การแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์

นายชินวิชญ์ สินธุเดชากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SOLVING LINE BALANCING AND ALLOCATION MULTI-SKILLED WORKERS PROBLEM ON PARALLEL ASSEMBLY LINES UNDER MANY-OBJECTIVE

Mr. Chinnawich Sintudachakul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์
โดย	นายชินวิชญ์ สินธุเดชากุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นระเกณฑ์ พุ่มชูศรี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชินวิชญ์ สินธุเดชากุล : การแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ (SOLVING LINE BALANCING AND ALLOCATION MULTI-SKILLED WORKERS PROBLEM ON PARALLEL ASSEMBLY LINES UNDER MANY-OBJECTIVE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ปารเมศ ชุติมา, 278 หน้า.

การจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยทักษะที่หลากหลายเกิดจากความทุพพลภาพของและความชำนาญของพนักงาน ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาแบบเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ในระยะเวลาที่จำกัด โดยวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาลักษณะนี้ คือวิธีการทางฮิวริสติก

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมี (A Hybrid Multi-Objective Evolutionary and Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template : AMOEA/D-COIN/WT) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาโดยมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ได้แก่ ได้แก่ รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด จำนวนสถานีน้อยที่สุด ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด และความไม่เกี่ยวเนื่องกันของขั้นงานน้อยที่สุด พร้อมกันนี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของ AMOEA/D-COIN/WT กับอัลกอริทึมอื่นๆที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาในลักษณะนี้ ได้แก่ อัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN) และ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) โดยตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมด 6 ตัว

ผลที่ได้จากการทดลองคือ อัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT สามารถค้นพบคำตอบในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่ำที่สุดที่ดีกว่าในเกือบทุกโจทย์ปัญหา ส่วนในด้านของตัวชี้วัดนั้น อัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่ดีกว่า COIN และ MOEA/D ในด้านการลู่เข้าหาคำตอบที่แท้จริงของทุกโจทย์ปัญหาตัวอย่างที่นำมาวิจัย ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดในการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ ถึงแม้การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบและจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจะไม่ดีเท่า COIN และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่นานกว่า COIN และMOEA/D แต่ยังอยู่ในช่วงเวลาที่ยอมรับได้ (นานที่สุดไม่เกิน 1 ชั่วโมง)

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5870136321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: MIXED-MODEL PARALLEL ASSEMBLY LINE / DISABLE WORKER / LINE BALANCING AND WORKER ALLOCATION

CHINNAWICH SINTUDACHAKUL: SOLVING LINE BALANCING AND ALLOCATION MULTI-SKILLED WORKERS PROBLEM ON PARALLEL ASSEMBLY LINES UNDER MANY-OBJECTIVE. ADVISOR: PROF.PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 278 pp.

Line balancing and allocation multi-skill worker problem that some are disable or unskilled on assembly line under many-objective is known as an NP-hard problem. Hence, to optimize this problem for a limited time, heuristic approaches need to be developed. The most commonly used method for solving these problems is the heuristic method.

In this research, A Hybrid Multi-Objective Evolutionary and Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template (AMOEA/D-COIN/WT) is adapted to optimize four objectives simultaneously, i.e. minimize cycle time, minimize the number of stations, minimize different workload between workstations, and minimize index of task-unrelated. The performance of AMOEA/D-COIN/WT is compared with other two good performance algorithms, namely Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm (COIN) and A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition (MOEA/D) with 6 performance indicators.

The experiment results show that AMOEA/D-COIN/WT can find answers in each function for that purpose have the lowest value, lower than COIN and MOEA/D in almost all the problems. In terms of metrics, AMOEA/D-COIN/WT obtains better performance than COIN and MOEA/D in terms of convergence of all the problems for example, which is the main concern of algorithm comparison. Although, its spread and number of non-dominated solution are not as good as COIN and takes longer than COIN and MOEA/D but also within an acceptable time period (not exceeding the maximum 1 h).

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

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

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์และการช่วยเหลือจากศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชุติมา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความรักและเอาใจใส่

ขอขอบคุณ นายกฤษณ์ ประเสริฐ นายการันต์ กันภัย นาย วัชรวิทย์ ถนนทอง และนางสาวทัศนีย์ ทองจันทร์ รุ่นพี่ที่ได้คอยช่วยสอนและให้คำแนะนำต่างๆ และขอขอบคุณนายปวริศ เอกพิทักษ์ธรรม ในความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ดังที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ต้องกราบขอบพระคุณครอบครัว และเพื่อนๆทุกคนที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้เสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ผ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 6

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 6

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย 9

1.5 ประโยชน์ของงานวิจัยนี้ 9

1.6 สรุปภาพรวมงานวิจัย 9

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 11

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 11

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสายการประกอบ 11

2.1.2 ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 17

2.1.3 วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล 20

2.1.4 ตัวอย่างการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 22

2.1.5 การการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) 51

2.1.6 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ 52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.1.7 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม 56
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 59
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบขนาน 59
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม (Type I) 60
2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม (Type II) 61
2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเมตาฮิวริสติก (Meta heuristic) ที่จะนำมาศึกษา 62
บทที่ 3 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก 65
3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของ MOEA/D 65
3.2 พารามิเตอร์ของ MOEA/D 66
3.2.1 จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (Lattice: *H*) 66
3.2.2 จำนวนของจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: *T*) 66
3.2.3 ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง 66
3.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D ในการแก้แก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 66
3.4 ตัวอย่างการใช้ MOEA/D แก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 70
บทที่ 4 อัลกอริทึมการบรรจวบ 88
4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN) 88
4.2 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN) 88
4.2.1 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น 88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

4.2.2 ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) 89
4.3 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 90
4.4 ตัวอย่างการใช้ COIN ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 94
บทที่ 5 วิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมีต้นแบบ 109
5.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของ MOEA/D-COIN/WT 109
5.2 พารามิเตอร์ของ MOEA/D-COIN/WT 110
5.2.1 จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (Lattice: *H*) 110
5.2.2 จำนวนของจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: *T*) 110
5.2.3 ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง 110
5.2.4 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น 110
5.2.5 ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) (k) 110
5.2.6 จำนวนจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบ (Number of Template Cut Point) 111
5.2.7 ร้อยละในการกำหนดช่วงบิตของต้นแบบ 111
5.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-COIN/WT ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 111
5.4 ตัวอย่างการใช้ MOEA/D-COIN/WT ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 116

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

บทที่ 6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆในการแก้ปัญหา การจัดสมดุลสายการประกอบที่ทำการวิจัย 151
6.1 ปัญหาที่ในการทดลองสำหรับงานวิจัย 151
6.2 วิธีการทดลองของงานวิจัย 153
6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในอัลกอริทึม 153
6.3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองสำหรับอัลกอริทึมต่างๆ 154
6.3.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) 158
6.3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง 177
6.4 ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึม 178
6.4.1 ผลการทดลองการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน 178
6.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง 186
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 193
7.1 บทสรุปงานวิจัย 193
7.1.1 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง 194
7.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ 194
7.1.3 ผลการนำ AMOEA/D-COIN/WT มาใช้ในการแก้ปัญหา 195
7.2 ข้อเสนอแนะ 195
รายการอ้างอิง 196
ภาคผนวก ก รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง 203
ภาคผนวก ข รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง 238
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 278

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แสดงรายละเอียดของปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม 8
ตารางที่ 2.1 เวลาในแต่ละขั้นงานของพนักงานในแต่ละทักษะของโจทย์ปัญหา Jackson 11 Task 18
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสตริงคำตอบของขั้นงาน 19
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสตริงคำตอบของพนักงาน 19
ตารางที่ 2.4 เวลาของขั้นงานในแต่ละรุ่นและขั้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A และ B 25
ตารางที่ 2.5 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ ... 30
ตารางที่ 2.6 เงื่อนไขการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนิการและการเก็บคำตอบของกระบวนหาคำตอบด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วงแบบปกติ 33
ตารางที่ 2.7 เงื่อนไขการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนิการและการเก็บคำตอบของกระบวนหาคำตอบด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วงแบบซ่อมแซม 35
ตารางที่ 2.8 เวลาร่วมของแต่ละขั้นงานที่ทำโดยพนักงานแต่ละทักษะ 36
ตารางที่ 2.9 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่1 ของโจทย์ตัวอย่าง 37
ตารางที่ 2.10 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่ 2 ของโจทย์ตัวอย่าง 40
ตารางที่ 2.11 ผลการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะบนสายการประกอบแบบขนาน 44
ตารางที่ 2.12 เวลาของแต่ละขั้นงานของแต่ละรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ทำโดยพนักงานแต่ละทักษะ 46
ตารางที่ 2.13 เวลาขั้นงานรวมในแต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ 48
ตารางที่ 2.14 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาดำเนินการร่วมกับเวลารวมของขั้นงานที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ พร้อมค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย 49
ตารางที่ 2.15 จำนวนเครือข่ายของขั้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงานต่างๆ . 50
ตารางที่ 2.16 ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่วัตถุประสงค์ 56
ตารางที่ 2.17 สรุปข้อมูลต่างๆของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.1 ค่าถ่วงน้ำหนัก λpi ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก 71
ตารางที่ 3.2 ระยะห่างระหว่างจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา (λp) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (λj) 72
ตารางที่ 3.3 จุดข้างเคียงของแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λp 72
ตารางที่ 3.4 สตริงคำตอบของพนักงาน 73
ตารางที่ 3.5 สตริงคำตอบของขั้นงาน 73
ตารางที่ 3.6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร 74
ตารางที่ 3.7 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของประชากรเริ่มต้น 74
ตารางที่ 3.8 คำตอบที่ถูกอยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0) 75
ตารางที่ 3.9 สตริงคำตอบและจุดค่าถ่วงน้ำหนักของประชากรย่อย เมื่อ $p = 1$ 75
ตารางที่ 3.10 สตริงลำดับความสำคัญของขั้นงานที่สุ่มได้ 76
ตารางที่ 3.11 สตริงลำดับความสำคัญของพนักงานที่สุ่มได้ 76
ตารางที่ 3.12 สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริงคำตอบที่ผ่านการซ่อมแซ่ม 78
ตารางที่ 3.13 สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงานที่พัฒนาได้ 78
ตารางที่ 3.14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง 78
ตารางที่ 3.15 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร 79
ตารางที่ 3.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว 79
ตารางที่ 3.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ผ่านการนอร์มัลไลแล้วไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 80
ตารางที่ 3.18 ค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ของสตริงคำตอบ String1, Offspring 1.1 และ Offspring 1.2 80
ตารางที่ 3.19 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 ($\lambda 1$) กับคำตอบในรุ่นลูก (Offspring) ที่ได้จากการสลับสายพันธุ์ 1 ตำแหน่ง 81

ตารางที่ 3.20 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 ($\lambda 1$) 81

ตารางที่ 3.21 การแทนที่ค่าวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ($\lambda 1$) 81

ตารางที่ 3.22 คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า 82

ตารางที่ 3.23 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 ($\lambda 3$) 83

ตารางที่ 3.24 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 ($\lambda 7$) 83

ตารางที่ 3.25 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 ($\lambda 3$) และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 ($\lambda 7$) 83

ตารางที่ 3.26 การแทนที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 2 ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 ($\lambda 3$) และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 ($\lambda 7$) 84

ตารางที่ 3.27 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร 84

ตารางที่ 3.28 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า 85

ตารางที่ 3.29 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นที่ 1 ... 86

ตารางที่ 3.30 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบเจเนอเรชั่นที่ 10 87

ตารางที่ 3.31 ลำดับความสำคัญของขั้นงานและพนักงานของสตริงคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D 87

ตารางที่ 4.1 ความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรกและพนักงานคนแรก 91

ตารางที่ 4.2 ความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้ขั้นงานถัดไปและพนักงานคนถัดไป 91

ตารางที่ 4.3 สตริงคำตอบลำดับความสำคัญของขั้นงาน 92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.4 สตริงคำตอบลำดับความสำคัญของพนักงาน 92
ตารางที่ 4.5 ค่าความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก ของโจทย์ตัวอย่าง 95
ตารางที่ 4.6 ค่าความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงาน ถัดไปของโจทย์ตัวอย่าง 95
ตารางที่ 4.7 ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนแรก . 96
ตารางที่ 4.8 ค่าความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรขั้นพนักงานคนถัดไป . 96
ตารางที่ 4.9 การสร้างวงล้อรูเร็ตในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญของขั้นงานแรก 97
ตารางที่ 4.10 ค่าความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 6..... 98
ตารางที่ 4.11 ค่าความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 10 99
ตารางที่ 4.12 การสร้างวงล้อรูเร็ตในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญของขั้นงาน A3 100
ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงานจำนวน 5 สตริงคำตอบ..... 101
ตารางที่ 4.14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ของทั้ง 5 สตริงคำตอบ 102
ตารางที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) ของสตริงคำตอบ..... 102
ตารางที่ 4.16 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเป็นสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดี 103
ตารางที่ 4.17 ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับ พนักงานหลังทำการให้รางวัลกับสตริงคำตอบที่ดี 105
ตารางที่ 4.18 ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับ พนักงานหลังทำการให้ลงโทษกับสตริงคำตอบที่ไม่ดี..... 106
ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 1 .. 106
ตารางที่ 4.20 การรวมสตริงคำตอบของเจเนอเรชั่นที่ 1 และ 2..... 107
ตารางที่ 4.21 การเปรียบเทียบคำตอบโดยกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) 108
ตารางที่ 4.22 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 2 .. 108
ตารางที่ 5.1 ความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้ขั้นงานถัดไป และพนักงานคนถัดไป 114

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.2 ค่าถ่วงน้ำหนัก λpi ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก 118

ตารางที่ 5.3 ค่า dpj ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด 119

ตารางที่ 5.4 จุดข้างเคียงจำนวน 6 จุดของแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λp 120

ตารางที่ 5.5 ค่าถ่วงน้ำหนัก λci ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงของตารางการบรรจวบ 122

ตารางที่ 5.6 ระยะห่างระหว่างจุดค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงของตารางการบรรจวบ (λc) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (λp) 122

ตารางที่ 5.7 จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการปรับค่าความน่าจะเป็นในแต่ละตารางการบรรจวบ 122

ตารางที่ 5.8 สตริงคำตอบเริ่มต้นของพนักงานทั้ง 20 สตริงคำตอบ 123

ตารางที่ 5.9 สตริงคำตอบของขั้นงานทั้ง 20 สตริงคำตอบ 124

ตารางที่ 5.10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร 125

ตารางที่ 5.11 สตริงคำตอบที่ถูกอยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0) 125

ตารางที่ 5.12 สตริงคำตอบและจุดค่าถ่วงน้ำหนักของประชากรย่อย เมื่อ $p = 1$ 126

ตารางที่ 5.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรย่อยที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้ว 127

ตารางที่ 5.14 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของประชาการย่อยที่ $\lambda 1$ 127

ตารางที่ 5.15 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในบิตที่ 1 (รุ่นลูกแบบที่ 1) 131

ตารางที่ 5.16 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในบิตที่ 2 (รุ่นลูกแบบที่ 1) 132

ตารางที่ 5.17 การซ่อมแซมสตริงคำตอบของการสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ของอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ (แบบที่ 2) ของโจทย์ตัวอย่าง 134

ตารางที่ 5.18 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในขั้นงานแรก (รุ่นลูกแบบที่ 2) 135

ตารางที่ 5.19 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในบิตที่ 2 (รุ่นลูกแบบที่ 2) 136

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.20 สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงานรุ่นลูกทั้ง 2 แบบ 137

ตารางที่ 5.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 แบบและค่ามากที่สุดและน้อยสุดที่ปรับปรุงใหม่ 138

ตารางที่ 5.22 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมดที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว 139

ตารางที่ 5.23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ผ่านการนอร์มัลไลแล้วไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 139

ตารางที่ 5.24 ค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ของสตริงคำตอบ String1, Offspring 1.1 และ Offspring 1.2 140

ตารางที่ 5.25 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก ($\lambda 1$) กับคำตอบในรุ่นลูก (Offspring) ที่ได้จากอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ 140

ตารางที่ 5.26 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 .. 141

ตารางที่ 5.27 การแทนที่ค่าวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 141

ตารางที่ 5.28 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า 142

ตารางที่ 5.29 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 ($\lambda 3$) 143

ตารางที่ 5.30 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 10 ($\lambda 10$) 143

ตารางที่ 5.31 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 ($\lambda 16$) 143

ตารางที่ 5.32 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 และ จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 144

ตารางที่ 5.33 การแทนที่ค่าวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 และ จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 144

ตารางที่ 5.34 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร 145

ตารางที่ 5.35 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า 146

ตารางที่ 5.36 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นที่ 1 . 148

ตารางที่ 5.37 จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการปรับค่าความน่าจะเป็นในแต่ละตารางการบรรจวบ 149

ตารางที่ 5.38 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบเจเนอเรชั่นที่ 10 149

ตารางที่ 6.1รายละเอียดของปัญหาสายการประกอบ 152

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดของโจทย์ปัญหาสายการประกอบลักษณะขนานที่ใช้ในการทดลอง 152

ตารางที่ 6.3 จำนวนเจเนอเรชั่นในแต่ละโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง 154

ตารางที่ 6.4 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D 159

ตารางที่ 6.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม COIN..... 160

ตารางที่ 6.6 ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT 160

ตารางที่ 6.7 โจทย์ปัญหาที่นำมาทดสอบพารามิเตอร์..... 161

ตารางที่ 6.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ในปัญหา 59 ขั้นงาน..... 162

ตารางที่ 6.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ในปัญหา 194 ขั้นงาน..... 167

ตารางที่ 6.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ของปัญหา 128 ขั้นงาน..... 171

ตารางที่ 6.11 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาแต่ละโจทย์ปัญหาและสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D อัลกอริทึม COIN และอัลกอริทึม MOEA/D-COIN/WT..... 177

ตารางที่ 6.12 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1..... 179

ตารางที่ 6.13 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1 179

ตารางที่ 6.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1..... 180

ตารางที่ 6.15 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3..... 181

ตารางที่ 6.16 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3..... 181

ตารางที่ 6.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3..... 182

ตารางที่ 6.18 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:11:2 183

ตารางที่ 6.19 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:11:2..... 183

ตารางที่ 6.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3..... 184

ตารางที่ 6.21 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4 185

ตารางที่ 6.22 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4..... 185

ตารางที่ 6.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4 186

ตารางที่ 6.24 ค่าต่ำที่สุดของรอบเวลาดำเนินการและจำนวนสถานีที่อัลกอริทึมหาได้ในแต่ละโจทย์ปัญหา..... 187

ตารางที่ 6.25 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาขนาดเล็ก (P1-P2)..... 189

ตารางที่ 6.26 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาขนาดกลาง (P3-P4)..... 190

ตารางที่ 6.27 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาขนาดใหญ่ (P5-P6)..... 191

ตารางที่ 6.28 สรุปผลการทดลองในทุกโจทย์ปัญหา 192

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Mitchell 21 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 203
ตารางที่ ก.2 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Buxey 29 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 204
ตารางที่ ก.3 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Sawyer 30 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 205
ตารางที่ ก.4 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Sawyer 30 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 206
ตารางที่ ก.5 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Warnecke 58 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 207
ตารางที่ ก.6 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Warnecke 58 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 209
ตารางที่ ก.7 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Tonge 70 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 211
ตารางที่ ก.8 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Wee-mag 75 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 213
ตารางที่ ก.9 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 216
ตารางที่ ก.10 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 219
ตารางที่ ก.11 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 111 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 222
ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 226
ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1 238
ตารางที่ ข.2 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1 239
ตารางที่ ข.3 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1 239
ตารางที่ ข.4 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2 240
ตารางที่ ข.5 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2 241
ตารางที่ ข.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2 241
ตารางที่ ข.7 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2 242

ตารางที่ ข.8 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2 243

ตารางที่ ข.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2 243

ตารางที่ ข.10 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3 244

ตารางที่ ข.11 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3 245

ตารางที่ ข.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3 245

ตารางที่ ข.13 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1 246

ตารางที่ ข.14 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1 247

ตารางที่ ข.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1 247

ตารางที่ ข.16 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2 248

ตารางที่ ข.17 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2 249

ตารางที่ ข.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2 249

ตารางที่ ข.19 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1 250

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.20 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1 251

ตารางที่ ข.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1 251

ตารางที่ ข.22 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3 252

ตารางที่ ข.23 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3 253

ตารางที่ ข.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3 253

ตารางที่ ข.25 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1 254

ตารางที่ ข.26 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1 255

ตารางที่ ข.27 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1 255

ตารางที่ ข.28 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2 256

ตารางที่ ข.29 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2 257

ตารางที่ ข.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2 257

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.31 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:2 258

ตารางที่ ข.32 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:2 259

ตารางที่ ข.33 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:2 259

ตารางที่ ข.34 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3 260

ตารางที่ ข.35 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3 261

ตารางที่ ข.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3 261

ตารางที่ ข.37 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2 262

ตารางที่ ข.38 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2 263

ตารางที่ ข.39 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2 263

ตารางที่ ข.40 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4 264

ตารางที่ ข.41 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4 265

ตารางที่ ข.42 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4 265

ตารางที่ ข.43 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3 266

ตารางที่ ข.44 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3 267

ตารางที่ ข.45 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3 267

ตารางที่ ข.46 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5 268

ตารางที่ ข.47 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5 269

ตารางที่ ข.48 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5 269

ตารางที่ ข.49 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1 270

ตารางที่ ข.50 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1 271

ตารางที่ ข.51 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1 271

ตารางที่ ข.52 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3 272

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.53 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3 273

ตารางที่ ข.54 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3..... 273

ตารางที่ ข.55 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2..... 274

ตารางที่ ข.56 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2 275

ตารางที่ ข.57 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2..... 275

ตารางที่ ข.58 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4..... 276

ตารางที่ ข.59 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4 277

ตารางที่ ข.60 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4..... 277

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 แผนผังภาพรวมงานวิจัย 10
รูปที่ 2.1 สายการประกอบประเภทต่างๆ แบ่งตามจำนวนรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต 12
รูปที่ 2.2 สายการประกอบเส้นตรง 14
รูปที่ 2.3 สายการประกอบรูปตัวยู 15
รูปที่ 2.4 สายการประกอบสองด้าน 15
รูปที่ 2.5 สายการประกอบแบบหลายคนงาน 16
รูปที่ 2.6 สายการประกอบขนาน 16
รูปที่ 2.7 แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A 23
รูปที่ 2.8 แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ B 24
รูปที่ 2.9 ลำดับความสำคัญของขั้นงานและลำดับความสำคัญของพนักงาน 27
รูปที่ 2.10 ขั้นงานที่สามารถจัดลงในลำดับที่ 1 27
รูปที่ 2.11 ขั้นงานที่สามารถจัดลงในลำดับที่ 2 28
รูปที่ 2.12 วิธีการกำหนดลำดับของขั้นงานที่จะจัดสรรลงสถานีงาน 28
รูปที่ 2.13 ลำดับของพนักงานที่จัดสรรลงสถานีงาน 29
รูปที่ 2.14 ข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Searching) 31
รูปที่ 2.15 ข้อมูลนำเข้าของโจทย์ตัวอย่าง 35
รูปที่ 2.16 ตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงานในรอบที่ 1 ของโจทย์ตัวอย่าง 39
รูปที่ 2.17 ตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงานในรอบที่ 2 ของโจทย์ตัวอย่าง 41
รูปที่ 2.18 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่ 3-5 ของโจทย์ตัวอย่าง 42
รูปที่ 2.19 ข้อมูลนำออกในรอบที่ 4 ของโจทย์ตัวอย่าง 43
รูปที่ 2.20 กำหนดขั้นงานลงในแต่ละสถานีโดยวิธีการถอดรหัสเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน 43
รูปที่ 2.21 Pareto Optimal Solution (Goldberg, 1989) 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D 67
รูปที่ 3.2 การสลับสายพันธุ์สตริงคำตอบของขั้นงาน 77
รูปที่ 3.3 ลำดับความสำคัญที่ซ้ำของสตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริงหลักจากทำการสลับสายพันธุ์ ... 77
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้าง mapping relationship 77
รูปที่ 4.1 การปรับปรุงตารางความนาจะเป็น 89
รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบ 90
รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นที่ของคำตอบที่ใช้ในงานวิจัยในกรณีที่มีสองฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 93
รูปที่ 4.4 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรของขั้นงานแรก (A1) 98
รูปที่ 4.5 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรของขั้นงานที่ 2 (A2) 99
รูปที่ 4.6 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญของขั้นงานที่ 3 (A3) 100
รูปที่ 5.1ตัวอย่างการทำงานของพารามิเตอร์ของการใช้ต้นแบบ 111
รูปที่ 5.2แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT 112
รูปที่ 5.3 จำนวนตารางการบรรจวบทั้งหมดของอัลกอริทึม MOEA/D-COIN/WT ในโจทย์ตัวอย่าง 121
รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการกำหนดบิตต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน 129
รูปที่ 5.5 บิตต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบของพนักงาน 129
รูปที่ 5.6 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 1 (A1) (รุ่นลูกแบบที่ 1) 131
รูปที่ 5.7 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 2 (A2) (รุ่นลูกแบบที่ 1) 133
รูปที่ 5.8 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 1 (A1) (รุ่นลูกแบบที่ 2) 134
รูปที่ 5.9 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 2 (A2) (รุ่นลูกแบบที่ 2) 137
รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง ด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ ในปัญหา 59 ขั้นงาน 163
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง ในปัญหา 59 ขั้นงานเมื่อตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 164
รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์คู่ลำดับด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ในปัญหา 59 ขั้นงาน. 164

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านกา กระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ในปัญหา 59 ขั้นงาน 165

รูปที่ 6.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer 166

รูปที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง ด้านการลู่เข้าสู่คำตอบในปัญหา 194 ขั้นงาน 167

รูปที่ 6.7 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ ในปัญหา 194 ขั้นงาน เมื่อตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง 168

รูปที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์คู่ลำดับด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ในปัญหา 194 ขั้นงาน 168

รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ในปัญหา 194 ขั้นงาน 169

รูปที่ 6.10 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษและปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในปัญหา 194 ขั้นงาน 170

รูปที่ 6.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ในปัญหา 128 ขั้นงาน 173

รูปที่ 6.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง ด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ในปัญหา 128 ขั้นงาน 174

รูปที่ 6.13 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงของปัญหา 128 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนองคือการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ 174

รูปที่ 6.14 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง ของปัญหา 128 ขั้นงานเมื่อตัวแปรตอบสนองคือการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ 175

รูปที่ 6.15 ผลการวิเคราะห์คู่ลำดับด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ในปัญหา 128 ขั้นงาน 175

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.16 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง และร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตาราง ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer 176

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ โดยนำวิธีการหาคำตอบแบบเมตาฮิวริสติก (Meta heuristic) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา พร้อมระบุวัตถุประสงค์ที่จะนำมาพิจารณา รวมถึงขอบเขตของปัญหาและลำดับขั้นตอนในการนำเสนองานวิจัย

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สายการประกอบ (Assembly Line) เป็นกระบวนการผลิตที่นำระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนไปประยุกต์ใช้ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมยุคปัจจุบัน โดยที่สายการประกอบหมายถึง กระบวนการผลิตประเภทหนึ่ง ซึ่งจะมีชิ้นงานในแต่ละขั้นงานถูกนำมาประกอบเข้าไปกับชิ้นงานก่อนหน้า ตามลำดับของขั้นงาน (Task Sequence) ที่ได้มีการวางแผนหรือกำหนดเอาไว้ล่วงหน้า โดยต้องไม่ผิดเงื่อนไขความสัมพันธ์ก่อนหลัง(Precedence Diagram) ของขั้นงาน และหลังจากทำงานประกอบทั้งหมดที่ได้รับมอบหมายบนแต่ละสถานีงาน (Workstation) เสร็จ ตามรอบเวลาดำเนินการ (Cycle Time) ชิ้นงานประกอบนี้ก็จะถูกเคลื่อนย้ายไปยังสถานีงานที่อยู่ในลำดับถัดไป ด้วยอุปกรณ์ขนย้ายวัสดุอัตโนมัติ เช่น สายพานลำเลียง หุ่นยนต์ เป็นต้น การทำงานเช่นนี้จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งการประกอบในขั้นงานสุดท้ายเสร็จสิ้น ชิ้นงานประกอบดังกล่าวนี้ก็จะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finished Good) ในที่สุด ทั้งนี้การจัดสรรขั้นงานให้กับแต่ละสถานีงานในสายการประกอบจะต้องไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดต่างๆ เช่น รอบเวลาดำเนินการ จำนวนสถานีงาน ความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงาน ความสามารถในการทำงานของพนักงานเป็น ซึ่งจะเรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่า การจัดสมดุลสายการผลิต (Line Balancing)

โดยปัญหาการจัดสมดุลสายการผลิตของสายการประกอบสามารถจำแนกได้ออกเป็น 4 ประเภทหลักๆ คือ Single Model Deterministic (SMD), Single Model Stochastic (SMS), Multi/Mixed Model Deterministic (MMD) และ Multi/Mixed Model Stochastic (MMS) (Ghosh and Gagnon, 1989) ซึ่งหากพิจารณาสายการประกอบตามจำนวนรุ่น (Model) ผลิตภัณฑ์ในสายการประกอบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบเดียว (Single Model), สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ (Multi Model) และสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model) แต่ถ้าพิจารณาตามความแปรผันของเวลา

การดำเนินงาน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ เวลาดำเนินงานเชิงกำหนด (Deterministic Task Time) คือเวลาของแต่ละขั้นงานจะมีค่าคงที่, เวลาดำเนินงานเชิงพลวัต (Dynamic Task Time) คือเวลาของแต่ละขั้นงานมีค่าลดลงอย่างเป็นระบบ ซึ่งเกิดจากเส้นโค้งการเรียนรู้ (Learning Curve) และ เวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม (Stochastic Task Time) คือเวลาดำเนินของแต่ละขั้นงานไม่คงที่ โดยเกิดจากความผันแปรของเวลาดำเนินงานซึ่งมีผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น เครื่องจักรเสีย สูญเสียแรงจูงใจ งานที่ซับซ้อน สิ่งแวดล้อมในการทำงาน และ ทักษะของพนักงาน (Özcan, 2010) ซึ่งประเภทที่ผู้วิจัยจะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ คือการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม (Stochastic Task Time) จากทักษะของพนักงานที่เกิดความพิการหรือความเชี่ยวชาญของพนักงาน โดยทั่วไปแล้วจะสามารถจำแนกปัญหาดังกล่าวได้ 2 รูปแบบได้แก่ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม และ ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะ

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาในรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะมองว่าคนพิการนั้นเป็นพนักงานที่มีทักษะต่ำ (Low-Skill Worker) ซึ่งสามารถทำงานบางงานได้ช้ากว่าคนปกติและไม่สามารถทำงานบางงานได้เลย ดังนั้นจะทำให้เกิดข้อจำกัดที่และปัญหาที่มากขึ้นในการจัดสมดุลสายการประกอบ รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบก็จะมากขึ้นตาม แต่ถ้าสามารถแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการผลิตสายการประกอบที่มีพนักงานพิการให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นได้ ก็จะสามารถลดต้นทุนและเพิ่มโอกาสที่ผู้พิการจะมีงานทำ ซึ่งถือว่าเป็นการช่วยสังคมได้อีกทางหนึ่งด้วย

เพราะในปัจจุบันมีจำนวนผู้พิการเพิ่มขึ้นจนเท่ากับ 10% ของประชากรโลก ซึ่งบุคคลประเภทนี้จะมีความลำบากมากในการหางานทำ ยกตัวอย่างเช่น การวิจัยล่าสุดในสหราชอาณาจักรได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการจ้างงานสำหรับคนพิการอยู่ในระดับต่ำมากโดยมีเพียงประมาณ 48% ของคนพิการเมื่อเทียบกับอัตราการจ้างงานสำหรับคนปกติสูงถึง 78% ของคนปกติ และส่วนใหญ่คนพิการมีแนวโน้มที่จะถูกว่าจ้างให้ทำงานเพียงชั่วคราวเท่านั้น ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญแม้แต่ในประเทศที่เจริญแล้ว (ODI, 2011)

ส่วนในประเทศไทยมีจำนวนผู้พิการสูงถึง 2.2% ของประชากรทั้งประเทศ และได้เริ่มใช้ระบบสัดส่วนการจ้างงานคนพิการตั้งแต่ พ.ศ. 2534 โดยมาตรา 17 (2) ของ พระราชบัญญัติการฟื้นฟูสมรรถภาพคนพิการ พ.ศ. 2534 ได้กำหนดให้นายจ้างหรือเจ้าของสถานประกอบการ จ้างงานคนพิการในสัดส่วนคนปกติต่อคนพิการ 200 : 1 หากประสงค์ไม่จ้างให้นายจ้างหรือเจ้าของสถานประกอบการจ่ายเงินเข้ากองทุนฟื้นฟูสมรรถภาพคนพิการเป็นจำนวนเงินครึ่งหนึ่งของค่าแรงขั้นต่ำคูณ 365 คูณจำนวนคนพิการที่ต้องจ้าง ต่อมาได้ยกเลิกพระราชบัญญัติ ฟื้นฟูสมรรถภาพคนพิการ พ.ศ. 2534 และประกาศใช้พ.ร.บ.ส่งเสริมพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ พ.ศ. 2550 แทนที่ โดยได้เพิ่มสภาพบังคับให้กับระบบสัดส่วนการจ้างงานคนพิการด้วยการกำหนดให้มีการจ่ายเงินเข้ากองทุนส่งเสริมและ

พัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการล่าช้าต้องเสียดอกเบี้ยร้อยละ 7.5 ต่อปี โดยกำหนดสัดส่วนการจ้างงานบุคคลปกติต่อคนพิการ 100 : 1 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมอีก 1 เท่าตัว

งานวิจัยเริ่มแรกที่กล่าวถึงคนพิการในสายการประกอบคือ (Miralles et al., 2007)ได้ทำการศึกษาสายการประกอบในประเทศสเปนสำหรับศูนย์งานของคนพิการซึ่งมีจำนวนของคนงานที่ควรจะอยู่ในสายการประกอบคงที่ ให้มีอัตราการผลิตที่เพิ่มหรือลดรอบเวลาดำเนินการ ต่อมา (Miralles et al., 2008) ได้นำเสนออัลกอริทึม Branch-and-Bound สำหรับการแก้ปัญหาประเภทนี้สำหรับขนาดเล็กโดยพยายามนำเสนอว่าคนพิการนั้นไม่สามารถพัฒนาวิชาชีพอย่างต่อเนื่อง และมีการนำเสนอวิธีการต่างๆอีกมีมากมายเพื่อแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนมากขึ้นและความจำเป็นที่จะแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่ เช่น Chaves et al. (2009) นำเสนออัลกอริทึม Elaborate Clustering Search ส่วน Moreira and Costa (2009) นำเสนออัลกอริทึม Minimalist Tabu Search และ Blum and Miralles (2011) นำเสนอ A Beam Search Algorithm เป็นต้น

เมื่อวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบแตกต่างกันไป ย่อมส่งผลให้ปัญหาและวิธีการในการจัดสมดุลสายการประกอบที่แตกต่างไปด้วย ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบง่าย (Simple Assembly Line Balancing: SALB) และปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบทั่วไป (General Assembly Line Balancing: GALB) โดยปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบง่าย แบ่งเป็น 2 ลักษณะที่เป็นที่นิยมได้แก่ ปัญหาประเภทที่ 1 (Type 1 or SALB-1) เป็นปัญหาที่ทำการจัดสรรงานในแต่ละสถานีงานให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดรอบเวลาดำเนินการ (Cycle Time) มาให้ และปัญหาประเภทที่ 2 (Type 2 or SALB-2) เป็นปัญหาที่หารอบการทำงานที่น้อยที่สุดโดยกำหนดจำนวนสถานีงานหรือกำหนดจำนวนพนักงาน (Worker) มาให้ ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะที่กล่าวมาเป็นการแก้ปัญหาเพียงวัตถุประสงค์เดียว(Single Objective) แต่ในปัจจุบันงานวิจัยที่เกี่ยวกับปัญหาการจัดสมดุลสายการผลิตของสายการประกอบนั้นส่วนใหญ่มีจำนวนของวัตถุประสงค์มากกว่า 1 เสมอ ภายใต้สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model) เนื่องจากปัจจุบันพบว่ารสนิยมของผู้บริโภคมีความต้องที่แตกต่างและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วบนสายการประกอบรูปแบบต่างๆเช่น สายการประกอบเส้นตรง (Straight Line) สายการประกอบรูปตัวยู (U-Shape Line) (Miltenburg and Wijngaard, 1994) สายการประกอบแบบสองด้าน (Two-Sided Line) (Bartholdi, 1993) และสายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines)(Gökçen et al., 2006) เป็นต้น

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่มทั้ง 2 รูปแบบถือเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial Optimization Problem) ซึ่งเป็นปัญหาแบบเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ใน

ระยะเวลาที่จำกัด จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาวิธีที่นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาเอ็นพีแบบยากโดยทั่วไป รวมถึงปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม คือวิธีการทางฮิวริสติก ซึ่งคำตอบที่ได้ถือว่าเป็นคำตอบที่ดี (Best Solution) ที่ยอมรับได้ในการแก้ปัญหาเหล่านี้ ในสายการประกอบรูปแบบต่างๆ เช่น Delice et al. (2016) ได้นำเสนอวิธีได้หาคำตอบแบบเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) ในสายการประกอบแบบสองด้านรูปตัวยูที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม Sungur and Yavuz (2015)ได้นำเสนอวิธีการหาคำตอบแบบ Simulated Annealing (SA) ในสายการประกอบเส้นตรงโดยเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่นเนื่องจากคนพิการ และ Fattahi et al. (2016) ได้นำเสนอวิธีการหาคำตอบแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ในการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงานบนสายการประกอบแบบสองด้าน ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นแก้ปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 1 (Type I) ส่วนวิธีการทางฮิวริสติกเพื่อแก้ปัญหาการจัดสมดุลประเภทที่ 2 (Type II) เช่น Kilincci (2009) ได้นำเสนอฮิวริส Petri Net-Based (PN) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบประเภทที่ 2 Chaves et al. (2009) ได้นำเสนอวิธีการหาคำตอบโดย Clustering Search (CS) และ Zhang et al. (2008) ได้นำเสนออัลกอริทึม Random Key-Based Genetic (rkGA) ร่วมกับ Fuzzy Logic Controller (FLC) ในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงาน ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมาเป็นเพียงสายการประกอบเส้นตรง Araújo et al. (2015) ได้นำเสนออัลอริทึม Tabu Search และ Biased Random-Key Genetic (BRKGA) ในการจัดสมดุลและการการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงานในสายการประกอบเส้นตรงขนานกันแทนที่จะเป็นเส้นตรงเส้นเดียวโดยใช้พนักงานเท่าเดิม ซึ่งสองสายการประกอบไม่มีความเกี่ยวข้องกันแต่อย่างใด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบแบบเส้นตรงขนานกัน เพราะด้วยลักษณะเฉพาะตัวของสายการประกอบเส้นตรงแบบขนานคือมีสถานีงานอยู่ 2 รูปแบบได้แก่ สถานีงานแยก (Separate Workstation) คือ สถานีงานที่รับผิดชอบเพียงสายการประกอบเดียวและ สถานีงานร่วม (Common Workstation) คือ สถานีงานที่ต้องอาศัยพนักงาน 1 คนเพื่อรับผิดชอบงานจากทั้งสองสายการประกอบ โดยพนักงานจะเริ่มต้นการทำงานในแต่ละรอบการผลิตด้วยการประกอบชิ้นงานบนสายการประกอบแรกจนเสร็จ แล้วหันไปประกอบชิ้นงานบนอีกสายการประกอบ เมื่อเสร็จสิ้นแล้วก็จะหันกลับมาที่สายการประกอบแรกอีกครั้งเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทำงานในรอบถัดไป ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสายการเส้นตรงแบบธรรมดาแล้ว สายการประกอบเส้นตรงขนานสามารถสร้างประโยชน์ให้กับสถานประกอบการได้หลายประการเช่น ลดจำนวนสถานีงาน, ลดรอบเวลาดำเนินการ, ลดจำนวนแรงงาน และลดเวลาสูญเปล่า (Gökçen et al., 2006) รวมถึงอาจจะเพิ่มประสิทธ์ภาพและผลิตภาพของสถานประกอบการที่มีการ

จ้างคนพิการเข้าไปทำงาน อย่างไรก็ตามในการจัดวางสายการประกอบแบบขนานอาจจาเป็นต้องสร้างสถานีงานว่างให้ชิ้นงานผ่านโดยไม่มีการประกอบใดๆ เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดต้นทุนเพิ่มเติมในด้านพื้นที่และอุปกรณ์ ดังนั้นสายการประกอบประเภทนี้เหมาะกับการใช้เพื่อผลิตสินค้าที่มีขนาดเล็กและมีระบบการขนย้ายวัสดุที่มีต้นทุนไม่สูง เช่น โทรศัพท์มือถือ โน้ตบุ๊ค เป็นต้น (Scholl and Boysen, 2009)

นอกจากนี้หลายๆปัญหาในปัจจุบันรวมถึงปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะในงานวิจัยนี้ ที่มักจะมีวัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งมากกว่าสามวัตถุประสงค์และต้องการหาค่าที่ดีที่สุดไปพร้อมๆกัน ซึ่งจะเรียกว่ากันทั่วไปว่าการหาค่าที่ดีที่สุดให้กับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimisation Problems: MaOPs) (He and Yen, 2016) โดยวิธีที่ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหาแบบนี้คือการหาวิธีที่จะช่วยลดจำนวนของวัตถุประสงค์โดยรวมวัตถุประสงค์ที่ขัดแย้งกันเป็นวัตถุประสงค์เดียว (Brockhoff and Zitzler, 2009) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ก็ไม่สามารถใช้ในทางปฏิบัติได้กับหลายปัญหา ต่อมาได้นำวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) ที่พัฒนาโดย Zhang and Li (2007) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาประเภทนี้อย่างแพร่หลายแลมีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งจริงๆแล้วอัลกอริทึม MOEA/D ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Muti- Objective Optimisation Problems: MOPs) และเหมาะกับการแก้ปัญหาที่เป็นแบบ Scalar Optimization

โดยหลักการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D คือจะทำการจำแนกปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากออกเป็นปัญหาย่อยๆ และทำการหาค่าที่ดีสุดใน แต่ละวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆกัน ด้วยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก และพัฒนาคำตอบโดยวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ส่วนการหาสตริงคำตอบแบบมากวัตถุประสงค์นั้นเลือกใช้วิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพราะเหมาะกับการแก้ปัญหาที่เป็นแบบ Nonconvex PF ซึ่งเป็นปัญหาไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimal) เพราะคำตอบอาจติดอยู่ในค่าที่เหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimal) หรือปัญหาที่มีคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Solution) ดังนั้นจึงเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่เหมาะกับการนำมาประยุกต์เพื่อใช้ในแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้เนื่องจากงานวิจัยเป็นปัญหาแบบ Scalar Optimization และเป็นปัญหาที่อาจเกิดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้หรือไม่สามารถหาคำตอบได้

จากที่มาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาวิธีการหาคำตอบแบบเมตาฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 (Type II Problem) โดยวิธีการหาคำตอบแบบเมตาฮิวริสติกที่จะศึกษาและทำการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้คือ 1. วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-

Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) ซึ่งพัฒนาคำตอบโดยวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) และใช้วิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม 2. อัลกอริทึมการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm: COIN) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่นิยมและมีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหาลักษณะนี้ โดยมีแนวคิดหลักคือการหาแนวทางของคำตอบที่ดี (Good) และคำตอบที่ไม่ดี (No Good) ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันเพื่อนำมากำหนดทิศทางการหาคำตอบ โดยทำการสร้างตารางความน่าจะเป็นขึ้นมาเป็นตารางเมทริกซ์แล้วทำการสุ่มเลือกเพื่อมาสร้างประชากรในแต่ละรอบ ซึ่งวิธีการการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่ถูกนำมาใช้ในอัลกอริทึมนี้คือ วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) (ปารเมศ ชุติมา และคณะ, 2552) และสุดท้ายคือ ทำการพัฒนาวิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมีต้นแบบ (A Hybrid Multi-Objective Evolutionary and Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template : AMOEA/D-COIN/WT) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่จะทำการพิจารณามีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ได้แก่ 1. รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (Minimum Cycle Time) 2. จำนวนสถานีน้อยที่สุด (Minimum Station) 3. ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Different Workload Between Workstations) 4. ความไม่เกี่ยวเนื่องกันของขั้นงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Index of Task-Unrelated) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านต่างๆ ตามลำดับความสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการหาคำตอบแบบเมตาฮิวริสติก (Meta heuristic) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การกำหนดขอบเขตที่ใช้ในการวิจัยการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 มีดังนี้

1. วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 มีจำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆ ดังนี้

    1) วัตถุประสงค์ที่หนึ่ง: รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด
    2) วัตถุประสงค์ที่สอง: จำนวนสถานีน้อยที่สุด
    3) วัตถุประสงค์ที่สาม: ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานน้อยที่สุด
    4) วัตถุประสงค์ที่สี่: ความไม่เกี่ยวเนื่องกันของขั้นงานในแต่ละสถานีงานน้อยที่สุด

2. ข้อกำหนดในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานให้กับสายการประกอบมีดังต่อไปนี้

    1) กำหนดให้พนักงานมี 3 ระดับ คือ 1. พนักงานทักษะสูง (High-Skill Worker) 2. พนักงานทักษะปกติ (Medium-Skill Worker) และ 3. พนักงานทักษะต่ำหรือพนักงานที่พิการ (Low-Skill Worker)
    2) ทราบจำนวนพนักงานในแต่ละระดับของทั้ง 2 สายการประกอบ
    3) ทราบจำนวนขั้นงานและความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงานของทุกผลิตภัณฑ์
    4) ทราบเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นงานของพนักงานในแต่ละทักษะ
    5) การกำหนดขั้นงานลงสถานีงานต้องไม่ละเมิดความสัมพันธ์ก่อนหลังของขั้นงานต่างๆ
    6) แต่ละขั้นงานแบ่งแยกไม่ได้ และต้องถูกจัดสรรลงสถานีงานใดเพียงสถานีงานหนึ่ง
    7) ไม่พิจารณาระยะเวลาในการเดินของพนักงาน
    8) มีพนักงานรับผิดชอบจำนวนหนึ่งคนต่อหนึ่งสถานีงาน
    9) ผลรวมของจำนวนพนักงานหรือสถานีงาน ต้องไม่เกินจำนวนที่สายการประกอบกรณีศึกษากำหนดให้
    10) พนักงานหรือสถานีงานต้องได้รับมอบหมายอย่างน้อยหนึ่งขั้นงาน ถ้าไม่อย่างนั้นจะมีลงโทษในแต่ละวัตถุประสงค์ตามที่กำหนด

3. อัลกอริทึมที่ใช้ในการทดลองแก้ปัญหา

    1) วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก(MOEA/D)
    2) อัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN)
    3) วิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมีต้นแบบ (AMOEA/D-COIN/WT)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4. ใช้โปรแกรมภาษา C++ ในการแก้ปัญหา

5. สายการประกอบกรณีศึกษาที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลของปัญหาประเภทนี้ แสดงดังตารางที่ 1.1 และสามารถอธิบายลักษณะของโจทย์ปัญหาได้ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แสดงรายละเอียดของปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม

No.	Problem Size	Line1				Line2				Total W	Worker ratio (High : Medium : Low)
		Problem	W	M	MPS	Problem	W	M	MPS		
1	Small	Buxey 29	6	2	1:3	Sawyer 30	7	2	2:3	13	(4:8:1) , (2:8:3)
			8				10			18	(5:11:2) , (3:11:4)
2		Sawyer 30	7	2	2:3	Mitchell 21	3	3	2:1:3	10	(3:6:1) , (2:6:2)
			10				5			15	(4:9:2) , (3:9:3)
3	Medium	Tonge 70	12	3	2:3:1	Warnecke 58	8	3	2:1:1	20	(6:13:1) , (5:13:2)
			17				12			29	(9:19:1) , (7:19:3)
4		Wee-mag 75	15	3	1:1:4	Warnecke 58	7	3	2:1:1	22	(7:14:1) , (6:14:2)
			22				10			32	(9:21:2) , (8:21:3)
5	Large	Arcus 83	15	3	2:1:2	Arcus 111	18	3	1:1:3	33	(10:21:2) , (8:21:4)
			22				26			48	(14:31:3) , (12:31:5)
6		Scholl 297	17	2	1:1	Arcus 83	13	3	2:1:2	30	(9:20:1) , (7:20:3)
			24				19			43	(13:28:2) , (11:28:4)

* W = จำนวนพนักงาน , M = จำนวนรุ่นของผลิตภัณฑ์, Total W = จำนวนพนักงานทั้งหมด

1) โจทย์ปัญหาจะประกอบด้วยโจทย์ 3 ขนาดคือ โจทย์ขนาดเล็ก (1-2) โจทย์ขนาดกลาง (3-4) และโจทย์ขนาดใหญ่ (5-6) ซึ่งแบ่งตามจำนวนของขั้นงานทั้งหมด

2) ในโจทย์ปัญหาที่มีขนาดเท่ากันก็จะแบ่งให้เห็นความแตกต่าง ด้วยความน่าจะเป็นของขั้นงานงานที่พนักงานทักษะต่ำไม่สามารถทำได้โดย โจทย์ที่ 1, 3 และ 5 จะมีค่าเท่ากับ 0.1 และ โจทย์ที่ 2, 4 และ 6 จะมีค่าเท่ากับ 0.2

3) สุดท้ายจะจำแนกปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย ด้วยจำนวนพนักงานและสัดส่วนของพนักงาน คือ High : Medium : Low โดย อัตราส่วนของโจทย์ขนาดเล็ก จะประกอบไปด้วย (30:60:10) , (20:60:20) โดยทำการปรับค่าระหว่างพนักงานประเภท High และLow และให้ค่าMedium คงที่ อัตราส่วนของโจทย์ขนาดกลางและใหญ่ จะประกอบไปด้วย (30:65:5) , (25:65:10) โดยทำการปรับค่าระหว่างพนักงานประเภท High และ Low และให้ค่า Medium คงที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
2. ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม C++ ที่ใช้ในการเขียนอัลกอริทึม
3. สร้างอัลกอริทึมต่างๆที่จะทำการศึกษา เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยโปรแกรม C++
4. ทดสอบและแก้ไขปัญหาของอัลกอริทึมที่เขียนขึ้นให้มีความถูกต้อง
5. กำหนดพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมต่างๆ โดยการออกแบบการทดลองและทดสอบผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab
6. นำอัลกอริทึมต่างๆที่กำหนดพารามิเตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้วมาแก้ปัญหา ตามขอบเขตที่กำหนดพร้อมทั้งประเมินผลด้วยตัวชี้วัดที่กำหนด
7. สรุปผลและวิเคราะห์ผลตามวัตถุประสงค์หลัก
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ของงานวิจัยนี้

ประโยชน์ที่ได้รับหลังจากที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยมีดังนี้

1. สามารถลดความยุ่งยากและลดระยะเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

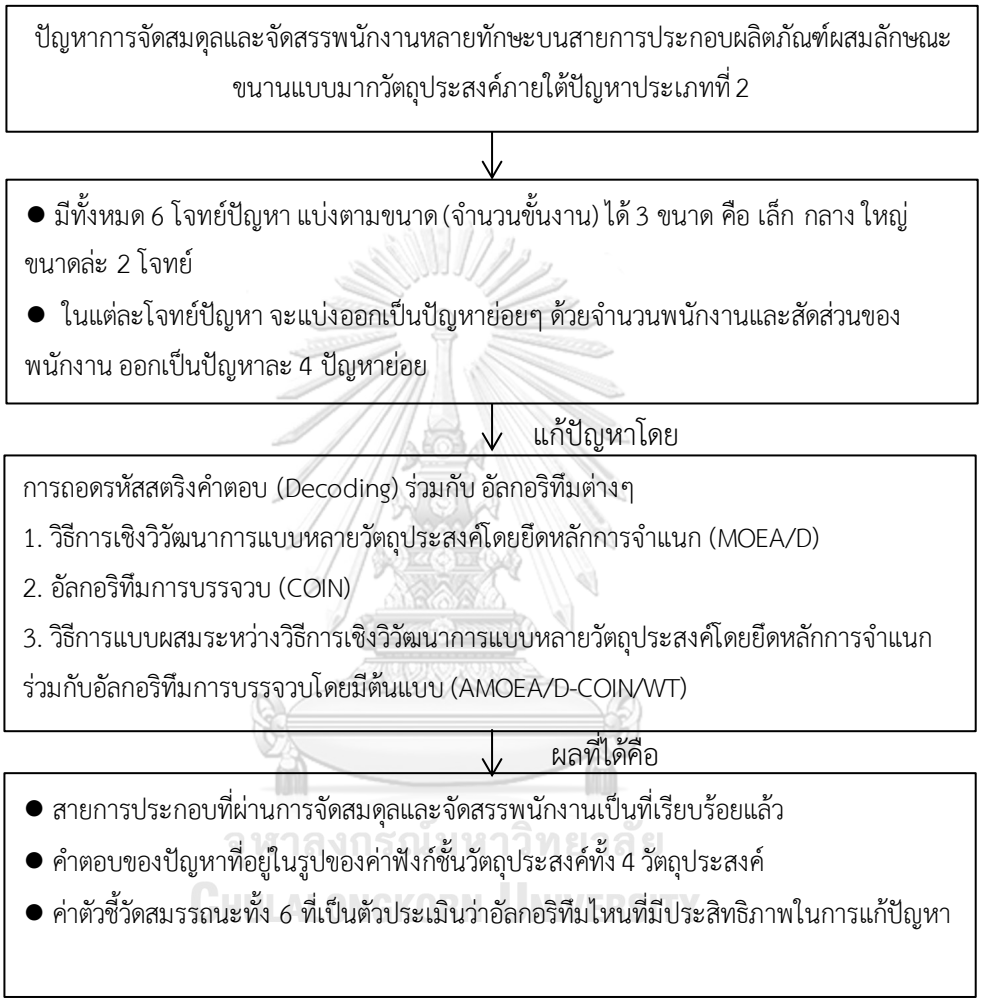
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. สามารถนำวิธีการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพสายการประกอบในอุตสาหกรรมจริง เพื่อเพิ่มโอกาสที่คนพิการจะถูกรับเข้าทำงาน
3. สามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการจัดสมดุลวิธีอื่นๆ ต่อไปในอนาคต

1.6 สรุปภาพรวมงานวิจัย

ทำการทดลองแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 (Type II Problem)

โดยใช้อัลกอริทึมต่างๆร่วมกับวิธีการถอดรหัส ซึ่งผลที่จะได้ก็คือสายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานเป็นที่เรียบร้อยแล้วพร้อมกับค่าวัตถุประสงค์ทั้งที่ 4 วัตถุประสงค์ รวมถึงค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึม ตามรูปที่



รูปที่ 1.1 แผนผังภาพรวมงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีของการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการที่ในการดำเนินการซึ่งครอบคลุมเนื้อหาส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในงานวิจัยจะประกอบไปด้วยเนื้อหาส่วนต่างๆ ดังนี้

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสายการประกอบ

สายการประกอบ (Assembly Line) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow-Oriented Production System) โดยจะประกอบไปด้วยสถานีงานต่างๆ ที่ถูกเชื่อมต่อกันไว้ด้วยสายพานหรือระบบที่สามารถขนย้ายวัสดุ ซึ่งคอยทำหน้าที่เคลื่อนย้ายชิ้นงานที่ถูกประกอบจากสถานีงานหนึ่งไปยังอีกสถานีงานหนึ่งด้วยความเร็วคงที่หรือจะเรียกรอบเวลาดำเนินการ (Cycle Time) โดยในแต่ละสถานีงานนั้นพนักงานหรือหุ่นยนต์จะทำหน้าที่ประกอบชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบในแต่ละสถานีงานเข้าด้วยกันตามขั้นงานของสถานีงานนั้นๆ จนกระทั่งได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จุดปลายสุดของสายการประกอบ (Scholl and Boysen, 2009)

เมื่อสายการประกอบได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เพื่อผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งสินค้าอุปโภคบริโภค จากความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ทำให้สายการประกอบที่มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำไปใช้งานได้นั้นจำเป็นต้องมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความหลากหลายของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ดังนั้นในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงการจัดประเภทปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ตามคุณสมบัติและสมมติฐานต่างๆ ของสายการประกอบที่ถูกนำมาใช้ (Ghosh and Gagnon, 1989, Shtub and Dar-El, 1989) ดังนี้

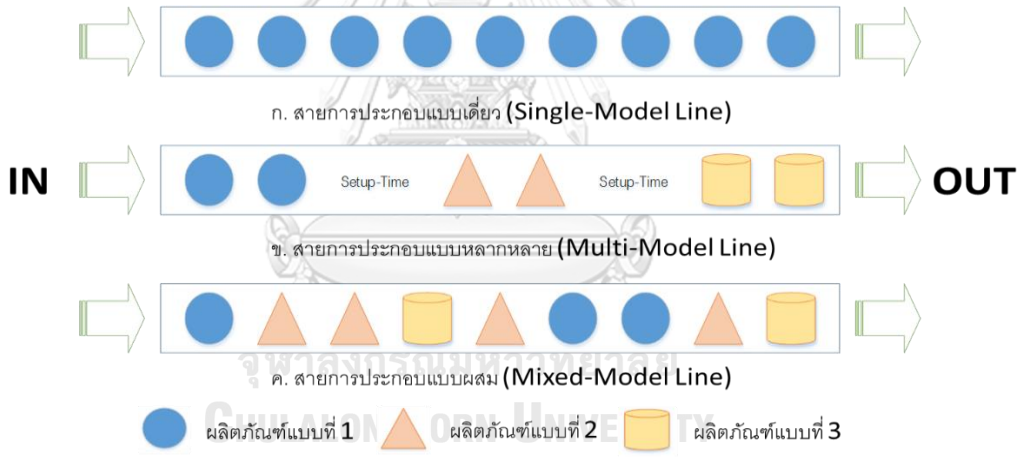
2.1.1.1 จำนวนรุ่น (Model) ของผลิตภัณฑ์ในสายการประกอบ

หากพิจารณาสายการประกอบตามจำนวนรุ่น (Model) ผลิตภัณฑ์ในสายการประกอบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. สายการประกอบรุ่นเดียว (Single-Model Line) : สายการประกอบประเภทนี้จะผลิตผลิตภัณฑ์เพียงรุ่น (Model) เดียวเท่านั้น ซึ่งทำให้ภาระงานบนทุกสถานีงานมีค่าคงที่ ดังรูปที่ 2.1 ก

2. สายการประกอบแบบหลากหลาย (Multi-Model Line) : สายการประกอบประเภทนี้จะผลิตผลิตภัณฑ์หลายแบบที่มีลักษณะค่อนข้างคล้ายกัน สามารถผลิตบนสายการผลิตเดียวกันได้ โดยจะผลิตแต่ละรุ่นเป็นชุด (Batch) ในแต่ละรอบที่จะเปลี่ยนรุ่นของผลิตภัณฑ์จะต้องมีเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ (Set-Up Time) ทุกครั้ง ดังรูปที่ 2.1 ข

3. สายการประกอบแบบผสม (Mixed-Model Line): สายการประกอบประเภทนี้จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบพื้นฐานเหมือนกัน จะแตกต่างกันในส่วนของตัวเลือก (Option) หรืออุปกรณ์เสริมที่จะนำมาประกอบเพิ่มเติมเท่านั้น เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของกระบวนการผลิต จึงทำให้ผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปน โดยระหว่างการผลิตจะไม่มีเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์บนสายการประกอบ ดังรูปที่ 2.1 ค



รูปที่ 2.1 สายการประกอบประเภทต่างๆ แบ่งตามจำนวนรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต

2.1.1.2 ความแปรผันของเวลาดำเนินงาน

หากพิจารณาประเภทปัญหาการจัดสมดุลการผลิตโดยความแปรผันของเวลาดำเนินงาน ได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

1. เวลาดำเนินการเชิงกำหนด (Deterministic): การจัดสมดุลสายการประกอบส่วนมากจะกำหนดว่าเวลาของขั้นงานเป็นข้อมูลเชิงกำหนดหรือมีค่าคงที่ ซึ่งจะหมายความว่าความแปรผันของเวลาขั้นงาน (Task Time) มีค่าน้อยมากหรือไม่มีเลย ดังนั้นข้อกำหนดดังกล่าวนี้จะมี

ความเหมาะสมก็ต่อเมื่อคนงานจะต้องได้รับการฝึกอบรมเป็นอย่างดี เพียบพร้อมด้วยคุณสมบัติที่ต้องการ มีภาระงานที่เหมาะสม และมีแรงจูงใจในการทำงานสูง

2. เวลาดำเนินการเชิงเฟ้นสุ่ม (Stochastic): คือเวลาของแต่ละขั้นงานไม่คงที่โดยเกิดจากความผันแปรของเวลาดำเนินงานซึ่งมีผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น เครื่องจักรเสีย สูญเสียแรงจูงใจงานที่ซับซ้อน สิ่งแวดล้อมในการทำงาน และ ทักษะของพนักงาน (Özcan, 2010)

3. เวลาดำเนินการเชิงพลวัต (Dynamic): ความผันแปรอีกลักษณะหนึ่งที่ทำให้เวลาดำเนินงานมีค่าลดลงอย่างเป็นระบบอันเกิดจากเส้นโค้งการเรียนรู้ (Learning Curve) หรือการปรับปรุงกระบวนการทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการติดตั้งสายการประกอบใหม่ขึ้น คนงานจะใช้เวลาทำงานมากกว่าหลังจากที่เขาเกิดความคุ้นเคยกับงานที่ต้องทำแล้ว โดยที่ระดับและอัตราของการเรียนรู้จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของงาน ความยืดหยุ่นของระบบประกอบ และระดับความสามารถของคนงาน (Chakravarty, 1988)

2.1.1.3 ข้อจำกัดในการมอบหมายงาน

ประเภทของข้อจำกัดในการมอบหมายงานในสายการประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. ข้อจำกัดเกี่ยวกับขั้นงาน เกิดขึ้นเมื่อขั้นงานตั้งแต่สองขั้นงานขึ้นไปต้องทำบนสถานีงานเดียวกัน หรือส่วนของสายการประกอบส่วนเดียวกัน ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าขั้นงานเหล่านี้ต้องการสภาวะการทำงานที่เหมือนกัน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน เป็นต้น แต่ก็มีบางครั้งเหมือนกันที่ขั้นงานเหล่านี้ไม่สามารถที่จะทำบนสถานีงานเดียวกัน หรือส่วนของสายการประกอบส่วนเดียวกันได้ เช่น การพ่นสีกับการเจาะชิ้นงาน เป็นต้น บ่อยครั้งที่เราเรียกข้อจำกัดดังกล่าวนี้ว่าข้อจำกัดด้านการจัดเขต (Zoning Constraint)

2. ข้อจำกัดเกี่ยวกับสถานีงาน เกิดขึ้นเมื่อเครื่องจักรหรือเครื่องมือชนิดพิเศษที่ต้องใช้ในการทำงานถูกติดตั้งไว้เฉพาะในสถานีงานเพียงแห่งเดียวหรือกลุ่มของสถานีงานกลุ่มเล็กๆ เท่านั้น และเครื่องจักรหรือเครื่องมือเหล่านี้ไม่สามารถเคลื่อนย้ายออกจากสถานีงานได้ เนื่องจากจะมีค่าใช้จ่ายในการขนย้ายค่อนข้างสูง ดังนั้น ขั้นงานที่ต้องใช้เครื่องจักรหรือเครื่องมือเหล่านี้จึงต้องถูกกำหนดให้ทำบนสถานีงานดังกล่าวนี้เท่านั้น ในทำนองเดียวกัน ข้อจำกัดเช่นนี้อาจจะเกิดขึ้นในกรณีที่วัตถุดิบที่ต้องใช้ในการประกอบถูกจัดเก็บไว้ในบางพื้นที่ของสายการประกอบเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่คลังพัสดุของโรงงาน

3. ข้อจำกัดเกี่ยวกับตำแหน่ง เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก เช่น รถยนต์ เครื่องซักผ้า ตู้แช่แข็ง เป็นต้น ดังนั้น การทำขั้นงานบนชิ้นงานจะต้องเกิดขึ้นในตำแหน่ง (ทิศทาง) ที่เหมาะสม เช่น ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา เป็นต้น เนื่องจากขนาดและน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

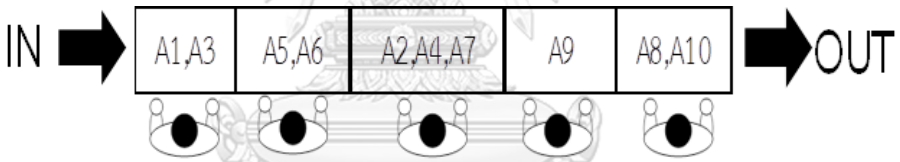
ของชิ้นงาน ทำให้คนงานไม่สามารถที่จะหมุนชิ้นงานได้บ่อยครั้ง ดังนั้น เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงาน จึงจำเป็นที่ต้องจัดกลุ่มขั้นงานที่ต้องทำในทิศทางเดียวกันให้รวมกันอยู่ในส่วนหนึ่งของสายการประกอบ สำหรับชิ้นงานที่ไม่สามารถหมุนได้เลยนั้น

4. ข้อจำกัดเกี่ยวกับคนงาน: แต่ละขั้นงานอาจจะต้องการความชำนาญของคนงานที่แตกต่างกัน ดังนั้น คนงานจึงควรได้รับการคัดเลือกเป็นอย่างดี เพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะทำงานที่ได้รับมอบหมายอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นไปได้ว่าขั้นงานประเภทดังกล่าวนี้จะถูกรวมกันอยู่ในสถานีงานเพียงไม่กี่แห่งเท่านั้น เพื่อลดค่าจ้างแรงงานของคนงานที่มีฝีมือลง

2.1.1.4 รูปแบบของสายการประกอบ

สายการประกอบสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ตามรูปร่างของสายการประกอบได้ดังนี้

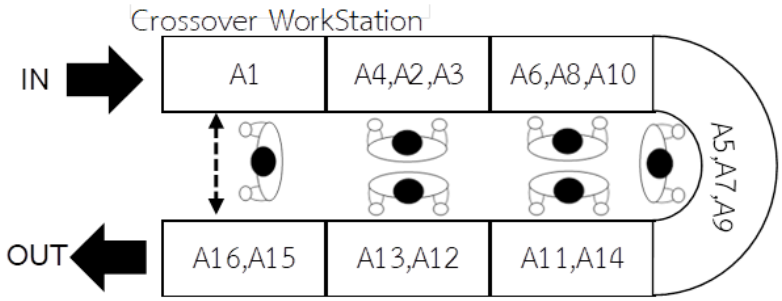
1. รูปแบบเส้นตรง (Straight Line) : สายการประกอบประเภทนี้บางครั้งเรียกว่า สายการประกอบอนุกรม (Serial Line) เป็นสายการประกอบแบบดั้งเดิม ที่ผลิตภัณฑ์จะถูกประกอบในแต่ละสถานีงานที่จัดเรียงต่อกันเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สายการประกอบเส้นตรง

