	1.00

5.3.4. สร้างเวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้นให้กับแต่ละอนุภาค

โดยให้มีจำนวนพิกัดในเวกเตอร์เท่ากับจำนวนชิ้นงานทั้งหมด และทำการสุ่มเลขจำนวนจริงที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ให้กับค่าในแต่ละพิกัดของเวกเตอร์จนครบทุกอนุภาค ดังตาราง 5.8 โดย $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id})$ เมื่อ d คือ จำนวนชิ้นงานทั้งหมด

ตารางที่ 5.7 เวกเตอร์ความเร็วเริ่มต้น

$V_j(0)$	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.84	0.76	0.29	0.11	0.48	0.27	0.5	0.51	0.49	0.38	0.59	0.74	0.61	0.83	0.49	0.53
2	0.83	0.99	0.91	0.31	0.24	0.84	0.12	0.41	0.06	0.16	0.21	0.86	0.83	0.69	0.39	0.6
3	0.87	0.02	0.33	0.45	0.96	0.13	0.37	0.19	0.26	0.78	0.38	0.31	0.7	0.46	0.42	0.26
4	0.2	0.74	0.82	0.12	0.41	0.75	0.78	0.7	0.17	0.99	0.12	0.43	0.15	0.95	0.56	0.46
5	0.34	0.34	0.32	0.12	0.25	0.63	0.53	0.3	0.5	0.46	0.7	0.84	0.99	0.7	0.21	0.64
6	0.28	0.42	0.81	0.34	0.8	0.15	0.63	0.4	0.73	0.13	0.78	0.64	0.54	0.29	0.28	0.48
7	0.24	0.97	0.25	0.4	0.95	0.95	0.44	0.06	0.2	0.29	0.05	1	0.09	0.14	0.09	0.85
8	0.28	0.96	0.41	0.16	0.27	0.89	0.09	0.14	0.87	0.74	0.82	0.09	0.76	0.15	0.87	0.09
9	0.68	0.65	0.12	0.73	0.59	0.81	0.34	0.95	0.41	0.49	0.06	0.94	0.87	0.01	0.33	0.31
10	0.31	0.35	0.15	0.69	0.97	0.97	0.96	0.41	0.97	0.91	0.75	0.14	0.96	0.46	0.47	0.62
11	0.74	0.61	0.81	0.93	0.41	0.21	0.89	0.36	0.51	0.22	0.22	0.81	0.79	0.78	0.58	0.29

5.3.5 ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

โดยทำการถอดรหัสเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคให้เป็นค่าสิทธิของชิ้นงาน
จะเป็นค่าสิทธิของชิ้นงานดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานของประชากรคำตอบเริ่มต้น

String	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	4	2	3	1	15	10	8	7	9	6	13	5	11	14	16	12
2	8	13	12	10	15	9	11	16	6	5	4	7	2	14	1	3
3	8	11	10	15	16	9	7	12	6	1	5	13	4	14	2	3
4	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
5	3	8	2	14	10	6	11	1	16	15	5	13	9	4	7	12
6	9	12	6	3	11	1	16	8	15	5	13	2	10	7	14	4
7	12	16	14	11	5	13	6	9	7	8	10	15	1	3	2	4
8	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
9	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
10	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
11	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

หลังจากที่ได้ค่าสิทธิแล้วจะทำการจัดสมดุลสายการประกอบโดยการเลือกชิ้นงานที่มีค่าสิทธิ
น้อยก่อน เพื่อจัดชิ้นงานลงสู่ทั้งสองสายการประกอบไปพร้อมกัน โดยที่รอบเวลาการผลิตของทั้งสอง
สายการประกอบถูกปรับให้เท่ากัน และมีค่าเท่ากับ 30 จากนั้นทำการประเมินหาค่าฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ทั้ง 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนสถานีงาน จำนวนสถานี ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่
เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานี ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานี และความสมดุลภายในสถานี
งาน ซึ่งได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น

$X_i(0)$	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
X_1	1	7	4	6.4167	0.1394	0.3874
X_2	2	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
X_3	3	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
X_4	4	7	6	6.4615	0.0645	0.5447
X_5	5	6	3	5.4546	0.0760	0.5255
X_6	6	7	4	6.3636	0.0750	0.3571
X_7	7	7	5	6.3000	0.1316	0.5328
X_8	8	7	5	6.3000	0.1029	0.4548

ตารางที่ 5.9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น (ต่อ)

$X_i(0)$	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
X_9	9	7	3	6.3636	0.1129	0.3438
X_{10}	10	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
X_{11}	11	7	3	6.3636	0.0644	0.3571
Minimum f_i		6	3	5.4546	0.0492	0.2918
Maximum f_i		7	6	6.4615	0.1394	0.5447

5.3.6 เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด

ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (z_i^*) เมื่อ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, m$ จากตารางที่ 5.10 ค่าที่น้อยที่สุดและมากที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าดังตารางที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดของประชากรคำตอบเริ่มต้น

Z_1^*	Z_2^*	Z_3^*	Z_4^*	Z_5^*
6	3	5.4546	0.0492	0.2918

ตารางที่ 5.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดของประชากรคำตอบเริ่มต้น

$f_1(max)$	$f_2(max)$	$f_3(max)$	$f_4(max)$	$f_5(max)$
7	6	6.4615	0.1394	0.5447

5.3.7 กำหนดตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว และ ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล

กำหนดให้ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาค (Personal Best Solution (Pbest) : P_i) เป็นตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น (X_j) ($P_j = X_j$) และกำหนดให้ตำแหน่งที่ดีที่สุดของประชากร (Global best solution (Gbest) : G_j) สำหรับแต่ละอนุภาคเป็นตำแหน่งอนุภาคเริ่มต้น (X_j) ($G_j = X_j$) ดังตารางที่ 5.13 การกำหนดคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัวของแต่ละอนุภาคและตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของอนุภาคเริ่มต้น

ตารางที่ 5.12 ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวและตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของอนุภาคเริ่มต้น

$X_i(0)$	$P_i(0)$	$G_i(0)$	String
X_1	P_1	G_1	1
X_2	P_2	G_2	2

ตารางที่ 5.12 ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวและตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของอนุภาคเริ่มต้น (ต่อ)

$X_i(0)$	$P_i(0)$	$G_i(0)$	String
X_3	P_3	G_3	3
X_4	P_4	G_4	4
X_5	P_5	G_5	5
X_6	P_6	G_6	6
X_7	P_7	G_7	7
X_8	P_8	G_8	8
X_9	P_9	G_9	9
X_{10}	P_{10}	G_{10}	10
X_{11}	P_{11}	G_{11}	11

5.3.8 เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในประชากรคำตอบภายนอก

เก็บสตริงคำตอบที่เริ่มต้นที่ดีที่สุดซึ่งจะเป็นคำตอบที่อยู่ในฟิตเนส 1 ไว้ในเซตของประชากรคำตอบภายนอก (External Population) ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.13 สตริงคำตอบของเซตประชากรคำตอบภายนอก

String	ค่าในพิกัดของเวกเตอร์															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
8	15	16	7	5	14	8	6	13	1	10	2	3	11	9	4	12
9	7	14	2	4	1	11	9	15	8	12	13	5	6	3	10	16
10	14	3	4	9	1	11	13	16	2	15	6	8	7	10	12	5
11	10	12	5	11	2	6	3	9	15	1	13	7	4	14	16	8

ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

5.3.9 กำหนดประชากรที่พิจารณาและปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุด

โดยในรอบการดำเนินงานแรกจะพิจารณาประชากรตัวที่หนึ่ง ($j = 1$) จากนั้นนำตำแหน่งของอนุภาค (X_1), ความเร็วของอนุภาค (V_1), ตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest: P_1) และ ตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_1) ของประชากรตัวที่ 1 มาทำการพัฒนาคำตอบตามวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยปรับปรุงความเร็ว

$$\text{จาก} \quad V_i(t+1) = wV_i(t) + c_1r_1(P_i(t) - X_i(t)) + c_2r_2(G_i(t) - X_i(t))$$

โดยที่

$$X_1(1) = (0.49, 0.26, 0.28, 0.15, 0.69, 0.61, 0.58, 0.58, 0.61, 0.51, 0.76, 0.99, 0.66, 0.76, 0.50, 0.91)$$

$$P_1(1) = (0.49, 0.26, 0.28, 0.15, 0.69, 0.61, 0.58, 0.58, 0.61, 0.51, 0.76, 0.99, 0.66, 0.76, 0.50, 0.91)$$

$$V_1(1) = (0.84, 0.76, 0.29, 0.11, 0.48, 0.27, 0.50, 0.51, 0.49, 0.38, 0.59, 0.74, 0.61, 0.83, 0.49, 0.53)$$

$$G_1(1) = (0.07, 0.13, 0.18, 0.19, 0.33, 0.34, 0.40, 0.43, 0.45, 0.46, 0.57, 0.71, 0.83, 0.91, 0.92, 0.99)$$

แทนค่า X_1, V_1, P_1 และ G_1 จะได้ค่าเวกเตอร์ความเร็วใหม่ของอนุภาคที่ 1

$$V_1(2) = wV_1(1) + c_1r_1(P_1(1) - X_1(1)) + c_2r_2(G - X_1(1))$$

$$V_1(2) = (0.84, 0.76, 0.29, 0.11, 0.48, 0.27, 0.50, 0.51, 0.49, 0.38, 0.59, 0.74, 0.61, 0.83, 0.49, 0.53)$$

จากนั้นปรับตำแหน่งของอนุภาค โดยนำเวกเตอร์ความเร็ว มาแทนค่าเพื่อหาตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรที่ทำการพิจารณา เมื่อ t คือรอบการดำเนินงาน

จาก
$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1)$$

ดังนั้น
$$X_i(2) = X_i(1) + V_i(2)$$

$$X_1(2) = (1.33, 1.02, 0.57, 0.26, 1.17, 0.88, 1.08, 1.09, 1.10, 0.89, 1.35, 1.73, 1.27, 1.59, 0.99, 1.44)$$

5.2.10 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรที่พิจารณา ในที่นี้คือตำแหน่งใหม่ของอนุภาคที่ 1 ($X_1(2)$) โดยสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคที่ถูกปรับปรุงได้โดยการถอดรหัสเวกเตอร์ตำแหน่งอนุภาคให้เป็นค่าสิทธิของชิ้นงาน ตามตารางที่ 5.15 และจัดชิ้นงานลงสู่สายการประกอบเพื่อประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 5 วัตถุประสงค์ได้ดังตารางที่ 5.16 สตริงคำตอบของอนุภาคที่ 1 ที่ได้จากการปรับปรุงจะเขียนในรูปแบบ 1,2 หมายถึง สตริงคำตอบของอนุภาคที่ 1 ที่ได้รับการปรับปรุงคำตอบสำหรับรอบที่ 2

ตารางที่ 5.14 ค่าสิทธิ (Priority) ในการเลือกงานที่ได้จากการปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคที่ 1

Particle	String	Task															
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
$X_1(2)$	1,2	4	3	6	10	15	2	7	8	9	5	13	1	11	16	14	12

ตารางที่ 5.15 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอนุภาคที่ถูกปรับปรุงในรอบที่ 1

Particle	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
$X_1(2)$	1,2	7	6	6.4615	0.1090	0.1452

5.3.11 ปรับปรุงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด

หลังจากปรับความเร็วและตำแหน่งของประชากรที่ทำการพิจารณาแล้ว ซึ่งในรอบแรกนี้คือประชากรตัวที่ 1 ซึ่งจากเดิมค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุด $z_1^* = 6$, $z_2^* = 3$, $z_3^* = 5.4546$, $z_4^* = 0.0492$, $z_5^* = 0.2918$ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.17 ค่า Minimum f_5 ในรอบนี้ได้ค่าที่น้อยกว่าเดิมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1452 ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงค่า z_5^* ได้ดังตารางที่ 5.18 ส่วนค่า Maximum f_i จึงยังคงเป็นค่าเดิมดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลังจากปรับปรุงคำตอบของอนุภาคที่ 1

X_i	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
$X_1(2)$	1,2	7	6	6.4615	0.1090	0.1452
X_2	2,1	7	4	6.4167	0.1137	0.4435
X_3	3,1	7	4	6.4615	0.1370	0.4333
X_4	4,1	7	6	6.4615	0.0645	0.5447
X_5	5,1	6	3	5.4546	0.0760	0.5255
X_6	6,1	7	4	6.3636	0.0750	0.3571
X_7	7,1	7	5	6.3000	0.1316	0.5328
X_8	8,1	7	5	6.3000	0.1029	0.4548
X_9	9,1	7	3	6.3636	0.1129	0.3438
X_{10}	10,1	7	3	6.4167	0.0492	0.2918
X_{11}	11,1	7	3	6.3636	0.0644	0.3571
Minimum f_i		6	3	5.4546	0.0492	0.1452
Maximum f_i		7	6	6.4615	0.137	0.5447

ตารางที่ 5.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด หลังจากปรับปรุงคำตอบของอนุภาคที่ 1

z_1^*	z_2^*	z_3^*	z_4^*	z_5^*
6	3	5.4546	0.0492	0.1452

ตารางที่ 5.18 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดหลังจากปรับปรุงคำตอบของอนุภาคที่ 1

$f_1(max)$	$f_2(max)$	$f_3(max)$	$f_4(max)$	$f_5(max)$
7	6	6.4615	0.1394	0.5447

5.3.12 นอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากสตริงคำตอบของประชากร

นอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของประชากรที่ได้จากตำแหน่งของอนุภาค (X_j) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าของแต่ละวัตถุประสงค์ที่มีค่าแตกต่างกันได้ดีขึ้น

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{f_{i(max)} - z_i^*}$$

โดยที่ $f_{i(max)}$ เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดในเจนเนอเรชันปัจจุบัน ซึ่งในรอบการพิจารณาปัญหาย่อยที่ 1 สามารถหาค่า $f_{i(max)}$ โดยดูจากตารางที่ 5.19 ด้านบน $f_1(max) = 7$, $f_2(max) = 6$, $f_3(max) = 6.4615$, $f_4(max) = 0.1394$ และ $f_5(max) = 0.5447$ และมีค่า z_1^* ตามตารางที่ 5.18 ดังนั้นจะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นอมอลไลซ์ตามตารางที่ 5.20-5.22

ตารางที่ 5.19 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ของ X_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์

X_j	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
$X_1(2)$	1.0000	1.0000	1.0000	0.6630	0.0000
X_2	1.0000	0.3333	0.9555	0.7151	0.7467
X_3	1.0000	0.3333	1.0000	0.9734	0.7212
X_4	1.0000	1.0000	1.0000	0.1696	1.0000
X_5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2971	0.9519
X_6	1.0000	0.3333	0.9028	0.2860	0.5304
X_7	1.0000	0.6667	0.8396	0.9135	0.9702
X_8	1.0000	0.6667	0.8396	0.5953	0.7750
X_9	1.0000	0.0000	0.9028	0.7062	0.4971
X_{10}	1.0000	0.0000	0.9555	0.0000	0.3670
X_{11}	1.0000	0.0000	0.9028	0.1685	0.5304

ตารางที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ P_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์

P_j	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
P_1	1.0000	0.3333	0.9555	1.0000	0.6063
P_2	1.0000	0.3333	0.9555	0.7151	0.7467
P_3	1.0000	0.3333	1.0000	0.9734	0.7212
P_4	1.0000	1.0000	1.0000	0.1696	1.0000
P_5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2971	0.9519
P_6	1.0000	0.3333	0.9028	0.2860	0.5304
P_7	1.0000	0.6667	0.8396	0.9135	0.9702
P_8	1.0000	0.6667	0.8396	0.5953	0.7750
P_9	1.0000	0.0000	0.9028	0.7062	0.4971
P_{10}	1.0000	0.0000	0.9555	0.0000	0.3670
P_{11}	1.0000	0.0000	0.9028	0.1685	0.5304

ตารางที่ 5.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ G_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์

G_j	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
G_1	1.0000	0.3333	0.9555	1.0000	0.6063
G_2	1.0000	0.3333	0.9555	0.7151	0.7467
G_3	1.0000	0.3333	1.0000	0.9734	0.7212
G_4	1.0000	1.0000	1.0000	0.1696	1.0000
G_5	0.0000	0.0000	0.0000	0.2971	0.9519
G_6	1.0000	0.3333	0.9028	0.2860	0.5304
G_7	1.0000	0.6667	0.8396	0.9135	0.9702

ตารางที่ 5.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ G_j ที่ได้จากการนอมอลไลซ์

G_j	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
G_8	1.0000	0.6667	0.8396	0.5953	0.7750
G_9	1.0000	0.0000	0.9028	0.7062	0.4971
G_{10}	1.0000	0.0000	0.9555	0.0000	0.3670
G_{11}	1.0000	0.0000	0.9028	0.1685	0.5304

5.3.13 ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest : P_j)

ปรับปรุงตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุด (Pbest : P_j) ของประชากรที่พิจารณา ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบตำแหน่งอนุภาคใหม่ ($X_1(2)$) กับตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_1) ของประชากรที่พิจารณา โดยใช้ฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ ดังนี้

- นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_j) ของประชากรที่พิจารณาที่ถูกนอมอลไลซ์แล้วมาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ โดยคูณกับค่าน้ำหนักของประชากรที่พิจารณา

$$\text{จาก } \text{minimize } g_j(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} |\bar{f}_i|\}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

จากประชากรที่พิจารณาคือ ประชากรตัวที่ 1

มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$

จากตารางที่ 5.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรตัวที่ 1 (P_1) ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่

$$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 0.3333, \bar{f}_3 = 0.9555, \bar{f}_4 = 1.0000 \text{ และ } \bar{f}_5 = 0.6063$$

$$\lambda_{11} |\bar{f}_1| = 0.1 |1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{21} |\bar{f}_2| = 0.1 |0.3333| = 0.0333$$

$$\lambda_{31} |\bar{f}_3| = 0.6 |0.9555| = 0.5733$$

$$\lambda_{41} |\bar{f}_4| = 0.1 |1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{51} |\bar{f}_5| = 0.1 |0.6063| = 0.06063$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} |\bar{f}_i|\} = 0.5733$$

- นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์ซึ่งได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรที่พิจารณา ($X_1(2)$) มาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์. โดยคูณกับค่าน้ำหนักของประชากรที่พิจารณา

