การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมในการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

นายชรัด จิรโกเมศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF MEMETIC ALGORITHMS FOR MULTI-OBJECTIVE WORKER ALLOCATION IN U-SHAPED ASSEMBLY

Mr. Charat Jirakomate

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมในการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู
โดย	นายชรัด จิรโกเมศ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชรัด จิรโกเมศ : การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมในการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู (APPLICATION OF MEMETIC ALGORITHMS FOR MULTI-OBJECTIVE WORKER ALLOCATION IN U-SHAPED ASSEMBLY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ปารเมศ ชุติมา, 391 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนออัลกอริทึมซึ่งประยุกต์ใช้ เมมเมติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่จะทำการพิจารณาในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนพนักงานที่น้อยที่สุด ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงานที่น้อยที่สุด และเวลาเดินของพนักงานที่น้อยที่สุด การทดสอบอัลกอริทึมที่นำเสนอจะทำการทดสอบกับปัญหามาตรฐานภายใต้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งผลการทดสอบของอัลกอริทึมที่นำเสนอจะนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับอัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมและเป็นที่ยอมรับกันว่ามีประสิทธิภาพดีในปัจจุบัน คือ วิธี COMSOAL วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม อัลกอริทึมการบรรจวบ และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบพบว่า เมมเมติกอัลกอริทึม มีประสิทธิภาพที่ดีและเป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหาการพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2553

5070664621 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : PARTICLE SWARM OPTIMIZATION / GENETIC ALGORITHM / ASSEMBLY LINE BALANCING / U-SHAPED ASSEMBLY LINE / MULTI-OBJECTIVES / WORKER ALLOCATION

CHARAT JIRAKOMATE : APPLICATION OF MEMETIC ALGORITHMS FOR MULTI-OBJECTIVE WORKER ALLOCATION IN U-SHAPED ASSEMBLY. ADVISOR : ASSOC.PROF.PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 391 pp.

The purpose of this research is to develop a new approach to multi-objective worker allocation problems using Memetic Algorithms. In this study we consider three objectives which are minimum number of workers, minimum deviation of operation times of workers, and minimum walk time of workers. The proposed algorithm is tested against several test functions taken from literature on U-shaped assembly line worker allocation problems. Their performances are compared with highly competitive evolutionary algorithms, i.e. Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines (COMSOAL), Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAII), COIN ,Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) and Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge (PSONK). The results indicate that Memetic Algorithms is highly competitive and can be considered as a viable alternative to solve multi-objective worker allocation problems.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถเสร็จลุล่วงไปด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปารเมศ ชุติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเมตตาตลอดการดำเนินการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ รศ.จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์ และ รศ.ดร.วันชัย ริจิรวนิช กรรมการในการวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้

ขอขอบคุณ ดร. รณชัย ศิโรเวฐนุกูล และ ภาณุวัฒน์ โอฬารวิวัฒน์ชัย อีกทั้งทีมงานทุกท่านสำหรับคำแนะนำปรึกษาในทุกด้านรวมทั้งการให้คำปรึกษาด้านโปรแกรมให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อนๆที่ได้ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจและเอาใจใส่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ในที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฟ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขั้นตอนการวิจัย..... 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย..... 3

1.5 ลักษณะและข้อกำหนดของปัญหา..... 4

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย..... 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 7

2.1 ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป..... 7

2.2 ลักษณะของสายการประกอบแบบเส้นตรง..... 7

2.3 ลักษณะของสายการประกอบแบบตัวยู..... 8

2.4 ประเภทของปัญหาสายการจัดสมดุลสายการประกอบ..... 9

2.5 ประเภทของปัญหาที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ..... 10

2.6 วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบ..... 12

2.7 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ..... 12

2.8 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 13

2.9 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด..... 18

2.10 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 20

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3 การประยุกต์ใช้ COMSOAL ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 31
3.1 หลักการและแนวคิดของ COMSOAL (Computer Method of Sequencing Operation for Assembly Line)..... 31
3.2 ขั้นตอนการนำ COMSOAL ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 31
3.3 ตัวอย่างการนำ COMSOAL ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 32
3.4 สรุปท้ายบท..... 45

4 การประยุกต์ใช้ วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 46
4.1 หลักการและแนวคิดของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม..... 46
4.2 ขั้นตอนการนำ NSGAII ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 48
4.3 ตัวอย่างการการนำ NSGA-II ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 50
4.4 สรุปท้ายบท..... 76

5 การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจวบในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 77
5.1 หลักการและแนวคิดของอัลกอริทึมการบรรจวบ..... 77
5.2 ขั้นตอนการนำอัลกอริทึมการบรรจวบไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 77
5.3 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึมการบรรจวบไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 79
5.4 สรุปท้ายบท..... 99

บทที่ หน้า

6 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 100
6.1 หลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค..... 100
6.2 ขั้นตอนการนำ DPSO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 100
6.3 ตัวอย่างการนำ DPSO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 102
6.4 สรุปท้ายบท..... 120

7 การพัฒนาวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค โดยใช้ความรู้เชิงลบ และการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์..... 121
7.1 หลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ..... 121
7.2 ขั้นตอนการนำ PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 122
7.3 ตัวอย่างการนำ PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 123
7.4 สรุปท้ายบท..... 151

8 การประยุกต์ใช้วิธีเมมเมติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 152
8.1 หลักการและแนวคิดของการประยุกต์ใช้วิธีเมมเมติกอัลกอริทึม..... 152
8.2 ขั้นตอนการนำ M-NSGA-II ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 154
8.3 ตัวอย่างการนำM-NSGA-IIไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู..... 156

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

8.4 การประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Memetic Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : M-PSONK)..... 194
8.5 ตัวอย่างการนำวิธี M-PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยู..... 196
8.6 สรุปท้ายบท..... 226

9 การทดลองและการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม..... 227
9.1 การกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... 227
9.2 การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม..... 237
9.3 การวิเคราะห์ผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม..... 288
9.4 สรุปท้ายบท..... 289

10 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 290
10.1 สรุปงานวิจัย..... 290
10.2 ข้อเสนอแนะ..... 293

รายการอ้างอิง..... 294
ภาคผนวก..... 306
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 391

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 3.1	เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน	33
ตารางที่ 3.2	เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ	34
ตารางที่ 3.3	ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า	34
ตารางที่ 3.4	ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง	35
ตารางที่ 3.5	การถอดรหัสคำตอบในสตริงคำตอบแรก	37
ตารางที่ 3.6	การจัดสรรงานให้กับพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1	39
ตารางที่ 3.7	ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้ในรอบการทำงานแรก	40
ตารางที่ 3.8	ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ	41
ตารางที่ 3.9	การเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด	42
ตารางที่ 3.10	ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์	42
ตารางที่ 3.11	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)	43
ตารางที่ 3.12	การรวมสตริงคำตอบ	44
ตารางที่ 3.13	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)	44
ตารางที่ 3.14	สตริงคำตอบที่ดีที่สุด	45
ตารางที่ 4.1	เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน	51
ตารางที่ 4.2	เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ	51
ตารางที่ 4.3	ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า	52
ตารางที่ 4.4	ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง	52
ตารางที่ 4.5	การถอดรหัสคำตอบในสตริงคำตอบแรก	55
ตารางที่ 4.6	การจัดสรรงานให้กับพนักงานในสตริงคำตอบแรก	57
ตารางที่ 4.7	ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้	58
ตารางที่ 4.8	ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ	59
ตารางที่ 4.9	ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ	60
ตารางที่ 4.10	การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value	61
ตารางที่ 4.11	การสร้างวงล้อรูเล็ต	61
ตารางที่ 4.12	การทำ Binary Tournament Selection	62
ตารางที่ 4.13	สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์	63

หน้า

ตารางที่ 4.14 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์..... 64
ตารางที่ 4.15 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน..... 65
ตารางที่ 4.16 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชัน..... 65
ตารางที่ 4.17 สติงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 66
ตารางที่ 4.18 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากร..... 66
ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบที่จะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป..... 67
ตารางที่ 4.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบการทำงานที่สอง..... 67
ตารางที่ 4.21 ค่า Dummy Fitness ของประชากรในรอบการทำงานที่สอง..... 68
ตารางที่ 4.22 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบในรอบที่สอง..... 69
ตารางที่ 4.23 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Valueในรอบการทำงานที่สอง..... 69
ตารางที่ 4.24 การสร้างวงล้อรูเล็ตในรอบการทำงานที่สอง..... 70
ตารางที่ 4.25 การทำ Binary Tournament Selection ในรอบการทำงานที่สอง..... 71
ตารางที่ 4.26 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์ในรอบการทำงานที่สอง..... 71
ตารางที่ 4.27 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์ในรอบที่สอง..... 73
ตารางที่ 4.28 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชันในรอบที่สอง..... 73
ตารางที่ 4.29 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชันในรอบที่สอง..... 74
ตารางที่ 4.30 สติงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูกในรอบที่สอง..... 74
ตารางที่ 4.31 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากรในรอบที่สอง..... 75
ตารางที่ 4.32 สตริงคำตอบที่จะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไปในการทำซ้ำรอบที่สาม..... 75
ตารางที่ 5.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 80
ตารางที่ 5.2 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ..... 80
ตารางที่ 5.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า..... 81
ตารางที่ 5.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง..... 81
ตารางที่ 5.5 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก..... 82
ตารางที่ 5.6 ตารางความน่าจะเป็นร่วม..... 82
ตารางที่ 5.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้..... 85
ตารางที่ 5.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ..... 86
ตารางที่ 5.9 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ..... 87

หน้า

ตารางที่ 5.10 สตริงคำตอบที่ดีและแย่..... 88

ตารางที่ 5.11 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่ดี..... 89

ตารางที่ 5.12 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่ดี..... 91

ตารางที่ 5.13 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่แย่..... 92

ตารางที่ 5.14 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่แย่..... 93

ตารางที่ 5.15 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1..... 94

ตารางที่ 5.16 ประชากรเริ่มต้นในรอบที่ 2..... 94

ตารางที่ 5.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้นในรอบที่ 2..... 94

ตารางที่ 5.18 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบในรอบที่ 2..... 85

ตารางที่ 5.19 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ..... 96

ตารางที่ 5.20 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ในรอบที่ 2..... 96

ตารางที่ 5.21 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หลังการปรับปรุงในรอบที่ 2..... 97

ตารางที่ 5.22 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) หลังการปรับปรุงในรอบที่ 2..... 97

ตารางที่ 5.23 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน..... 97

ตารางที่ 5.24 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน..... 98

ตารางที่ 5.25 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบการทำงานที่ 2..... 98

ตารางที่ 6.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 103

ตารางที่ 6. 2 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ..... 103

ตารางที่ 6.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า..... 104

ตารางที่ 6.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง..... 104

ตารางที่ 6.5 ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1..... 105

ตารางที่ 6.6 ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2..... 106

หน้า

ตารางที่ 6.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์..... 107
ตารางที่ 6.8 ค่า Lbest ของประชากรในรอบแรก..... 107
ตารางที่ 6.9 ค่า Gbest ของประชากรในรอบแรก..... 108
ตารางที่ 6.10 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก..... 109
ตารางที่ 6.11 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก..... 109
ตารางที่ 6.12 ตารางทิศทางการเคลื่อนทีของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก..... 110
ตารางที่ 6.13 ตารางทิศทางการเคลื่อนทีของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก..... 110
ตารางที่ 6.14 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2..... 111
ตารางที่ 6.15 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2..... 111
ตารางที่ 6.16 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1..... 111
ตารางที่ 6.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้นในการดำเนินการรอบที่ 2..... 112
ตารางที่ 6.18 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1ในรอบที่ 2..... 113
ตารางที่ 6.19 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1ในรอบที่ 2..... 114
ตารางที่ 6.20 ค่า Lbest ของประชากรในรอบที่ 2..... 114
ตารางที่ 6.21 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบทั้งหมดในรอบที่ 2..... 115
ตารางที่ 6.22 ค่า Gbest ของประชากรในรอบการดำเนินการที่ 2..... 116
ตารางที่ 6.23 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2..... 116
ตารางที่ 6.24 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2..... 116
ตารางที่ 6.25 ตารางทิศทางการเคลื่อนทีของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2..... 117
ตารางที่ 6.26 ตารางทิศทางการเคลื่อนทีของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2..... 117
ตารางที่ 6.27 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 3..... 118
ตารางที่ 6.28 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 3..... 118
ตารางที่ 6.29 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน..... 119
ตารางที่ 6.30 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน..... 119

หน้า

ตารางที่ 6.31	สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบการทำงานที่ 2.....	119
ตารางที่ 7.1	เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน.....	124
ตารางที่ 7.2	เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ.....	124
ตารางที่ 7.3	ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า.....	125
ตารางที่ 7.4	ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง.....	125
ตารางที่ 7.5	ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของ ฝูง ที่ 1 ในรอบการทำงานแรก.....	126
ตารางที่ 7.6	ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของ ฝูง ที่ 2 ในรอบการทำงานแรก.....	126
ตารางที่ 7.7	ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ของฝูงที่1ในรอบการทำงานแรก.....	126
ตารางที่ 7.8	ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ของฝูงที่2ในรอบการทำงานแรก.....	127
ตารางที่ 7.9	ตารางการสร้างประชากรเริ่มต้น.....	128
ตารางที่ 7.10	สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก.....	128
ตารางที่ 7.11	สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก.....	128
ตารางที่ 7.12	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก...	130
ตารางที่ 7.13	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก...	130
ตารางที่ 7.14	การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการแรก...	131
ตารางที่ 7.15	การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการแรก...	131
ตารางที่ 7.16	การคัดเลือกสตริงคำตอบของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการแรก.....	131
ตารางที่ 7.17	การคัดเลือกสตริงคำตอบของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการแรก.....	131
ตารางที่ 7.18	ประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก.....	132
ตารางที่ 7.19	การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก....	132
ตารางที่ 7.20	สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก..	134
ตารางที่ 7.21	สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรทั้งหมดในรอบการดำเนินการรอบแรก.....	134
ตารางที่ 7.22	ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงสตริงแรก.....	135

หน้า

ตารางที่ 7.23 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงสตริงที่สอง..... 135

ตารางที่ 7.24 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงสตริงที่สาม..... 136

ตารางที่ 7.25 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุง..... 136

ตารางที่ 7.26 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุง..... 137

ตารางที่ 7.27 ตารางแสดง ทิศทางการเคลื่อนที่เริ่มต้นของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก (V_{01}). 138