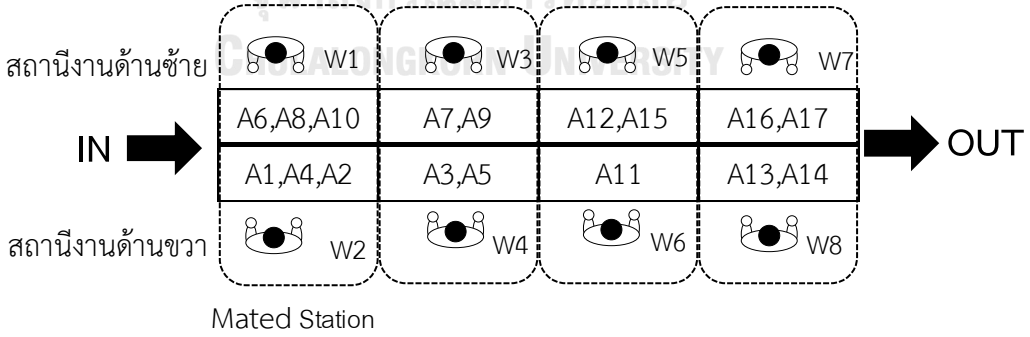
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. รูปแบบรูปตัวยู (U-Shaped Line) : สายการประกอบประเภทนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) เพื่อปรับปรุงข้อเสียที่เกิดขึ้นบนสายการประกอบเส้นตรง เช่น การทำงานซ้ำเดิม ความไม่ยืดหยุ่นของระบบ ความไม่สมดุลของภาระงาน เป็นต้น (Monden, 1998) สายการประกอบรูปตัวยูนี้จะรวบเอาปลายทั้งสองด้านของสายการประกอบมาวางอยู่ใกล้กันเป็นรูปตัวยู ตามรูปที่ 2.3 ซึ่งทำให้แต่ละคนงานสามารถถูกมอบหมายให้ทำงานกับทั้งสองด้านของสายการประกอบรูปตัวยูได้ เช่น คนงานที่อยู่ในสถานีงาน 1 จะรับผิดชอบทำขั้นงานด้านหน้า (Front) และขั้นงานด้านหลัง (Back) ของสายการประกอบ ซึ่งเราจะเรียกสถานีงานที่ 1 สถานีงานจุดข้าม (Crossover Station)



รูปที่ 2.3 สายการประกอบรูปตัวยู

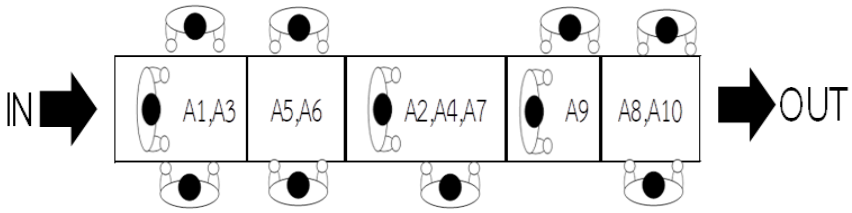
3. รูปแบบสองด้าน (Two-Sided Line) : สายการประกอบประเภทนี้เหมาะสำหรับการประกอบผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก เช่น รถยนต์ รถกระบะ เป็นต้น ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องมีจุดทำงานจากทั้งสองด้านของชิ้นงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ดังนั้นแทนที่จะใช้เพียงสถานีงานเดียวเหมือนอย่างในกรณีของสายการประกอบเส้นตรง สายการประกอบสองด้านจะใช้สถานีงานเป็นคู่ ที่วางอยู่ในตำแหน่งตรงกันข้ามกัน เรียกว่า สถานีงานจับคู่ (Mated Station) ทางด้านซ้ายและด้านขวาของสายการประกอบ เพื่อทำงานไปพร้อมกันบนชิ้นงานเดียวกัน ซึ่งขั้นงานบางขั้นจะต้องทำโดยสถานีงานที่อยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาเท่านั้น แต่ก็มีบางขั้นงานที่สามารถทำได้ด้านใดก็ได้ นอกจากนั้นบางขั้นงานอาจจะเป็นคู่แฝดซึ่งกันและกัน เช่น การติดตั้งประตูด้านซ้ายและด้านขวาของรถยนต์ ซึ่งขั้นงานดังกล่าวนี้ควรจะติดตั้งโดยสถานีงานที่อยู่ในคู่เดียวกัน เป็นต้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สายการประกอบสองด้าน

4. รูปแบบหลายคนงาน (Multi-manned Lines) : สายการประกอบประเภทนี้เหมาะสำหรับการประกอบผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่มากและมีน้ำหนักมาก เช่น รถบัส รถแทรกเตอร์ เป็นต้น สายการประกอบหลายคนงานจะยอมให้ใช้คนงานมากกว่า 1 คนทำงานในแต่ละสถานีงานในเวลา

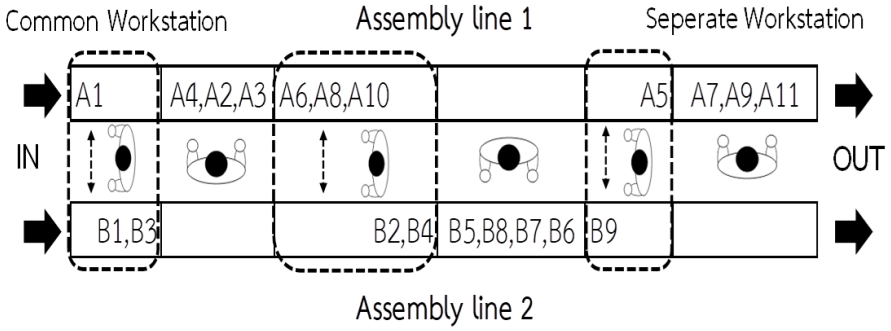
เดียวกัน โดยคนงานแต่ละคนจะได้รับมอบหมายให้ทำขั้นงานที่แตกต่างกันไปพร้อมกันบนชิ้นงานเดียวกัน ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สายการประกอบแบบหลายคนงาน

5. สายการประกอบขนาน (Parallel Assembly Line) หมายถึง ระบบผลิตที่ประกอบด้วยสายการประกอบเส้นตรงตั้งแต่ 2 สายการประกอบขึ้นไป ที่ถูกนำมาจัดเรียงในแนวขนานกัน จากรูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างการนำสายการประกอบเส้นตรง 2 มาจักเรียงในแนวขนานกัน ซึ่งประเภทของสถานีงานในสายการประกอบขนานจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1. สถานีงานแยก (Separate Workstation) หมายถึงสถานีงานที่ประกอบด้วยขั้นงานของสายการประกอบเดียว 2. สถานีงานร่วม (Common Workstation) หมายถึงสถานีงานที่ประกอบด้วยขั้นงานของทั้งสองสายการประกอบ และสายการประกอบขนานสามารถแบ่งย่อยลงไปอีกเป็น 2 ประเภท ตามความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นและรอบเวลาที่ใช้ คือ 1. ประเภทเฉื่อย (Passive) หมายถึงสายการประกอบที่นำมาขนานกัน จะผลิตผลิตภัณฑ์แบบเดียวกันหมด และแต่ละสายจะใช้รอบเวลาค่าเดียวกัน 2. ประเภทคล่องแคล่ว (Active) หมายถึงสายการประกอบที่นำมาขนานกัน จะผลิตผลิตภัณฑ์แบบที่ไม่เหมือนกัน และแต่ละสายอาจจะใช้รอบเวลาค่าเดียวกันหรือค่าต่างกันก็ได้ (Gökçen et al. 2006)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.6 สายการประกอบขนาน

2.1.2 ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ปัญหาประเภทนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานในด้านของลักษณะของสายการประกอบ และส่วนที่ต่างออกไป คือโจทย์ปัญหาที่นำมาวิจัย สตริงคำตอบ การถอดรหัสสตริงคำตอบ

2.1.2.1 ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน

สายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบขนาน จะมีลักษณะการจัดวางในรูปของสถานี (Station) ที่จัดเรียงกันอย่างต่อเนื่อง (Scholl and Boysen, 2009) โดยในแต่ละสถานีอาจประกอบด้วยสถานีงานแยก (Separate Workstation) ที่ถูกจัดสรรขั้นงานจากเพียงสายการประกอบเดียว อย่างมาก 2 สถานีงาน แต่ต้องเป็นสถานีแยกที่อยู่คนละสายการประกอบ หรือสถานีงานร่วม (Common Workstation) ที่ถูกจัดสรรขั้นงานจากทั้งสองสายการประกอบ

เนื่องจากแต่ละสายการประกอบมีการผลิตผลิตภัณฑ์แบบผสม ซึ่งสินค้าแต่ละรุ่นก็มีแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในการจัดสมดุลจะอยู่ในรูปของแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) ซึ่งเป็นแผนภาพตัวแทนของสายการประกอบที่สามารถใช้สื่อถึงแผนภาพของสินค้าทุกรุ่นได้ในแผนภาพเดียว และเนื่องจากเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นงานอาจแตกต่างกันไปตามรุ่นของสินค้า เวลาขั้นงานที่ใช้ในการจัดสมดุลจึงกำหนดให้อยู่ในรูปของเวลาขั้นงานร่วม (Combined Task Time) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักมาจากเวลาขั้นงานของสินค้าทุกรุ่น โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้(Sparling and Miltenburg, 1998)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

M คือ จำนวนรุ่นทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการผลิตในปัญหาที่กำลังศึกษา

D_m คือ จำนวนของผลิตภัณฑ์รุ่น m ที่ต้องการผลิต $(\mathrm{m}=1, 2, 3, \ldots, \mathrm{M})$

t_{im} คือ เวลาขั้นงาน i $(i = 1, 2, 3, \ldots, N)$ ของผลิตภัณฑ์รุ่น m

$q_m = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^{M} D_m}$ คือ สัดส่วนจำนวนผลิตภัณฑ์รุ่น m ที่จะทำการผลิตเทียบกับจำนวนผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตทั้งหมด

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

2.1.2.2 ปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ในงานวิจัยจะเป็นปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ดังนั้นการนำ

โจทย์ปัญหาตัวอย่างมาใช้ นั้นต้องมีปรับเพื่อประยุกต์ให้เข้ากับปัญหาที่กำลังจะวิจัย โดยหนึ่งขั้นงานจะประกอบด้วยเวลาของพนักงาน 3 ระดับ คือ ทักษะสูง ทักษะปกติ และทักษะต่ำ ซึ่งเวลาที่โจทย์ปัญหาตัวอย่างให้มาผู้วิจัยจะกำหนดให้เป็นเวลาของพนักงานทักษะปกติ ส่วนพนักงานทักษะสูงนั้นจะมีบางขั้นงานที่สามารถทำได้เร็วกว่าหรือใช้เวลาในการทำน้อยกว่าพนักงานทักษะปกติ แต่ในพนักงานทักษะต่ำนั้นจะมีบางขั้นงานที่ทำได้ช้ากว่าหรือใช้เวลาในการทำมากกว่าพนักงานทักษะปกติและบางขั้นงานไม่สามารถทำได้เลย แสดงตามตารางที่ 2.1 ในตารางเป็นโจทย์ปัญหา Jackson จำนวนขั้นงานทั้งหมด 11 ขั้นงาน ซึ่งจะเห็นได้ในขั้นงานที่ 3 นั้น พนักงานทักษะสูงนั้นสามารถทำงานได้เร็วกว่าพนักงานทักษะปกติโดยใช้เวลาแค่ 4 วินาที ส่วนพนักงานทักษะปกติใช้เวลา 5 วินาที ส่วนพนักงานทักษะต่ำนั้นไม่สามารถทำขั้นงานนี้ได้เลย

ตารางที่ 2.1 เวลาในแต่ละขั้นงานของพนักงานในแต่ละทักษะของโจทย์ปัญหา Jackson 11 Task

Task	Task Time (sec)	Modified Task Time		
	Jackson Problem	High	Medium	Low
1	6	5	6	8
2	2	2	2	3
3	5	4	5	-
4	7	6	7	-
5	1	1	1	3
6	2	2	2	4
7	3	3	3	5
8	6	4	6	7
9	5	5	5	7
10	5	4	5	6
11	4	3	4	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.2.3 ลักษณะของสตริงคำตอบและการถอดรหัสสตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

สตริงคำตอบ ที่ปรากฏในบทความนี้จะอยู่ในรูปของสตริงที่ลำดับความสำคัญซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 สตริงคำตอบย่อย คือ สตริงคำตอบของขั้นงาน และสตริงคำตอบของพนักงาน ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3 โดยแต่ละสตริงคำตอบของขั้นงานและของพนักงานนั้นจะมีลำดับความสำคัญที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งค่าน้อยจะมีโอกาสถูกจัดสรรก่อน

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสตริงคำตอบของขั้นงาน

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

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสตริงคำตอบของพนักงาน

Worker id	H	H	M	M	M	L
Worker priority	6	3	2	1	4	5

ในส่วนของขั้นตอนถอดรหัสสตริงคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานที่มากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 มี 4 ขั้นตอนหลักๆดังนี้ (Zhang et al., 2008)

1. การรวมรุ่นของผลิตภัณฑ์

   1) นำแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของแต่ละผลิตภัณฑ์ มาทำให้อยู่ในรูปของแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram)

   2) คำนวณหาเวลาขั้นงานร่วม (Combined Task Time) ในแต่ละขั้นงาน

2. การกำหนดลำดับในการจัดสรรขั้นงานและพนักงาน

   1) กำหนดลำดับความสำคัญของขั้นงานและของพนักงาน โดยวิธีเมตาฮิวริสติก

   2) สร้างลำดับของงานจากลำดับความสำคัญและลำดับก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์

   3) สร้างลำดับของพนักงานที่จัดสรรลงสถานีงานจากลำดับความสำคัญของพนักงาน

3. การหารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม พร้อมทั้งหาค่าเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint Vector)

   1) คำนวณหาค่าขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการ (lower bound) และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ (upper bound)

   2) หารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม โดย วิธี Bisection Searching

   3) ได้รับเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint Vector) เพื่อใช้ทำการแบ่งขั้นงาน

4. กำหนดผู้ปฏิบัติงานและขั้นงานลงในแต่ละสถานีงาน

   1) กำหนดผู้ปฏิบัติงานในแต่ละสถานีตามลำดับความสำคัญของพนักงาน

   2) กำหนดขั้นงานลงในแต่ละสถานีโดยการถอดรหัสเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint vector)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3 วัตถุประสงค์ในการจัดสมดุล

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน มีรายละเอียดดังนี้

1. วัตถุประสงค์ที่ 1: รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (Minimum Cycle Time)เพื่อให้สามารถประกอบผลิตภัณฑ์ต่อชิ้นได้เร็วที่สุด โดยมีค่าเท่ากับเวลารวมของขั้นงานในแต่ละสถานีงาน (Total Time of Each Workstation : TT_k) ที่มีค่ามากที่สุด ตามสมการที่ 2.1 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ด้านประสิทธิภาพของสายการประกอบที่สำคัญที่สุดในการจัดสมดุลสายการประกอบภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

$$f_1(X) = Minimum\ C_T = \max_{1 \le k \le Nw} \{ TT_k \} \qquad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

k คือ สัญลักษณ์กำหนดสถานีงาน

2. วัตถุประสงค์ที่ 2: จำนวนสถานีน้อยที่สุด (Minimum Station)สายการประกอบลักณะขนานหลายๆเส้นที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากันอาจมีความยาวที่ไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งจะแปรผันตรงกับจำนวนสถานีบนสายการประกอบ (Scholl and Boysen, 2009) ดังนั้นจึงกำหนดให้มีวัตถุประสงค์ในการทำให้สายการประกอบมีจำนวนสถานี (Number of station: N_S) น้อยที่สุด ตามสมการที่ 2.2 ซึ่งจะทำให้สายการประกอบที่ได้มีขนาดสั้นที่สุด หรือทำให้มีการสูญเสียพื้นที่ใช้สอยน้อยที่สุดนั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$f_2(X) = Minimum\ Station = N_S \qquad \text{สมการที่ 2.2}$$

แต่ในบางคำตอบที่ออกมานั้นอาจใช้จำนวนพนักงานที่น้อยกว่าที่กำหนด คือเกิดจากสถานีงานท้ายๆไม่มีการจัดสรรขั้นงาน ทำให้ต้องมีดัดแปลงการคำนวณจำนวนสถานี โดยคิดจากจำนวนสถานีที่จัดได้จริงรวมกับจำนวนสถานีงานที่ไม่ได้ใช้งาน (Number of unused stations : N_{un}) ตามสมการที่ 2.3

$$f_2(X) = Minimum\ Station = N_S + N_{un} \qquad \text{สมการที่ 2.3}$$

3. วัตถุประสงค์ที่ 3: ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Different Workload Between Workstations) คือการพยายามทำให้ความแตกต่างของภาระงานที่กระจายอยู่ในแต่ละสถานีงานมีค่าต่ำที่สุดนั้น หากมองอีกมุมหนึ่งก็คือการพยายามทำให้เวลาสูญเปล่า (Idle Time) ของแต่ละสถานีงานมีการกระจายตัวแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) เท่าที่จะทำได้ โดยประโยชน์ที่ได้รับนั้นมีอยู่หลายประการ เช่น อัตราการผลิตสูงขึ้น ความแออัดของสายการประกอบลดลง อีกทั้งยังทำให้พนักงานแต่ละคนได้รับมอบหมายงานในปริมาณที่เท่าเทียมกัน เป็นต้น (Kim et al., 2000) ซึ่งจะชี้วัดโดยความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน (Balancing Workload Between Workstations: B_b) มีค่าน้อยที่สุดทั้งนี้ B_b จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า B_b ยิ่งมีค่าต่ำจะยิ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายภาระงานระหว่างสถานีงานมีความสมดุล

$$f_3(X) = Minimise\ B_b = \frac{N_W}{N_W - 1} \sum_{k=1}^{N_W} \sum_{b=1}^{2} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_W} \right)^2 \qquad \text{สมการที่ 2.4}$$

แต่ในบางคำตอบที่ออกมานั้นอาจใช้จำนวนพนักงานที่น้อยกว่าที่กำหนด คือเกิดจากสถานีงานท้ายๆไม่มีการจัดสรรขั้นงาน ทำให้ต้องดัดแปลงการคำนวณตามสมการที่ 2.5

$$f_3(X) = Minimise\ B_b = \frac{N_W}{N_u - 1} \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{2} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u} \right)^2 \qquad \text{สมการที่ 2.5}$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนสถานีงานทั้งหมด

N_u คือ จำนวนสถานีงานที่ถูกจัดสรรงาน

k คือ สัญลักษณ์กำหนดสถานีงาน

b คือ สัญลักษณ์กำหนดประเภทของสถานี

1 คือ สถานีงานร่วม

2 คือ สถานีงานแยก

S_{kb} คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาการผลิตร่วม (CCT) กับเวลาขั้นงานรวมที่สถานีงานที่ k ซึ่งเป็นสถานีงานประเภท b

TAD คือ ผลรวมค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ของทุกสถานีงานถูกจัดสรร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. วัตถุประสงค์ที่ 4: ความไม่เกี่ยวเนื่องกันของขั้นงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Index of Task Unrelated) คือ การทำให้ขั้นงานภายในสถานีงานต่างๆ มีความ

เกี่ยวเนื่องกันมากที่สุด ทำให้พนักงานจะได้รับประโยชน์จากการทำงานเกี่ยวเช่น การเพิ่มพูนทักษะและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น และความพึงพอใจในงาน ถึงแม้ว่าผู้ปฏิบัติงานจะได้รับการอบรมให้มีทักษะในการทำงานที่หลากหลายก็ตาม แต่ย่อมมีทักษะงานหลักที่สามารถทำได้ดีกว่าทักษะรอง

ขั้นงานสองขั้นงานใดๆ จะถือว่ามีความสัมพันธ์กันก็ต่อเมื่อมีการเชื่อมโยงกันโดยตรงในแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลัง (Lee et al., 2001) การทำให้ขั้นงานในสถานีงานมีความสัมพันธ์กันมากๆ ทำได้ด้วยการจัดสรรให้ขั้นงานต่างๆ ในสถานีงานเป็นขั้นงานที่ต้องทำให้เสร็จก่อนหน้าหรือทำตามหลังซึ่งกันและกันโดยตรงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยสามารถประเมินได้ด้วยตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของงาน (Index of Task Relatedness: ITR) ทั้งนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยยิ่งมีค่ามากยิ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของงานที่สูงซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 เมื่อ SN_k คือจำนวนเครือข่ายของขั้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงานที่ ดังนั้นต้องทำการดัดแปลตัวชี้วัด ITR เป็น Index of Task Unrelated ($ITUR$) ดังสมการที่ 2.7 ซึ่งจะทำให้ค่าน้อยๆยิ่งดี

$$ITR = \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \qquad \text{สมการที่ 2.6}$$

$$f_4(X) = Minimise\ ITUR = 1 - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k} \qquad \text{สมการที่ 2.7}$$

แต่ในบางคำตอบที่ออกมานั้นอาจใช้จำนวนพนักงานที่น้อยกว่าที่กำหนด คือเกิดจากสถานีงานท้ายๆไม่มีการจัดสรรขั้นงาน ทำให้ต้องมีดัดแปลงการคำนวณค่า SN_k โดยสถานีงานที่ไม่ถูกใช้งานจะให้มีค่าเท่ากับจำนวนขั้นงานเฉลี่ยในแต่ละสถานีงานหรือเรียกว่า (West Ratio : WR) โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.8 (Dar-El, 1973)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\text{West Ratio} = \frac{n}{N_w} \qquad \text{สมการที่ 2.8}$$

2.1.4 ตัวอย่างการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ในที่นี้จะยกตัวอย่างกรณีสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม A และ B ที่ขนานกันอยู่ที่มีพนักงานอยู่ 3 ระดับ ซึ่งใช้ปัญหาของ Jackson จำนวนขั้นงานทั้งหมด 11 ขั้นงาน และปัญหาของ Jaeschke จำนวนขั้นงานทั้งหมด 9 ขั้นงานตามลำดับ โดยสายการประกอบ A มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นมีสัดส่วนการผลิตเป็น 1:1 และ สายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นมีสัดส่วนการผลิตเป็น 2:1 เพื่อให้เห็นวิธีการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานี

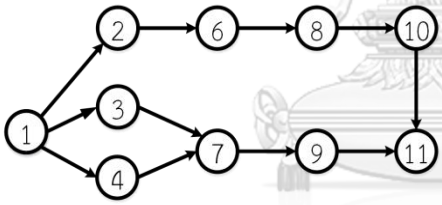
งานบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนานภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 พร้อมทั้งตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กล่าวมาทั้งหมดจำนวน 4 วัตถุประสงค์

2.1.4.1 วิธีการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

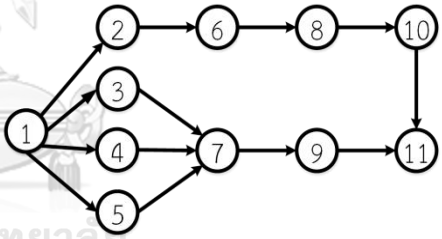
ขั้นตอนในการแก้ปัญหามี 4 ขั้นตอนหลักๆดังนี้

ขั้นที่ 1. ทำการรวมรุ่นของผลิตภัณฑ์ในแต่ละสายการประกอบ โดยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆได้ 2 ขั้นตอนคือ การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม และการคำนวณหาเวลาขั้นงานร่วม

ขั้นที่ 1.1 การสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม โดยการนำแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ในแต่ละสายการประกอบ มาทำให้อยู่ในรูปของแผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วม (Combined Precedence Diagram) ของทั้งผลิตภัณฑ์ A และ B แสดงตามรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ

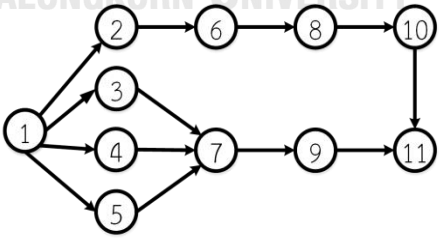


แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A รุ่นที่ 1



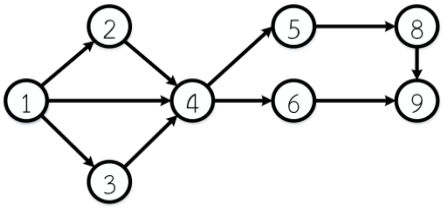
แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A รุ่นที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

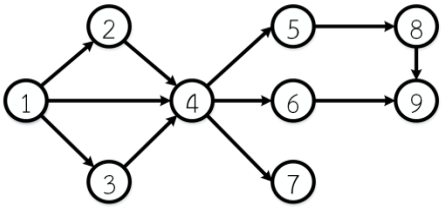


แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ A รุ่นที่ 1 และ รุ่นที่ 2

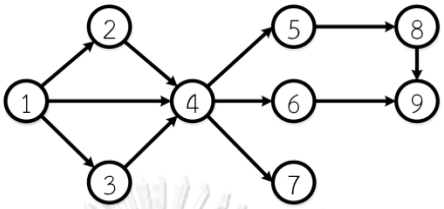
รูปที่ 2.7 แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณบนสายการประกอบ A



แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B รุ่นที่ 1



แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B รุ่นที่ 2



แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังของผลิตภัณฑ์ B รุ่นที่ 1 และ รุ่นที่ 2

รูปที่ 2.8 แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณบนสายการประกอบ B

ขั้นที่ 1.2 การคำนวณหาเวลาขั้นงานร่วม (Combined Task Time) ในแต่ละขั้นงาน โดยคำนวณจากสัดส่วนการผลิตของผลิตภัณฑ์ในแต่ละรุ่น

งานวิจัยนี้จะประกอบด้วย พนักงาน 3 ระดับ ดังนั้นต้องคำนวณเวลาขั้นงานร่วมของพนักงานทั้ง 3 ระดับ ดังนั้นวิธีการคำนวณจะต่างจากวิธี Sparling and Miltenburg (1998) เนื่องจากมีการคำนึงถึงทักษะของพนักงานด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

t_{iwm} คือ เวลาขั้นงาน i โดยพนักงานทักษะ w $(w = 1, 2, 3)$ ของสินค้ารุ่น m

$q_{ml} = \frac{D_m}{\sum_{m=1}^{M} D_m}$ คือ สัดส่วนจำนวนผลิตภัณฑ์รุ่น m ในสายการประกอบที่ l

$t_{iw} = \sum_{m=1}^{M} q_{ml}\, t_{iwm}$ คือ เวลาเฉลี่ยขั้นงาน i โดยพนักงานทักษะ w

ตารางที่ 2.4 เวลาของขั้นงานในแต่ละรุ่นและขั้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบ A และ B

(JACKSON DATA) 11 Task				
ขั้นงาน	Model	Task Time On Assembly Line A (2 Model Production ratio is 1:1)		
		High-skill	Medium-skill	low-skill
1	1	5	6	8
	2	3	4	6
	ร่วม	4	5	7
2	1	2	2	3
	2	4	4	6
	ร่วม	3	3	4.5
3	1	4	5	
	2	4	5	
	ร่วม	4	5	
4	1	6	7	
	2	3	5	
	ร่วม	4.5	6	
5	1	4	4	7
	2	0	0	0
	ร่วม	2	2	3.5
6	1	2	2	4
	2	2	2	5
	ร่วม	2	2	4.5
7	1	3	3	5
	2	4	5	6
	ร่วม	3.5	4	5.5
8	1	4	6	7
	2	1	2	4
	ร่วม	2.5	4	5.5
9	1	5	5	7
	2	3	3	5
	ร่วม	4	4	6
10	1	4	5	6
	2	3	5	7
	ร่วม	3.5	5	6.5
11	1	3	4	5
	2	2	2	4
	ร่วม	2.5	3	4.5

(JAESCHKE DATA) 9 Task				
ขั้นงาน	Model	Task Time On Assembly Line B (2 Model Production ratio is 2:1)		
		High-skill	Medium-skill	low-skill
1	1	4	5	7
	2	5	6	7
	ร่วม	4.333	5.333	7
2	1	3	3	3
	2	3	3	3
	ร่วม	3	3	3
3	1	2	4	
	2	4	4	
	ร่วม	2.667	4	
4	1	3	5	5
	2	3	3	4
	ร่วม	3	4.333	4.667
5	1	2	4	5
	2	2	2	4
	ร่วม	2	3.333	4.667
6	1	4	5	6
	2	3	5	5
	ร่วม	3.667	5	5.667
7	1	2	2.5	4
	2	0	0	0
	ร่วม	1.333	1.667	2.667
8	1	3	4	5
	2	3	5	5
	ร่วม	3	4.333	5
9	1	5	6	6
	2	3	4	5
	ร่วม	4.333	5.333	5.667

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวอย่างการคำนวณ

เวลาขั้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ในสายประกอบ B ขั้นงานที่ 5โดยสายการประกอบ B มีการผลิตสินค้าจำนวน 2 รุ่นมีสัดส่วนการผลิตเป็น 2:1 ทำการ คำนวณได้ดังนี้

$$t_{B5\,1\,1} = 2\,,\, t_{B5\,2\,1} = 4\,,\, t_{B5\,3\,1} = 5\,,\, q_{B_1} = \frac{2}{3}$$

$$t_{B5\,1\,2} = 2\,,\, t_{B5\,2\,2} = 2\,,\, t_{B5\,3\,2} = 4\,,\, q_{B_2} = \frac{1}{3}$$

$$t_{B5\,1} = \sum_{m=1}^{2} q_m\, t_{B5\,1\,m} = \left(q_{B_1} * t_{B5\,1\,1}\right) + \left(q_{B_2} * t_{B5\,1\,2}\right) = \frac{2}{3}(2) + \frac{1}{3}(2) = 2$$

$$t_{B5\,2} = \sum_{m=1}^{2} q_m\, t_{B5\,2\,m} = \left(q_{B_1} * t_{B5\,2\,1}\right) + \left(q_{B_2} * t_{B5\,2\,2}\right) = \frac{2}{3}(4) + \frac{1}{3}(2) = 3.333$$

$$t_{B5\,3} = \sum_{m=1}^{2} q_m\, t_{B5\,3\,m} = \left(q_{B_1} * t_{B5\,3\,1}\right) + \left(q_{B_2} * t_{B5\,3\,2}\right) = \frac{2}{3}(5) + \frac{1}{3}(4) = 4.6667$$

จากที่คำนวณจะเป็นเห็นได้ว่า เวลาขั้นงานร่วมของผลิตภัณฑ์ในสายประกอบ B ขั้นงานที่ 5 ของพนักงานทักษะสูงมีค่าเท่ากับ 2 พนักงานทักษะปกติมีค่าเท่ากับ 3.3333 พนักงานทักษะต่ำมีค่าเท่ากับ 4.6667 ส่วนเวลาขั้นงานร่วมของขั้นงานอื่นๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ขั้นที่ 2. กำหนดลำดับของขั้นงานและพนักงาน โดยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆได้ 3 ขั้นตอน คือการสร้างลำดับความสำคัญของขั้นงานและของพนักงาน การกำหนดลำดับของขั้นงานและการกำหนดลำดับพนักงาน

ขั้นที่ 2.1 สร้างลำดับความสำคัญของขั้นงานในแต่ละขั้นงานและสร้างลำดับความสำคัญของพนักงานในแต่ละคนของทั้ง 2 สายการประกอบ จากวิธีการสร้างสตริงคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมที่ทำการศึกษา

ตัวอย่างนี้จะมีขั้นงานของทั้ง 2 สายการประกอบรวม 20 ขั้นงาน และจำนวนพนักงานทั้งหมด 6 คน ซึ่งการสร้างลำดับความสำคัญนั้นจะทำการกำหนดเลขที่ไม่ซ้ำกันและค่ายิ่งน้องจะสำคัญสุดหรือมีโอกาสได้จัดลงสถานีงานก่อน โดยตัวอย่างนี้ลำดับความสำคัญของขั้นงานจะเป็นเลข 1 ถึง 20 ส่วนลำดับความสำคัญของพนักงานจะป็นเลข 1 ถึง 6 ตามรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าว่าขั้นงานที่ B5 นั้นมีค่าความสำคัญเป็น 1 คือมีโอกาสได้จัดลงสถานีงานก่อน และพนักงานทักษะปกติคนที่2 มีค่าความสำคัญเป็น 1 คือมีโอกาสได้จัดลงสถานี

งานก่อน แต่ขั้นงานที่ A5 นั้นมีค่าความสำคัญเป็น 20 คือมีโอกาสได้จัดลงสถานีงานท้ายสุด และพนักงานทักษะสูงคนที่ 1 มีค่าความสำคัญเป็น 6 คือมีโอกาสได้จัดลงสถานีงานท้ายสุดเช่นกัน

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

ลำดับความสำคัญของขั้นงานจำนวน 20 ขั้นงาน

Worker id	H	H	M	M	M	L
Worker priority	6	3	2	1	4	5

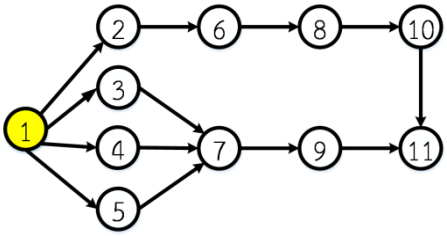
ลำดับความสำคัญของพนักงานจำนวน 6 คน

รูปที่ 2.9 ลำดับความสำคัญของขั้นงานและลำดับความสำคัญของพนักงาน

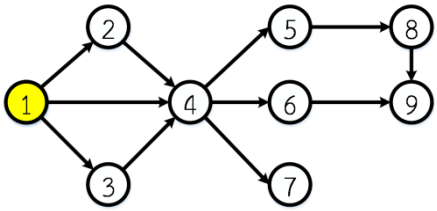
ขั้นที่ 2.2 การกำหนดลำดับของขั้นงาน (Task Sequence : V_2)

ขั้นตอนการกำหนดขั้นงานลำดับที่ 1 เริ่มจากพิจารณาความสัมพันธ์ร่วมของทั้ง 2 สายการประกอบ ว่าขั้นงานใดบ้างที่สามารถจัดลงในลำดับที่ 1 เมื่อพิจารณาแล้วมีเพียงแค่ขั้นงาน A1 และ B1 (ขั้นงานที่เป็นสีเหลือง) ตามรูปที่ 2.10 ต่อจากนั้นทำการพิจารณาลำดับความสำคัญของขั้นงานโดยลำดับความสำคัญของขั้นงาน A1 และ B1 เท่ากับ 3 และ 8 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแล้วเราจึงทำการเลือกขั้นงาน A1 ลงในลำดับที่ 1 เพราะมีความสำคัญลำดับที่ 3 ซึ่งมีความสำคัญมากกว่าขั้นงาน B1

CHULALONGKORN UNIVERSITY



แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ A

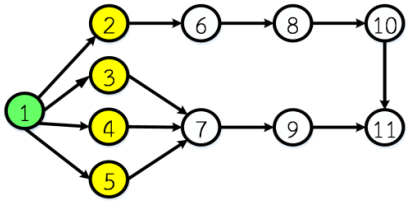


แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ B

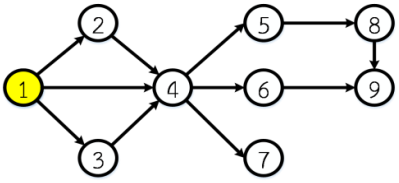
รูปที่ 2.10 ขั้นงานที่สามารถจัดลงในลำดับที่ 1

ต่อมากำหนดขั้นงานลำดับที่ 2 พิจารณาความสัมพันธ์ร่วมของทั้ง 2 สายการประกอบ จะเห็นได้ว่าเมื่อลงขั้น A1 ไปในลำดับที 1 แล้วในสายการประกอบ A จะสามารถ

ทำขั้นงาน A2 A3 A4 และ A5 ได้ ทำให้งานมีขั้นงานที่สามารถจัดลงในลำดับที่ 2 คือ A2 A3 A4 A5 และ B1 ตามรูปที่ 2.11 และทำการพิจารณาลำดับความสำคัญของขั้นงานโดยลำดับความสำคัญของขั้นงาน จากขั้นงานที่กล่าวมาขั้นงานที่มีความสำคัญมากที่สุดคือขั้นงาน B1 จึงทำกำหนดขั้นงาน B1 ลงในลำดับที่2



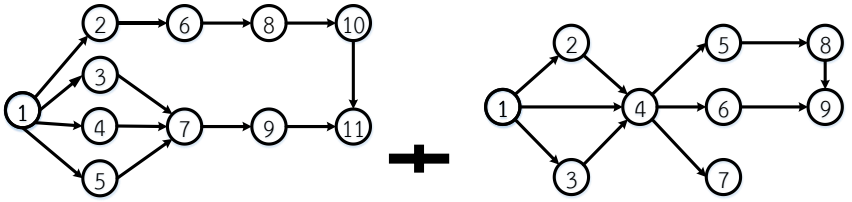
แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ A



แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ B

รูปที่ 2.11 ขั้นงานที่สามารถจัดลงในลำดับที่ 2

ต่อจากนั้นก็ทำตามขั้นตอนดังกล่าวต่อไปเรื่อยๆ จนครบ 20 ลำดับ จะได้ลำดับของขั้นงานที่จัดสรรลงสถานีงานตามรูปที่ 2.12



แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ A แผนภาพความสัมพันธ์ก่อนหลังร่วมของผลิตภัณฑ์ B

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

ลำดับความสำคัญของขั้นงานจำนวน 20 ขั้นงาน

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

ลำดับของขั้นงานที่จะจัดสรรลงสถานีงานจำนวน 20 ขั้น

รูปที่ 2.12 วิธีการกำหนดลำดับของขั้นงานที่จะจัดสรรลงสถานีงาน

ขั้นที่ 2.3 กำหนดลำดับของพนักงานที่จะจัดสรรลงสถานีงาน (Worker Allocation : V_3)

โดยกำหนดจากลำดับความสำคัญของพนักงานจากพนักงานที่มีค่าน้อยไปมาก ซึ่งจะได้ลำดับดังต่อไปนี้คือ พนักงานทักษะปกติ-พนักงานทักษะปกติ-พนักงานทักษะสูง-พนักงานทักษะปกติ-พนักงานทักษะต่ำ-พนักงานทักษะสูง ดังรูปที่ 2.13

Worker id	H	H	M	M	M	L
Worker priority	6	3	2	1	4	5

ลำดับความสำคัญของพนักงานจำนวน 6 คน

Station id	1	2	3	4	5	6
Worker priority	M	M	H	M	L	H

ลำดับของพนักงานที่จะจัดสรรลงสถานีงานจำนวน 6 คน

รูปที่ 2.13 ลำดับของพนักงานที่จัดสรรลงสถานีงาน

ขั้นที่ 3. การหารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม พร้อมทั้งหาค่าเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (breakpoint vector) โดยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆได้ 2 ขั้นตอนคือ การคำนวณค่าขอบเขตล่าง (lower bound) และ ค่าขอบเขตบน (upper bound) ของรอบเวลาดำเนินการ (cycle time) และการหารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (optimal cycle time ด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วง (bisection searching)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 3.1 คำนวณหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ

การหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 ดังต่อไปนี้ (Zhang et al., 2008)

$$C_{LB} = \frac{1}{Nw}\sum_{i=1}^{n} \min_{1\le w\le 3} \{t_{iw}\} \qquad \text{สมการที่ 2.9}$$

$$C_{UB} = \left(\frac{1}{Nw}\sum_{i=1}^{n} \max_{1\le w\le 3} \{t_{iw}\}\right) + \max_{\substack{1\le w\le 3 \\ 1\le i\le n}} \{t_{iw}\} \qquad \text{สมการที่ 2.10}$$

ดังนั้นก่อนที่จะคำนวณหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการต้องหาค่าเวลาที่น้อยที่สุดกับเวลาที่มากที่สุดในแต่ละขั้นงาน (Minimum and maximum times for each task) และเวลาที่มากที่สุดของขั้นงานทั้งหมด (Maximum times for all

task) ตามตารางที่ 2.5 จากนั้นก็จะสามารถหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ โดยค่าขอบเขตล่างของเวลาดำเนินเท่ากับ 10.47 วินาที และค่าขอบเขตบนของเวลาดำเนินการเท่ากับ 23.808 วินาที ตามตัวอย่างการคำนวณข้างล่าง

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

พนักงานมีทั้งมด 6 คนหรือสถานีงานมี 6 สถานี (N_w) = 6 สถานีงาน

ผลรวมของเวลาที่น้อยที่สุดในแต่ละขั้นงาน = 62.83 วินาที

ผลรวมของเวลาที่มากที่สุดในแต่ละขั้นงาน = 100.85 วินาที

เวลาที่มากที่สุดในทุกขั้นงาน = 7 วินาที

$$C_{LB} = \frac{62.83}{6} = 10.47 \text{ วินาที}$$

$$C_{UB} = \frac{100.85}{6} + 7 = 23.808 \text{ วินาที}$$

ตารางที่ 2.5 เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ

Task (i)	Task Time Unit			Minimum times for each task	Maximum times for each task	Maximum times for all task
	H	M	L			
A1	4	5	7	4	7	7
A2	3	3	4.5	3	4.5	
A3	4	5	-	4	5	
A4	4.5	6	-	4.5	6	
A5	2	2	3.5	2	3.5	
A6	2	2	4.5	2	4.5	
A7	3.5	4	5.5	3.5	5.5	
A8	2.5	4	5.5	2.5	5.5	
A9	4	4	6	4	6	
A10	3.5	5	6.5	3.5	6.5	
A11	2.5	3	4.5	2.5	4.5	
B1	4.33	5.33	7	4.33	7	
B2	3	3	3	3	3	
B3	2.67	4	-	2.67	4	
B4	3	4.33	4.67	3	4.67	
B5	2	3.33	4.67	2	4.67	
B6	3.67	5	5.67	3.67	5.67	
B7	1.33	1.67	2.67	1.33	2.67	
B8	3	4.33	5	3	5	
B9	4.33	5.33	5.67	4.33	5.67	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 3.2 การหารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (Optimal Cycle Time) ด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection searching)

คือการหาเวลาดำเนินการโดยการคำนวณหาจุดกึ่งกลางของค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างของรอบเวลาเดินการ และทำการจัดขั้นงานและจัดสรรพนักงานให้กับสถานีงานด้วยรอบเวลาดำเนินการที่คำนวณได้ โดยมีข้อมูลนำเข้าและขั้นตอนการทำดังต่อไปนี้

วิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Searching) จะประกอบด้วยข้อมูลนำเข้า (Input) อยู่ 8 ตัวแปรตามรูปที่ 2.14 คือ 1. จำนวนของสถานีงานทั้งหมด (Total Number of Work Stations : N_w) 2. จำนวนขั้นงานทั้งหมดของทั้ง 2 สายการประกอบ (Total Number of Tasks : n) 3. ลำดับของขั้นงานที่จัดสรรลงสถานีงาน (Task Sequence : V_2) 4. ลำดับของพนักงานที่จัดสรรลงสถานีงาน (Worker Allocation : V_3) 5. ขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการ (Lower Bound of Cycle Time : C_{LB}) 6. ขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ (Upper Bound of Cycle Time : C_{UB}) 7. เวลาของขั้นงาน i ที่ทำโดยพนักงานทักษะ w (Processing Time for Task i by Skilled Worker w : t_{iw}) 8. ค่าความต่างระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการเพื่อหยุดการทำงาน (Difference of Cycle Time : Dif_C) ซึ่งเป็นตัวกำหนดจำนวนรอบการทำงานของวิธีแบ่งครึ่งช่วง โดยถ้าค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดจะหยุดการทำงาน

● Input

N_w : Total No. of Work Stations , n : Total No. of Tasks

V_2 : Task Sequence

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

V_3 : Worker Allocation

Station Id	1	2	3	4	5	6
Worker Priority	M	M	H	M	L	H

C_{LB} : Lower Bound of Cycle Time , C_{UB} : Upper Bound of Cycle Time

t_{iw} : Processing Time for Task i by Skilled Worker w

Dif_C : Difference of Cycle Time

● Output

C_T : Optimal Cycle Time

V_4 : Breakpoint Vector

	1	2	3	4	5	6
Breakpoint Vector	1	4	7	12	16	18

รูปที่ 2.14 ข้อมูลนำเข้าและข้อมูลนำออกของวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Searching)

ขั้นตอนของวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Searching) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ที่นำเสนอในงานวิจัยเป็นดังนี้

<u>การคำนวณรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะในแต่ละรอบของวิธีแบ่งครึ่งช่วง</u>

<u>ขั้นที่ 1</u> คำนวณค่าความต่างระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ (C_{UB}-C_{LB}) ถ้ามีค่ามากกว่าค่าความต่างระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการเพื่อหยุดการทำงาน (Dif_c) ที่กำหนดไว้ทำขั้นที่ 2 - 6 ถ้าน้อยกว่าหยุดการทำงาน และข้ามไปทำนั้นให้ขั้นที่ 7

<u>ขั้นที่ 2</u> คำนวณรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) ในแต่ละรอบของวิธีแบ่งครึ่งช่วง เพื่อใช้ในการจัดสรรขั้นงานลงสถานีงานในรอบนั้นๆ

<u>การจัดสรรขั้นงานและพนักงานลงสถานีงาน</u>

<u>ขั้นที่ 3</u> เริ่มจัดสรรขั้นงานและพนักงานตามลำดับที่กำหนด (Task Seqence) ซึ่งจะใช้รอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) ตามขั้นที่ 2 โดยจัดสรรที่ละสถานีงาน เมื่อเวลาดำเนินการในสถานีงานนั้นๆ เกินรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม หรือถ้าสถานีงานมีผู้ปฏิบัติงานเป็นพนักงานทักษะต่ำและถูกจัดสรรขั้นงานที่ไม่ทำได้ ให้ทำการขึ้นสถานีงานใหม่ ต่อจากนั้นทำการจัดสรรขั้นงานและพนักงานในสถานีจนครบตามจำนวนที่กำหนด ซึ่งจะจบการจัดสรรขั้นงานเมื่อขั้นงานถูกจัดสรรขั้นงานจนครบหรือพนักงานเกินกว่าจำนวนที่กำหนด

<u>ขั้นที่ 4</u> ทำการเก็บตำแหน่งของลำดับขั้นงานที่ถูกจัดสรรลงในสถานีงานเป็นขั้นงานแรกในแต่ละสถานีงานในตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint Vector)

<u>การปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนิการและการเก็บคำตอบ</u>

<u>ขั้นที่ 5.</u> เมื่อจบการจัดสรรขั้นงานและพนักงานลงสถานีงาน จะต้องมีการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการและการเก็บคำตอบ โดยต้อง

พิจารณาจาก 2 อย่าง ได้แก่ 1. สถานีงานหรือพนักงานได้ถูกจัดสรรขั้นงานอย่างน้อย 1 ขั้นงาน 2. รอบเวลาดำเนินการ ซึ่งสามารถสรุปเป็นเงื่อนไขได้ 4 เงื่อนไขตามตารางที่ 2.6 โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

- การเก็บคำตอบ ก็ต่อเมื่อ ทุกสถานีงานถูกจัดสรรขั้นงานอย่างน้อย 1 ขั้นงานและรอบเวลาดำเนินการเพียงพอ (เงื่อนไขที่ 1)
- $C_T \rightarrow C_{UB}$ ก็ต่อเมื่อ รอบเวลาดำเนินการเพียงพอ (เงื่อนไขที่ 1 และ3)
- $C_T \rightarrow C_{LB}$ ก็ต่อเมื่อ รอบเวลาดำเนินการไม่เพียงพอ (เงื่อนไขที่ 2 และ4)

ตารางที่ 2.6 เงื่อนไขการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนิการและการเก็บคำตอบของกระบวนหาคำตอบด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วงแบบปกติ

เงื่อนไข	สถานีงานหรือพนักงานได้ถูกจัดสรรขั้นงานอย่างน้อย 1 ขั้นงาน	รอบเวลาดำเนินการพอหรือไม่	การปรับปรุงรอบเวลาดำเนินการ	การเก็บคำตอบ
1	☑	☑	C_{UB}	☑
2	☑	☒	C_{LB}	☒
3	☒	☑	C_{UB}	☒
4	☒	☒	C_{LB}	☒

<u>ขั้นที่ 6</u> กลับไปทำขั้นตอนที่ 1

<u>ขั้นที่ 7</u> ได้รับคำตอบของการถอดรหัสสตริงคำตอบด้วยวิธีการแบ่งครึ่งช่วง โดยคำตอบที่ได้จะได้เป็นคำตอบในรอบล่าสุดที่เป็นไปได้ (Fesible Solution)

ในบางครั้งเมื่อจบการทำงานของวิธีการแบ่งครึ่งช่วงแล้วไม่มีรอบการทำงานใดเลยที่ให้คำตอบที่เป็นไปได้ ซึ่งจะหมายความว่าสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่เป็นไปไม่ได้เลย ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนหาคำตอบโดยวิธีการแบ่งครึ่งช่วงและกระบวนการเก็บคำตอบ จึงได้มีการเพิ่มขั้นตอนการซ่อมแซม (Repair) การหาคำตอบโดยวิธีแบ่งครึ่งช่วง เพื่อให้สตริงคำตอบที่ได้นั้นเป็นสตริงคำตอบที่เป็นไปได้มากที่สุด แต่คำตอบที่ได้จากกระบวรการซ่อมแซม จะเป็นคำตอบที่แย่กว่าเนื่องจากกระบวนการการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการที่เปลียนแปลงไป และการเก็บคำตอบซึ่งจะทำให้เกิดการทำงานที่ผิดเงื่อนไข คือพนักงานบางคนหรือบางสถานีงานที่อยู่ท้ายๆ ไม่ถูกจัดสรรขั้นงานแม้แต่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เพียง 1 ขั้นงานดังนั้นจึงต้องมีการดัดแปลงการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลงโทษกับสตริงคำตอบเหล่านี้ โดยมีขั้นตอนการซ่อมแซมการหาคำตอบโดยวิธีแบ่งครึ่งช่วงดังนี้

<u>ขั้นตอนการซ่อมแซมการหาคำตอบโดยวิธีแบ่งครึ่งช่วง</u>

การซ่อมแซมการหาคำตอบโดยวิธีแบ่งครึ่งช่วงจะมีขั้นตอนหลักๆเหมือนเดิม ซึ่งส่วนที่ต่างออกจากขั้นตอนแบบเดิมจะมี 2 ส่วนหลัก คือ

1. จะทำการจัดสรรขั้นงานและพนักงานโดยใช้ขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการในรอบแรก (รอบที่ 0)
2. มีการปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาและการเก็บคำตอบ โดยเพิ่มสิ่งที่ต้องพิจารณา คือสถานีงานหรือพนักงานที่ไม่ถูกจัดสรรขั้นงานนั้นอยู่ในตำแหน่งใดของสายการประกอบ โดยจะแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. ระหว่างสายการประกอบ (มีสถานีงานที่ถูกจัดสรรขั้นงานและพนักงานต่อจากสถานีงานนั้นๆ) 2. ปลายสายการประกอบ (ไม่มีสถานีงานที่ถูกจัดสรรขั้นงานและพนักงานต่อจากสถานีงานนั้นๆ) ซึ่งสามารถสรุปเป็นเงื่อนไขได้ 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 2.7 โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

- การเก็บคำตอบ ก็ต่อเมื่อ ทุกสถานีงานถูกจัดสรรขั้นงานอย่างน้อย 1 ขั้นงานและรอบเวลาดำเนินการเพียงพอ (เงื่อนไขที่ 1) หรือมีสถานีงานไม่ถูกจัดสรรขั้นงานแต่อยู่ที่ปลายสายการประกอบและรอบเวลาดำเนินการเพียงพอ (เงื่อนไขที่ 5)
- $C_T \rightarrow C_{UB}$ ก็ต่อเมื่อ รอบเวลาดำเนินการเพียงพอและถ้ามีสถานีงานไม่ถูกจัดสรรขั้นงานจะต้องอยู่ปลายสายการประกอบหรืออยู่ระหว่างสายการประกอบและปลายสายการประกอบ (เงื่อนไขที่ 1 5 และ6)
- $C_T \rightarrow C_{LB}$ ก็ต่อเมื่อ รอบเวลาดำเนินการไม่เพียงพอ (เงื่อนที่ 2 และ4) หรือรอบเวลาดำเนินการเพียงพอและมีสถานีงานไม่ถูกจัดสรรขั้นงานจะต้องอยู่ระหว่างสายการประกอบ (เงื่อนที่ 3)

ตารางที่ 2.7 เงื่อนไขการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการและการเก็บคำตอบของกระบวนหาคำตอบด้วยวิธีแบ่งครึ่งช่วงแบบซ่อมแซม

เงื่อนไข	สถานีงานหรือพนักงานถูกจัดสรรอย่างน้อย 1 ขั้นงาน	รอบเวลาดำเนินการพอหรือไม่	การปรับปรุงรอบเวลาดำเนินการ	การเก็บคำตอบ
1	☑	☑	C_{UB}	☑
2	☑	☒	C_{LB}	☒
3	☒(กลางสายการประกอบ)	☑	C_{LB}	☒
4	☒(กลางสายการประกอบ)	☒	C_{LB}	☒
5	☒(ปลายสายการประกอบ)	☑	C_{UB}	☑
6	☒(กลางสายการประกอบและปลายสายการประกอบ)	☑	C_{UB}	☒

ตัวอย่างขั้นตอนของวิธีแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Searching)

ใช้โจทย์ปัญหาของ Jackson จำนวนขั้นงานทั้งหมด 11 ขั้นงาน และปัญหาของ Jaeschke จำนวนขั้นงานทั้งหมด 9 ขั้นงาน รวมทั้ง 2 สายการประกอบ มีจำนวนขั้นงานทั้งสิ้น 20 ขั้นงาน กำหนดให้มีพนักงานทั้งสิ้น 6 คน โดยเป็นพนักงานทักษะสูง 2 คน พนักงานทักษะปกติ 3 คน และพนักงานทักษะต่ำ 1 คน โดยมีเวลาร่วมของแต่ละขั้นงานที่ทำโดยพนักงานแต่ละทักษะตามตารางที่ 2.8 และข้อมูลนำเข้า (Input) ของโจทย์ตัวอย่างตามรูปที่ 2.15 โดยจะแสดงวิธีโดยละเอียดในรอบการทำงานที่ 1 และ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

● Input

N_w = 6 , n = 20 , C_{LB} = 10.47 , C_{UB} =20.3808 , Dif_C = 1

V_2 : Task Sequence

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

V_3 : Worker Allocation

รูปที่ 2.15 ข้อมูลนำเข้าของโจทย์ตัวอย่าง

ตารางที่ 2.8 เวลาร่วมของแต่ละขั้นงานที่ทำโดยพนักงานแต่ละทักษะ

task i	Task Time Unit		
	H	M	L
A1	4	5	7
A2	3	3	4.5
A3	4	5	-
A4	4.5	6	-
A5	2	2	3.5
A6	2	2	4.5
A7	3.5	4	5.5
A8	2.5	4	5.5
A9	4	4	6
A10	3.5	5	6.5
A11	2.5	3	4.5
B1	4.33	5.33	7
B2	3	3	3
B3	2.67	4	-
B4	3	4.33	4.67
B5	2	3.33	4.67
B6	3.67	5	5.67
B7	1.33	1.67	2.67
B8	3	4.33	5
B9	4.33	5.33	5.67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>รอบที่ 1</u>

<u>ขั้นที่ 1</u> คำนวณค่าความต่างระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ (C_{UB} -C_{LB})

$$C_{UB} - C_{LB} = 23.808 - 10.47 = 13.338 \text{ วินาที}$$

ทำการเปรียบเทียบกับค่า Dif_c คือ 13.338 > 1 ดังนั้นทำขั้นที่ 2 -7 ต่อ

<u>ขั้นที่ 2</u> คำนวณรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) เพื่อใช้สำหรับการจัดสรรขั้นงานและพนักงานให้กับแต่ละสถานีงาน

$$C_T = \frac{C_{UB}+C_{LB}}{2} = \frac{23.808+10.47}{2} = 17.14 \text{ วินาที}$$

<u>ขั้นที่ 3</u> นำรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสมจากขั้นที่ 2 มาทำการจัดสรรขั้นงานและพนักงานลงในสถานีงาน เริ่มจากสถานีงานที่ 1 จัดสรรพนักงานทักษะปกติลงสถานีงานตามด้วยขั้นงาน A1 B1 B3 ซึ่งมีเวลาดำเนินการทั้งสิ้น 14.33 วินาที เมื่อจัดสรรขั้นงาน A4 ลงสถานีงานที่ 1 จะทำให้เวลาดำเนินการทั้งสิ้น เป็น 20.33 วินาที ทำให้เกินรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม ดังนั้น ทำให้ต้องขึ้นสถานีงานใหม่ ดังนั้นสถานีงานที่ 2 จะถูกจัดสรรขั้นงาน A4 A2 A3 A6 โดยมีพนักทักษะปกติเป็นผู้ปฏิบัติงาน ต่อมาสถานีงานที่ 3 มีพนักงานทักษะสูงเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ A8 A10 B2 B4 B5 B8 สถานีงาน ที่ 4 มีพนักงานทักษะปกติเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ B7 B6 B9 A5 สถานีงานที่ 5 พนักงานทักษะต่ำเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ A7 A9 A11 และสถานีงานที่ 6 ที่มีพนักงานทักษะสูงเป็นผู้ปฏิบัติงาน แต่ไม่มีขั้นงานถูกจัดสรรลงสถานีงานเลย ตามตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่1 ของโจทย์ตัวอย่าง

Round 1		
C_{LB}	=	10.47166667
C_{UB}	=	23.80833333
$C_{UB} - C_{LB}$	=	13.33666667
C_T	=	17.14

ตารางที่ 2.9 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่1 ของโจทย์ตัวอย่าง (ต่อ)

Workstation 1			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
M2	A1	5	12.14
M2	B1	5.33	6.81
M2	B3	4	2.81
Workstation 2			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
M1	A4	6	11.14
M1	A2	3	8.14
M1	A3	5	3.14
M1	A6	2	1.14
Workstation 3			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
H2	A8	2.5	14.64
H2	A10	3.5	11.14
H2	B2	3	8.14
H2	B4	3	5.14
H2	B5	2	3.14
H2	B8	3	0.14
Workstation 4			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
M3	B7	1.67	12.55
M3	B6	5	7.55
M3	B9	5.33	2.22
M3	A5	2	0.22
Workstation 5			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
L1	A7	5.5	11.64
L1	A9	6	5.64
L1	A11	4.5	1.14
Workstation 6			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
H1			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 4 เก็บตำแหน่งของลำดับขั้นงานที่ถูกจัดสรรลงในสถานีงานเป็นขั้นงานแรกในแต่ละสถานีงานในตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint Vector) ซึ่งจะมีค่าเป็น 1 4 8 14 และ18 ตามลำดับ ซึ่งมีเพียง 5 ค่าเนื่องจากในสถานีงานที่ 6 ไม่มีขั้นงานถูกจัดเลยแม้แต่ขั้นงานเดียว ตามรูปที่ 2.16

	1	2	3	4	5	6
Breakpoint Vector	1	4	8	14	18	

รูปที่ 2.16 ตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงานในรอบที่ 1 ของโจทย์ตัวอย่าง

ขั้นที่ 5 ทำการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการและเก็บคำตอบ โดยดูจากตารางเงื่อนไขการปรับปรุงและการเก็บคำตอบ ซึ่งในรอบนี้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ 3 คือ มีสถานีงานไม่ถูกจัดสรรขั้นงานอย่างน้อย 1 ขั้นงานแต่รอบเวลาดำเนินการเพียงพอ ดังนั้นในรอบนี้จะไม่มีการเก็บคำตอบและจะทำการปรับปรุงค่าขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ โดยให้นำค่ารอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) ตามขั้นตอนที่ 2 ไปปรับปรุงในค่าขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ (C_{UB}) ในรอบถัดไป จาก 23.808 วินาที เป็น 17.14

ขั้นที่ 6 กลับไปทำขั้นที่ 1 ในรอบที่ 2

รอบที่ 2

ขั้นที่ 1 คำนวณค่าความต่างระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการ ($C_{UB} - C_{LB}$) ในรอบที่ 2 โดยใช้ค่าขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการที่ทำการปรับปรุงเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

$$C_{UB} - C_{LB} = 17.14 - 10.47 = 6.67 \text{ วินาที}$$

ทำการเปรียบเทียบกับค่า Dif_c คือ 6.67 > 1 ดังนั้นทำขั้นตอนที่ 2 -7 ต่อ

ขั้นที่ 2 คำนวณรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) เพื่อใช้สำหรับการจัดสรรขั้นงานและพนักงานให้กับแต่ละสถานีงาน

$$C_T = \frac{C_{UB}+C_{LB}}{2} = \frac{17.14+10.47}{2} = 13.805 \text{ วินาที}$$

ขั้นที่ 3 นำรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสมจากขั้นที่ 2 มาทำการจัดสรรขั้นงานและพนักงานลงในสถานีงาน เริ่มจากสถานีงานที่ 1 จัดสรรพนักงานทักษะปกติลงสถานีงานตามด้วยขั้นงาน A1 B1 สถานีงานที่ 2 มีพนักงานทักษะปกติเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ B3 B4 B2 สถานีงานที่ 3 มีพนักงานทักษะสูงเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ A3 A6 A8 A10 สถานีงาน ที่ 4 มีพนักงานทักษะปกติเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ B2 B4 B5 สถานีงานที่ 5 มีพนักงานทักษะต่ำเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ B8 B7 B6 และสถานีงานที่ 6 มีพนักงานทักษะสูงเป็นผู้ปฏิบัติงานโดยมีขั้นงานถูกจัดสรรคือ B9 A5 A7 แต่ไม่จัดสรรขั้นงาน A9 และ A11 ลงในสถานีงานนี้เนื่องจาก เวลาดำเนินการทั้งหมดจะเกินรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสมที่คำนวณจากขั้นตอนที่ 2 ทำให้มีขั้นงานเหลือ ตามตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่ 2 ของโจทย์ตัวอย่าง

Round 2			
C_{LB}		=	10.47166667
C_{UB}		=	17.14
$C_{UB} - C_{LB}$		=	6.67
C_T		=	13.805
Workstation 1			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
M2	A1	5.000	8.806
M2	B1	5.330	3.476
Workstation 2			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
M1	B3	4.000	9.806
M1	A4	6.000	3.806
M1	A2	3.000	0.806
Workstation 3			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
H2	A3	4.000	9.806
H2	A6	2.000	7.806
H2	A8	2.500	5.306
H2	A10	3.500	1.806

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.10 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่ 2 ของโจทย์ตัวอย่าง (ต่อ)

Workstation 4			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
M3	B2	3.000	10.806
M3	B4	4.330	6.476
M3	B5	3.330	3.146
Workstation 5			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
L1	B8	5.000	8.806
L1	B7	2.670	6.136
L1	B6	5.670	0.466
Workstation 6			
Worker	Task	Task Time	idle cycle time
H1	B9	4.330	9.476
H1	A5	2.000	7.476
H1	A7	3.500	3.976
H1	A9	4.000	-0.024
H1	A11	2.500	-2.524

<u>ขั้นที่ 4</u> เก็บตำแหน่งของลำดับขั้นงานที่ถูกจัดสรรลงในสถานีงานเป็นขั้นงานแรกในแต่ละสถานีงานในตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint vector) ดังรูปที่ 2.17 คือ ตำแหน่งของลำดับขั้นงานที่ถูกจัดสรรลงในสถานีงานที่ 1 ถึง 6 มีค่าเป็น 1 3 6 10 13 16 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

	1	2	3	4	5	6
Breakpoint Vector	1	3	6	10	13	16

รูปที่ 2.17 ตัวแปรเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงานในรอบที่ 2 ของโจทย์ตัวอย่าง

<u>ขั้นที่ 5</u> ทำการปรับปรุงขอบเขตล่างและขอบเขตบนของรอบเวลาดำเนินการและเก็บคำตอบ โดยดูจากตารางเงื่อนไขการปรับปรุงและการเก็บคำตอบ ซึ่งในรอบนี้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ 2 คือ ทุกสถานีงานถูกจัดสรรขั้นงานอย่างน้อย 1 ขั้นงานแต่รอบเวลาดำเนินการไม่เพียงพอ ดังนั้นในรอบนี้จะไม่มีการเก็บคำตอบและจะทำการปรับปรุงค่าขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการ โดยให้นำค่ารอบเวลาดำเนินการที่

เหมาะสม (C_T) ไปปรับปรุงในค่าขอบเขตล่างของรอบเวลาดำเนินการ (C_{UB}) ในรอบถัดไป จาก 10.472 วินาที เป็น 13.806

ขั้นที่ 6 กลับไปทำขั้นตอนที่ 1 ในรอบที่ 3

ทำซ้ำขั้นตอนเดิมจนกระทั้งครบรอบการทำงานตามเงื่อนไขของวิธีการแบ่งครึ่งช่วง ในโจทย์ตัวอย่างจะจบการทำงานในรอบที่ 5 ดังนั้นสามารถสรุปการจัดสรรขั้นงานและพนักงานลงในสถานีในรอบที่ 3 – 5 ได้ตามรูปที่ 2.18

Round 3		
C_{LB}	=	13.805
C_{UB}	=	17.14
C_{UB}-C_{LB}	=	3.334
C_T	=	15.473

Workstation 1			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
M2	A1	5.00	10.473
M2	B1	5.33	5.143
M2	B3	4.00	1.143

Workstation 2			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
M1	A4	6.00	9.473
M1	A2	3.00	6.473
M1	A3	5.00	1.473

Workstation 3			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
H2	A6	2.00	13.473
H2	A8	2.50	10.973
H2	A10	3.50	7.473
H2	B2	3.00	4.473
H2	B4	3.00	1.473

Workstation 4			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
M3	B5	3.33	12.143
M3	B8	4.33	7.813
M3	B7	1.67	6.143
M3	B6	5.00	1.143

Workstation 5			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
L1	B9	5.67	9.803
L1	A5	3.5	6.303
L1	A7	5.5	0.803

Workstation 6			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
H1	A9	4	11.473
H1	A11	2.5	8.973

Round 4		
C_{LB}	=	13.805
C_{UB}	=	15.473
C_{UB}-C_{LB}	=	1.667
C_T	=	14.639

Workstation 1			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
M2	A1	5	9.639
M2	B1	5.33	4.309
M2	B3	4	0.309

Workstation 2			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
M1	A4	6	8.639
M1	A2	3	5.639
M1	A3	5	0.639

Workstation 3			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
H2	A6	2	12.639
H2	A8	2.5	10.139
H2	A10	3.5	6.639
H2	B2	3	3.639
H2	B4	3	0.639

Workstation 4			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
M3	B5	3.33	11.30938
M3	B8	4.33	6.979375
M3	B7	1.67	5.309375
M3	B6	5	0.309375

Workstation 5			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
L1	B9	5.67	8.969375
L1	A5	3.5	5.469375

Workstation 6			
Worker	Task	Task Time	Idle Cycle Time
H1	A7	3.5	11.139375
H1	A9	4	7.139375
H1	A11	2.5	4.639375

Round 5		
C_{LB}	=	13.805
C_{UB}	=	14.639
C_{UB}-C_{LB}	=	0.83
C_{UB}-C_{LB} < Dif_c (1)		
END		