จากประชากรที่พิจารณา คือ ประชากรตัวที่ 1

มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$

จากตารางที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรตัวที่ 1 ($X_1(2)$) ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่

$$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 1.0000, \bar{f}_3 = 1.0000, \bar{f}_4 = 0.6630 \text{ และ } \bar{f}_5 = 0.0000$$

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0.6|1.0000| = 0.6000$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.1|0.663| = 0.0663$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.1|0.000| = 0$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij}|\bar{f}_i|\} = 0.6000$$

- 3) เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_j) และตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ดีกว่า จะทำการกำหนดให้ ตำแหน่งของอนุภาคใหม่เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว ($P_j = X_j$) และแทนที่สตริงคำตอบที่ได้ตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดส่วนตัว (P_j) ด้วยสตริงคำตอบที่ได้จากตำแหน่งของอนุภาคใหม่ (X_j)

ซึ่งการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ แบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้

- ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่ามากกว่า ($g(X_j|\lambda_j) > g(P_j|\lambda_j)$) ในกรณีนี้แสดงว่าคำตอบที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่เป็นคำตอบที่ไม่ดีสำหรับปัญหาข้างเคียงนั้นจึงไม่ทำการแทนที่สตริงคำตอบ

- ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่าน้อยกว่า ($g(X_j|\lambda_j) < g(P_j|\lambda_j)$) จะทำการแทนที่สตริงคำตอบเดิมของปัญหาด้วยสตริงคำตอบของตำแหน่งอนุภาคใหม่

- ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ได้เท่ากับค่าเดิม ($g(X_j|\lambda_j) = g(P_j|\lambda_j)$) จะทำการหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของวัตถุประสงค์อื่นที่มีค่า $g(x)$ น้อยรองลงมา จนพบว่าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่แตกต่างกันและจะทำการแทนที่คำตอบของปัญหาข้างเคียงนั้นถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ดีกว่า

จากในตัวอย่างนี้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่ามากกว่า

ดังนั้นจึงไม่แทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว ดังตารางที่ 5.23 และ 5.24

ตารางที่ 5.22 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)

Vector	String	λ_j	$\lambda_{ij} \bar{f}_i $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \bar{f}_i \}$
			Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
X_1	1,2	λ_1	0.1	0.1	0.6	0.0663	0	0.6000
P_1	1,1	λ_1	0.1	0.03333	0.5733	0.1	0.0606	0.5733

ตารางที่ 5.23 สรุปการปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)

Vector	String	λ_j	$g(x)$	การแทนที่
P_1	1,1	λ_1	$g(X_j \lambda_j) > g(P_j \lambda_j)$	ไม่เกิดการแทนที่คำตอบ

- 4) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (G_i) ของประชากรข้างเคียงซึ่งเป็นค่าที่ถูกนอมอลไลซ์แล้วมาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ โดยคูณกับค่าน้ำหนักของประชากรข้างเคียงที่พิจารณา จากประชากรที่พิจารณาคือ ประชากรตัวที่ 1 มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$ จากตารางที่ 5.22 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดสากลของประชากรที่พิจารณาได้แก่

$$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 0.3333, \bar{f}_3 = 0.9555, \bar{f}_4 = 1.0000 \text{ และ } \bar{f}_5 = 0.6063$$

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0.1|0.3333| = 0.0333$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0.6|0.9555| = 0.5733$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.1|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.1|0.6063| = 0.06063$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij}|\bar{f}_i|\} = 0.5733$$

- 5) เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) และตำแหน่งอนุภาคที่ดีที่สุดสากล (G_i) ถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ดีกว่าจะทำการกำหนดให้ ตำแหน่งของอนุภาคใหม่เป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว ($G_j = X_j$) และแทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือก (G_j) ด้วยสตริงคำตอบของตำแหน่งของอนุภาคใหม่ (X_j)

จากในตัวอย่างนี้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่ามากกว่า ดังนั้นจึงไม่แทนที่ค่าตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล ดังตารางที่ 5.25 และ 5.26

ตารางที่ 5.24 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)

Vector	String	λ_j	$\lambda_{ij} \bar{f}_i $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \bar{f}_i \}$
			Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
X_1	1,2	λ_1	0.1	0.1	0.6	0.0663	0	0.6000
P_1	1,1	λ_1	0.1	0.03333	0.5733	0.1	0.0606	0.5733

ตารางที่ 5.25 สรุปการปรับปรุงค่าตอบค่าตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)

Vector	String	λ_j	$g(x)$	การแทนที่
P_1	1,1	λ_1	$g(X_j \lambda_j) > g(P_j \lambda_j)$	ไม่เกิดการแทนที่ค่าตอบ

5.3.14 ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_j) ของประชากรที่พิจารณา

ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_j) ของอนุภาคในประชากรที่พิจารณา ดังนี้

- 1) คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จาก G_j ของประชากรที่พิจารณาแล้วนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากรที่พิจารณา (λ_j)

ประชากรที่พิจารณาคือ ประชากรที่ 1 มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$

จากตารางที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคของประชากรตัวที่ 1 (X_1) ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่

$$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 0.3333, \bar{f}_3 = 0.9555, \bar{f}_4 = 1.0000 \text{ และ } \bar{f}_5 = 0.6063$$

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0.2|1.0000| = 0.1$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0.2|0.3333| = 0.0333$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0.2|0.9555| = 0.5733$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.2|1.0000| = 0.1000$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.2|0.6063| = 0.0606$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij}|\bar{f}_i|\} = 0.5733$$

- 2) นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่พิจารณา มาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ โดยคูณกับเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของประชากรที่พิจารณา (λ_j)

จากประชากรที่พิจารณาคือ ประชากรตัวที่ 1 มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)$ จากตารางที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรตัวที่ 1 ($X_1(2)$) ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่

$$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 1.0000, \bar{f}_3 = 1.0000, \bar{f}_4 = 0.6630 \text{ และ } \bar{f}_5 = 0.0000$$

$$\lambda_{18}|\bar{f}_1| = 0.1|1.0000| = 0.1$$

$$\lambda_{28}|\bar{f}_2| = 0.1|1.0000| = 0.1$$

$$\lambda_{38}|\bar{f}_3| = 0.6|1.0000| = 0.6$$

$$\lambda_{48}|\bar{f}_4| = 0.1|0.6630| = 0.0663$$

$$\lambda_{58}|\bar{f}_5| = 0.1|0.0000| = 0$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij}|\bar{f}_i|\} = 0.6$$

- 3) ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) จากประชากรที่พิจารณา กับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (G_j) ของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือก หากค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) มีค่าที่ดีกว่าจะทำการแทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือก (G_j) ด้วยสตริงคำตอบของตำแหน่งของอนุภาคใหม่ (X_j) จากในตัวอย่างนี้ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่ามากกว่า ดังนั้นจึงไม่แทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัว ดังตารางที่ 5.27 และ 5.28

ตารางที่ 5.26 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดส่วนตัวของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)

Vector	String	λ_j	$\lambda_{ij} \bar{f}_i $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \bar{f}_i \}$
			Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
$X_1(2)$	1,2	λ_1	0.1	0.1	<u>0.6</u>	0.0663	0	0.6000
X_1	1,1	λ_1	0.1	0.03333	<u>0.5733</u>	0.1	0.0606	0.5733

ตารางที่ 5.27 สรุปการปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดส่วนตัว (Pbest) ของประชากรที่พิจารณา (ประชากรตัวที่ 1)

Vector	String	λ_j	$g(x)$	การแทนที่
X_1	1,1	λ_1	$g(X_j \lambda_j) > g(P_j \lambda_j)$	ไม่เกิดการแทนที่คำตอบ

5.3.15 ปรับปรุงตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (Gbest: G_i) ของประชากรข้างเคียง

- 1) สุ่มเลือกประชากรข้างเคียง 1 ปัญหา จากนั้นหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของประชากรที่ถูกสุ่มเลือก โดยเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟที่ได้กับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟที่เกิดจากการแทนที่คำตอบของตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรที่พิจารณา

ตัวอย่าง

ประชากรข้างเคียงของ ประชากรตัวที่ 1 เป็นไปตามตารางที่ 5.29 ในตัวอย่างนี้สุ่มได้ ประชากรข้างเคียงตัวที่ 8

ตารางที่ 5.28 ประชากรข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อยที่ 1

ปัญหาย่อย	ปัญหาข้างเคียง (Neighborhood)ของปัญหาย่อย
1	1, 8 , 10, 2, 3

หาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มได้

ประชากรข้างเคียงตัวที่ 8 มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_8 = (\lambda_{18}, \lambda_{28}, \lambda_{38}, \lambda_{48}, \lambda_{58}) = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$

จากตารางที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคของประชากรตัวที่ 8 (X_8) ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่

$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 0.6667, \bar{f}_3 = 0.8396, \bar{f}_4 = 0.5953$ และ $\bar{f}_5 = 0.7750$
0.1000 0.0667 0.5038 0.0595 0.0775

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0.2|1.0000| = 0.2$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0.2|0.6667| = 0.1333$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0.2|0.8396| = 0.1679$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.2|0.5953| = 0.1191$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.2|0.7750| = 0.1549$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij}|\bar{f}_i|\} = 0.2$$

- 2) หาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ใหม่ของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มได้โดยการแทนที่คำตอบที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของประชากรที่พิจารณา ดังนี้

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่พิจารณา มาแทนลงในฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ โดยคูณกับค่าน้ำหนักของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือกจากประชากรที่ถูกสุ่มเลือกคือ ประชากรตัวที่ 8

มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ $\lambda_8 = (\lambda_{18}, \lambda_{28}, \lambda_{38}, \lambda_{48}, \lambda_{58}) = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2,$

$0.2)$ จากตารางที่ 5.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ของ

ประชากรตัวที่ 1 ($X_1(2)$) ที่ถูกนอมอลไลซ์แล้ว ได้แก่

$$\bar{f}_1 = 1.0000, \bar{f}_2 = 1.0000, \bar{f}_3 = 1.0000, \bar{f}_4 = 0.6630 \text{ และ } \bar{f}_5 = 0.0000$$

$$\lambda_{18}|\bar{f}_1| = 0.2|1.0000| = 0.2$$

$$\lambda_{28}|\bar{f}_2| = 0.2|1.0000| = 0.2$$

$$\lambda_{38}|\bar{f}_3| = 0.2|1.0000| = 0.2$$

$$\lambda_{48}|\bar{f}_4| = 0.2|0.6630| = 0.1326$$

$$\lambda_{58}|\bar{f}_5| = 0.2|0.0000| = 0$$

$$\text{ดังนั้น } g_1(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij}|\bar{f}_i|\} = 0.2$$

หลังจากการสุ่มเลือกจะทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่พิจารณา กับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากล (G_j) ของประชากรข้างเคียงโดยใช้ค่าน้ำหนักของประชากรที่ถูกสุ่มเลือก หากตำแหน่งอนุภาคใหม่ (X_j) ของประชากรที่พิจารณาทำให้เกิดค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ดีกว่า จะทำการแทนที่สตริงคำตอบซึ่งเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มเลือกด้วยตำแหน่งอนุภาคใหม่ ($G_j = X_j$)

- 3) จากนั้นพิจารณาการแทนที่สตริงคำตอบโดยใช้ฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์เช่นเดียวกับ ข้อที่ 3 ในหัวข้อ 5.2.13

ดังนั้นในตัวอย่างนี้จากตารางที่ 5.30 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่าเท่ากับค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคเดิมของประชากร 8 ($g(X_j|\lambda_j) = g(P_j|\lambda_j)$) จึงต้องทำการหาค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของวัตถุประสงค์อื่นที่มีค่า $g(x)$ น้อยรองลงมา จนพบค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่แตกต่างกันและจะทำการแทนที่คำตอบของปัญหาข้างเคียงนั้นถ้าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ดีกว่า จากตารางที่ 5.31 เมื่อเรียงค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับจากมากไปน้อย

แล้วพบค่าที่แตกต่างกันในวัตถุประสงคืมีค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์มากเป็นอันดับสอง จะเห็นว่าค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่มีค่ามากกว่าดังนั้นจึงไม่เกิดการแทนที่สตรงคำตอบของอนุภาคใหม่

ตารางที่ 5.29 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่และจากตำแหน่งที่ดีที่สุดสากลของประชากรที่ถูกสุ่มเลือก ครั้งที่ 1

Vector	String	λ_j	$\lambda_{ij} \bar{f}_i $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \bar{f}_i \}$
			Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	
X_8	8,1	λ_8	0.2	0.1333	0.1679	0.1191	0.1549	0.2
$X_1(2)$	1,2	λ_8	0.2	0.2	0.2	0.1326	0.0000	0.2

ตารางที่ 5.30 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มได้ในรอบที่ 1

Vector	String	λ_j	$\lambda_{ij} \bar{f}_i $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \bar{f}_i \}$
			Obj. 1	Obj. 3	Obj. 5	Obj. 2	Obj. 4	
X_8	8,1	λ_8	0.2	0.1679	0.1549	0.1333	0.1191	0.2

ตารางที่ 5.31 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่โดยใช้น้ำหนักของประชากรข้างเคียงที่ถูกสุ่มได้ในรอบที่ 1

Vector	String	λ_j	$\lambda_{ij} \bar{f}_i $					$g(x) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} \bar{f}_i \}$
			Obj. 1	Obj. 3	Obj. 5	Obj. 2	Obj. 4	
$X_1(2)$	8,1	λ_8	0.2	0.2	0.2	0.1326	0.0000	0.2

ตารางที่ 5.32 การปรับปรุงคำตอบคำตอบที่ดีที่สุดสากล (Gbest) ของประชากรที่ถูกสุ่มเลือกครั้งที่ 1

Vector	String	λ_j	$g(x)$	การแทนที่
X_8	8,1	λ_1	$g(X_1(2) \lambda_8) < g(X_8 \lambda_8)$	ไม่เกิดการแทนที่คำตอบ

- วนซ้ำกลับไปทำข้อ 5 จนกว่าจะแทนที่สตรงคำตอบครบตามจำนวนครั้งที่กำหนด โดยจากตัวอย่างนี้กำหนดพารามิเตอร์จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR) ไม่เกิน 2 ครั้งจากจำนวนประชากรข้างเคียงทั้งหมด 5 ตัว (หรือการแทนที่คำตอบสูงสุดใน

ประชากรไม่เกิน $2/5 = 40$ เปอร์เซ็นต์จากประชากรข้างเคียงทั้งหมด) หรือหากเกิดการแทนที่คำตอบไม่ครบจำนวนครั้งที่กำหนดให้วนซ้ำจนกว่าจะครบจำนวนประชากรข้างเคียง

เมื่อทำการวนซ้ำจนครบตามเงื่อนไขการแทนที่แล้วจะสามารถสรุปการแทนที่ที่ตรงคำตอบโดยตรงคำตอบที่ได้จากตำแหน่งอนุภาคใหม่ได้ตามตารางที่ 5.34

ตารางที่ 5.33 สรุปการแทนที่ที่ตรงคำตอบของประชากรข้างเคียงของประชากรตัวที่ 1

Vector	String	λ_j	$g(X_{10}(2))$	$g(X_j)$	การเปรียบเทียบ $g(x)$	การแทนที่คำตอบ
X_8	8,1	λ_8	0.2	0.1679	$g(X_1(2) \lambda_8) > g(X_8 \lambda_8)$	ไม่เกิดการแทนที่
X_{10}	10,1	λ_{10}	1	0.9556	$g(X_1(2) \lambda_{10}) > g(X_{10} \lambda_{10})$	ไม่เกิดการแทนที่
X_2	2,1	λ_2	0.1	0.4	$g(X_1(2) \lambda_2) < g(X_2 \lambda_2)$	เกิดการแทนที่
X_3	8,1	λ_3	0.2	0.1679	$g(X_1(2) \lambda_3) > g(X_3 \lambda_3)$	ไม่เกิดการแทนที่

5.3.16 เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ในประชากรคำตอบภายนอก

ทำการเก็บคำตอบที่ได้จากประชากรที่พิจารณาไว้ในเซตคำตอบของประชากรภายนอก (External Population : EP) ในแต่ละรอบที่มีการพัฒนาคำตอบ ถ้าคำตอบที่ได้เป็นไม่ถูกรอรับโดยคำตอบอื่นที่อยู่ใน EP

5.3.17 พิจารณาประชากรตัวถัดไป

พิจารณาประชากรตัวถัดไปโดยวนกลับไปทำซ้ำรอบถัดไปตามขั้นตอนที่ 9 จนกว่าจะพิจารณาครบทุกจำนวนประชากร และเมื่อวนซ้ำครบทุกจำนวนประชากรแล้วจะจบเงินเนอเรชั่นแล้วทำการวนซ้ำตามจำนวนเงินเนอเรชั่นที่กำหนด

บทที่ 6

การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบ รูปตัวยู

ในบทนี้จะนำอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหามาเปรียบเทียบสมรรถนะโดยอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกัน ได้แก่ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (MOPSO) และการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคร่วมกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOPSO/D) ตัวชี้วัดที่ใช้ประกอบไปด้วย 6 ตัวชี้วัดได้แก่ 1) การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) 2) ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) 3) การกระจายตัว (Spread) 4) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) 5) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison)) 6) เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time)

6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 12 ปัญหา ซึ่งในแต่ละปัญหาจะแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาย่อยตามรอบเวลาการผลิต ในการทดลองสำหรับแต่ละปัญหาย่อยจะทำการทดลองซ้ำ 2 รอบ การทดลอง ซึ่งปัญหาตัวอย่างมีจำนวนชิ้นงานรวมของปัญหาในจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยูอยู่ในช่วง 32 ถึง 166 ชิ้นงาน โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 6.1 และเพื่อให้สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงกำหนดจำนวนเจนเนอชันเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมกับปัญหาในแต่ละขนาดดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