ตารางที่ 7.28 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรกหลังปรับปรุงด้วย L_{best}..... 139

ตารางที่ 7.29 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรกหลังปรับปรุงด้วย L_{best}..... 141

ตารางที่ 7.30 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรกหลังปรับปรุง..... 141

ตารางที่ 7.31 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรกหลังปรับปรุง..... 142

ตารางที่ 7.32 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก..... 142

ตารางที่ 7.33 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก..... 143

ตารางที่ 7.34 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการรอบแรก..... 143

ตารางที่ 7.35 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง..... 143

ตารางที่ 7.36 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง..... 144

ตารางที่ 7.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง 144

ตารางที่ 7.38 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง 144

ตารางที่ 7.39 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 1 ในการดำเนินการรอบสอง... 145

ตารางที่ 7.40 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในการดำเนินการรอบสอง..... 145

ตารางที่ 7.41 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 2 ในการดำเนินการรอบสอง... 145

ตารางที่ 7.42 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในการดำเนินการรอบสอง..... 145

ตารางที่ 7.43 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรรวม ในการดำเนินการรอบสอง..... 146

ตารางที่ 7.44 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่1หลังการปรับปรุงในรอบ 2. 147

ตารางที่ 7.45 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่2หลังการปรับปรุงในรอบ 2. 147

หน้า

ตารางที่ 7.46 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สองหลังปรับปรุง..... 148
ตารางที่ 7.47 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สองหลังปรับปรุง..... 148
ตารางที่ 7.48 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สอง..... 149
ตารางที่ 7.49 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สอง..... 149
ตารางที่ 7.50 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการแต่ละรอบ..... 150
ตารางที่ 7.51 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน..... 150
ตารางที่ 8.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน..... 157
ตารางที่ 8.2 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ..... 157
ตารางที่ 8.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า..... 158
ตารางที่ 8.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง..... 158
ตารางที่ 8.5 การถอดรหัสคำตอบในสตริงคำตอบแรก..... 161
ตารางที่ 8.6 การจัดสรรงานให้กับพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1..... 163
ตารางที่ 8.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้..... 164
ตารางที่ 8.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ..... 165
ตารางที่ 8.9 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ..... 166
ตารางที่ 8.10 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value..... 167
ตารางที่ 8.11 การสร้างวงล้อรูเล็ต..... 167
ตารางที่ 8.12 การทำ Binary Tournament Selection..... 168
ตารางที่ 8.13 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที่..... 168
ตารางที่ 8.14 สตริงคำตอบจากการทำการค้นหาเฉพาะที่..... 169
ตารางที่ 8.15 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบก่อนและหลังทำการค้นหาเฉพาะที่..... 169
ตารางที่ 8.16 สตริงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงที่ได้จากการค้นหาเฉพาะที่..... 170
ตารางที่ 8.17 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงที่ได้จากการค้นหาเฉพาะที่..... 170
ตารางที่ 8.18 ประชากรหลังจากการทำการค้นหาเฉพาะที่หลังจากการสร้างประชากรเริ่มต้น.. 171
ตารางที่ 8.19 ผลการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรง..... 171

หน้า

ตารางที่ 8.20 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value..... 172
ตารางที่ 8.21 การสร้างวงล้อรูเล็ต..... 172
ตารางที่ 8.22 การทำ Binary Tournament Selection..... 173
ตารางที่ 8.23 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์..... 173
ตารางที่ 8.24 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์..... 175
ตารางที่ 8.25 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน..... 175
ตารางที่ 8.26 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชัน..... 176
ตารางที่ 8.27 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value..... 176
ตารางที่ 8.28 การสร้างวงล้อรูเล็ต..... 176
ตารางที่ 8.29 การทำ Binary Tournament Selection..... 177
ตารางที่ 8.30 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที่..... 178
ตารางที่ 8.31 สตริงคำตอบจากการทำการค้นหาเฉพาะที่..... 178
ตารางที่ 8.32 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบก่อนและหลังทำการค้นหาเฉพาะที่..... 179
ตารางที่ 8.33 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที่หลังการมิวเตชัน..... 179
ตารางที่ 8.34 สติงคำตอบเริมต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูก..... 180
ตารางที่ 8.35 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากร..... 180
ตารางที่ 8.36 สตริงคำตอบที่จะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป..... 181
ตารางที่ 8.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบที่ 2..... 181
ตารางที่ 8.38 ค่า Dummy Fitness ของประชากรในรอบที่ 2..... 182
ตารางที่ 8.39 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบในรอบ 2 183
ตารางที่ 8.40 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Valueในรอบที่ 2..... 184
ตารางที่ 8.41 การสร้างวงล้อรูเล็ตในรอบที่ 2..... 184
ตารางที่ 8.42 การทำ Binary Tournament Selection ในรอบที่ 2..... 185
ตารางที่ 8.43 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์ในรอบที่ 2..... 185
ตารางที่ 8.44 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์ในรอบที่ 2..... 187
ตารางที่ 8.45 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชันในรอบที่ 2..... 187
ตารางที่ 8.46 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชันในรอบที่ 2..... 188
ตารางที่ 8.47 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value..... 188
ตารางที่ 8.48 การสร้างวงล้อรูเล็ตสำหรับการค้นหาเฉพาะที่หลังการมิวเตชันในรอบที่ 2..... 188

หน้า

ตารางที่ 8.49 การทำBinary Tournament Selectionสำหรับการค้นหาเฉพาะทีหลังการมิวเตชันในรอบที่ 2..... 189
ตารางที่ 8.50 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที..... 190
ตารางที่ 8.51 สตริงคำตอบจากการทำการค้นหาเฉพาะที..... 190
ตารางที่ 8.52 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบก่อนและหลังทำการค้นหาเฉพาะที..... 191
ตารางที่ 8.53 สตริงคำตอบรวมก่อนและหลังการค้นหาเฉพาะที..... 191
ตารางที่ 8.54 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริมต้นรวมกับสตริงที่ได้จากการค้นหาเฉพาะที..... 192
ตารางที่ 8.55 ประชากรรุ่นลูกหลังการค้นหาเฉพาะที..... 192
ตารางที่ 8.56 สติงคำตอบเริมต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูกในรอบที่ 2..... 193
ตารางที่ 8.57 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากรในรอบที่ 2..... 193
ตารางที่ 8.58 สตริงคำตอบที่จะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไปในการทำซ้ำรอบที่ 3..... 194
ตารางที่ 8.59 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของ ฝูง ที่ 1 ในรอบการทำงานแรก..... 197
ตารางที่ 8.60 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของ ฝูง ที่ 2 ในรอบการทำงานแรก..... 197
ตารางที่ 8.61 ตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability)ของฝูงที่1ในรอบการทำงานแรก..... 197
ตารางที่ 8.62 ตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability)ของฝูงที่2ในรอบการทำงานแรก..... 198
ตารางที่ 8.63 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก..... 198
ตารางที่ 8.64 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก..... 198
ตารางที่ 8.65 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก..... 199
ตารางที่ 8.66 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก..... 200
ตารางที่ 8.67 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก... 201
ตารางที่ 8.68 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก... 202
ตารางที่ 8.69 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก..... 203

หน้า

ตารางที่ 8.70 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก..... 204
ตารางที่ 8.71 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก.. 204
ตารางที่ 8.72 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก.. 205
ตารางที่ 8.73 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก..... 205
ตารางที่ 8.74 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก..... 207
ตารางที่ 8.75 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงในรอบแรก..... 208
ตารางที่ 8.76 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงในรอบแรก..... 208
ตารางที่ 8.77 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรกหลังปรับปรุง..... 209
ตารางที่ 8.78 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรกหลังปรับปรุง..... 209
ตารางที่ 8.79 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก..... 210
ตารางที่ 8.80 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก..... 210
ตารางที่ 8.81 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการรอบแรก..... 211
ตารางที่ 8.82 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง..... 211
ตารางที่ 8.83 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง..... 211
ตารางที่ 8.84 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที่ ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สอง..... 212
ตารางที่ 8.85 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที่ ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สอง..... 213
ตารางที่ 8.86 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง 214
ตารางที่ 8.87 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง 215
ตารางที่ 8.88 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง..... 216
ตารางที่ 8.89 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่
ตารางที่ 8.90 แย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง..... 217
สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง 218

หน้า

ตารางที่ 8.91	สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง	218
ตารางที่ 8.92	การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง.....	219
ตารางที่ 8.93	สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง.....	220
ตารางที่ 8.94	ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่1หลังการปรับปรุงในรอบ 2.	221
ตารางที่ 8.95	ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่2หลังการปรับปรุงในรอบ 2.	221
ตารางที่ 8.96	ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สองหลังปรับปรุง.....	222
ตารางที่ 8.97	ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สองหลังปรับปรุง.....	222
ตารางที่ 8.98	ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก.....	223
ตารางที่ 8.99	ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก.....	223
ตารางที่ 8.100	สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการแต่ละรอบ.....	224
ตารางที่ 8.101	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน.....	225
ตารางที่ 8.102	ค่าสตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการในรอบที่ 2....	226
ตารางที่ 9.1	จำนวนงานในแต่ละด้านของผังสายการประกอบแบบสมมาตร.....	230
ตารางที่ 9.2	จำนวนงานในแต่ละด้านของผังสายการประกอบแบบ Rectangular.....	231
ตารางที่ 9.3	% Average processing time ที่ใช้ในแต่ละปัญหา.....	232
ตารางที่ 9.4	พารามิเตอร์ที่ใช้ใน วิธี COMSOAL.....	232
ตารางที่ 9.5	พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี NSGAII.....	233
ตารางที่ 9.6	พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี M-NSGAII.....	233
ตารางที่ 9.7	พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี COIN.....	234
ตารางที่ 9.8	พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี DPSO.....	235
ตารางที่ 9.9	พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี PSONK.....	235
ตารางที่ 9.10	พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี M-PSONK.....	236
ตารางที่ 9.11	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร.....	238

หน้า

ตารางที่ 9.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร.... 239
ตารางที่ 9.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร.... 240
ตารางที่ 9.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 241
ตารางที่ 9.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 242
ตารางที่ 9.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 243
ตารางที่ 9.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 244
ตารางที่ 9.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 245
ตารางที่ 9.19 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 246
ตารางที่ 9.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 247
ตารางที่ 9.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ข้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 248

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

ตารางที่ 9.22 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 249
ตารางที่ 9.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 250
ตารางที่ 9.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 251
ตารางที่ 9.25 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 252
ตารางที่ 9.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 253
ตารางที่ 9.27 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 254
ตารางที่ 9.28 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 255
ตารางที่ 9.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 256
ตารางที่ 9.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 257

หน้า

ตารางที่ 9.31 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 258
ตารางที่ 9.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 259
ตารางที่ 9.33 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 260
ตารางที่ 9.34 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 261
ตารางที่ 9.35 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 262
ตารางที่ 9.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 263
ตารางที่ 9.37 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 264
ตารางที่ 9.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 265
ตารางที่ 9.39 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 266

หน้า

ตารางที่ 9.40 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 267
ตารางที่ 9.41 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 268
ตารางที่ 9.42 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 269
ตารางที่ 9.43 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 270
ตารางที่ 9.44 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 271
ตารางที่ 9.45 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 272
ตารางที่ 9.46 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 273
ตารางที่ 9.47 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 274
ตารางที่ 9.48 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 275

หน้า

ตารางที่ 9.49 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 276
ตารางที่ 9.50 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 277
ตารางที่ 9.51 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 278
ตารางที่ 9.52 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 279
ตารางที่ 9.53 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 280
ตารางที่ 9.54 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 281
ตารางที่ 9.55 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 282
ตารางที่ 9.56 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 283
ตารางที่ 9.57 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 284

หน้า

ตารางที่ 9.58 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 285

ตารางที่ 9.59 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 286

ตารางที่ 9.60 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 287

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	ลักษณะของสายงานประกอบ	7
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ของภาระงาน	8
รูปที่ 2.3	การไหลของงานในสายงานประกอบแบบเส้นตรง	8
รูปที่ 2.4	การไหลของงานในสายงานประกอบแบบตัวยู	8
รูปที่ 2.5	ประเภทของปัญหาในการจัดสมดุลสายการประกอบ	10
รูปที่ 2.6	ประเภทของปัญหาและวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ	11
รูปที่ 2.7	พื้นที่คำตอบในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์	15
รูปที่ 2.8	การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Goldberg	17
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL	32
รูปที่ 3.2	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม	33
รูปที่ 3.3	ลักษณะของสตริงคำตอบเริ่มต้น	35
รูปที่ 3.4	ลักษณะของตำแหน่งงานต่างๆในสตริงคำตอบที่ 1	38
รูปที่ 3.5	ค่า Dummy Fitness ของประชากร	41
รูปที่ 3.6	ค่า Dummy Fitness วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg	43
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นของ GA	47
รูปที่ 4.2	ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II	49
รูปที่ 4.3	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม	50
รูปที่ 4.4	ลักษณะของสตริงคำตอบเริ่มต้น	53
รูปที่ 4.5	ลักษณะของตำแหน่งงานต่างๆในสตริงคำตอบแรก	56
รูปที่ 4.6	ค่า Dummy Fitness ของประชากร	59
รูปที่ 4.7	วงล้อรูเล็ต	62
รูปที่ 4.8	การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX ในปัญหาตัวอย่าง	64
รูปที่ 4.9	การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่าง	65
รูปที่ 4.10	ค่าDummy Fitness ของประชากรในรอบการทำงานที่สอง	68
รูปที่ 4.11	วงล้อรูเล็ตในรอบการทำงานที่สอง	70
รูปที่ 4.12	การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX รอบที่ 2 ในปัญหาตัวอย่างรอบที่สอง	72
รูปที่ 4.13	การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่างรอบที่สอง	73