รูปที่ 2.18 การจัดสรรขั้นงานและพนักงานในรอบที่ 3-5 ของโจทย์ตัวอย่าง

● Output

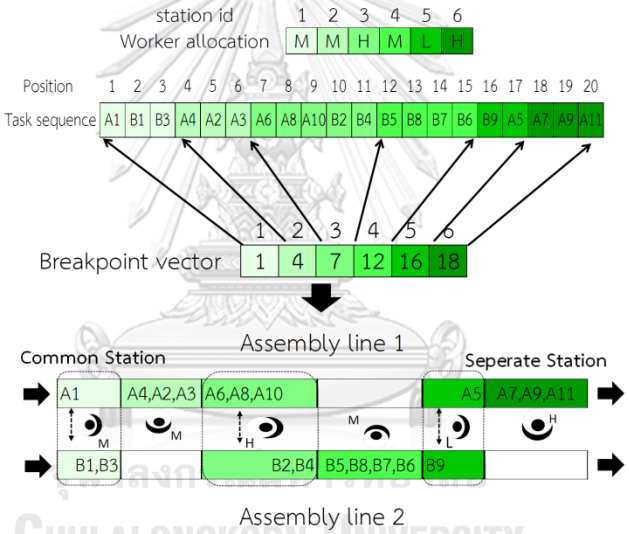
C_T = 14.639

V_4 : Breakpoint Vector

	1	2	3	4	5	6
Breakpoint Vector	1	4	7	12	16	18

รูปที่ 2.19 ข้อมูลนำออกในรอบที่ 4 ของโจทย์ตัวอย่าง

ซึ่งได้รับข้อมูลนำออก (Output Data) คือ รอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสม (C_T) และเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint Vector) ที่เกิดจากการทำงานในรอบที่ 4 ตามรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปตามเงื่อนไขในการเก็บคำตอบ คือถ้าจัดสรรขั้นงานและพนักงานลงสถานีงานตามที่กำหนดแล้ว ไม่มีขั้นงานเหลือ และทุกสถานีงานต้องถูกจัดสรรขั้นงานลงสถานีงานอย่างน้อย 1 ขั้นงาน และเป็นคำตอบที่ดีกว่าการทำงานในรอบที่ 3 เพราะมีรอบเวลาดำเนินการที่เหมาะสมที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.20 กำหนดขั้นงานลงในแต่ละสถานีโดยวิธีการถอดรหัสเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นที่ 4. กำหนดผู้ปฏิบัติงานและขั้นงานลงในแต่ละสถานีงาน

กำหนดผู้ปฏิบัติงานในแต่ละสถานีงานตามลำดับของพนักงาน คือ พนักงานทักษะปกติ พนักงานทักษะสูง พนักงานทักษะปกติ พนักงานทักษะปกติ พนักงานทักษะต่ำ พนักงานทักษะสูง ลงในสถานีงานที่ 1-6 ตามลำดับ และกำหนดขั้นงานลงในแต่ละสถานีโดยวิธีการถอดรหัสเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน ซึ่งจะเป็นตำแหน่งลำดับของขั้นงานที่จัดลงสถานีงานเป็นขั้นงานแรก คือสถานีงานที่ 1 จะประกอบด้วยขั้นงานลำดับที่ 1-3 ได้แก่ขั้นงาน A1 B1 และ B3 สถานีงานที่ 2 จะประกอบด้วยขั้นงานลำดับที่ 4-6 ได้แก่ขั้นงาน A4 A2 และ A3 สถานีงานที่ 3 จะประกอบด้วยขั้นงานลำดับที่ 7-11 ได้แก่ขั้นงาน A6 A8 A10 B2 และ B4 สถานีงานที่ 4 จะประกอบด้วยขั้นงาน

ลำดับที่ 12-15 ได้แก่ขั้นงาน B5 B8 B7 และ B6 สถานีงานที่ 5 จะประกอบด้วยขั้นงานลำดับที่ 16-17 ได้แก่ขั้นงาน B9 และ B5 สถานีงานที่ 6 จะประกอบด้วยขั้นงานลำดับที่ 18-20 ได้แก่ขั้นงาน A7 A9 และ A11 และมีจำนวนเท่ากับสถานีงานหรือพนักงาน ดังนั้นจะสามารถกำหนดขั้นงานลงสถานีงานได้ดังรูปที่ 2.20

2.1.4.2 การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากการถอดรหัสเวกเตอร์จุดแบ่งขั้นงาน (Breakpoint Vector) ซึ่งจะผลการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะบนสายการประกอบแบบขนาน ตามรูปที่ 2.20 และสามารถสรุปผลให้อยู่รูปของตาราง ตามตารางที่ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์

ตารางที่ 2.11 ผลการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะบนสายการประกอบแบบขนาน

Workstation	Station	Type	Worker	Task	Task Time	Total Time
1	1	Common	Medium	A1	5	14.33
				B1	5.33	
				B3	4	
2	2	Separate	Medium	A4	6	14
				A2	3	
				A3	5	
3	3	Common	High	A6	2	14
				A8	2.5	
				A10	3.5	
				B2	3	
				B4	3	
4	4	Separate	Medium	B5	3.33	14.33
				B8	4.33	
				B7	1.67	
				B6	5	
5	5	Common	Low	B9	5.67	9.17
				A5	3.5	
6	6	Separate	High	A7	3.5	10
				A9	4	
				A11	2.5	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ตัวอย่างการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งมีทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์</u>

1. วัตถุประสงค์ที่ 1: รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (Minimum Cycle Time) โดยมีค่าเท่ากับเวลารวมของขั้นงานในแต่ละสถานีงาน (Total Ttime of Each Workstation : TT_k) ที่มากที่สุด จึงสามารถพิจารณาได้จากผลการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานตามตารางที่ 2.11 ซึ่งพบว่าสถานีงานที่มีเวลารวมของขั้นที่มากที่สุดคือ สถานีงานที่ 1 และ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.33 วินาที

$$f_1(X) = 14.33$$

2. วัตถุประสงค์ที่ 2: จำนวนสถานีน้อยที่สุด (Minimum Station) สามารถพิจารณาได้จากผลการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานตามตารางที่ 2ซึ่งพบว่ามีจำนวนทั้ง 6 สถานี

$$f_2(X) = 6$$

3. วัตถุประสงค์ที่ 3: ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Different Workload Between Workstations) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี

$$Minimise\ B_b = \frac{N_W}{N_u - 1}\sum_{k=1}^{N_u}\sum_{b=1}^{2}\left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u}\right)^2$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยค่าต่างๆที่ใช้ประกอบการคำนวณมีดังต่อไปนี้

- $N_W = N_U = 6$
- $C_T = 14.33$ (วัตถุประสงค์ที่ 1)
- $q_{A_1} = \frac{1}{2}, q_{A_2} = \frac{1}{2}, q_{B_1} = \frac{2}{3}, q_{B_2} = \frac{1}{3}$
- เวลาของแต่ละขั้นงานของแต่ละรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ทำโดยพนักงานแต่ละทักษะตามตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 เวลาของแต่ละขั้นงานของแต่ละรุ่นของผลิตภัณฑ์ที่ทำโดยพนักงานแต่ละทักษะ

Task	High skill			Medium skill			Low skill		
Line1	A_1	A_2	combine	A_1	A_2	combine	A_1	A_2	combine
A1	5.00	3.00	4.00	6.00	4.00	5.00	8.00	6.00	7.00
A2	2.00	4.00	3.00	2.00	4.00	3.00	3.00	6.00	4.50
A3	4.00	4.00	4.00	5.00	5.00	5.00	-	-	-
A4	6.00	3.00	4.50	7.00	5.00	6.00	-	-	-
A5	1.00	3.00	2.00	1.00	3.00	2.00	3.00	4.00	3.50
A6	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	5.00	4.50
A7	3.00	4.00	3.50	3.00	5.00	4.00	5.00	6.00	5.50
A8	4.00	1.00	2.50	6.00	2.00	4.00	7.00	4.00	5.50
A9	5.00	3.00	4.00	5.00	3.00	4.00	7.00	5.00	6.00
A10	4.00	3.00	3.50	5.00	5.00	5.00	6.00	7.00	6.50
A11	3.00	2.00	2.50	4.00	2.00	3.00	5.00	4.00	4.50
Task	High skill			Medium skill			Low skill		
Line2	B_1	B_2	combine	B_1	B_2	combine	B_1	B_2	combine
B1	4.00	5.00	4.33	5.00	6.00	5.33	7.00	7.00	7.00
B2	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
B3	2.00	4.00	2.67	4.00	4.00	4.00	-	-	-
B4	3.00	3.00	3.00	5.00	3.00	4.33	5.00	4.00	4.67
B5	2.00	2.00	2.00	4.00	2.00	3.33	5.00	4.00	4.67
B6	4.00	3.00	3.67	5.00	5.00	5.00	6.00	5.00	5.67
B7	1.00	2.00	1.33	1.00	3.00	1.67	2.00	4.00	2.67
B8	3.00	3.00	3.00	4.00	5.00	4.33	5.00	5.00	5.00
B9	5.00	3.00	4.33	6.00	4.00	5.33	6.00	5.00	5.67

ในขั้นแรกให้คำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาดำเนินการร่วมกับเวลารวมของขั้นงานโดยเฉลี่ย (S_{kb}) ของทุกสถานีงานก่อน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์รวม (TAD) และทำการคำนวณค่า B_b ต่อไป โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณค่า S_{kb} ของสถานีงานแยก และสถานีงานร่วมอย่างละ 1 สถานีงาน ได้แก่ สถานีงานที่ 2 และสถานีงานที่ 3 ตามลำดับ

S_{kb} คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาดำเนินการร่วมกับเวลารวมของขั้นงานโดยเฉลี่ยที่สถานีงานที่ k ซึ่งเป็นสถานีงานประเภท b โดยถ้าค่าเป็น 1 จะหมายถึงสถานีงานแยก (Separate Workstation) และ 2 จะหมายถึงสถานีงานร่วม (Common Workstation) โดยมีสูตรการคำนวณที่ต่างกันดังต่อไปนี้

$$S_{k,1} = \sum_{m_{l=1}}^{M_l} q_{m_l} S_{k,1,m_l,l}$$
$$= \sum_{m_{l=1}}^{M_l} q_{ml} \left| C_T - TT_{k,1,m_l,l,w} \right| \; \forall l \in \{1,2\} \qquad \text{สมการที่ 2.11}$$

$$S_{k,2} = \sum_{m_{l=1}}^{M_l} \sum_{m_{l+1=1}}^{M_{l+1}} q_{m_l} q_{m_{l+1}} S_{k,2,m_{(l,l+1)},(l,l+1),w} \; \forall l \in \{1\}$$
$$= \sum_{m_{l=1}}^{M_l} q_m q_{m_{l+1}} \left| C_T - TT_{k,2,m_l,l,w} - TT_{k,2,m_{l+1},l+1,w} \right| \qquad \text{สมการที่ 2.12}$$

<u>สถานีงานที่ 2</u>

สถานีงานที่ 2 เป็นสถานีงานแยกบนสายการประกอบ 1 ซึ่งขั้นงานที่ถูกจัดสรรได้แก่ A4 A2 และ A3 ซึ่งมีพนักงานทักษะปกติเป็นผู้ปฏิบัติงาน

ดังนั้นค่า k =2, l = 1, b = 1 , w = 2 (medium worker)

ค่า S_{kb} ของสถานีงานที่ 2 ($S_{2,1}$) มีรายละเอียดในการคำนวณตามสมการที่ 2.11 ดังนี้

$$S_{2,1} = \sum_{m_{1=A_1}}^{A_2} q_{m1} S_{2,1,m_1,1,2} = q_{A_1} S_{2,1,A_1,1,2} + q_{A_2} S_{2,1,A_2,1,2}$$
$$= q_{A_1} \left| C_T - TT_{2,1,A_1,1,2} \right| + q_{A_2} \left| C_T - TT_{2,1,A_2,1,2} \right|$$
$$= \frac{1}{2} |14.33 - 14| + \frac{1}{2} |14.33 - 14|$$
$$= 0.1665 + 0.1665$$
$$= 0.3333$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>สถานีงานที่ 3</u>

สถานีงานที่ 3 เป็สถานีงานร่วม ซึ่งขั้นงานที่ถูกจัดสรรได้แก่ A6 A8 A10 B2 และB4 โดยพนักงานทักษะสูงเป็นผู้ปฏิบัติงาน

ดังนั้นค่า k = 3, b = 2 , w = 1 (high worker)

ค่า $S_{3,2}$ มีรายละเอียดในการคำนวณตามสมการที่ 2.12 ได้ดังนี้

$$S_{3,2} = \sum_{m_1=A_1}^{A_2} \sum_{m_2=B_1}^{B_2} q_{m1} q_{m2} S_{3,2,(m_1,m_{2),}(1,2),1}$$

$$= q_{A_1} q_{B_1} S_{3,2,(A_1,B_1),(1,2),1} + q_{A_1} q_{B_2} S_{3,2,(A_1,B_2),(1,2),1}$$

$$+ q_{A_2} q_{B_1} S_{3,2,(A_2,B_1),(1,2),1} + q_{A_2} q_{B_2} S_{3,2,(A_2,B_2),(1,2),1}$$

$$= q_{A_1} q_{B_1} \left| C_T - TT_{3,2,(A_1,B_1),(1,2),1} \right| + q_{A_2} q_{B_1} \left| C_T - TT_{3,2,(A_2,B_1),(1,2),1} \right|$$

$$+ q_{A_1} q_{B_2} \left| C_T - TT_{3,2,(A_1,B_2),(1,2),1} \right| + q_{A_2} q_{B_2} \left| C_T - TT_{3,2,(A_2,B_2),(1,2),1} \right|$$

$$= \left(\frac{1}{2} \times \frac{2}{3} |14.33 - 16| \right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} |14.33 - 16| \right)$$

$$+ \left(\frac{1}{2} \times \frac{2}{3} |14.33 - 12| \right) + \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{3} |14.33 - 12| \right)$$

$$= 0.55667 + 0.27833 + 0.77667 + 0.38833$$

$$= 2$$

ตารางที่ 2.13 แสดงเวลาขั้นงานรวม ($TT_{k,b,m_l,l,w}$) ที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ ในทุกกรณีที่เป็นไปได้ ซึ่งมีไว้ใช้ประกอบการคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย S_{kb}

ตารางที่ 2.13 เวลาขั้นงานรวมในแต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ

Workstation (k)	Worker (w)	Type (b)	Line	Task				$TT_{k,1,m_1,1,w}$		$TT_{k,1,m_2,2,w}$		$TT_{k,2,m_{(1,2)},(1,2),w}$			
								A_1	A_2	B_1	B_2	A_1 B_1	A_1 B_2	A_2 B_1	A_2 B_2
1	M	Common	1	A1				0	0	0	0	15	16	13	14
			2	B1	B3										
2	M	Separate Line1	1	A4	A2	A3		14	14	0	0	0	0	0	0
			2												
3	H	Common	1	A6	A8	A10		0	0	0	0	16	16	12	12
			2	B2	B4										
4	M	Separate Line1	1					0	0	14	15	0	0	0	0
			2	B5	B8	B7	B6								
5	L	Common	1	A5				0	0	0	0	9	8	10	9
			2	B9											
6	H	Separate Line1	1	A7	A9	A11		11	9	0	0	0	0	0	0
			2												

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งเมื่อทำการคำนวณค่า S_{kb} ของแต่ละสถานีงานจนครบตามค่าในตารางที่ 2.14 เราจะสามารถนำคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนสมบูรณ์รวม (TAD) ได้ดังนี้

$$TAD = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{2} S_{kb}$$
$$= 1 + 0.33 + 2 + 0.443333 + 5.16333 + 4.33 = 13.26667$$

สุดท้ายก็สามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 (B_b) ได้ดังนี้

$$f_3(X) = \frac{N_W}{N_u - 1} \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{2} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u} \right)^2 = \frac{6}{6-1} \times 0.12147 = 0.14577$$

และสามารถสรุปการคำควณในแต่ละขั้นตอนของทุกสถานีงานได้ตามตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ระหว่างรอบเวลาดำเนินการร่วมกับเวลารวมของขั้นงานที่แต่ละสถานีงานใช้ในการประกอบสินค้ารุ่นต่างๆ พร้อมค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย

Workstation (k)	Type (b)	$S_{k,1,m_1,1,w}$		$S_{k,1,m_2,2,w}$		$S_{k,2,m_{(1,2)},(1,2),w}$				S_{kb}	$\left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u}\right)^2$
		A_1	A_2	B_1	B_2	A_1B_1	A_1B_2	A_2B_1	A_2B_2		
1	Common	-	-	-	-	0.67	1.67	1.33	0.33	1	0.008333824
2	Separate Line1	0.33	0.33	-	-	-	-	-	-	0.33	0.020105055
3	Common	-	-	-	-	1.67	1.67	2.33	2.33	2	0.00025322
4	Separate Line1	-	-	0.33	0.67	-	-	-	-	0.443333	0.017755451
5	Common	-	-	-	-	5.3	6.33	4.33	5.33	5.163333	0.049519295
6	Separate Line1	3.33	5.33	-	-	-	-	-	-	4.33	0.025508959
$TAD = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{2} S_{kb}$										13.26667	
$\sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{2} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u}\right)^2$											0.121475804
$B_b = \frac{N_W}{N_u - 1} \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{b=1}^{2} \left(\frac{S_{kb}}{TAD} - \frac{1}{N_u}\right)^2$											0.145770965

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. วัตถุประสงค์ที่ 4: ความไม่เกี่ยวเนื่องกันของขั้นงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Index of Task Unrelated) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Minimise\ ITUR = 1 - \frac{N_w}{\sum_{k=1}^{N_w} SN_k}$$

ค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณดังต่อไปนี้

- $N_W = N_U = 6$ และ $WR = \frac{n}{Nw} = \frac{20}{6} = 3.333$ ขั้นงานต่อสถานีงาน
-

โดยที่จะยกตัวอย่างการคำนวณค่า SN_k ของสถานีงานที่ 1 ซึ่งมีขั้นงานที่ถูกจัดสรรจำนวนทั้งสิ้น 3 ขั้นงาน เรียงตามลำดับก่อนหลัง ได้แก่ A1 B1 และ B3 จะเห็นได้ว่าการ เริ่มทำขั้นงาน A1 แล้วตามด้วยขั้นงาน B1 นั้นจะไม่เกิดเครือข่ายของขั้นงาน เนื่องจากขั้นงาน A1 และ B1 ไม่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกัน ต่อมาเมื่อทำขั้นงาน B1 แล้วตามด้วยขั้นงาน B3 นั้นจะเกิดเครือข่ายของขั้นงานขึ้นเนื่อง ต้องทำขั้นงาน B1 ก่อนถึงทำขั้นงาน B3 ได้ ดังนั้นสถานีงานที่ 1 นั้น มีเครือข่ายของขั้นงานอยู่ 2 เครือข่าย คือ [A1] และ [B1-B3]

ส่วนค่า SN_k หรือจำนวนเครือข่ายของขั้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงานต่างๆ สามารถประเมินได้ดังตารางที่ 2.15 เมื่อทราบค่า SN_k ของทุกสถานีงานแล้ว จะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 4 ($ITUR$) ดังต่อไปนี้

$$f_4(X) = 1 - \frac{6}{13} = 0.58346$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.15 จำนวนเครือข่ายของขั้นงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกันโดยตรงในสถานีงานต่างๆ

Workstation (k)	Task	Network of Task	Number of network (SN_k)
1	A1,B1,B3	[A1], [B1-B3]	2
2	A4,A2,A3	[A4], [A2],[A3]	3
3	A6,A8,A10,B2,B4	[A6-A8-A10],[B2-B4]	2
4	B5,B8,B7,B6	[B5-B8],[B7],[B6]	3
5	A5,B9	[A5], [B9]	2
6	A7,A9,A11	[A7-A9-A11]	1
$\sum_{k=1}^{Nw} SN_k$			13

2.1.5 การการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization)

คือกระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา โดยคำตอบนั้นจะต้องไม่ละเมิดต่อข้อจำกัดหรือเงื่อนไขที่มีอยู่ โดยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบหลักๆ ได้แก่ 1. เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (Vector of Decision Variables) คือตัวแปรที่สามารถใช้ในการปรับเปลี่ยนหรือควบคุมขั้นตอนในการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนแปลงได้ 2. ข้อจำกัด (Constraints) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปข้อจำกัดแบบอสมการ (Inequality Constraints) หรือข้อจำกัดแบบสมการ (Equality Constraints) 3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions) คือเกณฑ์ที่เป็นตัวกำหนดว่าเป้าหมายในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นไปในลักษณะใด โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่มากที่สุด (Maximization) หรือน้อยที่สุด (Minimization) โดยจะสามารถแบ่งปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดออกเป็น 3 รูปแบบตามการพิจารณาจากจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

- ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Optimization Problem : SOPs)
- ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi objective Optimization Problem: MOPs) จะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่า 1 แต่ไม่เกิน 3 และทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน
- ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-objective Optimization :MaOPs) จะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 4 ขึ้นไปและทำการหาค่าเหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน

ส่วนใหญ่ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจในด้านธุรกิจและเศรษฐศาสตร์รวมไปถึงด้านการผลิต เส้นทาง สถานที่ตั้ง การจัดตาราง และการจัดสมดุลสายการผลิต ล้วนแต่เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) ที่มีวัตถุประสงค์มากกว่า 1 อย่าง และมีข้อจำกัดมากมายในแก้ปัญหา ดังนั้นเป็นไปได้ยากที่จะแก้ปัญหาได้อย่างถูกต้องและดีที่สุดภายใต้ระยะเวลาอันจำกัด หรือจะเรียกว่าปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงการจัด (combinatorial optimization problem) ซึ่งเป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) ดังนั้นฮิวริสติก (Heuristic) จึงกลายเป็นวิธีที่เป็นตัวเลือกที่ใช้ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ ฮิวริสติกเป็นวิธีการที่ไม่มีแนวทางหรือกฎเกณฑ์ที่แน่นอนตายตัว มักอาศัยประสบการณ์ที่ผ่านมาเข้ามาช่วย ดังนั้นอาจได้คำตอบที่ไม่ดีนัก แต่โดยเฉลี่ยแล้วคำตอบที่ได้จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมถึงแม้ว่าแนวทางนี้จะไม่ได้รับประกันว่าสุดท้ายแล้วจะได้คำตอบที่ดีที่สุดก็ตาม แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากในการคำนวณและเวลาในการคำนวณ แนวคิดนี้จึงได้รับการยอมรับจากนักวิชาการ ซึ่งต่อมามีการคิดค้นวิธีที่มีความสามารถทำให้ได้คำตอบที่ดีและใช้เวลาใน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การหาคำตอบได้รวดเร็วขึ้น หรือเรียกว่าเป็นการค้นหาอย่างชาญฉลาด (Intelligent Search Method) ที่เรียกว่า “เมทธาฮิวริสติก” (Metaheuristic) และถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Glover (1986) ต่อมามีการพัฒนาอัลกอริทึมต่างๆที่ถูกจัดว่าเป็นเมทธาฮิวริสติก ได้แก่ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) เอนโคโลนี่ (Ant Colony System: ACO) เอลโวลูชันนารี่อัลกอริทึม (Evolutionary Algorithms: EAs) เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GAs) ซิมูเลทแอนนีลลิ่ง (Simulated Annealing: SA) ทาบู เซิร์ท (Tabu Search: TS) และเมมเมติกอัลกอริทึม (Memetic Algorithms: MAs) เป็นต้น

2.1.6 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือการหาเซตของคำตอบภายในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region) ที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทุกฟังก์ชันที่กำหนดมีค่าที่ดีที่สุดพร้อม ๆ กันไป ซึ่งเป้าหมายของเหล่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์อาจเป็นรูปแบบที่ทุกฟังก์ชันต้องการค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุด โดยรูปแบบของปัญหาในการวิจัยครั้งนี้เป็นรูปแบบที่มีเป้าหมายให้ทุก ๆ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าที่น้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วการประเมินเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจะเกี่ยวข้องกับสองเป้าหมายในการหาคำตอบในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เป้าหมายแรก คือ การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Fitness Assignment) ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการค้นหาขอบเขตของกลุ่มคำตอบมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งขอบเขตกลุ่มคำตอบ เป้าหมายที่สองคือ วิธีการประมาณความหนาแน่นของประชากรคำตอบ (Population Diversity) เพื่อใช้รักษาความหลากหลายให้กับคำตอบ ทำให้ลักษณะการกระจายของคำตอบบนขอบเขตกลุ่มคำตอบมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งขอบเขตของกลุ่มคำตอบ ไม่เกาะอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งทั้งสองเป้าหมายนี้มีจะรายละเอียดดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.6.1 การกำหนดค่าความแข็งแรง

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์จะมีความแตกต่างกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีวัตถุประสงค์เดียว โดยสิ่งที่สำคัญสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกของกลุ่มประชากรแต่ละตัวได้อย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงในปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ ได้แก่วิธีการคำนวณแบบเวกเตอร์ (Vector Evaluation Approach) วิธีโกล์โปรแกรมมิ่ง (Goal Programming Approach) วิธีคอมโพรไมส์ (Compromise Approach) วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) วิธีการจำแนกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach) เป็นต้น (Gen and Cheng, 2007) ซึ่งใน

งานวิจัยนี้จะใช้เพียงการกำหนดค่าแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีและวิธีการจำแนกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) คือ วิธีการนี้จะใช้การจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรง โดยใช้หลักการของ Pareto dominance เพื่อคำนวณค่าแข็งแรง ซึ่งประชากรจะถูกจัดอันดับตามหลัก Dominance Rule แต่ละคำตอบจะถูกกำหนดค่าความแข็งแรงภายใต้พื้นฐานอันดับคำตอบ ซึ่งไม่ใช่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จริง หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) นั่นเองซึ่งเปรียบเสมือนการแยกกลุ่มคำตอบ โดยใช้ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเป็นตัวกำหนด

ในงานวิจัยนี้จะใช้การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg's Ranking) หรือการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) ที่นำเสนอโดย Goldberg (1989) มีเป้าหมายเพื่อให้ทราบว่าแต่ละคำตอบที่พิจารณาเป็นคำตอบที่ดีหรือแย่เพียงใดเมื่อเทียบกับคำตอบอื่นๆจัดลำดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) คำตอบที่อยู่ใน Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front จะเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่กลุ่มคำตอบที่อยู่ในนี้จะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มคำตอบใดเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีกว่ากันหรือที่เรียกว่า Non-dominated Solution จากกลุ่มของคำตอบอื่น

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาไปพร้อมกันทั้งหมด ดังสมการที่ 2.13

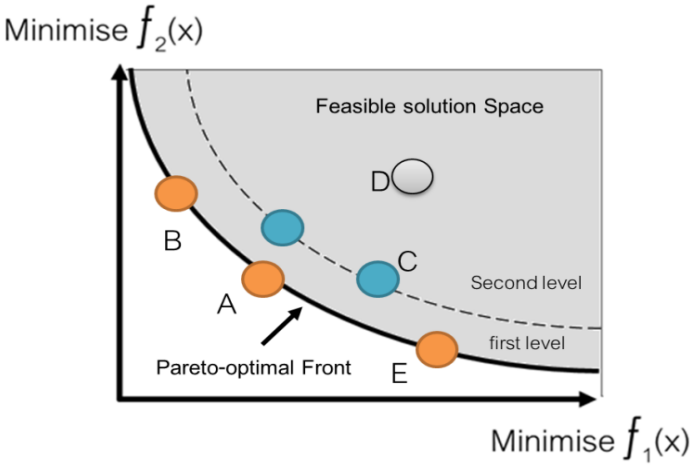
$$minimize: \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_o(\bar{x})\} \qquad \text{สมการที่ 2.13}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดย $\bar{x}$ คือ เวคเตอร์ของตัวแปรในการตัดสินใจ

$f_o(\bar{x})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละเรื่อง

ถ้าเวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าเวคเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ y แล้วจะได้ว่า $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่า $i \in \{1,2,\dots,O\}$ และ $f_i(x) \leq f_i(y)$ มีอย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1,2,\dots,O\}$



รูปที่ 2.21 Pareto Optimal Solution (Goldberg, 1989)

จากรูปที่ 2.21 เป็นการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แบบค่าน้อยที่สุด (Minimise) ทั้ง 2 ฟังก์ชัน โดยจุดแต่ละจุดจะแทนกลุ่มคำตอบที่หาได้ จะเห็นว่าจุดของ A B และ E จะเป็นจุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto Optimal Frontier) โดยที่ A B และ E จะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าจุดใดเป็นจุดที่ให้คำตอบที่ดีกว่ากันจะเรียกว่า คำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) แต่ถ้าในกรณีของจุด A และC นั้นสามารถบ่งบอกได้ว่าจุด A เป็นจุดของคำตอบที่ดีกว่าจุด C จะเรียกว่า คำตอบของ A นั้นครอบงำคำตอบ (Dominated Solution) ของ C อยู่ ซึ่งทำให้ A และ C อยู่กันคนละระดับ (level) หรือขอบเขต (Frontier) ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่าจุด A B และ E นั้นเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (1^{st} Frontier หรือ1^{st} level)

2. วิธีการจำแนกค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach) คือ วิธีการที่ใช้แก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยใช้หลักการจำแนกมีหลากหลายวิธี แต่ในงานวิจัยของ Zhang and Li (2007) ได้นำเสนอไว้ 3 วิธีดังต่อไปนี้ วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weighted-sum Approach) วิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) และวิธีแยกขอบเขตและลงโทษ (Penalty-Based Boundary Intersection Approach)

ในวิจัยนี้จะใช้เพียงวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพราะว่าเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการจัดการกับปัญหาที่เป็น Nonconvex Pareto Front และมีหลักการที่สามารถคำนวณที่ง่าย โดยมีสูตรดังสมการที่ 2.14 และ 2.15 ซึ่งเป็นกรณีการหาคำตอบที่น้อยที่สุด (Minimize) และการหาคำตอบที่มากที่สุด (Maximize) ตามลำดับ

$$minimize\ g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le O}\{\lambda_{pi}|f_i(X) - z_i^*|\}$$ สมการที่ 2.14

$$maximize\ g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le O}\{\lambda_{pi}|f_i(X) - z_i^*|\}$$ สมการที่ 2.15

เมื่อ z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i โดย i = 1,2,..., O
กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด $z_i^* = min\{f_i(X)\}$
กรณีหาค่าของคำตอบที่มากที่สุด $z_i^* = max\{f_i(X)\}$

λ_{pi} คือ ค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p โดย p = 1,2,..., P ของวัตถุประสงค์ i
โดย $\sum_{i=1}^{O}\lambda_{pi} = 1\ \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \ge 0$

O คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

P คือ จำนวนจำนวนองค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือประชากรของสตริงคำตอบ

$g(x|\lambda_P, z^*)$ คือ ผลต่างที่มีค่ามากที่สุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ i กับค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i ที่ทำการคูณค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของวัตถุประสงค์ i

ซึ่งการกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Point of Weight : λ_p) หรือจำนวนของสตริงคำตอบ (Population Size) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (lattice : H) ซึ่งมีสูตรคำนวณตามสมการที่ 2.16 หรือใช้

$$lambda\ set = C_{O-1}^{H+O-1}$$ สมการที่ 2.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อ H คือ จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์
โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะมีช่วงระหว่าง 0 ถึง 1ดังนี้ $\left\{\frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H}\right\}$
ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ H+1

ตัวอย่างการคำนวณ Population size

กำหนดให้ O = 4 , H = 2

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

ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีค่าดังต่อไปนี้ $\left\{\frac{0}{2}, \frac{1}{2}, \frac{2}{2}\right\}$ คือ 0, 0.5 และ1 โดยแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักของแต่วัตถุประสงค์จะมีค่าดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่วัตถุประสงค์

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

2.1.6.2 การกำหนดค่าความหนาแน่น

ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์นั้นมีเป้าหมายที่สำคัญได้แก่ เพื่อค้นหาขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และให้เซตคำตอบมีลักษณะการกระจายสม่ำเสมอ ไม่เกาะกลุ่มอยู่ในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องอาศัยวิธีการสร้างความหลากหลายให้แก่ประชากรคำตอบ (Diversity Population) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าความหนาแน่นให้แก่ประชากรคำตอบ หรือการแบ่งปันค่าความแข็งแรง (Fitness Sharing) ซึ่งมีเทคนิคต่างๆ (Konak et al., 2006) ได้แก่ Niched Fitness Sharing Technique, Crowding Distance และ Adaptive Density Estimation เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.7 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

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

โดยตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 ตัวชี้วัด คือ 1. การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง 2. การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ 3. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ 4. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

5. จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ 6. เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) (Kumar and Singh, 2007, วัชรวิทย์ ถนนทอง, 2558) ซึ่งจะเรียงตามลำดับความสำคัญและมีรายละเอียดดังนี้

1. ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง คือ การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดหรือกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Approximate True Pareto Optimal Solution) โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.17

$$Convergence = \frac{\sum_{y \in s^*} min\{d_{xy} | x \in S_j\}}{|s^*|}$$ สมการที่ 2.17

$$d_{\mathrm{xy}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{O} \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{max} - f_i^{min}}\right)^2}$$ สมการที่ 2.18

S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (1st Frontier) ของอัลกอริทึม j

S^* คือ กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

$|S^*|$ คือ จำนวนของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

d_{xy} คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับ คำตอบที่แท้จริง y โดยมีสูตรคำนวณตามสมการที่ 2.18

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

$f_i(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่หาได้

$f_i(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง นั่นคือ อัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่ดีกว่า

2. ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ คือการวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน โดยมีการสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.19

$$Spread_{\,j} = \frac{\sum_{m=1}^{o} d(e_m, S_j) + \sum_{x=1}^{|S_j|} |d_x - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^{o} d(e_m, S_j) + |S_j|\bar{d}} \qquad \text{สมการที่ 2.19}$$

$$d(e_m, S_j) = \min_{s \in S_j} \sqrt{\sum_{i=1}^{O} \left(\frac{f_i(e_m) - f_i(s)}{f_i^{max} - f_i^{min}}\right)^2} \qquad \text{สมการที่ 2.20}$$

$$d_x = \min_{x_2 \in S_j, x_2 \neq x} \sqrt{\sum_{i=1}^{O} \left(\frac{f_i(x) - f_i(x_2)}{f_i^{max} - f_i^{min}}\right)^2} \qquad \text{สมการที่ 2.21}$$

เมื่อ S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (1st Frontier) ของอัลกอริทึม 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 กับคำตอบที่ตำแหน่งS_j

e_m คือ กลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่วัตถุประสงค์ m ของคำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัวตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นมีการกระจายตัวดี

3. ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Ratio of Non-Dominated Solution) นี้ไว้ใช้แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้นมีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบที่อัลกอริทึมอื่น ๆ หามาได้ทั้งหมดคิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด โดยแบ่งค่าชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนเป็น 2 ค่าชี้วัดสมรรถนะดังต่อไปนี้

1) Ratio of non-dominated solutions (self-comparison) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (First Pareto frontier solution) ที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Approximated True Pareto optimum) ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีในตัวมันเอง (Own first Pareto frontier solutions) โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.22

$$R_{NDS1} = \frac{|S_j - \{x \in S_j \mid \exists_{y \in S^*} : y \prec x\}|}{|S_j|} \qquad \text{สมการที่ 2.22}$$

2) Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.23

$$R_{NDS2} = \frac{|S_j - \{x \in S_j \mid \exists_{y \in S^*} : y \prec x\}|}{|S^*|}$$ สมการที่ 2.23

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

S^* คือ เซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหามาได้ของทุกอัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน

ซึ่ง $S^* = S_1 \cup S_2 \ldots \cup S_j$

x คือ คำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y \prec x$ คือ คำตอบ x เด่นกว่าคำตอบ y

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

4. ตัวชี้วัดสมรรถนะของจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ คือจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (The Number of Non-dominated Solution) คือจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดของตัวมันเอง (First Pareto frontier obtained)

5. ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time) คือ การพิจารณาเวลาในการค้นหากลุ่มคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยอัลกอริทึมที่ดีควรใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยได้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบขนาน

Gökçen et al. (2006) ได้นำเสนอขั้นตอนเชิงฮิวริสติกพร้อมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยวแบบขนานภายใต้รูปแบบประเภทเฉื่อย (Passive) และ ประเภทคล่องแคล่ว (Active) โดยแสดงให้เห็นว่าการเกิดขึ้นของสถานีงานร่วมภายในสายการประกอบแบบขนานซึ่งประกอบขั้นงานจากสองสายการประกอบเดี่ยวที่อยู่ติดกัน จะทำให้การ

ดำเนินงานทั้งระบบนั้นมีจำนวนสถานีงานน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบการดำเนินงานในลักษณะสายการประกอบเส้นตรงที่เป็นอิสระต่อกัน

Scholl and Boysen (2009) ได้อธิบายรายละเอียดของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบขนาน และนำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงเส้นฐานสอง (Binary Linear Programming) และใช้ขั้นตอนวิธีขยายและจำกัดเขตในการหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนปัญหาขนาดใหญ่ก็ได้พัฒนาฮิวริสติกขึ้น ผลการทดสอบพบว่าคำตอบที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอนี้ดีกว่าวิธีการอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ

ณัฐชัย โยธาบริบาร (2556) ได้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) ในการใช้สำหรับการแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบขนานผลิตภัณฑ์โดยมีวัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 4 วัตถุประสงค์ 3 ระดับความสำคัญ โดยการประเมินผลแต่ละวัตถุประสงค์จะเกิดขึ้นอย่างเป็นลำดับของระดับความสำคัญ คือหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุ-ประสงค์ระดับหนึ่งเป็นลำดับแรกก่อนคือ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ต่อด้วยวัตถุ-ประสงค์ระดับสอง คือ จำนวนสถานีน้อยที่สุด และตามด้วยวัตถุ-ประสงค์ระดับสาม ซึ่งประกอบด้วย 2 วัตถุประสงค์ ได้แก่ ความสมดุลของภาระงานระหว่างสถานีงานสูงที่สุด และความสัมพันธ์ของขั้นงานสูงที่สุดตามลำดับ โดยพิจารณาความเหมาะสมไปพร้อมกัน ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า BBO มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ NSGA-II ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมหนึ่งที่เป็นที่นิยม ทั้งในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม (Type I)

Özcan (2010) ได้เสนอแบบจำลอง A Chance-constrained, Piecewise-linear, Mixed Integer Program (CPMIP) และอัลกอริทึม A Simulated Annealing (SA) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลของสายประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่เวลาของขั้นงานไม่เท่ากัน เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น เครื่องจักรเสีย สูญเสียแรงจูงใจ งานที่ซับซ้อน และ สิ่งแวดล้อมในการทำงาน โดยวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด

Delice et al. (2016)ได้นำเสนอวิธีได้หาคำตอบแบบเชิงพันธุกรรม (GA) ในสายการประกอบแบบสองด้านรูปตัวยูที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่มโดยมีวัตถุประสงค์จำนวนทั้งสิ้น 2 วัตถุประสงค์ คือ ความยาวของสายการประกอบ จำนวนของสถานงาน โดยแต่ละโจทย์ปัญหาที่นำมา

ทำการศึกษาจะกำหนดรอบเวลาดำเนินการมาให้ และมีการนำเสนอข้อดีของการออกแบบสายการประกอบแบบสองด้านรูปตัวยู

Fattahi et al. (2016) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งพนักงานจะมีทักษะที่แตกต่างกันในโดยเวลาการดำเนินการของแต่ละงานจะขึ้นอยู่กับทักษะของพนักงาน วัตถุประสงค์ประกอบด้วย จำนวนคู่สถานี จำนวนสถานี ค่าใช้จ่าย ประสิทธิภาพของสายการประกอบแบบถ่วงน้ำหนัก และความไหลเลื่อนแบบถ่วงน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบอัลกอริทึม PSO กับ SA

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่ม (Type II)

Zhang et al. (2008) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบพร้อมกับการจัดสรรพนักงานลงในสถานีงาน ที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยใช้วิธีหาคำตอบด้วยอัลกอริทึม Random Key-Based Genetic (rkGA) ร่วมกับ Fuzzy Logic Controller (FLC) ทดลองแก้ปัญหากรณีศึกษาผลการวิจัยพบว่า วิธีการที่เสนอสามารถปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มอัตราการลู่เข้าของคำตอบได้ดีกว่าวิธีได้หาคำตอบแบบเชิงพันธุกรรอื่นๆ

Kilincci (2009) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบพร้อมกับการจัดสรรพนักงานลงในสถานีงานที่มีหลายวัตถุประสงค์แบบประเภทที่ 2 โดยใช้วิธีหาคำตอบด้วย A Petri Net-Based (PNA) ซึ่งมีอยู่ 3 วิธีการคือ ข้างหน้า, ข้างหลังและแบบสองทิศทาง ใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียนโดยเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นอีก 5 วิธี การเปรียบเทียบผลการศึกษาพบว่าวิธีที่นำเสนอสามารถแก้ปัญหาได้รับผลลัพธ์ที่ดีกว่าโดยเฉพาะกับโจทย์ที่เป็นสายการผลิตขนาดใหญ่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Chaves et al. (2009) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบพร้อมกับการจัดสรรพนักงานลงในสถานีงานที่มีหลายวัตถุประสงค์แบบประเภทที่ 2 ซึ่งพนักงานบางคนไม่สามารถทำงานบางงานได้เพราะเนื่องจากเป็นพนักงานพิการ โดยใช้วิธี Hybrid Method Clustering Search (CS) ในการหาคำตอบ CS เป็นการระบุว่าภูมิภาคของการค้นหาพื้นที่โดยการสร้างวิธีการแก้ที่มีเมตาฮิวริสติก เช่น วิธีค้นหาคำาตอบแบบวนรอบซ้ำ(Iterated Local Search) และ clustering คือการจัดกลุ่มที่มีการสำรวจแล้วร่วมกับการวิเคราะห์พฤติกรรมการค้นหาในพื้นที่ใกล้เคียง

Araújo et al. (2015) ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสมดุลสายการประกอบพร้อมกับการจัดสรรพนักงานลงในสถานีงานที่มีหลายวัตถุประสงค์แบบประเภทที่ 2 ซึ่ง

พนักงานบางคนไม่สามารถทำงานบางงานได้เพราะเนื่องจากเป็นพนักงานพิการภายใต้สายการประกอบแบบขนานแทนที่จะเป็นเส้นตรงเส้นเดียวโดยใช้พนักงานเท่าเดิม ซึ่งสองสายการประกอบไม่มีความข้องกันแต่อย่างใดสิ่งนี้เป็นประโยชน์ในแง่ของการบูรณาการทั้งแรงงานและการผลิต โดยใช้วิธี Tabu Search และอัลกอริทึม Biased Random-Key Genetic (BRKGA)

2.2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเมตาฮิวริสติก (Meta heuristic) ที่จะนำมาศึกษา

Tsutsui et al. (2006) นำเสอนการใช้ Histogram Based Sampling Algorithms (EHBSA) ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (traveling salesman problem: TS) โดยนำเสนอ 2 แนวทางคือ 1.ไม่มีการใช้ต้นแบบ (Without Template) 2. การใช้ต้นแบบ (With Template) ซึ่งทำการเปรียบกับอีก 3 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธี Order Crossover (OX), วิธี Partially Matched Crossover (PMX) และ EER ผลก็คือ แนวทางที่ใช้ต้นแบบนั้นดีกว่าแต่ก็จะการเลือกจำนวนของจุดตัดให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการค้นหาเฉพาะจุด (Local Search) ร่วมด้วยถึง 2 วิธี คือ 1. วิธี 2-opt 2. วิธี Lin-Kernighan ผลการก็คือการนำวิธี EHBSA/WT ร่วมกับวิธีการค้นหาเฉพาะที่ทั้ง 2 วิธีมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นที่นำมาเทียบและสามารถแก้ปัญหาในโจทย์ใหญ่ๆได้

Zhang and Li (2007) ได้นำเสนอวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) โดยหลักการจำแนกเป็นกลยุทธ์พื้นฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์แบบดั้งเดิม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการจำแนกวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ร่วมกับการพัฒนาคำตอบโดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในการแก้ปัญหา 0–1 knapsack ที่มีหลายวัตถุประสงค์ และทำการเปรียบและทำการเปรียบเทียบกับวิธีที่ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) และ multi-objective genetic local search (MOGLS) พบว่า MOEA/D ให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าในโจทย์ขนาดเล็ก

นพพล (2551) ได้นำเสนออัลกอริทึมการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence: COIN) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบตัวยู โดยวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรและความผันแปรของภาระงานในระบบการผลิตน้อยที่สุด ผลจากงานวิจัยพบว่า COIN จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อได้มีการรวมกับอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-II) สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบลักษณะตัวยูได้มีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ จากงานวิจัยที่กล่าวมา พบว่า COIN มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่รวดเร็ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เนื่องจากมีการจดจำลักษณะตำแหน่งของคู่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ติดกันและมีการจดจำลักษณะตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่ดีและไม่ดี

ปารเมศ ชุติมา และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาอัลกอริทึมใหม่ที่ใช้รูปแบบของความน่าจะเป็นในการค้นหาคำตอบที่ดีมีชื่อว่าอัลกอริทึม COIN ซึ่งเป็นการพิจารณาการคัดเลือกทั้งคำตอบที่ดี และคำตอบที่ไม่ดี เพื่อทำการให้รางวัล และลงโทษ ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีลักษณะรูปตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ภายใต้วัตถุประสงค์ คือ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และความผันแปรของเวลาภายในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และทำการเปรียบเทียบกับวิธีที่เป็นที่นิยมและได้คำตอบที่ดีในปัจจุบันอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ(NSGA-II) พบว่า COIN ให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

Cheng et al. (2017) ได้อธิบายถึงปัญหาที่แบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems) คือปัญหาที่มีวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งการแก้ปัญหานี้ทำให้เกิดการคิดค้นพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์หลายอัลกอริทึม แต่ยังได้รับความสนใจน้อยในการตรวจสอบประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงทำการส่งเสริมการวิจัยของวิวัฒนาการการเพิ่มประสิทธิภาพวัตถุประสงค์ โดยนำปัญหา15 ปัญหาการทดสอบที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายเพื่อสร้างชุดทดสอบมาตรฐาน สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์

ภายหลังจากที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย จะสามารถสรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ตามตารางที่ 2.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการจะสมดุลสายการประกอบที่มีเวลาดำเนินงานเชิงเฟ้นสุ่มจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ 1.ปัญหาแบบเวลาเชิงเฟ้นสุ่ม (Stochastic time) 2.คิดแบบจัดสรรพนักพร้อมกับการจัดสมดุล (Worker allocation) และจะมีวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลที่และอัลกอริทึมที่นำเสนอที่แตกต่างกันไป แต่วัตถุประสงค์ที่ต้องมีในปัญหาประเภทที่ 1(Type I) และปัญหาประเภทที่ 2 (Type II) เสมอ คือ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุดและรอบเวลาดำเนินการที่น้อยที่สุด ตามลำดับ โดยงานวิจัยที่จะทำการศึกษานั้นจะทำการศึกษาการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานที่มีหลายทักษะเนื่องจากมีพนักงานพิการร่วมด้วยทำให้บางงานไม่สามารถทำได้ เป็นปัญหาแบบจัดสรรพนักพร้อมกับการจัดสมดุล (Worker allocation) ลักษณะปัญหาประเภทที่ 2 (Type II) ในสายการประกอบแบบขนาน โดยจะแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านๆมาคือ ส่วนมากจะทำการศึกษาในสายการประกอบแบบเส้นตรง ซึ่งงานวิจัยของ Araújo et al. (2015) มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้มากที่สุดคือ จะทำการศึกษาในสายการประกอบแบบเส้นขนานกัน แต่ทั้งสายการประกอบนั้นไม่มีความเกี่ยวข้องกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.17 สรุปข้อมูลต่างๆของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

งานวิจัย	Algorithm	Type	Problem	Objective	อื่นๆ
Özcan (2010)	CPMIP SA	I	Stochastic Time	สถานีงานที่น้อยที่สุด	• Two-side • เวลาดำเนินที่แตกต่างกัน เกิดจาก เครื่องจักรเสีย สิ่งแวดล้อม งานซับซ้อน และอื่นๆ
Delice et al. (2016)	GA	I	Stochastic Time	(1) สถานีงานที่น้อยที่สุด (2) ความยาวของสายการประกอบ	• Two-side
Fattahi et al. (2016)	PSO GA	I	Worker Allocation	(1) จำนวนคู่สถานีงาน (2) จำนวนสถานีงาน (3) ประสิทธิภาพสายการประกอบ (4) ความไหลเลื่อน	• Two-side • เวลาดำเนินการของแต่ละงานจะขึ้นอยู่กับทักษะของพนักงาน
Zhang et al. (2008)	rkGA + FLC	II	Worker Allocation	(1) รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (2) สมดุลภาะงาน (3) ต้นทุน	• Straight line • เวลาดำเนินการของแต่ละงานจะขึ้นอยู่กับทักษะของพนักงาน
Chaves et al. (2009)	CS	II	Worker Allocation	ประสิทธิภาพสายการประกอบ	• Straight line • พนักงานบางคนไม่สามารถทำบางงานได้เนื่องเป็นพนักงานพิการ
Araújo et al. (2015)	BRKGA	II	Worker Allocation	(1) รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (2) เพิ่มอัตราการผลิตโดยรวม	• Parallel Line (ไม่เกี่ยวเนื่องกัน) • พนักงานบางคนไม่สามารถทำบางงานได้เนื่องเป็นพนักงานพิการ
งานวิจัยนี้	MOEA/D COIN AMOEA/D-COIN/WT	II	Worker Allocation	(1) รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (2) สายการประกอบสั้นที่สุด (3) สมดุลภาระงานมากที่สุด (4) ความสัมพันธ์ของขั้นงานมาก	• Parallel Line • พนักงานบางคนไม่สามารถทำบางงานได้เนื่องเป็นพนักงานพิการ • Mix Model

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-ObjectiveEvolutionary Algorithm Based on Decomposition : MOEA/D) พารามิเตอร์ของ MOEA/D และขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สำหรับการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณ

3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของ MOEA/D

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) ถูกพัฒนาโดย Zhang and Li (2007) ซึ่งมีแนวคิดในการแก้ปัญหาโดยการพัฒนาคำตอบแบบมากวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กัน โดยกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักบนจุด p ของแต่ละวัตถุประสงค์ i (Weight for the p Point with i Objectives : λ_{pi}) ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Point of Weight : λ_p) พร้อมกับกำหนดจุดข้างเคียง (Neighborhood Point) จากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidian Distance) ของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) เพื่อใช้ในการระบุประชากรย่อย (Subpopulation) หรือปัญหาย่อย (Subproblem)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การพัฒนาคำตอบของประชากร (Population) ในแต่ละเจเนอเรชั่นนั้นจะใช้การสลับสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งเป็นวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm) ซึ่งจะให้คำตอบรุ่นลูกที่ได้มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิมที่เป็นค่าที่ดี และทำการประเมินคำตอบที่ดีโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพื่อทำการแทนที่คำตอบในแต่ละเจเนอเรชั่น ซึ่งก่อนจะขึ้นเจเนอเรชั่นใหม่จะทำการคัดเลือกหาคำตอบที่ดีที่สุดในแต่เจเนอเรชั่นโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominate Sorting) เข้าไปเก็บไว้ในในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในแต่ละเจเนอเรชั่น ซึ่งคำตอบกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นสุดท้ายจะถือว่าเป็นกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม

3.2 พารามิเตอร์ของ MOEA/D

3.2.1 จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (Lattice: *H*)

คือ ตัวกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Number of λ_p) หรือจำนวนของสตริงคำตอบทั้งหมด (Population Size) โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะมีช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งมีรูปแบบในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนัก ดังนี้ $\left\{\frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \ldots, \frac{H}{H}\right\}$ และจำนวนของรูปแบบเท่ากับ $H + 1$

3.2.2 จำนวนของจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: *T*)

คือ ตัวกำหนดจำนวนของประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา ซึ่งจำนวนของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T + 1$

3.2.3 ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง

คือ ตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้ามีค่าสูงมากๆ จะทำให้สตริงคำตอบในสตริงคำตอบในประชากรย่อยมีโอกาสเป็นตัวเดียวกันหมดได้ไวขึ้น ซึ่งถ้าเป็นตามที่กล่าวมาจะส่งผลให้ไม่เกิดการพัฒนาคำตอบอีกเพราะการพัฒนาคำตอบโดยการสลับสายพันธ์จะได้สตริงคำตอบเดิมเสมอ

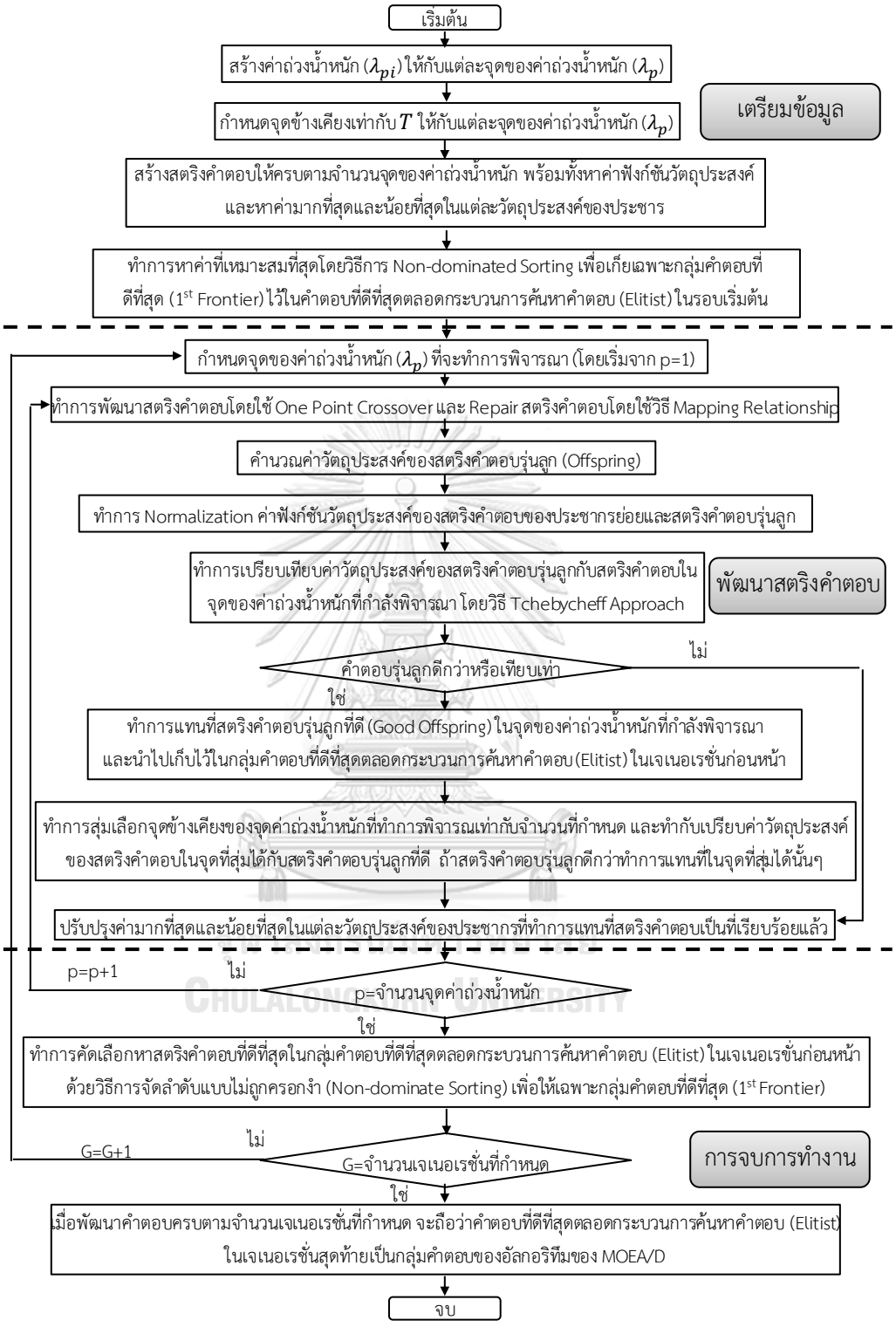
<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

กำหนดให้ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเท่ากับ 30 และกำหนดให้จำนวนของจุดข้างเคียง (T) เท่ากับ 4 ดังนั้นจะทำการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ $0.3 \times (4 + 1) = 1.5$ จุด แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการปัดเศษขึ้นเสมอดังนั้นจะต้องทำการสุ่มจุดข้างเคียง 2 จุด เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุและแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D ในการแก้แก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ขั้นตอนการทำงานของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 สามารถแบ่งได้ 14 ขั้นตอนหลักดังนี้ และมีแผนผังการทำงานตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม MOEA/D

<u>การเตรียมข้อมูล</u>

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งจะได้เมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (P) x จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) โดย $\lambda_p = (\lambda_{p1}, \dots, \lambda_{pO}), \sum_{i=1}^{O} \lambda_{pi} = 1 \; \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$

2. กำหนดจุดข้างเคียงเท่ากับ T ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_pเริ่มจากคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณากับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (d_{pj}) ตามสมการที่ 3.1 จากนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T

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

เมื่อ d_{pj} คือ ระยะระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก p กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก j

O คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดโดยการสุ่มอย่างอิสระ (Random) พร้อมทั้งทำการคำนวณค่าวัตถุประสงค์ และหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์

4. นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการ Non-dominated Sorting เพื่อเก็บคำตอบที่ดีที่สุด (1st Frontier) ไว้ในคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>การพัฒนาสตริงคำตอบ</u>

5. กำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา เพื่อกำหนดประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อยคือ สตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา และสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา

6. ทำการพัฒนาสตริงคำตอบโดยการสลับสายพันธุ์ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การสลับสายพันธุ์ระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง (One Point Crossove) และทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยใช้วิธี Mapping Relationship ของ Goldberg and Lingle (1985)

7. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ต่อจากนั้นทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์

8. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยมีสูตรในการนอร์มัลไล (Normalization) ดังสมการที่ 3.2

$$\bar{f_i} = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.0001) - z_i^*} \qquad \text{สมการที่ 3.2}$$

เมื่อ z_i^* คือ $min\{f_i(x)|x \in P\}$ โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, \dots, z_O^*)$

z_i^{nad} คือ $max\{f_i(x)|x \in P\}$ โดยที่ $z_i^{nad} = (z_1^{nad}, \dots, z_O^{nad})$

O คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

9. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่บนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง(Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ซึ่งต้องเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับสตริงคำตอบที่จุดค่าถ่วงน้ำที่ทำการพิจารณา ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ จะทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบรุ่นลูกที่ดี (Good Offspring) ลงในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณาและเก็บไว้ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า และทำขั้นตอนที่ 10 แต่ถ้าไม่ดีกว่าจะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 11

10. ทำการสุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนจุดข้างเคียงที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มีการแทนที่จุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_pที่กำลังพิจารณาในขั้นตอนที่ 9 กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง(Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ซึ่งการเปรียบเทียบนั้นจะเหมือนกับขั้นตอนที่ 9 แต่จะทำการเปรียบสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่ (Good Offspring) ในขั้นตอนที่กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าดีกว่าทำการแทนสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดี ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

11. หลังจากทำการพัฒนาคำตอบและแทนที่คำตอบเสร็จ ให้ทำการหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรใหม่

การพิจารณาการจบการพัฒนาสตริงคำตอบ

12. ถ้า $p < P$ ให้กำหนด $p = p + 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้า $p = P$ ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 13

13. ทำการคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ เพื่อให้เหลือเฉพาะกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (1^{st} Frontier)

14. ถ้า $G < Generation$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้า $G = Generation$ คือจบการพัฒนาคำตอบตามจำนวนเจเนอเรชั่นที่กำหนด ซึ่งจะถือว่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นสุดท้าย เป็นกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D

3.4 ตัวอย่างการใช้ MOEA/D แก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

จากขั้นตอนของ MOEA/D ที่ได้นำเสนอสามารถนำมาทดลองใช้ในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงาน ที่มี 4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ที่มีขั้นงานของทั้ง 2 สายการประกอบเท่ากับ 20 ขั้นงาน(A1-A11,B1-B9) โดยมีพนักงาน 6 คน (สถานีงาน 6 สถานีงาน) ซึ่งอัตราส่วนของทักษะพนักงาน High : Medium : Low เป็น 2 : 3 : 1โดยมีพารามิเตอร์และขั้นตอนการทำงานดังนี้

พารามิเตอร์ของ MOEA/D ที่เลือกใช้ คือ

- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ เท่ากับ 2
- จำนวนของจุดข้างเคียง เท่ากับ 4
- ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง คือ ร้อยละ30

ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากรได้ดังนี้

กำหนดให้ H=2, O=4

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

จะได้จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากร คือ 10

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

การเตรียมข้อมูล

การเตรียมข้อมูลนั้นจะทำก่อนขึ้นเจเนอเรชั่นที่ 1 (เจเนอเรชั่นที่ 0) เท่านั้น โดยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนย่อยๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นที่ 1. สร้างตารางค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_{pi})

สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งจะได้เมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (P) x จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) ซึ่งตัวอย่างนี้จำนวนจุดของถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 10 และจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด เท่ากับ 4 ดังนั้นจะได้ตารางเมทริกซ์ขนาด 10X4 และมีค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักในตารางนั้นจะมีเพียง 0, 0.5 และ1 เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีวิธีคิดจาก $\left\{\frac{0}{H},\frac{...}{H},\frac{H}{H}\right\}$ ซึ่งจะได้ $\left\{\frac{0}{2},\frac{1}{2},\frac{2}{2}\right\}$

ขั้นที่ 2. กำหนดจุดข้างเคียงให้กับแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ตามจำนวนที่กำหนด

เริ่มจากคำนวณระยะห่างระหว่าง (Euclidean distances) จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา (λ_p) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (λ_j) โดยที่ $p \neq j$ เช่น กำหนดให้ $p = 1,\ j = 2$ ดังนั้นค่า $d_{12} = \sqrt{(0-1)^2 + (1-0)^2 + 0 + 0} = \sqrt{2} = 1.41$ และสามารถคำนวณค่า d_{pj} ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆได้ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ระยะห่างระหว่างจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา (λ_p) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (λ_j)

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

จากนั้นทำการกำหนดจุดข้างเคียง ซึ่งตัวอย่างนี้กำหนดให้ค่า T เท่ากับ 4 ดังนั้นต้องเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุด 4 อันดับ ให้กับแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ตามตารางที่ 3.3

<u>ตัวอย่างการเลือกจุดข้างเคียงให้กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1)</u>

จากตารางที่ 3.2 เมื่อพิจารณาที่จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) จะพบว่าค่า d_{pj} ที่น้อยที่สุด คือ 0.71 ซึ่งประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก 3 จุด คือ λ_3, λ_6 และ λ_7 แต่ในตัวอย่างนี้ต้องการ 4 จุด ดังนั้นจึงพิจารณาค่า d_{pi} ที่น้อยรองลงมา คือ 1.22 ซึ่งประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก 3 จุด คือ λ_4, λ_5 และ λ_8 จึงต้องทำการสุ่มเพื่อเลือกเพียง 1 จุด ในตัวอย่างนี้สุ่มได้ λ_4 ดังนั้นจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 ประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_6$ และ λ_7

ตารางที่ 3.3 จุดข้างเคียงของแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p

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

<u>ขั้นที่ 3.</u> สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับทุกจุดค่าถ่วงน้ำหนัก

ในขั้นตอนนี้จะทำการสร้างสตริงคำตอบของพนักงาน คือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับพนักงาน (คนที่1 – คนที่6) ดังตารางที่ 3.4 และสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน คือการ

กำหนดลำดับความสำคัญให้กับขั้นงาน (A1-A12 และ B1-B9) ดังตารางที่ 3.5 ซึ่งจะเป็นการสุ่มเลือกแบบอิสระ (Random) แต่ละลำดับความสำคัญจะต้องไม่ซ้ำกัน จำนวนสตริงคำตอบจะเท่ากับจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดคือ 10 สตริงคำตอบ

ตารางที่ 3.4 สตริงคำตอบของพนักงาน

λ_p	string	Worker Priority					
		H	H	M	M	M	L
λ_1	1	6	3	2	1	4	5
λ_2	2	1	6	2	4	3	5
λ_3	3	5	6	3	1	4	2
λ_4	4	3	4	5	6	2	1
λ_5	5	3	6	1	4	2	5
λ_6	6	3	6	2	1	4	5
λ_7	7	2	3	1	5	4	6
λ_8	8	6	4	2	1	3	5
λ_9	9	3	2	5	6	4	1
λ_{10}	10	3	1	5	2	4	6

ตารางที่ 3.5 สตริงคำตอบของขั้นงาน

λ_p	string	Task Priority																			
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
λ_1	1	3	10	13	9	20	16	12	18	5	17	4	8	19	7	11	1	15	14	2	6
λ_2	2	2	3	18	11	20	19	8	14	13	15	4	12	9	5	16	17	7	1	6	10
λ_3	3	11	4	12	16	19	8	3	10	17	20	7	5	18	14	2	13	15	1	9	6
λ_4	4	4	8	6	1	2	20	5	14	15	3	12	18	10	13	7	11	16	9	17	19
λ_5	5	5	11	1	17	14	12	9	3	18	8	7	15	4	20	10	2	19	16	6	13
λ_6	6	3	15	17	9	8	11	2	14	1	4	19	7	13	5	10	6	16	12	20	18
λ_7	7	11	10	14	6	12	8	2	19	20	15	9	5	16	17	1	18	13	7	4	3
λ_8	8	5	18	15	11	20	13	3	4	10	19	9	7	1	17	8	12	16	14	6	2
λ_9	9	14	8	7	15	2	13	6	10	17	12	5	3	9	18	16	19	20	11	1	4
λ_{10}	10	2	15	9	12	10	13	8	6	7	3	18	5	4	17	1	20	19	16	11	14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจากนั้นทำการถอดรหัสสตริงคำตอบเพื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และทำการหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

String	objective				Max				Min			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	14.333	6	0.146	0.538	15.833	6.000	0.208	0.571	14.333	5.000	0.030	0.455
2	15.833	6	0.067	0.538								
3	15.333	6	0.208	0.538								
4	14.833	5	0.165	0.571								
5	15.333	6	0.121	0.455								
6	15.333	5	0.164	0.500								
7	15.500	6	0.062	0.571								
8	15.000	6	0.030	0.455								
9	15.333	5	0.145	0.500								
10	15.333	6	0.132	0.500								

<u>ขั้นที่ 4.</u> การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีเพื่อเข้ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

นำสตริงคำตอบของประชากรมาประเมินหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominate Sorting) ซึ่งจะได้ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง ตามตารางที่ 3.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.7 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของประชากรเริ่มต้น

String	objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
1	14.333	6.000	0.146	0.538	1
2	15.833	6.000	0.067	0.538	3
3	15.333	6.000	0.208	0.538	4
4	14.833	5.000	0.165	0.571	1
5	15.333	6.000	0.121	0.455	2
6	15.333	5.000	0.164	0.500	2
7	15.500	6.000	0.062	0.571	2
8	15.000	6.000	0.030	0.455	1
9	15.333	5.000	0.145	0.500	1
10	15.333	6.000	0.132	0.500	3

หลังจากนั้นจะเลือกเก็บเฉพาะคำตอบที่มีความแข็งแรง 1 (Fitness 1) ไว้ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนเรชั่นเริ่มต้น (G=0) ซึ่งทั้งสิ้น 4 สตริง คำตอบประกอบด้วย สตริงคำตอบที่ 1 4 8 และ9 ของเจเนอเรชั่นที่ 0 ตามตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 คำตอบที่ถูกอยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)

กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
1[0]	14.333	6.000	0.146	0.538
4[0]	14.833	5.000	0.165	0.571
8[0]	15.000	6.000	0.030	0.455
9[0]	15.333	5.000	0.145	0.500

การพัฒนาสตริงคำตอบ

เจเนอเรชั่นที่ 1 (G=1)

พิจารณาจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 ($p = 1$)

ขั้นที่ 5. กำหนดจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา

ด้วยการกำหนดค่า $p = 1$ โดยค่า $p = \{1,2, \dots ,10\}$ เพื่อสร้างประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อย คือสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 กับสตริงที่อยู่ในจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ตามตารางที่ 3.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.9 สตริงคำตอบและจุดค่าถ่วงน้ำหนักของประชากรย่อย เมื่อ $p = 1$