No.	Line1				Line2				Total Task	Common Cycle Time
	Problem	Model	MPS	Cycle Time	Problem	Model	MPS	Cycle Time		
1	Mitchell	3	2:1:2	15	Jackson	2	3:1	10	32	30
				18				12		36
				21				14		42
2	Jackson	3	1:2:1	9	Roziég	2	3:1	18	36	18
				11				22		22
				13				26		26
3	Mitchell	2	2:1:2	17	Roziég	3	1:2:1	34	46	34
				21				18		126
				21				21		21
4	Roziég	3	1:2:1	21	Roziég	3	2:1:2	42	50	42
				25				50		50
				16				32		32
5	Heskiaoff	3	1:1	138	Heskiaoff	2	1:1	205	56	28290
				205				216		44280
				216				324		648
6	Gunther	3	1:1	41	Sawyer	2	2:3	41	65	41
				54				54		54
				81				81		81
7	Killbridge	3	1:1	79	Heskiaoff	2	2:3	138	73	10902
				110				205		4510
				110				216		11880
8	Killbridge	2	1:1	57	Killbridge	2	1:3	79	90	4503
				92				110		5060
				110				110		110
9	Killbridge	3	2:1:2	79	Tonge	3	1:2:1	410	115	32390
				110				468		25740
				110				527		57970
10	Tonge	3	1:1:1	320	Tonge	2	3:1	320	140	320
				207				270		6210
				293				220		64460
11	Tonge	2	3:1	220	Wee-mag	3	1:1:1	270	145	5940
				252				84		252
				303				101		303
12	Arcus1	3	1:1:2	6842	Acrus1	3	1:2:1	6842	166	6842
				7571				7571		7571
				6309				6309		6309

ตารางที่ 6.2 จำนวนเจนเนอเรชันที่ใช้ในการทดลอง

Size	Range of Total task	No.	Line 1		Line 2		Total Task	Generation
			Problem	number of Task	Problem	number of Task		
small	30-50	1	Mitchell	21	Jackson	11	32	500
		2	Jackson	11	Roszieg	25	36	
		3	Mitchell	21	Roszieg	25	46	
		4	Roszieg	25	Roszieg	25	50	
Medium	51-100	5	Heskiaoff	28	Heskiaoff	28	56	1000
		6	Gunther	35	Sawyer	30	65	
		7	Kilbridge	45	Heskiaoff	28	73	
		8	Kilbridge	45	Kilbridge	45	90	
Large	101-170	9	Kilbridge	45	Tonge	70	115	1500
		10	Tonge	70	Tonge	70	140	
		11	Tonge	70	Wee-mag	75	145	
		12	Arcus1	83	Arcus1	83	166	

6.2 วิธีการทดลองของงานวิจัย

ในการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดสมดุคคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบมากวัตดูประสงค์บนสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมีขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึมสำหรับในแต่ละโจทย์ปัญหา
2. ทำการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างโดยใช้อัลกอริทึมและหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตามจำนวนรอบการทำงานที่กำหนด
3. รวบรวมคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึม (Obtained Pareto-optimal Solution) จากนั้นทำการจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 (fitness 1) จะถูกกำหนดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal Solution)
4. ประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกันด้วยตัวชี้วัดซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวชี้วัด ได้แก่ การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-

Optimal Set) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย (Convergence and diversity) การกระจายตัว (Spread) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison))

การทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างในงานวิจัยนี้จะใช้การทดลองผ่านโปรแกรม MATLAB ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel® Core™ i7-7700HQ CPU@2.8GHz RAM 8.00 GB

6.3 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมที่ใช้จะแตกต่างกันในแต่ละปัญหาโดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จะได้จากการทดลองและบางส่วนอ้างอิงจากงานวิจัยอื่นที่พบว่าเป็นค่าที่ทำให้อัลกอริทึมสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ดี

6.3.1 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D

1) จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population: N)

การกำหนดจำนวนประชากรของอัลกอริทึม MOEA/D จะขึ้นอยู่กับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหา และ วิธีการสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีชิมเพลกแลกทิตในการสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก ซึ่งจำนวนประชากรที่เหมาะสมกับปัญหา 5 วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้คือ 131 ดังนั้นจึงกำหนดให้จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 131

2) จำนวนปัญหาข้างเคียง (Neighborhood size: T)

ในอัลกอริทึม MOEA/D จำนวนของปัญหาข้างเคียงเป็นตัวกำหนดขนาดของกลุ่มปัญหาที่จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาคำตอบในแต่ละรอบซึ่งกลุ่มปัญหาข้างเคียงจะเปลี่ยนแปลงตามปัญหาที่ทำการพิจารณา ดังนั้นจำนวนปัญหาข้างเคียงจึงเป็นปัจจัยที่กำหนดทิศทางของการพัฒนาคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองโดยกำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียงโดยอ้างอิงจาก (Zhang et al., 2007) แบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ จำนวน 10 และ 20

3) จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Maximum number of solution replacement: NR)

สตริงคำตอบที่ได้จากการพัฒนาจะถูกใช้ในการแทนที่สตริงคำตอบของปัญหาข้างเคียง โดยจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุดเป็น เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อให้เกิดการแทนที่เหมาะสม หากมีจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดคำตอบซ้ำซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการพัฒนาคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบแบ่งเป็นสองระดับ

ได้แก่ 2 และ 5 เมื่อปัญหาข้างเคียงมีจำนวน 10 ตัว หรือเมื่อจำนวนปัญหาข้างเคียงมีจำนวน 20 ตัว จะคิดเป็นจำนวนครั้งในการแทนที่ค่าตอบเท่ากับ 4 และ 10 เป็นต้น หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การแทนที่สูงสุด 20% และ 50% ของจำนวนปัญหาข้างเคียง

6.3.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOPSO

1) จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population: N)

การกำหนดจำนวนประชากรของอัลกอริทึม PSO จะถูกกำหนดให้เท่ากับจำนวนประชากรของอัลกอริทึม MOEA/D เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาค่าตอบที่เหมาะสม โดยประชากรเริ่มต้นของ PSO จะมี 1 ฟังก์ชันประกอบไปด้วยจำนวนอนุภาคเท่ากับ 131 อนุภาค

2) ค่าน้ำหนักการหน่วง (Inertia Weight: w) ค่าน้ำหนักการหน่วงเป็นค่าที่มีความสำคัญในด้านการลู่เข้าของคำตอบซึ่งค่าน้ำหนักการหน่วงที่มีค่ามากจะส่งผลให้เกิดการค้นหาค่าตอบแบบวงกว้างหรือสามารถค้นหาคำตอบในพื้นที่ใหม่ ในขณะที่ค่าถ้ามีค่าน้อยจะทำการค้นหาค่าตอบแบบเฉพาะที่ (Parsopoulos and Vrahatis 2002) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าน้ำหนักการหน่วงเท่ากับ 1 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบ (Fattahi and Samouei 2016)

3) ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor: c_1, c_2)

เป็นค่าที่ให้ความสำคัญในการจดจำคำตอบจากตำแหน่งที่ดีที่สุดของแต่ละอนุภาคและของอนุภาคทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยแบ่งระดับปัจจัยของ c_1 และ c_2 เป็น 2 ระดับ ได้แก่ 1 และ 1.5

6.3.3 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOPSO/D

1) จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population: N)

การกำหนดจำนวนประชากรของอัลกอริทึม MOPSO/D จะใช้จำนวนเท่ากับ MOEA/D เนื่องจากทั้ง 2 อัลกอริทึมใช้การสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักที่เหมือนกันโดยใช้วิธีซิมเพกซ์แลตทิซ จึงกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 131

2) จำนวนปัญหาข้างเคียง (Neighborhood size: T)

กำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียงเท่ากับพารามิเตอร์จำนวนปัญหาข้างเคียงของ MOEA/D ซึ่งอ้างอิงจากการทดสอบพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม

3) จำนวนการแทนที่ค่าตอบสูงสุด (Maximum number of solution replacement: NR)

สตริงคำตอบที่ได้จากการพัฒนาจะถูกใช้ในการแทนที่สตริงคำตอบของตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค (Gbest: G) ในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุดโดยอ้างอิงจากการทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม MOEA/D

4) ค่าน้ำหนักการหมุน (Inertia Weight: w)

ค่าน้ำหนักการหมุนในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 1 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ (Parviz Fatthahia et al., 2016)

5) ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor: c1, c2)

เป็นค่าที่ให้ความสำคัญในการจดจำคำตอบจากตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ของแต่ละอนุภาคและของอนุภาคทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยแบ่งระดับปัจจัยของ c1 และ c2 เป็น 2 ระดับ ได้แก่ 1 และ 1.5

6.4 การทดสอบพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

ในการทดสอบพารามิเตอร์จะใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Full factorial design และทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 replicate โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 5 เป็นตัวแปรตอบสนองโดยเรียงลำดับความสำคัญของตัวชี้วัดดังนี้ 1) การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) 2) ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) 3) การกระจายตัว (Spread) 4) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ซึ่งเป็นคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเปรียบเทียบกับจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) 5) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ซึ่งเป็นคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเปรียบเทียบกับจำนวนคำตอบทั้งหมดในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison))

6.4.1 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึม มีดังนี้

- 1) ออกแบบการทดลองแบบ General full factorial design
- 2) ทำการทดลองจำนวน 3 replicate
- 3) คำนวณค่าตัวชี้วัดทั้ง 5 ตัวชี้วัด เพื่อใช้เป็นค่าตัวแปรตอบสนอง
- 4) กำหนดค่าตัวชี้วัดเป็นตัวแปรตอบสนองครั้งละ 1 ตัวชี้วัดและทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab 18

6.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1) วิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองที่ละตัวแปรโดยเรียงตามลำดับความสำคัญของตัวชี้วัด โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้พิจารณาตัวชี้วัดด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนองที่พิจารณาเป็นอันดับแรก

2) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแฟกทอเรียล ตามวิธีการดังนี้

- ถ้าค่า p-value ของอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction Effect) มีค่าน้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จะตัดสินใจยอมรับว่าปัจจัยในแต่ละระดับที่ทำการทดสอบมีผลต่อตัวแปรตอบสนองและทำการเลือกระดับของค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด

- ถ้าค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด $\alpha = 0.05$ จะตัดสินใจยอมรับว่าปัจจัยในแต่ละระดับที่ทำการทดลองเป็นอิสระต่อกัน และจะทำการพิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) เช่นเดียวกับการพิจารณาอิทธิพลร่วมซึ่งกำหนดค่าระดับนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$

3) ถ้าหากผลจากการวิเคราะห์ปัจจัยในระดับที่กำหนดไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองทั้งอิทธิพลร่วม และ อิทธิพลหลักของปัจจัย ให้ทำการพิจารณาค่าตัวแปรตอบสนองในลำดับความสำคัญถัดไปโดยทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 2 แต่ถ้าหากทำการวิเคราะห์จนครบทุกตัวแปรตอบสนองแล้วพบว่าไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองทุกตัวจะทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุดโดยใช้ Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab

6.4.3 รายละเอียดของการทดสอบพารามิเตอร์

จากค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะแบ่งระดับปัจจัยในการทดสอบ ของแต่ละอัลกอริทึมตามตารางที่ 6.3-6.4 ดังนี้

ตารางที่ 6.3 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D

No.	ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1.	จำนวนประชากรข้างเคียง (T)	10
		20
2.	จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR)	20% ของจำนวนประชากรข้างเคียง
		50% ของจำนวนประชากรข้างเคียง

ตารางที่ 6.4 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOPSO และ MOPSO/D

No.	ปัจจัย	ระดับปัจจัย
1.	Learning factor: Cognitive parameter (c1)	1
		1.5
2.	Learning factor: Social parameter (c2)	1
		1.5

6.4.4 ตัวอย่างการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ในตัวอย่างนี้จะทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในปัญหาขนาดกลางซึ่งมีจำนวน 73 ชั้นงานซึ่งมีส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 เท่ากับ 1:1 และ 2:3 ตามลำดับ มีรอบเวลาการผลิตรวมเท่ากับ 138 หน่วยเวลา ในแต่ละอัลกอริทึมมีการกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

6.4.4.1 อัลกอริทึม MOEA/D

ทำการทดสอบ 2 ปัจจัย ได้แก่ Neighborhood (T) และ Maximum Number of solution replacement (NR) ในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 รอบการทดลอง ได้ผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D

Replicate	No.	Neighborhood	NR	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
1	1	10	20%	0.10658	0.18394	0.84169	0.22581	0.10606
	2	10	50%	0.29083	0.19655	1.0096	0.088235	0.045455
	3	20	20%	0.1021	0.18165	0.90659	0.46154	0.18182
	4	20	50%	0.14777	0.22375	1.1031	0.055556	0.015152
2	5	10	20%	0.32133	0.14404	1.0165	0.13208	0.10606
	6	10	50%	0.15766	0.24602	1.0121	0.33333	0.075758
	7	20	20%	0.31658	0.29979	1.0045	0.058824	0.030303
	8	20	50%	0.070087	0.14609	0.95577	0.40476	0.25758
3	9	10	20%	0.11509	0.1647	1.0803	0.52632	0.15152
	10	10	50%	0.43363	0.29233	1.0209	0	0
	11	20	20%	0.36854	0.28398	0.95854	0	0
	12	20	50%	0.29195	0.17831	0.88097	0.037037	0.030303

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 6.1

General Factorial Regression: GD versus Neiborhood, NR

Factor Information

Factor	Levels	Values
Neiborhood	2	10, 20
NR	2	20%, 50%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.033361	0.011120	0.67	0.594
Linear	2	0.001685	0.000842	0.05	0.951
Neiborhood	1	0.001367	0.001367	0.08	0.781
NR	1	0.000317	0.000317	0.02	0.893
2-Way Interactions	1	0.031676	0.031676	1.91	0.205
Neiborhood*NR	1	0.031676	0.031676	1.91	0.205
Error	8	0.132916	0.016614		
Total	11	0.166277			

รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้การรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าค่า P-value ของปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักมีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha = 0.05$ หมายความว่า ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละระดับปัจจัยของจำนวนปัญหาข้างเคียง (T) และ จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR) ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง จึงทำการวิเคราะห์ในขั้นถัดไปโดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) เป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 6.2

General Factorial Regression: IGD versus Neiborhood, NR

Factor Information

Factor	Levels	Values
Neiborhood	2	10, 20
NR	2	20%, 50%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.018262	0.006087	2.92	0.100
Linear	2	0.000668	0.000334	0.16	0.854
Neiborhood	1	0.000616	0.000616	0.30	0.601
NR	1	0.000052	0.000052	0.02	0.878
2-Way Interactions	1	0.017594	0.017594	8.45	0.020
Neiborhood*NR	1	0.017594	0.017594	8.45	0.020
Error	8	0.016656	0.002082		
Total	11	0.034918			

รูปที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การรู้เข้าและความหลากหลายเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าค่า P-Value ของปัจจัยร่วมมีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha = 0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างจำนวนปัญหาข้างเคียง (T) และ จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย

ดังนั้นจึงทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการลู่เข้าและความหลากหลาย (IGD) ซึ่งพบว่า จำนวนปัญหาข้างเคียงเท่ากับ 10 และจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุดเท่ากับ 20% ของจำนวนปัญหาข้างเคียงหรือ เท่ากับ 2 ครั้ง ทำให้ค่าตัวชี้วัด IGD มีค่าที่ดีที่สุดจึงสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOEA/D

No.	ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
1.	จำนวนประชากรข้างเคียง (T)	10
2.	จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR)	20% ของจำนวนประชากรข้างเคียง

6.4.4.2 อัลกอริทึม MOPSO

ทำการทดสอบ 2 ปัจจัย ได้แก่ Learning factor c1 และ c2 ในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 รอบการทดลอง ได้ผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOPSO

Replicate	No.	c1	c2	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
1	1	1	1	0.17276	0.11669	0.65064	0.064103	0.05618
	2	1	1.5	0.14629	0.10622	0.80313	0.14754	0.10112
	3	1.5	1	0.11221	0.088845	0.66541	0.21311	0.14607
	4	1.5	1.5	0.12673	0.10437	0.64981	0.042254	0.033708
2	5	1	1	0.12426	0.12442	0.83813	0.039474	0.033708
	6	1	1.5	0.079123	0.11053	0.84637	0.39216	0.22472
	7	1.5	1	0.10953	0.1093	0.87175	0.18182	0.11236
	8	1.5	1.5	0.20428	0.13905	0.74682	0.038462	0.033708
3	9	1	1	0.13279	0.11855	0.77134	0.15686	0.089888
	10	1	1.5	0.19244	0.12606	0.6822	0.012821	0.011236
	11	1.5	1	0.151	0.10003	0.6828	0.14063	0.10112
	12	1.5	1.5	0.18056	0.13683	0.76795	0.090909	0.05618

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 6.3

General Factorial Regression: GD versus c1, c2

Factor Information

Factor	Levels	Values
c1	2	1.0, 1.5
c2	2	1.0, 1.5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.003348	0.001116	0.74	0.558
Linear	2	0.001453	0.000727	0.48	0.635
c1	1	0.000112	0.000112	0.07	0.792
c2	1	0.001341	0.001341	0.89	0.373
2-Way Interactions	1	0.001895	0.001895	1.26	0.295
c1*c2	1	0.001895	0.001895	1.26	0.295
Error	8	0.012070	0.001509		
Total	11	0.015418			

รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้การรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 6.3 จะเห็นได้ว่าค่า P-value ของปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักมีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha = 0.05$ หมายความว่า ค่าพารามิเตอร์ในแต่ละระดับปัจจัยของ Cognitive Parameter (c1) และ Social Parameter (c2) ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง จึงทำการวิเคราะห์ในขั้นถัดไปโดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) เป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 6.4

General Factorial Regression: IGD versus c1, c2

Factor Information

Factor	Levels	Values
c1	2	1.0, 1.5
c2	2	1.0, 1.5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.001218	0.000406	2.68	0.118
Linear	2	0.000403	0.000201	1.33	0.318
c1	1	0.000048	0.000048	0.32	0.589
c2	1	0.000355	0.000355	2.34	0.165
2-Way Interactions	1	0.000816	0.000816	5.37	0.049
c1*c2	1	0.000816	0.000816	5.37	0.049
Error	8	0.001214	0.000152		
Total	11	0.002432			

รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การรู้เข้าและความหลากหลายเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นได้ว่าค่า P-Value ของปัจจัยร่วมมีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha = 0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่าง Cognitive Parameter (c1) และ Social Parameter (c2) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าและความหลากหลาย ดังนั้นจึงทำการพิจารณา ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการรู้เข้าและความหลากหลาย (IGD) ซึ่งพบว่า Cognitive Parameter (c1) เท่ากับ 1.5 และ Social Parameter (c2) เท่ากับ 1 ทำให้ค่า ตัวชี้วัด IGD มีค่าที่ดีที่สุดจึงสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO

No.	ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
1.	Learning factor: Cognitive parameter (c1)	1.5
2.	Learning factor: Social parameter (c2)	1

6.4.4.3 อัลกอริทึม MOPSO/D

ทำการทดสอบ 2 ปัจจัย ได้แก่ Learning factor c1 และ c2 ในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 รอบการทดลอง ได้ผลค่าตัวชี้วัดสมรรถนะดัง ตารางที่ 6.9 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์จำนวนปัญหาข้างเคียงเท่ากับ 10 ซึ่งเป็น ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MOPSO/D ที่ได้ทำการทดสอบพารามิเตอร์แล้วตาม ตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOPSO/D

Replicate	No.	c1	c2	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
1	1	1	1	0.1666	0.2131	0.92827	0.21875	0.076087
	2	1	1.5	0.1062	0.10191	0.79359	0.18868	0.1087
	3	1.5	1	0.21816	0.15084	0.80825	0.044118	0.032609
	4	1.5	1.5	0.16024	0.19997	1.0172	0.16667	0.076087
2	5	1	1	0.1401	0.14635	0.84276	0.061224	0.032609
	6	1	1.5	0.099337	0.13709	0.93495	0.13559	0.086957
	7	1.5	1	0.15134	0.16288	0.70822	0.15584	0.13043
	8	1.5	1.5	0.15626	0.12988	0.8944	0.12069	0.076087
3	9	1	1	0.15713	0.15952	0.88152	0.13793	0.086957
	10	1	1.5	0.07069	0.1803	0.9516	0.42857	0.16304
	11	1.5	1	0.16979	0.14696	0.7176	0.031746	0.021739
	12	1.5	1.5	0.11954	0.15899	0.88575	0.18519	0.1087

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 6.5

General Factorial Regression: GD versus c1, c2

Factor Information

Factor	Levels	Values
c1	2	1.0, 1.5
c2	2	1.0, 1.5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.012255	0.004085	7.33	0.011
Linear	2	0.011662	0.005831	10.46	0.006
c1	1	0.004613	0.004613	8.28	0.021
c2	1	0.007050	0.007050	12.65	0.007
2-Way Interactions	1	0.000593	0.000593	1.06	0.333
c1*c2	1	0.000593	0.000593	1.06	0.333
Error	8	0.004459	0.000557		
Total	11	0.016714			

รูปที่ 6.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้การรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 6.5 จะเห็นได้ว่าค่า P-value ของปัจจัยรวมมีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha = 0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่าง Cognitive Parameter (c1) และ Social Parameter (c2) ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง แต่ผลจากปัจจัยหลักของทั้ง Cognitive Parameter (c1) และ Social Parameter (c2) มีค่า p-value น้อยกว่าที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ดังนั้น ทั้ง 2 ปัจจัยที่ทำการวิเคราะห์มีอิทธิพลหลักต่อตัวแปรตอบสนอง ในด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง จึงพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด พบว่า Cognitive Parameter (c1) เท่ากับ 1 และ Social Parameter (c2) เท่ากับ 1.5 ทำให้ค่า GD มีค่าที่ดีที่สุดจึงสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO/D

No.	ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
1.	Learning factor: Cognitive parameter (c1)	1
2.	Learning factor: Social parameter (c2)	1.5

6.4.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในแต่ละอัลกอริทึมที่ได้จากการทดสอบและจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีดังนี้

ตารางที่ 6.11 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOEA/D

No.	พารามิเตอร์	ขนาดปัญหา	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	อ้างอิง
1.	จำนวนประชากรข้างเคียง (T)	Small	T = 10	การทดลอง
		Medium		
		Large		
2.	จำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR)	Small	NR = 2 (20%ของT เมื่อ T=10)	การทดลอง
		Medium		
		Large		

ตารางที่ 6.12 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO

No.	พารามิเตอร์	ขนาดปัญหา	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	อ้างอิง
1.	ค่าน้ำหนักการหมุนง (w)	Small	w = 1	(Parviz Fatthahia et al., 2016)
		Medium		
		Large		
2.	Learning factor: Cognitive parameter (c1)	Small	c1 = 1.5	การทดลอง
		Medium	c1 = 1.5	
		Large	c1 = 1	
2.	Learning factor: Social parameter (c2)	Small	c2 = 1.5	การทดลอง
		Medium	c2 = 1	
		Large	c2 = 1	

ตารางที่ 6.13 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม MOPSO/D

No.	พารามิเตอร์	ขนาดปัญหา	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	อ้างอิง
1.	จำนวนประชากร ข้างเคียง (T)	Small	T = 10	การทดลอง ของ MOEA/D
		Medium		
		Large		
2.	จำนวนครั้งในการ แทนที่คำตอบ สูงสุด (NR)	Small	NR = 2 (20%ของT เมื่อ T=10)	การทดลอง ของ MOEA/D
		Medium		
		Large		
3.	ค่าน้ำหนักการ หมุน (w)	Small	w = 1	(Parviz Fatthahia et al., 2016)
		Medium		
		Large		
4.	Learning factor: Cognitive parameter (c1)	Small	c1 = 1.5	การทดลอง
		Medium	c1 = 1	
		Large	c1 = 1	
5.	Learning factor: Social parameter (c2)	Small	c2 = 1.5	การทดลอง
		Medium		
		Large		

6.5 ผลการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง

ในการทดลองแก้ปัญหาการจัดสมคูลู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม จะทำการทดลองซ้ำจำนวน 2 รอบการทดลอง ในแต่ละรอบของการทดลองจะนำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมมาเปรียบเทียบกันโดยวิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบ (Non-dominated sorting) แล้วรวบรวมคำตอบที่เหมาะสมที่สุดการเปรียบเทียบทั้ง 3 อัลกอริทึมซึ่งคำตอบที่ได้นั้นจะอยู่ในฟิตเนส 1 และเป็นตัวแทนคำตอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง จากนั้นประเมินค่าตัวชี้วัดในแต่ละด้านของอัลกอริทึมแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอตัวอย่างผลการทดลองในปัญหาชิ้นงานขนาดเล็ก S4 ซึ่งมีขนาด 50 ชิ้นงาน สำหรับผลการทดลองในส่วนที่เหลือจะแสดงในภาคผนวก ข

6.5.1 ผลการทดลองแก้ปัญหาขนาด 32 ชิ้นงาน

ปัญหา 32 ชิ้นงานแบ่งเป็นปัญหาย่อย 3 รอบเวลาการผลิต ได้แก่ 30 36 และ 42 หน่วยเวลา ซึ่งจำนวนชิ้นงานบนสายการประกอบที่ 1 และ 2 มีจำนวนเท่ากับ 21 และ 11 ชิ้นงานตามลำดับโดยผลการทดลองแต่ละรอบเวลาผลิต มีดังนี้

6.5.1.1 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 30 หน่วยเวลา

ที่รอบเวลาการผลิตรวมของคู่สายการประกอบรูปตัวยูเท่ากับ 30 หน่วยเวลา ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.14 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทั้ง 3 อัลกอริทึมสามารถหาได้และค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมแสดงดังตารางที่ 6.15 โดยค่าตัวชี้วัดที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจาก 2 รอบการทดลอง

ตารางที่ 6.14 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาด 32 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	11	4	10.3529	0.0096	0.0533
	2	11	4	10.3889	0.0116	0.0757
MOPSO	1	11	4	10.3879	0.0121	0.0524
	2	11	4	10.4211	0.0165	0.0315
MOPSO/D	1	11	4	10.3880	0.0106	0.0504
	2	11	4	10.3529	0.0083	0.0405

ตารางที่ 6.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม ในปัญหาขนาด 32 ชิ้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0699	0.0870	0.8937	0.3883	0.1914	2254.688
MOPSO	0.0980	0.1031	0.7448	0.1470	0.0820	2215.766
MOPSO/D	0.0412	0.0621	0.8175	0.4745	0.2695	2286.086

จากตารางที่ 6.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ MOPSO/D มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ สำหรับการกระจายตัวของคำตอบ MOPSO มีค่าการกระจายตัวดีที่สุด ในด้านเวลาในการค้นหาคำตอบทั้ง 3 อัลกอริทึม MOPSO/D ใช้เวลามากที่สุด ซึ่งมากกว่า MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ

6.5.1.2 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 36 หน่วยเวลา

ที่รอบเวลาการผลิตรวมของคู่สายการประกอบรูปตัวยูเท่ากับ 36 หน่วยเวลา ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.16 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทั้ง 3 อัลกอริทึมสามารถหาได้และค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมแสดงดังตารางที่ 6.17 โดยค่าตัวชี้วัดที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจาก 2 รอบการทดลอง

ตารางที่ 6.16 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	9	4	8.4375	0.0069	0.0734
	2	9	4	8.4370	0.0068	0.0252
MOPSO	1	9	4	8.4375	0.009	0.062
	2	9	4	8.4371	0.0101	0.0777
MOPSO/D	1	9	4	8.4371	0.0105	0.0367
	2	9	4	8.4360	0.0097	0.0333

ตารางที่ 6.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0852	0.0819	0.7737	0.3076	0.2453	2052.219
MOPSO	0.1508	0.1379	0.8388	0.0527	0.0283	1939.82
MOPSO/D	0.0646	0.1065	0.8216	0.5089	0.2311	2160.992

จากตารางที่ 6.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ R_{NDS1} ของ MOPSO/D มีสมรรถนะดีที่สุด

รองลงมาคือ MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ และ MOEA/D มีค่าสมรรถนะในด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย การกระจายตัวของคำตอบ และ อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ R_{NDS2} ดีที่สุด แต่ค่า R_{NDS2} ใกล้เคียงกับ MOPSO/D ในด้านเวลาในการค้นหา คำตอบทั้ง 3 อัลกอริทึม MOPSO/D ใช้เวลามากที่สุด ซึ่งมากกว่า MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ

6.5.1.3 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 42 หน่วยเวลา

ที่รอบเวลาการผลิตรวมของคู่สายการประกอบรูปตัวยูเท่ากับ 42 หน่วยเวลา ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.18 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทั้ง 3 อัลกอริทึมสามารถหาได้และค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมแสดงดังตารางที่ 6.19 โดยค่าตัวชี้วัดที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยจาก 2 รอบการทดลอง

ตารางที่ 6.18 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	8	3	7.4286	0.003	0.037
	2	8	3	7.4662	0.0022	0.0637
MOPSO	1	8	3	7.4677	0.013	0.0398
	2	8	3	7.4667	0.0041	0.036
MOPSO/D	1	8	3	7.4667	0.003	0.0372
	2	8	3	7.4286	0.0041	0.0637

ตารางที่ 6.19 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0648	0.1105	0.8745	0.4028	0.1905	2079.75
MOPSO	0.1379	0.1176	0.7758	0.0689	0.0536	2056.797
MOPSO/D	0.0616	0.0727	0.8663	0.4101	0.2857	2086.922

จากตารางที่ 6.19 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง ด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ MOPSO/D มีสมรรถนะดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ

สำหรับการกระจายตัวของคำตอบ MOPSO มีค่าการกระจายตัวที่ดีที่สุด ในด้านเวลาในการค้นหาคำตอบทั้ง 3 อัลกอริทึม MOPSO/D ใช้เวลามากที่สุด ซึ่งมากกว่า MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ

6.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ในการแก้ปัญหาการจัดสมมูลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมโดยใช้ปัญหาตัวอย่าง 12 ปัญหา ซึ่งแบ่งเป็น 36 ปัญหาย่อย พบว่าทั้ง 3 อัลกอริทึมได้แก่ MOEA/D MOPSO และ MOPSO/D สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ดีเทียบเท่ากันในทุกปัญหา ซึ่งแสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 6.20 - 6.21 และสามารถหาจำนวนสถานีงานได้เท่ากับจำนวนสถานีงานที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ โดยสามารถหาจำนวนสถานีงาน และจำนวนสถานีน้อยที่สุดได้เท่ากัน ยกเว้นปัญหาย่อยที่ S3 รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 42 MOPSO/D สามารถหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดได้ค่าที่ต่ำกว่า MOEA/D และ MOPSO

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการหาคำตอบโดยพิจารณาจากค่าตัวชี้วัด ตามตารางที่ 6.22 และ 6.23 พบว่า MOPSO/D มีสมรรถนะในด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และ ด้านการเข้าสู่และความหลากหลายของคำตอบ ที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นในปัญหาทุกขนาด เมื่อพิจารณาตัวชี้วัดด้านการกระจายตัวของคำตอบ ในปัญหาขนาดเล็กพบว่า ในภาพรวมอัลกอริทึม MOPSO/D มีค่าการกระจายตัวที่ดีที่สุดและใกล้เคียงกับ MOPSO สำหรับปัญหาขนาดกลางและปัญหาขนาดใหญ่ MOPSO มีสมรรถนะด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ในด้านตัวชี้วัดค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของอัลกอริทึมที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (RNDS2) พบว่าอัลกอริทึม MOPSO/D มีค่า RNDS1 และ RNDS2 มากที่สุดรองลงมาคือ MOEA/D และ MOPSO ตามลำดับ ในด้านเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ พบว่า MOPSO ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ MOPSO/D ใช้เวลามากที่สุดเนื่องจาก MOPSO/D มีความซับซ้อนมากกว่าจึงใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่า

จากผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า MOPSO/D มีสมรรถนะในการหาคำตอบที่ดีกว่า MOPSO และ MOEA/D ซึ่งมีผลค่าตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและในด้านการเข้าสู่และความหลากหลาย รวมถึงตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นในภาพรวมของปัญหาทุกขนาด ถึงแม้ว่า MOPSO/D จะมีการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่น้อยกว่า MOEA/D และ MOPSO และใช้ด้านเวลาในการหาคำตอบที่มากกว่าแต่วิธีการหาคำตอบของ MOPSO/D ทำให้เกิดการพัฒนาคำตอบที่ดีส่งผลให้มีค่าตัวชี้วัดที่ดีในด้านอื่นที่ดีตามไปด้วย ทำให้ MOPSO/D เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาในทุกขนาด

ตารางที่ 6.20 จำนวนสถานีงานและจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ในปัญหาทดลอง 1-6

No.	1	2	3	4	5	6
Problem	S1	S2	S3	S4	M1	M2
No. of Task (Line1-Line2)	32 (21-11)	36 (11-25)	46 (21-25)	50 (25-25)	56 (28-28)	65 (35-30)
Cycle Time	10 12 14	18 22 26	34 42 50	42 50 52	205 216 324	41 54 81
Number of workstation (Nw)						
Optimal	11 10 8	12 10 8	12 10 11	9 8 12	13 10 9	20 15 10
Lower bound (Balance together)	11 9 8	11 9 8	9 9 11	7 7 11	13 10 8	19 15 10
MOEAYD	11 9 8	11 9 8	9 9 12	7 7 11	13 10 8	20 15 10
MOPSO	11 9 8	11 9 8	9 9 12	7 7 11	13 10 8	20 15 10
MOPSO/D	11 9 8	11 9 8	9 9 11	7 7 11	13 10 8	20 15 10
Number of Station (Ns)						
MOEAYD	4 4 3	5 4 4	5 4 4	3 4 4	5 4 4	8 6 4
MOPSO	4 4 3	5 4 4	5 4 4	3 4 4	5 4 4	8 6 4
MOPSO/D	4 4 3	5 4 4	5 4 4	3 4 4	5 4 4	8 6 4

ตารางที่ 6.21 จำนวนสถานีงานและจำนวนสถานีที่น้อยที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ในปัญหาทดลอง 7-12

No.	7		8		9		10		11		12								
Problem	M3		M4		L1		L2		L3		L4								
No. of Task (Line1-Line2)	73 (45-28)		90 (45-45)		115 (45-70)		140 (70-70)		145 (70-75)		166 (83-83)								
Cycle Time	79	110	57	92	110	79	110	320	207	293	220	252	303	6842	7571	6309			
Number of workstation (Nw)																			
Optimal	15	10	10	17	11	10	16	13	12	12	22	30	28	39	32	27	24	21	25
Lower bound (Balance together)	15	10	10	17	11	10	16	13	12	12	22	30	28	38	32	27	23	21	25
MOEA/D	15	10	10	17	11	10	16	13	12	12	23	31	29	39	33	27	23	21	25
MOPSO	15	10	10	17	11	10	16	13	12	12	23	31	29	39	33	27	23	21	25
MOPSO/D	15	10	10	17	11	10	16	13	12	12	23	31	29	39	33	27	23	21	25
Number of Station (Ns)																			
MOEA/D	5	4	4	6	4	4	6	5	5	5	7	10	10	12	11	9	7	7	8
MOPSO	5	4	4	6	4	4	6	5	5	5	7	10	10	12	11	9	7	7	8
MOPSO/D	5	4	4	6	4	4	6	5	5	5	7	10	10	12	11	9	7	7	8

ตารางที่ 6.22 ค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมหาปัญหาทดลอง 1-6

Problem	1 (S1)		2 (S2)		3 (S3)		4 (S4)		5 (M1)		6 (M2)								
	30	36	42	18	22	26	34	126	21	42	50	52	28290	44280	648	41	54	81	
No. of Task (Line1-Line2)	32 (21-11)		36 (11-25)		46 (21-25)		50 (25-25)		56 (28-28)		65 (35-30)								
Cycle Time	0.0980	0.1508	0.1379	0.1349	0.1862	0.1057	0.1110	0.1079	0.1366	0.2265	0.1294	0.1565	0.1928	0.2203	0.1171	0.3239	0.1206	0.1717	0.1066
Generational Distance																			
MOPSO	0.0699	0.0749	0.0648	0.0907	0.1156	0.0842	0.0498	0.0631	0.1061	0.1471	0.0616	0.1032	0.0914	0.1538	0.0793	0.1386	0.0732	0.1066	0.1066
MOPSO/D	0.0412	0.0749	0.0616	0.0342	0.1027	0.0651	0.0343	0.0546	0.0180	0.1317	0.0520	0.0313	0.0877	0.0752	0.0508	0.0422	0.0510	0.0732	0.0732
Inverted Generational Distance																			
MOPSO	0.1031	0.1379	0.1176	0.1467	0.1482	0.1350	0.0959	0.0935	0.1680	0.2183	0.1240	0.1683	0.1968	0.1362	0.1380	0.2882	0.1730	0.1489	0.1489
MOPSO/D	0.0870	0.1072	0.1105	0.1468	0.1480	0.1791	0.1764	0.0972	0.1362	0.2774	0.0714	0.0926	0.1904	0.0894	0.0982	0.1531	0.1389	0.1797	0.1797
MOPSO/D	0.0621	0.0812	0.0727	0.1055	0.0730	0.0788	0.0415	0.0800	0.0892	0.0838	0.0618	0.0930	0.1901	0.0873	0.0956	0.1086	0.0864	0.1204	0.1204
Spread																			
MOPSO	0.7448	0.8388	0.7758	0.0550	0.8677	0.8937	0.8989	0.8550	0.9516	0.9487	0.8691	0.9537	0.7304	0.7500	0.8835	0.7142	0.7956	0.8383	0.8383
MOPSO/D	0.8937	0.8575	0.8745	0.2341	0.9021	0.9441	0.9871	0.9014	0.8701	0.8998	0.8486	0.6809	0.9766	0.7544	0.9103	0.7955	0.9608	0.9190	0.9190
MOPSO/D	0.8175	0.7379	0.8663	0.5562	0.7948	0.8827	0.9182	0.8836	0.9156	0.7955	0.8716	0.8231	0.8670	0.9083	0.8497	0.8920	0.8929	0.9720	0.9720
RND51																			
MOPSO	0.1470	0.0527	0.0689	0.5562	0.2514	0.1472	0.0667	0.0513	0.0426	0.1176	0.1647	0.0763	0.0959	0.0291	0.1189	0.0055	0.1480	0.0603	0.0603
MOPSO/D	0.3883	0.4133	0.4028	0.0550	0.2906	0.3504	0.4005	0.2628	0.0736	0.2414	0.2859	0.0775	0.3473	0.1923	0.3488	0.1430	0.3194	0.3571	0.3571
MOPSO/D	0.4745	0.4032	0.4101	0.2341	0.3454	0.4116	0.5016	0.4773	0.7027	0.3095	0.4732	0.6759	0.4769	0.5253	0.3955	0.6063	0.3346	0.4567	0.4567
RND52																			
MOPSO	0.0820	0.0283	0.0536	0.0316	0.0952	0.0727	0.0370	0.0379	0.0225	0.0476	0.0825	0.0402	0.0584	0.0227	0.0714	0.0057	0.0750	0.0443	0.0443
MOPSO/D	0.1914	0.2311	0.1905	0.1263	0.1619	0.1273	0.1543	0.1742	0.0449	0.1786	0.1495	0.0632	0.1948	0.1477	0.2071	0.1092	0.1375	0.2089	0.2089
MOPSO/D	0.2695	0.2453	0.2857	0.3421	0.2762	0.3000	0.3148	0.2879	0.4326	0.2738	0.2732	0.4023	0.2468	0.3295	0.2214	0.3851	0.2875	0.2468	0.2468
CPU Time																			
MOPSO	2216	1940	2057	2530	2386	1981	2764	6097	3429	2764	4636	3684	10807	7966	7993	14562	12160	9509	9509
MOPSO/D	2255	2052	2080	2660	2299	2125	2724	6006	3701	2824	3934	4029	12461	8835	7653	15863	12747	9971	9971
MOPSO/D	2286	2161	2087	2743	2312	2213	2784	6241	3434	2798	4995	4204	13255	8766	7930	15866	13163	9579	9579

ตารางที่ 6.23 ค่าตัวชี้วัดของอัลกอริทึมหาใบปัญหาทดลอง 7-12

Problem	7 (M3)		8 (M4)		9 (L1)		10 (L2)		11 (L3)		12 (L4)							
No. of Task (Line+Line2)	73 (45-28)		90 (45-45)		115 (45-70)		140 (70-70)		145 (70-75)		166 (83-83)							
Cycle Time	10902	4510	11880	4503	5060	110	32390	25740	57970	320	6210	64460	5940	252	303	6842	7571	6309
Generational Distance																		
MOPSO	0.1953	0.1106	0.1576	0.1129	0.0756	0.1232	0.0872	0.1194	0.0977	0.3657	0.2195	0.1568	0.2382	0.2210	0.2321	0.2329	0.3424	0.1838
MOEAD	0.1629	0.0516	0.0726	0.0633	0.0358	0.0817	0.0556	0.0752	0.0823	0.0630	0.1443	0.1296	0.1029	0.1541	0.1394	0.1687	0.1962	0.1239
MOPSO/D	0.0699	0.0455	0.0440	0.0484	0.0389	0.0546	0.0530	0.0751	0.0561	0.0565	0.0249	0.0245	0.0951	0.1002	0.0424	0.0758	0.0910	0.0777
Inverted Generational Distance																		
MOPSO	0.2113	0.1304	0.2155	0.1296	0.0922	0.1203	0.1034	0.1466	0.1862	0.2495	0.2186	0.1537	0.2324	0.1902	0.2140	0.1638	0.1386	0.1349
MOEAD	0.2096	0.0946	0.1458	0.1944	0.0996	0.1144	0.1639	0.1375	0.1541	0.1156	0.1940	0.1535	0.1648	0.1910	0.1189	0.1297	0.1369	0.1459
MOPSO/D	0.1227	0.0647	0.0899	0.0888	0.0773	0.0992	0.1001	0.1070	0.1280	0.0885	0.1223	0.1056	0.1031	0.1743	0.1171	0.1220	0.1268	0.0693
Spread																		
MOPSO	0.8129	0.8611	0.7586	0.8241	0.7392	0.7719	0.7754	0.9236	0.8413	0.5435	0.7135	0.8260	0.9029	0.6685	0.7624	0.7755	1.0852	1.0123
MOEAD	0.9164	0.8741	0.9333	0.8840	0.8809	0.9766	0.9743	1.1529	0.9164	0.8592	0.8289	0.8856	0.8968	0.9949	0.8711	0.9063	1.0978	0.9552
MOPSO/D	0.8671	0.8996	0.9009	0.9164	0.8371	0.9252	0.7566	1.0200	1.0618	0.9090	0.8975	0.9622	0.9378	0.8844	1.0241	0.9837	1.1209	1.0759
RND51																		
MOPSO	0.0259	0.0626	0.0526	0.2068	0.1495	0.0554	0.2564	0.0250	0.0663	0.0133	0.0450	0.0328	0.1699	0.1050	0.0473	0.0756	0.0175	0.0504
MOEAD	0.0693	0.3656	0.4114	0.2205	0.3697	0.2094	0.4559	0.3247	0.2107	0.4583	0.0775	0.2364	0.1632	0.1327	0.2001	0.1579	0.1134	0.2835
MOPSO/D	0.5857	0.4936	0.5781	0.4430	0.4330	0.3859	0.2722	0.5234	0.3968	0.6401	0.8400	0.6529	0.3818	0.5104	0.5962	0.5454	0.7155	0.3983
RND52																		
MOPSO	0.0161	0.0324	0.0174	0.1115	0.0940	0.0640	0.1875	0.0192	0.0739	0.0053	0.0234	0.0152	0.0427	0.0972	0.0160	0.0577	0.0159	0.0265
MOEAD	0.0484	0.1574	0.2087	0.0808	0.1745	0.1628	0.1602	0.1154	0.1420	0.2090	0.0391	0.1091	0.1325	0.1157	0.1440	0.1538	0.0476	0.1549
MOPSO/D	0.4355	0.3102	0.2739	0.3077	0.2315	0.2733	0.1523	0.3654	0.2841	0.2857	0.4375	0.3758	0.3248	0.2870	0.3400	0.2885	0.4365	0.3186
CPU Time																		
MOPSO	11335	9951	8522	16980	13603	13751	32328	34005	31953	56069	54273	11335	33847	36716	37521	58861	48556	48658
MOEAD	11606	11563	11082	16584	13596	15032	33155	33360	29230	57687	58583	11606	43750	34011	31635	50687	48007	50940
MOPSO/D	10589	11541	8462	16168	13607	12434	31234	38559	29139	52394	57891	10589	31215	34360	30332	56101	50219	50883

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยเกี่ยวกับลักษณะของปัญหา อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยและการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม MOPSO/D ในการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

7.1 บทสรุปงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูแบบมากวัตถุประสงค์ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสม ภายใต้ปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 1 (Type 1) ซึ่งมีลักษณะของสายการประกอบในรูปแบบของตัวยูสองสายขนานกันสามารถเกิดสถานการณ์งานร่วมบนด้านที่ขนานกัน ในขณะที่สายการประกอบทั้งสองมีจุดทางเข้าและทางออกของผลิตภัณฑ์เป็นจุดเดียวกัน โดยการจัดสมดุลมีลักษณะเช่นเดียวกับสายการประกอบรูปตัวยูแบบเดี่ยวซึ่งสามารถมอบหมายภาระงานได้จากทางด้านหน้าและด้านหลังของสายการประกอบโดยไม่ละเมิดข้อจำกัดด้านลำดับก่อนหลังของงาน และมีการจัดสมดุลสายการประกอบพร้อมกันทั้งหมด เนื่องจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) ซึ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากเมื่อปัญหามีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงอาศัยวิธีการทางฮิวริสติกมาช่วยในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems) ประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ที่ทำให้การหาค่าที่ดีที่สุดพร้อมกัน ได้แก่ การหาจำนวนสถานีงาน จำนวนสถานี (ความยาวของสายการประกอบ) ความสัมพันธ์ของงานที่ไม่เกี่ยวเนื่องกันภายในสถานีงาน ความสมดุลของภาระงานภายในระหว่างสถานี และความสมดุลของภาระงานภายในสถานี

ในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ส่วนใหญ่ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (Evolutionary multi-objective optimization: EMO) เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ได้ดี และได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดหลายคำตอบซึ่งอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto Optimal solution) โดยใช้หลักการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับคำตอบที่เรียกว่า การจัดอันดับเชิงพารेटอ (Pareto dominance) ในการประมาณขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto front) วิธี Pareto dominance จึงเป็นหลักการทั่วไปที่ใช้กับ EMO ถึงแม้ว่าวิธีการจัดอันดับเชิงพารेटอจะเป็นวิธีการที่ให้ผลลัพธ์คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ดีแต่วิธีนี้จะหาคำตอบได้มีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อนำมาใช้กับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ซึ่งมีมากกว่า 3

วัตถุประสงค์ จึงมีการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) ซึ่งจะใช้วิธีการแบ่งปัญหาหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาย่อยและทำการแก้ปัญหาโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกันมาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถหาค่าแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOPSO/D) โดยนำหลักการของ MOPSO มาใช้ในการพัฒนาคำตอบ และใช้วิธีการจำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach) ในการแบ่งเป็นปัญหาย่อย และทำการพัฒนาคำตอบไปพร้อมกัน ซึ่งจะนำอัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (MOPSO) มาใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะกับ MOPSO/D สำหรับการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างจะใช้ปัญหาทดลองทั้งหมด 36 ปัญหา มีจำนวนชั้นงานรวมบนคู่สายการประกอบอยู่ในช่วง 32-166 ชั้นงาน การเปรียบเทียบอัลกอริทึมทั้ง 3 อัลกอริทึมจะอาศัยตัวชี้วัดที่อยู่ภายใต้หลักการจัดอันดับเชิงพาริตโตจำนวนทั้งสิ้น 5 ตัวชี้วัด ได้แก่ ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าและความหลากหลาย ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของอัลกอริทึมในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และเวลาในการค้นหาคำตอบ

ผลจากการแก้ปัญหาตัวอย่างสำหรับการจัดสมดุของคู่สายการประกอบรูปตัวยูพบว่า ทั้ง 3 อัลกอริทึมสามารถให้ผลลัพธ์การจัดสมดุที่ดีเทียบเท่ากันในด้านจำนวนสถานีงานน้อยที่สุดและความยาวของสายการประกอบ โดย MOPSO/D ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า MOPSO และ MOEA/D ในบางปัญหาจากการเปรียบเทียบสมรรถนะในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสามารถสรุปได้ว่า MOPSO/D มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่ดีกว่า MOPSO และ MOEA/D ซึ่งมีผลค่าตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและในด้านการลู่อู่เข้าและความหลากหลาย รวมถึงตัวชี้วัดด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำของอัลกอริทึมที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นในภาพรวมของปัญหาทุกขนาด ในด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบ MOPSO/D มีสมรรถนะที่ดีน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่นในปัญหาทุกขนาดและสำหรับปัญหาขนาดกลาง MOPSO มีการกระจายตัวที่ดีที่สุดในด้านเวลาในการค้นหาคำตอบ MOPSO/D ใช้เวลานานที่สุด แต่สามารถหาคำตอบซึ่งให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดดีกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกัน

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำผลจากการแก้ปัญหาการจัดสมดุลในงานวิจัยนี้มาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพื่อให้สายการประกอบเกิดประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
2. ศึกษาปัจจัยในทางปฏิบัติเพิ่มเติม เช่น ในด้านระยะทางการเดินของพนักงาน
3. การแก้ปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูสามารถที่จะพิจารณาวัตถุประสงค์อื่นเพิ่มเติม โดยการเพิ่มจำนวนวัตถุประสงค์ เพื่อให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในวัตถุประสงค์ทุกด้านที่ต้องการพิจารณาพร้อมกัน
4. สายการประกอบในลักษณะคู่สายการประกอบรูปตัวยูสามารถเป็นแนวทางในจัดสมดุลสายการประกอบแบบรูปตัวยูหลายสาย (Multiple U-shaped line) ที่จะใช้ร่วมกันในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี
5. สามารถนำวิธีการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในงานวิจัยที่ทำการศึกษานี้มาใช้ในการพัฒนาการจัดสมดุลในรูปแบบอื่นที่เพิ่มความหลากหลายของคำตอบและให้เกิดรูปแบบคำตอบที่ดีมากยิ่งขึ้น
6. ศึกษารูปแบบการจัดสมดุลในทิศทางการไหลของงานในรูปแบบต่างๆบนคู่สายการประกอบรูปตัวยู
7. นำผลจากงานวิจัยมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติกับปัญหาการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในกรณีศึกษา
8. ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะให้กับอัลกอริทึมวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนก เช่น กระบวนการค้นหาเฉพาะที่ และการมิวเทชัน
9. พัฒนาอัลกอริทึมวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคโดยยึดหลักการจำแนกในด้านกลยุทธ์การเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสากลเพื่อใช้เป็นคำตอบที่นำไปสู่คำตอบที่ดีขึ้น และการประยุกต์ใช้พารามิเตอร์ที่มีการปรับค่าได้ตามสถานการณ์ต่างๆ

รายการอ้างอิง

Askin, R. G. and M. Zhou (1997). "A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem." International Journal of Production Research 35(11): 3095-3106.

Cheng C.H., J. M. and J. Motowani (2000). "The effect of straight- and u-shaped lines on quality." IEEE Transactions on Engineering Management 47(3): 321-334.

Choudhary, S. and S. Agrawal (2014). U-line Assembly Balancing for Medium Commercial Vehicle EicherMotorsLtd: A case Study. Proceedings of 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014), Guwahati, Assam, India.

Chutima, P. and P. Chimklai (2012). "Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge." Computers & Industrial Engineering 62(1): 39-55.

Coello, C. A. C. and N. C. Cortés (2005). "Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system." Genetic Programming and Evolvable Machines 6(2): 163-190.

Fattahi, P. and P. Samouei (2016). "A Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Mixed-Model Assembly Line Balancing with Different Skilled Workers." Journal of Optimization in Industrial Engineering 9(20): 9-18.

Go'kcen, H., et al. (2005). "A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem." Applied Mathematical Modelling 29 : 373-380.

Goldberg , D. E. (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning." Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

Kucukkoc, I. and D. Z. Zhang (2015). "Balancing of parallel u-shaped assembly lines." Computers & Operations Research 64: 233-244.

Lam, N. T., et al. (2016). "Lean line balancing for an electronics assembly line." Procedia CIRP 40: 437-442.

Li, M., et al. (2017). "Rules-based heuristic approach for the U-shaped assembly line balancing problem." Applied Mathematical Modelling 48 : 423-439.

Liao, C. J., et al. (2007). "A discrete version of particle swarm optimization for flow shop scheduling problems." Computers & Operation Research 34: 3099-3011.

Miltenburg, G. J. and J. Wijngaard (1994). "The u-line line balancing problem." Management Science 40(10): 1378-1388.

Miltenburg, J. (2001). "U-shaped production lines: A review of theory and practice." International Journal of Production Economics 70(3): 201-214.

Özcan, U., et al. (2009). "Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines." International Journal of Production Research 48:17, 5089:5113.

Parsopoulos, K. E. and M. N. Vrahatis (2002). "Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization." Natural computing 1(2-3): 235-306.

Peng, W. and Q. Zhang (2008). A decomposition-based multi-objective particle swarm optimization algorithm for continuous optimization problems. Granular Computing, 2008. GrC 2008. IEEE International Conference on, IEEE.

Rabbani, M., et al. (2016). "Multi-objective optimization algorithms for mixed model assembly line balancing problem with parallel workstations." Cogent Engineering 3: 1158903.

Saif, U., et al. (2014). "A survey on assembly lines and its types." Front Mech. Eng 9(2): 95-105.

Scholl, A. and N. Boysen (2009). "Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure." International Journal of Production Economics 119(1): 90-100.

Simaria, A. S. and P. M. Vilarinho (2009). "2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines." Computers & Industrial Engineering 56(2): 489-506.

Sparling, D. (1998). "Balancing Just-in-time Production units: The N U-line Balancing problem." ABI/INFORM 215.

Sparling, D. and J. Miltenburg (1998). "The mixed-model U-line balancing problem." International Journal of Production Research 36(2): 485-501.

Zhang, Q. and H. Li (2007). "A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition." IEEE Transactions on Evolutionary Computation 11 : 712-731.

Zheng, W., et al. (2017). "An Improved MOEA/D with Optimal DE Schemes for Many-Objective Optimization Problems." *Algorithms* 10(3): 86.

ณัฐชัย (2556). การจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. โยธาภิบาล.

เพ็ญนภัส (2561). การแก้ปัญหาการจัดสมมูลสายการประกอบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวขนาน. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

เพ็ญพัทธ์ (2551). การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ปิ่นกุ่มภีร์.