หน้า

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ อัลกอริทึมการบรรจวบ..... 78
รูปที่ 5.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม..... 79
รูปที่ 5.3 ค่า Dummy Fitness ของประชากร..... 86
รูปที่ 5.4 ค่า Dummy Fitness ของประชากรในรอบที่ 2..... 95
รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO..... 101
รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม..... 102
รูปที่ 6.3 ค่าความแข็งแรงของประชากรเริ่มต้น..... 108
รูปที่ 6.4 การจัดอันดับแบบ Goldberg ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 113
รูปที่ 6.5 การจัดอันดับแบบ Goldberg ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2..... 114
รูปที่ 6.6 การจัดอันดับแบบ Goldberg ของสตริงคำตอบทั้งหมด ในรอบที่ 2..... 115
รูปที่ 7.1 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK..... 122
รูปที่ 7.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม..... 123
รูปที่ 8.1 ขั้นตอนการทำงานของ M-NSGA-II..... 155
รูปที่ 8.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม..... 156
รูปที่ 8.3 ลักษณะของสตริงคำตอบเริ่มต้น..... 159
รูปที่ 8.4 ลักษณะของตำแหน่งงานต่างๆในสตริงคำตอบที่ 1..... 162
รูปที่ 8.5 ค่า Dummy Fitness ของประชากร..... 165
รูปที่ 8.6 วงล้อรูเล็ต..... 167
รูปที่ 8.7 การทำการค้นหาเฉพาะทีจากวิธี Pair wise Interchange..... 169
รูปที่ 8.8 วงล้อรูเล็ต..... 172
รูปที่ 8.9 การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX ในปัญหาตัวอย่าง..... 174
รูปที่ 8.10 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่าง..... 175
รูปที่ 8.11 วงล้อรูเล็ต..... 177
รูปที่ 8.12 การทำการค้นหาเฉพาะทีจากวิธี Pairwise Interchange..... 178
รูปที่ 8.13 ค่าDummy Fitness ของประชากรในรอบที่ 2..... 182
รูปที่ 8.14 วงล้อรูเล็ตในรอบที่ 2..... 184
รูปที่ 8.15 การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX รอบที่ 2 ในปัญหาตัวอย่างรอบที่ 2..... 186
รูปที่ 8.16 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่างรอบที่2..... 187

หน้า

รูปที่ 8.17 วงล้อรูเล็ตในรอบที่ 2..... 187
รูปที่ 8.18 การทำการค้นหาเฉพาะทีจากวิธี Pairwise Interchange..... 190
รูปที่ 8.19 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที..... 195
รูปที่ 9.1 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 238
รูปที่ 9.2 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร.... 239
รูปที่ 9.3 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร.... 240
รูปที่ 9.4 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 241
รูปที่ 9.5 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 242
รูปที่ 9.6 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 243
รูปที่ 9.7 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 244
รูปที่ 9.8 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 245
รูปที่ 9.9 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ7ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร... 246
รูปที่ 9.10 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 247

หน้า

รูปที่ 9.11 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 248
รูปที่ 9.12 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 249
รูปที่ 9.13 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 250
รูปที่ 9.14 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 251
รูปที่ 9.15 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 252
รูปที่ 9.16 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 253
รูปที่ 9.17 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 254
รูปที่ 9.18 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 255
รูปที่ 9.19 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 256

หน้า

รูปที่ 9.20 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 257
รูปที่ 9.21 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 258
รูปที่ 9.22 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 259
รูปที่ 9.23 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 260
รูปที่ 9.24 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 261
รูปที่ 9.25 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร..... 262
รูปที่ 9.26 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 263
รูปที่ 9.27 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 264
รูปที่ 9.28 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 265

หน้า

รูปที่ 9.29 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 266
รูปที่ 9.30 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 267
รูปที่ 9.31 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 268
รูปที่ 9.32 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 269
รูปที่ 9.33 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 270
รูปที่ 9.34 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 271
รูปที่ 9.35 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 272
รูปที่ 9.36 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 273
รูปที่ 9.37 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 274

หน้า

รูปที่ 9.38 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 275
รูปที่ 9.39 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 276
รูปที่ 9.40 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 277
รูปที่ 9.41 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 278
รูปที่ 9.42 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 279
รูปที่ 9.43 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 280
รูปที่ 9.44 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 281
รูปที่ 9.45 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 282
รูปที่ 9.46 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 283

หน้า

รูปที่ 9.47 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 284
รูปที่ 9.48 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 285
รูปที่ 9.49 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร..... 286
รูปที่ 9.50 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular..... 287

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการแข่งขันทางด้านธุรกิจ ไม่ว่าจะเป็นธุรกิจสินค้าหรือบริการได้มีการแข่งขันกันสูงขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตจำเป็นต้องมีการวางแผนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้มีสินค้าเพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า สายการประกอบแบบผลิตผลิตภัณฑ์แบบผสมจึงมีความสำคัญที่จะผลิตสินค้าต่างรุ่นพร้อมกันได้ในสายการผลิตเดียวกัน ซึ่งจะตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

ระบบการผลิตที่มีลักษณะสายการประกอบแบบเส้นตรง (Straight line) เป็นระบบที่ได้รับความนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม ซึ่งสายการประกอบแบบเส้นตรงจะมีทิศทางการไหลของงานในลักษณะไปข้างหน้า วัตถุดิบจะไหลไปตามสถานีงานเพื่อทำการประกอบหรือผลิตในแต่ละสถานีงาน โดยขบวนการผลิตจะไม่มีทิศทางการไหลของงานย้อนกลับมาทำในสถานีงานก่อนหน้า และมีพื้นที่ในการผลิตค่อนข้างมากแต่เมื่อไม่นานนี้ ได้มีการศึกษาและการพัฒนาสายการประกอบให้มีลักษณะแบบตัวยู และทำการเปรียบเทียบกับสายการประกอบแบบเส้นตรง ประสิทธิภาพของสายการประกอบแบบตัวยู มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า อันเนื่องจากสถานีการประกอบและเวลาว่างงานในแต่ละสถานีงานมีปริมาณที่น้อยลง ทำให้เกิดความสามัคคีในการทำงาน เกิดการเรียนรู้ทักษะในการทำงานมากขึ้นกว่าในกรณีของสายการประกอบแบบเส้นตรง

สายการประกอบที่มีลักษณะเป็นรูปตัวยูนั้นพนักงานที่ทำงานในสายการประกอบจำเป็นที่จะต้องได้รับการฝึกฝนให้ทำงานได้หลายประเภท ดังนั้นสายการประกอบแบบตัวยูนั้นจะเหมาะกับอุตสาหกรรมที่พนักงานไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญในการทำงานในขั้นตอนต่างๆมากนัก.เช่น อุตสาหกรรม ผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป และอุตสาหกรรมผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง

อย่างไรก็ตามปัญหาของการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนซึ่งสามารถจัดได้เป็นปัญหาแบบ NP-Hard ซึ่งเป็นปัญหาที่ใช้เวลาในการหาคำตอบและเวลาในการหาคำตอบจะเพิ่มมากขึ้นในลักษณะแบบเอ็กโปเนเชียลเมื่อขนาดของปัญหาเพิ่มขึ้นได้มีการพัฒนาเทคนิคทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว แต่เนื่องจากเทคนิคทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีการที่ยุ่งยากในการคำนวณและใช้เวลานาน ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่เป็นที่

ยอมรับ คือวิธีการทางฮิวริสติกและที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms) เพื่อจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบแบบผลิตผลิตภัณฑ์ผสมในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี Mansouri (2005) ได้เสนอเจนเนติกอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multi Objective Genetic Algorithms: MOGAs) เพื่อค้นหาเซตคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมแบบพาเรโต (Pareto-Optimal Frontier) นอกจากนี้ Moghaddam and Vahed (2006) ได้พัฒนาเมมเมติกอัลกอริทึม (Memetic Algorithms) ในการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีการรวมฟังก์ชันโดยอาศัยการให้น้ำหนัก (Weighted Sum Approach)

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกียวข้องกับการใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงาน พบว่าวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ซึงเป็นวิธีการค้นหาคำตอบวิธีหนึงที่มีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการบินหาอาหารของฝูงนก (Kennedy and Eberhart, 2001) ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับ GA (Liao, Tseng and Luarn, 2007)

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมเข้ามาร่วมกับอัลกอริทึมอืนในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการจัดสรรพนักงานบนสายการประกอบแบบตัวยู เพื่อเพิมประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบรูปตัวยู นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆนี้กับอัลกอริทึมในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แก่ COMSOAL วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม อัลกอริทึมการบรรจวบ และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลการนำเมมเมติกอัลกอริทึมเข้ามาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

1.3 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนของงานวิจัยมีดังนี้

1) ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกียวข้อง
2) ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้า

3) สร้าง Algorithm และทำการปรับแก้โปรแกรมในงานวิจัยก่อนหน้า โดยใช้ MATLAB

4) ทดสอบและแก้ไขปัญหาของโปรแกรมที่เขียนขึ้นให้มีความถูกต้อง

5) ประเมินผลการแก้ไขปัญหาโดยโปรแกรมที่เขียนขึ้น

6) สรุปผลการดำเนินงานและเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงต่อไป

7) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอผลงาน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยมีดังนี้

1) ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ในแบบของปัญหาแบบ UALBP-1 เท่านั้น (มีการกำหนด Cycle Time มาและหาจำนวนของสถานีงาน)

2) ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่ทำการศึกษา เป็นการหาจำนวนพนักงานที่เหมาะสมและเป็นการจัดกลุ่มให้พนักงานโดยมีวัตถุประสงค์ 3 ประการคือ

- เพื่อให้มีจำนวนพนักงานน้อยที่สุด
- เพื่อให้ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงานมีค่าน้อยที่สุด
- เพื่อให้เวลาเดินของพนักงานมีค่าต่ำที่สุด

3) นำเอาวิธีการของเมมเมติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ในการหาคำตอบ

4) การประเมินประสิทธิภาพคำตอบของการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบของการศึกษาครั้งนี้คือการค้นหาเซตคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อใช้ในการคำนวณหาตัวชี้วัดสมรรถนะ 3 ด้าน คือการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence To The Pareto-Optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread To The Pareto-Optimal Set) และอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution) เพื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น

1.5 ลักษณะและข้อกำหนดของปัญหา

งานวิจัยนี้มีลักษณะและข้อกำหนดของปัญหาดังนี้

1) มีข้อมูลเข้า (Input) ได้แก่ ขั้นการทำงาน (Work Element) รอบเวลาทำงาน (Cycle Time) ลำดับความสัมพันธ์ก่อน-หลังของงาน (Precedence Relationships) ของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาการทำงาน (Processing Time) และด้านของขั้นงานที่สามารถทำได้

2) พนักงานทุกคนมีความสามารถในการทำงานเท่ากัน

3) เวลาทำงานคงที่ ไม่ขึ้นกับลำดับการจัดงาน และไม่ขึ้นกับหนักงานนั้น ๆ

4) ข้อกำหนดที่ต้องพิจาณาในการแก้ปัญหา มีดังนี้

- การกำหนดงานให้กับพนักงานต้องไม่ขัดกับลำดับความสัมพันธ์ก่อน-หลังของงาน
- ขั้นงานแต่ละขั้นงานจะถูกจัดให้กับพนักงานได้เพียง 1 คนเท่านั้น
- ในแต่ละสถานีงาน จะมีคนทำงานเพียง 1 คน
- ในแต่ละสถานีทำงานสามารถทำงานได้หลายงาน แต่เวลารวมของการทำงานในสถานีการทำงานนั้นๆต้องไม่เกินรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)
- ระยะเวลาในการข้ามไปทำงานในงานถัดไปกำหนดให้มีช่วงเวลาในการเดินทางเท่ากับ 0 วินาที
- คิดเวลาการเดินของพนักงานในการเดินทำงานถัดไปในสถานีเดียวกัน
- ไม่มีการทำงานเพื่อส่งไปยังคงคลัง
- ไม่ยอมให้มีการแทรกงานเกิดขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้มีดังนี้

1) ลดความยุ่งยากและระยะเวลาในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

2) เป็นแนวทางในการตัดสินใจในการจัดสถานีงานลงในระบบสายการประกอบแบบตัวยูให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

3) สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมอื่น ๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4) สามารถนำผลที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องได้ในอนาคต

1.7 สรุปเนื้อหางานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทฤษฎีการจัดสมดุลของสายการประกอบ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมต่างๆในการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม และผลสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 2 เสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบ

บทที่ 3 อธิบายหลักการ แนวคิด ขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา COMSOAL มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 4 อธิบายหลักการ แนวคิด ขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา เจนเนติกอัลกอริทึม (GA) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 5 อธิบายหลักการ แนวคิด ขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา อัลกอริทึมการบรรจวบมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 6 อธิบายหลักการ แนวคิด ขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 7 นำเสนอหลักการและแนวทางในการแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึมใหม่ ที่เรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : PSONK)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8 อธิบายหลักการ แนวคิด ขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา เมมเมติกอัลกอริทึม มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์โดยจะนำเอา เมมเมติกอัลกอริทึมเข้ามาใช้ร่วมกับ NSGA-II และ PSONK

บทที่ 9 นำผลที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมมาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะ เพื่อทำการหาอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์

บทที่ 10 กล่าวถึงงานวิจัยโดยสรุปและข้อเสนอแนะ

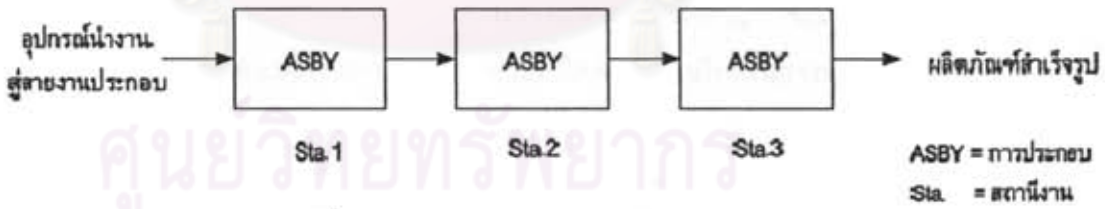
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับสายการประกอบทั้งแบบเส้นตรงและแบบรูปตัวยู ประเภทของการจัดสมดุลสายการประกอบ วิธีการหาค่าเหมาะสมในกรณีที่มีหลายวัตถุประสงค์ การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบ รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะของสายการประกอบทั่วไป

สายงานประกอบ (Assembly Line) เป็นการจัดรูปแบบของผังการประกอบซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยการผลิตต่าง ๆ ที่เรียกว่า สถานีงาน (Work Station) ในระบบสายงานการประกอบแบบต่อเนื่อง ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่จะทำการประกอบจะเคลื่อนย้ายมาตามสถานีงานต่าง ๆ เมื่อชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ดังกล่าวแต่ละหน่วยเข้ามาสู่สถานีงานใด ๆ แล้ว จะเกิดขั้นงานการประกอบ (Assembly Operation) ขึ้นในสถานีนั้นตามลำดับ เมื่อหมดขั้นตอนการประกอบในสถานีนั้นแล้ว ชิ้นส่วนนั้นก็จะเคลื่อนไปยังสถานีงานต่อไป ในขณะเดียวกันที่สถานีเดิมก็จะมีชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์หน่วยถัดไปเข้าแทน (Yogathasan, 1996) ดังรูป