$\lambda_p = \{\lambda_{p1},\lambda_{p2},\lambda_{p3},\lambda_{p4}\}$	String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
$\lambda_1 =$ [0 1 0 0]	1	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]
$\lambda_3 =$ [0 0.5 0.5 0]	3	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]
$\lambda_4 =$ [0.5 0 0.5 0]	4	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 20 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
$\lambda_6 =$ [0.5 0.5 0 0]	6	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
$\lambda_7 =$ [0 0.5 0 0.5]	7	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]

ขั้นที่ 6. ทำการพัฒนาสตริงคำตอบโดยการสลับสายพันธุ์ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม

โดยเริ่มจากสุ่มสตริงคำตอบ 2 สตริงคำตอบที่อยู่ในประชากรย่อยตามตารางที่ 3.9โดย 2 สตริงคำตอบนั้นต้องไม่ซ้ำกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องสุ่มทั้งสิ้น 4 สตริงคำตอบโดยแบ่งออกเป็นสตริงคำตอบของขั้นงาน 2 สตริง และสตริงคำตอบของพนักงาน 2 สตริง ในตัวอย่างสมมติว่าสุ่มได้สตริงคำตอบของขั้นงานคือสตริงคำตอบที่ 3 และ 7 ตามตารางที่ 3.10 ส่วนสตริงคำตอบของพนักงานคือสตริงคำตอบที่ 1 และ 4 ตามตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.10 สตริงลำดับความสำคัญของขั้นงานที่สุ่มได้

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

ตารางที่ 3.11 สตริงลำดับความสำคัญของพนักงานที่สุ่มได้

string	Worker priority					
	H	H	M	M	M	L
1	6	3	2	1	4	5
4	3	4	5	6	2	1

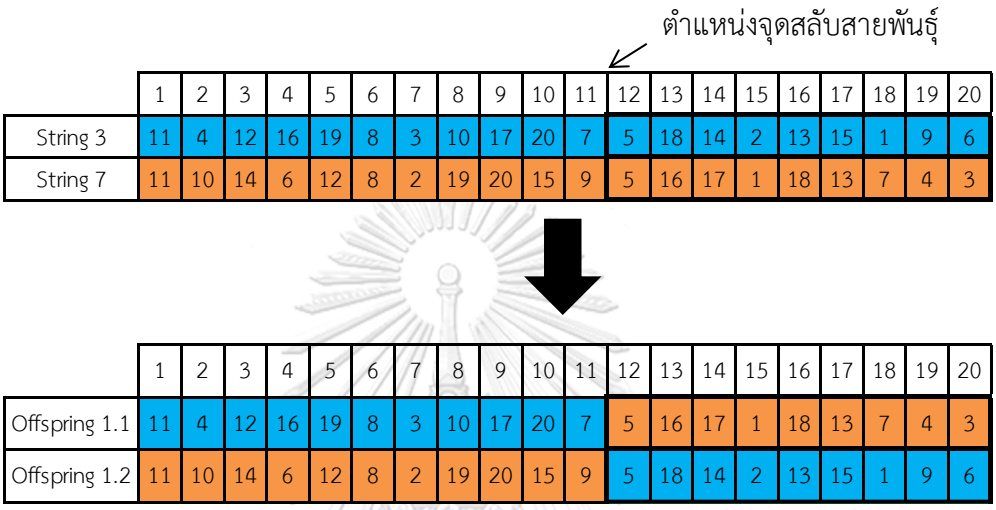
ต่อมาจะเริ่มทำการสลับสาย โดยวิธีการสลับสายพันธุ์นั้นมีอยู่หลายแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แบบ One-point Crossover คือการสลับสายพันธุ์ระหว่าง 2 สตริงคำตอบแบบ 1 ตำแหน่ง และทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยใช้ Mapping relationship และสามารถอธิบายหลักการในการพัฒนาสตริงคำตอบและการซ่อมแซมสตริงคำตอบได้เป็น 3 ขั้นตอนย่อยๆ ดังนี้

ขั้นที่ 6.1 สุ่มตำแหน่งที่จะทำการสลับสายพันธุ์ โดยสุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง N-1 เนื่องจาก N เท่ากับ 20 ดังนั้นจะทำการสุ่มค่า 1 ถึง 19 สมมติว่าสุ่มได้ 11 จากนั้นทำการสลับสายตรงตำแหน่งที่สุ่มได้ตามรูปที่ 3.2

ขั้นที่ 6.2 ทำการสุ่มเลือกว่าจะซ่อมแซ่มสตริงคำตอบก่อนตำแหน่งสลับสายพันธุ์หรือหลังตำแหน่งสลับสายพันธุ์ สมมติว่าสุ่มได้ว่าจะทำการซ่อมแซ่มสตริงคำตอบก่อนตำแหน่งสลับสายพันธุ์ ดังนั้นจะทำการคงค่าสตริงคำตอบหลังตำแหน่งสลับสายพันธุ์ และทำการพิจารณาว่าสตริงคำตอบก่อนตำแหน่งสลับสายพันธุ์นั้นมีบิตไหนบ้างที่ซ้ำกับสตริงคำตอบที่มีการคงค่าไว้ ซึ่งในสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที 1 (Offstring 1.1) ลำดับความสำคัญที่ซ้ำคือ 4, 16, 3, 17

และ 7 ส่วนสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offstring 1.2) ลำดับความสำคัญที่ซ้ำคือ 14, 6, 2, 15 และ 9 ตามรูปที่ 3.3

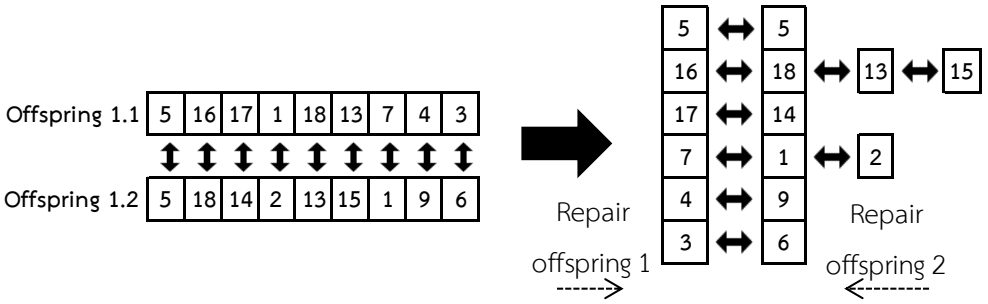
<u>ขั้นที่ 6.3</u> ทำการซ่อมแซมคำตอบรุ่นลูกให้ลำดับความสำคัญไม่ซ้ำกัน เริ่มจากสร้าง Mapping Relationship จากสตริงคำตอบที่คงค่าตามรูปที่ 3.4 ก



รูปที่ 3.2 การสลับสายพันธุ์สตริงคำตอบของขั้นงาน

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Offspring 1	11	4	12	16	19	8	3	10	17	20	7	5	16	17	1	18	13	7	4	3
Offspring 2	11	10	14	6	12	8	2	19	20	15	9	5	18	14	2	13	15	1	9	6

รูปที่ 3.3 ลำดับความสำคัญที่ซ้ำของสตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริงหลักจากทำการสลับสายพันธุ์



(ก) สร้าง Mapping Relationship จากลำดับความสำคัญที่คงค่า

(ข) การเปลี่ยนลำดับความสำคัญจาก Mapping Relationship

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้าง mapping relationship

หลังจากนั้นทำการซ่อมแซ่มสตริงคำตอบที่ซ้ำกันโดยใช้หลักการ Mapping relationship ดังรูปที่ 3.4ข ซึ่งสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) จะพิจารณา Mapping relationship จากซ้ายไปขวา โดยทำการเปลี่ยนลำดับความสำคัญได้ดังนี้ $5 \rightarrow 5, 16 \rightarrow 15, 17 \rightarrow 14, 7 \rightarrow 1 \rightarrow 2, 4 \rightarrow 9$ และ$3 \rightarrow 6$ ส่วนสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) จะพิจารณาจากขวามาซ้าย โดยทำการเปลี่ยนลำดับความสำคัญได้ดังนี้ $5 \rightarrow 5, 15 \rightarrow 16, 14 \rightarrow 17, 2 \rightarrow 1 \rightarrow 7, 9 \rightarrow 4$ และ$6 \rightarrow 3$ เมื่อทำการเปลี่ยนลำดับความสำคัญจนไม่มีค่าที่ซ้ำกัน จะได้สตริงคำตอบพัฒนาได้ทั้ง 2 สตริงคำตอบที่ผ่านการซ่อมแซ่มตามตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 สตริงคำตอบรุ่นลูกทั้ง 2 สตริงคำตอบที่ผ่านการซ่อมแซ่ม

string	Task priority																		
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Offspring 1.1	11	9	12	15	19	8	6	10	14	20	2	5	16	17	1	18	13	7	4	3
Offspring 1.2	11	10	17	3	12	8	7	19	20	16	4	5	18	14	2	13	15	1	9	6

ซึ่งเมื่อทำการพัฒนาสตริงคำตอบของพนักงานที่สุ่มได้ด้วยวิธีเดียวกัน จะได้สตริงคำตอบของขั้นงานและของพนักงานในสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริงคำตอบตามตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงานที่พัฒนาได้

String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน	พนักงาน 6 คน
Offspring 1.1	[11 9 12 15 19 8 6 10 14 20 2 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[6 3 2 4 5 1]
Offspring 1.2	[11 10 17 3 12 8 7 19 20 16 4 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[3 4 5 1 6 2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 7. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring)

นำสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง มาทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการถอดรหัสสตริงคำตอบ ซึ่งได้ค่าตามตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง

String	objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 1.1	14.333	6	0.066	0.538
Offspring 1.2	16.833	5	0.092	0.688

ขั้นที่ 8. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง

ซึ่งก่อนจะทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะต้องทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร โดยเทียบค่าในแต่ละวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริงในตารางที่ 3.14 กับค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิมตามตารางที่ 3.16 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่เปลี่ยนแปลงไป คือ ค่ามากที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 และ 4

ตารางที่ 3.15 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

String	objective				Max ใหม่				Min ใหม่			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 1.1	14.333	6	0.066	0.538	16.833	6	0.208	0.688	14.333	5	0.030	0.455
Offspring 1.2	16.833	5	0.092	0.688								
Max เดิม	15.833	6	0.208	0.571								
Min เดิม	14.333	5	0.030	0.455								

ต่อจากนั้นจะทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.0001) - z_i^*}$ เมื่อ i คือฟังก์ชันวัตถ์ประสงค์ ($i = 1, 2, 3, 4$) โดยที่ z_i^* และ z_i^{nad} คือค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการปรับปรุงแล้วตามตารางที่ 3.15 ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ทำการนอร์มัลไลแล้วจะมีค่าตามตารางที่ 3.16

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว

String	Norm-objective			
	$\bar{f}_1$	$\bar{f}_2$	$\bar{f}_3$	$\bar{f}_4$
1	0.00	1.00	0.65	0.36
3	0.40	1.00	1.00	0.36
4	0.20	0.00	0.76	0.50
6	0.40	0.00	0.75	0.20
7	0.47	1.00	0.18	0.50
Offspring 1.1	0.00	1.00	0.20	0.36
Offspring 1.2	1.00	0.00	0.35	1.00

ขั้นที่ 9. การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

ซึ่งมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและการแทนที่สตริงตอบอยู่ 4 ขั้นตอนย่อยดังนี้ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 9.1 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับสตริงคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 λ_{1i} ตามตารางที่ 3.17

ขั้นที่ 9.2 หาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le 4}\{\lambda_{pi} \times \overline{f_i}\}$ ของ String1, Offspring 1.1 และ Offspring 1.2 ซึ่งมีค่า 1, 1 และ 0 ตามลำดับดังตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ผ่านการนอร์มัลไลแล้วไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	$\lambda_{11} \times \overline{f_1}$	$\lambda_{12} \times \overline{f_2}$	$\lambda_{13} \times \overline{f_3}$	$\lambda_{14} \times \overline{f_4}$
1	1	0	1	0	0	0.00	1.00	0.00	0.00
1	Offspring 1.1	0	1	0	0	0.00	1.00	0.00	0.00
1	Offspring 1.2	0	1	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 3.18 ค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ของสตริงคำตอบ String1, Offspring 1.1 และ Offspring 1.2

P	String	$\lambda_{11} \times \overline{f_1}$	$\lambda_{12} \times \overline{f_2}$	$\lambda_{13} \times \overline{f_3}$	$\lambda_{14} \times \overline{f_4}$	$g(x\|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le 4}\{\lambda_{1i} \times \overline{f}_i\}$
1	1	0.00	1.00	0.00	0.00	1
1	Offspring 1.1	0.00	1.00	0.00	0.00	1
1	Offspring 1.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0

ขั้นที่ 9.3 จากการพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ ตามตารางที่ 3.18 จะสามารถบอกได้ว่าสตริงคำตอบในรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริงเป็นสตริงคำตอบที่ดีกว่าสตริงคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_1) เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ น้อยกว่าหรือเทียบเท่า ซึ่งสตริงคำตอบในรุ่นลูกสตริงที่ 2 เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ น้อยกว่าสตริงคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_1) ซึ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.19

ตารางที่ 3.19 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 (λ_1) กับคำตอบในรุ่นลูก (Offspring) ที่ได้จากการสลับสายพันธุ์ 1 ตำแหน่ง

P	String	$g(x\|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le 4}\{\lambda_{1i} \times \overline{f_i}\}$	Selection
1	1	1	
1	Offspring 1.1	1 (เท่ากับ)	Good
1	Offspring 1.2	0 (น้อยกว่า)	Best

<u>ขั้นที่ 9.4</u> จากตารางที่ 3.19 จะเห็นได้ว่าสตริงคำตอบในรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจะทำการแทนที่สตริงคำตอบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ตามตารางที่ 3.20 และ ตารางที่ 3.21 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.20 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 (λ_1)

$\lambda_p = \{\lambda_{p1},\lambda_{p2},\lambda_{p3},\lambda_{p4}\}$	String	ขั้นงาน 20 ชิ้นงาน	พนักงาน 6 คน
[0 1 0 0]	Offspring 1.2	[11 10 17 3 12 8 7 19 20 16 4 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[3 4 5 1 6 2]
[0 0.5 0.5 0]	3	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]
[0.5 0 0.5 0]	4	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 20 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
[0.5 0.5 0 0]	6	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
[0 0.5 0 0.5]	7	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]

ตารางที่ 3.21 การแทนที่ค่าวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1)

$\lambda_p = \{\lambda_{p1},\lambda_{p2},\lambda_{p3},\lambda_{p4}\}$	String	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
[0 1 0 0]	Offspring 1.2	16.833	5	0.092	0.688
[0 0.5 0.5 0]	3	15.333	6	0.208	0.538
[0.5 0 0.5 0]	4	14.833	5	0.165	0.571
[0.5 0.5 0 0]	6	15.333	5	0.164	0.500
[0 0.5 0 0.5]	7	15.500	6	0.062	0.571

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ต่อจากนั้นจะนำคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่ทำการแทนที่เป็นที่เรียบร้อบแล้วเก็บไว้ในคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้าตามตารางที่ 3.22 แล้วไปทำต่อในขั้นตอนที่ 10

ตารางที่ 3.22 คำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า

กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
1[0]	14.333	6.000	0.146	0.538
4[0]	14.833	5.000	0.165	0.571
8[0]	15.000	6.000	0.030	0.455
9[0]	15.333	5.000	0.145	0.500
Offspring 1.2[1]	16.833	5.000	0.092	0.688

ขั้นที่ 10. ทำการสุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) เท่ากับจำนวนที่กำหนดและทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ที่ได้มีการแทนที่คำตอบในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) หรือสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่สุดกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

โดยมีขั้นตอนการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อทำการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบอยู่ 4 ขั้นตอนย่อยๆ ดังต่อไปนี้ โดยค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเท่ากับ 0.3 และจำนวนของจุดข้างเคียงเท่ากับ 4 จำนวนของประชากรย่อยเท่ากับ 5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 10.1 จำนวนจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ต้องสุ่มเท่ากับ $0.3 \times 5 = 1.5$ ทำการปัดค่าขึ้นเสมอจึงทำการสุ่มจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 จำนวน 2 จุด

ขั้นที่ 10.2 สมมติว่าสุ่มได้ λ_3 และ λ_7

ขั้นที่ 10.3 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) ตามตารางที่ 3.23 และนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 (λ_7) ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 (λ_7) ตามตารางที่ 3.24

ตารางที่ 3.23 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3)

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	$\lambda_{31} \times \bar{f_1}$	$\lambda_{32} \times \bar{f_2}$	$\lambda_{33} \times \bar{f_3}$	$\lambda_{34} \times \bar{f_4}$
3	3	0	0.5	0.5	0	0.00	0.50	0.50	0.00
3	Offspring 1.2	0	0.5	0.5	0	0.00	0.00	0.175	0.00

ตารางที่ 3.24 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 (λ_7)

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	$\lambda_{71} \times \bar{f_1}$	$\lambda_{72} \times \bar{f_2}$	$\lambda_{73} \times \bar{f_3}$	$\lambda_{74} \times \bar{f_4}$
7	7	0	0.5	0	0.5	0.00	0.50	0.00	0.25
7	Offspring 1.2	0	0.5	0	0.5	0.00	0.00	0.00	0.50

ขั้นที่ 10.4 จากตารางที่ 3.25 เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) มีค่าเท่ากับ 0.175 กับค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.50 แล้วค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 มีค่าน้อยกว่านั้นจะถือว่าสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 เป็นคำตอบที่ดีกว่า ต่อมาพิจารณาตารางที่ 3.26 ค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) มีค่าเท่ากับ 0.50 และค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบที่ 7 มีค่าเท่ากับ 0.50 แล้วค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 มีค่าเทียบเท่าจะถือว่าสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 เป็นคำตอบที่ดีกว่า ดังนั้นจะทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของรุ่นลูกสตริงที่ 2 (Offspring 1.2) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 (λ_7) ตามตารางที่ 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.25 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 2 ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 (λ_7)

$\lambda_p = \{\lambda_{p1}, \lambda_{p2}, \lambda_{p3}, \lambda_{p4}\}$	String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน	พนักงาน 6 คน
[0 1 0 0]	Off 1.2	[11 10 17 3 12 8 7 19 20 16 4 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[3 4 5 1 6 2]
[0 0.5 0.5 0]	Off 1.2	[11 10 17 3 12 8 7 19 20 16 4 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[3 4 5 1 6 2]
[0.5 0 0.5 0]	4	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 20 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
[0.5 0.5 0 0]	6	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
[0 0.5 0.5 0]	Off 1.2	[11 10 17 3 12 8 7 19 20 16 4 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[3 4 5 1 6 2]

ตารางที่ 3.26 การแทนที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 2 ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 7 (λ_7)

$\lambda_p = \{\lambda_{p1},\lambda_{p2},\lambda_{p3},\lambda_{p4}\}$	String	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
[0 1 0 0]	Off 1.2	16.833	5	0.092	0.688
[0 0.5 0.5 0]	Off 1.2	16.833	5	0.092	0.688
[0.5 0 0.5 0]	4	14.833	5	0.165	0.571
[0.5 0.5 0 0]	6	15.333	5	0.164	0.500
[0 0.5 0 0.5]	Off 1.2	16.833	5	0.092	0.688

ขั้นที่ 11. หาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรใหม่

หลังจากทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่คำตอบที่ดีในประชากรย่อย จะต้องหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรใหม่ ตามตารางที่ 3.27

ตารางที่ 3.27 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

String	objective				Max				Min			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Off 1.2	16.833	5	0.092	0.688	16.833	6.000	0.165	0.688	14.333	5.000	0.030	0.455
2	15.833	6	0.067	0.538								
Off 1.2	16.833	5	0.092	0.688								
4	14.833	5	0.165	0.571								
5	15.333	6	0.121	0.455								
6	15.333	5	0.164	0.500								
Off 1.2	16.833	5	0.092	0.688								
8	15.000	6	0.030	0.455								
9	15.333	5	0.145	0.500								
10	15.333	6	0.132	0.500								

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การพิจารณาการจบการทำงาน

ขั้นที่ 12. ทำการเช็คว่าได้ทำการพัฒนาคำตอบให้กับทุกประชากรย่อยหรือปัญหาย่อยแล้วหรือไม่ (พัฒนาคำตอบครบ 1 เจเนอเรชั่นแล้วหรือไม่)

หลังจากนั้น เช็คว่า $p < P$ หรือไม่ถ้าใช่ให้กำหนด $p = p + 1$ และวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 ซึ่งในโจทย์ตัวอย่างกำหนดให้ $P = 10$ หมายความว่าจะต้องทำการพัฒนาสตริงคำตอบตามขั้นที่ 5-12 อีก 9 ครั้ง เมื่อครบ 10 ปัญหาย่อย จะถือว่าครบ 1 เจเนอเรชั่น จะข้ามไปขั้นตอนที่ 13 ต่อ

ขั้นที่ 13. ทำการคัดเลือกหาคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นปัจจุบัน เพื่อให้เหลือเฉพาะคำตอบที่ดีสุด

เริ่มจากนำคำตอบที่ที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยคำตอบที่ที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 0 และคำตอบของรุ่นลูกที่ดีในแต่ประปัญหาย่อยหรือประชาย่อยที่มีการแทนที่คำตอบ มากำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominate Sorting) ซึ่งจะได้ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงตามตารางที่ 3.28

ตารางที่ 3.28 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า

กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)					
String	Objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
1[0]	14.333	6.000	0.146	0.538	3
4[0]	14.833	5.000	0.165	0.571	2
8[0]	15.000	6.000	0.030	0.455	1
9[0]	15.333	5.000	0.145	0.500	2
Offspring 1.2[1]	16.833	5.000	0.092	0.688	2
Offspring 2.1[1]	14.333	6.000	0.085	0.538	2
Offspring 4.1[1]	14.333	5.000	0.057	0.500	1
Offspring 5.2[1]	15.000	6.000	0.053	0.455	2
Offspring 7.2[1]	14.000	5.000	0.084	0.538	1
Offspring 10.1[1]	14.000	6.000	0.043	0.538	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หลักจากนั้นจะเลือกเก็บเฉพาะคำตอบที่มีความแข็งแรง 1 (Fitness 1) ไว้ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนเรชั่นที่ 1 ทั้งหมด 4 สตริงคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย สตริงคำตอบที่ 8 เจเนเรชันที่ 0 (String 8[0]) และสตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนเรชันที่ 1 ที่เกิดจากพัฒนาคำตอบในปัญหาย่อยที่ 4 สตริงที่ 1 (Offspring 4.1[1]) ปัญหาย่อยที่ 7 สตริงที่ 2 (Offspring 7.2[1]) และปัญหาย่อยที่ 10 สตริงที่ 1 (Offspring 10.1[1]) ตามตารางที่ 3.29

ตารางที่ 3.29 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นที่ 1

กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
8[0]	15.000	6.000	0.030	0.455
Offspring 4.1[1]	14.333	5.000	0.057	0.500
Offspring 7.2[1]	14.000	5.000	0.084	0.538
Offspring 10.1[1]	14.000	6.000	0.043	0.538

ขั้นที่ 14. การขึ้นเจเนอเรชั่นใหม่และการจบการทำงาน

เมื่อทำการพัฒนาสตริงคำตอบตามขั้นตอนที่ 5 -12 ครบทุกปัญหาย่อย จะได้รับสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชั่นปัจจุบัน เพื่อเอาไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชั่นถัดไป หลังจากนั้น เช็คว่า $G < Genaretion$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้กำหนด $G = G + 1,\ p = 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 ซึ่งในตัวอย่างนี้จะกำหนดให้ Generation เท่ากับ 10 หมายความว่าจะต้องทำการพัฒนาสตริงคำตอบตาม 5-12 ทั้งหมด 10x10=100 ครั้ง จึงจะจบการพัฒนาคำตอบของสตริง ซึ่งจะถือว่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 10 ตามตารางที่ 3.30 เป็นกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D ซึ่งมีลำดับความสำคัญของขั้นงานและพนักงานตามตารางที่ 3.31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.30 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบเจเนอเรชั่นที่ 10

String	objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
8[0]	15.000	6.000	0.030	0.455	1
Offspring 10.1[1]	13.333	6.000	0.012	0.538	1
Offspring 8.1[3]	13.500	5.000	0.039	0.400	1
Offspring 7.2[5]	14.000	4.000	0.057	0.455	1
Offspring 9.1[5]	14.000	5.000	0.043	0.333	1
Offspring 1.1[8]	14.333	5.000	0.040	0.333	1
Offspring 10.2[10]	14.500	4.000	0.071	0.333	1

ตารางที่ 3.31 ลำดับความสำคัญของขั้นงานและพนักงานของสตริงคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D

String	ขั้นงาน 20 ชิ้งาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
8[0]	[5 18 15 11 20 13 3 4 10 19 9 7 1 17 8 12 16 14 6 2]	[6 4 2 1 3 5]
Offspring 10.1[1]	[1 19 14 12 18 4 9 17 5 10 20 6 3 15 16 8 11 13 7 2]	[2 3 1 4 5 6]
Offspring 8.1[3]	[7 20 13 10 18 16 12 5 1 14 3 15 19 4 11 9 2 8 17 6]	[2 6 1 3 5 4]
Offspring 7.2[5]	[11 16 18 9 8 13 20 6 19 4 7 14 3 1 10 12 5 15 17 2]	[6 3 2 4 1 5]
Offspring 9.1[5]	[15 18 7 17 3 13 16 4 5 6 20 9 8 10 1 1 19 12 2 14]	[4 2 3 5 6 1]
Offspring 1.1[8]	[13 16 18 15 17 6 3 14 7 1 4 10 8 12 11 20 9 2 5 19]	[2 1 3 4 6 5]
Offspring 10.2[10]	[12 19 17 15 13 2 9 18 8 5 4 16 1 7 11 20 6 10 14 3]	[3 4 6 2 5 1]

บทที่ 4

อัลกอริทึมการบรรจวบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence : COIN) พารามิเตอร์ที่สำคัญๆของ COIN และขั้นตอนการทำงานของ COIN สำหรับการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณ

4.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN)

วิธีการแบบบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence: COIN) มีแนวคิดหลักคือการศึกษาหาแนวทางของคำตอบที่ดี (Good Solution frontier) และคำตอบที่ไม่ดี (No Good Solution frontier) ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันเพื่อนำมากำหนดทิศทางในการหาคำตอบ โดยทำการสร้างตารางความน่าจะเป็นขึ้นมาเป็นตารางเมทริกซ์แล้วทำการสุ่มเลือกเพื่อมาสร้างประชากรในแต่ละเจเนอเรชั่น โดยจะมีการปรับปรุงความน่าจะเป็นจากทั้งคำตอบที่ดีและคำตอบที่ไม่ดีเมื่อจบกระบวนการหาคำตอบในแต่ละเจเนอเรชั่น ทำให้ทุกคู่อันดับที่อยู่ในคำตอบที่ดีจะมีค่าความน่าจะเป็นร่วมเพิ่มขึ้น แต่ทุกคู่อันดับที่อยู่ในคำตอบที่ไม่ดีจะมีค่าความน่าจะเป็นร่วมลดลง ดังนั้นคำตอบตอบที่ดีก็จะมีโอกาสถูกสุ่มได้มากขึ้น ส่วนคำตอบตอบที่ไม่ดีก็จะมีโอกาสถูกสุ่มได้น้อย ซึ่งจะนำตารางที่มีการปรับปรุงความน่าจะเป็นไปสร้างสตริงคำตอบของประชากรในเจเนอเรชั่นถัดไป และจะเก็บเฉพาะคำตอบที่ดีไว้ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) (ปารเมศและคณะ 2552)

4.2 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN)

พารามิเตอร์หลักๆที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมการบรรจวบมี 3 ตัวแปร ดังนี้

4.2.1 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

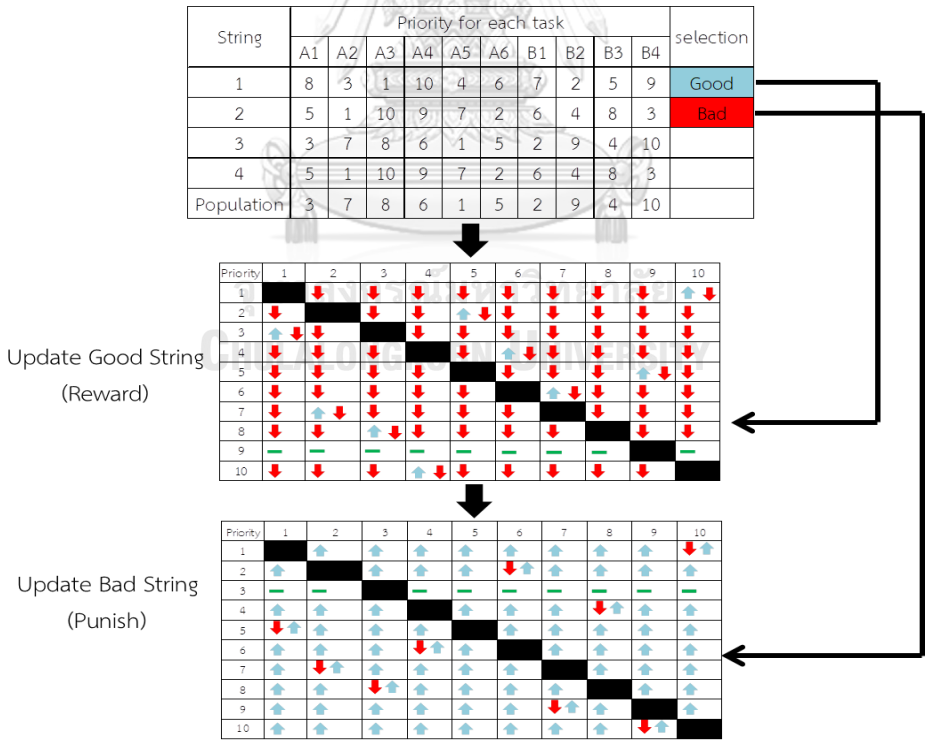
คือตัวกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น ถ้ามีค่าสูงจะทำให้จำนวนสตริงคำตอบที่เลือกมามีมากเกินความจำเป็นจะทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดให้ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นเท่ากับ 20 และกำหนดให้จำนวนประชากรเบื้องต้น (Population) เท่ากับ 100 ดังนั้นจะทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดี (Good string) และสตริงคำตอบที่ไม่ดี (Bad string) อย่างมากจำนวนเท่ากับ 0.2 X 100 เท่ากับ 20 ตัว

4.2.2 ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish)

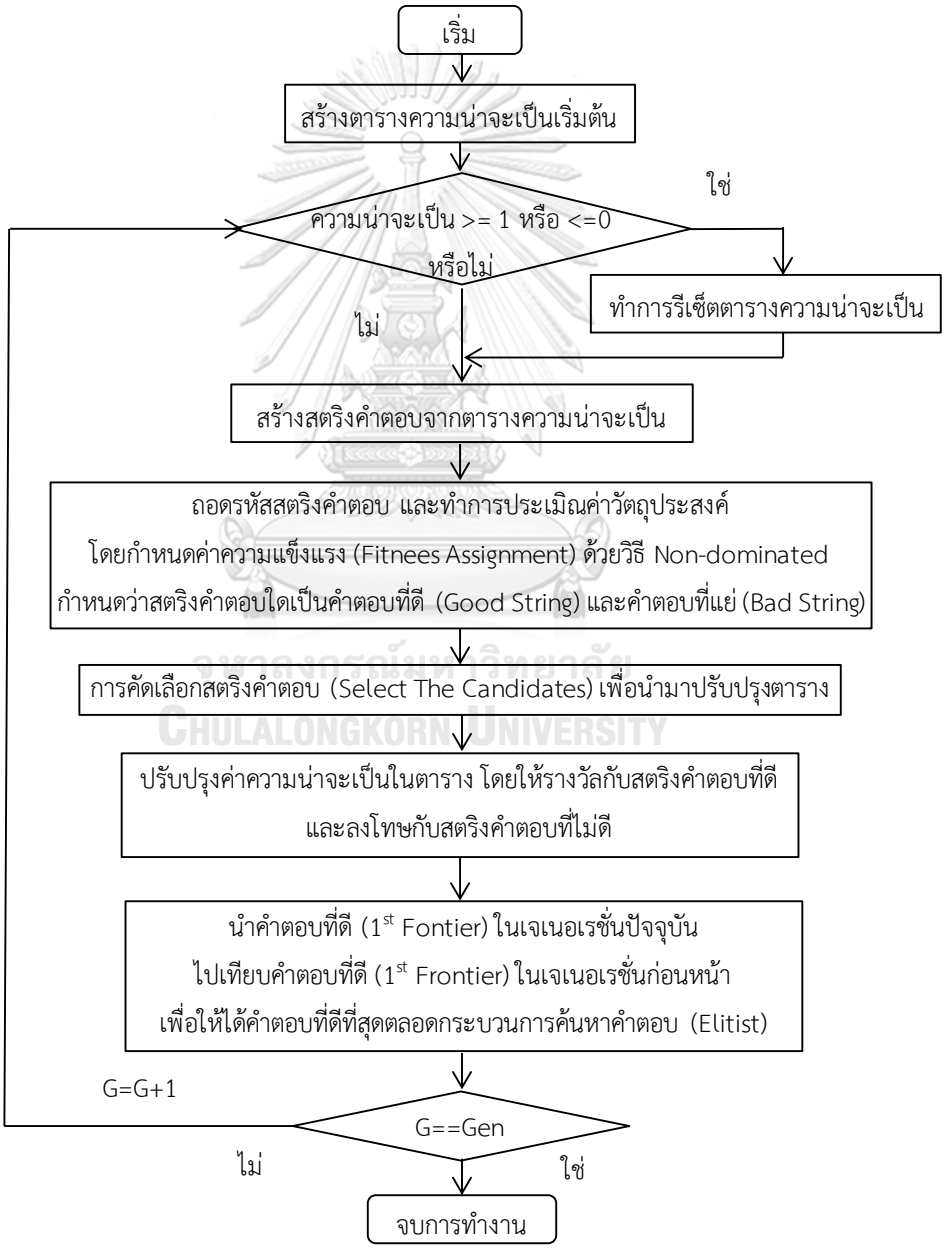
ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และการลงโทษ (Punish) มีความสำคัญ เนื่องจากใช้ในการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็นตามรูป 4.1 โดยการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าคำตอบที่ที่คิดว่าเป็นคำตอบไม่ดี และเพิ่มโอกาสในการเลือกคำตอบที่ดีให้มีสิทธิในการถูกเลือกมากขึ้น โดยจะคัดเลือกคำตอบที่ดีและไม่ดีโดยใช้การกำหนดความแข็งแรงให้กับกลุ่มคำตอบโดยวิธีจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ ช่วยทำให้พื้นที่ของคำตอบที่เราสนใจมีขนาดที่แคบไม่กระจัดกระจาย ทำให้คำตอบในการหาแต่ละรอบลู่สู่ค่าเหมาะสมมากกว่าวิธีอัลกอริทึมอื่น



รูปที่ 4.1 การปรับปรุงตารางความนาจะเป็น

4.3 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบในแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 สามารถแบ่งได้ 6 ขั้นตอน และมีแผนผังการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบตามรูปที่ 4.2 ดังนี้



รูปที่ 4.2 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมการบรรจวบ

1. สร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้น โดยจะสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นขนาด $1 \times N$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก (Probability Matrix of Prioritizing First Task) กับตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นขนาด $1 \times N_w$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนแรก (Probability Matrix of Prioritizing First Worker) ตามตารางที่ 4.1 และสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N \times N$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป (Joint Probability Matrix of Prioritizing Each Task) กับตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N_w \times N_w$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานถัดไป (Joint Probability Matrix of Prioritizing Each Worker) ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรกและพนักงานคนแรก

Priority				
1	2	...	...	N (N_w)
$1/N$ ($1/N_w$)	$1/N$ ($1/N_w$)	$1/N$ ($1/N_w$)	$1/N$ ($1/N_w$)	$1/N$ ($1/N_w$)

ตารางที่ 4.2 ความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้ขั้นงานถัดไปและพนักงานคนถัดไป

Priority	j 1	2	...	...	N (N_w)
i 1		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
2	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
...	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
...	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
N (N_w)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. การสร้างสตริงคำตอบจากตารางความน่าจะเป็น โดยการสร้างสตริงคำตอบนั้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ สร้างสตริงคำของขั้นงาน และสร้างสตริงคำของพนักงาน ซึ่งทั้ง มีขั้นตอนในการสร้างสตริงคำตอบที่คล้ายกันต่างกันที่ตารางที่ใช้ คือ สร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน(พนักงาน)ที่ละสตริงคำตอบโดยเลือกลำดับความสำคัญจากตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก(พนักงานคนแรก) และตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้ขั้นงานถัดไป(พนักงานคนถัดไป) ทำจนได้สติงคำตอบเท่ากับ Population Size ตามตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 แต่ก่อนจะสร้างสตริงคำตอบได้นั้นต้องทำการเช็คก่อนว่าการปรับปรุงสตริงคำตอบในรอบก่อนทำให้ ค่าความน่าจะเป็นนั้นมีค่ามากกว่าเท่ากับ 1 หรือมีค่าน้อยกว่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าใช่ต้องทำการรีเซ็ตตารางก่อนทำการสร้างสตริงคำตอบ

ตารางที่ 4.3 สตริงคำตอบลำดับความสำคัญของขั้นงาน

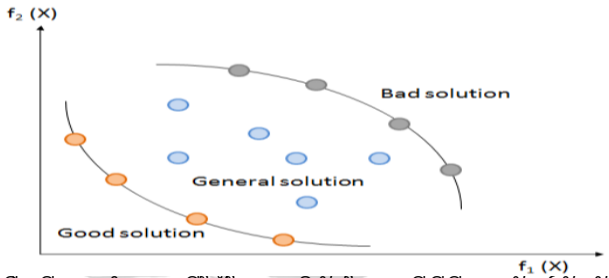
String	Priority for each task									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4
1	8	3	1	10	4	6	7	2	5	9
2	5	1	10	9	7	2	6	4	8	3
...										
...										
Population	3	7	8	6	1	5	2	9	4	10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.4 สตริงคำตอบลำดับความสำคัญของพนักงาน

String	Priority for each worker			
	H	M	M	L
1	4	2	1	3
2	2	3	4	1
...				
...				
Population	1	4	3	2

3. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และประเมินค่า คือ การคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และทำการจัดอันดับของคำตอบโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วย Non-dominated Sorting เพื่อที่ประเมินว่าลำดับความสำคัญของขั้นงานและของพนักงานไหนบ้าง ที่ทำเกิดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดี (Good String) และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ไม่ดี (Bad String) ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะพีนทีของคำตอบที่ใช้ในงานวิจัยในกรณีที่มีสองฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4. การคัดเลือกสตริงคำตอบ (Select the Candidates) เป็นการเลือกคำตอบที่ดี (Good string) และคำตอบที่ไม่ดี (Bad string) ให้ไม่เกินจำนวนที่คิดจากร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

5. การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ เป็นการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น โดยการให้รางวัล (Reward) และทำการลงโทษ (Punish) โดยมีค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและการลงโทษเท่ากับ k ซึ่งมีหลักการปรับปรุงดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- การให้รางวัล (Reward) กับคำตอบที่ดี คือการนำสตริงคำตอบที่ดีที่ได้จากการคัดเลือกมาพิจารณาทีละคู่ลำดับเพื่อเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้คู่อันเท่ากับ $\frac{k}{(n-1)}$ และทำการลดค่าความน่าจะเป็นในทุกคู่อันเท่ากับ $\frac{k}{(n-1)^2}$ เพื่อที่ว่าความจะเป็นรวมในการเลือกลำดับสำคัญถัดไปจะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ
- การให้ลงโทษ (Punish) กับคำตอบที่ไม่ดี คือการนำสตริงคำตอบที่ไม่ดีที่ได้จากการคัดเลือกมาพิจารณาทีละคู่ลำดับเพื่อลดค่าความน่าจะเป็นให้คู่อันเท่ากับ $\frac{k}{(n-1)}$ และทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในทุกคู่อันเท่ากับ $\frac{k}{(n-1)^2}$ เพื่อที่ว่าความจะเป็นรวมในการเลือกลำดับสำคัญถัดไปจะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

6. เก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม คือเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสติรงคำตอบที่ดี (Good String) ทุกคำตอบในรอบปัจจุบันมารวมกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า และทำการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการ Non-dominated Sorting เพื่อเก็บคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบปัจจุบัน ถ้ารอบการทำงานยังไม่เท่ากับรอบสูงสุดที่ทำการทดลอง ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 2 โดยใช้ตารางความน่าจะเป็นที่ได้รับการปรับปรุงจากขั้นตอนที่ 5 ไปสร้างเป็นสตริงคำตอบในรอบถัดไป แต่ถ้าครบตามจำนวนเจเนอเรชั่นที่กำหนด

4.4 ตัวอย่างการใช้ COIN ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

จากขั้นตอนของ COIN ที่ได้นำเสนอ สามารถนำมาทดลองใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและการจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงาน ที่มี 4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ที่มีขั้นงานของทั้ง 2 สายการประกอบเท่ากับ 20 ขั้นงาน (A =11 ขั้นงาน และ B =9 ขั้นงาน โดยมีพนักงาน 6 คน (สถานีงาน 6 สถานีงาน) ซึ่งอัตราส่วนของทักษะพนักงาน High : Medium : Low เป็น 2 : 3 : 1 โดยมีพารามิเตอร์และขั้นตอนการทำงานดังนี้

พารามิเตอร์ของ COIN ที่เลือกใช้ คือ

- จำนวนประชากรสตริงคำตอบเท่ากับ 5 สตริง
- ร้อยละของจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นเท่ากับ 20
- ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) หรือค่า k เท่ากับ 0.1
- จำนวนเจเนอเรชั่น 10 เจเนอเรชั่น

ขั้นตอนการทำงาน

<u>เจเนอเรชั่นที่ 1 (G=1)</u>

<u>ขั้นที่ 1.</u> สร้างตารางเมทริกซ์เริ่มต้น

สร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นขนาด $1 \times N$ สำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก และสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N \times N$ สำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป เมื่อ N คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด โดยค่าความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรกเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{N} = \frac{1}{20} = 0.05$ และความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรขั้นงานถัดไปมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{N-1} = \frac{1}{19} = 0.0526$ ดังตารางที่ 4.5 ดังตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 ค่าความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรกของโจทย์ตัวอย่าง

Priority																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

ตารางที่ 4.6 ค่าความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปของโจทย์ตัวอย่าง

Priority	1	2	3	4	5	6	....	....	15	16	17	18	19	20
1		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
2	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
3	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
4	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
5	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
6	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
...	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
...	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
15	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
16	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053
17	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053
18	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053
19	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053
20	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แต่ในงานวิจัยนี้มีการจัดสรรพนักงานร่วมด้วยจึงต้องสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นขนาด $1 \times N_w$ สำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนแรก และสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N_w \times N_w$ สำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนถัดไป ซึ่ง N_w คือจำนวนพนักงานหรือจำนวนสถานีงานทั้งหมด โดยค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนแรกและความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรพนักงานคนถัดไปมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $\frac{1}{N_w} = \frac{1}{6} = 0.16667$ และ $\frac{1}{N_w - 1} = \frac{1}{5} = 0.2$ ดังตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนแรก

Priority					
1	2	3	4	5	6
0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167

ตารางที่ 4.8 ค่าความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรขั้นพนักงานคนถัดไป

Priority	1	2	3	4	5	6
1		0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
2	0.200		0.200	0.200	0.200	0.200
3	0.200	0.200		0.200	0.200	0.200
4	0.200	0.200	0.200		0.200	0.200
5	0.200	0.200	0.200	0.200		0.200
6	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	

<u>ขั้นที่ 2.</u> การสร้างสตริงคำตอบจากตารางความน่าจะเป็น

การสร้างสตริงคำตอบของขั้นงานคือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับขั้นงาน (A1-A1 และ B1-B9) โดยใช้ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก เพื่อหาลำดับความคัญของขั้นงานแรก และใช้ตารางความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป สตริงคำตอบที่ได้จะต้องมีลำดับความสำคัญที่ซ้ำกัน ส่วนการสร้างสตริงคำตอบของพนักงานนั้น คือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับพนักงาน (คนที่1 – คนที่6) ซึ่งจะมีขั้นตอนเหมือนกับการสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน แต่จะแตกต่างกันที่ใช้ตารางเมทริกซ์คนละตารางกัน โดยมีขั้นตอนย่อยๆ ในการสร้างสตริงคำตอบดังนี้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>ตัวอย่างการสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน</u>

<u>ขั้นที่ 2.1</u> พิจารณาค่าความน่าจะเป็นว่ามีค่ามากกว่าเท่ากับ 1 หรือน้อยกว่าเท่ากับ 0 หรือไม่ได้ ซึ่งในที่นี้ไม่มีค่าความน่าใดเลยที่เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นไม่มีการรีเซ็ตตารางความน่าจะเป็นร่วมในแถวใดเกิดขึ้น และสามารถเริ่มสร้างสตริงคำตอบได้ทันที

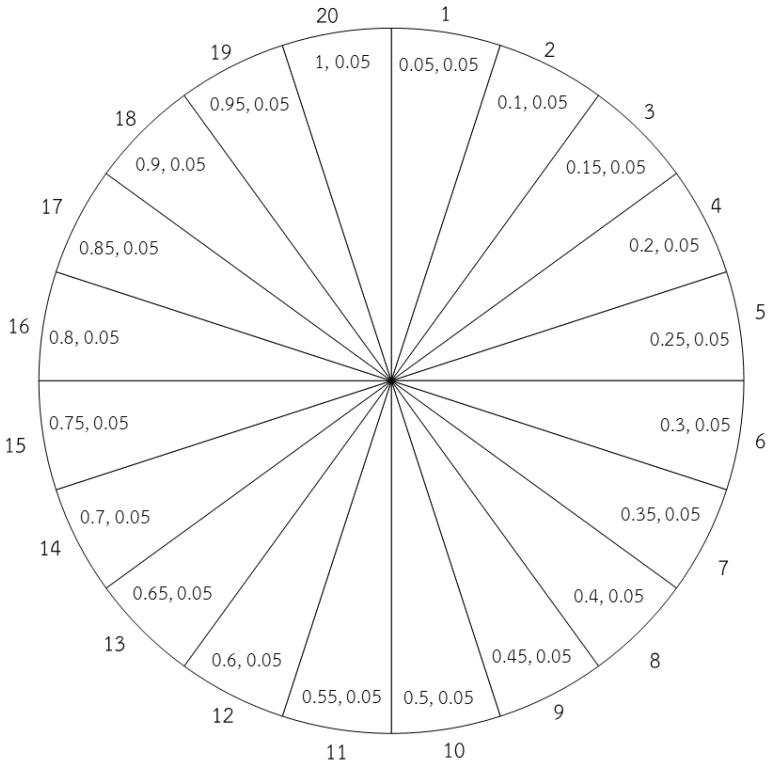
<u>ขั้นที่ 2.2</u> กำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก ในที่นี้คือ A1 จะเห็นได้ว่าสามารถเลือกลำดับความสำคัญใดก็ได้ ซึ่งทุกลำดับความสำคัญมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.05 โดยวิธีการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญนั้นจะใช้ Roulette Wheel Selection (Goldberg, 1989) ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นวงกลมที่มีพื้นที่ 1 หน่วย โดยพื้นที่

จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ จากนั้นทำการหมุนวงล้อ ซึ่งในที่นี้สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.27 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A1 จะเท่ากับ 6

ตารางที่ 4.9 การสร้างวงล้อรูเร็ตในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญของขั้นงานแรก

ลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
1	0.05	0.05	0.05
2	0.05	0.05	0.1
3	0.05	0.05	0.15
4	0.05	0.05	0.2
5	0.05	0.05	0.25
6	0.05	0.05	0.3
7	0.05	0.05	0.35
8	0.05	0.05	0.4
9	0.05	0.05	0.45
10	0.05	0.05	0.5
11	0.05	0.05	0.55
12	0.05	0.05	0.6
13	0.05	0.05	0.65
14	0.05	0.05	0.7
15	0.05	0.05	0.75
16	0.05	0.05	0.8
17	0.05	0.05	0.85
18	0.05	0.05	0.9
19	0.05	0.05	0.95
20	0.05	0.05	1
รวม	1	1	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



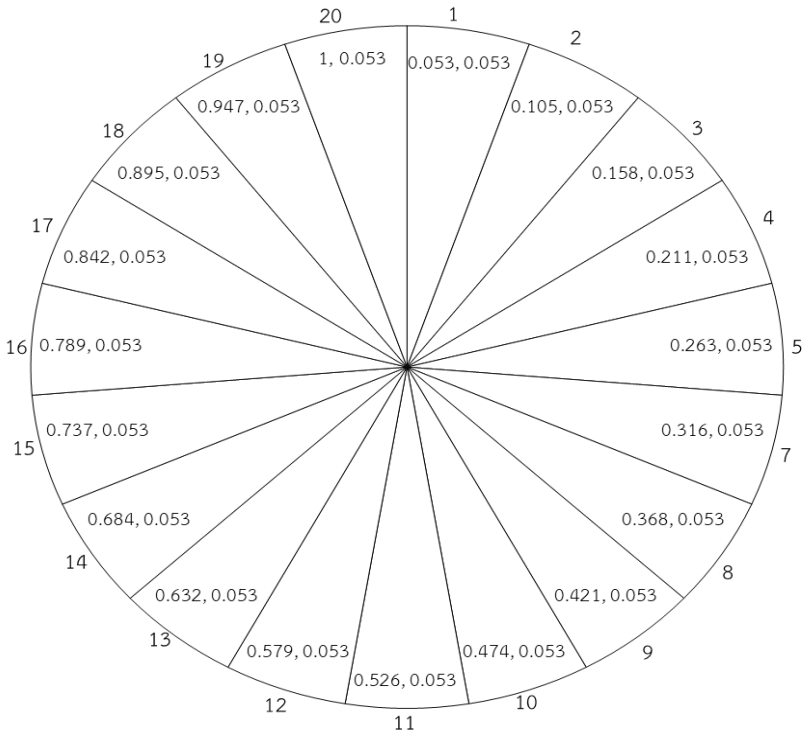
รูปที่ 4.4 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรของขั้นงานแรก (A1)

<u>ขั้นที่ 2.3</u> ทำการปรับปรุงลำดับความสำคัญที่เลือกได้ โดยลำดับความสำคัญที่เลือกไปแล้วคือลำดับความสำคัญที่ 6 ซึ่งจะไม่สามารถเลือกได้อีก

<u>ขั้นที่ 2.4</u> กำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานที่ 2 ในที่นี้คือ A2 โดยพิจารณาตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 6 ซึ่งลำดับความสำคัญที่ไม่สามารถเลือกนั้น คือ 6 และค่าความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้มีค่าเท่ากับ 0.053 ทั้งหมด ตามตารางที่ 4.10 และทำการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญโดยใช้ Roulette Wheel Selection ตามรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการหมุนวงล้อ ซึ่งในที่นี้สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.46 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A2 จะเท่ากับ 10

ตารางที่ 4.10 ค่าความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 6

Priority	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	...	18	19	20
6	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053



รูปที่ 4.5 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรของขั้นงานที่ 2 (A2)

ขั้นที่ 2.5 ทำการปรับปรุงลำดับความสำคัญที่เลือกได้ โดยลำดับความสำคัญที่เลือกไปแล้วคือลำดับความสำคัญที่ 6 และ10 ซึ่งจะไม่สามารถเลือกได้อีก

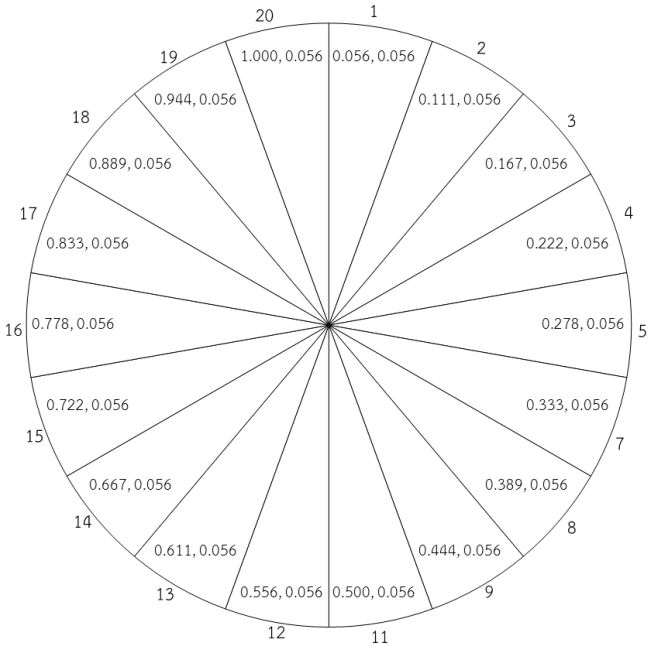
ขั้นที่ 2.6 กำหนดลำดับความสำคัญให้ขั้นงานที่ 3 ในที่นี้คือ A3 โดยพิจารณาตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป แถวที่ 10 ซึ่งลำดับความสำคัญที่ไม่สามารถเลือกนั้น คือลำดับความสำคัญที่ 6 และ 10 ซึ่งค่าความน่าในการเลือกลำดับความสำคัญมีค่าเท่ากับ 0.053 ทั้งหมด ตามตารางที่ 4.11 แต่ความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้จะเป็น 0.056 ทั้งหมด และทำการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญโดยใช้ Roulette Wheel Selection ตามตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.6 จากนั้นทำการหมุนวงล้อ ซึ่งในที่นี้สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.61 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A3 จะเท่ากับ 13

ตารางที่ 4.11 ค่าความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 10

Priority	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	....	19	20
10	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053		0.053	0.053	0.053	0.053

ตารางที่ 4.12 การสร้างวงล้อรูเร็ตในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญของขั้นงาน A3

ลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
1	0.053	0.056	0.056
2	0.053	0.056	0.111
3	0.053	0.056	0.167
4	0.053	0.056	0.222
5	0.053	0.056	0.278
7	0.053	0.056	0.333
8	0.053	0.056	0.389
9	0.053	0.056	0.444
11	0.053	0.056	0.500
12	0.053	0.056	0.556
13	0.053	0.056	0.611
14	0.053	0.056	0.667
15	0.053	0.056	0.722
16	0.053	0.056	0.778
17	0.053	0.056	0.833
18	0.053	0.056	0.889
19	0.053	0.056	0.944
20	0.053	0.056	1.000
รวม	0.9474	1	1



รูปที่ 4.6 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญของขั้นงานที่ 3 (A3)

ขั้นที่ 2.7 ทำซ้ำขั้นตอนการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรจนกระทั่ง สามารถกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับทุกขั้นงานจนครบ จนได้สตริงคำตอบของขั้นงาน เป็น [6 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 3]

ขั้นที่ 2.8 ทำการหาลำดับความสำคัญในการจัดสรรของสตริงคำตอบทั้งของขั้นงานและพนักงานให้เท่ากับจำนวนประชากรที่กำหนด ซึ่งในที่คือ 5 สตริงคำตอบ ซึ่งจะได้สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงาน ตามตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงานจำนวน 5 สตริงคำตอบ

String	ขั้นงาน 20 ขั้นงาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
1	[6 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 3]	[6 3 2 1 4 5]
2	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]
3	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 10 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
4	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
5	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]

ขั้นที่ 3. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และประเมินค่า

คือการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และทำการจัดอันดับของคำตอบโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) โดย Non-dominated Sorting โดยมีขั้นตอนย่อยๆ ดังนี้

ขั้นที่ 3.1 ทำการคำนวณค่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการถอดรหัสสตริงคำตอบ ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละสตริงคำตอบตามตารางที่ 4.14

ขั้นที่ 3.2 ทำการจัดอันดับของคำตอบโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) โดยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) โดยค่าที่ได้นั้นเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) ตามตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ของทั้ง 5 สตริงคำตอบ

String	f_1	f_2	f_3	f_4
1	14.333	6	0.1458	0.5385
2	15.473	6	0.1987	0.5385
3	15.473	6	0.1319	0.5714
4	15.473	5	0.1581	0.5000
5	16.306	6	0.0547	0.5714

ตารางที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) ของสตริงคำตอบ

String	f_1	f_2	f_3	f_4	Dummy Fitness
1	14.3333	6	0.1458	0.5385	1
2	15.4729	6	0.1987	0.5385	2
3	15.4729	6	0.1319	0.5714	1
4	15.4729	5	0.1581	0.5000	1
5	16.3065	6	0.0547	0.5714	1

จากการพิจารณาค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ในตารางที่ 4.15 จะบอกได้สตริงคำตอบที่ดี (Good string) คือสตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5 เพราะมีค่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงน้อยที่สุดคือ 1 ส่วนคำตอบที่ไม่ดี (Bad string) คือสตริงคำตอบที่ 2 เพราะมีค่าค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงมากที่สุดคือ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 4. การคัดเลือกสตริงคำตอบ (Select the Candidates)

เป็นการเลือกสตริงคำตอบที่ดี (Good string) และสตริงคำตอบที่ไม่ดี (Bad string) ให้ไม่เกินจำนวนที่คิดจากร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เท่ากับร้อยละ20 ดังนั้นจะทำการเลือกสตริงคำตอบที่ดี (Good string) และสตริงคำตอบที่ไม่ดี (Bad string) มาจำนวนไม่เกิน $0.2 \times 5 = 1$ ตัว ได้ดังตารางที่ 4.16 เพื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม ซึ่งสมมติว่าทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบที่ได้ สตริงคำตอบที่ 1 และสตริงคำตอบที่ไม่ดีต้องเป็นสตริงคำตอบที่ 2 เสมอ เพราะอยู่ Dummy Fitness 2 เพียงสตริงคำตอบเดียว

ตารางที่ 4.16 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกเป็นสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดี

String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน	พนักงาน 6 คน	Dummy Fitness	selection
1	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]	1	Good
2	[11 4 12 16 19 8 3 10 17 20 7 5 18 14 2 13 15 1 9 6]	[5 6 3 1 4 2]	2	Bad
3	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 10 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]	1	
4	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]	1	
5	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]	1	

ขั้นที่ 5. การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็น

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็น เป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากการให้รางวัล (Reward) และการลงโทษ (Punish) แก่สตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดีนั้น จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่เหมาะสม แต่จะทำการปรับปรุงเพียงตารางความน่าจะเป็นร่วม

ในงานวิจัยนี้จะมีตารางความน่าจะเป็นร่วมอยู่ 2 ตารางคือ ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปและตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนถัดไป โดยวิธีการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของทั้ง 2 ตารางเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงตัวอย่างวิธีในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนถัดไปดังนี้ โดยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) หรือค่า k เท่ากับ 0.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงาน

จากสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกได้สตริงคำตอบที่ดี (Good String) และสตริงคำตอบที่ไม่ดี (Bad String) ดังนี้

Good String: String 1 = [6 3 2 1 4 5]

Bad String: String 2 = [5 6 3 1 4 2]

1) ทำให้การให้รางวัล (Reward) กับสตริงกับคำตอบที่ดี

ค่าความน่าจะเป็นที่จะเพิ่มให้กับคู่อันดับที่ดีเท่ากับ $\frac{k}{N_w} = \frac{0.1}{5} = 0.02$

ค่าความน่าจะเป็นที่จะลดให้กับทุกคู่อันดับเท่ากับ $\frac{k}{{N_w}^2} = \frac{0.1}{5^2} = 0.004$

โดยพิจารณาสตริงคำตอบที่ดี ที่ละคู่อันดับเริ่มจาก [6,3]

คู่อันดับที่ได้รับการเพิ่มค่า

ตำแหน่ง [6,3] มีค่าเท่ากับ 0.2+0.02 = 0.22

คู่อันดับที่โดนลดค่า

ตำแหน่ง [6,1] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

ตำแหน่ง [6,2] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

ตำแหน่ง [6,3] มีค่าเท่ากับ 0.22-0.004 = 0.216

ตำแหน่ง [6,4] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

ตำแหน่ง [6,5] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

คู่อันดับที่2 [3,2]

คู่อันดับที่ได้รับการเพิ่มค่า

ตำแหน่ง [3,2] มีค่าเท่ากับ 0.2+0.02 = 0.22

คู่อันดับที่โดนลดค่า

ตำแหน่ง [3,1] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

ตำแหน่ง [3,2] มีค่าเท่ากับ 0.22-0.004 = 0.216

ตำแหน่ง [3,4] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

ตำแหน่ง [3,5] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

ตำแหน่ง [3,6] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.004 = 0.196

พิจารณาจนครบทุก 5 คู่อันดับเพื่อทำการเพิ่มค่าและลดค่า จะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงาน ที่ทำการให้รางวัล (Reward) กับสตริงกับคำตอบที่ดี ตามตารางที่ 4.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.17 ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานหลังทำการให้รางวัลกับสตริงคำตอบที่ดี

Priority	1	2	3	4	5	6
1		0.196	0.196	0.216	0.196	0.196
2	0.216		0.196	0.196	0.196	0.196
3	0.196	0.216		0.196	0.196	0.196
4	0.196	0.196	0.196		0.216	0.196
5	0.200	0.200	0.200	0.200		0.200
6	0.196	0.196	0.216	0.196	0.196	

2) ทำให้การให้ลงโทษ (Punish) กับสตริงกับคำตอบที่ไม่ดี โดยจะปรับปรุงต่อจากกตารางที่ 4.17 ในขั้นตอนย่อยที่ 1

ค่าความน่าจะเป็นที่จะลดให้กับคู่อันดับที่ไม่ดีเท่ากับ $\frac{k}{N_w} = \frac{0.1}{5} = 0.02$

ค่าความน่าจะเป็นที่จะเพิ่มให้กับทุกคู่อันดับเท่ากับ $\frac{k}{{N_w}^2} = \frac{0.1}{5^2} = 0.004$

โดยพิจารณาสตริงคำตอบที่ดี ที่ละคู่อันดับเริ่มจาก [5,6]

คู่อันดับที่ได้รับการเพิ่มค่า

ตำแหน่ง [5,6] มีค่าเท่ากับ 0.2-0.02 = 0.18

คู่อันดับที่โดนลดค่า

ตำแหน่ง [5,1] มีค่าเท่ากับ 0.2+0.004= 0.204

ตำแหน่ง [5,2] มีค่าเท่ากับ 0.2+0.004= 0.204

ตำแหน่ง [5,3] มีค่าเท่ากับ 0.2+0.004= 0.204

ตำแหน่ง [5,4] มีค่าเท่ากับ 0.2+0.004= 0.204

ตำแหน่ง [5,6] มีค่าเท่ากับ 0.18+0.004 = 0.184

พิจารณาจนครบทุก 5 คู่อันดับเพื่อทำการลดค่าและเพิ่มค่า จะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานที่ทำการให้ลงโทษ (Punish) กับสตริงกับคำตอบที่ไม่ดี ตามตารางที่ 4.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.18 ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงาน หลังทำการให้ลงโทษกับสตริงคำตอบที่ไม่ดี

Priority	1	2	3	4	5	6
1		0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
2	0.216		0.196	0.196	0.196	0.196
3	0.180	0.220		0.200	0.200	0.200
4	0.200	0.180	0.200		0.220	0.200
5	0.204	0.204	0.204	0.204		0.184
6	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	

ขั้นที่ 6. การเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมการบรรจวบ ในเจเนอเรชั่นแรก จะให้สตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยสตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5ตามตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 1

String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน	พนักงาน 6 คน
1	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]
3	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 10 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
4	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
5	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]

เมื่อทำการเก็บสตริงคำตอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการเช็คว่า ครบตามจำนวนเจเนอเรชั่นที่ กำหนดหรือไม่ ซึ่งในที่เป็นเพียงเจอเนอเรชั่นที่ 1 ซึ่งไม่เท่ากับจำนวนเจเนอเรชั่นทั้งหมดที่กำหนดไว้ที่ 5 เจเนอเรชั่น ดังนั้นจะทำการพัฒนาสตริงคำตอบต่อในเจเนอเรชั่นที่ 2 ในขั้นตอนที่ 2 คือการสร้างสตริงคำตอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เจเนอเรชั่นที่ 2 (G=2)

ขั้นที่ 1. การสร้างสตริงคำตอบจากตารางความน่าจะเป็น

ขั้นตอนในการสร้างสตริงคำตอบเหมือนกับในเจเนอเรชั่นที่ 1 แต่ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญที่นำมาสร้างสตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงาน นั้นจะได้ขั้นตอนที่ 5 ในเจเนอเรชั่นที่ 1 ที่ทำการให้รางวัลและลงโทษเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

ขั้นที่ 2. คำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และประเมินค่า

ทำการคำนวณค่าเหมือนเจเนอเรชั่นที่ 1 ทุกประการ

ขั้นที่ 3. การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมเหมือนเจเนอเรชั่นที่ 1 ทุกประการ

ขั้นที่ 4. การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็น

ทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมเหมือนเจเนอเรชั่นที่ 1 ทุกประการ

ขั้นที่ 5. การเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดของอัลกอริทึมการบรรจวบ จะทำโดยการนำสตริงคำตอบที่ดีในรอบที่กำลังพิจารณา (Current Good String) ที่มีอยู่ 2 สตริงคำตอบ คือ สตริงคำตอบที่ 3 และ 4 รวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้าที่มีอยู่ 4 สตริงคำตอบ คือ สตริงคำตอบที่ 1 3 4 และ 5 ตามตารางที่ 4.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.20 การรวมสตริงคำตอบของเจเนอเรชั่นที่ 1 และ 2

Generation	String	ขั้นงาน 20 ขั้นงาน	พนักงาน 6 คน
Elitist	1[1]	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]
	3[1]	[4 8 6 1 2 20 5 14 15 3 12 18 10 13 7 11 16 9 17 19]	[3 4 5 6 2 1]
	4[1]	[3 15 17 9 8 11 2 14 1 4 19 7 13 5 10 6 16 12 20 18]	[3 6 2 1 4 5]
	5[1]	[11 10 14 6 12 8 2 19 20 15 9 5 16 17 1 18 13 7 4 3]	[2 3 1 5 4 6]
Current Good String	3[2]	[11 4 13 15 19 9 3 10 1 20 7 5 18 17 8 12 16 14 6 2]	[3 4 5 2 1 6]
	4[2]	[19 10 15 6 12 20 9 11 5 14 2 8 16 17 1 18 13 7 4 3]	[4 3 5 2 1 6]

และทำการในค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 4 วัตถุประสงค์ มาเปรียบเทียบคำตอบโดยกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ด้วยวิธี Non-dominated Sorting ตามตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 การเปรียบเทียบคำตอบโดยกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

Generation	String	f_1	f_2	f_3	f_4	Dummy Fitness
Previous Best String	1[1]	14.333	6	0.146	0.539	1
	3[1]	15.473	6	0.132	0.571	2
	4[1]	15.473	5	0.158	0.5	2
	5[1]	16.307	6	0.055	0.571	2
Current Good String	3[2]	14.639	5	0.055	0.5	1
	4[2]	14.639	6	0.045	0.571	1

ซึ่งสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จะถือว่าเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบปัจจุบันหรือในเจเนอเรชั่นที่ 2 ได้แก่ สตริงคำตอบที่ 1 เจเนอเรชั่นที่ 1(String 1[1]) สตริงคำตอบที่ 3 เจเนอเรชั่นที่ 2(String 3[2]) และสตริงคำตอบที่ 4 เจเนอเรชั่นที่ 2(String 4[2]) ตามตารางที่ 4.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.22 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 2