สุชาติดา (2553). การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมมูลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวที่มีสถานีงานแบบขนานในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คิดอ่าน.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ข้อมูลของโจทย์ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

ปัญหาการจัดสมคูลคู่สายการประกอบรูปตัวยูในรูปแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่นำมาใช้ในการทดลองมี
ข้อมูลดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ก.1 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) และ ขนาด 21 ชั้นงาน และ ลำดับ
ก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson ขนาด 11 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

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

ตาราง ก.1 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) และ ขนาด 21 ชั้นงาน และ ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson ขนาด 11 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
15	18	-	-
16	17	-	-
17	20	-	-
18	19	-	-

ตาราง ก.2 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson (1957) ขนาด 11 ชั้นงาน และ ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2	1	3
1	3	2	3
1	4	3	4
1	5	4	5
2	6	4	8
3	7	5	6
4	7	6	7
5	7	6	10
6	8	7	11
7	9	7	12
8	10	8	9
9	11	8	11
10	11	9	10
-	-	9	13
-	-	11	13
-	-	12	15
-	-	13	14
-	-	14	16
-	-	14	19

ตาราง ก.2 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Jackson (1957) ขนาด 11 ชั้นงาน และ ลำดับ
ก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงานบนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
-	-	14	20
-	-	15	17
-	-	15	22
-	-	16	18
-	-	17	18
-	-	17	23
-	-	18	25
-	-	19	22
-	-	20	21
-	-	20	25
-	-	21	22
-	-	21	24
-	-	23	25

ตาราง ก.3 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) ขนาด 21 ชั้นงาน และลำดับ
ก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2	1	3
1	3	2	3
2	21	3	4
3	4	4	5
4	5	4	8
4	21	5	6
5	6	6	7
5	7	6	10
6	8	7	11
7	8	7	12

ตาราง ก.3 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Mitchell (1957) ขนาด 21 ชั้นงาน และลำดับ
ก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

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

ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
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
7	11	7	11
7	12	7	12
8	9	8	9
8	11	8	11
9	10	9	10
9	13	9	13
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	18	25
19	22	19	22
20	21	20	21
20	25	20	25
21	22	21	22

ตาราง ก.4 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Roszieg ขนาด 25 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
21	24	21	24
23	25	23	25

ตาราง ก.5 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	3	1	3
1	4	1	4
1	5	1	5
1	8	1	8
1	19	1	19
1	21	1	21
1	22	1	22
1	23	1	23
1	24	1	24
1	26	1	26
2	6	2	6
2	17	2	17
3	28	3	28
4	28	4	28
5	28	5	28
6	7	6	7
7	18	7	18
8	9	8	9
9	10	9	10
10	11	10	11

ตาราง ก.5 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
10	12	10	12
11	15	11	15
12	13	12	13
13	14	13	14
13	16	13	16
14	28	14	28
15	28	15	28
16	28	16	28
17	28	17	28
18	28	18	28
19	20	19	20
20	28	20	28
21	28	21	28
22	28	22	28
23	28	23	28
24	25	24	25
25	28	25	28
26	27	26	27
27	28	27	28

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Gunther ขนาด 35 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Sawyer ขนาด 30 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2	1	4
1	5	1	5
1	7	2	11

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Gunther ขนาด 35 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Sawyer ขนาด 30 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	10	2	12
1	12	3	16
2	3	3	17
3	4	4	7
4	11	5	6
5	6	6	7
6	7	7	8
6	8	8	9
7	14	9	26
7	18	10	24
8	9	12	13
9	13	13	14
10	14	14	15
11	28	14	20
11	33	15	22
12	18	16	20
13	28	17	18
13	33	18	19
14	15	20	21
15	16	20	24
16	21	21	22
17	20	22	23
18	19	23	27
19	20	24	25
20	21	25	26
21	22	26	27
21	25	27	28
21	30	27	29
21	32	29	30

ตาราง ก.6 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Gunther ขนาด 35 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Sawyer ขนาด 30 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
22	23	-	-
23	24	-	-
24	27	-	-
25	26	-	-
26	27	-	-
27	28	-	-
27	33	-	-
27	34	-	-
28	29	-	-
30	31	-	-
31	32	-	-
32	33	-	-
33	35	-	-

ตาราง ก.7 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	3	1	3
1	7	1	4
2	4	1	5
2	8	1	8
3	5	1	19
4	6	1	21
5	9	1	22
6	10	1	23
7	9	1	24
7	14	1	26

ตาราง ก.7 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
8	10	2	6
8	14	2	17
9	41	3	28
10	41	4	28
11	13	5	28
12	13	6	7
12	37	7	18
13	14	8	9
13	15	9	10
14	17	10	11
14	25	10	12
14	29	11	15
14	30	12	13
14	31	13	14
14	32	13	16
15	16	14	28
15	18	15	28
15	23	16	28
15	24	17	28
16	19	18	28
17	26	19	20
17	27	20	28
18	19	21	28
19	20	22	28
19	33	23	28
20	21	24	25
21	22	25	28
22	28	26	27
23	33	27	28
24	33	-	-

ตาราง ก.7 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Heskiaoff ขนาด 28 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
25	26	-	-
26	38	-	-
27	28	-	-
27	33	-	-
28	38	-	-
29	41	-	-
30	41	-	-
31	41	-	-
32	41	-	-
33	34	-	-
33	35	-	-
33	36	-	-
34	38	-	-
35	40	-	-
36	38	-	-
37	43	-	-
38	40	-	-
39	41	-	-
40	41	-	-
41	42	-	-
42	44	-	-
42	45	-	-

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	3	1	3

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	7	1	7
2	4	2	4
2	8	2	8
3	5	3	5
4	6	4	6
5	9	5	9
6	10	6	10
7	9	7	9
7	14	7	14
8	10	8	10
8	14	8	14
9	41	9	41
10	41	10	41
11	13	11	13
12	13	12	13
12	37	12	37
13	14	13	14
13	15	13	15
14	17	14	17
14	25	14	25
14	29	14	29
14	30	14	30
14	31	14	31
14	32	14	32
15	16	15	16
15	18	15	18
15	23	15	23
15	24	15	24
16	19	16	19
17	26	17	26

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
17	27	17	27
18	19	18	19
19	20	19	20
19	33	19	33
20	21	20	21
21	22	21	22
22	28	22	28
23	33	23	33
24	33	24	33
25	26	25	26
26	38	26	38
27	28	27	28
27	33	27	33
28	38	28	38
29	41	29	41
30	41	30	41
31	41	31	41
32	41	32	41
33	34	33	34
33	35	33	35
33	36	33	36
34	38	34	38
35	40	35	40
36	38	36	38
37	43	37	43
38	40	38	40
39	41	39	41
40	41	40	41
41	42	41	42
42	44	42	44

ตาราง ก.8 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Kilbridge ขนาด 45 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
42	45	42	45

ตาราง ก.9 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1 และ 2		สายการประกอบที่ 1 และ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2	20	21
1	41	21	23
1	69	22	23
1	70	23	25
2	3	23	31
3	4	23	33
3	68	24	25
4	6	25	26
4	7	25	27
5	6	25	28
5	24	25	29
5	30	26	35
6	8	27	35
7	8	28	35
8	12	29	35
9	10	30	31
10	11	31	32
11	12	32	35
12	13	33	34
12	14	34	35
13	23	35	36
14	23	35	44
15	16	35	48

ตาราง ก.9 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1 และ 2		สายการประกอบที่ 1 และ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
16	17	35	51
16	18	35	53
17	19	35	56
18	19	35	60
19	20	35	61
19	22	35	62
19	57	36	37
37	38	51	52
38	39	52	54
39	40	53	54
40	42	54	55
41	42	57	58
42	43	58	59
43	50	59	60
44	45	61	65
45	46	62	63
46	47	63	64
47	50	64	65
48	49	64	66
49	50	64	67

ตาราง ก.10 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Wee-mag ขนาด 75 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2	1	2
1	41	1	3
1	69	1	4

ตาราง ก.10 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Wee-mag ขนาด 75 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	70	1	5
2	3	1	6
3	4	1	7
3	68	2	15
4	6	3	13
4	7	3	24
5	6	4	8
5	24	4	14
5	30	4	16
6	8	5	12
7	8	5	15
8	12	6	9
9	10	6	10
10	11	6	11
11	12	6	13
12	13	9	20
12	14	9	24
13	23	10	18
14	23	12	19
15	16	13	22
16	17	15	17
16	18	15	20
17	19	15	23
18	19	16	21
19	20	16	26
19	22	17	30
19	57	18	26
20	21	18	30
21	23	20	27
22	23	21	33

ตาราง ก.10 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Wee-mag ขนาด 75 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
23	25	24	25
23	31	25	28
23	33	25	30
24	25	25	33
25	26	25	34
25	27	26	31
25	28	26	32
25	29	26	41
26	35	27	29
27	35	27	35
28	35	27	36
29	35	31	37
30	31	31	39
31	32	32	44
32	35	32	45
33	34	33	41
34	35	35	38
35	36	35	42
35	44	36	40
35	48	36	43
35	51	39	51
35	53	40	46
35	56	42	47
35	60	43	48
35	61	43	50
35	62	46	48
36	37	46	51
37	38	47	49
38	39	47	50
39	40	47	52

ตาราง ก.10 ลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Tonge ขนาด 70 ชั้นงาน และลำดับก่อนหลังของชั้นงานของ Wee-mag ขนาด 75 ชั้นงาน บนสายการประกอบที่ 1 และ 2 (ต่อ)

สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง	ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
40	42	47	53
41	42	49	59
42	43	49	61
43	50	49	62
44	45	50	54
45	46	50	55
46	47	50	60
47	50	50	62
48	49	52	56
49	50	52	57
51	52	53	58
52	54	55	63
53	54	58	65
54	55	59	64
57	58	59	66
58	59	62	67
59	60	66	68
61	65	68	69
62	63	68	70
63	64	68	71
64	65	68	72
64	66	68	73
64	67	68	74
-	-	68	75

ตาราง ก.11 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S1 ขนาด 32 (21-11) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	4	4	4	6	5
2	3	3	2	2	1
3	9	8	8	4	4
4	5	5	4	6	6
5	8	8	9	0	1
6	4	3	4	2	1
7	7	7	8	2	2
8	6	7	6	5	6
9	4	4	4	4	5
10	0	1	1	5	4
11	2	3	2	4	3
12	0	1	0	-	-
13	5	5	4	-	-
14	3	3	3	-	-
15	4	4	4	-	-
16	2	3	2	-	-
17	11	13	13	-	-
18	5	5	5	-	-
19	2	2	2	-	-
20	3	2	3	-	-
21	6	6	7	-	-
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-

ตาราง ก.12 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S2 ขนาด 36 (11-25) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	6	5	5	3	3
2	2	1	2	3	3
3	4	4	5	9	9
4	6	6	6	4	5
5	0	1	0	8	8
6	2	1	2	3	3
7	2	2	2	8	7
8	5	6	5	6	6
9	4	5	5	4	4
10	5	4	5	1	1
11	4	3	3	2	3
12	-	-	-	1	0
13	-	-	-	5	4
14	-	-	-	3	2
15	-	-	-	4	4
16	-	-	-	3	3
17	-	-	-	14	12
18	-	-	-	5	5
19	-	-	-	1	1
20	-	-	-	2	2
21	-	-	-	6	7
22	-	-	-	5	5
23	-	-	-	3	3
24	-	-	-	7	8
25	-	-	-	4	4

ตาราง ก.13 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S3 ขนาด 46 (21-25) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
1	4	4	4	3	3	3
2	3	3	2	3	3	3
3	9	8	8	9	9	8
4	5	5	4	4	5	5
5	8	8	9	8	8	9
6	4	3	4	3	3	3
7	7	7	8	8	7	8
8	6	7	6	6	6	7
9	4	4	4	4	4	5
10	0	1	1	1	1	0
11	2	3	2	2	3	2
12	0	1	0	1	0	1
13	5	5	4	5	4	5
14	3	3	3	3	2	2
15	4	4	4	4	4	5
16	2	3	2	3	3	2
17	11	13	13	14	12	13
18	5	5	5	5	5	5
19	2	2	2	1	1	1
20	3	2	3	2	2	3
21	6	6	7	6	7	6
22	-	-	-	5	5	4
23	-	-	-	3	3	3
24	-	-	-	7	8	8
25	-	-	-	4	4	4

ตาราง ก.14 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S4 ขนาด 50 (25-25) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
1	3	3	3	3	3	3
2	3	3	3	3	3	3
3	9	9	8	9	9	8
4	4	5	5	4	5	5
5	8	8	9	8	8	9
6	3	3	3	3	3	3
7	8	7	8	8	7	8
8	6	6	7	6	6	7
9	4	4	5	4	4	5
10	1	1	0	1	1	0
11	2	3	2	2	3	2
12	1	0	1	1	0	1
13	5	4	5	5	4	5
14	3	2	2	3	2	2
15	4	4	5	4	4	5
16	3	3	2	3	3	2
17	14	12	13	14	12	13
18	5	5	5	5	5	5
19	1	1	1	1	1	1
20	2	2	3	2	2	3
21	6	7	6	6	7	6
22	5	5	4	5	5	4
23	3	3	3	3	3	3
24	7	8	8	7	8	8
25	4	4	4	4	4	4

ตาราง ก.15 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S5 ขนาด 56 (28-28) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	70	68	70	68
2	59	58	59	58
3	33	29	33	29
4	6	5	6	5
5	1	0	1	0
6	27	29	27	29
7	17	16	17	16
8	62	61	62	61
9	31	29	31	29
10	53	55	53	55
11	21	22	21	22
12	19	18	19	18
13	108	116	108	116
14	52	50	52	50
15	5	5	5	5
16	8	7	8	7
17	97	98	97	98
18	8	8	8	8
19	47	44	47	44
20	67	68	67	68
21	17	16	17	16
22	8	7	8	7
23	3	3	3	3
24	21	22	21	22
25	107	96	107	96

ตาราง ก. 15 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S5 ขนาด 56 (28-28) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
26	3	3	3	3
27	2	2	2	2
28	72	69	72	69

ตาราง ก.16 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S6 ขนาด 65 (35-30) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	30	27	8	8
2	3	3	7	6
3	4	5	17	17
4	21	20	10	9
5	6	5	1	2
6	13	14	5	5
7	2	2	13	14
8	4	4	9	9
9	20	23	0	1
10	31	29	4	3
11	22	25	12	14
12	32	27	13	13
13	24	23	5	5
14	2	2	12	13
15	20	20	9	9
16	28	27	10	10
17	1	2	1	2
18	2	2	9	10

ตาราง ก.16 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ S6 ขนาด 65 (35-30) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
19	18	17	18	16
20	28	27	16	15
21	6	6	20	19
22	9	10	13	12
23	15	14	15	15
24	21	23	7	6
25	4	5	17	15
26	4	4	9	8
27	5	5	22	25
28	38	38	7	7
29	1	2	13	14
30	5	4	1	2
31	4	5	-	-
32	1	0	-	-
33	36	36	-	-
34	1	1	-	-
35	1	1	-	-

ตาราง ก.17 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ S7 ขนาด 73 (45-28) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	9	9	70	68
2	9	8	59	58
3	10	9	33	29
4	10	9	6	5

ตารางที่ ก.17 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S7 ขนาด 73 (45-28) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
5	17	17	1	0
6	17	15	27	29
7	13	13	17	16
8	13	13	62	61
9	20	18	31	29
10	20	18	53	55
11	10	9	21	22
12	11	11	19	18
13	6	5	108	116
14	22	23	52	50
15	11	10	5	5
16	19	20	8	7
17	12	12	97	98
18	3	2	8	8
19	7	7	47	44
20	4	3	67	68
21	55	50	17	16
22	14	15	8	7
23	27	25	3	3
24	29	26	21	22
25	26	27	107	96
26	6	5	3	3
27	5	4	2	2
28	24	24	72	69
29	4	4	-	-
30	5	5	-	-

ตารางที่ ก.17 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S7 ขนาด 73 (45-28) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
31	7	6	-	-
32	4	3	-	-
33	15	14	-	-
34	3	3	-	-
35	7	6	-	-
36	9	9	-	-
37	4	4	-	-
38	7	7	-	-
39	5	5	-	-
40	4	3	-	-
41	21	22	-	-
42	12	12	-	-
43	6	6	-	-
44	5	5	-	-
45	5	5	-	-

ตาราง ก.18 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S8 ขนาด 90 (45-45) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	9	9	9	9
2	9	8	9	8
3	10	9	10	9
4	10	9	10	9
5	17	17	17	17
6	17	15	17	15

ตาราง ก.18 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S8 ขนาด 90 (45-45) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
7	13	13	13	13
8	13	13	13	13
9	20	18	20	18
10	20	18	20	18
11	10	9	10	9
12	11	11	11	11
13	6	5	6	5
14	22	23	22	23
15	11	10	11	10
16	19	20	19	20
17	12	12	12	12
18	3	2	3	2
19	7	7	7	7
20	4	3	4	3
21	55	50	55	50
22	14	15	14	15
23	27	25	27	25
24	29	26	29	26
25	26	27	26	27
26	6	5	6	5
27	5	4	5	4
28	24	24	24	24
29	4	4	4	4
30	5	5	5	5

ตาราง ก.18 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S8 ขนาด 90 (45-45) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2
31	7	6	7	6
32	4	3	4	3
33	15	14	15	14
34	3	3	3	3
35	7	6	7	6
36	9	9	9	9
37	4	4	4	4
38	7	7	7	7
39	5	5	5	5
40	4	3	4	3
41	21	22	21	22
42	12	12	12	12
43	6	6	6	6
44	5	5	5	5
45	5	5	5	5

ตาราง ก.19 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S9 ขนาด 115 (45-70) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
1	9	9	8	17	18	17
2	9	8	9	66	60	71
3	10	9	9	54	59	54
4	10	9	9	52	48	56
5	17	17	15	6	5	5