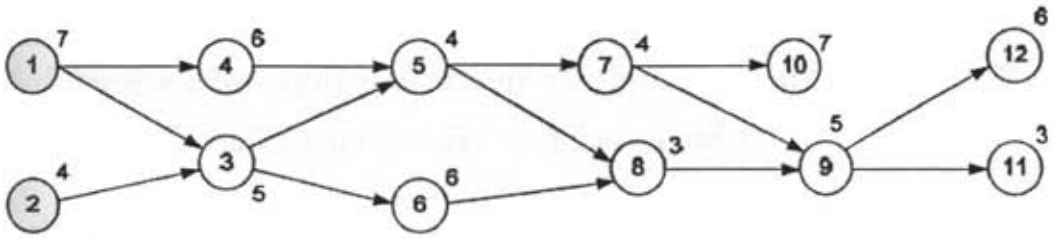


รูปที่ 2.1 ลักษณะของสายงานประกอบ

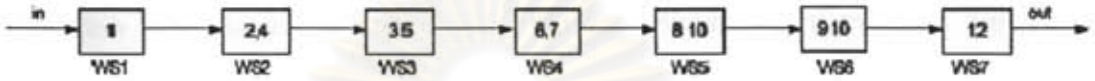
2.2 ลักษณะของสายการประกอบแบบเส้นตรง

สายการประกอบที่มีลักษณะเส้นตรง (Straight Line) คือ สายงานการประกอบที่มีทิศทางการไหลของงานเข้าและออกไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะไม่มีการย้อนกลับมาทำงานก่อนหน้า ในแต่ละสถานีงานจะมีการดำเนินการภายในสถานีงานดังรูป (Olanviwatchai, 2008)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



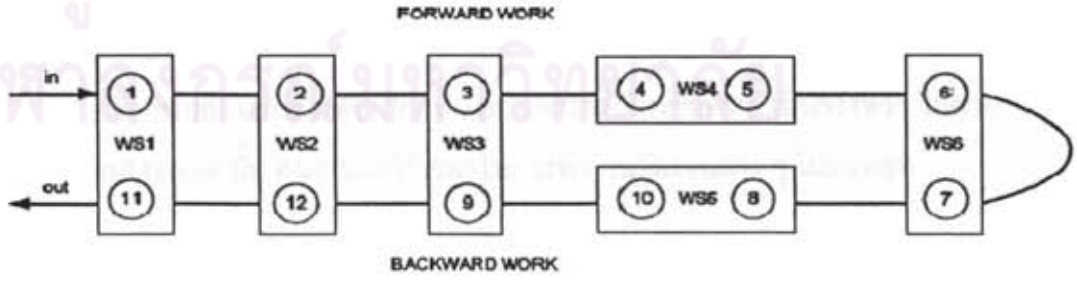
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของภาระงาน



รูปที่ 2.3 การไหลของงานในสายงานประกอบแบบเส้นตรง

2.3 ลักษณะของสายการประกอบแบบตัวยู

สายการประกอบที่มีลักษณะตัวยู (U-shaped หรือ U-line) คือสายการประกอบที่มีทิศทางการไหลของงานในลักษณะเป็นตัวยู การทำงานในแต่ละสถานีงานจะมีการทำงานในทิศทางข้างหน้างาน (Forward Work) และข้ามมาทำงานข้างหลัง (Backward Work) ทำให้จำนวนของสถานีงานในสายการประกอบนี้มีค่าน้อยกว่าเท่ากับสถานีงานของสายการประกอบแบบเส้นตรง ในกรณีนี้ทำให้สายการประกอบลักษณะตัวยูทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า การจัดเตรียมของเครื่องจักรในสายการประกอบแบบตัวยูจะวางอยู่บริเวณรอบ ๆ ของสายการผลิต โดยพนักงานหรือผู้ปฏิบัติงานจะอยู่ภายในสายตัวยู (U-line) ซึ่งพื้นที่ตรงกลางของตัวยู จะเป็นพื้นที่ ที่คอยติดต่อสื่อสารและช่วยเหลือของแต่ละสถานีงาน ทำให้เกิดความสามัคคีในการทำงาน เกิดการเรียนรู้ทักษะในการทำงานมากขึ้น (Olanviwatchai,2008)



รูปที่ 2.4 การไหลของงานในสายงานประกอบแบบตัวยู

ลักษณะการทำงานของสายการประกอบแบบตัวยูคือจะเริ่มต้นการทำงานข้างหน้างาน (Forward Work) และข้ามมาทำงานข้างหลัง (Backward Work) ผู้ปฏิบัติงานในสถานีงานที่ 1 ซึ่ง

จะทำงานที่ 1 ให้เสร็จก่อน พอดีกลับงานที่ 11 เข้ามาในสถานีงานในตำแหน่งข้างหลังทำให้เกิดการเดินข้ามมาทำงานทิศทางข้างหลัง เมื่อทำงานที่ 11 เสร็จผลิตภัณฑ์ก็จะถูกส่งออก ผู้ปฏิบัติงานก็จะเดินข้ามกับมาทำงานที่ 1 ใหม่พอดีกับมีชิ้นงานเข้าสู่สถานีงานที่ 1

2.4 ประเภทของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ

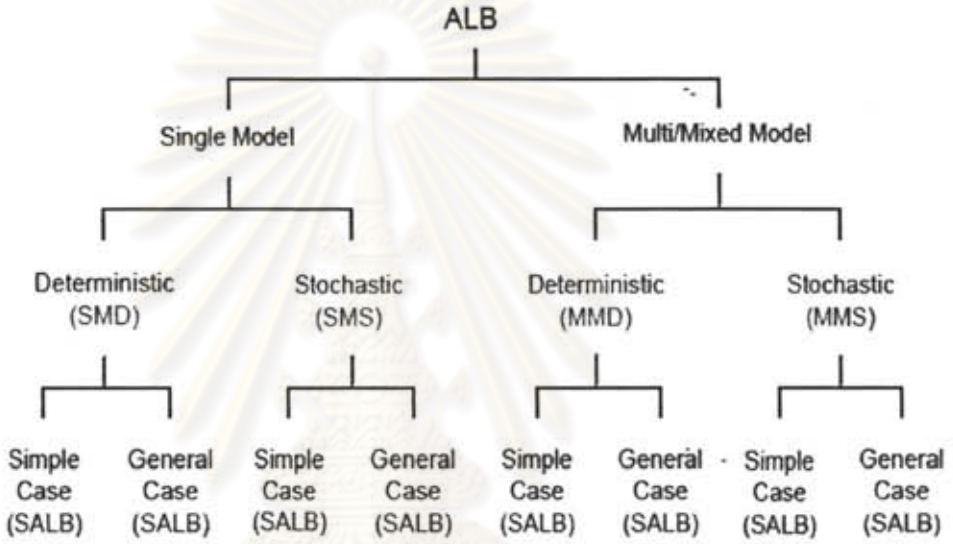
การจัดสมดุลของสายงานประกอบ หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การจัดสมดุลสายการผลิต (Production Line Balancing) หมายถึง การพยายามที่จะจัดให้สถานีงานต่างๆ มีอัตราการทำงานหรือเวลาทำงานหรือเวลาที่ใช้สำหรับแต่ละชิ้นเท่า ๆ กัน ถ้าหากว่าอัตราการทำงานไม่เท่ากันแล้ว อัตราการผลิตสินค้าของสายการผลิตนั้น จะถูกกำหนดโดยอัตราการทำงานของสถานีงานที่ช้าที่สุดเนื่องจากในระบบสายงานการประกอบหนึ่ง ๆ จะประกอบไปด้วยขั้นงานต่าง ๆ มากมาย จึงต้องมีการแบ่งงานให้กับสถานีทำงานต่างๆเป็นกลุ่ม ๆ ไป การจัดงานต่าง ๆ นี้สามารถจัดได้มากมายหลายวิธี แต่อย่างไรก็ดี ถ้าสามารถจัดให้แต่ละสถานีมีความสมดุลกัน เวลาว่างเปล่าในแต่ละสถานีก็จะมีน้อย ส่งผลให้สายงานการประกอบนั้นมีประสิทธิภาพสูง จึงทำให้เกิดปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบขึ้น ปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบสามารถจำแนกออกได้ 4 ประเภท (Ghosh and Gagnon,1989) คือ

1) Single Model Deterministic (SMD) เป็นปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นปัญหาแบบที่ง่ายที่สุด และมีผู้สนใจศึกษาวิจัยมากที่สุด ลักษณะเด่นของปัญหาแบบนี้ คือ เป็นการจัดสมดุลของสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว และเวลาการทำงานของขั้นงานแต่ละขั้นถูกกำหนดไว้อย่างแน่นอน

2) Single Model Stochastic (SMS) เป็นปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียวเช่นเดียวกับ SMD แต่ต่างกันที่เวลาการทำงานของขั้นงานในแบบ SMS นั้นจะไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งปัญหาแบบนี้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่ว่า ในสายงานการประกอบแบบManual นั้น คนงานมักใช้เวลาในการทำงานขั้นงานต่าง ๆ ไม่แน่นอน

3) Multi/Mixed Model Deterministic (MMD) เป็นปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์มากกว่า 1อย่างขึ้นไป โดยที่มีการกำหนดเวลาทำงานของขั้นงานแต่ละขั้นเป็นค่าที่แน่นอนโดยทั่วไปแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตในสายงานการประกอบแบบผสมมักจะมีขั้นงานและ Precedence Diagram ที่คล้ายกัน ดังนั้นเราจึงมักออกแบบสายการประกอบเพียงแบบเดียวเพื่อรองรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

4) Multi/Mixed Model Stochastic (MMS) เป็นปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์มากกว่า 1อย่างขึ้นไป โดยที่มีการกำหนดเวลาทำงานของขั้นงานแต่ละขั้นไม่แน่นอน ปัญหาแบบนี้เป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากที่สุด เพราะต้องคำนึกถึงองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เช่นLearning Effect ระดับทักษะความชำนาญของคนงาน การออกแบบงาน และสายงานการประกอบแบบนี้ต้องจัดสมดุลใหม่บ่อย ๆ เนื่องจากมีการเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์บ่อยแสดงได้ดังรูป (Ghosh and Gagnon,1989)

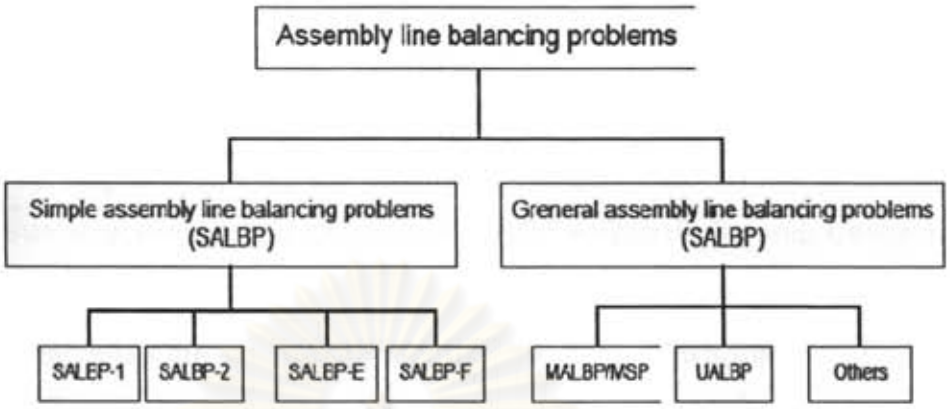


รูปที่ 2.5 ประเภทของปัญหาในการจัดสมดุลสายการประกอบ

2.5 ประเภทของปัญหาที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

ได้มีการแยกลักษณะในการพิจารณาในด้านข้อจำกัดเฉพาะและความแตกต่างในวัตถุประสงค์ในปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบ (Scholl and Becker, 2006) ได้ดังรูป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ประเภทของปัญหาและวัตถุประสงค์ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

2.5.1 ปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบอย่างง่าย (Simple Assembly Line Balancing Problem: SALB)

เป็นปัญหาที่มีสายการประกอบชนิดเส้นตรงที่มีผลิตผลิตภัณฑ์แบบเดี่ยว ซึ่งจะมีการพิจารณาข้อจำกัดในด้านความสัมพันธ์ของแต่ละภาระงานเท่านั้น แบ่ง 4 ลักษณะ

1. Type 1 (SALB-1) เป็นปัญหาที่ทำงานจัดสรรงานในแต่ละสถานีงานให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด โดยมีการกำหนดรอบเวลาการทำงานมา (Cycle Time)

2. Type 2 (SALB-2) เป็นปัญหาที่หารอบการทำงานที่น้อยที่สุด โดยกำหนดสถานีงาน

3. Type E (SALB-E) เป็นปัญหาทั่วไปที่มีความสำคัญ มีวัตถุประสงค์หาประสิทธิภาพของสายการประกอบ ซึ่งการพิจารณาความสัมพันธ์รวมระหว่าง Type 1 และ Type 2 รวมกัน

4. Type F (SALB-F) เป็นปัญหาที่มีความเป็นไปได้ที่มีการตั้งขึ้นหรือการหาทางออกของปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ โดยมีการกำหนดค่าสถานีงานและรอบการทำงานมาให้

2.5.2 ปัญหาการจัดสมดุลของสายงานการประกอบโดยทั่วไป (General Assembly Line)

แตกต่างกับ SALB ตรงที่ ในปัญหาแบบ GALB จะมีข้อจำกัด (Restriction) หรือปัจจัย (Factor) อื่น ๆ เพิ่มเติมเข้ามา เช่น มีสถานีทำงานแบบขนาน (Parallel Station) มีการพิจารณาขนาดของวัสดุคงคลังในแต่ละสถานี (Buffer Size) และมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการรวมชั้นงาน (Zoning Restriction)

2.6 วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบ

การจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม เป็นการจัดสมดุลของสายงานการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 อย่างขึ้นไป โดยที่มีการกำหนดเวลาทำงานของข้นงานแต่ละข้นเป็นค่าเวลามาตรฐานของงาน โดยทั่วไปแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตในสายงานการประกอบแบบผสมมักจะมีข้นงานและPrecedence Diagram ที่คล้ายกัน ดังนั้นเราจึงมักออกแบบสายงานการประกอบเพียงแบบเดียวเพื่อรองรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ในการจัดสมดุลของสายงานการประกอบเช่นนี้ ต้องการผลการจัดที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดโดยรวม (Overall Optimum Solution)

วิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมมี 2 วิธี คือ วิธีการทาง Mathematical และ วิธีทาง Heuristic ซึ่งวิธีการทางด้าน Mathematical Programming ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในทางปฏิบัติ เพราะมีความยุ่งยากซับซ้อน ประกอบกับวิธีการทางด้าน Mathematical ไม่สามารถนำไปสร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับแก้ปัญหาทั่วไปได้ จึงมีผู้คิดค้นวิธีการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้มากกว่า คือ วิธีการของ Thomopoulos(1967) โดยนำวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์เดียวมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม โดยให้พิจารณาถึงแผนการผลิตทั้งหมดในแต่ละวัน (DailyBasis) หรือในช่วงเวลากะ (Shiftly Basis) แทนที่จะพิจารณาถึงรอบเวลาการผลิต (Cycle Time Basis)

2.7 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบเป็นปัญหาที่เป็นการจัดสรรข้นงานที่มีลักษณะที่แตกต่างลงสถานีงาน การจัดสมดุลสายการประกอบที่เหมาะสมโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หนึ่งวัตถุประสงค์หรือหลายวัตถุประสงค์ จะเป็นการยากที่จะจัดสรรงานลงสถานีงานให้เกิดความสมดุลอันเนื่องมาสภาพความเป็นจริง จึงทำให้การจัดสมดุลสายการประกอบของส่วนมากจะใช้วิธีสามัญสำนึกแทน ผลที่ได้มาคือสายการประกอบไม่มีประสิทธิภาพและขาดสมดุลในการทำงาน

ในสถานีงาน วัตถุประสงค์ที่ใช้ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบมีหลายวัตถุประสงค์ให้เลือกพิจารณา ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของเป้าหมายในการจัดสมดุล ซึ่งบางครั้งวัตถุประสงค์มีความขัดแย้งกันหรือทิศทางเดียวกัน ทำให้ต้องมีการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ก่อนที่จะทำการจัดสมดุลของสายการประกอบ ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ เป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการจัดข้นงานลงในสถานีงานให้สายการประกอบให้เกิดความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์

ที่เราต้องการ ซึ่งสามารถจำแนกกลุ่มวัตถุประสงค์ในปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบได้ทั้งหมด 2 กลุ่มได้แก่

2.7.1 ด้านประสิทธิภาพของสายการประกอบ (Efficiency Line)

- สถานีงานที่น้อยที่สุด (Minimum Workstation)
- รอบเวลาการทำงานน้อยที่สุด (Minimum Cycle Time)
- ประสิทธิภาพของสายการประกอบสูงที่สุด (Maximum Line Efficiency)
- เวลาสูญเปล่ารวมน้อยที่สุด (Minimum Total Idle Time)
- ผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานน้อยที่สุด (Minimum Relatedness)
- มีเวลาการเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimum walk time)

2.7.2 ด้านสมดุลของภาระงาน (Workload Smoothing)

- มีความแปรผันของปริมาณงานน้อยที่สุด (Minimum Workload Variation)
- มีความแปรผันของงานที่ทำให้แต่ละรอบต่ำที่สุด (Minimum routine time deviation)

2.8 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.8.1 รูปแบบการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ เป็นการค้นหาเซตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อม ๆ กันโดยทั่วไปแล้ว รูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ มี 3 รูปแบบที่เป็นไปได้คือ

- ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่าน้อยที่สุด
- ทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่ามากที่สุด
- บางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่าน้อยที่สุด บางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการหาค่ามากที่สุด

ซึ่งในงานวิจัยนี้ลักษณะของฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์จะเป็นตามข้อที่ 1 นั้นคือ ทุกฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ ซึ่งได้แต่ จำนวนสถานีงาน, ค่าความแปรผันของเวลาทำงานของคนงานแต่ละคน และค่าเวลาเดินของคนงาน จะมีค่าน้อยที่สุดโดยทั่วไปแล้ว ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Multiobjective Optimization: MOP) จะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k วัตถุประสงค์ และตัวแปรตัดสินใจ n ตัว เขียนได้ดังสมการ

$$Minimize \ \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}),..., f_k(\bar{x})\} \quad (2.1)$$

โดยที่ $\bar{x}$ คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ

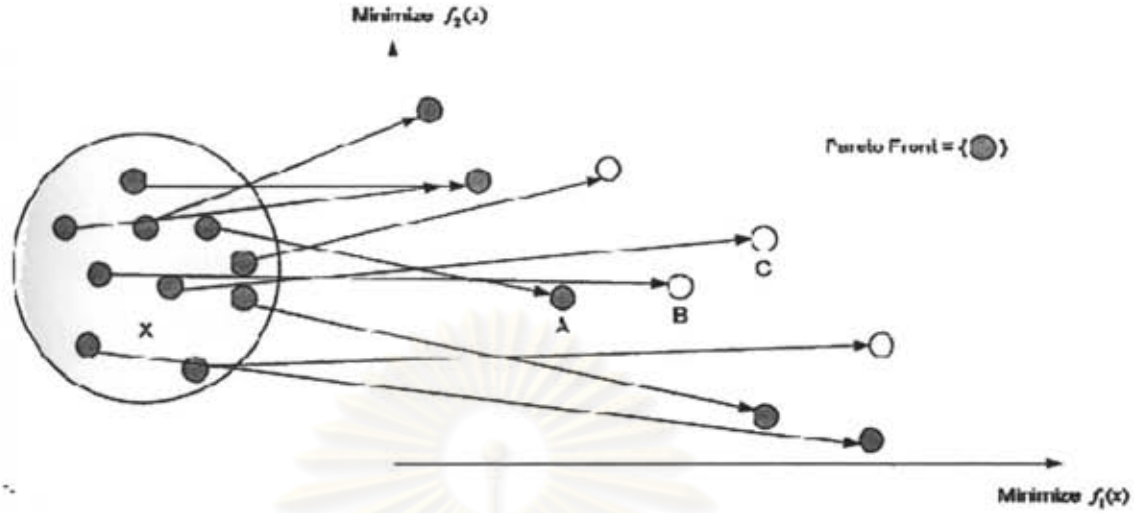
$f_i(\bar{x})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i

ถ้าเวกเตอร์ตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าหรือครอบงำ (Dominated) เวกเตอร์ตัดสินใจ y แล้ว

$f_i(x) \le f_i(y)$ สำหรับทุกค่า $i \in \{1,2,...,k\}$ และ (2.2)

$f_i(x) < f_i(y)$ มีอย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1,2,...,k\}$ (2.3)

นั้นคือ ถ้าคำตอบที่ได้ในพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ เป็นคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดดีกว่าหรือไม่มีคำตอบใดที่สามารถครอบงำชุดคำตอบนี้ได้ จะเรียกคำตอบนี้ว่าเป็น กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกสมาชิกคำตอบทุกคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ว่าเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) หรือเซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ (Nondominated Set) หรือเซตคำตอบที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Set) ซึ่งเซตคำตอบนี้จะใช้ในการกำหนดพื้นที่ขอบเขตของคำตอบ และเรียกว่า ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) หรือขอบเขตของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ (Non-dominated Frontier) หรือขอบเขตของคำตอบที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Frontier)



รูปที่ 2.7 พื้นที่คำตอบในการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

จากรูปจะแสดงตัวอย่างรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ที่มีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมกัน โดยกำหนดให้ X เป็นพื้นที่คำตอบ และ z เป็นเวกเตอร์ฟังก์ชันความแข็งแรง (Vector Fitness Function) ซึ่งจะทำการค้นหาในพื้นที่คำตอบ X ไปสู่คำตอบที่ได้มาจากเวกเตอร์วัตถุประสงค์ $f_1(x)$และ $f_2(x)$ ให้มีค่าน้อยที่สุด โดยที่เวกเตอร์วัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (จุดทึบ) คือเวกเตอร์วัตถุประสงค์ที่ไม่มีค่าใดดีกว่า เรียกว่า เซตคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบ และสมาชิกคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากทุกคำตอบนี้ จะประกอบขึ้นเป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด จะเห็นได้ว่าคำตอบที่ตรงกันกับจุดทึบ ก็คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด(Non-dominated Optimal) ซึ่งจาก 3 เวกเตอร์คำตอบข้างต้นจะเห็นได้ว่า เซตคำตอบของเวกเตอร์ A จะ dominate เซต B และเซต B จะ dominate เซต C

สำหรับเป้าหมายของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือการระบุเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งการระบุถึงเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True ParetoOptimal หรือ Reference Pareto Optimal) นั้น เป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากปัญหาที่มีความเฉพาะเจาะจง อย่างเช่นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในเชิงการจัด(Combinatorial Optimization Problem) ขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้คำตอบที่เป็นไปได้มีจำนวนมากขึ้นในลักษณะเอ็กโปเนนเชียล และเป็นปัญหา NP-hard ดังนั้นการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดจึงเป็นเพียงสิ่งที่เป็นไปได้ยาก นอกจากนี้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาที่มีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกัน ยังก่อให้เกิดความสับสน ดังนั้นในทางปฏิบัติวิธีการที่ใช้ปัญหาในการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ จะเป็นการสืบค้นถึงเซตกลุ่มคำตอบที่สามารถใช้แทนเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงได้ โดยสิ่งที่ทำให้การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดบรรลุเป้าหมายมีดังนี้

- ขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ควรจะใกล้เคียงกับขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดแท้จริง และควรเป็นเซตย่อย (Sub Set) ของขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง
- เซตของกลุ่มคำตอบที่อยู่บนขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดนี้ควรมีลักษณะการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) หรือมีคำตอบอยู่บนขอบเขตกลุ่มคำตอบอย่างทั่วไปถึง ไม่เกาะอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่งนั้นคือคำตอบนี้มีความสามารถครอบคลุมขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด
- ขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ควรจับสเปกตรัมของขอบเขตกลุ่มคำตอบได้ทั้งหมด หมายถึงมีความสามารถในการสืบค้นถึงคำตอบที่อยู่ปลายสุดของคำตอบในพื้นที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

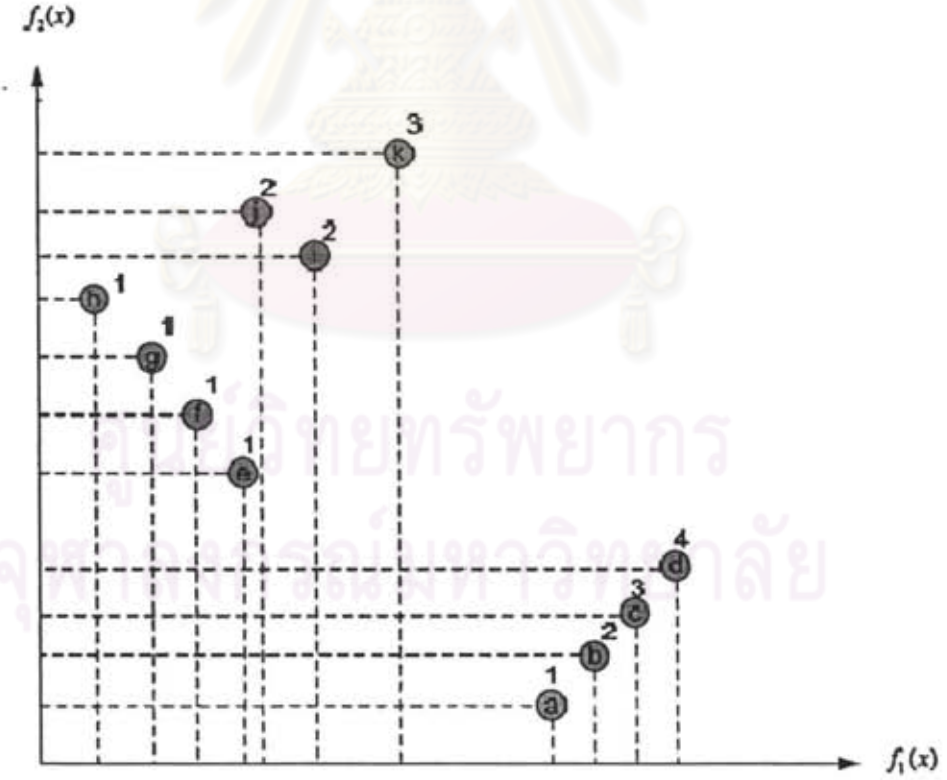
2.8.2 การกำหนดค่าความแข็งแรง

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์จะมีความแตกต่างกับการหาค่าเหมาะสมที่มีวัตถุประสงค์เดียว โดยที่สิ่งที่สำคัญสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกของกลุ่มประชากรแต่ละตัวได้อย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach)

วิธีการนี้จะใช้การจัดอันดับที่แบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรง (Fitness Value) สำหรับวิธีการนี้จะมีคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหามากกว่าหนึ่งคำตอบ และอยู่ในรูปแบบที่เป็นเซตหรือกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front) ในกรณีของการจัดอันดับที่แบบพาเรโต เป้าหมายของการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือการหาเซตคำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมแบบพาเรโต (Pareto Optimal) ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดแบบพาเรโตคือ คำตอบที่ไม่มีคำตอบตัวใดที่ดีกว่าคำตอบนี้ หรือคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Solution) จากคำตอบอื่นเลย และวิธีการหาคำตอบที่ใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ได้แก่ วิธีการจัดการแบบพาเรโต (Pareto-based Assignment) โดย Goldberg เจนเนติกอัลกอริทึมหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm: MOGA) โดย Fonseca และ Fleming เจนเนติกอัลกอริทึมแบบเรียงอันดับคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Ranking Genetic Algorithm) โดย Srinivas และ Deb เจนเนติกอัลกอริทึมแบบพาเรโตที่อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม (Niche Pareto

Genetic Algorithm: NPGA) โดย Horn และ Nafpliotis เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้การจัดอันดับแบบ Goldberg