String	ขั้นงาน 20 ขั้นงาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
1[1]	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[6 3 2 1 4 5]
3[2]	[11 4 13 15 19 9 3 10 1 20 7 5 18 17 8 12 16 14 6 2]	[3 4 5 2 1 6]
4[2]	[19 10 15 6 12 20 9 11 5 14 2 8 16 17 1 18 13 7 4 3]	[4 3 5 2 1 6]

<u>ทำเจเนอเรชั่นที่ 3-10 ตามขั้นตอนจนจบ</u>

จะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 10 และจะถือว่าเป็นคำตอบสุดท้ายของตัวอย่างนี้ที่ได้จากการค้นหาโดยอัลกอริทึมการบรรจวบ ซึ่งในคำตอบสุดท้ายนั้นไม่จำเป็นว่าจะต้องมีสตริงคำตอบจากทุกเจเนอเรชั่น

บทที่ 5

วิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมีต้นแบบ

ในบทนี้จะขอกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมี (A Hybrid Multi-Objective Evolutionary and Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template : AMOEA/D-COIN/WT) พารามิเตอร์ของ AMOEA/D-COIN/WT และขั้นตอนการทำงานของ AMOEA/D-COIN/WT สำหรับการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญาหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณ

5.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของ MOEA/D-COIN/WT

วิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยมีต้นแบบ (A Hybrid Multi-Objective Evolutionary and Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template : AMOEA/D-COIN/WT) ที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีแนวคิดในการแก้ปัญหาโดยการพัฒนาคำตอบแบบมากวัตถุประสงค์ไปพร้อมๆ กันที่คล้ายกับ MOEA/D ในบทที่ 3 คือการจำแนกออกเป็นประชากรย่อย (Subpopulation) หรือปัญหาย่อย (Subproblem) ด้วยการสร้างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Point of Weight : λ_p) พร้อมกับกำหนดจุดข้างเคียง (Neighborhood Point) จากระยะห่างระหว่างจุด (Euclidian Distance) ของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ทำการประเมินคำตอบที่ดีโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) และเก็บคำตอบที่ดีในแตละเจเนอเรชั่น ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominate Sorting)

แต่การพัฒนาคำตอบของประชากร (Population) ในแต่ละเจเนอเรชั่นนั้นจะใช้อัลกอริทึมการบรรจวบโดยยึดต้นแบบแทน ซึ่งจะคล้ายกับวิธีการของอัลกอริทึมการบรรจวบในบทที่ 4 แต่จะต่างกันที่ การสร้างสตริงคำตอบนั้นจะสร้างแค่บ้างส่วนเพราะจะใช้ต้นแบบ(คำตอบที่ดีที่อยู่ประชากรย่อยหรือปัญหาย่อย) และจำนวนของตารางความน่าจะเป็น ซึ่งจะเท่ากับจำนวนของค่าวัตถุประสงค์

บวกหนึ่ง ดังนั้นจะมีการกำหนดสตริงคำตอบที่จะทำการปรับปรุงตารางโดยอาศัยจุดสร้างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก

5.2 พารามิเตอร์ของ MOEA/D-COIN/WT

พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D-COIN/WT นี้จะแบ่งเป็นพารามิเตอร์ 3 ส่วน คือ 1. อัลกอริทึม MOEA/D คือ จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ จำนวนจุดข้างเคียง และร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง 2.อัลกอริทึม COIN คือ ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น และค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) 3.การใช้ต้นแบบ (With Template) คือ จำนวนจุดที่ใช้คัดลอกต้นแบบ และร้อยละในการกำหนดช่วงของต้นแบบ

5.2.1 จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (Lattice: *H*)

คือ ตัวกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Number of λ_p) หรือจำนวนของสตริงคำตอบทั้งหมด (Population Size)

5.2.2 จำนวนของจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: *T*)

คือ ตัวกำหนดจำนวนของประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา ซึ่งจำนวนของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T + 1$

5.2.3 ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง

คือ ตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

5.2.4 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

คือ ตัวกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

5.2.5 ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) (k)

คือ ตัวกำหนดการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าคำตอบที่ที่คิดว่าเป็นคำตอบไม่ดี และเพิ่มโอกาสในการเลือกคำตอบที่ดี

5.2.6 จำนวนจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบ (Number of Template Cut Point)

คือ ตัวกำหนดจำนวนต้นแบบที่จะทำการคัดลอก ซึ่งถ้ามีจำนวนมากก็จะทำให้สตริงคำตอบที่กำลังจะสร้างใหม่นั้นมีความเหมือนกับต้นแบบมาก

5.2.7 ร้อยละในการกำหนดช่วงบิตของต้นแบบ

คือ ตัวกำหนดช่วงต้นแบบที่จะทำการคัดลอกหรือทำคงค่าเอาไว้เพื่อที่จะนำสร้างสตริงคำตอบตอบใหม่ ซึ่งถ้ามีจำนวนมากก็จะทำให้สตริงคำตอบที่กำลังจะสร้างใหม่นั้นมีความเหมือนกับต้นแบบมากแม้ว่าจำนวนจุดที่ใช้คัดลอกต้นแบบจะน้อยก็ตาม

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

กำหนดให้ร้อยละในการกำหนดช่วงของต้นแบบเท่ากับ 20 และกำหนดให้จำนวนขั้นงาน (Task) หรือเรียกอีกอย่างว่าบิต (Bit) เท่ากับ 20 ดังนั้น ค่าช่วงของต้นแบบ (Range of Bit for Template : R_{bt}) จะเท่ากับ $0.2 \times 20 = 4$ ขั้นงานหรือบิต ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 5.1

จำนวนจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบ เท่ากับ 2
ร้อยละในการกำหนดช่วงของต้นแบบ เท่ากับ 20

N_{cp} ที่ 1 N_{cp} ที่ 2

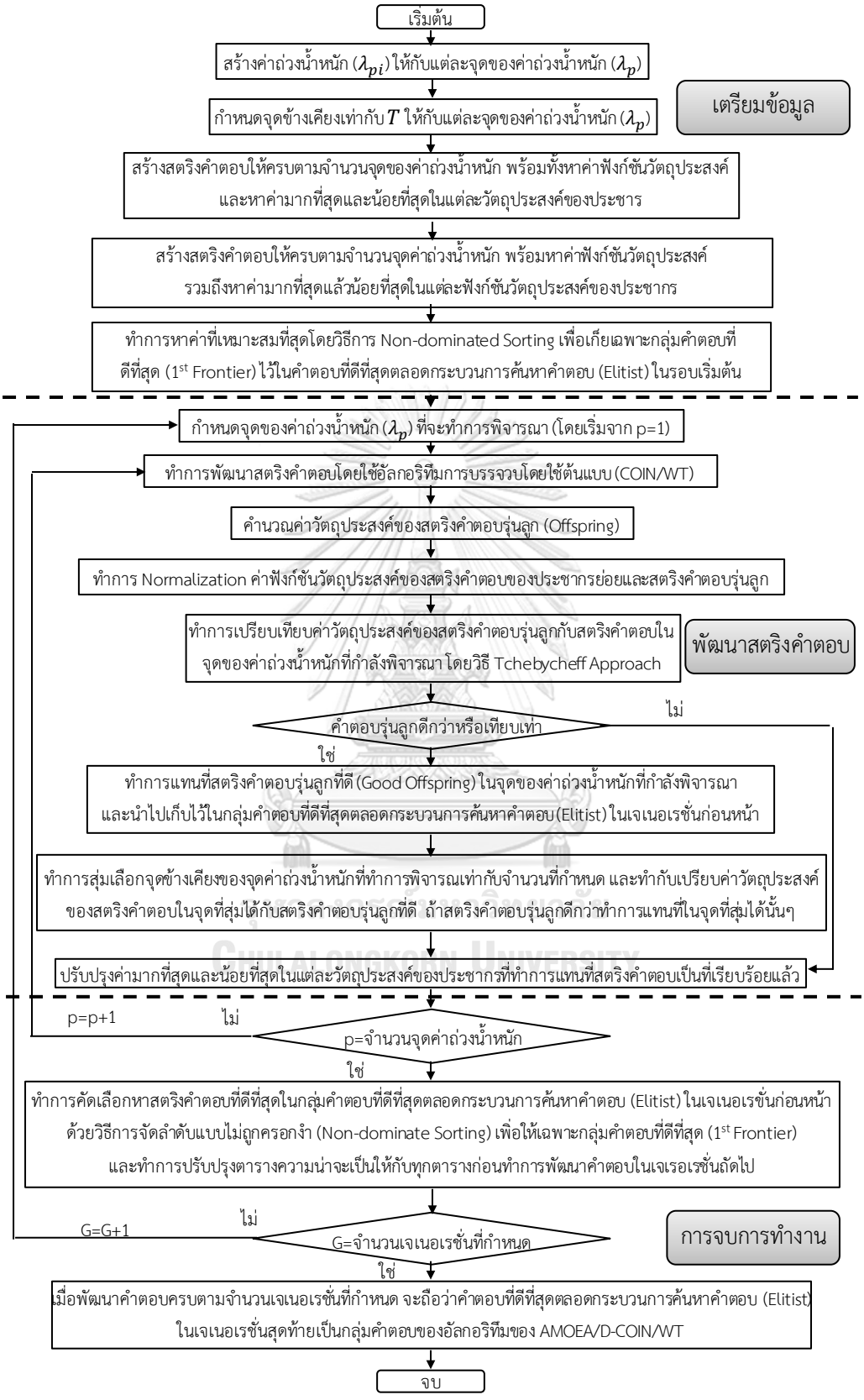
Task (bit)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
priority	11	4	12	16	19	8	3	10	17	20	7	5	18	14	2	13	15	1	9	6

Range of Bit for Template = 4

รูปที่ 5.1ตัวอย่างการทำงานของพารามิเตอร์ของการใช้ต้นแบบ

5.3 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-COIN/WT ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D-COIN/WT ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D สามารถแบ่งได้ 15 ขั้นตอนหลักดังนี้ และมีแผนผังการทำงานตามรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT

<u>การเตรียมข้อมูล</u>

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งจะได้เมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (P) x จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) โดย $\lambda_p = (\lambda_{p1}, \dots, \lambda_{pO}), \sum_{i=1}^{O} \lambda_{pi} = 1 \; \forall p \in P$ และ $\lambda_{pi} \geq 0$

2. กำหนดจุดข้างเคียงเท่ากับ T ให้กับแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก λ_pเริ่มจากคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณากับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (d_{pj}) ตามสมการที่ 5.1 จากนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุดตามจำนวน T

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

เมื่อ d_{pj} คือ ระยะระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก p กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก j

O คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

3. สร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้นและกำหนดจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ให้กับตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็น สร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N \times N$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป กับตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N_w \times N_w$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานถัดไป ตามตารางที่ 5.1 เท่ากับจำนวนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดบวกหนึ่ง ($C = O + 1$) ซึ่งจะคล้ายกับการสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็น ของอัลกอริทึม COIN-E ที่พัฒนาโดย สถาพร โอฬารวิวัฒน์ชัย และ ปารเมศชุติมา (2557) และกำหนดจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ให้กับตารางเมทริกซ์คชวามน่าเป็น โดยใช้ระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงของตารางการบรรจวบกับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (d_{cp}) ตามสมการที่ 5.1 จากนั้นทำการเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{cp} ที่มีค่าน้อยที่สุดตามจำนวนเท่ากับ $\frac{P}{C}$ จุด ซึ่งจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ในตารางตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นจะต้องไม่ซ้ำกัน

$$d_{cp} = \sqrt{\sum_{i=1}^{O}(\lambda_{ci} - \lambda_{pi})^2} \quad \forall p \in P, \forall c \in C \qquad \text{สมการที่ 5.2}$$

ตารางที่ 5.1 ความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้ขั้นงานถัดไปและพนักงานคนถัดไป

Priority	j 1	2	...	...	N (N_w)
i 1		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
2	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
...	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
...	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)		$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)
N (N_w)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	$1/[N-1]$ ($1/[N_w-1]$)	

4. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดโดยการสุ่มจากตารางความน่าจะเป็น แต่เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นนั้นมีค่าเท่ากันหมดจึงทำให้เหมือนกันการสุ่มอย่างอิสระ พร้อมทั้งทำการคำนวณค่าวัตถุประสงค์ และหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5. นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการ Non-dominated Sorting เพื่อเก็บคำตอบที่ดีที่สุด (1^{st} Frontier) ไว้ในคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบเริ่มต้น

<u>การพัฒนาสตริงคำตอบ</u>

6. กำหนดจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา เพื่อกำหนดประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อยคือ สตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา และสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p ที่กำลังพิจารณา

7. ทำการพัฒนาสตริงคำตอบโดยอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ (COIN/WT) ซึ่งการสร้างสตริงคำตอบโดนใช้ต้นแบบจะใช้หลักการกับที่คิดค้นโดย Tsutsui et al. (2006) คือจะทำการสร้างสตริงคำตอบโดยใช้ตารางความน่าจะเป็น แต่จะไม่ได้สร้างใหม่ทั้งสตริงแต่จะมีต้นแบบของสตริงคำตอบที่ได้มาจากสตริงคำตอบที่ดีที่อยู่ในประชากรย่อยหรือปัญหาย่อย ซึ่งสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ออกมานั้นจะมี 2 แบบ คือ 1. จะไม่มีโอกาสเลือกซ้ำค่าที่ต้นแบบเลือกไว้ 2. มีโอกาสเลือกซ้ำค่าที่ต้นแบบเลือกไว้และหลังจากนั้นต้องทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบ

8. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ต่อจากนั้นทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์

9. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) โดยมีสูตรในการนอร์มัลไล (Normalization) เหมือนกับขั้นตอนของ MOEA/D ดังสมการที่ 3.2

10. ทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่บนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง(Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ซึ่งต้องเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_p, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับสตริงคำตอบที่จุดค่าถ่วงน้ำที่ทำการพิจารณา ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ จะทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบรุ่นลูกที่ดี (Good Offspring) ลงในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณาและเก็บไว้ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า และทำขั้นตอนที่ 11 แต่ถ้าไม่ดีกว่าจะไม่เกิดการแทนที่สตริงคำตอบและให้ข้ามไปทำขั้นตอนที่ 12

11. ทำการสุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณาเท่ากับจำนวนจุดข้างเคียงที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มีการแทนที่จุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_pที่กำลังพิจารณาในขั้นตอนที่ 10 กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง(Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ซึ่งการเปรียบเทียบนั้นจะเหมือนกับขั้นตอนที่ 10 แต่จะทำการเปรียบสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่ (Good Offspring) ในขั้นตอนที่กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้าดีกว่าทำการแทนสตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดี ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

12. หลังจากทำการพัฒนาคำตอบและแทนที่คำตอบเสร็จ ให้ทำการหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรใหม่

การพิจารณาการจบการพัฒนาสตริงคำตอบ

13. ถ้า $p < P$ ให้กำหนด $p = p + 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 แต่ถ้า $p = P$ ให้ไปทำต่อในขั้นตอนที่ 14

14. ทำการคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ เพื่อให้เหลือเฉพาะกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (1^{st} Frontier) และทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นทุกตาราง โดยการให้รางวัล (Reward) กับสตริงคำตอบที่ดี และทำการลงโทษ (Punish) กับสตริงคำตอบที่ไม่ดี โดยมีค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและการลงโทษเท่ากับ k ซึ่งมีหลักการปรับปรุงเหมือนกันอัลกอริทึม COIN (ขั้นตอนที่ 5 ของ COIN) ต่างกันที่จะทำการปรับตารางความน่าจะเป็นตารางไหนจะต้องพิจารณาเฉพาะสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 3

15. ถ้า $G < Generation$ ให้กำหนด $G = G + 1, p = 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5 แต่ถ้า $G = Generation$ คือจบการพัฒนาคำตอบตามจำนวนเจเนอเรชั่นที่กำหนด ซึ่งจะถือว่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นสุดท้าย เป็นกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม MOEA/D

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.4 ตัวอย่างการใช้ MOEA/D-COIN/WT ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2

จากขั้นตอนของ MOEA/D ที่ได้นำเสนอสามารถนำมาทดลองใช้ในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะให้กับสถานีงาน ที่มี 4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบขนาน ที่มีขั้นงานของทั้ง 2 สายการประกอบเท่ากับ 20 ขั้นงาน(A1-A11,B1-B9) โดยมีพนักงาน 6 คน (สถานีงาน 6 สถานีงาน) ซึ่งอัตราส่วนของทักษะพนักงาน High : Medium : Low เป็น 2 : 3 : 1โดยมีพารามิเตอร์และขั้นตอนการทำงานดังนี้

พารามิเตอร์ของ MOEA/D ที่เลือกใช้ คือ

- จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ เท่ากับ 3
- จำนวนของจุดข้างเคียง เท่ากับ 6
- ร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 30
- ร้อยละของจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นเท่ากับ 20
- ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) (k) เท่ากับ 0.1
- ร้อยละในการกำหนดช่วงบิตของต้นแบบ เท่ากับ 20
- จำนวนจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบ เท่ากับ 2 จุด
- จำนวนเจเนอเรชั่น 10 เจเนอเรชั่น

ดังนั้นสามารถคำนวณจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากรได้ดังนี้

กำหนดให้ H=2, O=4

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

จะได้จำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดหรือจำนวนประชากร คือ 10

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

<u>การเตรียมข้อมูล</u>

การเตรียมข้อมูลนั้นจะทำก่อนขึ้นเจเนอเรชั่นที่ 1 (เจเนอเรชั่นที่ 0) เท่านั้น โดยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนย่อยๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ขั้นที่ 1.</u> สร้างตารางค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_{pi})

สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งจะได้เมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (P) x จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด (O) ซึ่งตัวอย่างนี้จำนวนจุดของถ่วงน้ำหนัก เท่ากับ 20 และจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด เท่ากับ 4 ดังนั้นจะได้ตารางเมทริกซ์ขนาด 20X4 และมีค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{pi} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก

λ_p	λ_{p1}	λ_{p2}	λ_{p3}	λ_{p4}
1	0.000	0.000	0.000	1.000
2	0.000	1.000	0.000	0.000
3	0.333	0.000	0.000	0.667
4	0.667	0.000	0.333	0.000
5	0.667	0.000	0.000	0.333
6	0.333	0.333	0.333	0.000
7	0.000	0.333	0.667	0.000
8	0.000	0.667	0.333	0.000
9	0.333	0.333	0.000	0.333
10	0.000	0.333	0.333	0.333
11	0.000	0.000	1.000	0.000
12	0.000	0.333	0.000	0.667
13	0.000	0.000	0.333	0.667
14	0.333	0.667	0.000	0.000
15	1.000	0.000	0.000	0.000
16	0.333	0.000	0.333	0.333
17	0.000	0.667	0.000	0.333
18	0.667	0.333	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.667	0.333
20	0.333	0.000	0.667	0.000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักในตารางนั้นจะมีเพียง 0, 0.333, 0.667 และ1 เนื่องจากค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์จะมีวิธีคิดจาก $\left\{\frac{0}{H}, \frac{\dots}{H}, \frac{H}{H}\right\}$ ซึ่งจะเท่ากับ $\left\{\frac{0}{3}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{3}{3}\right\}$

<u>ขั้นที่ 2.</u> กำหนดจุดข้างเคียงให้กับแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ตามจำนวนที่กำหนด

เริ่มจากคำนวณระยะห่างระหว่าง (Euclidean distances) จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา (λ_p) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักอื่นๆ (λ_j) โดยที่ $p \neq j$ ซึ่งจะได้ค่า d_{pj} ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด ตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่า d_{pj} ของจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด

d \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		1.4	0.5	1.2	0.9	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8	1.4	0.5	0.5	1.2	1.4	0.8	0.9	1.2	0.9	1.2
2	1.4		1.2	1.2	1.2	0.8	0.9	0.5	0.8	0.8	1.4	0.9	1.2	0.5	1.4	1.2	0.5	0.9	1.2	1.2
3	0.5	1.2		0.8	0.5	0.8	1.1	1.1	0.5	0.7	1.2	0.5	0.5	0.9	0.9	0.5	0.8	0.8	0.8	0.9
4	1.2	1.2	0.8		0.5	0.5	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	1.1	0.9	0.8	0.5	0.5	1.1	0.5	0.8	0.5
5	0.9	1.2	0.5	0.5		0.7	1.1	1.1	0.5	0.8	1.2	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.9	0.5	0.9	0.8
6	1.2	0.8	0.8	0.5	0.7		0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8	0.5	0.7	0.5	0.7	0.5
7	1.2	0.9	1.1	0.8	1.1	0.5		0.5	0.8	0.5	0.5	0.9	0.8	0.8	1.2	0.7	0.8	0.9	0.5	0.5
8	1.2	0.5	1.1	0.9	1.1	0.5	0.5		0.7	0.5	0.9	0.8	0.9	0.5	1.2	0.8	0.5	0.8	0.8	0.8
9	0.8	0.8	0.5	0.7	0.5	0.5	0.8	0.7		0.5	1.2	0.5	0.7	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8
10	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5		0.8	0.5	0.5	0.7	1.2	0.5	0.5	0.8	0.5	0.7
11	1.4	1.4	1.2	0.9	1.2	0.8	0.5	0.9	1.2	0.8		1.2	0.9	1.2	1.4	0.8	1.2	1.2	0.5	0.5
12	0.5	0.9	0.5	1.1	0.8	0.8	0.9	0.8	0.5	0.5	1.2		0.5	0.8	1.2	0.7	0.5	0.9	0.8	1.1
13	0.5	1.2	0.5	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.7	0.5	0.9	0.5		1.1	1.2	0.5	0.8	1.1	0.5	0.8
14	1.2	0.5	0.9	0.8	0.8	0.5	0.8	0.5	0.5	0.7	1.2	0.8	1.1		0.9	0.8	0.5	0.5	1.1	0.9
15	1.4	1.4	0.9	0.5	0.5	0.8	1.2	1.2	0.8	1.2	1.4	1.2	1.2	0.9		0.8	1.2	0.5	1.2	0.9
16	0.8	1.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	0.8	0.5	0.5	0.8	0.7	0.5	0.8	0.8		0.8	0.7	0.5	0.5
17	0.9	0.5	0.8	1.1	0.9	0.7	0.8	0.5	0.5	0.5	1.2	0.5	0.8	0.5	1.2	0.8		0.8	0.9	1.1
18	1.2	0.9	0.8	0.5	0.5	0.5	0.9	0.8	0.5	0.8	1.2	0.9	1.1	0.5	0.5	0.7	0.8		1.1	0.8
19	0.9	1.2	0.8	0.8	0.9	0.7	0.5	0.8	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	1.1	1.2	0.5	0.9	1.1		0.5
20	1.2	1.2	0.9	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.8	0.7	0.5	1.1	0.8	0.9	0.9	0.5	1.1	0.8	0.5	

จากนั้นทำการกำหนดจุดข้างเคียง ซึ่งตัวอย่างนี้กำหนดให้ค่า T เท่ากับ 7 ดังนั้นต้องเลือกจุดข้างเคียงจากค่า d_{pj} ที่มีค่าน้อยที่สุด 6 อันดับให้กับแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ตามตารางที่ 5.4

<u>ตัวอย่างการเลือกจุดข้างเคียงให้กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1)</u>

จากตารางที่ 5.3 เมื่อพิจารณาที่จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) จะพบว่าค่า d_{pj} ที่น้อยที่สุดคือ 0.5 ซึ่งประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก 3 จุด คือ λ_3, λ_{12} และ λ_{13} แต่ในตัวอย่างนี้ต้องการ 6 จุด ดังนั้นจึงพิจารณาค่า d_{pj} ที่น้อยรองลงมา คือ 0.8 ซึ่งประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก 3 จุด คือ λ_9, λ_{10} และ λ_{16} ดังนั้นจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ประกอบด้วยจุดค่าถ่วงน้ำหนัก $\lambda_3, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_7, \lambda_{12}$ และ λ_{13} ตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 จุดข้างเคียงจำนวน 6 จุดของแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_p

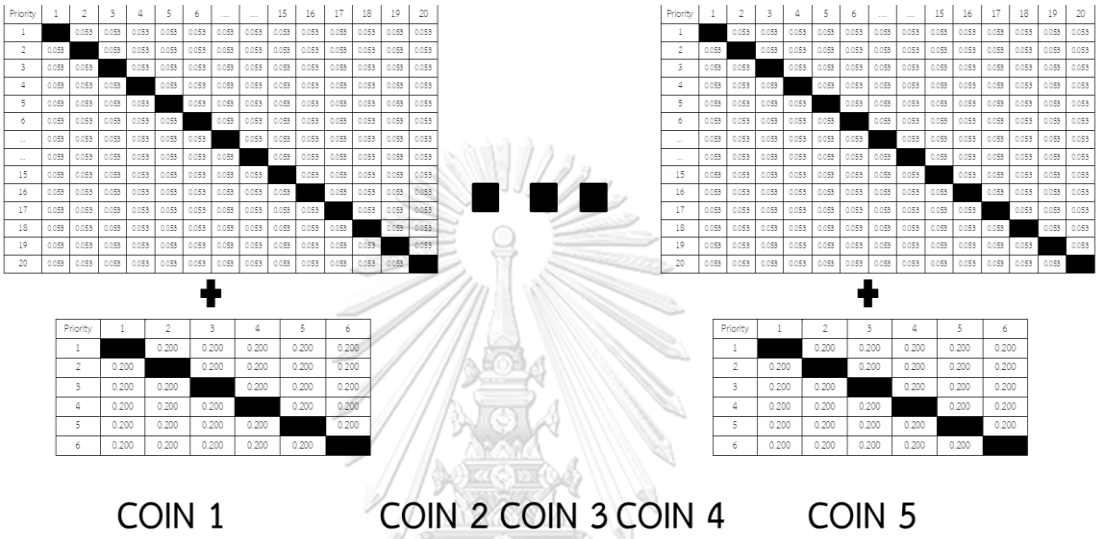
Neighborhood	1	2	3	4	5	6
λ_1	λ_3	λ_9	λ_{10}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{16}
λ_2	λ_6	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{14}	λ_{17}
λ_3	λ_1	λ_5	λ_9	λ_{12}	λ_{13}	λ_{16}
λ_4	λ_5	λ_6	λ_{15}	λ_{16}	λ_{18}	λ_{20}
λ_5	λ_3	λ_4	λ_9	λ_{15}	λ_{16}	λ_{18}
λ_6	λ_4	λ_9	λ_{10}	λ_{16}	λ_{18}	λ_{20}
λ_7	λ_6	λ_8	λ_{10}	λ_{11}	λ_{19}	λ_{20}
λ_8	λ_2	λ_6	λ_7	λ_{10}	λ_{14}	λ_{17}
λ_9	λ_6	λ_{10}	λ_{14}	λ_{16}	λ_{17}	λ_{18}
λ_{10}	λ_6	λ_9	λ_{12}	λ_{13}	λ_{16}	λ_{17}
λ_{11}	λ_6	λ_7	λ_{10}	λ_{16}	λ_{19}	λ_{20}
λ_{12}	λ_1	λ_3	λ_9	λ_{10}	λ_{13}	λ_{17}
λ_{13}	λ_1	λ_3	λ_{10}	λ_{12}	λ_{16}	λ_{19}
λ_{14}	λ_2	λ_6	λ_8	λ_9	λ_{17}	λ_{18}
λ_{15}	λ_4	λ_5	λ_6	λ_9	λ_{16}	λ_{18}
λ_{16}	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_9	λ_{10}
λ_{17}	λ_2	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{12}	λ_{14}
λ_{18}	λ_4	λ_5	λ_6	λ_9	λ_{14}	λ_{15}
λ_{19}	λ_7	λ_{10}	λ_{11}	λ_{13}	λ_{16}	λ_{20}
λ_{20}	λ_4	λ_6	λ_7	λ_{11}	λ_{16}	λ_{19}

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ขั้นที่ 3.</u> สร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้นและกำหนดจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ให้กับตารางการบรรจวบ

สร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N \times N$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป โดยความน่าจะเป็นร่วมสำหรับการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรขั้นงานถัดไปมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{N-1} = \frac{1}{19} = 0.0526$ และตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมขนาด $N_w \times N_w$ สำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานถัดไป โดยความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความคัญในการจัดสรรพนักงานคนถัดไปมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $\frac{1}{N_w-1} = \frac{1}{5} = 0.2$ เหมือนกับอัลกอริทึมการบรรจวบ ซึ่งจะเรียกตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็น

ร่วมสำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปกับตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมสำหรับเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนถัดไป ว่าตารางการบรรจวบ (COIN) ในอัลกอริทึมนี้จะสร้างตารางการบรรจวบเท่ากับจำนวนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดบวกหนึ่งคูณสอง $(C = O + 1)$ ดังนั้นจะสร้างเท่ากับ 5 ชุดเนื่องจากมีจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 4 วัตถุประสงค์ตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 จำนวนตารางการบรรจวบทั้งหมดของอัลกอริทึม MOEA/D-COIN/WT ในโจทย์ตัวอย่าง

ตาราง COIN ทั้ง 5 ตารางนั้นเป็นตัวกำหนดแนวทางของคำตอบที่ดี (Good Solution frontier) และคำตอบที่ไม่ดี (No Good Solution frontier) ในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งจะประกอบด้วย 1. ตารางการบรรจวบจากวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง 2. ตารางการบรรจวบจากวัตถุประสงค์ที่สอง 3. ตารางการบรรจวบจากวัตถุประสงค์ที่ สาม 4. ตารางการบรรจวบจากวัตถุประสงค์ที่สี่ 5. ตารางการบรรจวบจากทุกวัตถุประสงค์ โดยแต่ละตารางการบรรจวบนั้นนั้นจะมีจุดค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิง (λ_c) ตามตารางที่ 5.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.5 ค่าถ่วงน้ำหนัก λ_{ci} ในแต่ละจุดค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงของตารางการบรรจวบ

λ_c	λ_{c1}	λ_{c2}	λ_{c3}	λ_{c4}
1 (Objective 1)	1.000	0.000	0.000	0.000
2 (Objective 2)	0.000	1.000	0.000	0.000
3 (Objective 3)	0.000	0.000	1.000	0.000
4 (Objective 4)	0.000	0.000	0.000	1.000
5 (Objective 1 -4)	0.250	0.250	0.250	0.250

ต่อมาจะกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการปรับค่าความน่าจะเป็นในแต่ละตาราง จากระยะห่างระหว่างจุดค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงของตารางการบรรจวบ (λ_c) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (λ_p) ตามตารางที่ 5.6 ที่น้อยที่สุด 4 อันดับ ตามตารางที่ 5.7 ซึ่ง 4 อันดับคิดมากจาก $\frac{P}{C}$ หรือ $\frac{20}{5}$

ตารางที่ 5.6 ระยะห่างระหว่างจุดค่าถ่วงน้ำหนักอ้างอิงของตารางการบรรจวบ (λ_c) กับจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด (λ_p)

c \ p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.4	1.4	0.9	0.5	0.5	0.8	1.2	1.2	0.8	1.2	1.4	1.2	1.2	0.9	0.0	0.8	1.2	0.5	1.2	0.9
2	1.4	0.0	1.2	1.2	1.2	0.8	0.9	0.5	0.8	0.8	1.4	0.9	1.2	0.5	1.4	1.2	0.5	0.9	1.2	1.2
3	1.4	1.4	1.2	0.9	1.2	0.8	0.5	0.9	1.2	0.8	0.0	1.2	0.9	1.2	1.4	0.8	1.2	1.2	0.5	0.5
4	0.0	1.4	0.5	1.2	0.9	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8	1.4	0.5	0.5	1.2	1.4	0.8	0.9	1.2	0.9	1.2
5	0.9	0.9	0.6	0.6	0.6	0.3	0.6	0.6	0.3	0.3	0.9	0.6	0.6	0.6	0.9	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.7 จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการปรับค่าความน่าจะเป็นในแต่ละตารางการบรรจวบ

Neighbor COIN	1	2	3	4
COIN 1	λ_4	λ_5	λ_{15}	λ_{18}
COIN 2	λ_2	λ_8	λ_{14}	λ_{17}
COIN 3	λ_7	λ_{11}	λ_{19}	λ_{20}
COIN 4	λ_1	λ_3	λ_{12}	λ_{13}
COIN 5	λ_6	λ_9	λ_{10}	λ_{16}

ขั้นที่ 4. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นให้กับจุดของค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมด พร้อมทั้งทำการคำนวณค่าวัตถุประสงค์ และหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์

ในขั้นตอนนี้จะทำการสร้างสตริงคำตอบของพนักงาน คือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับพนักงาน (คนที่1 – คนที่6) ดังตารางที่ 5.8 และสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน คือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับขั้นงาน (A1-A12 และ B1-B9) ดังตารางที่ 5.9 ซึ่งจะเป็นการสุ่มจากตารางความน่าจะเป็น แต่เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นนั้นมีค่าเท่ากันหมดจึงทำให้เหมือนกันการสุ่มอย่างอิสระ (Random) ลำดับความสำคัญในแต่ละบิตจะต้องไม่ซ้ำกัน จำนวนสตริงคำตอบจะเท่ากับจุดค่าถ่วงน้ำหนักทั้งหมดคือ 20 สตริงคำตอบ

ตารางที่ 5.8 สตริงคำตอบเริ่มต้นของพนักงานทั้ง 20 สตริงคำตอบ

λ_p	string	Worker Priority					
		H	H	M	M	M	L
λ_1	1	3	4	5	1	6	2
λ_2	2	3	6	2	1	4	5
λ_3	3	3	4	5	2	1	6
λ_4	4	3	4	5	2	1	6
λ_5	5	4	3	1	6	2	5
λ_6	6	3	4	5	2	1	6
λ_7	7	2	3	1	5	4	6
λ_8	8	6	4	2	1	3	5
λ_9	9	4	3	1	6	2	5
λ_{10}	10	3	4	5	2	1	6
λ_{11}	11	5	6	1	2	4	3
λ_{12}	12	2	5	6	4	1	3
λ_{13}	13	2	4	3	1	5	6
λ_{14}	14	2	6	1	5	3	4
λ_{15}	15	1	2	5	3	4	6
λ_{16}	16	4	3	6	5	1	2
λ_{17}	17	6	2	3	5	1	4
λ_{18}	18	1	5	2	3	4	6
λ_{19}	19	1	3	6	5	4	2
λ_{20}	20	4	6	1	2	5	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.9 สตริงคำตอบของขั้นงานทั้ง 20 สตริงคำตอบ

λ_p	string	Task Priority																			
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
λ_1	1	3	10	13	9	20	16	12	18	5	17	4	8	19	7	11	1	15	14	2	6
λ_2	2	11	4	12	15	19	8	3	10	17	20	7	5	18	1	9	13	16	14	6	2
λ_3	3	6	10	15	9	20	19	12	11	5	14	2	8	16	17	1	18	13	7	4	3
λ_4	4	11	4	13	15	19	9	3	10	1	20	7	5	18	17	8	12	16	14	6	2
λ_5	5	14	12	5	11	17	9	1	3	18	8	7	15	4	20	10	2	19	16	6	13
λ_6	6	6	10	15	9	20	19	12	11	5	14	2	8	16	17	1	18	13	7	4	3
λ_7	7	11	10	14	6	12	8	2	19	20	15	9	5	16	17	1	18	13	7	4	3
λ_8	8	5	18	15	11	20	13	3	4	10	19	9	7	1	17	8	12	16	14	6	2
λ_9	9	14	12	5	11	17	9	1	3	18	8	7	15	4	20	10	2	19	16	6	13
λ_{10}	10	11	4	13	15	19	9	3	10	1	20	7	5	18	17	8	12	16	14	6	2
λ_{11}	11	11	16	10	13	3	14	2	9	7	4	5	20	17	15	19	1	8	6	12	18
λ_{12}	12	12	4	10	5	15	16	20	18	6	14	7	9	11	2	19	17	13	8	1	3
λ_{13}	13	18	6	16	5	7	11	3	17	12	9	13	1	2	15	20	14	19	4	8	10
λ_{14}	14	10	9	5	1	19	18	7	6	8	13	17	20	16	14	4	12	3	11	15	2
λ_{15}	15	8	18	2	19	14	1	20	6	9	10	11	7	5	15	4	3	16	17	13	12
λ_{16}	16	3	2	18	16	13	19	4	1	8	15	14	10	9	20	12	5	17	11	7	6
λ_{17}	17	8	20	17	5	2	14	6	4	18	19	12	3	11	13	10	16	1	7	9	15
λ_{18}	18	3	20	8	2	18	14	4	1	19	16	5	6	9	17	7	13	15	12	11	10
λ_{19}	19	13	14	6	20	1	4	17	2	11	15	9	12	19	18	7	10	3	16	5	8
λ_{20}	20	16	7	5	19	9	3	13	18	1	4	20	14	2	11	6	12	10	8	15	17

หลังจากนั้นทำการถอดรหัสสตริงคำตอบเพื่อคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และทำการหาค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ตามตารางที่ 5.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 5. การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีเพื่อเข้ากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist)

นำสตริงคำตอบของประชากรมาประเมินหาสตริงคำตอบที่ดีที่สุดโดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominate Sorting) หลังจากนั้นจะเลือกเก็บเฉพาะคำตอบที่มีความแข็งแรง 1 (Fitness 1) ไว้ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนเรชั่นเริ่มต้น (G=0) ซึ่งทั้งสิ้น 8 สตริงคำตอบประกอบด้วย สตริงคำตอบที่ 4 8 10 11 13 14 17 และ 20 ของเจเนอเรชั่นที่ 0 ตามตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

String	objective				Max				Min			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	20.333	6	0.222	0.667								
2	14.333	6	0.085	0.538								
3	14.000	5	0.084	0.538								
4	14.333	5	0.057	0.500								
5	15.000	6	0.053	0.455								
6	14.000	5	0.084	0.538								
7	15.500	6	0.062	0.571								
8	15.000	6	0.030	0.455								
9	15.000	6	0.053	0.455								
10	14.333	5	0.057	0.500	20.333	6.000	0.222	0.667	13.500	4.000	0.025	0.400
11	14.500	6	0.060	0.455								
12	16.000	5	0.145	0.538								
13	13.667	4	0.079	0.500								
14	15.000	5	0.117	0.400								
15	15.333	6	0.194	0.400								
16	16.167	6	0.117	0.500								
17	13.500	5	0.062	0.455								
18	15.000	6	0.035	0.500								
19	14.500	6	0.076	0.538								
20	14.500	6	0.025	0.538								

ตารางที่ 5.11 สตริงคำตอบที่ถูกอยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
4 [0]	14.333	5	0.057	0.500
8 [0]	15.000	6	0.030	0.455
10 [0]	14.333	5	0.057	0.500
11 [0]	14.500	6	0.060	0.455
13 [0]	13.667	4	0.079	0.500
14 [0]	15.000	5	0.117	0.400
17 [0]	13.500	5	0.062	0.455
20 [0]	14.500	6	0.025	0.538

การพัฒนาสตริงคำตอบ

เจเนอเรชั่นที่ 1 (G=1)

พิจารณาจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1 ($p = 1$)

ขั้นที่ 6. กำหนดจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำการพิจารณา

ด้วยการกำหนดค่า $p = 1$ โดยค่า $p = \{1,2, \dots ,20\}$ เพื่อสร้างประชากรย่อยที่จะทำการพัฒนาคำตอบ ซึ่งประชากรย่อย คือสตริงคำตอบของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 กับสตริงที่อยู่ในจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ตามตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 สตริงคำตอบและจุดค่าถ่วงน้ำหนักของประชากรย่อย เมื่อ $p = 1$

$\lambda_p = \{\lambda_{p1}, \lambda_{p2}, \lambda_{p3}, \lambda_{p4}\}$	String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
$\lambda_1 =$ [0 0 0 1]	1	[3 10 13 9 20 16 12 18 5 17 4 8 19 7 11 1 15 14 2 6]	[3 4 5 1 6 2]
$\lambda_3 =$ [0.333 0 0 0.667]	3	[6 10 15 9 20 19 12 11 5 14 2 8 16 17 1 18 13 7 4 3]	[3 4 5 2 1 6]
$\lambda_9 =$ [0.33 0.33 0 0.33]	9	[14 12 5 11 17 9 1 3 18 8 7 15 4 20 10 2 19 16 6 13]	[4 3 1 6 2 5]
$\lambda_{10} =$ [0 0.33 0.33 0.33]	10	[11 4 13 15 19 9 3 10 1 20 7 5 18 17 8 12 16 14 6 2]	[3 4 5 2 1 6]
$\lambda_{12} =$ [0 0.333 0 0.667]	12	[12 4 10 5 15 16 20 18 6 14 7 9 11 2 19 17 13 8 1 3]	[2 5 6 4 1 3]
$\lambda_{13} =$ [0 0 0.333 0.667]	13	[18 6 16 5 7 11 3 17 12 9 13 1 2 15 20 14 19 4 8 10]	[2 4 3 1 5 6]
$\lambda_{16} =$ [0.33 0 0.33 0.33]	16	[3 2 18 16 13 19 4 1 8 15 14 10 9 20 12 5 17 11 7 6]	[4 3 6 5 1 2]

ขั้นที่ 7. ทำการพัฒนาสตริงคำตอบอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ (COIN/WT) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักได้แก่ 1. การสร้างสตริงต้นแบบของคำตอบรุ่นลูก 2. การสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูกโดยใช้อัลกอริทึมการบรรจวบบนสตริงต้นแบบ

ขั้นที่ 7.1 สร้างสตริงต้นแบบของคำตอบรุ่นลูก

เริ่มจากทำการเลือกสตริงต้นแบบจากสตริงคำตอบในประชากรย่อย โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) และจะใช้ค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่กำลังพิจารณาในการคำนวณ ในที่นี้คือ จุดค่าถ่วงนี้หนักที่ 1 ($\lambda_1 =$ [0 0 0 1])

โดยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่นำมาคิดต้องผ่านการนอร์มัลไลแล้วตามตารางที่ 5.13 ที่คำนวณได้จากสมการ $\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.00001) - z_i^*}$ ซึ่งจะได้ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง

(Dummy Fitness) ตามตารางที่ 5.14 จากนั้นทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเท่ากับ 1 ถ้ามีมากกว่า 1 สตริงคำตอบทำการสุ่มเลือกอย่างอิสระ ในตัวอย่างนี้สตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเท่ากับ 1 มีเพียงสตริงคำตอบเดียว คือ สตริงคำตอบที่ 9 ดังนั้นจะใช้สตริงที่ 9 เป็นต้นแบบในการสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูก

ตารางที่ 5.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรย่อยที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้ว

String	Norm-Objective			
	$\bar{f}_1$	$\bar{f}_2$	$\bar{f}_3$	$\bar{f}_4$
1	1	1	1	1
3	0.07	0.50	0.30	0.52
9	0.22	1.00	0.15	0.20
10	0.12	0.50	0.16	0.37
12	0.37	0.50	0.61	0.52
13	0.02	0.00	0.28	0.37
16	0.39	1.00	0.47	0.37

ตารางที่ 5.14 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของประชาการย่อยที่ λ_1

P	String	λ_p	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$	$g(x\|\lambda_P, z^*) = \max_{1 \le i \le 4}\{\lambda_{1i} \times \bar{f}_i\}$	Dummy Fitness
1	1	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	4
1	3	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	0.52	0.52	3
1	9	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	1
1	10	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	0.37	0.37	2
1	12	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	0.52	0.52	3
1	13	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	0.37	0.37	2
1	16	[0 0 0 1]	0.00	0.00	0.00	0.37	0.37	2

เมื่อได้สตริงต้นแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็จะกำหนดบิตของต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูก ซึ่งขั้นตอนการกำหนด 4 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ทำการคำนวณช่วงบิตของต้นแบบ (R_{bt}) สำหรับสตริงคำตอบของขั้นงานจาก ร้อยละในการกำหนดช่วงของบิต $\times 20$ (N) ส่วนสตริงคำตอบของขั้นงานคำนวณจากร้อยละในการกำหนดช่วงของบิต $\times 6$ (N_w)

ขั้นที่ 2 สุ่มจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบโดยทำการสุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง 20 (N) สำหรับสตริงคำตอบของขั้นงาน และทำการสุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง 6 (N_w) สำหรับสตริงคำตอบของพนักงาน เท่ากับจำนวนจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบ (N_{cp}) ในตัวอย่างเท่ากับ 2จุด

ขั้นที่ 3 ทำการเลื่อนบิตของต้นแบบจากจุดอ้างอิงไปด้านหน้าและด้านหลัง โดยมีเงื่อนไขดังต่อไป คือ พิจารณาจากค่าช่วงบิตของต้นแบบ (R_{bt}) ถ้าเป็นเลขคู่สามารถคิดตามสมการที่ 5.3 แต่ถ้าเป็นเลขคี่จะคิดจากสมการที่ 5.4 ซึ่งค่า $\left[\frac{R_{bt}-0.5}{2}\right]$ ที่นำมาคิดจะต้องเป็นจำนวนเต็มเสมอ

เลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหน้าที่ตำแหน่งบิต $=$ จุดบิตอ้างอิง $+ \left[\frac{R_{bt}-0.5}{2}\right]$

เลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหลังที่ตำแหน่งบิต $=$ จุดบิตอ้างอิง $- \left[\frac{R_{bt}-0.5}{2}\right] + 1$ สมการที่ 5.3

เลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหน้าที่ตำแหน่งบิต $=$ จุดบิตอ้างอิง $+ \left[\frac{R_{bt}-0.5}{2}\right]$

เลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหลังที่ตำแหน่งบิต $=$ จุดบิตอ้างอิง $- \left[\frac{R_{bt}-0.5}{2}\right]$ สมการที่ 5.4

ขั้นที่ 4 ได้สตริงคำต้นแบบของรุ่นลูกที่ได้มีกำหนดค่าความสำคัญในการจัดสรรให้กับบิตบ้างตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>ตัวอย่างการกำหนดบิตต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบของขั้นงานรุ่นลูก</u>

ขั้นที่ 1 คำนวณช่วงบิตของต้นแบบ (R_{bt}) สำหรับสตริงคำตอบของขั้นงาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.2 \times 20 = 4$ บิต

ขั้นที่ 2 สุ่มจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบโดยทำการสุ่มค่าระหว่าง 1 ถึง 20 สมมติว่าสุ่ม บิต 6 และ 15 ตามรูปที่ 5.4 (ก)

ขั้นที่ 3 ทำการเลื่อนบิตของต้นแบบจากจุดอ้างอิงไปด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งในที่ตัวอย่างนี้มีบิตที่ 6 และ 15 ดังนั้นต้องเลื่อนบิตของต้นแบบ 2 ช่วง และเมื่อพิจารณาค่า R_{bt} ในขั้นตอนที่ 1 ซึ่งมีเป็นคู่ ดังนั้นจะทำการเลื่อนบิตตามสมการที่ 5.3 ดังนี้

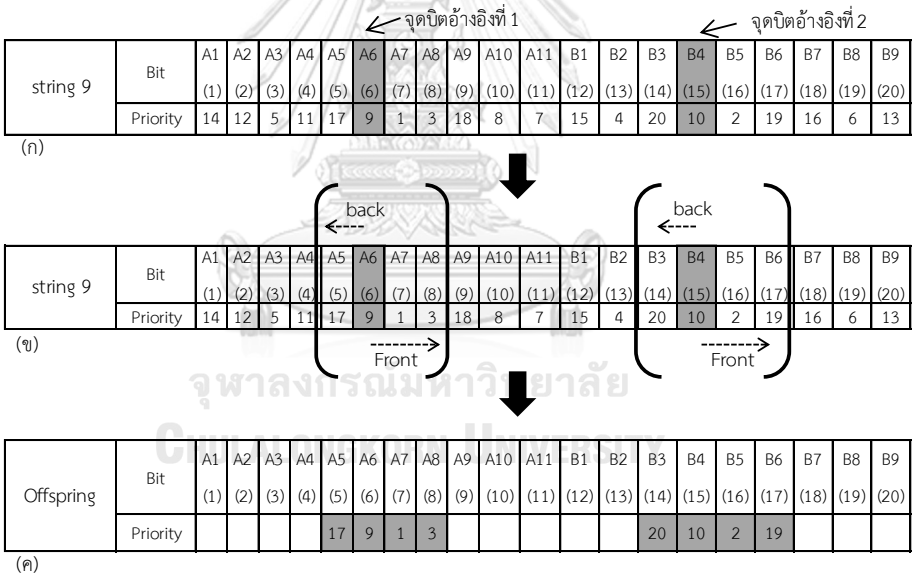
<u>จุดบิตอ้างอิงที่ 1 คือ บิตที่ 6</u>

เลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหน้าที่ตำแหน่งบิตที่ $= 6 + \left[\frac{4-0.5}{2}\right] = 8$ และเลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหลังที่ตำแหน่งบิตที่ $= 6 - \left[\frac{4-0.5}{2}\right] + 1 = 5$ ดังนั้นช่วงบิตต้นแบบของจุดอ้างอิงที่ 1 จะอยู่ระหว่าง 5 – 8 ตามรูปที่ 5.4 (ข)

<u>จุดบิตอ้างอิงที่ 2 คือ บิตที่ 15</u>

เลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหน้าที่ตำแหน่งบิตที่ $= 15 + \left[\frac{4-0.5}{2}\right] = 17$ และเลื่อนช่วงต้นแบบไปด้านหลังที่ตำแหน่งบิตที่ $= 15 - \left[\frac{4-0.5}{2}\right] + 1 = 14$ ดังนั้นช่วงบิตต้นแบบของจุดอ้างอิงที่ 1 จะอยู่ระหว่าง 14 – 17 ตามรูปที่ 5.4 (ข)

ขั้นที่ 4 ได้ต้นแบบสตริงคำของรุ่นลูกที่ได้มีกำหนดค่าความสำคัญในการจัดสรรให้กับบิตบ้างตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งได้แก่ บิตที่ 5 – 8 และ 14 -17 ตามรูป 5.4 (ค)



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนการกำหนดบิตต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน

ซึ่งเมื่อทำการกำหนดบิตต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบของพนักงานรุ่นลูกด้วยวิธีเดียวกันจะได้ ต้นแบบสตริงคำของรุ่นลูกที่ได้มีกำหนดค่าความสำคัญในการจัดสรรให้กับบิตบ้างตัวเป็นที่เรียบร้อย ตามรูป 5.5

Offspring	Bit	High Skill (1)	High Skill (2)	Medium Skill (3)	Medium Skill (4)	Medium Skill (5)	Low Skill (6)
	Priority	4			6		

รูปที่ 5.5 บิตต้นแบบสำหรับใช้การสร้างสตริงคำตอบของพนักงาน

ขั้นที่ 7.2 สร้างสตริงคำตอบรุ่นลูกบนสตริงต้นแบบ

การสร้างสตริงคำตอบของขั้นงานคือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับขั้นงาน (A1-A1 และ B1-B9) โดยลำดับความคัญของขั้นงานแรกจะใช้การสุ่มอย่างอิสระ และใช้ค่าความน่าจะเป็นของคู่อันดับลำดับความสำคัญในตารางความน่าจะเป็นร่วมของขั้นงานสำหรับการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไป สตริงคำตอบที่ได้จะต้องมีลำดับความสำคัญที่ซ้ำกัน ส่วนการสร้างสตริงคำตอบของพนักงานนั้น คือการกำหนดลำดับความสำคัญให้กับพนักงาน (H-H-M-M-M-L) จะมีขั้นตอนเหมือนกับการสร้างสตริงคำตอบของขั้นงาน แต่จะแตกต่างกันที่ใช้ตารางความน่าจะเป็นร่วมของพนักงานแทน

ซึ่งการสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ของอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบนั้นจะออกมาที่ละ 2 สตริงคำตอบที่มีขั้นตอนการสร้างที่แตกต่าง แบบที่ 1 คือจะไม่ยอมให้มีการเลือกลำดับความสำคัญสตริงต้นแบบกำหนดไว้แล้ว แบบที่ 2 คือจะยอมให้มีการเลือกลำดับความสำคัญสตริงต้นแบบกำหนดไว้แล้วและทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบไม่ให้มีลำดับความสำคัญที่ซ้ำกัน โดยมีขั้นตอนการสร้างสตริงคำตอบดังนี้

ตัวอย่างการพัฒนาสตริงคำตอบของขั้นงาน แบบที่ 1

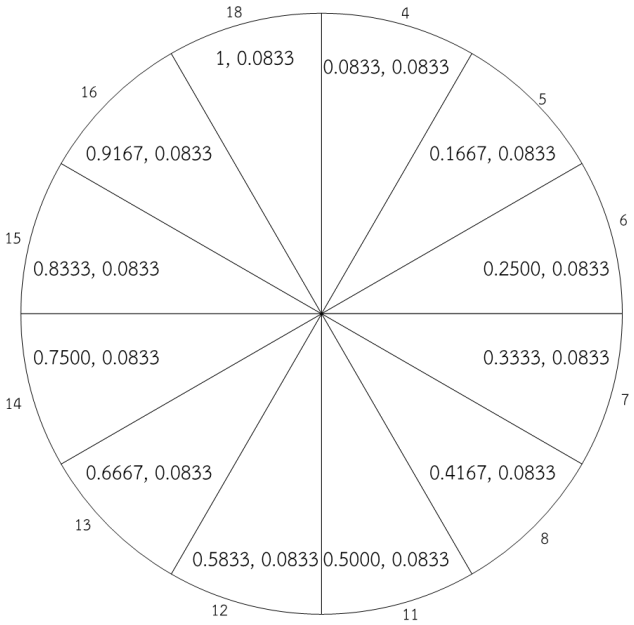
2) พิจารณาค่าความน่าจะเป็นของคู่อันดับลำดับความสำคัญว่ามีค่ามากกว่าเท่ากับ 1 หรือน้อยกว่าเท่ากับ 0 หรือไม่ได้ ซึ่งในที่นี้ไม่มีค่าความน่าใดเลยที่เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นไม่มีการรีเซ็ตตารางความน่าจะเป็นร่วมในแถวใดเกิดขึ้น และสามารถเริ่มสตริงคำตอบได้ทันที

3) ทำการพิจารณาสตริงคำตอบต้นแบบที่ได้มีการเลือกไว้แล้ว ว่าจะต้องกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดให้กับบิตใดบ้าง และลำดับความสำคัญใดบ้างที่ได้เลือกไปแล้วในสตริงคำตอบต้นแบบ ซึ่งในตัวอย่างนี้จะต้องกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดให้กับบิตที่ 1-4, 9-13,18-20 และลำดับความสำคัญที่ถูกเลือกไปแล้วได้แก่ 1, 2, 3, 9, 10, 17, 19 และ 20

4) เริ่มจากกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก (บิตที่ 1) ในที่นี้คือ A1 ซึ่งทุกลำดับความสำคัญมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.05 แต่จากขั้นตอนที่ 2ได้ระบุไว้ว่าลำดับความสำคัญที่ถูกเลือกไปแล้วได้แก่ 1, 2, 3, 9, 10, 17, 19 และ 20 ซึ่งจะไม่สามารถเลือกได้อีก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้จะมีค่าตามตารางที่ และทำการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญโดยใช้ Roulette Wheel Selection ตามรูปที่ 5.6 สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.34 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A1 จะเท่ากับ 8

ตารางที่ 5.15 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในบิตที่ 1 (รุ่นลูกแบบที่ 1)

ลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
4	0.05	0.0833	0.0833
5	0.05	0.0833	0.1667
6	0.05	0.0833	0.2500
7	0.05	0.0833	0.3333
8	0.05	0.0833	0.4167
11	0.05	0.0833	0.5000
12	0.05	0.0833	0.5833
13	0.05	0.0833	0.6667
14	0.05	0.0833	0.7500
15	0.05	0.0833	0.8333
16	0.05	0.0833	0.9167
18	0.05	0.0833	1
รวม	0.6	1	1



รูปที่ 5.6 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 1 (A1) (รุ่นลูกแบบที่ 1)

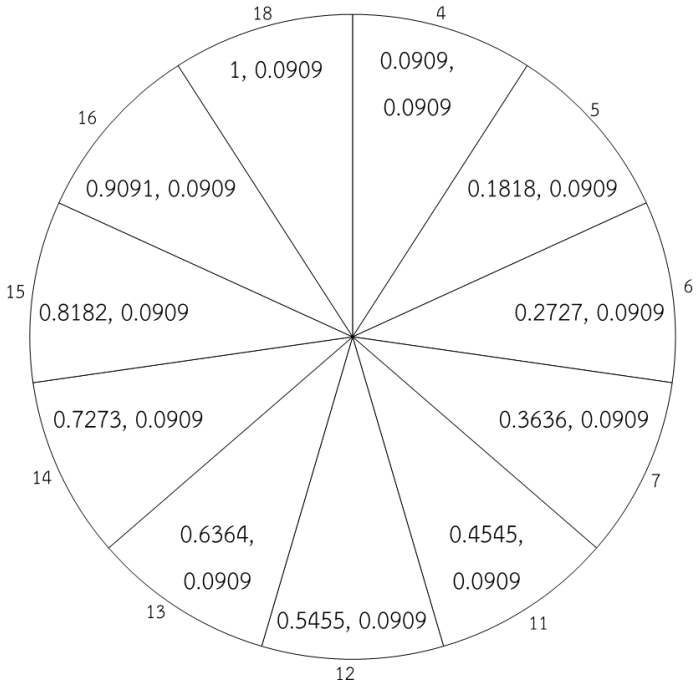
5) ทำการปรับปรุงลำดับความสำคัญที่เลือกได้ โดยลำดับความสำคัญที่เลือกไปแล้ว คือ ลำดับความสำคัญที่ 1, 2, 3, 8, 9, 10, 17, 19 และ 20 ซึ่งจะไม่สามารถเลือกได้อีก

6) กำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับบิตที่ 2 ในที่นี้คือ A2 โดยพิจารณาตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 8 ซึ่งลำดับความสำคัญที่ไม่สามารถเลือกนั้น คือลำดับความสำคัญที่ 1, 2, 3, 8, 9, 10, 17, 19 และ 20 ซึ่งค่าความน่าในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้ และค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้จะเป็นจะมีค่าตามตารางที่ 5.16 ต่อจากนั้นทำการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญโดยใช้ Roulette Wheel Selection ตามรูปที่ 5.7สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.82 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A2 จะเท่ากับ 16

ตารางที่ 5.16 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในบิตที่ 2 (รุ่นลูกแบบที่ 1)

ลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
4	0.05	0.0909	0.0909
5	0.05	0.0909	0.1818
6	0.05	0.0909	0.2727
7	0.05	0.0909	0.3636
11	0.05	0.0909	0.4545
12	0.05	0.0909	0.5455
13	0.05	0.0909	0.6364
14	0.05	0.0909	0.7273
15	0.05	0.0909	0.8182
16	0.05	0.0909	0.9091
18	0.05	0.0909	1
รวม	0.55	1	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.7 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 2 (A2) (รุ่นลูกแบบที่ 1)

7) ทำซ้ำขั้นตอนการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรจนกระทั่งสามารถกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับทุกขั้นงานจนครบ จนได้สตริงคำตอบของขั้นงานเป็น [8 16 5 4 17 9 1 3 13 14 18 6 7 20 10 2 19 15 11 12]

<u>ตัวอย่างการพัฒนาสตริงคำตอบของขั้นงาน แบบที่ 2</u>

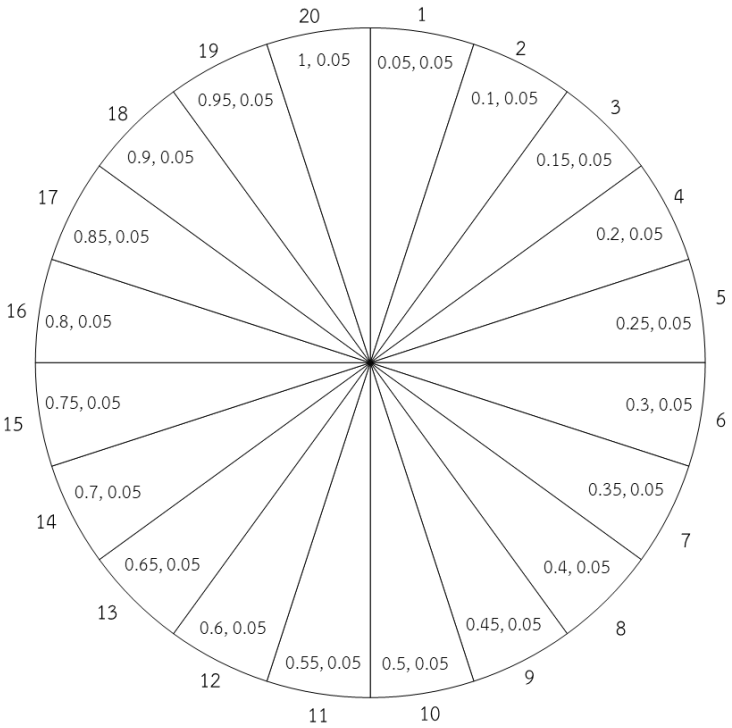
1) พิจารณาค่าความน่าจะเป็นของคู่อันดับลำดับความสำคัญว่ามีค่ามากกว่าเท่ากับ 1 หรือน้อยกว่าเท่ากับ 0 หรือไม่ได้ ซึ่งในที่นี้ไม่มีค่าความน่าใดเลยที่เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นไม่มีการรีเซ็ตตารางความน่าจะเป็นร่วมในแถวใดเกิดขึ้น และสามารถเริ่มสตริงคำตอบได้ทันที

2) ทำการพิจารณาสตริงคำตอบต้นแบบที่ได้มีการเลือกไว้แล้ว ว่าจะต้องกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดให้กับบิตใดบ้าง และลำดับความสำคัญใดบ้างที่ได้เลือกไปแล้วในสตริงคำตอบต้นแบบ ซึ่งในตัวอย่างนี้จะต้องกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดให้กับบิตที่ 1-4, 9-13,18-20 และลำดับความสำคัญที่ถูกเลือกไปแล้วได้แก่ 1, 2, 3, 9, 10, 17, 19 และ 20 ซึ่งถ้าเลือกซ้ำจะต้องมีวิธีการซ่อมแซมสตริงคำตอบตามตารางที่ 5.17 ตัวอย่างเช่น ถ้าบิตที่ 3 สุ่มได้ลำดับความสำคัญที่ 10 ซึ่งไปซ้ำกับต้นแบบบิตที่ 14 ดังนั้นจะทำการเปลี่ยนลำดับความสำคัญของต้นแบบบิตที่ 14 เป็นที่ 5 แทน

ตารางที่ 5.17 การซ่อมแซมสตริงคำตอบของการสร้างสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ของอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ (แบบที่ 2) ของโจทย์ตัวอย่าง

บิตที่ซ้ำกับต้นแบบ	A1 (1)	A2 (2)	A3 (3)	A4 (4)	A9 (9)	A10 (10)	A11 (11)	B1 (12)	B2 (13)	B7 (18)	B8 (19)	B9 (20)
แทนที่ต้นแบบด้วยลำดับความสำคัญ	14	12	5	11	18	8	7	15	4	16	6	13

3) เริ่มจากกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานแรก (บิตที่ 1) ในที่นี้คือ A1 จะเห็นได้ว่าสามารถเลือกลำดับความสำคัญใดก็ได้ ซึ่งทุกลำดับความสำคัญมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.05 แต่ถ้าซ้ำกับต้นแบบจะต้องทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบตามตารางที่ 5.17 ดังนั้นความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้จะมีค่าตามตารางที่ 5.18 และทำการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญโดยใช้ Roulette Wheel Selection ตามรูปที่ 5.8 สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.43 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A1 จะเท่ากับ 9 ไปซ้ำกับต้นแบบบิตที่ 6 ดังนั้นจะทำการเปลี่ยนลำดับความสำคัญของต้นแบบบิตที่ 6 เป็นที่ 14 แทน



รูปที่ 5.8 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 1 (A1) (รุ่นลูกแบบที่ 2)

ตารางที่ 5.18 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในขั้นงานแรก (รุ่นลูกแบบที่ 2)

ลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
1	0.05	0.05	0.05
2	0.05	0.05	0.1
3	0.05	0.05	0.15
4	0.05	0.05	0.2
5	0.05	0.05	0.25
6	0.05	0.05	0.3
7	0.05	0.05	0.35
8	0.05	0.05	0.4
9	0.05	0.05	0.45
10	0.05	0.05	0.5
11	0.05	0.05	0.55
12	0.05	0.05	0.6
13	0.05	0.05	0.65
14	0.05	0.05	0.7
15	0.05	0.05	0.75
16	0.05	0.05	0.8
17	0.05	0.05	0.85
18	0.05	0.05	0.9
19	0.05	0.05	0.95
20	0.05	0.05	1
รวม	1	1	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) ทำการปรับปรุงลำดับความสำคัญที่เลือกได้ โดยลำดับความสำคัญที่เลือกไปแล้ว คือ ลำดับความสำคัญที่ 9 ซึ่งจะไม่สามารถเลือกได้อีก

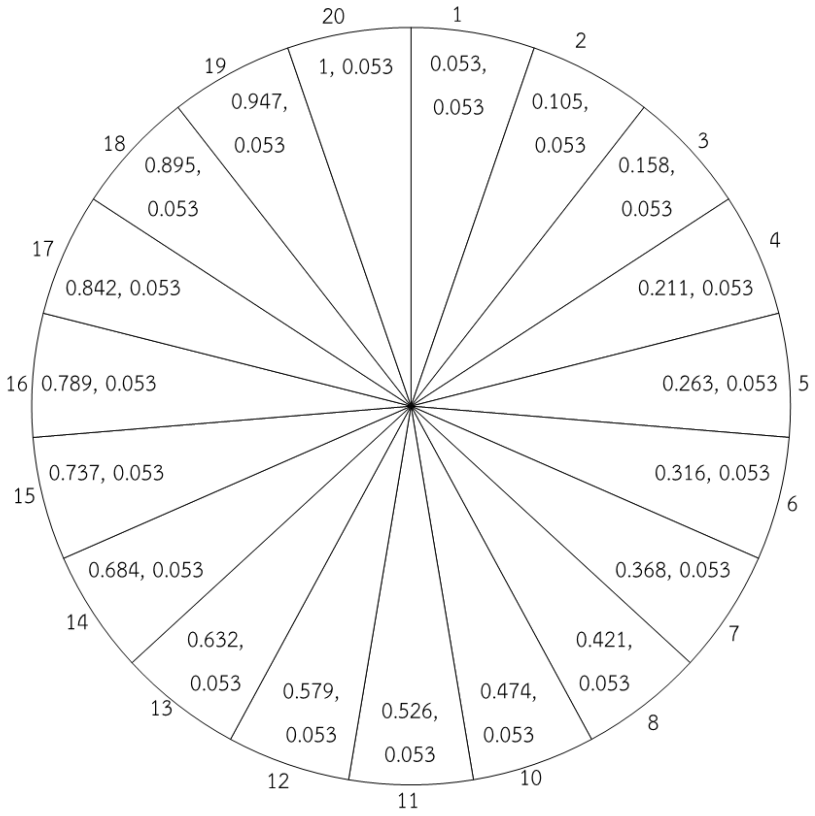
5) กำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับบิตที่ 2 ในที่นี้คือ A2 โดยพิจารณาตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปแถวที่ 9 ซึ่งลำดับความสำคัญที่ไม่สามารถเลือกนั้น คือลำดับความสำคัญที่ 9 ซึ่งค่าความน่าในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้ และค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของ

ลำดับความสำคัญที่เลือกได้จะเป็นจะมีค่าตามตารางที่ 5.19 ต่อจากนั้นทำการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญโดยใช้ Roulette Wheel Selection ตามรูปที่ 5.9 แต่ถ้าซ้ำกับต้นแบบจะต้องทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบ สมมติได้ค่าเท่ากับ 0.54 ดังนั้นลำดับความสำคัญของขั้นงาน A2 จะเท่ากับ 12 ซึ่งไม่ซ้ำกับต้นแบบไม่ต้องทำการซ่อมแซมสตริงคำตอบ