ตาราง ก.19 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S9 ขนาด 115 (45-70) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
6	17	15	17	88	87	95
7	13	13	13	21	22	23
8	13	13	12	128	124	118
9	20	18	21	68	64	66
10	20	18	19	70	65	71
11	10	9	10	85	78	90
12	11	11	10	21	22	20
13	6	5	6	134	141	127
14	22	23	23	135	133	123
15	11	10	9	94	98	97
16	19	20	17	90	85	85
17	12	12	12	50	53	48
18	3	2	3	143	147	153
19	7	7	7	19	19	18
20	4	3	4	54	58	58
21	55	50	58	50	48	52
22	14	15	13	40	37	36
23	27	25	28	73	75	69
24	29	26	27	12	12	12
25	26	27	27	152	149	150
26	6	5	6	42	40	45
27	5	4	5	45	40	45
28	24	24	22	74	72	79
29	4	4	4	26	24	26
30	5	5	5	11	10	10

ตาราง ก.19 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S9 ขนาด 115 (45-70) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
31	7	6	7	31	28	27
32	4	3	4	50	53	49
33	15	14	14	102	110	107
34	3	3	2	46	47	49
35	7	6	6	35	38	32
36	9	9	9	40	41	37
37	4	4	4	2	1	2
38	7	7	6	1	1	0
39	5	5	5	3	2	3
40	4	3	4	13	11	12
41	21	22	20	16	14	14
42	12	12	11	25	24	24
43	6	6	6	21	21	22
44	5	5	4	43	42	39
45	5	5	4	30	27	29
46	-	-	-	83	87	90
47	-	-	-	89	88	80
48	-	-	-	56	57	55
49	-	-	-	59	59	62
50	-	-	-	43	43	46
51	-	-	-	11	11	12
52	-	-	-	26	26	25
53	-	-	-	44	40	47

ตาราง ก.19 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ S9 ขนาด 115 (45-70) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
54	7	6	7	121	130	126
55	4	3	4	38	34	35
56	15	14	14	68	68	67
57	3	3	2	22	20	22
58	7	6	6	7	7	7
59	9	9	9	16	15	17
60	4	4	4	32	32	31
61	7	7	6	25	24	24
62	5	5	5	27	28	24
63	4	3	4	156	148	160
64	21	22	20	28	28	30
65	12	12	11	15	15	14
66	6	6	6	26	25	23
67	5	5	4	18	17	17
68	5	5	4	72	66	67
69	-	-	-	23	24	20
70	-	-	-	27	26	25

ตาราง ก.20 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ S10 ขนาด 140 (70-70) ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2
1	17	15	18	17	15
2	66	62	60	66	62
3	54	54	59	54	54

ตาราง ก.20 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S10 ขนาด 140 (70-70) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2
4	52	49	48	52	49
5	6	5	5	6	5
6	88	83	87	88	83
7	21	22	22	21	22
8	128	130	124	128	130
9	68	73	64	68	73
10	70	67	65	70	67
11	85	81	78	85	81
12	21	22	22	21	22
13	134	141	141	134	141
14	135	139	133	135	139
15	94	92	98	94	92
16	90	92	85	90	92
17	50	47	53	50	47
18	143	150	147	143	150
19	19	20	19	19	20
20	54	51	58	54	51
21	50	48	48	50	48
22	40	43	37	40	43
23	73	68	75	73	68
24	12	11	12	12	11
25	152	158	149	152	158
26	42	41	40	42	41
27	45	40	40	45	40
28	74	79	72	74	79
29	26	24	24	26	24

ตาราง ก.20 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S10 ขนาด 140 (70-70) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2
30	11	9	10	31	28
31	31	30	28	50	53
32	50	49	53	102	110
33	102	97	110	11	9
34	46	44	47	31	30
35	35	32	38	50	49
36	40	41	41	102	97
37	2	1	1	46	44
38	1	1	1	35	32
39	3	2	2	40	41
40	13	14	11	2	1
41	16	17	14	1	1
42	25	24	24	3	2
43	21	20	21	13	14
44	43	40	42	16	17
45	30	28	27	25	24
46	83	88	87	21	20
47	89	89	88	43	40
48	56	56	57	30	28
49	59	62	59	83	88
50	43	44	43	89	89
51	11	12	11	56	56
52	26	23	26	59	62
53	44	41	40	43	44
54	121	121	130	11	12
55	38	40	34	26	23

ตาราง ก.20 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S10 ขนาด 140 (70-70) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2	
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2
56	68	72	68	31	28
57	22	23	20	50	53
58	7	6	7	102	110
59	16	16	15	68	72
60	32	34	32	22	23
61	25	23	24	7	6
62	27	27	28	16	16
63	156	157	148	32	34
64	28	27	28	25	23
65	15	14	15	27	27
66	26	27	25	156	157
67	18	16	17	28	27
68	72	76	66	15	14
69	23	23	24	26	27
70	27	27	26	18	16

ตาราง ก.21 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S11 ขนาด 145 (70-75) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
1	17	15	23	20	23
2	66	62	24	24	25
3	54	54	25	23	24
4	52	49	26	25	28
5	6	5	23	22	22

ตาราง ก.21 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S11 ขนาด 145 (70-75) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
6	88	83	22	23	23
7	21	22	6	5	6
8	128	130	22	24	21
9	68	73	23	23	22
10	70	67	21	21	19
11	85	81	22	21	20
12	21	22	15	15	14
13	134	141	5	5	4
14	135	139	23	22	21
15	94	92	4	4	3
16	90	92	26	24	27
17	50	47	21	19	21
18	143	150	5	5	4
19	19	20	24	25	24
20	54	51	25	24	22
21	50	48	26	25	23
22	40	43	26	24	26
23	73	68	24	24	24
24	12	11	27	26	27
25	152	158	20	19	20
26	42	41	23	22	22
27	45	40	25	27	25
28	74	79	13	13	13
29	26	24	3	3	3
30	11	9	11	11	12
31	31	30	21	22	22

ตาราง ก.21 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S11 ขนาด 145 (70-75) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
32	50	49	22	20	23
33	102	97	21	21	20
34	46	44	22	23	22
35	35	32	25	24	23
36	40	41	8	8	7
37	2	1	22	20	20
38	1	1	24	23	25
39	3	2	22	20	22
40	13	14	21	19	21
41	16	17	6	6	5
42	25	24	26	27	25
43	21	20	22	22	20
44	43	40	6	5	5
45	30	28	21	19	19
46	83	88	25	22	27
47	89	89	11	10	12
48	56	56	22	20	23
49	59	62	21	20	20
50	43	44	25	23	26
51	11	12	22	20	21
52	26	23	22	23	20
53	44	41	23	23	25
54	121	121	22	23	22
55	38	40	22	20	23
56	68	72	25	25	27
57	22	23	23	22	25

ตาราง ก.21 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S11 ขนาด 145 (70-75) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1		สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
58	7	6	21	20	21
59	16	16	22	20	22
60	32	34	22	21	23
61	25	23	22	21	23
62	27	27	22	22	20
63	156	157	21	21	19
64	28	27	27	28	26
65	15	14	23	21	23
66	26	27	2	1	1
67	18	16	26	24	25
68	72	76	25	25	24
69	23	23	24	25	25
70	27	27	22	20	22

ตาราง ก.22 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S12 ขนาด 166 (83-83) ชั้นงาน

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
1	1673	1626	1536	1536	1834	1624
2	985	936	948	948	1006	1033
3	1836	2014	1882	1882	1803	1757
4	973	937	1002	1002	913	1056
5	1700	1847	1696	1696	1537	1718

ตาราง ก.22 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S12 ขนาด 166 (83-83) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
6	2881	2695	2796	2796	2705	2892
7	2231	2390	2361	2361	2297	2043
8	1040	943	1024	1024	957	1064
9	1793	1616	1620	1620	1819	1628
10	1250	1281	1178	1178	1192	1142
11	700	698	747	747	700	681
12	464	442	453	453	459	420
13	500	530	523	523	486	529
14	1133	1040	1104	1104	1200	1106
15	577	571	629	629	541	627
16	483	496	504	504	507	529
17	880	963	875	875	934	838
18	667	688	705	705	730	608
19	600	634	586	586	561	629
20	233	235	244	244	252	253
21	408	370	404	404	428	418
22	847	911	880	880	809	772
23	767	700	722	722	794	804
24	850	815	827	827	929	931
25	780	855	718	718	820	749
26	912	834	961	961	915	1002
27	748	675	673	673	681	696
28	1863	1686	1889	1889	1979	1959
29	714	723	756	756	710	765
30	1004	1007	1023	1023	919	1068
31	713	734	712	712	758	719

ตาราง ก.22 เวลาชั้นงานของปัญหาที่ S12 ขนาด 166 (83-83) ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
32	642	670	601	601	640	681
33	629	614	633	633	644	631
34	1234	1204	1137	1137	1337	1138
35	1143	1034	1133	1133	1069	1050
36	1266	1367	1336	1336	1297	1245
37	792	746	782	782	721	776
38	1251	1341	1349	1349	1274	1321
39	1310	1322	1391	1391	1340	1320
40	663	724	726	726	699	646
41	494	506	542	542	502	510
42	1288	1255	1162	1162	1385	1289
43	792	863	769	769	819	727
44	578	546	623	623	551	623
45	594	596	631	631	640	616
46	578	547	554	554	540	589
47	622	671	563	563	598	668
48	578	563	634	634	543	619
49	564	554	520	520	539	555
50	578	606	594	594	563	597
51	578	561	526	526	635	531
52	578	563	552	552	556	635
53	578	545	568	568	585	545
54	578	528	569	569	552	615
55	578	588	628	628	632	590
56	578	598	623	623	555	611
57	578	570	614	614	623	634

ตาราง ก.22 เวลาชิ้นงานของปัญหาที่ S12 ขนาด 166 (83-83) ชิ้นงาน (ต่อ)

ชิ้นงาน	สายการประกอบที่ 1			สายการประกอบที่ 2		
	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3	รุ่นที่1	รุ่นที่2	รุ่นที่3
58	578	615	570	570	559	596
59	578	524	603	603	611	520
60	578	596	523	523	559	619
61	578	549	552	552	605	548
62	578	606	573	573	605	624
63	578	618	558	558	594	616
64	578	539	574	574	550	613
65	578	607	555	555	623	613
66	578	569	524	524	582	622
67	578	566	579	579	568	554
68	578	536	565	565	567	628
69	467	467	468	468	485	475
70	887	880	860	860	823	929
71	396	394	374	374	372	420
72	1296	1188	1396	1396	1267	1182
73	1100	1173	1047	1047	1065	1094
74	2543	2736	2733	2733	2533	2541
75	764	771	819	819	699	812
76	357	357	383	383	373	375
77	701	644	643	643	699	706
78	1164	1131	1217	1217	1136	1266
79	286	298	272	272	304	278
80	2100	1893	2156	2156	2260	1984
81	450	416	410	410	489	465
82	1300	1192	1260	1260	1306	1285
83	3691	3824	3824	3824	3736	3813

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย

ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึมของแต่ละโจทย์ปัญหา แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ข.1 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	11	4	10.3529	0.0096	0.0533
	2	11	4	10.3889	0.0116	0.0757
MOPSO	1	11	4	10.3879	0.0121	0.0524
	2	11	4	10.4211	0.0165	0.0315
MOPSO/D	1	11	4	10.3880	0.0106	0.0504
	2	11	4	10.3529	0.0083	0.0405

ตาราง ข.2 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึม ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 30 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0699	0.0870	0.8937	0.3883	0.1914	2254.688
MOPSO	0.0980	0.1031	0.7448	0.1470	0.0820	2215.766
MOPSO/D	0.0412	0.0621	0.8175	0.4745	0.2695	2286.086

ตาราง ข.3 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	9	4	8.4375	0.0069	0.0734
	2	9	4	8.4370	0.0068	0.0252
MOPSO	1	9	4	8.4375	0.009	0.062
	2	9	4	8.4371	0.0101	0.0777
MOPSO/D	1	9	4	8.4371	0.0105	0.0367
	2	9	4	8.4360	0.0097	0.0333

ตาราง ข.4 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 36 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0749	0.1072	0.8575	0.4133	0.2311	2052.219
MOPSO	0.1508	0.1379	0.8388	0.0527	0.0283	1939.82
MOPSO/D	0.0749	0.0812	0.7379	0.4032	0.2453	2160.992

ตาราง ข.5 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	8	3	7.4286	0.003	0.037
	2	8	3	7.4662	0.0022	0.0637
MOPSO	1	8	3	7.4677	0.013	0.0398
	2	8	3	7.4667	0.0041	0.036
MOPSO/D	1	8	3	7.4667	0.003	0.0372
	2	8	3	7.4286	0.0041	0.0637

ตาราง ข.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S1 ขนาด 32 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					CPU TIME (second)
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	
MOEA/D	0.0648	0.1105	0.8745	0.4028	0.1905	2079.75
MOPSO	0.1379	0.1176	0.7758	0.0689	0.0536	2056.797
MOPSO/D	0.0616	0.0727	0.8663	0.4101	0.2857	2086.922

ตาราง ข.7 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S2 ขนาด 36 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 18 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	11	5	10.5417	0.0155	0.093
	2	11	5	10.5000	0.0126	0.1322
MOPSO	1	11	5	10.5417	0.0109	0.121
	2	11	5	10.5419	0.0131	0.1333
MOPSO/D	1	11	5	10.4762	0.0105	0.1066
	2	11	5	10.4760	0.0075	0.0922

ตาราง ข.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S2 ขนาด 36 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 18 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					CPU TIME (second)
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	
MOEA/D	0.0907	0.1468	0.2341	0.0550	0.1263	2660
MOPSO	0.1349	0.1467	0.0550	0.5562	0.0316	2530.102
MOPSO/D	0.0342	0.1055	0.5562	0.2341	0.3421	2743.219

ตาราง ข.9 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S2 ขนาด 36 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	9	4	8.5000	0.0089	0.0363
	2	9	4	8.5263	0.0118	0.1193
MOPSO	1	9	4	8.5265	0.0151	0.0989
	2	9	4	8.5600	0.0058	0.0507
MOPSO/D	1	9	4	8.5000	0.0077	0
	2	9	4	8.5220	0.0089	0.0626

ตาราง ข.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S2 ขนาด 36 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 22 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1156	0.1480	0.9021	0.2906	0.1619	2299.344
MOPSO	0.1862	0.1482	0.8677	0.2514	0.0952	2385.867
MOPSO/D	0.1027	0.0730	0.7948	0.3454	0.2762	2312.086

ตาราง ข.11 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S2 ขนาด 36 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 26 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	8	4	7.5000	0.0041	0.0814
	2	8	4	7.5000	0.0095	0.0486
MOPSO	1	8	4	7.5294	0.0070	0.0400
	2	8	4	7.5700	0.0050	0.0702
MOPSO/D	1	8	4	7.4667	0.0066	0.0894
	2	8	4	7.4286	0.0064	0.0831

ตาราง ข.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S2 ขนาด 36 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 26 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0842	0.1791	0.9441	0.3504	0.1273	2125.398
MOPSO	0.1057	0.1350	0.8937	0.1472	0.0727	1981.391
MOPSO/D	0.0651	0.0788	0.8827	0.4116	0.3000	2212.727

ตาราง ข.13 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S3 ขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	9	4	8.7500	0.0092	0.0720
	2	9	4	8.6897	0.0139	0.0738
MOPSO	1	9	4	8.7097	0.0148	0.0655
	2	9	4	8.7000	0.0125	0.0734
MOPSO/D	1	9	4	8.6897	0.0074	0.0252
	2	9	4	8.6539	0.0018	0.0434

ตาราง ข.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S3 ขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 34 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0498	0.1764	0.9871	0.5016	0.1543	2724.047
MOPSO	0.1110	0.0959	0.8989	0.0667	0.0370	2763.563
MOPSO/D	0.0343	0.0415	0.9182	0.4005	0.3148	2784.094

ตาราง ข.15 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S3 ขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 126 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	12	5	11.4540	0.0059	0.0567
	2	12	5	11.4542	0.0037	0.0194
MOPSO	1	12	5	11.4545	0.0080	0.0637
	2	12	5	11.4783	0.0069	0.0539
MOPSO/D	1	12	5	11.4545	0.0060	0.0626
	2	11	5	10.6071	0.0073	0.0543

ตาราง ข.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S3 ขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 126 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0633	0.0659	0.8419	0.3685	0.2288	6005.547
MOPSO	0.0727	0.1249	0.9780	0.0658	0.0339	6096.867
MOPSO/D	0.0327	0.0820	0.9192	0.4052	0.2542	6240.57

ตาราง ข.17 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S3 ขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 21 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	11	4	10.4500	0.0081	0.0639
	2	11	4	10.4762	0.0052	0.0363
MOPSO	1	11	4	10.4765	0.0089	0.0721
	2	11	4	10.5000	0.0075	0.0816
MOPSO/D	1	11	4	10.4762	0.0066	0.0733
	2	11	4	10.4742	0.0085	0.0598

ตาราง ข.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S3 ขนาด 46 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 21 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0631	0.0972	0.9014	0.2628	0.1742	3701.281
MOPSO	0.1079	0.0935	0.8550	0.0513	0.0379	3428.742
MOPSO/D	0.0546	0.0800	0.8836	0.4773	0.2879	3434.242

ตาราง ข.19 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S4 ขนาด 50 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	9	3	8.6087	0.0081	0.0693
	2	9	3	8.6250	0.0295	0.0805
MOPSO	1	9	3	8.5909	0.0141	0.051
	2	9	3	8.5908	0.0069	0.0561
MOPSO/D	1	9	3	8.6097	0.0069	0.0522
	2	9	3	8.6080	0.0049	0.0526

ตาราง ข.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S4 ขนาด 50 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 42 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1471	0.2774	0.8998	0.3095	0.1786	2823.961
MOPSO	0.2265	0.2183	0.9487	0.1176	0.0476	2764.289
MOPSO/D	0.1317	0.0838	0.7955	0.2414	0.2738	2798.328

ตาราง ข.21 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S4 ขนาด 50 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 50 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	7	3	6.6957	0.0010	0.0452
	2	7	3	6.6818	0.0014	0.0616
MOPSO	1	7	3	6.7200	0.0061	0.0515
	2	7	3	6.6956	0.0035	0.0686
MOPSO/D	1	7	3	6.6819	0.0018	0.0485
	2	7	3	6.6815	0.0025	0.0574

ตาราง ข.22 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S4 ขนาด 50 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 50 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0616	0.0714	0.8486	0.2859	0.1495	3934.477
MOPSO	0.1294	0.1240	0.8691	0.1647	0.0825	4635.609
MOPSO/D	0.0520	0.0618	0.8716	0.4732	0.2732	4994.563