การกำหนดค่าความแข็งแรงของคำตอบ ด้วยการจัดอันดับที่แบบพาเรโต ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกด้วย Goldberg (1989) และเรียกวิธีนี้ว่าวิธีการจัดลำดับของ Goldberg(Goldberg's Ranking) หรือ Non-dominated Sorting และเป็นเทคนิคหนึ่งในการบรรลุเป้าหมายแรกในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ คือการได้มาของขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Frontier) แนวคิดพื้นฐานของเทคนิคนี้ คือการจัดลำดับเซตของสตริงคำตอบในประชากรคำตอบทั้งหมด โดยจะพิจารณาคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดดีกว่าเซตคำตอบนี้เป็นอันดับแรก และจัดอันดับ (Rank) เป็นอันดับที่หนึ่ง จากนั้นจะถูกตัดออกจากการพิจารณาของประชากรคำตอบทั้งหมด เซตของสตริงคำตอบที่เหลือจะถูกจัดให้เป็นอันดับต่อมา โดยที่กระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุดของเทคนิคนี้จะค้นหาคำตอบจนกระทั่งคำตอบในประชากรคำตอบทั้งหมดถูกจัดอันดับ



รูปที่ 2.8 การกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ Goldberg

จากรูปที่ จะเห็นได้ว่าสมาชิกประชากรคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบอื่น จะถูกจัดให้มีอันดับที่หนึ่ง จากนั้นจะไม่พิจารณาสมาชิกดังกล่าวชั่วคราว เพื่อกำหนดอันดับที่ ให้กับสมาชิก

ประชากรคำตอบที่เหลืออยู่ โดยถ้าสมาชิกประชากรคำตอบนั้นไม่ถูกครอบงำจากคำตอบอื่น จะถูกจัดอันดับที่ให้เป็นอันดับต่อมา และพิจารณาไปเรื่อย ๆ จนครบสมาชิกคำตอบทุกคำตอบ โดยเริ่มต้นจากสมาชิกตัวที่แข็งแรงที่สุด จนถึงสมาชิกตัวที่มีความอ่อนแอที่สุด

2.9 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

คำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้จะได้ออกมาในรูปของกลุ่มคำตอบดังนั้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ได้นั้นจะยอมรับได้ว่าเป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีก็ต่อเมื่อสามารถวัดสมรรถนะของของคำตอบว่าใกล้เคียงกับขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือ (Reference Pareto Optimal)ขอบเขตกลุ่มคำตอบอ้างอิง ดังนั้นการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด(Performance Measure) เป็นการวัดคุณภาพของคำตอบที่หาได้จากอัลกอริทึมในอัลกอริทึมหนึ่งและสามารถเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบที่หาได้จากหลายอัลกอริทึมด้วยตัววัดสมรรถนะในด้านต่าง ๆ เช่น การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง(Spread to the Pareto-optimalSet) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) เป็นต้น (Ishibuchi, oshida and Murata, 2003)

ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดบนพื้นฐานการเปรียบเทียบระยะทางจากสมาชิกกลุ่มคำตอบที่แท้จริงกับกลุ่มคำตอบทุกคำตอบที่หาได้ (Obtained Pareto Optimal) โดยในที่นี้ได้ทำการประมาณขอบเขตกลุ่มคำตอบที่แท้จริงจากการใช้กลุ่มคำตอบที่ดีสุดได้จากทุกอัลกอริทึมที่ใช้ทดลองในงานวิจัยมารวมกันและใช้หลักการ Pareto Dominance ในการสร้างกลุ่มคำตอบที่แท้จริงซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ตัววัดสมรรถนะของอัลกอริทึม 3 ตัวดังนี้

2.9.1 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

ตัววัดตัวนี้จะเป็นตัวที่แสดงว่าคำตอบที่หาได้มานั้นมีความแตกต่างกับเซตของคำตอบที่ดีที่สุดแท้จริง(True Pareto Optimal) มากน้อยเพียงใดโดยค่าที่ได้นี้ถ้ามีค่าน้อยจะแสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพดีถ้าค่านี้เป็น 0 จะแสดงได้ว่ากลุ่มของคำตอบที่ได้อยู่ใน True Pareto Optimal ทั้งหมด ซึ่งเราสามารถหา Convergence ได้จาก

$$Convergence = \frac{1}{|S^*|}\sum_{y \in S^*} \min\left\{d_{xy} \mid x \in S_j\right\} \qquad (2.4)$$

เมื่อ $$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}\right)^2} \quad (2.5)$$

โดยที่ S_j คือ เซตคำตอบที่เปรียบเทียบ

S^* คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$|S^*|$ คือ จำนวนคำตอบที่แท้จริง

d_{xy} คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y

$f_i^{\max}$ และ $f_i^{\min}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด

$f_i(x)$ เป็นค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่หาได้

$f_i(y)$ เป็นค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

2.9.2 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

ค่านี้จะเป็นค่าที่แสดงถึงการกระจายของคำตอบถ้าตัววัดสมรรถนะนี้มีค่าน้อย แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้มีการกระจายในลักษณะสม่ำเสมอ นั่นคือมีคำตอบกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดและจัดได้ว่ามีลักษณะการกระจายที่ดีซึ่งจะหาได้จาก

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1}\left|d_i - \bar{d}\right|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (2.6)$$

โดยที่ d_f และ d_l คือ ระยะห่างของคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน (Extreme solution) ของเส้นของเขตของกลุ่มคำตอบที่หาได้

$\bar{d}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i คือ ระยะห่างของคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันในเซตคำตอบที่ดีที่สุด

เมื่อ $i = 1,2,..., N-1$

N คือ จำนวนคำตอบที่หาได้

2.9.3 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง

ค่านี้จะแสดงอัตราส่วนระหว่างจำนวนคำตอบที่หาได้โดยไม่ถูก dominate กับจำนวนคำตอบที่แท้จริงค่านี้ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 จะเป็นค่าที่แสดงถึงสมรรถภาพที่ดีของอัลกอริทึมซึ่งค่านี้หาได้จาก

$$Ratio = \frac{\left|S_j - \{x \in S_j \mid \exists_y S : y \prec x\}\right|}{\left|S_j\right|} \qquad (2.7)$$

โดยที่ S_j คือ เซตคำตอบที่ j เมื่อ $j = 1,2,...,J$

S คือ การร่วมกันของ j เซตคำตอบ ซึ่ง $S = S_1 \cup S_2 .. \cup S_J$

x คือ เซตคำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y \prec x$ คือ คำตอบ x ถูกข่มด้วยคำตอบ y

2.10 งานวิจัยที่เกียวข้อง

ผู้วิจัยได้สำรวจงานวิจัยที่เกียวข้องโดยได้แบ่งออกเป็น ส่วนๆดังนี้

2.10.1 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบแบบเส้นตรง

งานวิจัยที่ทำการศึกษาเกียวกับการแก้ปัญหาในสายการประกอบแบบเส้นตรงทั้งหมดได้แก่

- กรรณิกา ศิลานนท์ (2542) ได้ทำการวิจัยเกียวกับการนำเอาเจนเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithms: MOGAs) มาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งหมายถึงการหารูปแบบการจัดงานให้กับแต่ละสถานีงานเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ 3 ประการพร้อม ๆ กัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาและทดลองพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการหาคำตอบของเจนเนติกอัลกอริทึมจากงานวิจัยนี้จะได้ว่าเจนเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ที่มีประสิทธิภาพและสามารถให้คำตอบที่ดีภายในระยะเวลาที่กำหนดได้

- จงกล เอียมมิ (2543) ได้เสนอแนวทางการนำเจนเนติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด และเกิดเวลาว่างงานรวมน้อยที่สุด

ด้วยและผลการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากเจนเนติกอัลกอริทึมกับวิธีการ COMSOALพบว่าเจนเนติกอัลกอริทึมจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าและสามารถสรุปได้ว่าเจนเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีประสิทธิภาพ และสามารถให้คำตอบที่ดีภายในระยะเวลาที่กำหนดให้ได้

- ภาณุวัฒน์ โอฬารวิวัฒน์ชัย(2551) ได้เสนอแนวทางการทำอัลกอริทึมการบรรจวบร่วมกับเจนเนติกอัลกอริทึมและ เมมเมติกอัลกอริทึมมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีจำนวนสถานีงานน้อยที่สุด งานมีผลต่างความสัมพันธ์ในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุดและความผันแปรของเวลาในสถานีงานทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

- Scholl(1999) ได้ทำการอธิบายถึงลักษณะสายการประกอบที่ผลิตภัณฑ์แบบเดียว แบบหลายอย่าง และ แบบผสม ซึ่งผลิตภัณฑ์แบบเดียวนั้นจะมีการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวโดยเฉพาะ และเป็นรูปแบบเดียว ในส่วนสำหรับหลายผลิตภัณฑ์สายงานการประกอบจะมีการผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่2ชนิดขึ้นไป จะมีการผลิตเป็นแบบทำทีละชุด ในช่วงที่จะเปลี่ยนการประกอบชนิดของผลิตภัณฑ์ ต้องมีการปรับสายการประกอบใหม่(Set up) และสายงานประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมเป็นสายงานการประกอบที่ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ 2 ชนิดหรือมากกว่า แต่ต่างกันที่ผลิตภัณฑ์ต่างๆจะเข้าสู่สายงานการประกอบปนกัน และไม่มีการปรับสายการประกอบ และได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายการประกอบแบบเส้นตรงและแบบตัวยู พบว่าสายการประกอบแบบตัวยูจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเนื่องจากสถานีการทำงานน้อยกว่าแบบเส้นตรง รวมทั้งถ้าจำนวนรอบเวลาการทำงานมีค่าน้อยลงจะส่งผลให้มีเวลาที่สูญเปล่ามีค่าน้อยลง จึงช่วยให้มีประสิทธิภาพของสายการประกอบสูงขึ้น และได้อธิบายในการหา Lower Bound และ Upper Bound ในภายใต้วัตถุประสงค์ชนิดที่ 1 (การกำหนดรอบเวลาในการทำงานและหาจำนวนสถานีน้อยที่สุด) และชนิดที่ 2 (การกำหนดสถานีงานและหารอบเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด)

2.10.2 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยู

งานวิจัยที่ทำการศึกษาเกียวกับการแก้ปัญหาในสายการประกอบแบบตัวยู ทั้งหมดได้แก่

- Sparling and Miltenburg (1998) อธิบายว่าในอุตสาหกรรมส่วนมากจะมีการปรับเปลี่ยนจากสายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว (Single Product) เป็นแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Mutil Product) หรือผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model) เครื่องมือที่เข้ามาช่วยในการดำเนินการคือ ระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-in-time) สิ่งที่ช่วยให้การผลิตของให้ทันต่อความต้องการลูกค้า และมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ในเวลาที่มีจำกัดและเสียต้นทุนที่ไม่มาก คือ ปัญหาการจัดสมดุลของสายการประกอบแบบผสม ที่มีลักษณะสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งเป็นการจัดภาระงานตามความต้องการผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเพื่อให้จำนวนของสถานีงานบนสายการประกอบแบบตัวยูมีจำนวนน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการอธิบายขั้นตอนการจัดสมดุลของสายการประกอบแบบตัวยูไว้ 4 ขั้นตอนคือ 1.การคำนวณหาค่าเฉลี่ยน้ำหนักของเวลาในการทำงานและการเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์2. การวาดกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของภาระงานตามข้อจำกัดในรูปแบบผลิตภัณฑ์เดียว 3.หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละพารามิเตอร์เพื่อเป็นสายการประกอบสมดุลเริ่มต้น 4.ทำการปรับสมดุลให้มีค่าให้เท่าๆกันในแต่ละสถานีงานโดยจะพิจารณาจากตัววัดสภาพที่ไม่สมดุล (Imbalance Measure) ให้มีค่าน้อยที่สุด

- Cheng , Miltenburg and Motwani (2000) ได้นำเสนอเปรียบเทียบคุณภาพของสายการประกอบแบบเส้นตรงและแบบตัวยู ซึ่งได้อธิบายถึงข้อดีของสายการประกอบแบบตัวยู ดังนี้ ปริมาณและผู้ปฏิบัติการจะมีความยืดหยุ่นกว่าเนื่องจากการเดินทางของพนักงานมีระยะทางที่สั้นกว่าทำให้อัตราการผลิตมีอัตราที่สูงขึ้น จำนวนสถานีงานมีจำนวนน้อยกว่าเท่ากับสายการประกอบแบบเส้นตรง วัสดุเครื่องมือสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกรวดเร็ว ทำให้เกิดความสามัคคีอย่างชัดเจนในการทำงาน

- Martinez and Duff (2004) ได้นำเสนอวิธีการฮิวริสติกเพิ่มเติมปัญหาจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู โดยใช้วิธีการเจนเนติกอัลกอริทึมในการทดลอง ซึ่งการทดลองครั้งนี้ทดลองภายใต้ปัญหาชนิดที่ 1 (Type I Problem) งานวิจัยนี้ได้นำวิธีฮิวริสติก

ทั้งหมด 10 ฮิวริสติก และนำมาเป็นยีนส์ในวิธีการเจนเนติกอัลกอริ่มในการหาคำตอบ ผลลัพธ์ที่ได้มีฮิวริสติกบางตัวที่จะได้คำตอบที่ลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม

- Chiang and Urban (2005) เป็นอธิบายถึงการจัดงานในสถานีงานกรณีสายการประกอบแบบตัวยู (U-line) เนื่องจากสายการประกอบแบบตัวยู ในแต่ละสถานีงานมีการทำงานข้างหน้า (Front) และเดินข้างมาทำงานข้างหลัง(Back) ทำให้สถานีงานมีจำนวนน้อยกว่า สายการประกอบแบบเส้นตรง การพิจารณางานในแต่ละสถานีงานจึงต้องพิจารณาควบคู่ระหว่างงานที่ทำข้างหน้าและข้างหลังในแต่ละสถานีงาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการอธิบายโดยจะพิจารณาให้ความต้องการงานในการทำงานข้างหน้าอยู่ในเซต P(i) และ ความต้องการงานในการทำงานข้างหลังอยู่ในเซต S(i) จัดเซตของงานที่มีเซตเหมือนกันให้อยู่ในระดับเดียวกันทั้งเซต P(i) และ S(i) จากนั้นทำการจัดเซตของงานที่อยู่ในระดับเดียวกันนำมารวมกัน จะทำให้ได้สถานีงานที่มีการทำงานข้างหน้าและข้างหลังในสายการประกอบที่มีลักษณะตัวยู และไม่ผิดข้อจำกัดด้านความสัมพันธ์ของแต่ละงาน