ตารางที่ 5.19 ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญที่สามารถเลือกได้และความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของลำดับความสำคัญที่เลือกได้ในบิตที่ 2 (รุ่นลูกแบบที่ 2)

ลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับความสำคัญ	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือก	ความน่าจะเป็นในการถูกเลือกสะสม
1	0.052631579	0.052631579	0.053
2	0.052631579	0.052631579	0.105
3	0.052631579	0.052631579	0.158
4	0.052631579	0.052631579	0.211
5	0.052631579	0.052631579	0.263
6	0.052631579	0.052631579	0.316
7	0.052631579	0.052631579	0.368
8	0.052631579	0.052631579	0.421
10	0.052631579	0.052631579	0.474
11	0.052631579	0.052631579	0.526
12	0.052631579	0.052631579	0.579
13	0.052631579	0.052631579	0.632
14	0.052631579	0.052631579	0.684
15	0.052631579	0.052631579	0.737
16	0.052631579	0.052631579	0.789
17	0.052631579	0.052631579	0.842
18	0.052631579	0.052631579	0.895
19	0.052631579	0.052631579	0.947
20	0.052631579	0.052631579	1
รวม	1	1	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 5.9 วงล้อในการสุ่มเลือกลำดับความสำคัญให้กับบิตที่ 2 (A2) (รุ่นลูกแบบที่ 2)

6) ทำวนซ้ำขั้นตอนการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรจนกระทั่งสามารถกำหนดลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับทุกขั้นงานจนครบ จนได้สตริงคำตอบของขั้นงานเป็น [9 12 15 3 17 14 1 11 20 18 7 4 5 8 10 2 19 14 13 6]

7) ทำการหาลำดับความสำคัญในการจัดสรรของสตริงคำตอบพนักงานโดยใช้วิธีเดียวกันจนเสร็จ จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกของอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบทั้ง 2 แบบ ตามตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 สตริงคำตอบของขั้นงานและพนักงานรุ่นลูกทั้ง 2 แบบ

String	ขั้นงาน 20 ขั้นงาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
Offspring 1.1	[8 16 5 4 17 9 1 3 13 14 18 6 7 20 10 2 19 15 11 12]	[4 1 3 6 2 5]
Offspring 1.2	[9 12 15 3 17 14 1 11 20 18 7 4 5 8 10 2 19 14 13 6]	[4 5 6 1 2 3]

ขั้นที่ 8. ทำคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) พร้อมกับปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

นำสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง มาทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยการถอดรหัสสตริงคำตอบและทำการปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากรตามตารางที่ 5.21 โดยเทียบค่าในแต่ละวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริงใน 2 กับค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดิมตาม ซึ่งจะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5.21 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 แบบและค่ามากที่สุดและน้อยสุดที่ปรับปรุงใหม่

String	objective				Max ใหม่				Min ใหม่			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 1.1	14.333	6.000	0.060	0.500	20.333	6.000	0.222	0.667	13.500	4.000	0.025	0.400
Offspring 1.2	15.333	6.000	0.026	0.571								
Max เดิม	20.333	6.000	0.222	0.667								
Min เดิม	13.500	4.000	0.025	0.400								

ขั้นที่ 9. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบของประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 แบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $\bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(z_i^{nad} + 0.0001) - z_i^*}$ เมื่อ i คือฟังก์ชันวัตถ์ประสงค์ ($i = 1, 2, 3, 4$) โดยที่ z_i^* และ z_i^{nad} คือค่าน้อยที่สุดและมากที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ทำการปรับปรุงแล้วตามตารางที่ 5.21 ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมดที่ทำการนอร์มัลไลแล้วจะมีค่าตามตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบกลุ่มประชากรย่อยและสตริงคำตอบรุ่นลูกทั้งหมดที่ทำการนอร์มัลไลแล้ว

String	Norm-objective			
	$\bar{f}_1$	$\bar{f}_2$	$\bar{f}_3$	$\bar{f}_4$
1	1	1	1	1
3	0.07	0.50	0.30	0.52
9	0.22	1.00	0.15	0.20
10	0.12	0.50	0.16	0.37
12	0.37	0.50	0.61	0.52
13	0.02	0.00	0.28	0.37
16	0.39	1.00	0.47	0.37
Offspring 1	0.12	1.00	0.18	0.37
Offspring 2	0.27	1.00	0.01	0.64

ขั้นที่ 10. การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_p) ที่กำลังพิจารณา โดยการกำหนดค่าความแข็งแรง(Fitness Assignment) ด้วยวิธีเทบบีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

ซึ่งมีขั้นตอนการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงตอบย่อยๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 10.1 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) กับสตริงคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 ตามตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ผ่านการนอร์มัลไลแล้วไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่1

P	String	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	$\lambda_{11} \times \bar{f}_1$	$\lambda_{12} \times \bar{f}_2$	$\lambda_{13} \times \bar{f}_3$	$\lambda_{14} \times \bar{f}_4$
1	1	0	0	0	1	0.00	0.00	0.00	1.00
1	Offspring 1.1	0	0	0	1	0.00	0.00	0.00	0.37
1	Offspring 1.2	0	0	0	1	0.00	0.00	0.00	0.64

ขั้นที่ 10.2 หาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ โดยที่ $g(x|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le 4}\{\lambda_{pi} \times \overline{f_i}\}$ ของ String 1, Offspring 1.1 และ Offspring 1.2 ซึ่งมีค่า 1, 1 และ 0 ตามลำดับดังตารางที่ 5.24

ตารางที่ 5.24 ค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ของสตริงคำตอบ String1, Offspring 1.1 และ Offspring 1.2

P	String	$\lambda_{11} \times \overline{f_1}$	$\lambda_{12} \times \overline{f_2}$	$\lambda_{13} \times \overline{f_3}$	$\lambda_{14} \times \overline{f_4}$	$g(x\|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le 4}\{\lambda_{1i} \times \overline{f_i}\}$
1	1	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00
1	Offspring 1	0.00	0.00	0.00	0.37	0.37
1	Offspring 2	0.00	0.00	0.00	0.64	0.67

ขั้นที่ 10.3 จากการพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ ตามตารางที่ 5.24 จะสามารถบอกได้ว่าสตริงคำตอบในรุ่นลูก (Offspring) ทั้ง 2 สตริงเป็นสตริงคำตอบที่ดีกว่าสตริงคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_1) เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ น้อยกว่า ซึ่งสตริงคำตอบในรุ่นลูกสตริงที่ 1 เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสตริงคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_1) และสตริงคำตอบในรุ่นลูกสตริงที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 5.25

ตารางที่ 5.25 การพิจารณาคำตอบที่ดีที่สุดระหว่างคำตอบที่อยู่บนจุดค่าถ่วงน้ำหนัก (λ_1) กับคำตอบในรุ่นลูก (Offspring) ที่ได้จากอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ

P	String	$g(x\|\lambda_P, z^*) = \max_{1\le i\le 4}\{\lambda_{1i} \times \overline{f_i}\}$	Selection
1	1	1.00	
1	Offspring 1.1	0.37 (น้อยที่สุด)	Best
1	Offspring 1.2	0.64 (น้อยกว่า)	Good

ขั้นที่ 10.4 จากตารางที่ 5.25 จะเห็นได้ว่าสตริงคำตอบในรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจะทำการแทนที่สตริงคำตอบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 ตามตารางที่ 5.26 และ ตารางที่ 5.27 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.26 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1

$\lambda_p = \{\lambda_{p1},\lambda_{p2},\lambda_{p3},\lambda_{p4}\}$	String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
$\lambda_1 =$ [0 0 0 1]	Off 1.1	[8 16 5 4 17 9 1 3 13 14 18 6 7 20 10 2 19 15 11 12]	[4 1 3 6 2 5]
$\lambda_3 =$ [0.333 0 0 0.667]	3	[6 10 15 9 20 19 12 11 5 14 2 8 16 17 1 18 13 7 4 3]	[3 4 5 2 1 6]
$\lambda_9 =$ [0.33 0.33 0 0.33]	9	[14 12 5 11 17 9 1 3 18 8 7 15 4 20 10 2 19 16 6 13]	[4 3 1 6 2 5]
$\lambda_{10} =$ [0 0.33 0.33 0.33]	10	[11 4 13 15 19 9 3 10 1 20 7 5 18 17 8 12 16 14 6 2]	[3 4 5 2 1 6]
$\lambda_{12} =$ [0 0.333 0 0.667]	12	[12 4 10 5 15 16 20 18 6 14 7 9 11 2 19 17 13 8 1 3]	[2 5 6 4 1 3]
$\lambda_{13} =$ [0 0 0.333 0.667]	13	[18 6 16 5 7 11 3 17 12 9 13 1 2 15 20 14 19 4 8 10]	[2 4 3 1 5 6]
$\lambda_{16} =$ [0.33 0 0.33 0.33]	16	[3 2 18 16 13 19 4 1 8 15 14 10 9 20 12 5 17 11 7 6]	[4 3 6 5 1 2]

ตารางที่ 5.27 การแทนที่ค่าวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1

$\lambda_p = \{\lambda_{p1},\lambda_{p2},\lambda_{p3},\lambda_{p4}\}$	String	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
$\lambda_1 =$ [0 0 0 1]	Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500
$\lambda_3 =$ [0.33 0 0 0.67]	3	14.000	5	0.084	0.538
$\lambda_9 =$ [0.33 0.33 0 0.33]	9	15.000	6	0.053	0.455
$\lambda_{10} =$ [0 0.33 0.33 0.33]	10	14.333	5	0.057	0.500
$\lambda_{12} =$ [0 0.33 0 0.67]	12	16.000	5	0.145	0.538
$\lambda_{13} =$ [0 0 0.33 0.67]	13	13.667	4	0.079	0.500
$\lambda_{16} =$ [0.33 0 0.33 0.33]	16	16.167	6	0.117	0.500

ต่อจากนั้นจะนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่ทำการแทนที่เป็นที่เรียบร้อบแล้วเก็บไว้ในคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้าตามตารางที่ 5.28 แล้วไปทำต่อในขั้นตอนที่ 11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.28 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในรอบก่อนหน้า

กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
4 [0]	14.333	5	0.057	0.500
8 [0]	15.000	6	0.030	0.455
10 [0]	14.333	5	0.057	0.500
11 [0]	14.500	6	0.060	0.455
13 [0]	13.667	4	0.079	0.500
14 [0]	15.000	5	0.117	0.400
17 [0]	13.500	5	0.062	0.455
20 [0]	14.500	6	0.025	0.538
Offspring 1.1 [1]	14.333	6	0.060	0.500

ขั้นที่ 11. ทำการสุ่มเลือกจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) เท่ากับจำนวนที่กำหนด และทำการเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ที่ได้มีการแทนที่คำตอบในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 1 (λ_1) หรือสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ดีที่สุดกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้

โดยมีขั้นตอนการสุ่มจุดข้างเคียงเพื่อทำการเปรียบเทียบและแทนที่สตริงคำตอบย่อยๆ ดังต่อไปนี้ โดยค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเท่ากับ 0.3 และ จำนวนของจุดข้างเคียงเท่ากับ 6 จำนวนของประชากรย่อยเท่ากับ 7

ขั้นที่ 11.1 จำนวนจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ต้องสุ่มเท่ากับ $0.3 \times 7 = 2.1$ ทำการปัดค่าขึ้นเสมอ จึงทำการสุ่มจุดข้างเคียงของจุดค่าถ่วงน้ำหนัก λ_1 จำนวน 3 จุด

ขั้นที่ 11.2 สมมติว่าสุ่มได้ λ_3, λ_{10} และ λ_{16}

ขั้นที่ 11.3 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) ตามตารางที่ 5.29 และนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลแล้วของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 10 (λ_{10}) ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 10 (λ_{10}) ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.30 และสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) กับสตริงคำตอบที่อยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 (λ_{16}) ไปคูณกับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 (λ_{16}) ตามตารางที่ 5.31

ตารางที่ 5.29 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3)

P	String	λ_{31}	λ_{32}	λ_{33}	λ_{34}	$\lambda_{31} \times \overline{f_1}$	$\lambda_{32} \times \overline{f_2}$	$\lambda_{33} \times \overline{f_3}$	$\lambda_{34} \times \overline{f_4}$
3	3	0.33	0	0	0.67	0.023	0	0	0.348
3	Offspring 1.1	0.33	0	0	0.67	0.039	0	0	0.248

ตารางที่ 5.30 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 10 (λ_{10})

P	String	$\lambda_{10,1}$	$\lambda_{10,2}$	$\lambda_{10,3}$	$\lambda_{10,4}$	$\lambda_{10,1} \times \overline{f_1}$	$\lambda_{10,2} \times \overline{f_2}$	$\lambda_{10,3} \times \overline{f_3}$	$\lambda_{10,4} \times \overline{f_4}$
10	10	0	0.33	0.33	0.33	0.000	0.165	0.053	0.122
10	Offspring 1.1	0	0.33	0.33	0.33	0.000	0.330	0.059	0.122

ตารางที่ 5.31 ผลคูณระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์กับค่าถ่วงน้ำหนักในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 (λ_{16})

P	String	$\lambda_{16,1}$	$\lambda_{16,2}$	$\lambda_{16,3}$	$\lambda_{16,4}$	$\lambda_{16,1} \times \overline{f_1}$	$\lambda_{16,2} \times \overline{f_2}$	$\lambda_{16,3} \times \overline{f_3}$	$\lambda_{16,4} \times \overline{f_4}$
16	16	0.33	0	0.33	0.33	0.129	0.000	0.155	0.122
16	Offspring 1.1	0.33	0	0.33	0.33	0.040	0.000	0.059	0.122

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขั้นที่ 11.4 จากตารางที่ 5.29 เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) มีค่าเท่ากับ 0.248 กับค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.348 แล้วค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 มีค่าน้อยกว่านั้นจะถือว่าสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 เป็นคำตอบที่ดีกว่า และจากตารางที่ 5.31 เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) มีค่าเท่ากับ 0.122 กับค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบที่ 16 มีค่าเท่ากับ 0.155 แล้วค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 มีค่าน้อยกว่านั้นจะถือว่าสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 เป็นคำตอบที่ดีกว่า แต่จากตารางที่ 5.30 เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) มีค่าเท่ากับ 0.330

กับค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบที่ 10 มีค่าเท่ากับ 0.165 แล้วค่าฟังก์ชันเทบบีเชฟฟ์ $g(x|\lambda_P, z^*)$ ของสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 มีค่ามากกว่านั้นจะถือว่าสตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 เป็นคำตอบที่แย่กว่า ดังนั้นจะทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) เพียงแค่จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 (λ_3) และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16 (λ_{16}) ตามตารางที่ 5.32 และ 5.53 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.32 การแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 และจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16

$\lambda_p = \{\lambda_{p1}, \lambda_{p2}, \lambda_{p3}, \lambda_{p4}\}$	String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
$\lambda_1 =$ [0 0 0 1]	Off 1.1	[8 16 5 4 17 9 1 3 13 14 18 6 7 20 10 2 19 15 11 12]	[4 1 3 6 2 5]
$\lambda_3 =$ [0.333 0 0 0.667]	Off 1.1	[8 16 5 4 17 9 1 3 13 14 18 6 7 20 10 2 19 15 11 12]	[4 1 3 6 2 5]
$\lambda_9 =$ [0.33 0.33 0 0.33]	9	[14 12 5 11 17 9 1 3 18 8 7 15 4 20 10 2 19 16 6 13]	[4 3 1 6 2 5]
$\lambda_{10} =$ [0 0.33 0.33 0.33]	10	[11 4 13 15 19 9 3 10 1 20 7 5 18 17 8 12 16 14 6 2]	[3 4 5 2 1 6]
$\lambda_{12} =$ [0 0.333 0 0.667]	12	[12 4 10 5 15 16 20 18 6 14 7 9 11 2 19 17 13 8 1 3]	[2 5 6 4 1 3]
$\lambda_{13} =$ [0 0 0.333 0.667]	13	[18 6 16 5 7 11 3 17 12 9 13 1 2 15 20 14 19 4 8 10]	[2 4 3 1 5 6]
$\lambda_{16} =$ [0.33 0 0.33 0.33]	Off 1.1	[8 16 5 4 17 9 1 3 13 14 18 6 7 20 10 2 19 15 11 12]	[4 1 3 6 2 5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.33 การแทนที่ค่าวัตถุประสงค์รุ่นลูกสตริงที่ 1 (Offspring 1.1) ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 3 และ จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ 16

$\lambda_p = \{\lambda_{p1}, \lambda_{p2}, \lambda_{p3}, \lambda_{p4}\}$	String	Objective			
		f_1	f_2	f_3	f_4
$\lambda_1 =$ [0 0 0 1]	Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500
$\lambda_3 =$ [0.33 0 0 0.67]	Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500
$\lambda_9 =$ [0.33 0.33 0 0.33]	9	15.000	6	0.053	0.455
$\lambda_{10} =$ [0 0.33 0.33 0.33]	10	14.333	5	0.057	0.500
$\lambda_{12} =$ [0 0.33 0 0.67]	12	16.000	5	0.145	0.538
$\lambda_{13} =$ [0 0 0.33 0.67]	13	13.667	4	0.079	0.500
$\lambda_{16} =$ [0.33 0 0.33 0.33]	Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500

ขั้นที่ 12. หาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรใหม่

หลังจากทำการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อแทนที่คำตอบที่ดีในประชากรย่อย จะต้องหาค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรใหม่ ตามตารางที่ 5.34

ตารางที่ 5.34 การปรับปรุงค่ามากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ของประชากร

String	objective				Max				Min			
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500								
2	14.333	6	0.085	0.538								
Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500								
4	14.333	5	0.057	0.500								
5	15.000	6	0.053	0.455								
6	14.000	5	0.084	0.538								
7	15.500	6	0.062	0.571								
8	15.000	6	0.030	0.455								
9	15.000	6	0.053	0.455								
10	14.333	5	0.057	0.500	16.000	6.000	0.194	0.571	13.500	4.000	0.025	0.400
11	14.500	6	0.060	0.455								
12	16.000	5	0.145	0.538								
13	13.667	4	0.079	0.500								
14	15.000	5	0.117	0.400								
15	15.333	6	0.194	0.400								
Offspring 1.1	14.333	6	0.060	0.500								
17	13.500	5	0.062	0.455								
18	15.000	6	0.035	0.500								
19	14.500	6	0.076	0.538								
20	14.500	6	0.025	0.538								

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การพิจารณาการจบการทำงาน

ขั้นที่ 13. ทำการเช็คว่าได้ทำการพัฒนาคำตอบให้กับทุกประชากรย่อยหรือปัญหาย่อยแล้วหรือไม่ (พัฒนาคำตอบครบ 1 เจเนอเรชั่นแล้วหรือไม่)

หลังจากนั้น เช็คว่า $p < P$ หรือไม่ถ้าใช่ให้กำหนด $p = p + 1$ และวนกลับไปทำขั้นตอนที่ 4 ซึ่งในโจทย์ตัวอย่างกำหนดให้ $P = 10$ หมายความว่าจะต้องทำการพัฒนาสตริงคำตอบตามขั้นที่ 6-13 อีก 19 ครั้ง เมื่อครบ 20 ปัญหาย่อย จะถือว่าครบ 1 เจเนอเรชั่น จะข้ามไปขั้นตอนที่ 14 ต่อ

<u>ขั้นที่ 14.</u> ทำการคัดเลือกหาคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นปัจจุบัน เพื่อให้เหลือเฉพาะคำตอบที่ดีสุดและปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วมทุกตารางเพื่อใช้ในการสร้างสตริงคำตอบในเจเนอเรชั่นถัดไป

เริ่มจากนำคำตอบที่ที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยคำตอบที่ที่สุดในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 0 และคำตอบของรุ่นลูกที่ดีในแต่ประปัญหาย่อยหรือประชาย่อยที่มีการแทนที่คำตอบ มากำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominate sorting) ซึ่งจะได้ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.35 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า

กลุ่มคำตอบทีดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)					
String	Objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
4 [0]	14.333	5	0.057	0.500	1
8 [0]	15.000	6	0.030	0.455	2
10 [0]	14.333	5	0.057	0.500	1
11 [0]	14.500	6	0.060	0.455	2
13 [0]	13.667	4	0.079	0.500	2
14 [0]	15.000	5	0.117	0.400	1
17 [0]	13.500	5	0.062	0.455	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.35 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นก่อนหน้า (ต่อ)

กลุ่มคำตอบทีดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นเริ่มต้น (G=0)					
String	Objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
20 [0]	14.500	6	0.025	0.538	3
Offspring 1.1 [1]	14.333	6	0.060	0.500	3
Offspring 2.1[1]	14.333	6.000	0.085	0.538	4
Offspring 5.2[1]	15.000	6.000	0.053	0.455	3
Offspring 7.2[1]	14.000	5.000	0.084	0.538	3
Offspring 10.1[1]	14.000	6.000	0.043	0.538	2
Offspring 13.2[1]	14.000	6.000	0.014	0.500	1
Offspring 14.1[1]	13.000	6.000	0.017	0.500	1
Offspring 17.2[1]	13.000	4.000	0.073	0.455	1
Offspring 18.1[1]	13.500	4.000	0.063	0.455	1
Offspring 20.2[1]	13.667	6.000	0.017	0.400	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หลังจากนั้นจะเลือกเก็บเฉพาะคำตอบที่มีความแข็งแรง 1 (Fitness 1) ไว้ในกลุ่มคำตอบทีดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนเรชั่นที่ 1 ทั้งหมด 9สตริงคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย สตริงคำตอบเจเนเรชันที่ 0 ได้แก่ สตริงที่ 4 (String 4[0]) สตริงที่ 10 (String 10[0]) สตริงที่ 14 (String 14[0]) สตริงที่ 17 (String 17[0]) และสตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนเรชันที่ 1 ที่เกิดจากพัฒนาคำตอบในปัญหาย่อยที่ 13 สตริงที่ 2 (Offspring 13.2[1]) ปัญหาย่อยที่ 14 สตริงที่ 1 (Offspring 14.1[1]) ปัญหาย่อยที่ 17 สตริงที่ 2 (Offspring 17.2[1]) ปัญหาย่อยที่ 18 สตริงที่ 1 (Offspring 18.1[1]) และปัญหาย่อยที่ 10 สตริงที่ 1 (Offspring 10.1[1]) ตามตารางที่ 5.36

ตารางที่ 5.36 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นที่ 1

กลุ่มคำตอบทีดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ของเจเนอเรชั่นที่ 1 (G=1)				
String	Objective			
	f_1	f_2	f_3	f_4
4 [0]	14.333	5	0.057	0.500
10 [0]	14.333	5	0.057	0.500
14 [0]	15.000	5	0.117	0.400
17 [0]	13.500	5	0.062	0.455
Offspring 13.2[1]	14.000	6.000	0.014	0.500
Offspring 14.1[1]	13.000	6.000	0.017	0.500
Offspring 17.2[1]	13.000	4.000	0.073	0.455
Offspring 18.1[1]	13.500	4.000	0.063	0.455
Offspring 20.2[1]	13.667	6.000	0.017	0.400

จากนั้นจะทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นทั้งหมด (5 ตารางการบรรจวบ) เป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากการให้รางวัล และการลงโทษแก่สตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดีนั้น จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่เหมาะสม แต่จะทำการปรับปรุงเพียงตารางความน่าจะเป็นร่วม ซึ่งสตริงคำตอบที่จะพิจารณาว่าเป็นสตริงคำตอบที่หรือสตริงคำตอบที่ไม่ดีนั้นต้องอยู่ในจุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการปรับค่าความน่าจะเป็นในแต่ละตารางการบรรจวบ ตามตารางที่ 5.37

ในงานวิจัยนี้จะมีตารางการบรรจวบจะประกอบด้วย 2 ตารางคือ ตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับขั้นงานถัดไปและตารางความน่าจะเป็นร่วมในการเลือกลำดับความสำคัญในการจัดสรรให้กับพนักงานคนถัดไป โดยวิธีการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นนั้นจะเหมือนกับอัลกอริทึมการบรรจวบ (บทที่ 3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.37 จุดค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการปรับค่าความน่าจะเป็นในแต่ละตารางการบรรจวบ

Neighbor COIN	1	2	3	4
COIN 1	λ_4	λ_5	λ_{15}	λ_{18}
COIN 2	λ_2	λ_8	λ_{14}	λ_{17}
COIN 3	λ_7	λ_{11}	λ_{19}	λ_{20}
COIN 4	λ_1	λ_3	λ_{12}	λ_{13}
COIN 5	λ_6	λ_9	λ_{10}	λ_{16}

ขั้นที่ 15. การขึ้นเจเนอเรชั่นใหม่และการจบการทำงาน

เมื่อทำการพัฒนาสตริงคำตอบตามขั้นตอนที่ 5 –14 ครบทุกปัญหาย่อย จะได้รับสตริงคำตอบทั้งหมดของประชากรในเจเนอเรชั่นปัจจุบัน เพื่อเอาไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชั่นถัดไป หลังจากนั้น เช็คว่า $G < Genaretion$ หรือไม่ ถ้าใช้ให้กำหนด $G = G + 1$, $p = 1$ และให้กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 ซึ่งในตัวอย่างนี้จะกำหนดให้ Generation เท่ากับ 10 หมายความว่าจะต้องทำการพัฒนาสตริงคำตอบตาม 6-13 ทั้งหมด 20x10=100 ครั้ง จึงจะจบการพัฒนาคำตอบของสตริง ซึ่งจะถือว่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ในเจเนอเรชั่นที่ 10 ตามตารางที่ 5.38 เป็นกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT ซึ่งมีลำดับความสำคัญของขั้นงานและพนักงานตามตารางที่ 5.39

ตารางที่ 5.38 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) เมื่อจบเจเนอเรชั่นที่ 10

String	objective				Dummy Fitness
	f_1	f_2	f_3	f_4	
Offspring 11.1[4]	12.667	6.000	0.074	0.538	1
Offspring 15.2[4]	13.000	4.000	0.027	0.400	1
Offspring 5.1[8]	13.333	6.000	0.004	0.500	1
Offspring 18.2[8]	13.500	4.000	0.093	0.250	1
Offspring 20.1[8]	13.500	5.000	0.022	0.400	1
Offspring 6.2[10]	14.000	4.000	0.085	0.333	1
Offspring 14.1[12]	14.333	4.000	0.040	0.333	1
Offspring 2.2[15]	14.500	4.000	0.024	0.400	1
Offspring 11.1[15]	14.500	5.000	0.012	0.455	1
Offspring 2.2[18]	14.500	6.000	0.010	0.455	1
Offspring 16.1[19]	14.833	4.000	0.010	0.455	1
Offspring 20.1[19]	15.000	3.000	0.105	0.500	1

ตารางที่ 5.38 ลำดับความสำคัญของขั้นงานและพนักงานของสตริงคำตอบของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT

String	ขั้นงาน 20 ขั้งาน (A1-A11,B1-B9)	พนักงาน 6 คน (H-H-M-M-M-L)
Offspring 11.1[4]	[17 6 9 18 7 14 2 15 16 8 13 10 5 1 4 12 20 19 11 3]	[2 4 1 3 5 6]
Offspring 15.2[4]	[18 14 6 4 3 2 20 8 1 15 16 12 17 19 10 7 13 5 9 11]	[5 4 3 2 6 1]
Offspring 5.1[8]	[2 14 8 17 7 19 12 5 13 4 1 18 16 20 10 15 6 9 11 3]	[3 5 1 2 6 4]
Offspring 18.2[8]	[18 19 13 9 8 7 1 3 5 17 15 4 20 14 6 10 12 2 11 16]	[4 5 1 2 3 6]
Offspring 20.1[8]	[11 10 2 9 7 15 4 8 1 12 16 20 3 14 6 13 17 18 19 5]	[3 2 1 4 5 6]
Offspring 6.2[10]	[14 9 12 11 16 18 15 5 3 13 10 4 6 20 2 19 8 7 17 1]	[3 6 2 4 5 1]
Offspring 14.1[12]	[15 12 6 7 19 10 2 16 13 1 17 5 3 4 8 20 18 9 14 11]	[2 1 3 6 4 5]
Offspring 2.2[15]	[2 8 1 20 7 3 5 11 17 13 10 19 14 4 15 16 9 12 18 6]	[6 1 5 3 2 4]
Offspring 11.1[15]	[10 19 14 20 8 11 15 13 5 2 7 16 12 17 4 3 9 6 18 1]	[6 4 1 2 5 3]
Offspring 2.2[18]	[7 13 3 4 8 20 11 2 10 16 12 14 15 19 1 5 17 9 6 18]	[1 4 3 5 6 2]
Offspring 16.1[19]	[8 17 5 18 2 6 4 10 16 19 13 9 3 11 1 12 15 20 14 7]	[6 5 3 2 1 4]
Offspring 20.1[19]	[3 8 13 4 14 20 2 10 15 16 19 12 17 18 11 5 1 6 7 9]	[1 5 3 6 4 2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 6

การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่ทำการวิจัย

ในบทนี้จะเสนอผลการทดลองแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยใช้อัลกอริทึม MOEA/D, COIN และ AMOEA/D-COIN/WT แล้วนำผลที่ได้มาประเมินและเปรียบเทียบว่าอัลกอริทึมเหล่านี้ มีสมรรถนะในการค้นหาคำตอบที่สูงหรือต่ำแตกต่างกันอย่างไร โดยตัวชี้วัดที่นำมาใช้เปรียบเทียบมีจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัว ซึ่งจะเรียงตามลำดับความสำคัญจากมากไปหาน้อยดังนี้

- การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-Optimal Set)
- การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread to the Pareto-Optimal Set)
- อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I)
- อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II)
- จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Number of Non-Dominated Solution)
- เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.1 ปัญหาที่ในการทดลองสำหรับงานวิจัย

ปัญหาสายการประกอบที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย 12 ปัญหา ซึ่งมีข้อมูลพื้นฐานตามตารางที่ 6.1 ที่นำมาสร้างเป็นปัญหาสายการประกอบลักษณะขนานได้ 6 ปัญหาโดยแต่ละปัญหานั้นแบ่งออกเป็น 4 ปัญหาย่อยตามจำนวนพนักงานและสัดส่วนระดับของพนักงาน (รวมมีปัญหาในการทดลองทั้งสิ้น 24 ปัญหา) ขนาดของปัญหาเมื่อพิจารณาตามจำนวนขั้นงานรวมของสายการประกอบลักษณะขนานจะอยู่ในช่วง 59 ถึง 380 ขั้นงาน ตามตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1รายละเอียดของปัญหาสายการประกอบ

Problem Number	Problem Name	Probability for Unavailable Task	Precedence Diagram and Task time	Reference
1	Mitchell 21	0.2	ดูจากตารางที่ ก.1	(Mitchell, 1957)
2	Buxey 29	0.1	ดูจากตารางที่ ก.2	(Buxey, 1974)
3	Sawyer 30	0.1	ดูจากตารางที่ ก.3	(Sawyer, 1970)
4	Sawyer 30	0.2	ดูจากตารางที่ ก.4	(Sawyer, 1970)
5	Warnecke 58	0.1	ดูจากตารางที่ ก.5	(Warnecke, 1971)
6	Warnecke 58	0.2	ดูจากตารางที่ ก.6	(Warnecke, 1971)
7	Tonge 70	0.1	ดูจากตารางที่ ก.7	(Tonge, 1960)
8	Wee-mag 75	0.2	ดูจากตารางที่ ก.8	(Wee and Magazine, 1981)
9	Arcus 83	0.1	ดูจากตารางที่ ก.9	(Arucs, 1965)
10	Arcus 83	0.2	ดูจากตารางที่ ก.10	(Arucs, 1965)
11	Arcus 111	0.1	ดูจากตารางที่ ก.11	(Arucs, 1965)
12	Scholl 297	0.2	ดูจากตารางที่ ก.12	(Scholl, 1995)

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดของโจทย์ปัญหาสายการประกอบลักษณะขนานที่ใช้ในการทดลอง

No.	Probability for Unavailable Task	Line1		Line2		Total Worker (Line1, Line2)	Worker ratio (H:M:L)
		Problem	Model (MPS)	Problem	Model (MPS)		
P1	0.10	Buxey 29	2 (1:3)	Sawyer 30	2 (2:3)	13 (6, 7)	(4:8:1) , (2:8:3)
						18 (6, 8)	(5:11:2) , (3:11:4)
P2	0.20	Sawyer 30	2 (2:3)	Mitchell 21	3 (2:1:3)	10 (7, 3)	(3:6:1) , (2:6:2)
						15 (10, 5)	(4:9:2) , (3:9:3)
P3	0.10	Tonge 70	3 (2:3:1)	Warnecke 58	3 (2:1:1)	20 (12, 8)	(6:13:1) , (5:13:2)
						29 (17, 12)	(9:19:1) , (7:19:3)
P4	0.20	Wee-mag 75	3 (1:1:4)	Warnecke 58	3 (2:1:1)	22 (15, 7)	(7:14:1) , (6:14:2)
						32 (22, 10)	(9:21:2) , (8:21:3)
P5	0.10	Arcus 83	3 (2:1:2)	Arcus 111	3 (1:1:3)	33 (15, 18)	(10:21:2) , (8:21:4)
						48 (22, 26)	(14:31:3) , (12:31:5)
P6	0.20	Scholl 297	2 (1:1)	Arcus 83	3 (2:1:2)	30 (17, 13)	(9:20:1) , (7:20:3)
						43 (24, 19)	(13:28:2) , (11:28:4)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2 วิธีการทดลองของงานวิจัย

วิธีการทดลองแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 โดยใช้อัลกอริทึมต่างมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอัลกอริทึมที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาแต่ละโจทย์ปัญหาโดยการอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านและทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) เพื่อให้อัลกอริทึมทั้งหมดที่ทำการศึกษาสามารถทำงานเต็มประสิทธิภาพ

2. ทำการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยอัลกอริทึมต่างๆ โดยทำการทดลองหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตลอดกระบวนการทำงานตามจำนวนรอบการทำงานที่กำหนด

3. นำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (1^{st} Frontier) ที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้ (Obtained Pareto-optimal Solution) มารวมเข้าด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบด้วยวิธี Non-Dominated Sorting ซึ่งคำตอบที่อยู่ในค่าความแข็งแรงที่ 1 (1^{st} Frontier) จะถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal Solution)

4. ประเมินค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึมทั้ง 6 ตัว และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในด้านต่างๆตามลำดับความสำคัญของตัวชี้วัด

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในอัลกอริทึม

การค้นหาคำตอบด้วยอัลกอริทึมต่างๆ ในโจทย์ปัญหาที่แตกต่างกัน จำเป็นต้องมีพารามิเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 มีทั้งที่เหมือนกันและแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าอัลกอริทึมทั้งหมดที่ทำการศึกษาจะได้ทำงานตามสมรรถนะที่ดีที่สุดในแต่ละโจทย์ปัญหา ดังนั้นพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละอัลกอริทึมจะถูกกำหนดอย่างมีหลักการโดยค่าพารามิเตอร์บางตัวจะอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาและบางส่วนจะทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE) ดังนี้

6.3.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลองสำหรับอัลกอริทึมต่างๆ

6.3.1.1 พารามิเตอร์สำหรับทุกอัลกอริทึม

1. จำนวนประชากรเบื้องต้น (Population Size) คือ จำนวนสตริงคำตอบทั้งหมดที่อยู่ในแต่ละเจนเนอเรชัน โดยในงานวิจัยทั่วไปจะกำหนดจำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 100 ประชากร (Hwang et al., 2008) แต่สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D จำนวนของประชากรจะขึ้นอยู่กับจำนวนของวัตถุประสงค์และสัดส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งคำนวณได้จาก ฟังก์ชันซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) ซึ่งงานวิจัยนี้มีจำนวนวัตถุประสงค์เท่ากับ 4 วัตถุประสงค์ เมื่อทำการคำนวณจำนวนของประชากรที่ใกล้เคียงกับ 100 นั้น คือ 120 ดังนั้นจำนวนของประชากรในงานวิจัยนี้จะใช้ 120 ประชากร ($C_{O-1}^{H+O-1}, O = 4, H = 7$)

2. จำนวนเจเนอเรชั่น (Generation Size) คือ จำนวนรอบในการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนสิ้นสุดกระบวนการในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งถ้าหากกำหนดจำนวนเจเนอเรชั่นน้อยเกินไป จะทำให้คำตอบที่ได้อาจจะไม่ใช้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด และถ้าหากกำหนดจำนวนเจเนอเรชั่นมากเกินไป จะทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณโดยไม่จำเป็น ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดจำนวนเจเนอเรชั่นในแต่ละโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดลองไว้ตามตารางที่

ตารางที่ 6.3 จำนวนเจเนอเรชั่นในแต่ละโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

No.	Problem Size	Line1	Line2	Generation Size
		Problem	Problem	
P1	Small	Buxey 29	Sawyer 30	1500
P2		Sawyer 30	Mitchell 21	
P3	Medium	Tonge 70	Warnecke 58	2000
P4		Wee-mag 75	Warnecke 58	
P5	Large	Arcus 83	Arcus 111	2000
P6		Scholl 297	Arcus 83	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.3.1.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ของอัลกอริทึม MOEA/D มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว ดังนี้

1. จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (lattice : H) คือ ตัวกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Number of λ_p) หรือจำนวนของสตริงคำตอบทั้งหมด (Population size) โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7 เพื่อทำให้ประชากรเบื้องต้นของสตริงคำตอบมีค่าเท่ากับ 120

2. จำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: T) คือ ตัวกำหนดจำนวนของประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา ซึ่งจำนวนของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T+1$ ซึ่งการพัฒนาคำตอบของ MOEA/D จะเกิดจากการนำสตริงคำตอบที่อยู่ในกลุ่มประชากรย่อยรวมถึงบริเวณที่จะทำการแทนที่คำตอบที่ดีนั้น ถ้ามากหรือน้อยเกินอาจทำเกิดคำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาจำนวนของจุดข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีระดับปัจจัยทั้งหมด 2 ระดับ (Ishibuchi et al., 2013) ได้แก่

- ระดับที่ 1 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 4
- ระดับที่ 2 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง คือ ตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้ามีค่าสูงมากๆ จะทำให้สตริงคำตอบในสตริงคำตอบในประชากรย่อยมีโอกาสเป็นตัวเดียวกันหมดได้ไวขึ้น ซึ่งถ้าเป็นตามที่กล่าวมาจะส่งผลให้ไม่เกิดการพัฒนาคำตอบอีกเพราะการพัฒนาคำตอบโดยการสลับสายพันธ์จะได้สตริงคำตอบเดิมเสมอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับระดับ (Ishibuchi et al., 2013) ได้แก่

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

6.3.1.3 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม COIN

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ของอัลกอริทึม COIN มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว ดังนี้

1. ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น คือ ตัวกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น ถ้ามีค่าสูงจะทำให้จำนวนสตริงคำตอบที่เลือกมามีมากเกินความจำเป็นจะทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณ ดั้งนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553) ได้แก่

- ระดับที่ 1 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่นำมาปรับปรุงความน่าจะเป็น เท่ากับ 10
- ระดับที่ 2 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่นำมาปรับปรุงความน่าจะเป็น เท่ากับ 20
- ระดับที่ 3 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่นำมาปรับปรุงความน่าจะเป็น เท่ากับ 30

2. ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish)

คือ ค่าที่ใช้ในการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น โดยการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าคำตอบที่ที่คิดว่าเป็นคำตอบไม่ดี และเพิ่มโอกาสในการเลือกคำตอบที่ดีให้มีสิทธิในการถูกเลือกมากขึ้น ถ้ามีค่าที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ได้คำตอบที่ไม่เหมาะสมเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) เป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง

.

- ระดับที่ 1 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.05
- ระดับที่ 2 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.1
- ระดับที่ 3 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2

6.3.1.4 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว ดังนี้

1. จำนวนส่วนในการแบ่งค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์ (lattice : H) คือ ตัวกำหนดจำนวนจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก (Number of λ_p) หรือจำนวนของสตริงคำตอบทั้งหมด (Population size) โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7 เพื่อทำให้ประชากรเบื้องต้นของสตริงคำตอบมีค่าเท่ากับ 120

2. จำนวนจุดบิตอ้างอิงที่ใช้คัดลอกต้นแบบ (Number of Template Cut Point : N_{cp}) คือ ตัวกำหนดจำนวนต้นแบบที่จะทำการคัดลอก ซึ่งถ้ามีจำนวนมากก็จะทำให้สตริงคำตอบที่กำลังจะสร้างใหม่นั้นมีความเหมือนกับต้นแบบมาก โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 ในโจทย์ขนาดเล็กและขนาดกลาง (P1-P4) และ ค่าเท่ากับ 3 ในโจทย์ขนาดใหญ่ (P5-P6)

3. ร้อยละในการกำหนดช่วงบิตของต้นแบบ คือ ตัวกำหนดช่วงต้นแบบที่จะทำการคัดลอกหรือทำคงค่าเอาไว้เพื่อที่จะนำสร้างสตริงคำตอบตอบใหม่ ซึ่งถ้ามีจำนวนมากก็จะทำให้สตริงคำตอบที่กำลังจะสร้างใหม่นั้นมีความเหมือนกับต้นแบบมากแม้ว่าจำนวนจุดที่ใช้คัดลอกต้นแบบจะน้อยก็ตาม โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 20

4. ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) คือ ค่าที่ใช้ในการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น โดยการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็น มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าคำตอบที่ที่คิดว่าเป็นคำตอบไม่ดีและเพิ่มโอกาสในการเลือกคำตอบที่ดีให้มีสิทธิในการถูกเลือกมากขึ้น เนื่องจากเมื่อออกแบบการทดลองในอัลกอริทึม COIN แล้วในทุกโจทย์ปัญหาที่ทำการทดลองกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 ในอัลกอริทึมนี้จะกำหนดให้ค่า เท่ากับ 0.1

5. จำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood of Each Weight Vector: T) คือ ตัวกำหนดจำนวนของประชากรย่อยในการพัฒนาคำตอบในแต่ละจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่พิจารณา ซึ่งจำนวนของประชากรย่อยจะเท่ากับ $T+1$ ซึ่งการพัฒนาคำตอบของ MOEA/D จะเกิดจากการนำสตริงคำตอบที่อยู่ในกลุ่มประชากรย่อยรวมถึงบริเวณที่จะทำการแทนที่คำตอบที่ดีนั้น ถ้ามากหรือน้อยเกินอาจทำเกิดคำตอบที่ไม่ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาจำนวนของจุดข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีระดับปัจจัยทั้งหมด 2 ระดับ (Ishibuchi et al., 2013) ได้แก่

- ระดับที่ 1 จำนวนเซตข้างเคียงเท่ากับ 4
- ระดับที่ 2 จำนวนเซตข้างเคียงเท่ากับ 9

6. ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง คือ ตัวกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และแทนที่คำตอบในจุดข้างเคียงที่สุ่มได้ ถ้ามีค่าสูงมากๆ จะทำให้สตริงคำตอบในสตริงคำตอบในประชากรย่อยมีโอกาสเป็นตัวเดียวกันหมดได้ไวขึ้น ซึ่งถ้าเป็นตามที่กล่าวมาจะส่งผลให้ไม่เกิดการพัฒนาคำตอบอีกเพราะการพัฒนาคำตอบโดยการสลับสายพันธ์จะได้สตริงคำตอบเดิมเสมอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง ซึ่งมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับระดับ (Ishibuchi et al., 2013) ได้แก่

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

7. ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น คือ ตัวกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น ถ้ามีค่าสูงจะทำให้จำนวนสตริงคำตอบที่เลือกมามีมากเกินความจำเป็นจะทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณ ดั้งนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เป็นปัจจัยที่ต้องทำการออกแบบการทดลอง โดยมีระดับปัจจัยทั้งหมด 3 ระดับ (ปาลิดา ฉิมคล้าย, 2553) ได้แก่

- ระดับที่ 1 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่นำมาปรับปรุงความน่าจะเป็น เท่ากับ 10
- ระดับที่ 2 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่นำมาปรับปรุงความน่าจะเป็น เท่ากับ 20
- ระดับที่ 3 ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่นำมาปรับปรุงความน่าจะเป็น เท่ากับ 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.3.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments)

ในการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนั้น จะทำการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน (Replication) 3 การทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำตัวชี้วัดสมรรถนะในด้าน การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) และการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) มาเป็นตัวแปรตอบสนองกับระดับปัจจัยที่กำหนดข้างต้น เนื่องจากตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวชี้วัดหลักที่สำคัญในการประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้นั้นเป็นกลุ่ม

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาราโตที่แท้จริงมากเพียงใด และ การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ เพื่อให้มีคำตอบมีคำตอบที่หลากหลาย

6.3.2.1 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

โดยจะทำการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design
2. ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ
3. คำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมดในทุกระดับปัจจัย เพื่อใช้เป็นค่าตัวแปรตอบสนอง
4. พิจารณาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ ด้วยโปรแกรม Minitab 18
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

6.3.2.2 รายละเอียดพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบ

จากการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design และจำนวนพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมที่แตกต่างกัน จะได้จำนวนทรีทเมนต์ (Treatment Combination) ในแต่ละปัญหาการทดลองและแต่ละอัลกอริทึมดังนี้

1. อัลกอริทึม MOEA/D มีจำนวนพารามิเตอร์ หรือปัจจัย 2 ปัจจัย โดย 1 ปัจจัยมี 2 ระดับ แค่อีกปัจจัยมี 3 ระดับ และมีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นในแต่ละปัญหาจะทำการทดลองเท่ากับ 2x3x3 = 18 การทดลอง ตามตารางที่ 6.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.4 จำนวนปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม MOEA/D

พารามิเตอร์ หรือปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนจุดข้างเคียง (T)	2	ระดับที่ 1 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 4
		ระดับที่ 2 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9
2. ร้อยละในกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	3	ระดับที่ 1 ร้อยละ 10
		ระดับที่ 2 ร้อยละ 30
		ระดับที่ 3 ร้อยละ 50

2. อัลกอริทึม COIN มีจำนวนพารามิเตอร์ หรือปัจจัย 2 ปัจจัย โดยทั้ง 2 ปัจจัยมี 3 ระดับ และมีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นในแต่ละปัญหาจะทำการทดลอง เท่ากับ 3x3x3 = 18 การทดลอง ตามตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม COIN

พารามิเตอร์ หรือปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น	3	ระดับที่ 1 ร้อยละ 10
		ระดับที่ 2 ร้อยละ 20
		ระดับที่ 3 ร้อยละ 30
2. ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ	3	ระดับที่ 1 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.05
		ระดับที่ 2 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.1
		ระดับที่ 3 ค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2

3. อัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT มีจำนวนพารามิเตอร์ หรือปัจจัย 3 ปัจจัย โดย 1 ปัจจัยมี 2 ระดับ แต่อีก 2 ปัจจัยมี 3 ระดับ และมีการทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดังนั้นในแต่ละปัญหาจะทำการทดลอง เท่ากับ 3x3x3 = 18 การทดลอง ตามตารางที่ 6.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.6 ปัจจัยและระดับปัจจัยของอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT

พารามิเตอร์ หรือปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ระดับปัจจัย
1. จำนวนจุดข้างเคียง (T)	2	ระดับที่ 1 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 4
		ระดับที่ 2 จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9
2. ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง	3	ระดับที่ 1 ร้อยละ 10
		ระดับที่ 2 ร้อยละ 30
		ระดับที่ 3 ร้อยละ 50
3. ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น	3	ระดับที่ 1 ร้อยละ 10
		ระดับที่ 2 ร้อยละ 20
		ระดับที่ 3 ร้อยละ 30

6.3.2.3 โจทย์ปัญหาที่นำมาทดสอบพารามิเตอร์

ปัญหาที่ใช้ทดลองในการทดสอบพารามิเตอร์มีปัญหาการทดลองทั้งหมด 6 ปัญหา โดยมีจำนวนของพนักและสัดส่วนของพนักงานตามตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 โจทย์ปัญหาที่นำมาทดสอบพารามิเตอร์

No.	Probability for Unavailable Task	Line1		Line2		Total Worker (Line1, Line2)	Worker ratio (H:M:L)
		Problem	Model (MPS)	Problem	Model (MPS)		
1	0.10	Buxey 29	2 (1:3)	Sawyer 30	2 (2:3)	13 (6, 7)	(4:8:1)
2	0.20	Sawyer 30	2 (2:3)	Mitchell 21	3 (2:1:3)	10 (7, 3)	(3:6:1)
3	0.10	Tonge 70	3 (2:3:1)	Warnecke 58	3 (2:1:1)	20 (12, 8)	(6:13:1)
4	0.20	Wee-mag 75	3 (1:1:4)	Warnecke 58	3 (2:1:1)	22 (15, 7)	(7:14:1)
5	0.10	Arcus 83	3 (2:1:2)	Arcus 111	3 (1:1:3)	33 (15, 18)	(10:21:2)
6	0.20	Scholl 297	2 (1:1)	Arcus 83	3 (2:1:2)	30 (17, 13)	(9:20:1)

6.3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์และสรุปผลการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีขั้นตอนการพิจารณา ดังนี้

1. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง เป็นตัวแปรตอบสนองในการทดสอบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดที่ถือว่าระดับของปัจจัยที่ทดสอบนั้นมีคุณภาพ จะมีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองด้วยระดับของปัจจัยนี้ มีค่าใกล้เคียงกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ซึ่งจะมีลำดับการวิเคราะห์ดังนี้

1) วิเคราะห์ ANOVA เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ถ้ามีจะดำเนินการวิเคราะห์ในข้อ 2 ย่อยต่อ แต่ถ้าไม่มีปัจจัยใดเลยมีผลต่อตัวแปรตอบสนองให้ ให้ข้ามไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2) วิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect) หรือกราฟอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) เพื่อเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 0) ซึ่งถ้าปัจจัยมีเพียง 2 ระดับสามารถเลือกได้เลย แต่ถ้ามีมากกว่า 2 ระดับอาจต้องวิเคราะคู่ลำดับ (Mean Comparisons) ร่วมด้วย เพื่อหาว่าระดับของปัจจัยใดบ้างมีที่ทำให้ค่าต่อตัวแปรตอบสนองแตกต่างจากระดับปัจจัยอื่นๆ โดยถ้าหากทดสอบแล้วพบว่า มีปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองดีที่สุดเพียงระดับเดียว จะทำการกำหนดระดับของปัจจัยนั้นเป็นค่าพารามิเตอร์ของอัลอริทึม แต่ถ้าพบว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหลายระดับหรือยังไม่สามารถระบุระดับปัจจัยว่าเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดได้ จะนำปัจจัยนั้นไปทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 2

2. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ เป็นตัวแปรตอบสนองในการทดสอบ ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดที่ถือว่าระดับของปัจจัยที่ทดสอบนั้นมีคุณภาพจะมีค่าเข้าใกล้ 0 นั่นแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จากการทดลองมีการกระจายสม่ำเสมอโดยจะวิเคราะห์เช่นเดียวกับในขั้นตอนแรก

3. หากทำการวิเคราะห์ใน 2 ขั้นตอนแรกแล้วยังไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยให้กับทุกปัจจัยได้เราจะทำการกำหนดจากการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม minitab เพื่อกำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้มีค่าดีที่สุด (ต่ำที่สุดหรือเข้าใกล้ 0)

6.3.2.5 ตัวอย่างการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

1. อัลกอริทึม MOEA/D

ตัวอย่างในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D นี้ เป็นตัวอย่างของโจทย์ขนาดเล็ก โดยมีขั้นงานจำนวน 59 ขั้นงาน พนักงานทั้งหมด 13 คน สัดส่วนของพนักงาน H:M:L เท่ากับ 4:8:1 และจำนวนรอบในการทดสอบ 1500 รอบ โดยค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ในปัญหา 59 ขั้นงาน

จำนวนจุดข้างเคียง	ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Replication		
			1	2	3
4	10	Convergence	0.0787	0.0349	0.1063
		Spread	0.6561	0.6216	0.5811
	30	Convergence	0.1106	0.1061	0.1170
		Spread	0.5622	0.6669	0.6214
	50	Convergence	0.1263	0.2368	0.1041
		Spread	0.5768	0.6162	0.5917
9	10	Convergence	0.0696	0.0578	0.0129
		Spread	0.5736	0.4970	0.7679
	30	Convergence	0.1516	0.0881	0.0992
		Spread	0.6292	0.7171	0.7195
	50	Convergence	0.1361	0.0345	0.0890
		Spread	0.6496	0.7361	0.7179

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นตอนการวิเคราะห์

ขั้นที่ 1. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

นำค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ได้ในตารางที่ 6.8 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) แสดงดังรูปที่ 6.1

General Linear Model: Convergence versus Neighborhood, %replace

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Neighborhood	Fixed	2	4, 9
%replace	Fixed	3	10, 30, 50

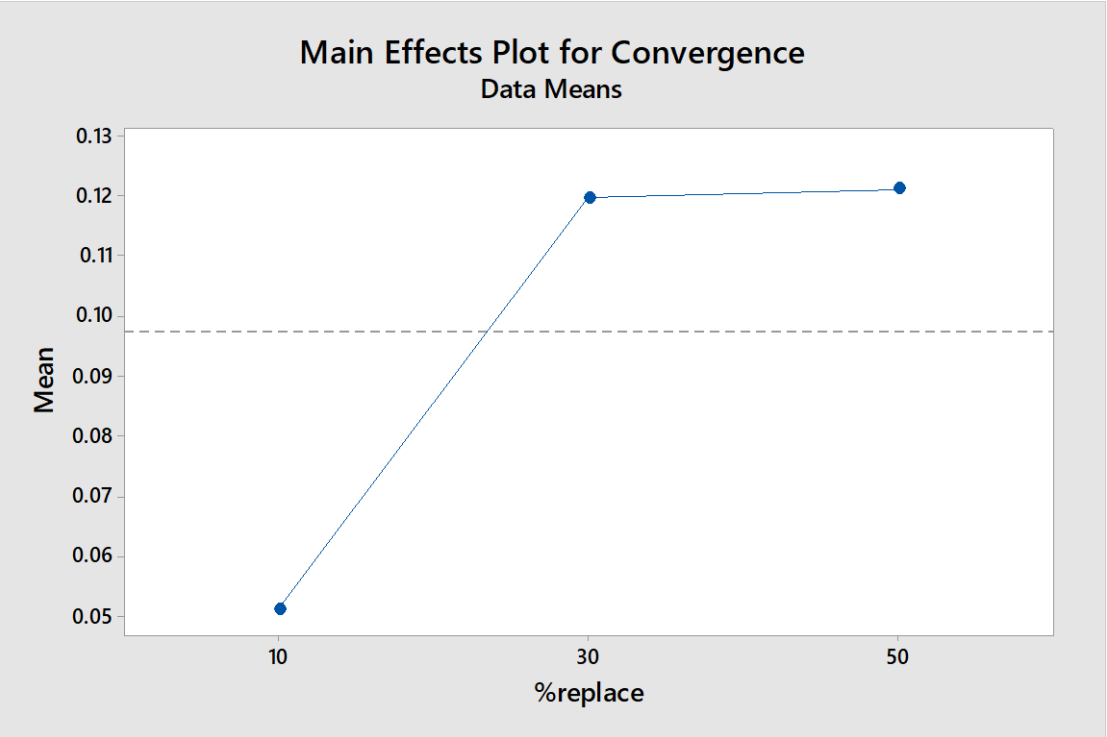
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Neighborhood	1	0.002712	0.002712	1.61	0.228
%replace	2	0.019239	0.009620	5.72	0.018
Neighborhood*%replace	2	0.004592	0.002296	1.37	0.292
Error	12	0.020176	0.001681		
Total	17	0.046720			

รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ ในปัญหา 59 ขั้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูป 6.1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง (%Replace) นั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect) เพื่อเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 0) ระดับสามารถเลือกได้เลย ซึ่งปัจจัยนี้มีอยู่ 3 ระดับ ดังนั้นต้องวิเคราะห์คู่ลำดับ (Mean Comparisons) ด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ร่วมด้วยเพื่อหาว่าระดับของปัจจัยใดบ้างที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าแตกต่างตามรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง ในปัญหา 59 ขั้นงานเมื่อตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

%replace	N	Mean	Grouping
50	6	0.1211	A
30	6	0.11961	A
10	6	0.05103	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
30 - 10	0.0686	0.0247	(0.0045, 0.1327)	2.78	0.036
50 - 10	0.0701	0.0247	(0.0060, 0.1342)	2.84	0.032
50 - 30	0.0015	0.0247	(-0.0626, 0.0656)	0.06	0.998

Individual confidence level = 97.97%

รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์คู่ลำดับด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ในปัญหา 59 ขั้นงาน

จากรูปที่ 6.2 และ 6.3 จะเห็นได้ว่า ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเท่ากับ 10 ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าแตกต่างและดีที่สุด (ค่าต่ำที่สุด) เมื่อเทียบกับระดับปัจจัยอื่น ดังนั้นจะทำการกำหนดระดับปัจจัยให้กับตัวแปรร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง ในปัญหา 59 ขั้นงาน คือ ร้อยละ10 แต่ยังไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะให้กับปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงได้ ดังนั้นจะต้องไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนที่ 2

ขั้นที่ 2. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

นำค่าจากในตารางที่ 6.8 มาทำการวิเคราะห์ต่อโดยเลือกเฉพาะตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้จากปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 10 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) แสดงดังรูปที่ 6.4

General Linear Model: Spread versus Neighborhood

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Neighborhood	Fixed	2	4, 9

Analysis of Variance

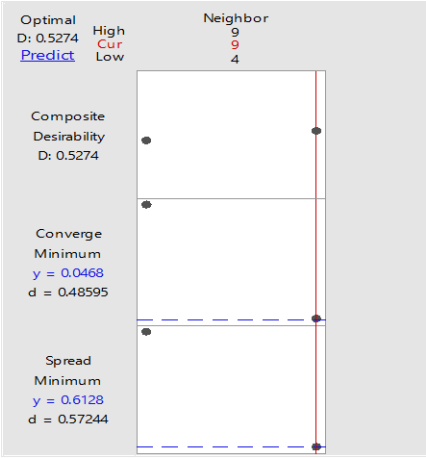
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Neighborhood	1	0.000068	0.000068	0.01	0.940
Error	4	0.041825	0.010456		
Total	5	0.041894			

รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านกา
กระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ในปัญหา 59 ขั้นงาน

จากรูป 6.4 จะเห็นได้ว่าปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood) นั้นมีไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยให้กับปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงได้ จึงต้องไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนที่ 3

ขั้นที่ 3. การวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab

นำค่าจากในตารางที่ 6.8 มาทำการวิเคราะห์ต่อโดยเลือกเฉพาะตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้จากปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 10 ไปทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมของปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab โดยจะกำหนดจากค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้มีค่าดีที่สุด (ต่ำที่สุดหรือเข้าใกล้ 0) ตามรูปที่ 6.5 ซึ่งจะได้ระดับปัจจัยของปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงที่ทำตัวแปรตอบสนองในการทดลองมีค่าดีที่สุด คือ จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9



รูปที่ 6.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer

เมื่อทำการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา 59 ขั้นงาน จนเสร็จ พบว่า ระดับปัจจัยของจำนวนจุดข้างเคียงและร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงที่ทำให้การแก้ปัญหาเกิดประสิทธิภาพสูงสุด คือ จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9 จุด ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 10

2. อัลกอริทึม COIN

ตัวอย่างในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึม COIN นี้ เป็นตัวอย่างของโจทย์ขนาดใหญ่ โดยมีขั้นงานจำนวน 194 ขั้นงาน พนักงานทั้งหมด 33 คน สัดส่วนของพนักงาน H:M:L เท่ากับ 10:21:2 และจำนวนรอบในการทดสอบ 2000 รอบ โดยค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นตอนการวิเคราะห์

ขั้นที่ 1. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

นำค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ได้ในตารางที่ 6.9 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) แสดงดังรูปที่ 6.1

ตารางที่ 6.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ในปัญหา 194 ขั้นงาน

ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตาราง	ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Replication		
			1	2	3
10	0.05	Convergence	0.0767	0.0875	0.1032
		Spread	0.6196	0.6347	0.6032
	0.1	Convergence	0.0795	0.0921	0.0504
		Spread	0.5794	0.5607	0.6436
	0.2	Convergence	0.0908	0.0952	0.0819
		Spread	0.5899	0.6163	0.6062
20	0.05	Convergence	0.0486	0.0760	0.0765
		Spread	0.6763	0.6168	0.5972
	0.1	Convergence	0.0595	0.0706	0.0587
		Spread	0.6396	0.5704	0.6369
	0.2	Convergence	0.0679	0.0734	0.0741
		Spread	0.5532	0.5897	0.6233
30	0.05	Convergence	0.0778	0.0714	0.0923
		Spread	0.6233	0.5967	0.5803
	0.1	Convergence	0.0755	0.0585	0.0839
		Spread	0.6515	0.6087	0.6099
	0.2	Convergence	0.0721	0.1095	0.0809
		Spread	0.6370	0.5287	0.6252

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

General Linear Model: Convergence versus % NO. of ... Learning coeff

Factor Information

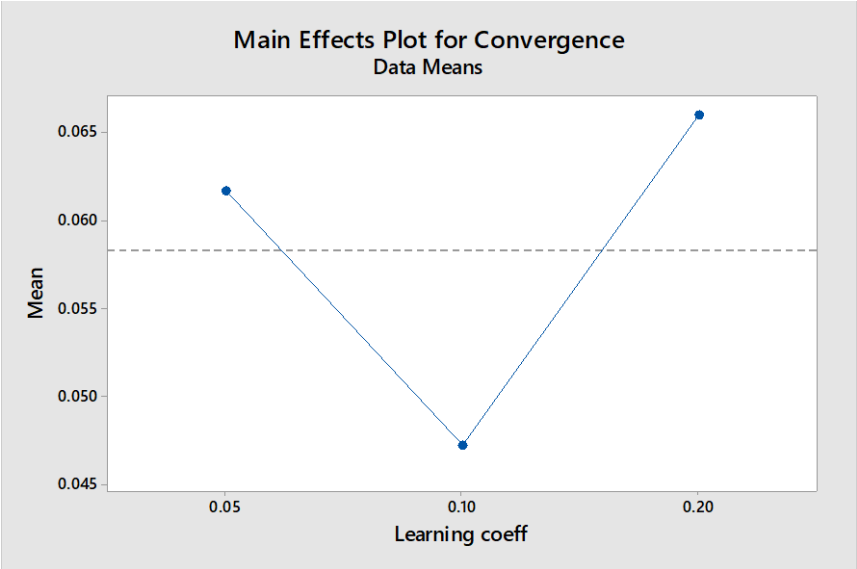
Factor	Type	Levels	Values
% NO. of String Learning	Fixed	3	10, 20, 30
Learning coeff	Fixed	3	0.05, 0.10, 0.20

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
% NO. of String Learning	2	0.000116	0.000058	0.25	0.779
Learning coeff	2	0.001739	0.000870	3.78	0.042
% NO. of String Learning*Learning coeff	4	0.000801	0.000200	0.87	0.500
Error	18	0.004137	0.000230		
Total	26	0.006793			

รูปที่ 6.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบในปัญหา 194 ขั้นงาน

จากรูป 6.6 จะเห็นได้ว่าปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ (Learning Coeff.) นั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect) เพื่อเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 0) ซึ่งปัจจัยนี้มีอยู่ 3 ระดับ ดังนั้นต้องวิเคราะห์คู่ลำดับ (Mean Comparisons) ด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ร่วมด้วยเพื่อหาว่าระดับของปัจจัยใดบ้างที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าแตกต่าง ตามรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ ในปัญหา 194 ขั้นงาน เมื่อตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Learning coeff	N	Mean	Grouping	
0.20	9	0.06596	A	
0.05	9	0.06169	A	B
0.10	9	0.04720		B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
0.10 - 0.05	-0.01448	0.00684	(-0.03156, 0.00259)	-2.12	0.107
0.20 - 0.05	0.00427	0.00684	(-0.01280, 0.02134)	0.62	0.808
0.20 - 0.10	0.01875	0.00684	(0.00168, 0.03583)	2.74	0.030

Individual confidence level = 98.02%

รูปที่ 6.8 ผลการวิเคราะห์คู่ลำดับด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ในปัญหา 194 ขั้นงาน

จากรูปที่ 6.7 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษเท่ากับ 0.1 นั้นทำให้ตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าต่ำที่สุด) เมื่อเทียบกับระดับปัจจัยอื่น แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.8 จะเห็นได้ว่า ค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่ 0.1 และ 0.05 ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจะสามารถระบุได้ว่า ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่มีค่าเท่ากับ 0.2 นั้นทำให้ตัวแปรตอบสนองแย่ที่สุด (ค่าสูงที่สุด) จะตัดระดับปัจจัยนี้ออก แต่ยังไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับทั้ง 2 ปัจจัยได้ ดังนั้นจะต้องไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนที่ 2

ขั้นที่ 2. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

นำค่าจากในตารางที่ 6.9 ที่ทำการตัดค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้จากปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่มีค่าเท่ากับ 0.2 ออกแล้วไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) แสดงดังรูปที่ 6.9

General Linear Model: Spread versus % NO. of String ... Learning coeff

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
% NO. of String Learning	Fixed	3	10, 20, 30
Learning coeff	Fixed	2	0.05, 0.10

Analysis of Variance

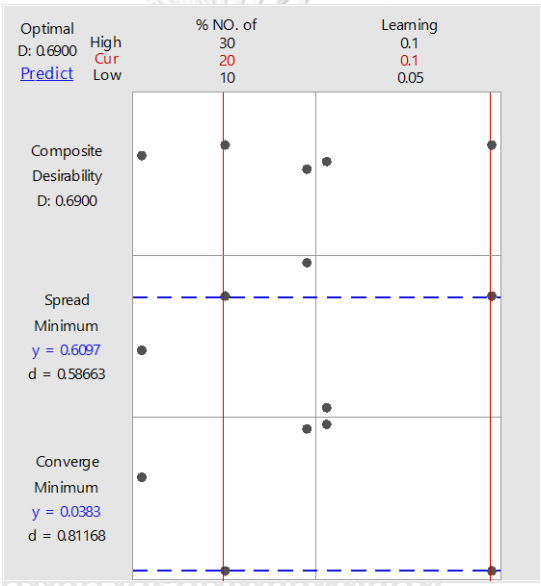
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
% NO. of String Learning	2	0.002053	0.001026	0.64	0.546
Learning coeff	1	0.000594	0.000594	0.37	0.555
% NO. of String Learning*Learning coeff	2	0.001579	0.000790	0.49	0.625
Error	12	0.019353	0.001613		
Total	17	0.023578			

รูปที่ 6.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ในปัญหา 194 ขั้นงาน

จากรูป 6.9 จะเห็นได้ว่าไม่มีปัจจัยใดเลยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้ จึงต้องไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนที่ 3

ขั้นที่ 3. การวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab

นำค่าจากในตารางที่ 6.9 ที่ทำการตัดค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้จากปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่มีค่าเท่ากับ 0.2 ออกแล้วไปทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษและปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab โดยจะกำหนดจากค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้มีค่าดีที่สุด (ต่ำที่สุดหรือเข้าใกล้ 0) ตามรูปที่ 6.10



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.10 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษและปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ในปัญหา 194 ขั้นงาน

เมื่อทำการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา 194 ขั้นงาน จนเสร็จพบว่า ระดับปัจจัยของค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษและปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางที่ทำให้การแก้ปัญหาเกิดประสิทธิภาพสูงสุด คือ ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ เท่ากับ 0.1 และร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตาราง เท่ากับ 20

3. อัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT

ตัวอย่างในการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT นี้ เป็นตัวอย่างของโจทย์ขนาดกลาง โดยมีขั้นงานจำนวน 128 ขั้นงาน พนักงานทั้งหมด 20 คน สัดส่วนของพนักงาน H:M:L เท่ากับ 6:13:1 และจำนวนรอบในการทดสอบ 2000 รอบ โดยค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.10

ตารางที่ 6.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ของปัญหา 128 ขั้นงาน

จำนวนจุดข้างเคียง	ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตาราง	การทำซ้ำ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	
				Convergence	Spread
4	10	10	1	0.0691	0.7553
			2	0.0632	0.8692
			3	0.0319	0.8411
		20	1	0.0249	0.8970
			2	0.0245	0.8656
			3	0.0602	0.8891
		30	1	0.0323	0.8984
			2	0.0431	0.8299
			3	0.0385	0.8106
	30	10	1	0.0420	0.9295
			2	0.0423	0.8816
			3	0.0373	0.9216
		20	1	0.0417	0.8727
			2	0.1069	0.8666
			3	0.0243	0.8430
		30	1	0.0516	0.8713
			2	0.0483	0.8205
			3	0.0485	0.8708
	50	10	1	0.0658	0.8450
			2	0.0661	0.8143
			3	0.0317	0.8705
		20	1	0.0506	0.8248
			2	0.0584	0.8122
			3	0.0512	0.8570
		30	1	0.0472	0.8250
			2	0.0618	0.8305
			3	0.0299	0.8132

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6.10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของค่าพารามิเตอร์ที่ระดับต่างๆ ของปัญหา 128 ขั้นงาน (ต่อ)

จำนวนจุดข้างเคียง	ค่าร้อยละในการกำหนดจำนวนครั้งในการสุ่มจุดข้างเคียง	ร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตาราง	การทำซ้ำ	ตัวชี้วัดสมรรถนะ	
				Convergence	Spread
9	10	10	1	0.0554	0.8463
			2	0.0273	0.8076
			3	0.0901	0.8223
		20	1	0.0322	0.8412
			2	0.0279	0.8575
			3	0.0473	0.8788
		30	1	0.0386	0.8482
			2	0.0423	0.8456
			3	0.0734	0.8483
	30	10	1	0.0015	0.8898
			2	0.0286	0.7999
			3	0.0149	0.8595
		20	1	0.0385	0.8411
			2	0.0260	0.7875
			3	0.0313	0.8645
		30	1	0.0528	0.8367
			2	0.0387	0.7876
			3	0.0473	0.8182
	50	10	1	0.0320	0.7271
			2	0.0338	0.8124
			3	0.0446	0.8600
		20	1	0.0519	0.8020
			2	0.0292	0.8436
			3	0.0198	0.8043
		30	1	0.0254	0.7257
			2	0.0787	0.8748
			3	0.0582	0.8268

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ขั้นตอนการวิเคราะห์

ขั้นที่ 1. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

นำค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่ได้ในตารางที่ 6.10 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง (Convergence) แสดงดังรูปที่ 6.11

General Linear Model: Convergence versus ... % NO. of String Learning

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Neighborhood	Fixed	2	4, 9
% replace	Fixed	3	10, 30, 50
% NO. of String Learning	Fixed	3	10, 20, 30

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Neighborhood	1	0.000783	0.000783	2.28	0.140
% replace	2	0.000426	0.000213	0.62	0.544
% NO. of String Learning	2	0.000355	0.000177	0.52	0.601
Neighborhood*% replace	2	0.001260	0.000630	1.83	0.175
Neighborhood*% NO. of String Learning	2	0.001264	0.000632	1.84	0.174
% replace*% NO. of String Learning	4	0.002400	0.000600	1.74	0.162
Neighborhood*% replace*% NO. of String Learning	4	0.000110	0.000028	0.08	0.988
Error	36	0.012385	0.000344		
Total	53	0.018983			

รูปที่ 6.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ในปัญหา 128 ขั้นงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูป 6.11 จะเห็นได้ไม่มีปัจจัยใดเลยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจะไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้ จึงต้องไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนที่ 2

ขั้นที่ 2. การวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

นำค่าจากในตารางที่ 6.10 ไปทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับโจทย์ปัญหานี้ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งผลการวิเคราะห์ของตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread) แสดงดังรูปที่ 6.12

General Linear Model: Spread versus Neighborhood, % ... ing Learning

Factor Information

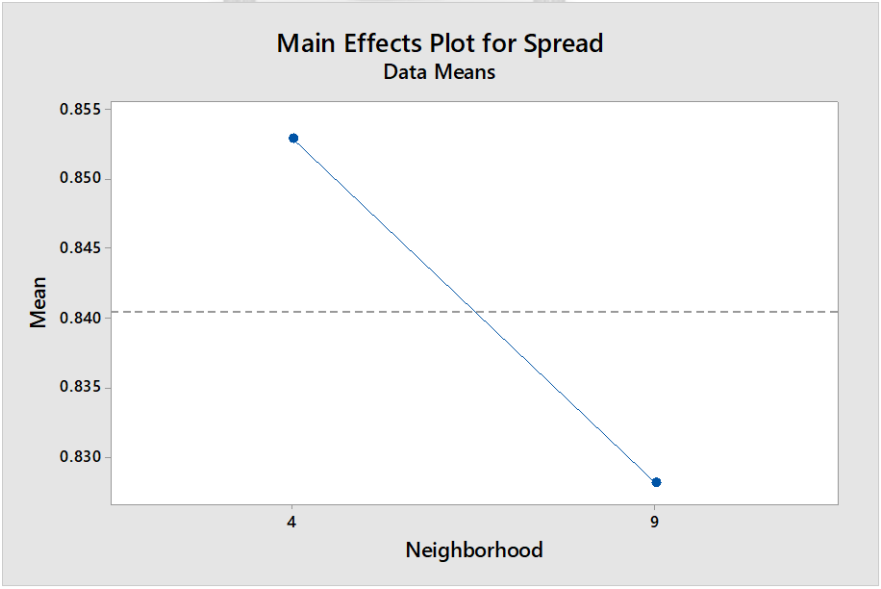
Factor	Type	Levels	Values
Neighborhood	Fixed	2	4, 9
% replace	Fixed	3	10, 30, 50
% NO. of String Learning	Fixed	3	10, 20, 30

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Neighborhood	1	0.008286	0.008286	5.98	0.020
% replace	2	0.011059	0.005529	3.99	0.027
% NO. of String Learning	2	0.002020	0.001010	0.73	0.490
Neighborhood*% replace	2	0.003072	0.001536	1.11	0.341
Neighborhood*% NO. of String Learning	2	0.000605	0.000302	0.22	0.805
% replace*% NO. of String Learning	4	0.011966	0.002991	2.16	0.094
Neighborhood*% replace*% NO. of String Learning	4	0.001754	0.000438	0.32	0.865
Error	36	0.049908	0.001386		
Total	53	0.088668			

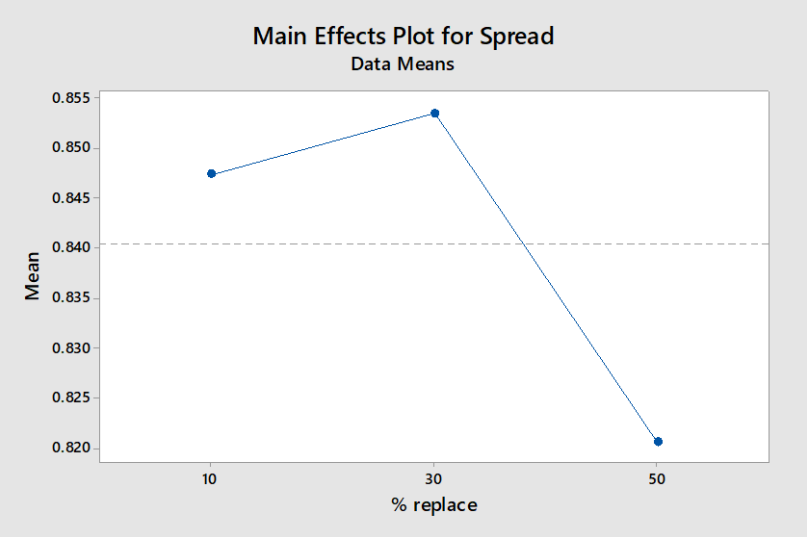
รูปที่ 6.12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ ในปัญหา 128 ขั้นงาน

จะเห็นได้ว่าปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง (%Replace) และปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียง (Neighborhood) นั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect) เพื่อเลือกระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าเข้าใกล้ 0) ซึ่งปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงมีเพียง 2 ระดับทำให้สามารถเลือกได้เลย ตามรูป 6.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า จำนวนจุดข้างเคียงที่มีค่าเท่ากับ 9 จะทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าดีที่สุด (ค่าต่ำที่สุด) เมื่อเทียบกับระดับปัจจัยอื่น



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงของปัญหา 128 ขั้นงาน เมื่อตัวแปรตอบสนองคือการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

แต่ปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงมีอยู่ 3 ระดับปัจจัยดังนั้นต้องวิเคราะห์คู่ลำดับ (Mean Comparisons) ด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ร่วมด้วยเพื่อหาว่าระดับของปัจจัยใดบ้างที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าแตกต่างตามรูปที่ 6.14 และรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.14 กราฟแสดงอิทธิพลของปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงของปัญหา 128 ขั้นงานเมื่อตัวแปรตอบสนองคือการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

% replace	N	Mean	Grouping	
30	18	0.85346	A	
10	18	0.84734	A	B
50	18	0.82051		B

Means that do not share a letter are significantly different.