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.23 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา S4 ขนาด 50 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 52 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	11	4	10.6207	0.0077	0.0805
	2	11	4	10.5769	0.0060	0.0612
MOPSO	1	11	4	10.6333	0.0100	0.0741
	2	11	4	10.6071	0.0112	0.0645
MOPSO/D	1	11	4	10.5769	0.0091	0.0607
	2	11	4	10.6071	0.0059	0.0601

ตาราง ข.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา S4 ขนาด 50 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 52 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1032	0.0926	0.6809	0.0775	0.0632	4028.594
MOPSO	0.1565	0.1683	0.9537	0.0763	0.0402	3683.75
MOPSO/D	0.0313	0.0930	0.8231	0.6759	0.4023	4204.367

ตาราง ข.25 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 28290 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	13	5	12.6759	0.0065	0.0230
	2	13	5	12.6579	0.0095	0.0122
MOPSO	1	13	5	12.6667	0.0113	0.0143
	2	13	5	12.6486	0.0084	0.0285
MOPSO/D	1	13	5	12.6667	0.0079	0.0258
	2	13	5	12.6758	0.0098	0.0171

ตาราง ข.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 28290 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0914	0.1904	0.9766	0.3473	0.1948	12461.24
MOPSO	0.1928	0.1968	0.7304	0.0959	0.0584	10806.55
MOPSO/D	0.0877	0.1901	0.8670	0.4769	0.2468	13235.09

ตาราง ข.27 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 44280 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	10	4	9.7222	0.0130	0.0234
	2	10	4	9.7438	0.0086	0.0290
MOPSO	1	10	4	9.7436	0.0201	0.0160
	2	10	4	9.7297	0.0108	0.0182
MOPSO/D	1	10	4	9.7273	0.0037	0.0285
	2	10	4	9.7058	0.0120	0.0175

ตาราง ข.28 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 44280 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1538	0.0894	0.7544	0.1923	0.1477	8835.094
MOPSO	0.2203	0.1362	0.7500	0.0291	0.0227	7966.242
MOPSO/D	0.0752	0.0873	0.9083	0.5253	0.3295	8766.242

ตาราง ข. 29 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 648 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	8	4	7.7778	0.0043	0.0641
	2	8	4	7.7780	0.0054	0.0000
MOPSO	1	8	4	7.7714	0.0067	0.0181
	2	8	4	7.7712	0.0036	0.0446
MOPSO/D	1	8	4	7.7838	0.0027	0.0156
	2	8	4	7.7647	0.0060	0.0302

ตาราง ข.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M1 ขนาด 56 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 648 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0793	0.0982	0.9103	0.3488	0.2071	7653.203
MOPSO	0.1171	0.1380	0.8835	0.1189	0.0714	7993.203
MOPSO/D	0.0508	0.0956	0.8497	0.3955	0.2214	7930.016

ตาราง ข.31 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 41 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	20	8	19.5654	0.0085	0.0354
	2	20	8	19.5662	0.0105	0.0258
MOPSO	1	20	8	19.5833	0.0152	0.0293
	2	20	8	19.6000	0.0168	0.044
MOPSO/D	1	20	8	19.5745	0.0104	0.0352
	2	20	8	19.5652	0.0073	0.0246

ตาราง ข.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 41 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1386	0.1531	0.7955	0.1430	0.1092	15862.58
MOPSO	0.3239	0.2882	0.7142	0.0055	0.0057	14562.09
MOPSO/D	0.0422	0.1086	0.8920	0.6063	0.3851	15865.5

ตาราง ข.33 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 54 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	15	6	14.6250	0.0039	0.0373
	2	15	6	14.6341	0.0115	0.0317
MOPSO	1	15	6	14.6340	0.0087	0.0217
	2	15	6	14.6154	0.0066	0.0295
MOPSO/D	1	15	6	14.6134	0.0067	0.0272
	2	15	6	14.6053	0.0054	0.0245

ตาราง ข.34 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 54 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0732	0.1389	0.9608	0.3194	0.1375	12747.03
MOPSO	0.1206	0.1730	0.7956	0.1480	0.0750	12160.18
MOPSO/D	0.0510	0.0864	0.8929	0.3346	0.2875	13162.84

ตาราง ข. 35 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 81 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	10	4	9.7368	0.0124	0.0302
	2	10	4	9.7058	0.0091	0.0250
MOPSO	1	10	4	9.7142	0.0095	0.0076
	2	10	4	9.7297	0.0109	0.0111
MOPSO/D	1	10	4	9.7143	0.0114	0.0002
	2	10	4	9.6969	0.0098	0.0038

ตาราง ข.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหา M2 ขนาด 65 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 81 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1066	0.1797	0.9190	0.3571	0.2089	9970.609
MOPSO	0.1717	0.1489	0.8383	0.0603	0.0443	9508.617
MOPSO/D	0.0732	0.1204	0.9720	0.4567	0.2468	9579.289

ตาราง ข.37 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหา M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 10902 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	15	5	14.7115	0.0104	0.0607
	2	15	5	14.7273	0.0139	0.0988
MOPSO	1	15	5	14.7115	0.0135	0.1116
	2	15	5	14.7222	0.0159	0.1054
MOPSO/D	1	15	5	14.7222	0.0098	0.0807
	2	15	5	14.7115	0.0105	0.0415

ตาราง ข.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 10902 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1629	0.2096	0.9164	0.0693	0.0484	11606.2
MOPSO	0.1953	0.2113	0.8129	0.0259	0.0161	11335.32
MOPSO/D	0.0699	0.1227	0.8671	0.5857	0.4355	10588.81

ตาราง ข.39 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 4510 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	10	4	9.8079	0.0026	0.0705
	2	10	4	9.8123	0.0028	0.0941
MOPSO	1	10	4	9.8113	0.0063	0.0868
	2	10	4	9.8148	0.0076	0.1042
MOPSO/D	1	10	4	9.7959	0.0038	0.0873
	2	10	4	9.8113	0.0018	0.0760

ตาราง ข.40 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบ
เวลาการผลิต 4510 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0516	0.0946	0.8741	0.3656	0.1574	11562.75
MOPSO	0.1106	0.1304	0.8611	0.0626	0.0324	9951.359
MOPSO/D	0.0455	0.0647	0.8996	0.4936	0.3102	11541.1

ตาราง ข.41 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 11880 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	10	4	9.8000	0.0063	0.1754
	2	10	4	9.7917	0.0020	0.0914
MOPSO	1	10	4	9.8010	0.0133	0.1593
	2	10	4	9.8110	0.0116	0.0931
MOPSO/D	1	10	4	9.7959	0.0114	0.0770
	2	10	4	9.7872	0.0069	0.0744

ตาราง ข.42 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M3 ขนาด 73 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 11880 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0726	0.1458	0.9333	0.4114	0.2087	11081.6
MOPSO	0.1576	0.2155	0.7586	0.0526	0.0174	8522.086
MOPSO/D	0.0440	0.0899	0.9009	0.5781	0.2739	8462.195

ตาราง ข.43 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4503 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	17	6	16.7213	0.007	0.2493
	2	17	6	16.7018	0.0035	0.2710
MOPSO	1	17	6	16.7119	0.0073	0.2094
	2	17	6	16.7119	0.0059	0.2489
MOPSO/D	1	17	6	16.7069	0.0035	0.1311
	2	17	6	16.7167	0.0044	0.2394

ตาราง ข.44 ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 4503 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0633	0.1944	0.8840	0.2205	0.0808	16584.44
MOPSO	0.1129	0.1296	0.8241	0.2068	0.1115	16980.48
MOPSO/D	0.0484	0.0888	0.9164	0.4430	0.3077	16168.09

ตาราง ข.45 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5060 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	11	4	10.8103	0.0024	0.2363
	2	11	4	10.8000	0.0018	0.2506
MOPSO	1	11	4	10.8136	0.002	0.2416
	2	11	4	10.8070	0.0021	0.1877
MOPSO/D	1	11	4	10.8036	0.0008	0.1469
	2	11	4	10.8103	0.0026	0.2044

ตาราง ข.46 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5060 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0358	0.0996	0.8809	0.3697	0.1745	13596.44
MOPSO	0.0756	0.0922	0.7392	0.1495	0.0940	13603.18
MOPSO/D	0.0389	0.0773	0.8371	0.4330	0.2315	13606.86

ตาราง ข.47 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 110 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	10	4	9.8076	0.0026	0.1808
	2	10	4	9.8246	0.0017	0.1810
MOPSO	1	10	4	9.8214	0.0014	0.1929
	2	10	4	9.8213	0.0030	0.2619
MOPSO/D	1	10	4	9.8141	0.0025	0.1406
	2	10	4	9.8079	0.0009	0.2345

ตาราง ข.48 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด M4 ขนาด 90 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 110 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0817	0.1144	0.9766	0.2094	0.1628	15032.45
MOPSO	0.1232	0.1203	0.7719	0.0554	0.0640	13751
MOPSO/D	0.0546	0.0992	0.9252	0.3859	0.2733	12433.55

ตาราง ข.49 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 32390 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	16	6	15.7612	0.0079	0.0757
	2	16	6	15.7746	0.0111	0.0727
MOPSO	1	16	7	15.7808	0.0166	0.0908
	2	16	6	15.7714	0.0126	0.0866
MOPSO/D	1	16	6	15.7736	0.0077	0.0654
	2	16	6	15.7647	0.0026	0.0615

ตาราง ข.50 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 32390 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0556	0.1639	0.9743	0.4559	0.1602	33155.48
MOPSO	0.0872	0.1034	0.7754	0.2564	0.1875	32328.1
MOPSO/D	0.0530	0.1001	0.7566	0.2722	0.1523	31233.88

ตาราง ข.51 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 25740 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	13	6	12.8088	0.0139	0.0653
	2	13	5	12.8003	0.0179	0.0902
MOPSO	1	13	5	12.8169	0.0108	0.0723
	2	13	5	12.8000	0.0083	0.0701
MOPSO/D	1	13	5	12.8030	0.0114	0.0766
	2	13	5	12.8000	0.0050	0.0645

ตาราง ข.52 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 25740 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0752	0.1375	1.1529	0.3247	0.1154	33359.97
MOPSO	0.1194	0.1466	0.9236	0.0250	0.0192	34005.28
MOPSO/D	0.0751	0.1070	1.0200	0.5234	0.3654	38559.38

ตาราง ข.53 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 57970 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	12	5	11.8125	0.0091	0.0634
	2	12	5	11.8235	0.0120	0.0659
MOPSO	1	12	5	11.8356	0.0113	0.0872
	2	12	5	11.8125	0.0131	0.0623
MOPSO/D	1	12	5	11.8209	0.0088	0.0665
	2	12	5	11.8182	0.0069	0.0488

ตาราง ข.54 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L1 ขนาด 115 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 57970 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0823	0.1541	0.9164	0.2107	0.1420	29230.4
MOPSO	0.0977	0.1862	0.8413	0.0663	0.0739	31953.3
MOPSO/D	0.0561	0.1280	1.0618	0.3968	0.2841	29138.71

ตาราง ข.55 คำตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆ หาได้ในปัญหาขนาด L2 ขนาด 140 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 320 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	23	7	22.7700	0.0074	0.0567
	2	23	7	22.7830	0.0065	0.0616
MOPSO	1	23	7	22.7832	0.0089	0.0660
	2	23	7	22.7843	0.0065	0.0620
MOPSO/D	1	23	7	22.7810	0.0076	0.0577
	2	23	7	22.7723	0.0042	0.0659

ตาราง ข.56 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L2 ขนาด 140 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 320 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.0630	0.1156	0.8592	0.4583	0.2090	50686.88
MOPSO	0.3657	0.2495	0.5435	0.0133	0.0053	58860.55
MOPSO/D	0.0565	0.0885	0.9090	0.6401	0.2857	56101.41

ตาราง ข.57 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L2 ขนาด 140 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 6210 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	31	10	30.7767	0.0135	0.1267
	2	31	10	30.7700	0.0086	0.0897
MOPSO	1	31	10	30.7527	0.0119	0.0964
	2	31	10	30.7553	0.0088	0.0823
MOPSO/D	1	31	10	30.7579	0.0084	0.0830
	2	31	10	30.7500	0.0098	0.0892

ตาราง ข.58 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L2 ขนาด 140 ชั้นงาน รอบ
เวลาการผลิต 6210 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1443	0.1940	0.8289	0.0775	0.0391	43749.69
MOPSO	0.2195	0.2186	0.7135	0.0450	0.0234	33846.58
MOPSO/D	0.0249	0.1223	0.8975	0.8400	0.4375	31214.89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข.59 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L2 ขนาด 140 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 64460 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	29	10	28.6990	0.0113	0.0915
	2	29	10	28.7075	0.0078	0.0974
MOPSO	1	29	10	28.7103	0.0115	0.1020
	2	29	10	28.6900	0.0109	0.0933
MOPSO/D	1	29	10	28.6990	0.0111	0.1016
	2	29	10	28.7130	0.0122	0.0882

ตาราง ข.60 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L2 ขนาด 140 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 64460 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					CPU TIME (second)
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	
MOEA/D	0.1296	0.1535	0.8856	0.2364	0.1091	34010.78
MOPSO	0.1568	0.1537	0.8260	0.0328	0.0152	36716.45
MOPSO/D	0.0245	0.1056	0.9622	0.6529	0.3758	34359.68

ตาราง ข.61 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L3 ขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5940 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	39	12	38.7212	0.0072	0.0921
	2	39	12	38.7184	0.0134	0.1047
MOPSO	1	39	12	38.7100	0.0166	0.1082
	2	39	12	38.7184	0.0130	0.1195
MOPSO/D	1	39	12	38.7290	0.0093	0.0932
	2	39	12	38.7290	0.0063	0.1000

ตาราง ข.62 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L3 ขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 5940 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					CPU TIME (second)
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	
MOEA/D	0.1029	0.1648	0.8968	0.1632	0.1325	31634.73
MOPSO	0.2382	0.2324	0.9029	0.1699	0.0427	37520.87
MOPSO/D	0.0951	0.1031	0.9378	0.3818	0.3248	30332.45

ตาราง ข.63 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L3 ขนาด 145 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 252 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	33	11	32.6905	0.0085	0.1310
	2	33	11	32.6723	0.0089	0.1248
MOPSO	1	33	11	32.6803	0.0106	0.1442
	2	33	11	32.6953	0.0094	0.1409
MOPSO/D	1	33	11	32.6750	0.0086	0.1302
	2	33	11	32.6777	0.0069	0.1398

ตาราง ข.64 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L3 ขนาด 145 ชั้นงาน รอบ
เวลาการผลิต 252 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1541	0.1910	0.9949	0.1327	0.1157	57687.33
MOPSO	0.2210	0.1902	0.6685	0.1050	0.0972	56068.74
MOPSO/D	0.1002	0.1743	0.8844	0.5104	0.2870	52394.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ข.65 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L3 ขนาด 145 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 303 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	27	9	26.7360	0.0100	0.1107
	2	27	9	26.7339	0.0088	0.1084
MOPSO	1	27	9	26.7203	0.0089	0.1005
	2	27	9	26.7349	0.0105	0.1160
MOPSO/D	1	27	9	26.7203	0.0085	0.1069
	2	27	9	26.7130	0.0112	0.0921

ตาราง ข.66 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L3 ขนาด 145 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 303 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1394	0.1189	0.8711	0.2001	0.1440	58583.44
MOPSO	0.2321	0.2140	0.7624	0.0473	0.0160	54272.92
MOPSO/D	0.0424	0.1171	1.0241	0.5962	0.3400	57890.93

ตาราง ข.67 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6842 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	23	7	23.7692	0.0098	0.1158
	2	23	7	23.7568	0.0096	0.1059
MOPSO	1	23	7	23.7611	0.0105	0.1254
	2	23	7	23.7632	0.0104	0.1209
MOPSO/D	1	23	7	23.7610	0.006	0.0924
	2	23	7	23.7589	0.0041	0.1210

ตาราง ข.68 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6842 หน่วยเวลา ปัญหาสุดท้าย

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1687	0.1297	0.9063	0.1579	0.1538	53860.46
MOPSO	0.2329	0.1638	0.7755	0.0756	0.0577	39840.74
MOPSO/D	0.0758	0.1220	0.9837	0.5454	0.2885	58860.46

ตาราง ข.69 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 7571 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	21	7	20.7879	0.0046	0.0651
	2	21	7	20.7835	0.0084	0.0582
MOPSO	1	21	7	20.7901	0.0094	0.0629
	2	21	7	20.7835	0.0065	0.0514
MOPSO/D	1	21	7	20.7890	0.0041	0.0653
	2	21	7	20.7879	0.0047	0.0490

ตาราง ข.70 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบ
เวลาการผลิต 7571 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1962	0.1369	1.0978	0.1134	0.0476	48007.45
MOPSO	0.3424	0.1386	1.0852	0.0175	0.0159	48555.54
MOPSO/D	0.0910	0.1268	1.1209	0.7155	0.4365	50219.31

ตาราง ข.71 ค่าตอบที่น้อยที่สุดที่สุดที่อัลกอริทึมต่างๆหาได้ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน
รอบเวลาการผลิต 6309 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	การทำซ้ำ	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่ทำได้				
		N_w	N_s	MITR	B_b	B_w
MOEA/D	1	25	8	24.7664	0.0074	0.0553
	2	25	8	24.7642	0.0072	0.0663
MOPSO	1	25	8	24.7727	0.0073	0.0585
	2	25	8	24.7685	0.0084	0.0616
MOPSO/D	1	25	8	24.7619	0.0080	0.0675
	2	25	8	24.7685	0.0063	0.0478

ตาราง ข.72 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในปัญหาขนาด L4 ขนาด 166 ชั้นงาน รอบเวลาการผลิต 6309 หน่วยเวลา

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU TIME (second)
MOEA/D	0.1239	0.1459	0.9552	0.2835	0.1549	50939.86
MOPSO	0.1838	0.1349	1.0123	0.0504	0.0265	48657.57
MOPSO/D	0.0777	0.0693	1.0739	0.3983	0.3186	50883.08



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว สุชานันท์ ต้นชนะประดิษฐ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2533 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา ในปี 2556 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้เข้าร่วมงานกับบริษัทเม็กเท็ค แมนูแฟคเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรฝ่าย คุณภาพในปี 2558 เป็นระยะเวลา 6 เดือน และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