- Baykasogiu (2006) ได้นำเสนอวัตถุประสงค์ใหม่ที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งใช้วิธีฮิวริสติกแบบซิมูเลท แอนนีลลิง (Simulated Annealing) ในการหาคำตอบการจัดสมดุลในสายการประกอบแบบเส้นตรงและแบบตัวยู มีทั้งหมด 2วัตถุประสงค์ คือ 1.ค่ามากที่สุดของค่าราบเรียบของงาน และ 2.ประสิทธิภาพสมรรถะของสายการประกอบสูงสุด (จำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด) ในการเลือกงานจะใช้กฎของการเลือกงานทั้งหมด 15 กฎ จะมีการสุ่มเลือกกฎทั้งหมดจากนั้นจะทำการเลือกงานขึ้นมาสองงานทำการสลับกฎที่ใช้(Swap) และมีการปรับเปลี่ยนกฎที่ใช้(Mutate) จากการทดลองทั้งหมด 57 ปัญหา ในสายการประกอบแบบตัวยูมีจำนวนสถานีงานเท่ากับสถานีงานที่เหมาะสมทั้งหมดแต่พบว่า 3 ปัญหาที่สายการประกอบแบบตัวยูที่ดีกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง และมี 54 ปัญหาที่มีจำนวนสถานีงานเท่ากัน ในส่วนการจัดสมดุลงานมี26 ปัญหาที่สายการประกอบแบบตัวยูมีค่าราบเรียบมากกว่าสายการประกอบแบบเส้นตรง มี 3 ปัญหาที่สายการประกอบแบบเส้นตรงดีกว่าสายการประกอบแบบตัวยู และใน 28 ปัญหาที่สายการประกอบเส้นตรงและตัวยูมีค่าเท่ากัน จากการวัดกฎในการหาค่าจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุดของสายการประกอบแบบตัวยู คือกฎการจัดงานแบบ Greatest Ranked Positional Weight ดีที่สุดรองลงมาคือกฎ Minimum Slack ซึ่งทั้งสองกฎนี้จะมีค่าเข้าใกล้หรือเท่ากับค่าที่เหมาะสม

- Hwang , Katayama and Gen (2007) ได้นำเสนอเจนเนติกอัลกอริทึมหลายวัตถุประสงค์ในการหาคำตอบจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู วัตถุประสงค์ที่ทดลองได้แก่ 1.จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด 2.เพื่อให้มีความแปรปรวนน้อยที่สุดผลลัพธ์จากการทดลองพบว่าทำให้มีประสิทธิภาพของสายการประกอบสูงและสามารถปรับปรุงความแปรปรวนของสายการประกอบได้พร้อมกัน

- Kara , Ozcan and Peker (2007a) ได้นำเสนอวิธีการในการจัดสมดุลและลำดับของผลิตภัณฑ์แบบผสม ด้วยระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ที่มีลักษณะสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ฮิวริสติกแบบซิมูเลทแอนนีลลิง (Simulated Annealing) ในการแก้ปัญหา 2 ปัญหาคือ 1.เพื่อทำให้จำนวนสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด 2.ทำให้เวลารวมของภาระงานในแต่ละสถานีงานมีค่าเท่าๆกัน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการพิจารณาทั้งการจัดสมดุลและจัดลำดับควบคู่กัน ทำให้ค้นพบการให้กำเนิดค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงในวิธีของซิมูเลท แอนนีลลิง (Simulated Annealing) และได้นำเสนอขั้นตอนการทดลองถึงพารามิเตอร์ของแต่ละปัญหา จากผลการทดลองพบว่าปัญหาที่ 1 ไม่สามารถคำนวณหาได้ในกรณีที่ทราบจำนวนภาระงานและรอบเวลาการทำงานที่(10,30) และ (10,45) และเมื่อทำการทดสอบค่าแตกต่างของกลุ่มจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดกับจำนวนภาระงานปัญหาที่มีจำนวนภาระงานและรอบเวลาการทำงานเท่ากับ (20,30) ในใช้ Tukey Test พบว่าที่จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่มีค่าเท่ากับ 3, 5, 7 มีความแตกต่างกัน ยังพบว่ายิ่งจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีค่ามากขึ้นจะทำให้จำนวนภาระงานและค่าความเอนเอียงของภาระงานเพิ่มมากขึ้นด้วย

- Kara , Ozcan and Peker (2007b) ได้นำเสนอวิธีการในการจัดสมดุลและลำดับของผลิตภัณฑ์แบบผสม ด้วยระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี ที่มีลักษณะสายการประกอบแบบตัวยู ในการหาคำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ ในงานวิจัยนี้กำหนดปัญหาทั้งหมด 3 ปัญหา คือ 1. อัตราการใช้ที่เหลือมีค่าเท่าๆกัน 2.ต้นทุนรวมของการปรับตั้งเครื่องที่น้อยที่สุด และ 3.ค่าความเอนเอียงของภาระงานในการข้ามไปทำงานในสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด การคำนวณปัญหาจะใช้การพิจารณาทั้งการจัดสมดุลและจัดลำดับควบคู่กันโดยใช้ฮิวริสติกแบบซิมูเลท แอนนีลลิง (Simulated Annealing) ในการแก้ปัญหา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำ การหาพารามิเตอร์ที่ระดับต่างที่มีประสิทธิภาพของ SA พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ SA คือ ที่ค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิ

(InitialTemperature:T) อัตราความเย็น (A Cooling Rate:R) และ ระดับของอุณหภูมิ (Level of Temperature:IT) มีค่าเท่ากับ 250 , 0.95 และ 20 ตามลำดับ

2.10.3 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธี COMSOAL

งานวิจัยที่ทำการศึกษาแก้ปัญหาโดยใช้วิธี COMSOAL ได้แก่

- Arcus, A.L. (1966) ได้ทำการศึกษาเกียวกับการจัดลำดับงานในสายการประกอบด้วยการใช้วิธี COMSOAL ซึงพบว่าสามารถใช้ในการหาคำตอบได้ผลค่อนข้างดี

2.10.4 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม

งานวิจัยที่ทำการศึกษาแก้ปัญหาโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ได้แก่

- Ajenblit and Wainwrigth (1998) อธิบายถึงประสิทธิภาพการจัดสายการประกอบแบบยูกับแบบเส้นตรง ซึงประสิทธิภาพในการจัดสายการประกอบแบบยู มีประสิทธิภาพทีดีกว่าหรือเท่ากับสายการประกอบเส้นตรง ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการฮิวริสติกแบบเจนเนติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลชนิดที่ 1 (การกำหนดค่ารอบเวลาการทำงานและหาค่าจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด) ของสายการประกอบแบบตัวยู วัตถุประสงค์ที่กำหนดในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์คือ 1. การทำให้เวลาสูญเปล่ารวมมีค่าน้อยที่สุด 2.จัดสมดุลของแต่ละสถานีงานให้มีภาระงานน้อยที่สุด และ 3.การพิจารณารวมกันทั้งข้อ 1 และ 2 จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นจากปัญหามาตราฐานทั้งหมด 61ปัญหา แสดงให้เห็นว่าวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเป็นเทคนิคที่ดีในการแก้ไขปัญหาโดยวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมได้ผลเหมือนกับงานวิจัยวิธี ไดนามิกโปรแกรม และวิธีฮิวริสติกอันอืน จำนวน 49 ปัญหา และได้ผลที่ดีกว่า 11 ปัญหา และมีแค่ 1ปัญหาที่ได้ผลแย่กว่า จึงสรุปได้ว่าวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู

- McMullen (2001a) ได้เปรียบเทียบฮิวริกติกในการค้นหาคำตอบ 3 วิธีคือ เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm: GA), ซิมูแลท แอนเนลลิง(SimulatedAnnealing:

SA) และทาบู เซิส (Tabu Search: TA) และนำเสนอเทคนิคที่เกียวข้องกับปัญหาการจัดตารางการผลิตในระบบทันเวลาพอดีที่พิจารณา 2วัตถุประสงค์ ในเวลาเดียวกัน เทคนิคนั้นก็คือ “Efficient Frontier” สำหรับการหาค่าที่ตำที่สุดในการปรับต้งเครื่องระหว่างผลิตผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน (และสามารถมองข้ามการปรับต้งเครื่องไปได้) และการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับลักษณะที่เปลียนแปลงได้ในตารางการผลิต เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของฮิวริสติกทั้งสามโดยใช้เปอร์เซ็นต์ไทล์ของสมรรถนะของฮิวริสติกแต่ละตัวผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าในปัญหาที่มีขนาดใหญ่ GA ไม่ได้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า SA และ TSโดยให้เหตุผลว่าการเลือกใช้ครอสโอเวอร์ที่ใช้ในเจนเนติกอัลกอริทึมที่ไม่เหมาะสม จะทำให้มีผลลัพธ์ในสมรรถนะของ Efficient Frontier ไม่ดี

- Mansouri (2005) ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยเจนเนติกอัลกอริทึม (MOGA) เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์แบบผสมในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยพยายามค้นหาPareto-Optimal Frontier หรือ Locally Non-dominated Frontier ซึงพิจารณาฟังก์ชันเป้าหมาย คือ การหาค่าที่ตำที่สุดในการปรับต้งเครื่องและการหาค่าความผันแปรในการผลิตที่ตำที่สุดไปพร้อม ๆ กัน สำหรับการพัฒนา MOGA ได้ใช้พื้นฐานของตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Operator) คือ ครอสโอเวอร์ (Crossover) อินเวอร์ชัน (Inversion) และมิวเทชัน (Mutation) ที่มีความสามารถในการได้มาซึงคุณภาพและความหลากหลายของคำตอบ

2.10.5 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเมมเมติกอัลกอริทึม

งานวิจัยที่ทำการศึกษาแก้ปัญหาโดยใช้วิธีเมมเมติกอัลกอริทึม ได้แก่

- Cheng and Gen (1997) ได้หาเหตุผลถึงการประยุกต์ใช้ Hybrid Genetic Algorithms หรือ Memetic Algorithms ในการแก้ปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรขนาน ซึงมีสองประเด็นที่สำคัญในการจัดการกับทุกรูปแบบของปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรขนาน คือการแบ่งสรรงานให้กับเครื่องจักร และการลำดับงานภายในเครื่องจักรแต่ละเครื่อง โดยพื้นฐานแนวคิดของการนำเสนอวิธีการในการแก้ปัญหาคือ การใช้เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms) ในการแบ่งสรรงาน หลังจากนั้นจะประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการเฉพาะที (Local Optimizer) เพื่อปรับให้การเปลียนแปลงตำแหน่งของงานมีความเหมาะสม สำหรับวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

คือ ผลรวมที่น้อยที่สุดของผลคูณระหว่างตัวถ่วงน้ำหนักกับค่าสัมบูรณ์ของความผันแปรระหว่างเวลาเสร็จงานและเวลาส่งมอบ ผลลัพธ์ของการทดลองแสดงให้เห็นว่า MA ให้ค่าที่ต่ำกว่า GA

- Franca, Mendes and Moscato (2001) ได้เสนอเมมเมติกอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางเครื่องจักรเดียวที่ใช้ตัววัดสมรรถนะเป็นเวลาล่าช้าทั้งหมด (Total Tardiness)

- Moghaddam, Saremi and Ziaee (2006) ได้เสนอเมมเมติกอัลกอริทึม(Memetic Algorithm: MA) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาเส้นทางการเดินทางของยานพาหนะที่ขนส่งสินค้ากลับในเส้นทางเดิม(Vehicle Routing Problem withBackhauls: VRPB) ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้ฮิวริสติกแบบวิธีการละโมบ(Greedy Heuristic) ในการเจนเนอเรทคำตอบเบื้องต้น ซึ่งการค้นหาค่าใกล้เคียงที่สุด (Nearest Neighbor Algorithm) นี้ถือว่าเป็นการเริ่มต้นในการสร้างคำตอบที่ดี เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของคำตอบให้มีคุณภาพและมีความรวดเร็วในการคำนวณ การเสนอ MA ของคณะผู้วิจัยนี้ ถือว่าเป็นรูปแบบที่แตกต่างไปจากตัวดำเนินการทางวิวัฒนาการ (Evolutionary Operator) เช่น Partial-MappedCrossover (PMX) Order Crossover (OX), Position Based Crossover(PBX), Order-Based Crossover (OBX) และการมิวเทชั้น (Mutation) โดยที่สามารถแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของ MA ในการทดลอง 2 ทดลองดังนี้ ทดลองที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบ MA กับโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (MathematicalProgramming) คือ Lingo Software ไม่สามารถคำนวณค่าได้ ส่วนการทดลองที่2 เป็นการตรวจสอบผลกระทบของการใช้การค้นหาค่าใกล้เคียงที่สุดในการเริ่มต้นหาคำตอบของ MA ผลการทดลองพบว่า MA มีสมรรถนะที่ดีในด้านคุณภาพของคำตอบและเวลาในการคำนวณ

- Tseng, Wang and Shih (2006) ได้เสนอเมมเมติกอัลกอริทึม(MemeticAlgorithms: MAs) กับการใช้การค้นหาเฉพาะที่แบบแนะนำ (Guided LocalSearch) ในการแก้ปัญหาการวางแผนลำดับการการประกอบผลิตภัณฑ์ โดยเป้าหมายของการวางแผนการประกอบ คือการสร้างลำดับการผลิตที่เป็นไปได้เพื่อประกอบเป็นผลิตภัณฑ์และสามารถเลือกลำดับการประกอบอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้ปัจจัยที่มีข้อจำกัด เช่น เวลาในการประกอบ เครื่องมือ และเครื่องจักร เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดลำดับ

การประกอบ ที่ใช้สามัญสำนึกส่วนบุคคล รวมทั้งประสบการณ์ของนักวางแผน ดังนั้น การวางแผนอาจจะเป็นการประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms) เพื่อจัดลำดับการประกอบให้มีความยืดหยุ่น ซึ่งการพิจารณาปัญหาการประกอบที่มีข้อจำกัดมาก จนเนติกอัลกอริทึมแบบทั่วไป อาจจะก่อให้เกิดคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ในระหว่างกระบวนการวิวัฒนาการ (Evolution Process) ทำให้เกิดความล้มเหลวในการค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเป็นการประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึมแบบแนะนำ (Guided GAs) เพื่อเปรียบเทียบกับเมมเมติกอัลกอริทึมซึ่งผลลัพธ์ของ MA ทำให้หาคำตอบได้อย่างครอบคลุมถึงข้อจำกัดในการวางแผนการประกอบและ Guided Gas มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ MA แล้ว ผลลัพธ์ของ MA สามารถให้คำตอบที่เหนือกว่า Guided Gas