Tukey Simultaneous Tests for Differences of Means

Difference of Levels	Difference of Means	SE of Difference	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
30 - 10	0.0061	0.0130	(-0.0252, 0.0375)	0.47	0.885
50 - 10	-0.0268	0.0130	(-0.0582, 0.0045)	-2.06	0.108
50 - 30	-0.0330	0.0130	(-0.0643, -0.0016)	-2.53	0.038

Individual confidence level = 98.05%

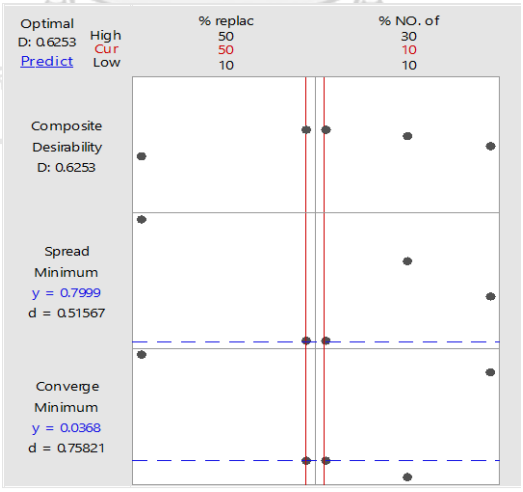
รูปที่ 6.15 ผลการวิเคราะห์คู่ลำดับด้วยวิธี Tukey Pairwise Comparisons ในปัญหา 128 ขั้นงาน

จากรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงเท่ากับ 50 นั้นทำให้ตัวแปรตอบสนองดีที่สุด (ค่าต่ำที่สุด) เมื่อเทียบกับระดับปัจจัยอื่น แต่เมื่อพิจารณาจาก

รูปที่ 6.15 จะเห็นได้ว่า ค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่ 50 และ 10 ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจะสามารถระบุได้ว่า ปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่มีค่าเท่ากับ 30 นั้นทำให้ตัวแปรตอบสนองแย่ที่สุด (ค่าสูงที่สุด) จะตัดระดับปัจจัยนี้ออกจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้ยังไม่สามารถกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงและร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตาราง ดังนั้นจะต้องไปวิเคราะห์ต่อในขั้นตอนที่ 3

ขั้นที่ 3. การวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab

นำค่าจากในตารางที่ 6.10 โดยเลือกเฉพาะค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากปัจจัยจำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9 และการตัดค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากปัจจัยค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษที่มีค่าเท่ากับ 30 ออกแล้ว ไปทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษและปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงคำตอบที่จะนำมาปรับปรุงตารางด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab โดยจะกำหนดจากค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง และการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้มีค่าดีที่สุด ตามรูปที่ 6.16 ซึ่งจะได้ระดับปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงและร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตารางที่ทำตัวแปรตอบสนองในการทดลองมีค่าดีที่สุด เท่ากับ 50 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 6.16 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงและร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตาราง ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer

เมื่อทำการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา 128 ขั้นงาน จนเสร็จ พบว่า ระดับปัจจัยของจำนวนจุดข้างเคียง ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียงและร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตาราง ที่ทำให้การแก้ปัญหาเกิดประสิทธิภาพสูงสุด คือ จำนวนจุดข้างเคียงเท่ากับ 9 จุด ร้อยละในการกำหนดจำนวนการสุ่มจุดข้างเคียง เท่ากับ 50 และร้อยละในการกำหนดจำนวนสตริงที่จะนำมาปรับปรุงตารางเท่ากับ 10

6.3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลอง

จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาแต่ละโจทย์ปัญหาและสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D อัลกอริทึม COIN และอัลกอริทึม MOEA/D-BBO แสดงดังตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาแต่ละโจทย์ปัญหาและสำหรับอัลกอริทึม MOEA/D อัลกอริทึม COIN และอัลกอริทึม MOEA/D-COIN/WT

อัลกอริทึม	พารามิเตอร์	โจทย์ปัญหา					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
MOEA/D	neighborhood	9	9	9	9	9	9
	%replace	10	10	30	30	50	50
COIN	Learning coefficient	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	% NO. of String Learning	30	30	20	20	20	20
MOEA/D-COIN/WT	neighborhood	9	9	9	9	9	9
	%replace	50	50	50	50	50	50
	% NO. of String Learning	30	30	10	10	20	20
	% Range of Bit for Template	2				3	
	No. of Template Cut Point	0.2					
Difference of Cycle Time (Dif_C)		0.5		5	2	150	
Population		120					
Generation		1500		2000			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.4 ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึม

ในการทดลองแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ที่มีทั้งหมด 24 โจทย์ปัญหาที่มีรายละเอียดของปัญหาตามตารางที่ 6.2 โดยการทำซ้ำโจทย์ละ 3 รอบ เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (1^{st} Frontier) ของแต่ละอัลกอริทึมในแต่ละรอบ จากนั้นนำคำตอบเหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตทั้งหมดของทั้ง 3 อัลกอริทึมของแต่ละโจทย์ตัวอย่างมาหากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) โดยต่างๆ โดยกำหนดค่าความแข็งแรงร่วมกันด้วยวิธี Non-Dominated Sorting และทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมนั้นๆ ดังนั้นจะนำเสนอผลของการแก้ปัญหาใน 3 ส่วนดังนี้ 1. ค่าที่ต่ำที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แต่อัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้ (3 รอบ) 2. กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง(นำเสนอเพียง 15 คำตอบเนื่องจากมีคำตอบจำนวนมาก) 3. ผลตัวชี้วัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่แต่อัลกอริทึม โดยในที่นี้จะแสดงผลพร้อมวิเคราะห์เพียงโจทย์ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน (4 ปัญหาย่อย) ส่วนโจทย์ปัญหาอื่นผลจะใน ภาคผนวก ข. ทั้งหมด

6.4.1 ผลการทดลองการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน

ปัญหา P1 นี้ มีจำนวนขั้นงาน 59 ขั้นงาน โดยมีรายละเอียดดังนี้ สายการประกอบที่ 1 ประกอบผลิตภัณฑ์ A จำนวน 2 รุ่น สัดส่วนการผลิต 1:3 จำนวนขั้นงาน 29 ขั้นงาน และสายการประกอบที่ 2 ประกอบผลิตภัณฑ์ B จำนวน 2 รุ่น สัดส่วนการผลิต 2:3 จำนวนขั้นงาน 30 ขั้นงาน โดยจะแบ่งออกเป็นปัญหาย่อยตามจำนวนพนักงานและสัดส่วนระดับของพนักงานได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6.4.1.1 จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1 มีจำนวนเท่ากับ 593 คำตอบ ซึ่งในที่จะแสดงเฉพาะค่าที่ต่ำที่สุดในแต่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แต่ละอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้ตามตารางที่ 6.12 และเมื่อนำคำตอบที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรงจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 6.13 (นำมาแสดงแค่ 15 คำตอบเนื่องจากคำตอบที่ได้มีจำนวนเท่ากับ 110 คำตอบ) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.14 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

ตารางที่ 6.12 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	49	8	0.004202	0.434783
	2	48.8	9	0.006022	0.434783
	3	49	8	0.005074	0.434783
MOEA/D	1	49	9	0.005991	0.315790
	2	49.25	8	0.010396	0.380952
	3	48.75	7	0.005930	0.380952
AMOEA/D-COIN/WT	1	47.8	7	0.001945	0.315790
	2	48.6	7	0.003457	0.350000
	3	47.85	8	0.004114	0.350000

ตารางที่ 6.13 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	47.8	11	0.039523	0.500000
2	47.8	10	0.046397	0.458333
3	47.85	12	0.008729	0.593750
4	47.85	12	0.009635	0.580645
5	48	11	0.034764	0.518519
6	48.3	12	0.006224	0.593750
7	48.3	12	0.005834	0.617647
8	48.35	11	0.033143	0.500000
9	48.5	13	0.006636	0.580645
10	48.5	13	0.007855	0.551724
11	48.5	13	0.007975	0.535714
12	48.6	11	0.009534	0.593750
13	48.6	10	0.029860	0.480000
14	48.6	10	0.017640	0.518519
15	48.75	13	0.005543	0.593750

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:8:1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.3756	0.6248	0.0031	0.0030	<u>100</u>	<u>0.83</u>
MOEA/D	0.2613	0.8113	0.3462	0.0788	36	1.70
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1423</u>	<u>0.6182</u>	<u>0.4517</u>	<u>0.2515</u>	63	4.17

จากตารางที่ 6.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง การกระจายตัวของคำตอบ และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ AMOEA/D-COIN/WT มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ COIN ตามลำดับ แต่การกระจายตัวของคำตอบ ของ COIN จะดีกว่า MOEA/D ส่วนจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำและเวลาในการค้นหาคำตอบอัลกอริทึม COIN มีประสิทธิภาพดีที่สุด

6.4.1.2 จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3 มีจำนวนเท่ากับ 577 คำตอบ ซึ่งในที่จะแสดงเฉพาะค่าที่ต่ำที่สุดในแต่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แต่ละอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้ตามตารางที่ 6.15 และเมื่อนำคำตอบที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรงจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 6.16 (นำมาแสดงแค่ 15 คำตอบเนื่องจากคำตอบที่ได้มีจำนวนเท่ากับ 126 คำตอบ) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.17 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.15 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	51.6	9	0.008020	0.434783
	2	51.6	9	0.005468	0.434783
	3	51.6	8	0.004653	0.409091
MOEA/D	1	51.5	8	0.005318	0.380952
	2	52.05	8	0.006748	0.350000
	3	51.35	8	0.005755	0.315790
AMOEA/D-COIN/WT	1	51.6	8	0.004604	0.409091
	2	51	8	0.004892	0.315790
	3	50.25	8	0.006805	0.350000

ตารางที่ 6.16 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	50.25	12	0.031585	0.551724
2	50.25	11	0.042036	0.566667
3	50.6	13	0.007672	0.606061
4	50.6	13	0.011099	0.593750
5	50.6	13	0.007672	0.606061
6	51	12	0.019938	0.535714
7	51	12	0.006488	0.657895
8	51.25	12	0.019780	0.518519
9	51.25	12	0.011845	0.566667
10	51.35	13	0.013658	0.551724
11	51.35	13	0.013828	0.535714
12	51.4	11	0.017442	0.580645
13	51.4	12	0.014682	0.551724
14	51.4	12	0.015107	0.535714
15	51.45	13	0.014222	0.518519

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.3464	<u>0.6814</u>	0.0000	0.0000	<u>83</u>	<u>0.91</u>
MOEA/D	0.2027	0.7316	0.2902	0.1253	62	1.92
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1592</u>	0.7001	<u>0.3891</u>	<u>0.2080</u>	71	4.05

จากตารางที่ 6.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ AMOEA/D-COIN/WT มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ COIN ตามลำดับ แต่ตัวชี้วัดการกระจายตัวของคำตอบ จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำและเวลาในการค้นหาคำตอบอัลกอริทึม COIN มีประสิทธิภาพดีที่สุด

6.4.1.3 จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:11:2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:11:2 มีจำนวนเท่ากับ 557 คำตอบ ซึ่งในที่จะแสดงเฉพาะค่าที่ต่ำที่สุดในแต่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แต่ละอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้ตามตารางที่ 6.18 และเมื่อนำคำตอบที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรงจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 6.19 (นำมาแสดงแค่ 15 คำตอบเนื่องจากคำตอบที่ได้มีจำนวนเท่ากับ 91 คำตอบ) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.20 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.18 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:11:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	36.9	12	0.005308	0.307692
	2	36.85	12	0.005759	0.280000
	3	37.25	13	0.005966	0.307692
MOEA/D	1	36.2	12	0.003473	0.280000
	2	36.45	12	0.004677	0.280000
	3	37.4	12	0.004419	0.250000
AMOEA/D-COIN/WT	1	35.6	11	0.004438	0.217391
	2	36.9	11	0.004218	0.217391
	3	35.8	13	0.003177	0.280000

ตารางที่ 6.19 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:11:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	35.6	17	0.027577	0.485714
2	35.65	17	0.022214	0.470588
3	35.75	16	0.024318	0.470588
4	35.75	16	0.018908	0.513514
5	35.75	17	0.016797	0.500000
6	35.8	18	0.003723	0.485714
7	35.8	16	0.008186	0.379310
8	35.8	18	0.003723	0.485714
9	35.8	18	0.003913	0.470588
10	36	18	0.003462	0.500000
11	36.2	13	0.019925	0.379310
12	36.2	13	0.016559	0.400000
13	36.2	13	0.013781	0.419355
14	36.2	14	0.006855	0.333333
15	36.2	15	0.012310	0.307692

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 13 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:8:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.3856	<u>0.5023</u>	0.0000	0.0000	<u>85</u>	<u>0.80</u>
MOEA/D	0.2078	0.6718	0.2002	0.1172	48	1.83
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.2014</u>	0.5519	<u>0.4371</u>	<u>0.2161</u>	53	3.33

จากตารางที่ 6.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ AMOEA/D-COIN/WT มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ COIN ตามลำดับ แต่ตัวชี้วัดการกระจายตัวของคำตอบ จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำและเวลาในการค้นหาคำตอบอัลกอริทึม COIN มีประสิทธิภาพดีที่สุด

6.4.1.4 จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ที่กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4 มีจำนวนเท่ากับ 484 คำตอบ ซึ่งในที่จะแสดงเฉพาะค่าที่ต่ำที่สุดในแต่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แต่ละอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบได้ตามตารางที่ 6.21 และเมื่อนำคำตอบที่ได้มากำหนดค่าความแข็งแรงจะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงดังตารางที่ 6.22 (นำมาแสดงแค่ 15 คำตอบเนื่องจากคำตอบที่ได้มีจำนวนเท่ากับ 77 คำตอบ) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆของอัลกอริทึมได้ดังตารางที่ 6.23 (ค่าเฉลี่ยของ 3 การทดลองซ้ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.21 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	38.05	13	0.007049	0.307692
	2	38.25	12	0.007377	0.307692
	3	38.4	13	0.005466	0.307692
MOEA/D	1	38.75	11	0.005649	0.250000
	2	38.25	12	0.007919	0.250000
	3	37.6	11	0.004920	0.250000
AMOEA/D-COIN/WT	1	37	11	0.004164	0.250000
	2	37.4	10	0.002582	0.217391
	3	37.4	12	0.003451	0.217391

ตารางที่ 6.22 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	37	14	0.017174	0.357143
2	37.3	15	0.008938	0.357143
3	37.3	15	0.012504	0.333333
4	37.3	14	0.025764	0.280000
5	37.4	15	0.007315	0.419355
6	37.4	15	0.007202	0.437500
7	37.4	15	0.012749	0.280000
8	37.4	14	0.009613	0.333333
9	37.4	14	0.009613	0.333333
10	37.4	14	0.008502	0.419355
11	37.55	16	0.008594	0.400000
12	37.8	17	0.007001	0.500000
13	37.9	15	0.006484	0.419355
14	38.2	14	0.008853	0.379310
15	38.25	14	0.008027	0.357143

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P1 ขนาด 59 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 18 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:11:4

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.4709	<u>0.4198</u>	0.0000	0.0000	<u>83</u>	<u>1.10</u>
MOEA/D	0.2093	0.6373	0.0669	0.0270	31	1.70
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1092</u>	0.6864	<u>0.5081</u>	<u>0.3198</u>	48	3.42

จากตารางที่ 6.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ AMOEA/D-COIN/WT มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ COIN ตามลำดับ แต่ตัวชี้วัดการกระจายตัวของคำตอบ จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำและเวลาในการค้นหาคำตอบอัลกอริทึม COIN มีประสิทธิภาพดีที่สุด

6.5 **วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง**

ผลสรุปประสิทธิภาพในด้านการหาค่าที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ตัวอย่าง 6 ปัญหา (24 ปัญหาย่อย) โดยแบ่งออกเป็นปัญหาขนาดเล็ก (P1 59 ขั้นงาน และ P2 51 ขั้นงาน) ปัญหาขนาดกลาง (P3 128 ขั้นงาน และ P4 133 ขั้นงาน) และปัญหาขนาดใหญ่ (P5 194 ขั้นงาน P6 380 ขั้นงาน) ดังตารางที่ 6.24 พบว่าอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT สามารถค้นพบกลุ่มคำตอบที่มีค่าต่ำที่สุดที่ต่ำกว่า (ดีกว่า) หรือเทียบเท่าของทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในเกือบทุกปัญหา ยกเว้น ปัญหา P3 กรณีคนงานเท่ากับ 20 (6:13:1) คน ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 (C_T) ที่สูงกว่า (แย่กว่า) อัลกอริทึม COIN ส่วนปัญหา P4 กรณีคนงานเท่ากับ 22 (7:14:1) ,32 (9:21:2) คน และปัญหา P6 กรณีคนงานเท่ากับ 30 (7:20:3) ซึ่งค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 (C_T) ที่สูงกว่า (แย่กว่า) อัลกอริทึม MOEA/D ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการหาคำตอบเบื่องต้นของ AMOEA/D-COIN/WT นั้นดีกว่า COIN และ MOEA/D

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6.24 ค่าต่ำที่สุดของรอบเวลาดำเนินการและจำนวนสถานีที่อัลกอริทึมหาได้ในแต่ละโจทย์ปัญหา

Problem			P1				P2				P3				P4				P5				P6			
Task			59 (29 - 30)				51 (30 - 21)				128 (70 - 58)				133 (75 - 58)				194 (83 - 111)				380 (297 - 83)			
Total worker			13		18		10		15		20		29		22		32		33		48		30		43	
Worker ratio			4:8:1	2:8:3	5:11:2	3:11:4	3:6:1	2:6:2	4:9:2	3:9:3	6:13:1	5:13:2	9:19:1	7:19:3	7:14:1	6:14:2	9:21:2	8:21:3	10:21:2	8:21:4	14:31:3	12:31:5	9:20:1	7:20:3	13:28:2	11:28:4
LB	Cycletime (C_T)		41.7		30.1		35.0		23.3		209.1		144.2		116.0		79.7		3893.2		2676.6		4064.3		2835.5	
	Number of		7		9		5		8		10		15		11		16		17		24		15		22	
Min Objective	Cycletime (C_T)	COIN	48.8	51.6	36.9	38.1	41.1	43.0	28.8	30.2	241.0	247.8	174.3	178.5	135.3	137.8	97.3	99.1	6898.2	7167.6	5663.4	5663.4	4776.2	4902.5	3425.0	3528.5
		MOEA/D	48.8	51.4	36.2	37.6	41.2	43.4	28.8	30.6	244.3	249.0	173.2	175.5	134.3	138.0	95.3	98.0	6891.0	7129.8	5663.4	5663.4	4712.4	4814.2	3411.0	3506.0
		AMOEA/D -COIN/WT	47.8	50.3	35.6	37.0	40.8	42.6	28.8	29.3	242.0	244.5	170.8	175.0	134.8	135.8	95.3	97.0	6835.0	6951.4	5663.4	5663.4	4710.0	4817.8	3388.4	3422.5
	Number of Station (N_S)	COIN	8	8	12	12	7	7	11	11	15	15	22	23	16	16	25	25	27	27	42	41	25	24	37	37
		MOEA/D	7	8	12	11	7	7	11	11	16	15	22	22	15	16	23	24	24	26	39	39	24	24	35	35
		AMOEA/D -COIN/WT	7	8	11	10	7	7	10	10	14	15	21	22	15	15	21	23	25	26	39	39	23	24	34	36

ซึ่งจะสอดคล้องผลตัวชี้วัดสมรรถนะในด้านต่างๆตามตารางที่ 6.25-6.27 ซึ่งเรียงตามขนาดของโจทย์ปัญหา โดยตัวชี้วัด Convergence ของ AMOEA/D-COIN/WT มีค่าน้อยกว่า (ยิ่งเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) ซึ่งหมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก AMOEA/D-COIN/WT มีความใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงมากกว่า และไปทิศทางเดียวกับตัวชี้วัด R_{NDS1} และ R_{NDS2}ของ AMOEA/D-COIN/WT ที่มีค่ามากกว่า (ยิ่งเข้าใกล้ 1 ยิ่งดี) ถึงแม้ตัวชี้วัด Spread ของ AMOEA/D-COIN/WT ในปัญหาตัวอย่างส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่า (ยิ่งเข้าใกล้ 0 ยิ่งดี) ซึ่งหมายความว่ากลุ่มคำตอบที่ได้จาก AMOEA/D-COIN/WT มีความกระจายตัวกันที่น้อยกว่า COIN และในด้านระยะเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบ พบว่า MOEA/D และ AMOEA/D-COIN/WT จะใช้เวลาที่นานกว่า COIN ประมาณ 2 และ 4 เท่าในทุกปัญหาตามลำดับ

เมื่อพิจารณาตามขนาดของปัญหา จะพบว่าปัญหาขนาดเล็ก (P1-P2) และปัญหาขนาดกลาง (P3-P4) ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ R_{NDS1} และ R_{NDS2} ของ AMOEA/D-COIN/WT มีประสิทธิภาพดีที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ COIN ในเกือบทุกโจทย์ปัญหาย่อย และมีบางโจทย์ปัญหาย่อยที่ตัวชี้วัดด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบและจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำของ AMOEA/D-COIN/WT นั้นดีกว่า COIN ส่วนในปัญหาขนาดใหญ่ (P5-P6) ตัวชี้วัดด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบของ COIN จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกปัญหาย่อย และสำหรับทุกโจทย์ปัญหาเวลาในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมจะเรียงจากน้อยไปมากได้ดังนี้ COIN < MOEA/D < AMOEA/D-COIN/WT

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.25 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาขนาดเล็ก (P1-P2)

Problem		P1				P2			
Task		59 (29 - 30)				51 (30 - 21)			
Total worker		13		18		10		15	
Worker ratio		4:8:1	2:8:3	5:11:2	3:11:4	3:6:1	2:6:2	4:9:2	3:9:3
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	**Convergence**								
	COIN	0.38	0.35	0.39	0.47	0.22	0.20	0.29	0.32
	MOEA/D	0.26	0.20	0.21	0.21	0.20	0.17	0.24	0.26
	AMOEA/D-COIN/WT	0.14	0.16	0.20	0.11	0.17	0.13	0.17	0.17
	Spread								
	COIN	0.62	0.68	0.50	0.42	0.72	0.75	0.60	0.57
	MOEA/D	0.81	0.73	0.67	0.64	0.85	0.86	0.76	0.68
	AMOEA/D-COIN/WT	0.62	0.70	0.55	0.69	0.74	0.76	0.60	0.57
	Ratio of non-dominated solutions (self-comparison):R_{NDS1}								
	COIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00
	MOEA/D	0.35	0.29	0.20	0.07	0.29	0.26	0.17	0.07
	AMOEA/D-COIN/WT	0.45	0.39	0.44	0.51	0.25	0.36	0.53	0.41
	Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison):R_{NDS2}								
	COIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00
	MOEA/D	0.08	0.13	0.12	0.03	0.12	0.08	0.07	0.04
	AMOEA/D-COIN/WT	0.25	0.21	0.22	0.32	0.18	0.24	0.27	0.29
	Number of Non-dominated Solution:N_{NDS}								
	COIN	100	83	85	83	67	51	63	57
	MOEA/D	36	62	48	31	29	38	43	51
	AMOEA/D-COIN/WT	63	71	53	48	48	60	47	58
	CPU Time (min)								
	COIN	0.83	0.91	0.80	1.10	0.74	0.86	0.82	1.03
	MOEA/D	1.70	1.92	1.83	1.70	1.48	1.56	1.67	1.42
	AMOEA/D-COIN/WT	4.17	4.05	3.33	3.42	3.10	3.07	2.97	2.98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.26 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาขนาดกลาง (P3-P4)

Problem		P3				P4			
Task		128 (70 - 58)				133 (75 - 58)			
Total worker		20		29		22		32	
Worker ratio		6:13:1	5:13:2	9:19:1	7:19:3	7:14:1	6:14:2	9:21:2	8:21:3
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	**Convergence**								
	COIN	0.35	0.56	0.38	0.56	0.51	0.45	0.58	0.46
	MOEA/D	0.20	0.32	0.17	0.22	0.22	0.31	0.27	0.24
	AMOEA/D-COIN/WT	0.15	0.19	0.15	0.19	0.19	0.21	0.20	0.17
	Spread								
	COIN	0.74	0.67	0.56	0.51	0.51	0.76	0.52	0.54
	MOEA/D	0.88	0.88	0.62	0.59	0.68	0.80	0.52	0.72
	AMOEA/D-COIN/WT	0.73	0.70	0.68	0.65	0.53	0.69	0.61	0.62
	Ratio of non-dominated solutions (self-comparison):R_{NDS1}								
	COIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
	MOEA/D	0.66	0.13	0.38	0.31	0.43	0.04	0.40	0.21
	AMOEA/D-COIN/WT	0.42	0.48	0.48	0.48	0.35	0.68	0.40	0.53
	Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison):R_{NDS2}								
	COIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	MOEA/D	0.15	0.03	0.15	0.15	0.15	0.01	0.20	0.09
	AMOEA/D-COIN/WT	0.18	0.30	0.19	0.19	0.18	0.32	0.14	0.24
	Number of Non-dominated Solution:N_{NDS}								
	COIN	117	116	113	108	109	62	116	116
	MOEA/D	61	36	94	76	44	56	94	73
	AMOEA/D-COIN/WT	112	83	84	69	79	72	55	83
	CPU Time (min)								
	COIN	1.75	1.83	2.01	1.87	1.89	1.95	1.84	1.96
	MOEA/D	3.05	2.95	3.87	3.95	4.12	4.21	3.99	4.12
	AMOEA/D-COIN/WT	5.42	5.21	5.96	5.66	6.01	5.89	5.84	5.95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6.27 สรุปค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในปัญหาขนาดใหญ่ (P5-P6)

Problem		P5				P6			
Task		194 (83 - 111)				380 (297 - 83)			
Total worker		33		48		30		43	
Worker ratio		10:21:2	8:21:4	14:31:3	12:31:5	9:20:1	7:20:3	13:28:2	11:28:4
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	**Convergence**								
	COIN	0.50	0.62	0.75	1.02	0.62	0.60	0.63	0.56
	MOEA/D	0.22	0.34	0.32	0.64	0.25	0.29	0.21	0.25
	AMOEA/D-COIN/WT	0.19	0.21	0.26	0.21	0.21	0.24	0.18	0.19
	Spread								
	COIN	0.56	0.54	0.63	0.71	0.65	0.72	0.68	0.54
	MOEA/D	0.74	0.67	0.75	0.94	0.78	0.92	0.77	0.80
	AMOEA/D-COIN/WT	0.60	0.67	0.78	0.84	0.71	0.80	0.78	0.79
	Ratio of non-dominated solutions (self-comparison):R_{NDS1}								
	COIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	MOEA/D	0.54	0.06	0.15	0.00	0.37	0.54	0.37	0.11
	AMOEA/D-COIN/WT	0.32	0.44	0.46	0.55	0.19	0.24	0.46	0.44
	Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison):R_{NDS2}								
	COIN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	MOEA/D	0.18	0.03	0.12	0.00	0.19	0.18	0.17	0.07
	AMOEA/D-COIN/WT	0.15	0.31	0.21	0.33	0.14	0.15	0.16	0.26
	Number of Non-dominated Solution:N_{NDS}								
	COIN	94.00	86.00	79.00	70.00	83.00	72.00	88.00	90.00
	MOEA/D	77.00	80.00	68.00	49.00	50.00	64.00	87.00	81.00
	AMOEA/D-COIN/WT	98.00	100.00	50.00	45.00	85.00	101.00	65.00	87.00
	CPU Time (min)								
	COIN	7.08	8.12	10.51	10.78	13.21	14.85	13.24	15.32
	MOEA/D	13.40	14.32	15.21	16.24	21.20	20.29	22.13	23.15
	AMOEA/D-COIN/WT	31.02	30.52	29.02	31.05	38.51	38.15	41.20	40.13

Chulalongkorn University

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 6.28 ว่า AMOEA/D-COIN/WT นั้นมีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่นำเสนอได้ดีกว่า COIN, MOEA/D เพราะตัวชี้วัดในด้านการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริง (Convergence) มีค่าที่ดีกว่าในทุกโจทย์ปัญหา ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดเพราะการลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงนั้นจะถือว่าอัลกอริทึมนั้นสามารถค้นหาคำตอบได้ดีกว่า และตัวชี้วัด R_{NDS1} มีค่าที่ดีกว่าในโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและดีเทียบเท่ากับ MOEA/D ในโจทย์ขนาดกลางและขนาดใหญ่ ส่วนตัวชี้วัด R_{NDS2} มีค่าที่ดีกว่าในโจทย์ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง และดีเทียบเท่ากับ MOEA/D ในโจทย์ขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าตัวชี้วัดในการกระจายตัวของคำตอบและจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจะมีค่าแย่กว่าก็ตามในบางโจทย์ปัญหาก็ตาม เพราะเป็นตัวชี้วัดที่แสดงให้เห็นว่า มีจำนวนและการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบให้ผู้แก้ปัญหาได้เลือกนำไปใช้ให้สอดคล้องกับปัญหา แต่ถ้ามีจำนวนของคำตอบให้เลือกเยอะแต่เป็นคำตอบที่ไม่ดีก็จะถือว่าเป็น

อัลกอริทึมที่ไม่มีประสิทธิภาพเช่นกัน รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะนานกว่า แต่ผู้แก้ปัญหาย่อมพึงพอใจกับอัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีได้ภายในระยะเวลาที่ไม่นานจนเกินไป เพราะในที่นานสุดไม่เกิน 1 ชั่วโมง ซึ่งในการแก้ไขปัญหาลักษณะนี้ถือว่ายอมรับได้

ตารางที่ 6.28 สรุปผลการทดลองในทุกโจทย์ปัญหา

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	โจทย์ขนาดเล็ก			โจทย์ขนาดกลาง			โจทย์ขนาดใหญ่		
	COIN	MOEA/D	AMOEA/D-COIN/WT	COIN	MOEA/D	AMOEA/D-COIN/WT	COIN	MOEA/D	AMOEA/D-COIN/WT
Convergence			✓			✓			✓
Spread	☑		☑	✓			✓		
RNDS1			✓		☑	☑		☑	☑
RNDS2			✓			✓		☑	☑
NNDS	✓			✓			☑		☑
CPU Times	✓			✓			✓		

หมายเหตุ ✓ดีที่สุด ,☑ ดีที่ใกล้เคียงกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงบทสรุปงานวิจัย ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย ผลการนำอัลกอริทึมต่างๆมาใช้ในการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่ได้จากงานวิจัยนี้ โดยเนื้อหามีดังต่อไปนี้

7.1 บทสรุปงานวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น ซึ่งเป็นปัญหาแบบเอ็นพีแบบยาก (NP-hard) ทำให้เป็นไปได้ยากที่จะได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ในระยะเวลาที่จำกัด เนื่องจากมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น เวลาของขั้นงานที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับทักษะของพนักงาน พนักงานทักษะต่ำไม่สามารถทำบางขั้นงานได้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) เพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดีในระดับที่สามารถยอมรับได้โดยใช้เวลาไม่นานมากนัก โดยการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ซึ่งจะพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมๆกัน ได้แก่ 1. รอบเวลาดำเนินการน้อยที่สุด (Minimum Cycle Time) 2. จำนวนสถานีน้อยที่สุด (Minimum Station) 3. ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Different Workload Between Workstations) 4. ความไม่เกี่ยวเนื่องกันของขั้นงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด (Minimum Index of Task-Unrelated) และนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based On Decomposition: MOEA/D ร่วมกับวิธีการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ (Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template) ซึ่งจะเรียกว่า วิธีการแบบผสมระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกร่วมกับอัลกอริทึมการบรรจวบโดยใช้ต้นแบบ (A Hybrid Multi-Objective Evolutionary and Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm with Template : AMOEA/D-COIN/WT)

7.1.1 ลักษณะของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยเป็นการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ซึ่งเป็นปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ผลิตภัณฑ์ขึ้นไป โดยผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะเข้าสู่สายการประกอบแบบปะปนกัน ซึ่งปัญหาที่ใช้ประกอบด้วย ปัญหาขนาดเล็ก (P1 59 ขั้นงาน และ P2 51 ขั้นงาน) ปัญหาขนาดกลาง (P3 128 ขั้นงาน และ P4 133 ขั้นงาน) และปัญหาขนาดใหญ่ (P5 194 ขั้นงาน P6 380 ขั้นงาน) ซึ่งหนึ่งขั้นงานจะต้องประกอบด้วยเวลาของพนักงาน 3 ระดับ คือ ทักษะสูง ทักษะปกติ และทักษะต่ำ ซึ่งเวลาที่โจทย์ปัญหาตัวอย่างให้มาผู้วิจัยจะกำหนดให้เป็นเวลาของพนักงานทักษะปกติ ส่วนพนักงานทักษะสูงนั้นจะมีบางขั้นงานที่สามารถทำได้เร็วกว่าหรือใช้เวลาในการทำน้อยกว่าพนักงานทักษะปกติ แต่ในพนักงานทักษะต่ำนั้นจะมีบางขั้นงานที่ทำได้ช้ากว่าหรือใช้เวลาในการทำมากกว่าพนักงานทักษะปกติและบางขั้นงานไม่สามารถทำได้เลย และสตริงคำตอบของงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยสตริงคำตอบของขั้นและสตริงคำตอบพนักงาน โดยการถอดรหัสสตริงคำตอบเพื่อให้ได้เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะต้องสตริงคำตอบทั้ง 2 ส่วนร่วมกัน ซึ่งจะวิธีการของ Bisection Method ในการถอดรหัสสตริงคำตอบ

7.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ

เพื่อเป็นการชี้วัดสมรรถนะของ AMOEA/D-COIN/WT ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 งานวิจัยนี้ได้นำ AMOEA/D-COIN/WT ไปใช้ในการแก้ปัญหาตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 6 ปัญหา (24 ปัญหาย่อย) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีจำนวนขั้นงานครอบคลุมอยู่ในช่วง 59 ถึง 330 ขั้นงาน พร้อมเปรียบเทียบสมรรถนะร่วมกับอัลกอริทึมอื่นๆ ที่เป็นที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาลักษณะคล้ายๆแบบนี้ จำนวนทั้งสิ้น 2 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based On Decomposition: MOEA/D วิธีการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm) ทั้งนี้ ปัญหาการจัดสมดุลที่นำเสนอเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะที่สุดแบบมากวัตถุประสงค์ ในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างอัลกอริทึมต่างๆ ข้างต้นจะอาศัยตัวชี้วัดที่อยู่ภายใต้หลักการการจัดอันดับเชิงพาเรโตจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวได้แก่ 1. การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง 2. การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ 3. อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ 4.อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด 5.จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ และ 6. เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

7.1.3 ผลการนำ AMOEA/D-COIN/WT มาใช้ในการแก้ปัญหา

พบว่า AMOEA/D-COIN/WT สามารถค้นพบกลุ่มคำตอบที่มีค่าต่ำที่สุดที่ต่ำกว่า (ดีกว่า) หรือเทียบเท่าของทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเกือบทุกโจทย์ปัญหา ส่วนในด้านของตัวชี้วัดนั้น AMOEA/D-COIN/WT มีสมรรถนะที่เหนือกว่าทั้ง 2 อัลกอริทึมอย่างชัดเจนในด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ และอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง แต่ในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบและจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า MOEA/D แต่ดีไม่เท่า COIN และเวลาในการค้นหาคำตอบนั้นมีสิทธิภาพที่ไม่ดีซึ่งสามารถเรียงลำดับเวลาในการค้นคำตอบจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ COIN < MOEA/D < AMOEA/D-COIN/WT

แต่เมื่อพิจารณาตามลำดับความสำคัญของตัวชี้วัดนั้นจะเห็นว่า MOEA/D สามารถค้นพบกลุ่มคำตอบที่ดีเพราะมีการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงมากกว่าซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการค้นหาคำตอบโดยอัลกอริทึม เพราะผู้แก้ปัญหาส่วนใหญ่น่าจะอยากได้กลุ่มคำตอบที่ดีกว่าถึงแม้จะมีคำตอบให้เลือกน้อยและการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบไม่ดีก็ตาม รวมถึงเวลาในการค้นหาคำตอบนั้นผู้แก้ปัญหาย่อมพึงพอใจกับอัลกอริทึมที่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีถึงแม้อาจจะใช้เวลานานกว่า ซึ่งในบทความนี้เวลาของ AMOEA/D-COIN/WT อาจจะนานกว่า COIN ถึง 4 เท่า แต่เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้จริงนั้นเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่นานที่สุดของ AMOEA/D-COIN/WT ประมาณ 40 นาทีจึงเป็นเวลาที่ผู้แก้ปัญหายอมรับได้: ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า AMOEA/D-COIN/WT เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลและจัดสรรพนักงานหลายทักษะบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมลักษณะขนานแบบมากวัตถุประสงค์ภายใต้ปัญหาประเภทที่ 2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะให้กับอัลกอริทึม AMOEA/D-COIN/WT ให้สูงยิ่งขึ้นไปอีกด้วยกระบวนการ เสริมอื่นๆ เช่น กระบวนการค้นหาเฉพาะที่ (Local Search) การเปลี่ยนพารามิเตอร์ระหว่างกระบวนการหาคำตอบ (Adaptive Model) เป็นต้น

2. นอกจากวัตถุประสงค์ต่างๆ ที่ใช้ในการจัดสมดุลในงานวิจัยนี้แล้ว อาจมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญอื่นๆ ที่เหมาะแก่การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต หรือทำการปรับเปลี่ยนข้อกำหนดในการจัดสมดุลสายการประกอบเพื่อให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

3. สามารถนำไปวิจัยต่อยอดในด้านของปัญหาการจัดลำดับการผลิต (Sequencing Problem) เพื่อให้ทราบลำดับการผลิตสินค้าที่ทำให้สายการประกอบมีการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ณัฐชัย โยธาบริบาร. 2556. การจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบ ขนาน ด้วยอัลกอริทึมแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปารเมศ ชุติมา, ภาณุวัฒน์ โอฬารวิวัฒนชัย, วรินทร์ วัฒนพรพรหม & ประภาส จงสถิตย์วัฒนา. 2552. การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจวบสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบลักษณะตัวยูที่ทำการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี.

ปาลิดา ฉิมคล้าย. 2553. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วัชรวิทย์ ถนนทอง. 2558. การจัดลำดับผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุปรสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึมการบรรจวบร่วมกับฟัซซี่. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาพร โอฬารวิวัฒน์ชัย & ปารเมศ ชุติมา 2557. การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 24, 87-102.

ภาษาอังกฤษ

ARAÚJO, F. F. B., COSTA, A. M. & MIRALLES, C. 2015. Balancing parallel assembly lines with disabled workers. *European J. of Industrial Engineering,* 9, 344.

ARUCS, A. L. 1965. A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research,* 4, 259-277.

BARTHOLDI, J. J. 1993. Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research,* 31, 2447-2461.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

BLUM, C. & MIRALLES, C. 2011. On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. *Computers & Operations Research,* 38**,** 328-339.

BROCKHOFF, D. & ZITZLER, E. 2009. Objective Reduction in Evolutionary Multiobjective Optimization: Theory and Applications. *Evolutionary Computation,* 17**,** 135-166.

BUXEY, G. M. 1974. Assembly Line Balancing with Multiple Stations. *Management Science,* 20**,** 1010-1021.

CHAKRAVARTY, A. K. 1988. Line balancing with task learning effects. *IIE Transactions,* 20**,** 186-193.

CHAVES, A. A., LORENA, L. A. N. & MIRALLES, C. 2009. Hybrid Metaheuristic for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. *In:* BLESA, M. J., BLUM, C., DI GASPERO, L., ROLI, A., SAMPELS, M. & SCHAERF, A. (eds.) *Hybrid Metaheuristics: 6th International Workshop, HM 2009, Udine, Italy, October 16-17, 2009. Proceedings.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

CHENG, R., LI, M., TIAN, Y., ZHANG, X., YANG, S., JIN, Y. & YAO, X. 2017. A benchmark test suite for evolutionary many-objective optimization. *Complex & Intelligent Systems,* 3**,** 67-81.

DAR-EL, E. M. 1973. MALB—A Heuristic Technique for Balancing Large Single-Model Assembly Lines. *A I I E Transactions,* 5**,** 343-356.

DELICE, Y., KıZıLKAYA AYDOĞAN, E. & ÖZCAN, U. 2016. Stochastic two-sided u-type assembly line balancing: A genetic algorithm approach. *International Journal of Production Research,* 54**,** 3429-3451.

FATTAHI, P., SAMOEI, P. & ZANDIEH, M. 2016. SIMULTANEOUS MULTI-SKILLED WORKER ASSIGNMENT AND MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINE BALANCING. *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications,* 29**,** 211.

GEN, M. & CHENG, R. 2007. Multiobjective Optimization Problems. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization.* John Wiley & Sons, Inc.

GHOSH, S. & GAGNON, R. J. 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research,* 27**,** 637-670.

GLOVER, F. 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research,* 13**,** 533-549.

GÖKÇEN, H., AĞPAK, K. & BENZER, R. 2006. Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics,* 103**,** 600-609.

GOLDBERG, D. E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

GOLDBERG, D. E. & LINGLE, R. Alleles, loci, and the traveling salesman problem. Proceedings of an international conference on genetic algorithms and their applications, 1985. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 154-159.

HE, Z. & YEN, G. G. 2016. Many-Objective Evolutionary Algorithm: Objective Space Reduction and Diversity Improvement. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation,* 20**,** 145-160.

HWANG, R. K., KATAYAMA, H. & GEN, M. 2008. U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research,* 46**,** 4637-4649.

ISHIBUCHI, H., AKEDO, N. & NOJIMA, Y. Relation between neighborhood size and MOEA/D performance on many-objective problems. International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2013. Springer, 459-474.

KILINCCI, O. 2009. A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 46**,** 329-338.

KIM, Y. K., KIM, Y. & KIM, Y. J. 2000. Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach. *Production Planning & Control,* 11**,** 44-53.

KONAK, A., COIT, D. W. & SMITH, A. E. 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety,* 91**,** 992-1007.

KUMAR, R. & SINGH, P. K. 2007. Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP. *In:* ABRAHAM, A., GROSAN, C. & ISHIBUCHI, H. (eds.) *Hybrid Evolutionary Algorithms.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

LEE, T. O., KIM, Y. & KIM, Y. K. 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers & Industrial Engineering,* 40**,** 273-292.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

MILTENBURG, G. J. & WIJNGAARD, J. 1994. The u-line line balancing problem. *Management Science,* 40**,** 1378-1388.

MIRALLES, C., GARCÍA-SABATER, J. P., ANDRÉS, C. & CARDOS, M. 2007. Advantages of assembly lines in sheltered work Centres for disabled. A case study. *International Journal of Production Economics,* 110**,** 187-197.

MIRALLES, C., GARCÍA-SABATER, J. P., ANDRÉS, C. & CARDÓS, M. 2008. Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled. *Discrete Applied Mathematics,* 156**,** 352-367.

MONDEN, Y. 1998. *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time*, CRC Press.

MOREIRA, M. C. D. O. & COSTA, A. M. 2009. A minimalist yet efficient tabu search algorithm for balancing assembly lines with disabled workers. *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Porto Seguro, Brasil***,** 660-671.

OFFICE FOR DISABILITY ISSUES ODI. 2011. *Roadmap 2025: Disability Equality Indicators. Indicator B1: Employment rates.* [Online]. Available: https://www.gov.uk/government/organisations/office-for-disabi. [Accessed].

ÖZCAN, U. 2010. Balancing stochastic two-sided assembly lines: A chance-constrained, piecewise-linear, mixed integer program and a simulated annealing algorithm. *European Journal of Operational Research,* 205**,** 81-97.

SAWYER, J. H. F. 1970. *Line Balancing*, Machinery Publishing.

SCHOLL, A. 1995. Data of assembly line balancing problems. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL).

SCHOLL, A. & BOYSEN, N. 2009. Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure. *International Journal of Production Economics,* 119**,** 90-100.

SHTUB, A. & DAR-EL, E. 1989. A methodology for the selection of assembly systems. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH,* 27**,** 175-186.

SPARLING, D. & MILTENBURG, J. 1998. The mixed-model u-line balancing problem. *International Journal of Production Research,* 36**,** 485-501.

SUNGUR, B. & YAVUZ, Y. 2015. Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems,* 37**,** 290-298.

TONGE, F. M. 1960. A heuristic program for assembly line balancing.

TSUTSUI, S., PELIKAN, M. & GHOSH, A. 2006. Edge histogram based sampling with local search for solving permutation problems. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems,* 3**,** 11-22.

WEE, T. S. & MAGAZINE, M. J. 1981. An efficient branch and bound algorithm for an assembly linebalancing problem - part II: maximize the production rate. Working Paper No. 151, University ofWaterloo, Waterloo.

ZHANG, Q. & LI, H. 2007. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation,* 11**,** 712-731.

ZHANG, W., GEN, M. & LIN, L. 2008. A multiobjective genetic algorithm for Assembly Line Balancing problem with worker allocation. 3026-3033.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง

ปัญหา 21 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Mitchell 21 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	2	3	3	4	5	5	5	7	7	2 3
2	3	2	2	3	2	2	5	3	3	21
3	9	6	5	9	6	5	13	9	7	4
4	3	3	2	5	3	4	6	5	6	5 21
5	7	11	8	9	11	10	-	-	-	6 7
6	3	3	3	4	3	3	5	3	5	8
7	6	9	5	8	11	6	10	15	9	8 14
8	6	3	8	7	4	10	9	5	10	9
9	4	4	7	5	5	7	6	6	9	10 11 12 13
10	1	0	0	1	0	0	2	0	0	15
11	3	2	1	3	4	3	4	6	4	15
12	1	1	1	1	1	1	-	-	-	15
13	3	2	5	5	4	6	7	6	6	17 18
14	3	2	3	3	2	3	-	-	-	19
15	5	4	4	5	5	5	6	7	6	16 18
16	3	4	2	3	4	2	4	4	3	17
17	10	13	10	13	13	16	-	-	-	20
18	5	6	5	5	6	5	6	9	5	19
19	2	1	1	2	1	2	2	2	3	-
20	1	3	3	3	3	3	-	-	-	-
21	6	3	6	7	4	7	-	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัญหา 29 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Buxey 29 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
1	6	5	7	6	-	-	3 25
2	15	13	19	21	19	21	6 26
3	15	7	15	11	15	13	4
4	5	5	5	5	5	5	5
5	9	7	12	12	12	12	8 13
6	10	9	10	11	-	-	8
7	8	6	8	7	8	9	9 12 25
8	12	15	16	19	16	22	11 16
9	2	2	2	2	2	2	10
10	5	2	6	4	7	4	14 15
11	13	21	21	21	29	25	17
12	10	8	10	10	10	12	15
13	7	8	9	10	-	-	17
14	4	4	4	4	5	6	16
15	14	13	14	13	17	15	19
16	7	5	7	5	9	6	18
17	14	16	14	16	14	19	20
18	17	19	17	19	17	22	22
19	6	12	10	12	14	17	21
20	16	15	16	20	22	20	23
21	1	0	1	0	1	0	22
22	7	5	9	6	11	9	23
23	25	21	25	21	25	25	24 28
24	11	10	14	10	-	-	29
25	11	16	14	16	14	16	29
26	2	1	2	1	3	2	27
27	8	5	10	9	10	11	29
28	7	3	7	6	7	9	29
29	15	22	20	22	27	22	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัญหา 30 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Sawyer 30 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
1	5	9	8	9	11	9	4 5
2	6	4	7	5	10	6	11 12
3	19	11	19	18	22	18	16 17
4	8	5	10	9	-	-	7
5	2	1	2	1	2	1	6
6	6	4	6	5	9	6	7
7	9	11	14	18	14	21	8
8	10	4	10	7	14	7	9
9	1	0	1	0	1	0	26
10	4	2	4	4	-	-	24
11	11	10	14	13	14	18	-
12	15	12	15	12	15	17	13
13	4	3	5	4	6	4	14
14	12	14	12	14	12	14	15 20
15	9	6	9	8	11	11	22
16	8	9	10	9	12	13	20
17	2	1	2	2	2	3	18
18	8	8	10	8	14	10	19
19	11	16	18	21	25	25	-
20	12	11	16	11	22	13	21 24
21	16	25	21	25	25	29	22
22	11	15	14	15	19	15	23
23	10	15	16	19	19	19	27
24	7	5	7	5	-	-	25
25	13	13	17	17	23	17	26
26	9	10	9	10	13	14	27
27	16	23	25	30	29	30	28 29
28	7	6	7	8	7	10	-
29	9	12	14	16	14	16	30
30	2	2	2	2	2	2	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.4 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Sawyer 30 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
1	8	5	8	9	11	9	4 5
2	6	5	7	5	-	-	11 12
3	15	11	19	18	26	25	16 17
4	6	9	10	9	12	11	7
5	2	1	2	1	3	2	6
6	6	4	6	5	-	-	7
7	14	14	14	18	17	25	8
8	10	6	10	7	14	9	9
9	1	0	1	0	2	0	26
10	3	4	4	4	6	6	24
11	9	13	14	13	17	15	-
12	12	7	15	12	18	14	13
13	4	3	5	4	7	6	14
14	7	9	12	14	17	14	15 20
15	7	8	9	8	-	-	22
16	8	7	10	9	-	-	20
17	2	2	2	2	3	3	18
18	8	8	10	8	12	10	19
19	18	13	18	21	-	-	-
20	16	11	16	11	16	15	21 24
21	16	19	21	25	21	29	22
22	11	15	14	15	17	15	23
23	16	15	16	19	22	19	27
24	7	5	7	5	-	-	25
25	17	11	17	17	23	20	26
26	7	8	9	10	9	14	27
27	19	23	25	30	-	-	28 29
28	7	6	7	8	7	11	-
29	14	12	14	16	19	22	30
30	2	2	2	2	2	3	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัญหา 58 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Warnecke 58 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	10	6	8	10	7	10	14	7	10	9
2	34	48	33	53	64	44	72	87	60	25
3	41	36	27	41	36	35	41	42	35	21 22
4	27	18	27	36	29	36	-	-	-	10
5	35	26	30	35	40	39	48	46	39	36
6	17	13	12	17	20	15	20	20	18	23 24
7	34	21	18	34	28	24	46	28	33	43
8	18	29	21	23	29	28	23	34	28	44
9	11	10	11	14	10	14	19	12	19	11
10	39	27	48	52	43	64	52	50	64	-
11	25	20	21	33	31	28	45	31	28	13 14 15
12	34	32	31	34	42	41	46	49	41	17
13	7	11	8	12	14	10	12	17	14	17
14	33	48	49	52	48	49	60	48	49	17
15	12	6	8	12	8	10	12	10	12	17
16	25	16	29	33	25	29	45	29	29	18
17	44	27	53	44	36	53	51	42	61	20
18	7	4	5	7	7	9	9	9	11	19
19	15	12	12	15	16	15	21	19	15	23
20	13	11	10	13	11	13	-	-	-	21 25
21	22	21	21	29	21	33	34	29	45	26 44
22	37	26	47	37	26	47	-	-	-	27
23	33	28	37	43	44	37	50	60	37	31
24	18	12	17	23	16	22	27	16	22	31
25	24	15	28	24	24	28	24	24	33	38
26	9	6	9	9	7	9	13	9	13	29
27	12	9	18	16	15	18	22	15	25	30
28	12	12	5	12	15	9	14	18	9	32 33
29	20	14	20	26	23	26	30	27	30	31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Warnecke 58 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
30	14	15	12	22	15	19	22	18	22	34
31	39	48	36	51	63	36	51	63	36	36
32	36	39	53	47	51	53	55	69	61	45
33	34	24	31	34	32	31	-	-	-	35
34	18	18	15	23	24	19	23	28	19	36
35	12	12	12	12	15	12	14	18	12	43
36	39	41	46	52	41	61	60	48	83	37 38
37	7	9	9	12	12	11	17	17	13	39 40 41
38	25	26	27	33	34	36	38	40	42	52
39	44	39	27	44	51	35	44	59	41	43
40	7	5	4	7	5	5	9	6	6	43
41	12	7	10	15	12	13	18	14	13	42
42	10	14	7	13	14	12	18	14	14	43
43	29	20	25	29	31	33	-	-	-	45
44	28	42	38	37	42	38	43	49	44	45
45	27	33	39	43	43	39	-	-	-	46 48 49
46	18	29	18	23	29	23	23	34	23	47 50
47	15	18	18	24	29	18	24	34	18	51
48	5	9	9	9	11	9	11	13	11	55
49	12	16	12	16	16	19	19	16	22	58
50	9	11	8	12	11	13	17	11	15	58
51	20	20	22	26	32	22	36	37	22	52
52	12	5	9	12	9	9	12	9	9	53
53	39	49	46	52	49	61	60	67	61	54
54	9	10	12	12	13	12	14	18	17	55 56
55	33	18	24	33	29	32	33	29	44	57
56	44	38	30	44	38	40	51	52	46	57
57	7	7	4	7	7	5	10	7	6	58
58	12	7	10	15	11	13	21	13	13	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Warnecke 58 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	6	6	10	10	7	10	14	10	12	9
2	40	41	33	53	64	44	61	87	51	25
3	26	27	27	41	36	35	56	36	41	21 22
4	36	29	27	36	29	36	49	29	36	10
5	27	26	30	35	40	39	48	54	45	36
6	17	20	12	17	20	15	20	27	15	23 24
7	26	28	18	34	28	24	46	38	28	43
8	23	29	18	23	29	28	32	34	38	44
9	9	10	11	14	10	14	-	-	-	11
10	39	43	41	52	43	64	60	50	87	-
11	25	24	28	33	31	28	38	42	38	13 14 15
12	26	27	41	34	42	41	-	-	-	17
13	9	11	8	12	14	10	17	17	14	17
14	39	36	37	52	48	49	-	-	-	17
15	12	6	10	12	8	10	-	-	-	17
16	33	25	22	33	25	29	45	29	40	18
17	44	23	53	44	36	53	60	36	72	20
18	6	7	7	7	7	9	10	7	13	19
19	12	12	9	15	16	15	18	22	15	23
20	13	7	13	13	11	13	-	-	-	21 25
21	29	16	25	29	21	33	34	25	38	26 44
22	37	26	47	37	26	47	50	36	64	27
23	33	33	37	43	44	37	50	60	43	31
24	23	16	17	23	16	22	-	-	-	31
25	24	24	28	24	24	28	28	33	28	38
26	9	6	7	9	7	9	13	10	13	29
27	12	15	18	16	15	18	-	-	-	30
28	7	15	7	12	15	9	14	21	13	32 33
29	26	23	26	26	23	26	36	27	36	31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Warnecke 58 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
30	22	15	19	22	15	19	-	-	-	34
31	33	63	27	51	63	36	69	73	42	36
32	30	33	40	47	51	53	47	69	72	45
33	26	32	24	34	32	31	46	44	36	35
34	23	24	19	23	24	19	-	-	-	36
35	12	12	7	12	15	12	17	15	14	43
36	52	31	46	52	41	61	60	56	71	37 38
37	9	9	9	12	12	11	14	14	15	39 40 41
38	25	34	23	33	34	36	38	40	42	52
39	33	39	35	44	51	35	51	59	41	43
40	7	4	5	7	5	5	9	5	6	43
41	12	12	13	15	12	13	-	-	-	42
42	13	11	7	13	14	12	18	14	17	43
43	29	20	33	29	31	33	34	31	38	45
44	37	27	38	37	42	38	43	49	52	45
45	33	27	25	43	43	39	50	50	45	46 48 49
46	18	22	23	23	29	23	-	-	-	47 50
47	18	29	18	24	29	18	28	29	25	51
48	9	11	9	9	11	9	13	11	9	55
49	16	16	15	16	16	19	-	-	-	58
50	12	9	10	12	11	13	17	13	15	58
51	20	20	17	26	32	22	36	44	30	52
52	12	9	7	12	9	9	17	11	11	53
53	33	37	61	52	49	61	60	57	83	54
54	9	10	12	12	13	12	-	-	-	55 56
55	25	22	24	33	29	32	-	-	-	57
56	44	38	30	44	38	40	44	44	46	57
57	4	4	5	7	7	5	9	10	7	58
58	15	11	5	15	11	13	-	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปัญหา 70 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.7 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Tonge 70 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	13	24	11	17	24	11	17	28	11	2 41 69 70
2	50	45	36	66	45	36	76	52	42	3
3	54	51	27	54	68	35	63	92	41	4 68
4	39	52	31	52	52	31	71	71	36	6 7
5	6	1	3	6	3	4	6	4	6	6 24 30
6	88	67	87	88	67	116	102	91	116	8
7	16	11	20	21	14	20	29	14	27	8
8	128	185	161	128	185	161	128	250	186	12
9	68	27	51	68	42	67	92	57	91	10
10	53	67	103	70	89	103	95	121	103	11
11	85	116	33	85	116	43	85	134	43	12
12	16	12	15	21	16	15	-	-	-	13 14
13	134	54	144	134	71	192	155	71	192	23
14	102	88	114	135	117	152	156	158	175	23
15	94	91	90	94	91	139	109	105	188	16
16	68	42	51	90	56	67	90	56	67	17 18
17	32	38	73	50	59	73	68	59	84	19
18	108	121	78	143	161	103	143	161	119	19
19	15	16	26	19	26	26	22	30	26	20 22 57
20	54	65	50	54	65	77	63	75	77	21
21	32	45	66	50	60	66	58	69	90	23
22	26	21	16	40	21	21	46	21	25	23
23	47	33	62	73	52	82	73	52	95	25 31 33
24	12	7	8	12	9	10	17	9	10	25
25	114	128	159	152	170	211	206	170	243	26 27 28 29
26	27	30	21	42	30	21	42	35	29	35
27	45	36	33	45	36	51	52	36	69	35
28	48	61	48	74	81	64	-	-	-	35
29	16	15	28	26	15	37	26	15	37	35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.7 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Tonge 70 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
30	7	10	10	11	16	10	11	16	14	31
31	31	29	20	31	45	26	36	45	30	32
32	38	51	41	50	51	41	58	59	56	35
33	66	52	141	102	52	141	102	60	141	34
34	46	44	57	46	58	57	46	58	57	35
35	27	15	19	35	19	19	48	22	19	36 44 48 51 53 56 60 61 62
36	40	42	51	40	42	51	54	42	59	37
37	2	0	1	2	1	1	3	2	1	38
38	1	1	0	1	1	0	2	2	0	39
39	1	3	1	3	3	2	4	4	3	40
40	10	14	14	13	14	18	13	17	21	42
41	12	22	8	16	22	8	16	26	8	42
42	25	19	28	25	30	28	-	-	-	43
43	16	31	15	21	31	15	-	-	-	50
44	33	48	39	43	48	52	43	65	52	45
45	19	21	37	30	21	37	30	29	37	46
46	83	64	36	83	85	47	83	85	55	47
47	89	93	48	89	123	74	89	167	74	50
48	42	29	39	56	29	39	65	29	45	49
49	59	29	27	59	46	36	68	63	42	50
50	43	58	60	43	58	60	-	-	-	-
51	9	8	15	11	10	15	13	10	15	52
52	20	23	20	26	23	32	30	27	44	54
53	44	48	43	44	48	57	60	65	77	54
54	91	139	59	121	139	91	121	188	105	55
55	29	24	22	38	24	29	52	28	29	-
56	51	35	72	68	55	96	68	55	96	-
57	14	14	12	22	14	12	22	14	14	58
58	6	2	7	7	4	7	-	-	-	59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.7 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Tonge 70 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
59	16	18	12	16	23	12	22	32	14	60
60	32	26	39	32	41	39	32	41	39	-
61	19	16	27	25	16	27	29	16	27	65
62	21	18	12	27	28	16	37	33	16	63
63	156	86	150	156	86	199	156	86	229	64
64	18	16	26	28	25	40	28	25	40	65 66 67
65	12	17	12	15	17	12	18	23	17	-
66	26	24	28	26	38	28	36	44	38	-
67	14	12	11	18	16	14	21	22	17	-
68	72	71	73	72	71	97	98	71	97	-
69	23	9	24	23	15	32	23	15	32	-
70	21	28	12	27	28	16	27	38	19	-

ปัญหา 75 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.8 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Wee-mag 75 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	14	28	21	23	28	28	23	33	28	2 3 4 5 6 7
2	24	34	30	24	34	30	28	40	30	15
3	16	8	15	25	13	19	-	-	-	13 24
4	26	18	10	26	29	13	26	40	13	8 14 16
5	14	33	29	23	33	29	32	45	40	12 15
6	17	20	14	22	20	14	-	-	-	9 10 11 13
7	6	4	8	6	5	8	7	6	10	-
8	22	21	11	22	28	11	30	28	13	-
9	23	20	16	23	26	16	32	26	22	20 24
10	16	29	10	21	29	16	-	-	-	18
11	17	19	19	22	30	30	30	30	35	-

ตารางที่ ก.8 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Wee-mag 75 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
12	15	9	9	15	9	12	-	-	-	19
13	4	2	4	5	2	5	6	3	5	22
14	23	21	29	23	27	29	27	37	34	-
15	4	3	1	4	3	2	5	4	2	17 20 23
16	20	19	28	26	19	37	-	-	-	21 26
17	16	14	24	21	14	31	-	-	-	30
18	4	1	3	5	3	3	7	4	4	26 30
19	18	25	17	24	33	27	28	45	32	-
20	25	15	24	25	15	31	34	18	42	27
21	20	17	26	26	17	34	30	17	46	33
22	26	38	29	26	38	38	-	-	-	-
23	24	22	34	24	29	34	33	40	40	-
24	21	26	29	27	26	38	27	36	52	25
25	13	18	12	20	18	15	-	-	-	28 30 33 34
26	18	18	12	23	23	16	-	-	-	31 32 41
27	19	12	18	25	16	23	-	-	-	29 35 36
28	10	12	12	13	15	15	15	15	18	-
29	3	1	3	3	2	3	4	2	5	-
30	9	9	13	11	14	13	13	19	18	-
31	16	12	7	21	16	12	25	22	12	37 39
32	17	30	16	22	30	21	26	35	21	44 45
33	16	13	23	21	20	30	29	23	35	41
34	22	11	8	22	18	13	30	18	15	-
35	25	12	24	25	19	24	-	-	-	38 42
36	8	10	3	8	10	4	8	14	6	40 43
37	17	12	22	22	15	22	-	-	-	-
38	18	14	33	24	14	33	28	17	33	-
39	14	24	14	22	24	14	26	28	14	51
40	16	11	29	21	11	29	25	13	40	46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.8 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Wee-mag 75 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
41	3	1	4	6	3	5	7	4	5	-
42	20	29	21	26	38	21	36	52	29	47
43	22	24	22	22	24	22	30	24	26	48 50
44	3	7	1	6	7	3	-	-	-	-
45	21	7	9	21	11	12	-	-	-	-
46	19	25	19	25	25	19	29	25	26	48 51
47	11	10	5	11	16	6	15	19	6	49 50 52 53
48	17	21	20	22	28	20	22	38	23	-
49	21	12	17	21	15	22	-	-	-	59 61 62
50	25	21	10	25	21	13	34	21	18	54 55 60 62
51	17	11	26	22	11	26	26	13	36	-
52	22	21	23	22	21	30	-	-	-	56 57
53	18	11	18	23	17	24	23	20	33	58
54	22	9	19	22	12	25	26	14	25	-
55	22	31	29	22	31	29	26	31	40	63
56	19	27	18	25	36	24	25	49	28	-
57	23	17	27	23	17	27	32	23	32	-
58	16	12	9	21	12	12	25	12	14	65
59	17	9	10	22	12	16	30	17	19	64 66
60	22	28	26	22	28	26	26	38	36	-
61	22	21	30	22	21	30	22	29	35	-
62	17	18	12	22	24	15	-	-	-	67
63	21	21	14	21	21	14	-	-	-	-
64	21	21	29	27	28	38	27	38	44	-
65	23	30	33	23	30	33	23	35	45	-
66	2	2	1	2	2	1	2	3	2	68
67	20	13	17	26	13	17	-	-	-	-
68	16	17	18	25	17	18	25	23	25	69 70 71 72 73 74 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.8 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Wee-mag 75 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
69	15	19	19	24	19	19	-	-	-	-
70	22	20	9	22	26	12	26	30	14	-
71	24	25	18	24	33	28	24	38	38	-
72	4	4	3	4	4	4	5	4	4	-
73	17	23	17	22	30	22	26	41	30	-
74	10	8	8	10	13	10	12	18	12	-
75	25	27	24	25	27	24	-	-	-	-

ปัญหา 83 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	1087	1305	1455	1673	1305	1455	1924	1305	1674	2
2	739	945	765	985	1259	1019	1133	1448	1376	3 4 5
3	1377	1714	2383	1836	1714	2383	2479	1714	2383	6
4	973	579	734	973	772	734	973	1043	734	6 7
5	1700	1545	1266	1700	2060	1688	1955	2060	1942	8
6	2881	2684	2062	2881	3578	2062	2881	3578	2062	9 10
7	2231	1602	1370	2231	2135	2109	3012	2135	2848	11
8	1040	555	642	1040	739	856	1196	998	1156	77 78
9	1345	1491	1478	1793	1987	1970	2062	2683	1970	12
10	812	964	765	1250	964	1019	1688	1302	1172	13 14 25
11	525	855	381	700	855	508	700	984	585	15
12	348	426	392	464	568	392	464	767	392	16
13	375	407	425	500	407	566	575	469	651	17 18 20
14	1133	1091	1179	1133	1091	1179	1303	1255	1356	19
15	375	425	455	577	425	455	-	-	-	20 39
16	363	406	385	483	541	513	556	541	590	77 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
17	660	1096	658	880	1096	877	880	1261	1009	21 22 28
18	433	477	864	667	635	864	667	731	1167	23
19	600	378	498	600	582	663	690	670	896	24
20	175	154	175	233	205	233	233	236	315	26
21	306	304	338	408	405	450	408	466	450	27
22	550	606	1082	847	807	1082	847	929	1245	27
23	576	571	732	767	761	975	883	761	1122	74
24	638	537	619	850	715	619	-	-	-	28 29
25	585	372	444	780	573	591	780	659	591	32
26	912	490	837	912	754	1115	-	-	-	74
27	748	616	573	748	949	764	748	1282	764	69
28	1863	1359	1686	1863	1811	2247	-	-	-	32
29	536	657	594	714	657	791	-	-	-	30
30	1004	771	695	1004	771	926	1004	887	1251	31
31	713	486	624	713	749	832	713	749	957	39
32	482	624	450	642	832	599	-	-	-	33 34 35 36
33	472	790	723	629	790	723	629	790	723	37
34	926	795	915	1234	1059	1220	1420	1059	1403	77 78
35	742	752	890	1143	1157	890	1544	1331	890	77 78
36	1266	907	831	1266	1209	1107	1266	1391	1274	38 39
37	594	684	386	792	911	594	792	1048	802	40
38	939	1041	995	1251	1603	1326	1689	1844	1791	41
39	1310	734	1125	1310	1130	1499	1310	1130	1499	42 43 44 75
40	430	460	535	663	613	713	763	828	820	77 78
41	321	398	353	494	613	470	569	828	541	45
42	1288	947	961	1288	1458	961	1482	1458	1106	77 78
43	792	953	711	792	953	711	911	1287	818	77 78
44	434	540	406	578	720	541	665	720	731	46
45	386	579	680	594	579	680	594	579	782	47

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
46	578	714	438	578	714	583	-	-	-	48
47	622	711	783	622	711	783	716	818	901	49
48	434	427	365	578	427	563	665	577	563	50
49	423	321	425	564	428	425	649	493	574	69
50	578	474	420	578	632	559	781	854	643	51
51	578	352	575	578	542	575	-	-	-	52
52	375	373	526	578	497	701	665	671	947	53
53	434	721	473	578	721	473	578	974	639	54
54	434	336	593	578	447	593	781	447	801	55
55	434	516	703	578	688	703	-	-	-	56
56	434	555	735	578	740	735	-	-	-	57
57	578	625	663	578	625	663	665	719	663	58
58	434	501	306	578	501	408	781	501	408	59
59	578	725	363	578	725	484	578	834	484	60
60	375	371	371	578	494	494	781	494	569	61
61	578	552	568	578	736	568	578	847	654	62
62	375	655	390	578	655	520	578	885	702	63
63	434	567	438	578	567	584	665	766	789	64
64	434	657	399	578	657	532	578	756	532	65
65	434	309	558	578	411	743	578	555	743	66
66	578	659	267	578	659	411	578	659	555	67
67	434	733	672	578	733	672	578	733	908	68
68	578	405	547	578	540	729	665	540	729	74 75
69	467	419	342	467	558	455	538	558	455	70 71
70	576	1006	892	887	1006	892	1021	1157	1205	72
71	297	277	220	396	369	293	456	499	396	73
72	972	1603	947	1296	1603	947	1296	1603	947	73
73	825	1212	890	1100	1212	890	1100	1212	1202	74 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
74	2543	1978	3138	2543	2637	3138	2543	3033	3138	76
75	764	559	987	764	745	987	764	857	987	76
76	268	330	341	357	439	454	357	439	523	77 78
77	526	589	672	701	589	896	701	589	1210	79
78	1164	1066	1221	1164	1421	1221	-	-	-	79
79	286	330	148	286	330	229	329	380	264	80 81
80	2100	2355	2105	2100	2355	2105	2415	2355	2842	82
81	338	469	324	450	469	432	608	469	497	83
82	1300	1489	926	1300	1489	1425	1495	2011	1924	83
83	2399	3824	2485	3691	3824	3824	4983	3824	4398	-

ตารางที่ ก.10 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	1255	979	1455	1673	1305	1455	2259	1501	1674	2
2	640	1259	1019	985	1259	1019	-	-	-	3 4 5
3	1193	1286	2383	1836	1714	2383	2479	1972	2741	6
4	632	579	734	973	772	734	1119	888	734	6 7
5	1105	1339	1266	1700	2060	1688	-	-	-	8
6	2161	3578	2062	2881	3578	2062	3890	3578	2784	9 10
7	1674	2135	2109	2231	2135	2109	2566	2135	2426	11
8	1040	739	642	1040	739	856	1404	850	856	77 78
9	1345	1987	1970	1793	1987	1970	2421	2286	2660	12
10	1250	723	765	1250	964	1019	1438	1109	1172	13 14 25
11	700	642	330	700	855	508	945	855	686	15
12	348	369	294	464	568	392	534	767	530	16
13	375	306	566	500	407	566	-	-	-	17 18 20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.10 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
14	1133	1091	766	1133	1091	1179	1303	1091	1179	19
15	375	425	455	577	425	455	664	574	615	20 39
16	363	541	385	483	541	513	-	-	-	77 78
17	660	822	570	880	1096	877	1188	1480	877	21 22 28
18	433	412	561	667	635	864	768	635	1167	23
19	600	378	430	600	582	663	-	-	-	24
20	151	133	175	233	205	233	233	236	268	26
21	306	263	338	408	405	450	-	-	-	27
22	636	807	1082	847	807	1082	1144	807	1245	27
23	498	761	732	767	761	975	1036	876	1317	74
24	638	537	465	850	715	619	-	-	-	28 29
25	780	372	444	780	573	591	-	-	-	32
26	912	566	1115	912	754	1115	1049	868	1283	74
27	561	712	764	748	949	764	-	-	-	69
28	1863	1811	1686	1863	1811	2247	-	-	-	32
29	536	657	594	714	657	791	-	-	-	30
30	753	579	695	1004	771	926	1356	887	1065	31
31	713	562	540	713	749	832	963	1012	957	39
32	482	832	450	642	832	599	-	-	-	33 34 35 36
33	472	790	723	629	790	723	629	790	832	37
34	926	1059	1220	1234	1059	1220	1666	1218	1220	77 78
35	858	1157	890	1143	1157	890	1143	1562	1202	77 78
36	1266	907	831	1266	1209	1107	1456	1633	1495	38 39
37	792	592	446	792	911	594	792	1230	594	40
38	939	1203	995	1251	1603	1326	1251	1603	1791	41
39	851	848	1499	1310	1130	1499	1769	1300	2024	42 43 44 75
40	430	613	463	663	613	713	663	613	820	77 78
41	321	613	353	494	613	470	569	828	470	45
42	837	947	721	1288	1458	961	1482	1677	1298	77 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.10 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
43	792	953	711	792	953	711	911	1287	711	77 78
44	578	540	406	578	720	541	578	972	541	46
45	446	579	442	594	579	680	684	666	918	47
46	434	714	583	578	714	583	665	964	788	48
47	404	711	783	622	711	783	716	818	901	49
48	375	321	563	578	427	563	-	-	-	50
49	366	321	319	564	428	425	-	-	-	69
50	434	474	559	578	632	559	781	854	643	51
51	578	407	575	578	542	575	-	-	-	52
52	434	323	701	578	497	701	-	-	-	53
53	375	541	355	578	721	473	781	721	639	54
54	578	447	593	578	447	593	-	-	-	55
55	578	516	528	578	688	703	578	929	950	56
56	434	555	552	578	740	735	781	999	846	57
57	375	406	498	578	625	663	-	-	-	58
58	434	501	306	578	501	408	-	-	-	59
59	578	544	484	578	725	484	-	-	-	60
60	434	371	494	578	494	494	665	667	569	61
61	578	736	369	578	736	568	-	-	-	62
62	578	492	390	578	655	520	781	754	598	63
63	375	567	438	578	567	584	578	766	584	64
64	578	657	399	578	657	532	-	-	-	65
65	578	267	743	578	411	743	781	555	855	66
66	578	659	267	578	659	411	665	890	555	67
67	434	476	504	578	733	672	781	843	672	68
68	578	540	729	578	540	729	665	621	839	74 75
69	303	419	342	467	558	455	631	754	615	70 71
70	887	653	892	887	1006	892	1198	1006	1026	72
71	396	277	190	396	369	293	535	425	396	73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.10 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 83 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน (วินาที)									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
72	842	1603	711	1296	1603	947	1296	1844	1279	73
73	825	909	890	1100	1212	890	1100	1394	1024	74 75
74	1908	1978	2039	2543	2637	3138	-	-	-	76
75	573	559	741	764	745	987	1032	857	1333	76
76	357	330	454	357	439	454	411	593	613	77 78
77	701	589	672	701	589	896	947	678	1031	79
78	873	923	916	1164	1421	1221	1339	1421	1649	79
79	286	330	172	286	330	229	286	330	229	80 81
80	2100	1530	1368	2100	2355	2105	-	-	-	82
81	450	304	432	450	469	432	608	540	432	83
82	1300	1489	1069	1300	1489	1425	1755	2011	1924	83
83	3691	3824	2868	3691	3824	3824	4983	3824	4398	-

ปัญหา 111 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 111 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	1470	908	851	1960	1210	1310	-	-	-	2
2	1287	2541	820	1715	2541	1093	1973	2541	1093	3
3	477	366	865	735	488	865	735	562	865	4
4	1715	1447	2448	1715	1929	2448	1973	2605	3305	5 6 7 8 9 10
5	490	589	458	490	589	458	564	678	458	39
6	919	578	492	1225	770	656	1225	770	656	39
7	109	128	129	169	128	199	169	128	229	83
8	2252	2143	1619	2252	3297	2158	2252	4451	2482	71
9	919	519	784	1225	691	1045	1409	691	1411	32
10	1507	921	1548	2319	1418	2064	2667	1915	2374	11 12
11	1715	1763	1478	1715	1763	1478	1715	2028	1478	13 14 15 16 17 18 19 20 21
12	980	585	928	980	780	1428	1127	1053	1643	13 14 15 16 17 18 19 20 21
13	552	468	1004	735	624	1004	993	624	1004	71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 111 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
14	1482	1316	3126	2281	2025	3126	2281	2734	3595	22 23 24 25
15	2750	1535	2179	2750	2363	3353	-	-	-	26
16	58	66	110	77	87	110	77	101	127	27
17	89	83	88	89	83	88	103	96	119	28
18	39	29	30	51	29	39	59	34	45	29
19	273	303	432	364	404	432	364	404	584	30
20	405	306	605	405	306	605	466	306	696	91
21	1989	2760	2517	3060	2760	3355	3519	3726	3355	111
22	94	116	122	125	154	122	125	208	141	31 83
23	3429	4745	3611	3429	4745	3611	4630	4745	4153	32 33
24	33	17	22	43	22	34	50	26	34	69 70
25	2573	2405	1511	3430	2405	2325	3945	2405	2325	34
26	1470	1164	1177	1960	1552	1811	2254	1785	1811	82
27	18	20	38	29	26	38	-	-	-	35
28	21	22	26	27	35	26	27	35	26	36
29	12	5	9	15	8	11	-	-	-	37
30	121	63	112	121	84	149	-	-	-	38
31	1287	756	1534	1715	1007	2361	1973	1007	2716	39
32	1596	1605	1689	2127	2140	2251	2447	2140	3039	41
33	955	571	937	1470	761	1249	1470	1028	1437	111
34	2624	3328	3629	4037	4437	3629	4037	5103	3629	42
35	51	64	52	68	85	80	79	98	92	43
36	40	35	67	62	54	89	-	-	-	44 91
37	42	29	21	42	38	28	57	38	28	45 91
38	273	246	157	364	379	209	-	-	-	46 91
39	3749	1833	2980	4998	2820	3973	4998	2820	3973	40
40	1103	1101	793	1470	1467	793	1470	1688	793	111
41	1925	2678	1742	2963	2678	2681	2963	3080	3620	69 70
42	5689	8345	4761	5689	8345	6347	5689	9597	7300	47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 111 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
43	44	49	51	68	49	51	79	67	59	48 49
44	18	21	17	18	21	17	21	29	20	50
45	8	10	4	10	10	5	12	10	6	51
46	52	66	42	81	87	55	94	118	75	52
47	5200	7498	3283	5200	7498	4377	5200	10123	5909	54 55 56 57 58 59 60
48	30	57	24	39	57	37	39	57	43	53
49	67	62	56	67	62	56	91	62	65	91
50	17	22	34	27	22	34	27	26	34	111
51	12	13	12	15	17	12	15	23	17	111
52	121	96	86	121	127	86	140	147	86	111
53	37	71	46	58	71	61	58	82	83	111
54	1287	1164	990	1715	1792	1319	1715	2061	1781	69 70
55	81	149	140	125	149	140	125	149	189	61 62 63
56	4010	3807	3601	4010	5857	3601	5414	6736	4142	63 64
57	1103	809	636	1470	809	848	1985	809	976	65 91
58	1103	984	1642	1470	1514	2189	1470	1514	2518	66 91
59	2303	1083	832	2303	1667	1280	2303	1918	1280	67 91
60	1960	877	2185	1960	1169	2913	2254	1169	3350	68 91
61	2205	1230	1971	2205	1230	2627	2536	1661	2627	69 70
62	3014	4467	3744	4018	4467	5760	4018	6031	7776	71
63	2058	3033	1221	2744	3033	1628	-	-	-	111
64	2999	1702	2103	2999	2269	3236	-	-	-	72
65	735	342	994	735	456	994	846	456	1342	111
66	735	682	531	735	682	707	735	785	707	111
67	552	405	1086	735	539	1086	735	728	1249	111
68	477	742	815	735	989	1086	993	989	1086	111
69	545	526	203	545	701	313	627	807	313	77 78
70	2540	3545	4294	3386	3545	4294	4572	4077	5797	73

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 111 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
71	2426	1912	3028	3234	2549	3028	3234	2932	3028	91
72	2205	1540	1832	2205	1540	2442	2977	2079	3297	74
73	2206	2403	2876	2206	3203	2876	-	-	-	75
74	368	285	507	490	285	675	490	385	675	76
75	619	822	797	825	822	1062	-	-	-	77 78 79
76	2646	3209	3419	3528	3209	4558	4763	3209	5242	80 81 82
77	2676	3967	4227	3568	5289	4227	3568	5289	4227	83
78	1200	1170	883	1200	1170	1177	1200	1580	1589	84
79	464	371	440	618	572	678	711	773	678	85
80	955	1215	908	1470	1619	1397	1985	1619	1607	86 91
81	1287	1354	1449	1715	1805	1932	2316	2076	2609	87 91
82	552	433	628	735	433	628	-	-	-	111
83	1470	1213	1482	1960	1617	1976	2254	1617	1976	91
84	2167	1894	2058	2889	2914	2058	2889	3352	2779	88 89 91
85	401	618	662	618	618	662	618	618	894	111
86	490	624	581	490	624	581	564	843	581	111
87	477	309	440	735	411	678	846	473	916	90
88	490	641	366	490	641	488	490	641	659	105
89	691	674	811	921	898	811	1244	1033	811	105
90	326	179	133	326	179	177	375	242	177	111
91	3503	2330	6396	5390	3585	6396	5390	4123	7356	92 93 94
92	243	108	171	243	143	264	243	165	357	95
93	279	319	341	371	425	454	427	574	613	95
94	44	34	30	58	34	47	58	34	47	95
95	3795	5276	3056	5059	5276	4703	-	-	-	96 97 98 99 100 104
96	796	1088	684	1225	1674	911	1225	1674	1230	101
97	769	605	458	769	605	705	-	-	-	102
98	499	369	495	768	492	659	-	-	-	103

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Arcus 111 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.1 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน									ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)			Medium-skill (Original)			Low-skill (modified)			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
99	1670	2255	1531	1670	2255	2041	1921	2594	2756	111
100	1253	1329	2235	1670	1771	2235	1670	2391	2235	111
101	368	472	272	490	472	272	490	472	272	105
102	152	131	234	202	202	234	202	233	234	106 107
103	203	121	243	203	121	243	203	121	243	107 108
104	202	174	226	202	268	226	202	309	226	111
105	2744	3209	1899	2744	3209	2531	2744	4333	2911	111
106	162	161	137	162	214	212	187	214	212	109
107	210	206	266	324	318	266	438	318	306	111
108	105	68	69	162	106	92	162	106	92	110
109	121	103	122	121	137	122	140	158	122	111
110	122	152	83	162	202	83	162	202	96	111
111	59	46	96	91	46	127	123	63	172	-

ปัญหา 297 ขั้นงาน

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
1	203	122	270	189	-	-	2
2	270	110	270	146	311	198	3
3	130	82	130	82	150	95	4
4	111	216	148	216	171	249	5 22 26 27 40 48 56 83 86 94 105 109 111 134 221 247 259
5	143	184	190	245	257	331	6
6	293	433	293	433	337	498	7 8 9 10
7	261	166	348	221	401	255	11 12 13 14 15 20
8	137	181	182	241	182	241	11 12 13 14 15 20
9	368	481	490	641	-	-	11 12 13 14 15 20
10	212	232	212	232	-	-	11 12 13 14 15 20
11	248	250	248	333	-	-	16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
12	186	208	248	208	248	281	17
13	248	228	248	228	-	-	18
14	186	132	248	132	286	152	19
15	248	226	248	226	286	306	21
16	201	258	268	343	362	464	23
17	174	123	268	164	268	164	23
18	268	254	268	254	309	343	23
19	288	162	288	162	389	162	23
20	186	132	248	132	248	152	23
21	174	132	268	176	362	238	23
22	45	74	60	74	-	-	24 25
23	174	186	268	247	309	334	28
24	240	175	240	270	324	311	29
25	240	99	240	153	240	176	29
26	129	79	171	105	-	-	30
27	490	523	490	523	564	602	31
28	118	242	182	242	210	327	32 37
29	170	139	170	139	170	160	33 44 121
30	306	166	306	166	-	-	34 297
31	70	97	108	129	125	149	34 82 172 179
32	186	293	248	293	335	337	36
33	143	132	190	132	257	132	38
34	180	321	240	321	324	370	35
35	255	188	339	188	458	188	42
36	216	186	288	248	389	335	39
37	248	345	248	345	286	466	39
38	455	447	455	447	524	604	41
39	201	118	268	157	-	-	43
40	270	283	270	377	270	509	44 84 97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
41	135	236	180	236	207	236	45
42	121	123	121	164	164	189	46
43	270	231	270	231	365	312	47
44	286	428	440	428	-	-	49
45	249	141	249	188	249	254	50
46	146	78	194	103	224	119	51 138
47	162	83	162	128	219	148	52
48	130	111	130	111	130	150	52
49	291	191	388	295	447	399	53
50	68	117	90	117	90	135	54
51	212	119	212	158	-	-	55 81
52	185	324	246	324	246	373	57
53	141	196	188	196	217	265	58
54	270	97	270	150	-	-	58 296
55	120	152	160	234	184	316	59
56	60	110	79	110	91	127	60 61
57	466	423	466	564	630	649	62 63 71 76
58	180	173	240	173	240	234	64
59	137	143	137	190	-	-	64 99 100
60	184	141	184	187	184	216	68
61	110	121	110	121	127	140	65
62	275	183	275	243	-	-	66
63	112	108	149	144	149	144	67
64	280	273	280	364	378	419	72
65	90	47	119	62	-	-	69
66	138	100	184	133	212	133	69
67	105	194	140	194	-	-	70
68	150	164	150	218	173	218	73
69	190	158	190	210	-	-	74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
70	113	153	150	153	173	153	75
71	150	75	150	116	-	-	77
72	213	348	284	348	327	470	78
73	144	96	192	128	260	173	84 97
74	347	257	347	257	469	347	84 97
75	174	347	232	347	232	469	84 97
76	140	129	140	171	-	-	84 97
77	456	458	608	458	-	-	84 97
78	80	90	80	119	-	-	79 80 125 192
79	30	57	40	57	-	-	85
80	84	148	130	148	130	171	85
81	110	80	110	80	127	92	87
82	227	375	350	499	473	574	88 89
83	140	131	140	131	-	-	90
84	180	207	240	275	240	275	91
85	240	176	240	271	324	366	92
86	90	114	90	114	104	132	93
87	41	68	54	68	73	68	99 100
88	221	431	294	431	294	496	99 100
89	203	92	203	122	203	165	99 100
90	113	65	150	100	173	135	95
91	270	267	270	356	270	410	96
92	155	229	155	229	210	310	98
93	190	170	190	226	-	-	98
94	50	109	78	109	106	148	101
95	105	45	140	70	189	95	101
96	241	314	241	314	-	-	101
97	430	542	430	542	581	624	101
98	68	68	90	68	122	79	102

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
99	110	102	110	135	127	183	103
100	7	10	9	10	13	12	104
101	279	361	430	361	581	361	106
102	84	85	130	85	176	115	107
103	217	279	289	372	333	503	108
104	110	66	110	87	110	101	108
105	120	105	160	105	184	142	110
106	332	207	442	276	597	373	112
107	103	144	159	223	-	-	113
108	250	356	250	356	250	481	114 115 292
109	190	126	190	126	219	171	119 120
110	138	260	184	260	249	260	119 120 162
111	690	774	690	774	932	1045	116
112	72	33	72	44	98	51	117
113	190	183	190	244	257	244	118
114	143	239	190	239	219	275	119
115	58	38	90	50	-	-	120
116	577	657	889	876	1023	876	122
117	170	162	170	216	196	249	123 124 257
118	155	91	155	91	179	105	126
119	190	187	190	187	-	-	127
120	130	77	130	77	176	77	127 150
121	390	384	390	511	527	690	128
122	301	366	301	366	347	366	129
123	54	28	54	44	73	51	130 145 146 147 148 149
124	171	244	227	244	262	281	130
125	142	117	142	181	192	209	130
126	184	134	184	134	212	181	130
127	556	621	741	827	853	1117	130 157

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
128	651	941	868	1254	868	1443	130
129	149	204	230	315	-	-	130 141
130	78	152	121	152	121	175	131 144
131	320	268	320	268	-	-	132 133
132	126	87	126	134	-	-	135
133	330	392	440	392	594	530	135 170
134	82	116	127	154	172	154	136
135	134	183	134	183	155	211	137
136	113	59	150	92	203	125	139
137	91	90	140	139	189	160	140
138	83	127	110	127	149	172	140 191
139	208	284	320	437	368	503	142 253
140	250	271	250	361	-	-	143 200
141	174	199	232	265	267	265	151
142	188	81	188	107	254	107	152
143	250	232	250	309	338	356	153 169
144	377	371	377	494	434	667	154
145	90	41	90	54	104	73	155
146	105	73	140	73	-	-	156
147	90	62	90	62	122	72	158
148	90	74	90	74	104	100	159
149	53	38	70	50	95	58	160
150	90	57	90	88	122	88	161
151	110	120	110	160	-	-	163
152	150	85	150	85	203	115	164
153	101	93	101	124	-	-	165
154	377	340	377	340	-	-	166
155	89	64	118	64	136	87	166
156	218	222	290	342	392	394	166

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
157	157	308	209	308	283	355	166
158	150	120	150	120	173	162	166
159	150	147	150	195	150	195	166
160	79	31	79	41	79	56	166
161	113	71	150	110	203	127	166
162	69	77	91	77	123	77	167
163	38	28	59	37	80	37	166
164	164	177	218	236	218	319	167
165	264	517	351	517	404	517	168 176
166	567	859	873	1145	1179	1317	170
167	84	138	130	184	150	212	171
168	68	50	68	50	-	-	173
169	81	73	126	97	145	131	174
170	78	98	120	152	-	-	174
171	227	190	227	190	262	219	174
172	198	232	198	232	-	-	175
173	132	75	132	99	132	99	177
174	91	49	121	65	140	75	178 287 288
175	97	202	150	202	203	202	180
176	100	78	100	78	-	-	181
177	24	48	38	48	44	65	181
178	70	39	70	51	-	-	181
179	355	291	355	388	480	388	181
180	213	130	284	201	384	272	181 252
181	92	79	122	79	141	107	182 183 184 185 186 187 188 189 196 197 295
182	75	58	75	90	102	122	190
183	104	106	160	106	184	122	193
184	140	72	140	96	189	96	194
185	390	266	520	354	702	408	195

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
186	75	104	99	104	99	141	195
187	137	102	182	135	182	135	195
188	80	72	80	96	108	96	195
189	386	268	514	413	694	475	195
190	96	58	96	77	-	-	195
191	38	27	50	35	-	-	200
192	272	172	272	229	-	-	201
193	170	110	226	146	306	198	198
194	146	179	194	179	194	179	199
195	123	82	164	109	189	148	199 203 205 227 229
196	62	122	96	122	130	165	202
197	107	75	107	75	107	87	202
198	108	69	108	91	125	123	202
199	167	125	167	166	226	225	202
200	98	74	98	74	-	-	202
201	82	41	82	41	111	41	202
202	362	243	482	324	651	438	204 251
203	72	51	72	67	-	-	206 208
204	50	27	50	27	68	37	207 250
205	130	81	130	125	176	144	207
206	173	170	230	263	311	303	209
207	38	45	50	59	68	68	210 212
208	180	267	240	267	240	361	210
209	190	244	190	244	-	-	210 211
210	123	164	190	218	257	251	213
211	180	274	240	274	324	370	213
212	48	38	74	50	74	68	214
213	139	157	139	157	139	181	214
214	339	328	339	437	339	503	215 234

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
215	195	189	260	189	260	256	216
216	132	81	132	107	-	-	217
217	550	565	550	753	743	753	218
218	420	325	420	325	567	374	219
219	98	134	152	207	206	239	220
220	9	4	12	7	-	-	222
221	58	68	90	106	122	106	223
222	5	6	5	6	-	-	224
223	128	109	128	145	173	167	225
224	100	127	100	127	-	-	226
225	120	94	120	94	138	127	227
226	100	49	100	65	115	65	228
227	208	141	320	217	-	-	230
228	627	462	835	616	835	616	231
229	740	450	740	450	851	518	235 236
230	168	169	223	225	257	304	232 271 289
231	65	52	100	81	135	94	233
232	293	302	390	302	449	348	236
233	140	156	140	156	-	-	237
234	304	264	304	264	-	-	238 256
235	120	127	120	169	138	195	237
236	303	155	403	206	464	237	239
237	21	15	21	24	25	28	240
238	185	129	246	129	283	175	240 285
239	160	98	160	98	216	133	240 279
240	1019	945	1019	945	1376	1276	241 243
241	34	26	34	34	-	-	242
242	120	103	120	103	-	-	244
243	51	61	68	61	79	71	245 246

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
244	591	764	910	764	-	-	245 246 255
245	302	256	302	341	348	393	248
246	505	443	778	443	895	510	248
247	101	72	101	96	-	-	278
248	1310	1716	1310	1716	-	-	249
249	20	28	20	28	23	33	254 284
250	209	198	278	264	376	304	256
251	81	60	81	80	94	80	256
252	290	155	290	239	334	323	258
253	65	143	100	143	-	-	260
254	372	318	372	318	503	430	261
255	46	28	72	37	-	-	261 262
256	28	25	28	33	38	45	263
257	90	113	90	113	122	130	264
258	250	248	250	248	288	286	265
259	108	150	144	150	-	-	266
260	303	171	303	171	-	-	267
261	220	245	220	245	297	282	268 269
262	44	46	58	72	-	-	269
263	168	107	224	165	303	223	270
264	211	225	211	300	-	-	271
265	64	91	99	91	114	105	272
266	33	31	44	49	51	57	271
267	90	62	120	82	138	82	273
268	70	56	70	74	95	100	274
269	421	162	421	250	485	288	274
270	231	188	231	250	312	338	274
271	161	110	214	146	289	198	274
272	196	268	196	268	-	-	275

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.12 รายละเอียดปัญหาตัวอย่าง Scholl 297 ขั้นงาน % Unavailable Task 0.2 (ต่อ)

ขั้นงาน	เวลาขั้นงานของรุ่นผลิตภัณฑ์ในแต่ละคนงาน						ขั้นงานที่ทำได้ถัดไป
	High-skill (modified)		Medium-skill (Original)		Low-skill (modified)		
	A	B	A	B	A	B	
273	210	361	280	361	322	361	276
274	398	279	398	279	-	-	277 278 282
275	46	58	72	77	72	104	280
276	280	365	280	365	280	493	281
277	356	144	356	191	481	220	283
278	193	123	193	123	222	142	283
279	140	81	140	108	161	146	286
280	130	91	130	141	130	163	290
281	225	306	300	408	405	408	291
282	342	428	456	570	616	570	293
283	4	5	7	6	7	7	293
284	128	154	170	237	230	237	294
285	163	246	252	328	-	-	294
286	158	111	210	148	-	-	294
287	308	199	308	307	416	307	293
288	200	161	308	161	308	218	293
289	91	44	121	68	-	-	294
290	52	35	52	35	71	48	293
291	426	343	426	343	576	395	293
292	104	70	104	93	-	-	293
293	1040	1099	1386	1465	1594	1978	-
294	396	446	527	687	-	-	-
295	968	578	968	770	1307	770	-
296	786	692	1047	922	1414	1061	-
297	404	358	538	358	538	412	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองแก้ปัญหาโจทย์ตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข
รายละเอียดของปัญหาตัวอย่าง

ผลการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างและสมรรถนะของอัลกอริทึมของแต่ละโจทย์ปัญหาแสดงดังตารางต่อไปนี้

ผลการทดลองการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1

ตารางที่ ข.1 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	40.8333333	10	0.038504	0.655172
2	40.8333333	10	0.038504	0.655172
3	40.8666667	10	0.039151	0.615385
4	40.8666667	10	0.038804	0.642857
5	41	10	0.026261	0.600000
6	41.1	10	0.025470	0.629630
7	41.1666667	10	0.024736	0.629630
8	41.2	8	0.021133	0.565217
9	41.2	9	0.017110	0.565217
10	41.2	9	0.016776	0.583333
11	41.2	10	0.015136	0.600000
12	41.2	10	0.014332	0.615385
13	41.33333	8	0.022079	0.545455
14	41.5	8	0.024684	0.523810
15	41.5	9	0.016657	0.600000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.2 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	41.2	7	0.005736	0.473684
	2	41.6	7	0.005728	0.500000
	3	41.13333	7	0.003928	0.523810
MOEA/D	1	41.2	7	0.006333	0.444444
	2	42.6	7	0.007717	0.444444
	3	41.6	7	0.008829	0.444444
AMOEA/D-COIN/WT	1	41.2	7	0.009153	0.411765
	2	41.2	7	0.004055	0.500000
	3	40.83333	7	0.004623	0.444444

ตารางที่ ข.3 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:6:1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.2198	<u>0.7151</u>	0.0364	0.0338	<u>67</u>	<u>0.74</u>
MOEA/D	0.2026	0.8452	<u>0.2866</u>	0.1208	29	1.48
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1718</u>	0.7399	0.2484	<u>0.1787</u>	48	3.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2

ตารางที่ ข.4 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	42.6	10	0.020419	0.615385
2	42.6	10	0.020419	0.615385
3	42.6	10	0.031178	0.600000
4	43.13333	10	0.017372	0.523810
5	43.1666667	10	0.014851	0.655172
6	43.2	9	0.017968	0.545455
7	43.2666667	9	0.016904	0.615385
8	43.2666667	9	0.016904	0.615385
9	43.36667	10	0.017337	0.523810
10	43.4	10	0.016182	0.545455
11	43.6	8	0.033833	0.565217
12	43.66667	10	0.012099	0.666667
13	43.8	8	0.038043	0.545455
14	43.83333	10	0.015802	0.545455
15	43.93333	10	0.015582	0.565217

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.5 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	43.73333	7	0.002582	0.473684
	2	43	7	0.004809	0.500000
	3	43.8	7	0.003956	0.500000
MOEA/D	1	45	8	0.014136	0.444444
	2	43.4	7	0.005339	0.411765
	3	43.66667	7	0.004611	0.444444
AMOEA/D-COIN/WT	1	44	7	0.004009	0.444444
	2	42.93333	7	0.004081	0.444444
	3	42.6	7	0.004396	0.473684

ตารางที่ ข.6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 2:6:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.2013	<u>0.7468</u>	0.0264	0.0159	51	<u>0.86</u>
MOEA/D	0.1733	0.8609	0.2631	0.0833	38	1.56
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1305</u>	0.7563	<u>0.3597</u>	<u>0.2381</u>	<u>60</u>	3.07

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2

ตารางที่ ข.7 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	28.8	15	0.009652	0.500000
2	28.8	14	0.008709	0.516129
3	28.8	13	0.019498	0.423077
4	28.8	13	0.015021	0.444444
5	28.8	12	0.023599	0.423077
6	28.8	12	0.024785	0.400000
7	28.8	12	0.017417	0.482759
8	28.83333	14	0.007556	0.516129
9	29	13	0.015081	0.400000
10	29	13	0.012476	0.423077
11	29	12	0.019685	0.444444
12	29	12	0.019685	0.444444
13	29	11	0.012416	0.482759
14	29	11	0.010649	0.500000
15	29	11	0.010382	0.516129

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.8 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	28.83333	11	0.004627	0.375000
	2	28.8	11	0.005973	0.375000
	3	29.8	11	0.006178	0.375000
MOEA/D	1	29.86667	11	0.005572	0.285714
	2	28.8	11	0.005854	0.285714
	3	29.5	11	0.008190	0.285714
AMOEA/D-COIN/WT	1	28.8	10	0.005114	0.285714
	2	28.8	11	0.003743	0.318182
	3	29.2	11	0.003944	0.318182

ตารางที่ ข.9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 4:9:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.2905	0.6026	0.0049	0.0037	<u>63</u>	<u>0.82</u>
MOEA/D	0.2384	0.7575	0.1703	0.0659	43	1.67
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1667</u>	<u>0.5992</u>	<u>0.5340</u>	<u>0.2674</u>	47	2.97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 10 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3

ตารางที่ ข.10 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	29.33333	14	0.008369	0.545455
2	30	13	0.030271	0.444444
3	30	13	0.015367	0.531250
4	30	13	0.015288	0.545455
5	30	12	0.016398	0.500000
6	30	12	0.021071	0.482759
7	30.06667	14	0.007753	0.545455
8	30.33333	14	0.005989	0.516129
9	30.33333	12	0.020276	0.423077
10	30.4	12	0.013637	0.423077
11	30.4	12	0.018161	0.400000
12	30.4	12	0.026121	0.375000
13	30.5	12	0.012968	0.444444
14	30.6	12	0.013511	0.400000
15	30.6	12	0.016993	0.375000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.11 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	30.8	11	0.006874	0.347826
	2	30.83333	11	0.008361	0.347826
	3	30.2	11	0.007186	0.347826
MOEA/D	1	31.6	11	0.004046	0.285714
	2	30.6	11	0.004828	0.318182
	3	30.83333	11	0.004175	0.318182
AMOEA/D-COIN/WT	1	30.6	11	0.005718	0.250000
	2	29.33333	10	0.004370	0.318182
	3	30	10	0.004439	0.285714

ตารางที่ ข.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P2 ขนาด 51 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 15 คน และสัดส่วนพนักงาน 3:9:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.3241	0.5735	0.0000	0.0000	57	1.03
MOEA/D	0.2564	0.6823	0.0700	0.0433	51	1.42
AMOEA/D-COIN/WT	0.1709	0.5728	0.4116	0.2900	58	2.98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดลองการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1

ตารางที่ ข.13 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	241	20	0.023996	0.729730
2	242	20	0.011105	0.740260
3	243	20	0.010464	0.743590
4	243	17	0.018676	0.710145
5	243.1666667	20	0.010346	0.740260
6	243.1666667	20	0.012389	0.729730
7	243.1666667	18	0.016337	0.718310
8	243.25	20	0.010087	0.743590
9	243.25	18	0.016077	0.718310
10	243.25	17	0.017990	0.714286
11	244	19	0.015604	0.740260
12	244.1666667	19	0.017088	0.714286
13	244.5	19	0.012292	0.746835
14	244.5833333	20	0.011018	0.736842
15	244.6666667	20	0.008875	0.710145

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.14 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	244.5	16	0.004837	0.672131
	2	246.1667	16	0.005823	0.672131
	3	241	15	0.005018	0.672131
MOEA/D	1	244.25	16	0.004947	0.622642
	2	247.1667	16	0.005107	0.661017
	3	246.1667	16	0.004965	0.636364
AMOEA/D-COIN/WT	1	242	14	0.005446	0.655172
	2	244.6667	15	0.004873	0.622642
	3	244.8333	16	0.002565	0.649123

ตารางที่ ข.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:13:1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.3527	0.7411	0.0029	0.0013	<u>117</u>	<u>1.75</u>
MOEA/D	0.2036	0.8844	<u>0.6604</u>	0.1515	61	3.05
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1472</u>	<u>0.7313</u>	0.4244	<u>0.1806</u>	112	5.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2

ตารางที่ ข.16 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	244.5	18	0.018733	0.687500
2	244.8333	18	0.019663	0.677419
3	244.8333	18	0.017430	0.682540
4	245.8333	18	0.017295	0.696970
5	245.8333	18	0.013066	0.701493
6	246	18	0.012581	0.705882
7	246.25	18	0.016285	0.692308
8	246.5	16	0.020300	0.672131
9	246.5	16	0.019577	0.682540
10	246.5	16	0.018519	0.692308
11	246.5	17	0.016898	0.672131
12	246.5	17	0.015262	0.682540
13	246.5	18	0.015081	0.682540
14	246.6667	18	0.011713	0.705882
15	247.6667	18	0.010457	0.701493

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.17 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	249.8333	16	0.005221	0.677419
	2	247.8333	16	0.004265	0.677419
	3	248.75	15	0.00431	0.677419
MOEA/D	1	250.5833	17	0.006461	0.661017
	2	251	15	0.005387	0.642857
	3	249.8333	15	0.006755	0.649123
AMOEA/D-COIN/WT	1	246.3333	15	0.004554	0.636364
	2	244.5	16	0.002451	0.649123
	3	249	15	0.004673	0.615385

ตารางที่ ข.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 20 คน และสัดส่วนพนักงาน 5:13:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.5600	<u>0.6730</u>	0.0029	0.0030	<u>116</u>	<u>1.83</u>
MOEA/D	0.3230	0.8808	0.1282	0.0327	36	2.95
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1851</u>	0.6957	<u>0.4825</u>	<u>0.2976</u>	83	5.21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1

ตารางที่ ข.19 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	170.8333	27	0.010581	0.666667
2	170.8333	27	0.010581	0.666667
3	171	27	0.010034	0.658824
4	171.25	26	0.008446	0.658824
5	172.1667	27	0.010033	0.613333
6	172.5	25	0.011734	0.585714
7	172.5	25	0.010766	0.613333
8	172.5	26	0.011346	0.602740
9	172.5	24	0.011950	0.591549
10	172.6667	26	0.010023	0.654762
11	172.6667	26	0.007764	0.658824
12	172.6667	26	0.007606	0.662791
13	172.75	25	0.011390	0.591549
14	172.75	26	0.007500	0.662791
15	172.75	26	0.007749	0.658824

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.20 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	175.1667	23	0.005302	0.560606
	2	175.1667	24	0.00479	0.560606
	3	174.3333	22	0.003915	0.560606
MOEA/D	1	173.3333	23	0.003336	0.52459
	2	174.1667	22	0.003873	0.516667
	3	173.1667	22	0.003064	0.52459
AMOEA/D-COIN/WT	1	170.8333	23	0.003252	0.508475
	2	172.8333	21	0.003817	0.532258
	3	172.1667	23	0.003429	0.553846

ตารางที่ ข.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:19:1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.3812	<u>0.5612</u>	0.0000	0.0000	<u>113</u>	<u>2.01</u>
MOEA/D	0.1735	0.6191	0.3762	0.1453	94	3.87
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1495</u>	0.6751	<u>0.4837</u>	<u>0.1881</u>	84	5.96

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3

ตารางที่ ข.22 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	175	28	0.007439	0.650602
2	175	28	0.007439	0.650602
3	175.1667	28	0.005778	0.632911
4	175.1667	28	0.005733	0.637500
5	175.5	28	0.011839	0.618421
6	175.5	28	0.012346	0.602740
7	175.75	28	0.005106	0.637500
8	175.8333	28	0.011710	0.608108
9	176	28	0.012849	0.597222
10	176.1667	27	0.009901	0.632911
11	176.1667	27	0.009917	0.628205
12	176.4167	29	0.011719	0.597222
13	176.5833	25	0.010995	0.585714
14	176.5833	25	0.009191	0.591549
15	176.8333	27	0.007896	0.632911

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.23 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	178.5	23	0.004594	0.546875
	2	178.6667	23	0.005108	0.567164
	3	181.25	23	0.004969	0.567164
MOEA/D	1	175.5	22	0.002535	0.508475
	2	179.1667	24	0.004447	0.508475
	3	176.5833	22	0.004211	0.524590
AMOEA/D-COIN/WT	1	178.5	22	0.003153	0.508475
	2	176.8333	22	0.003499	0.532258
	3	175	22	0.003420	0.508475

ตารางที่ ข.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P3 ขนาด 128 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 29 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:19:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.5565	<u>0.5054</u>	0.0000	0.0000	<u>108</u>	<u>1.87</u>
MOEA/D	0.2163	0.5932	0.3059	0.1481	76	3.95
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1911</u>	0.6482	<u>0.4821</u>	<u>0.1852</u>	69	5.66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดลองการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1

ตารางที่ ข.25 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	134.25	18	0.004092	0.710526
2	134.25	18	0.004039	0.714286
3	134.3333	21	0.007547	0.702703
4	134.4167	18	0.005601	0.690141
5	134.6667	18	0.007303	0.681159
6	135.75	17	0.012005	0.685714
7	135.75	17	0.009881	0.690141
8	135.75	17	0.007048	0.706667
9	135.75	17	0.004703	0.710526
10	136	18	0.005225	0.702703
11	136	18	0.002834	0.710526
12	136	17	0.004075	0.710526
13	136	17	0.006354	0.706667
14	136	17	0.007914	0.694444
15	136	17	0.022079	0.681159

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.26 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	135.25	17	0.003804	0.681159
	2	135.9167	16	0.003138	0.685714
	3	135.25	17	0.003568	0.685714
MOEA/D	1	134.25	17	0.002834	0.65625
	2	137	16	0.005738	0.671642
	3	134.3333	15	0.0038	0.65625
AMOEA/D-COIN/WT	1	135.3333	17	0.001559	0.65625
	2	134.8333	15	0.003019	0.671642
	3	135.25	16	0.003352	0.65625

ตารางที่ ข.27 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:14:1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.5067	<u>0.5129</u>	0.0000	0.0000	<u>109</u>	<u>1.89</u>
MOEA/D	0.2222	0.6827	<u>0.4250</u>	0.1504	44	4.12
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1913</u>	0.5261	0.3549	<u>0.1829</u>	79	6.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2

ตารางที่ ข.28 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	135.75	21	0.010356	0.721519
2	135.8333	21	0.009355	0.734940
3	135.9167	21	0.007745	0.734940
4	135.9167	21	0.008310	0.731707
5	135.9167	20	0.009657	0.725000
6	135.9167	20	0.008404	0.731707
7	135.9167	20	0.008293	0.738095
8	136.5	21	0.007618	0.734940
9	136.5	21	0.006614	0.744186
10	136.5	21	0.006428	0.747126
11	136.6667	21	0.006498	0.734940
12	137	21	0.009768	0.706667
13	137	21	0.009527	0.728395
14	137	21	0.006347	0.741177
15	137	21	0.006149	0.744186

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.29 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	138.0833	17	0.004379	0.671642
	2	137.75	17	0.00508	0.685714
	3	139	16	0.005162	0.685714
MOEA/D	1	138	16	0.004295	0.681159
	2	138.75	17	0.004993	0.685714
	3	139.5	17	0.005207	0.685714
AMOEA/D-COIN/WT	1	138.5	15	0.002375	0.666667
	2	137.6667	15	0.003493	0.645161
	3	135.75	16	0.002838	0.671642

ตารางที่ ข.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 22 คน และสัดส่วนพนักงาน 6:14:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.4464	0.7614	0.0069	0.0020576	62	1.95
MOEA/D	0.3055	0.7985	0.0362	0.010288	56	4.21
AMOEA/D-COIN/WT	0.2052	0.6918	0.6821	0.3209867	72	5.89

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:1

ตารางที่ ข.31 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	95.25	25	0.008515	0.600000
2	95.25	25	0.010714	0.589744
3	95.25	26	0.009795	0.594937
4	95.25	26	0.007672	0.600000
5	95.25	26	0.007537	0.604938
6	95.33333	28	0.004956	0.623529
7	95.33333	28	0.004538	0.632184
8	95.33333	27	0.005950	0.623529
9	95.66667	27	0.004278	0.632184
10	95.83333	27	0.003876	0.632184
11	95.91667	28	0.007125	0.604938
12	95.91667	27	0.007342	0.609756
13	96	28	0.006209	0.609756
14	96	27	0.006897	0.594937
15	96	27	0.007612	0.589744

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.32 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	97.5	25	0.004148	0.573333
	2	97.25	25	0.004111	0.573333
	3	97.5	25	0.003932	0.567568
MOEA/D	1	96	23	0.003666	0.529412
	2	95.25	23	0.003403	0.536232
	3	96.25	23	0.003567	0.536232
AMOEA/D-COIN/WT	1	96.75	24	0.003255	0.549296
	2	95.33333	23	0.003459	0.522388
	3	96.16667	21	0.002669	0.549296

ตารางที่ ข.33 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:21:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.5827	0.5217	0.0000	0.0000	<u>116</u>	<u>1.84</u>
MOEA/D	0.2677	<u>0.5199</u>	<u>0.4040</u>	<u>0.1958</u>	94	3.99
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1986</u>	0.6095	0.4017	0.1375	55	5.84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3

ตารางที่ ข.34 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	97	31	0.006897	0.632184
2	97.25	30	0.007220	0.663158
3	97.25	28	0.011612	0.640449
4	97.33333	31	0.004816	0.632184
5	97.33333	31	0.004815	0.636364
6	97.33333	31	0.004838	0.623529
7	97.41667	31	0.007862	0.619048
8	97.5	31	0.005038	0.619048
9	97.5	30	0.010401	0.561644
10	97.5	30	0.008966	0.573333
11	97.5	30	0.008943	0.578947
12	97.5	30	0.005899	0.609756
13	97.5	29	0.007627	0.652174
14	97.5	29	0.008198	0.648352
15	97.5	29	0.009082	0.640449

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.35 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	99.16667	26	0.004999	0.567568
	2	99.08333	25	0.005031	0.573333
	3	99.5	25	0.004907	0.578947
MOEA/D	1	98	25	0.004573	0.549296
	2	98.66667	25	0.005245	0.536232
	3	100.5	24	0.00436	0.549296
AMOEA/D-COIN/WT	1	97	24	0.003388	0.542857
	2	97.25	25	0.002913	0.555556
	3	97.66667	23	0.003557	0.542857

ตารางที่ ข.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P4 ขนาด 133 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 32 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.4634	<u>0.5447</u>	0.0000	0.0000	<u>116</u>	<u>1.96</u>
MOEA/D	0.2364	0.7230	0.2094	0.0920	73	4.12
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1652</u>	0.6180	<u>0.5271</u>	<u>0.2414</u>	83	5.95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการทดลองการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2

ตารางที่ ข.37 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	6835	32	0.009670	0.679612
2	6835	32	0.009670	0.679612
3	6856.4	31	0.006033	0.625000
4	6856.4	31	0.006088	0.620690
5	6856.4	31	0.006684	0.616279
6	6871.4	29	0.013511	0.685714
7	6871.4	28	0.014140	0.682692
8	6871.6	33	0.004348	0.656250
9	6872.8	29	0.006474	0.659794
10	6872.8	29	0.005392	0.663265
11	6872.8	29	0.005134	0.666667
12	6872.8	30	0.004594	0.685714
13	6872.8	33	0.003414	0.656250
14	6872.8	33	0.002987	0.659794
15	6872.8	33	0.004089	0.652632

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.38 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	6988.4	28	0.007019	0.611765
	2	7012.8	27	0.005763	0.607143
	3	6898.2	27	0.005589	0.616279
MOEA/D	1	6982.8	27	0.003501	0.554054
	2	6971.6	24	0.003369	0.56
	3	6891	27	0.0046	0.592593
AMOEA/D-COIN/WT	1	6856.4	25	0.002567	0.582279
	2	6871.4	25	0.002987	0.582279
	3	6835	28	0.003385	0.56579

ตารางที่ ข.39 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 10:21:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.5043	<u>0.5589</u>	0.0000	0.0000	94	<u>7.08</u>
MOEA/D	0.2221	0.7367	<u>0.5374</u>	<u>0.1810</u>	77	13.40
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1947</u>	0.6041	0.3167	0.1524	<u>98</u>	31.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4

ตารางที่ ข.40 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	6951.4	32	0.006560	0.673267
2	6951.4	32	0.006930	0.670000
3	6958.2	32	0.006517	0.673267
4	6958.2	32	0.006164	0.676471
5	6958.2	32	0.006099	0.682692
6	7003	32	0.007944	0.663265
7	7017	32	0.007871	0.659794
8	7017	32	0.005550	0.663265
9	7017	32	0.005166	0.666667
10	7017	32	0.005083	0.670000
11	7024	32	0.008531	0.656250
12	7028.6	31	0.006034	0.659794
13	7052.4	31	0.011994	0.625000
14	7054	31	0.010992	0.625000
15	7054	31	0.009894	0.629214

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.41 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	7167.6	27	0.006065	0.607143
	2	7194.2	28	0.006246	0.611765
	3	7195.6	27	0.005795	0.602410
MOEA/D	1	7169.2	27	0.006002	0.597561
	2	7129.8	26	0.006115	0.597561
	3	7165.2	28	0.004490	0.565790
AMOEA/D-COIN/WT	1	7076	27	0.004929	0.587500
	2	7088.6	26	0.003547	0.560000
	3	6951.4	26	0.003589	0.560000

ตารางที่ ข.42 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 33 คน และสัดส่วนพนักงาน 8:21:4

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.6164	<u>0.5395</u>	0.0000	0.0000	86	<u>8.12</u>
MOEA/D	0.3350	0.6717	0.0556	0.0278	80	14.32
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.2090</u>	0.6691	<u>0.4418</u>	<u>0.3131</u>	<u>100</u>	30.52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3

ตารางที่ ข.43 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	5663.4	47	0.008403	0.448276
2	5663.4	46	0.010490	0.435294
3	5663.4	47	0.008403	0.448276
4	5663.4	47	0.004905	0.500000
5	5663.4	45	0.003754	0.538462
6	5663.4	45	0.003744	0.551402
7	5663.4	45	0.003480	0.555556
8	5663.4	45	0.003456	0.559633
9	5663.4	44	0.003750	0.575221
10	5663.4	43	0.004796	0.524753
11	5663.4	43	0.004841	0.505155
12	5663.4	43	0.004940	0.500000
13	5663.4	43	0.004991	0.494737
14	5663.4	43	0.005103	0.483871
15	5663.4	42	0.005457	0.483871

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.44 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	5663.4	41	0.006541	0.505155
	2	5663.4	42	0.006490	0.505155
	3	5663.4	42	0.005262	0.510204
MOEA/D	1	5663.4	39	0.004032	0.454546
	2	5663.4	41	0.004624	0.472528
	3	5663.4	41	0.004350	0.510204
AMOEA/D-COIN/WT	1	5663.4	39	0.003456	0.441861
	2	5663.4	39	0.004416	0.435294
	3	5663.4	42	0.003375	0.466667

ตารางที่ ข.45 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 14:31:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.7474	<u>0.6291</u>	0.0000	0.0000	<u>79</u>	<u>10.51</u>
MOEA/D	0.3203	0.7470	0.1548	0.1187	68	15.21
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.2557</u>	0.7750	<u>0.4636</u>	<u>0.2146</u>	50	29.02

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5

ตารางที่ ข.46 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	5663.4	42	0.005684	0.494737
2	5663.4	42	0.006029	0.500000
3	5663.4	41	0.006405	0.505155
4	5663.4	42	0.006804	0.500000
5	5663.4	40	0.005267	0.489362
6	5663.4	41	0.005923	0.489362
7	5663.4	40	0.003034	0.448276
8	5663.4	39	0.002660	0.454546
9	5663.4	38	0.003235	0.441861
10	5663.4	42	0.005684	0.494737
11	5663.4	42	0.006029	0.500000
12	5663.4	41	0.006405	0.505155
13	5663.4	42	0.006804	0.500000
14	5663.4	40	0.005267	0.489362
15	5663.4	41	0.005923	0.489362

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.47 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	5663.4	46	0.002660	0.601695
	2	5663.4	46	0.002748	0.598291
	3	5663.4	44	0.006882	0.441861
MOEA/D	1	5663.4	43	0.005488	0.448276
	2	5663.4	43	0.005380	0.454546
	3	5663.4	43	0.004886	0.460674
AMOEA/D-COIN/WT	1	5663.4	43	0.004019	0.510204
	2	5663.4	43	0.004007	0.515152
	3	5663.4	41	0.003076	0.542857

ตารางที่ ข.48 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P5 ขนาด 194 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 48 คน และสัดส่วนพนักงาน 12:31:5

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	1.0249	0.7101	0.0000	0.0000	70	10.78
MOEA/D	0.6386	0.9419	0.0000	0.0000	49	16.24
AMOEA/D-COIN/WT	0.2128	0.8371	0.5473	0.3333	45	31.05

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดลองการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1

ตารางที่ ข.49 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	4710	29	0.009265	0.827586
2	4712.4	27	0.005997	0.797297
3	4712.4	27	0.006627	0.788732
4	4712.4	27	0.007380	0.785714
5	4712.4	27	0.008221	0.784173
6	4712.4	27	0.008520	0.782609
7	4712.4	26	0.009715	0.788732
8	4714	28	0.005330	0.823529
9	4722.5	27	0.005645	0.800000
10	4722.5	27	0.005660	0.797297
11	4722.5	27	0.006328	0.791667
12	4723.2	26	0.008115	0.800000
13	4723.2	26	0.007865	0.801325
14	4723.2	26	0.007454	0.803922
15	4723.2	29	0.004920	0.820359

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.50 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	4779.5	25	0.006105	0.793103
	2	4776.2	25	0.005776	0.795918
	3	4779.6	25	0.005208	0.793103
MOEA/D	1	4755	24	0.005035	0.774436
	2	4777.4	25	0.004992	0.777778
	3	4712.4	24	0.003186	0.776119
AMOEA/D-COIN/WT	1	4723.2	23	0.003428	0.781022
	2	4710	23	0.003339	0.784173
	3	4759	24	0.003320	0.779412

ตารางที่ ข.51 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 9:20:1

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.6224	<u>0.6541</u>	0.0000	0.0000	83	<u>13.21</u>
MOEA/D	0.2502	0.7829	<u>0.3727</u>	<u>0.1900</u>	50	21.20
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.2050</u>	0.7083	0.1937	0.1433	<u>85</u>	38.51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3

ตารางที่ ข.52 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	4814.2	30	0.013287	0.824561
2	4814.2	30	0.012704	0.825581
3	4814.2	30	0.012472	0.826590
4	4814.2	30	0.007601	0.830509
5	4814.2	30	0.005994	0.833333
6	4814.2	29	0.008557	0.833333
7	4814.2	29	0.010110	0.831461
8	4814.2	29	0.014986	0.825581
9	4814.2	28	0.017750	0.830509
10	4814.2	28	0.013918	0.832402
11	4814.2	28	0.012464	0.834254
12	4817.8	29	0.005284	0.818182
13	4817.8	29	0.005679	0.815951
14	4817.8	29	0.005912	0.813665
15	4857.5	29	0.005363	0.815951

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.53 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	4956	24	0.009100	0.797297
	2	4902.5	25	0.008971	0.795918
	3	4952	25	0.008071	0.798658
MOEA/D	1	4875	24	0.008777	0.776119
	2	4883.5	24	0.006105	0.782609
	3	4814.2	24	0.004802	0.781022
AMOEA/D-COIN/WT	1	4817.8	24	0.004648	0.772727
	2	4869.6	25	0.004475	0.776119
	3	4857	24	0.004036	0.776119

ตารางที่ ข.54 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 30 คน และสัดส่วนพนักงาน 7:20:3

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.6042	<u>0.7172</u>	0.0000	0.0000	72	<u>14.85</u>
MOEA/D	0.2914	0.9191	<u>0.5390</u>	<u>0.1842</u>	64	20.29
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.2363</u>	0.8007	0.2405	0.1492	<u>101</u>	38.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2

ตารางที่ ข.55 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	3388.4	41	0.005819	0.742515
2	3388.4	41	0.005819	0.742515
3	3393	42	0.005249	0.745562
4	3395.5	41	0.005220	0.745562
5	3395.5	41	0.005174	0.747059
6	3395.5	42	0.005113	0.747059
7	3402.8	39	0.007096	0.727848
8	3402.8	39	0.008833	0.726115
9	3404.9	40	0.004459	0.755682
10	3408.5	41	0.004894	0.752874
11	3411	40	0.010181	0.720779
12	3411	39	0.008628	0.724359
13	3411	39	0.008171	0.726115
14	3411.4	40	0.008934	0.711409
15	3411.4	40	0.007404	0.715232

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.56 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	3486.5	37	0.006618	0.726115
	2	3425	37	0.007307	0.726115
	3	3492.8	37	0.007358	0.727848
MOEA/D	1	3415	36	0.003936	0.705480
	2	3411.4	37	0.006001	0.699301
	3	3429	35	0.004390	0.699301
AMOEA/D-COIN/WT	1	3430.6	35	0.004777	0.699301
	2	3404.9	34	0.003837	0.713333
	3	3388.4	37	0.004278	0.707483

ตารางที่ ข.57 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 13:28:2

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.6330	<u>0.6776</u>	0.0000	0.0000	<u>88</u>	<u>13.24</u>
MOEA/D	0.2133	0.7729	0.3681	<u>0.1710</u>	87	22.13
AMOEA/D-COIN/WT	<u>0.1783</u>	0.7766	<u>0.4636</u>	0.1623	65	41.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4

ตารางที่ ข.58 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (Approximate True Pareto-Optimal) ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4

คำตอบที่	C_T	N_S	B_b	$ITUR$
1	3422.5	42	0.005350	0.751445
2	3426	42	0.005716	0.748538
3	3428.5	42	0.005619	0.750000
4	3441	41	0.009226	0.740964
5	3441	41	0.007206	0.742515
6	3441	41	0.007129	0.744048
7	3441	41	0.006976	0.745562
8	3441	42	0.006692	0.745562
9	3443	40	0.008693	0.742515
10	3443	40	0.008751	0.740964
11	3443	40	0.008955	0.739394
12	3443	40	0.012452	0.736196
13	3498.3	38	0.014450	0.734568
14	3499.2	41	0.008224	0.737805
15	3499.2	41	0.008165	0.740964

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.59 คำตอบที่ต่ำที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมต่างๆค้นหาได้ในปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4

อัลกอริทึม	Rep.	ค่าวัตถุประสงค์ที่น้อยที่สุดที่หาได้			
		C_T	N_S	B_b	$ITUR$
COIN	1	3529.5	37	0.009107	0.720779
	2	3528.5	37	0.008811	0.729560
	3	3528.5	37	0.008949	0.727848
MOEA/D	1	3506	35	0.005793	0.707483
	2	3574	37	0.010962	0.715232
	3	3523.9	37	0.005695	0.726115
AMOEA/D-COIN/WT	1	3502	37	0.004758	0.711409
	2	3479.2	37	0.005298	0.699301
	3	3422.5	36	0.005350	0.711409

ตารางที่ ข.60 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ ในการแก้ปัญหา P6 ขนาด 380 ขั้นงาน ที่จำนวนพนักงานเท่ากับ 43 คน และสัดส่วนพนักงาน 11:28:4

ตัวชี้วัดสมรรถนะ / อัลกอริทึม	Convergence	Spread	RNDS1	RNDS2	NNDS	CPU TIME (min)
COIN	0.5597	0.5354	0.0000	0.0000	90	15.32
MOEA/D	0.2505	0.8027	0.1057	0.0712	81	23.15
AMOEA/D-COIN/WT	0.1896	0.7919	0.4394	0.2621	87	40.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชินวิชญ์ สินธุเดชากุล เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน พ.ศ.2535 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร จากมหาลัยวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University