- Moghaddam and Vahed (2006) ได้พิจารณา 3 วัตถุประสงค์ในการจัดลำดับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี นั้นคือค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการทำงานที่น้อยที่สุด (Minimizing the total utility workcost) ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกียวข้องกับความแปรผันของการผลิตที่ต่ำที่สุด (Minimizing total production rate variation cost) และค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการปรับต้งเครื่องที่ต่ำที่สุด (Minimizing total setup cost) โดยเสนอการใช้เมมเมติกอัลกอริทึม (Memetic Algorithm: MA) ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งวิธีการทำงานในการคัดเลือกคำตอบจะใช้วงล้อรูเลต และมีตัวดำเนินการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Operator) ได้แก่ ครอสโอเวอร์ (Crossover) อินเวอร์ชั้น (Inversion) และมิวเทชั้น (Mutation) ผลลัพธ์ของการคำนวณแสดงให้เห็นว่า MAมีความสามารถที่สมบูรณ์แบบกว่าการใช้ Lingo Software โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่มีขนาดใหญ่

- Vahed ,et al. (2007) ได้พัฒนา MAs ที่มีชื่อว่า Multi-Objective ScatterSearch (MOSS) มาใช้แก้ปัญหาเดียวกับ Hyun(1998) โดยแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการหาคำตอบของเมมเมติกอัลกอริทึมที่เหนือกว่าอัลกอริทึมชนิดอื่น

- Chutima, P. and Pinkoompee, P. (2009) ได้เสนอการนำวิธีเมมเมติกอัลกอริทึม (Memetic Algorithm : MA) สำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม ที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยวิธีเมมเมติกอัลกอริทึม มาใช้

ร่วมกับเจนเนติกอัลกอริทึม พบว่าวิธีเมมเมติกอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ดีกว่า SPEA2 และ NSGA II

2.10.6 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจวบ

งานวิจัยที่ทำการศึกษาแก้ปัญหาโดยใช้อัลกอริทึมการบรรจวบ ได้แก่

- De Bonet et,al. (1997) ได้นำเสนออัลกอริทึมที่เป็นที่นิยมใช้มีชื่อว่า มีมิกอัลกอริทึม (Mutual Information Maximizing Input Clustering : MIMIC) เป็นอัลกอริทึมที่ละโมบ (Greedy Algorithm)ในการค้นหาคำตอบในแต่รอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงที่ดีระหว่างการกระจายความน่าจะเป็นของตัวแปร

- Baluja and Davies ได้นำเสนออัลกอริทึมโคมิกต์ (Combining Optimizers with Mutual Information Tree: COMIC) เป็นอัลกอริทึมที่ทำการสร้างต้นไม้ที่เป็นไม่อิสระต่อกัน โดยให้ความสำคัญกับคำตอบที่ดี(Good Solution) ในการค้นหาคำตอบ

- Wattananpornprom W., Olanviwitchai, P., Chutima, P. and Chongstitvatana, P. (2009) ได้ทำการพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ทั้งคำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่เข้ามาช่วยในการหาคำตอบ โดยใช้ตารางความน่าจะเป็น ในการค้นหาคำตอบที่ดี ที่มีชื่อว่า Combinatorial Optimization with Coincidence Algorithm (COIN) ในการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีลักษณะแบบตัวยูในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี และทำการเปรียบเทียบกับวิธี NSGA-II พบว่า COIN ให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

2.10.7 งานวิจัยที่เกียวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

งานวิจัยที่ทำการศึกษาแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค ได้แก่

- Coello Coello, C.A., Pulido, G.T. and Lechuga, M.S. (2004) ได้พัฒนาวิธีการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธี Particle Swarm Optimization (MPSO) และนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับ Nondominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), Pareto Archived Evolution Strategy (PAES) และ Microgenetic

Algorithm for Multiobjective Optimization (Micro-GA) พบว่า MOPSO ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดี

- Rameshkumar, K., Suresh, R.K. and Mohanasundaram, K.M. (2005) ได้พัฒนาอัลกอริทึม Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบไหล และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบกับ GA และ hybrid genetic algorithm (HGA) และทำการปรับปรุงอัลกอริทึมโดยการนำการค้นหาเฉพาะที่มาช่วยในการหาคำตอบ พบว่า จากการประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดี

- Liao, C.J., Tseng, C.T. and Luarn, P. (2007) ได้พัฒนา Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) ในการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน โดยอาศัยอนุภาค (particle) และทิศทางในการเคลื่อนที่ (velocity) และตารางตำแหน่งของสตริงคำตอบเพื่อไปหาช่วยในการหาคำตอบ และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม continuous PSO และ GA นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ร่วมกับ PSO (PSO-LS) และนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับ ACO พบว่า ให้ผลลัพธ์ที่ดี

- Tseng, C.T. and Liao, C.J. (2008) ได้เสนอการนำอัลกอริทึม discrete particle swarm optimization (DPSO) มาใช้ร่วมกับอัลกอริทึม net benefit of movement (NBM) ในการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน และได้ทำการเปรียบเทียบกับ GA และ hybrid genetic algorithm (HGA) นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ร่วมกับ DPSO (DPSO-LS) พบว่า DPSO-LS ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้ COMSOAL ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงอัลกอริทึมที่จะนำมาใช้ในการเปรียบเทียบคำตอบตัวหนึ่งคือ วิธีการ Computer Method of Sequencing Operation for Assembly Line (COMSOAL) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ โดยจะกล่าวถึงหลักการ ขั้นตอนการนำอัลกอริทึมไปใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู และตัวอย่างการใช้ COMSOAL ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์

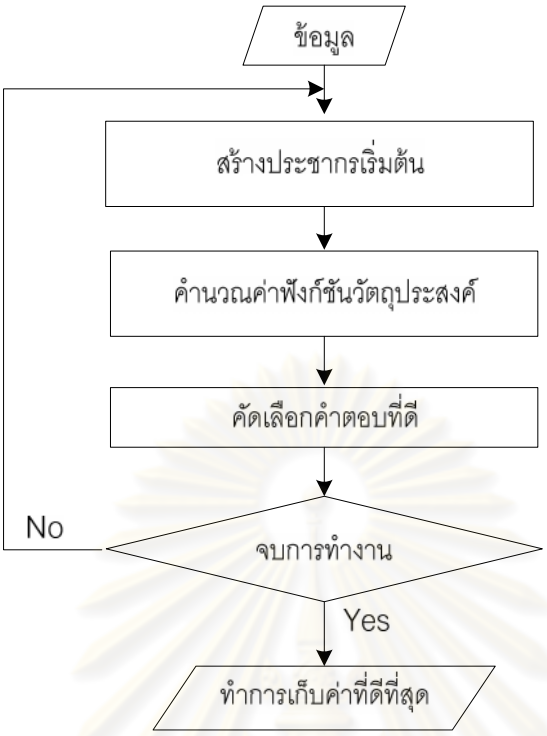
3.1 หลักการของCOMSOAL

COMSOAL เป็นอัลกอริทึมที่ใช้วิธีการสุ่มเลือกงานมาใช้ในการหาคำตอบ โดยจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการสุ่มคำตอบและคัดเลือกคำตอบที่ดีเก็บไว้ เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากซับซ้อนน้อย สามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีสามารถหาคำตอบได้ในระดับที่ดีและนิยมใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบทั่วไป

3.2 ขั้นตอนการนำ COMSOAL ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

ในการนำ COMSOAL ไปใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูนั้นเราสามารถสรุปขั้นตอนต่างๆได้ดังรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานของ COMSOAL

รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปพร้อมกับการนำเสนอตัวอย่างการใช้ COMSOAL ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยู

3.3 ตัวอย่างการนำ COMSOAL ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

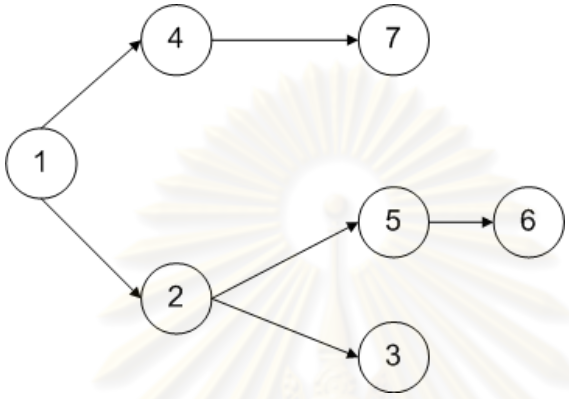
จากขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของ COMSOAL และแสดงตัวอย่างการนำ COMSOAL ไปใช้กับปัญหาขนาด 7 งานในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ได้ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data Input)

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่ แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้

3.3.1.1 แผนภาพความสัมพันธ์รวม

แผนภาพความสัมพันธ์รวมจะแสดงถึงข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานในแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในตัวอย่างที่จะแสดงในหัวข้อนี้จะมีผลิตภัณฑ์เพียง 1 ชนิดเราสามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์รวมได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม

3.3.1.2 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

จะแสดงว่าแต่ละขั้นงานใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใดถ้าปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 ผลิตภัณฑ์เวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนจะต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ในขั้นงานนั้นๆ

ตาราง 3.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Time(s)
1	1
2	5
3	4
4	3
5	5
6	6
7	5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1.3 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

เป็นตารางแสดงเวลาทีพนักงานแต่ละคนจะใช้เมือเดินจากตำแหน่งหนึงในสายการประกอบไปยังอีกตำแหน่งหนึงซึงตำแหน่งในตารางจะหมายถึงตำแหน่งในสายการประกอบโดยตำแหน่งที 1 คือตำแหน่งของข้นงานแรกในด้านหน้าของสายการประกอบ และตำแหน่งที 7 ซึงเป็นตำแหน่งสุดท้ายคือข้นงานแรกทีเข้ามาจากด้านหลังของสายการประกอบ

ตาราง 3.2 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.21	0.42	0.5354	0.4696	0.297	0.21
2	0.21	0	0.21	0.332	0.297	0.21	0.297
3	0.42	0.21	0	0.1485	0.21	0.297	0.4696
4	0.5354	0.332	0.1485	0	0.1485	0.332	0.5354
5	0.4696	0.297	0.21	0.1485	0	0.21	0.42
6	0.297	0.21	0.297	0.332	0.21	0	0.21
7	0.21	0.297	0.4696	0.5354	0.42	0.21	0

3.3.1.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

จากแผนภาพความสัมพันธ์รวมเราจะนำความสัมพันธ์ทีได้มาสร้างเป็นตารางเพือให้ง่ายก็การนำไปใช้คำนวณ

ตาราง 3.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 3.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0

3.3.1.5 **พารามิเคอร์ที่ใช้ในการทดลอง**

พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่างนี้คือ

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที
- งานด้านหน้า : ด้านหลัง : ด้านข้าง เป็น 3:3:1

3.3.2 **การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น**

ในงานวิจัยนี้จะสร้างสตริงคำตอบโดยวิธีกำหนดค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) ซึ่งสตริงที่ได้จากการสุ่มจะมีลักษณะดังนี้

รูปที่ 3.3 ลักษณะของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ซึ่งจากรูปที่ 3.3 จะพบว่างานที่ 1 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเท่ากับ 7 ในขณะที่งานที่ 2 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเป็น 1 ซึ่งเราจะใช้ค่าสิทธิในการเลือกงานนี้ในกระบวนการดำเนินงานทั้งหมด

เมื่อทำการสร้างสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ได้สตริงเริ่มต้น 5 สตริงดังนี้

String Priority 1 = [7 1 4 3 6 5 2]

String Priority 2 = [4 1 3 5 7 6 2]

String Priority 3 = [5 1 2 3 7 6 4]

String Priority 4 = [5 2 7 1 3 4 6]

String Priority 5 = [7 2 4 1 3 6 5]

3.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้จะทำโดย นำ String Priority มาทำการถอดรหัสคำตอบ เพื่อให้ได้ลำดับขั้นการทำงาน (Sequence) และตำแหน่งของงาน (Position) จากนั้นจึงจัดงานให้กับคนงานแต่ละคน เมื่อจัดแล้วจึงทำการหาค่าวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ

3.3.3.1 การถอดรหัสคำตอบ

สตริงคำตอบเริ่มต้นซึ่งเป็นค่าสิทธิในการเลือกงานข้างต้นยังไม่สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ ต้องทำการถอดรหัสคำตอบเพื่อให้ได้ Sequence และ Position ก่อนซึ่งการถอดรหัสคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

- พิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหน้างาน จะดูจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า โดยหาผลรวมของคอลัมน์ใดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งของลำดับงานได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดความสัมพันธ์ของขั้นงาน

- พิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหลังงาน จะดูจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง โดยหาผลรวมของคอลัมน์ใดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งของลำดับงานได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดความสัมพันธ์ของขั้นงาน

- พิจารณาค่าสิทธิในการเลือกงานจากสตริงคำตอบตามตำแหน่งของงานที่ถูกเลือกลงในตำแหน่งข้างหน้างาน และถูกเลือกลงในตำแหน่งข้างหลังงาน ซึ่งขั้นงานที่สามารถถูกเลือกลงตำแหน่งข้างหน้าและข้างหลังงานใดมีค่ามากสุดจะถูกเลือกลงในลำดับขั้นงานก่อน

- ถ้างานที่ถูกเลือกมาจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ให้ตัดทิ้งโดยการเปลี่ยนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Font เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Back มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

- ถ้างานที่ถูกเลือกมาจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back)ให้ตัดทิ้งโดยการเปลี่ยนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Back เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Font มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก String Priority 1 เราจะสามารถถอดรหัสคำตอบและหาขั้นตอนการทำงานและตำแหน่งของงานได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การถอดรหัสคำตอบในสตริงคำตอบแรก

รอบที่	งานด้านหน้า	งานด้านหลัง	งานที่เลือก	ตำแหน่งของงาน
1	1	3,6,7	1	Front
2	2,4	3,6,7	6	Back
3	2,4	3,5,7	5	Back
4	2,4	3,7	3	Back
5	2,4	7	4	Front
6	2	7	7	Front
7	2	-	2	Front

ซึ่งเมื่อทำการถอดรหัสคำตอบทั้ง 5 สตริงคำตอบจะได้ลำดับของงานและตำแหน่งหน้าหลังดังนี้

String Sequence 1: ลำดับของงาน = [1 6 5 3 4 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 1 1 1]
String Sequence 2: ลำดับของงาน = [6 5 1 4 3 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 1 2 1 1]
String Sequence 3: ลำดับของงาน = [6 5 1 7 4 3 2]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 2 1 2 1]

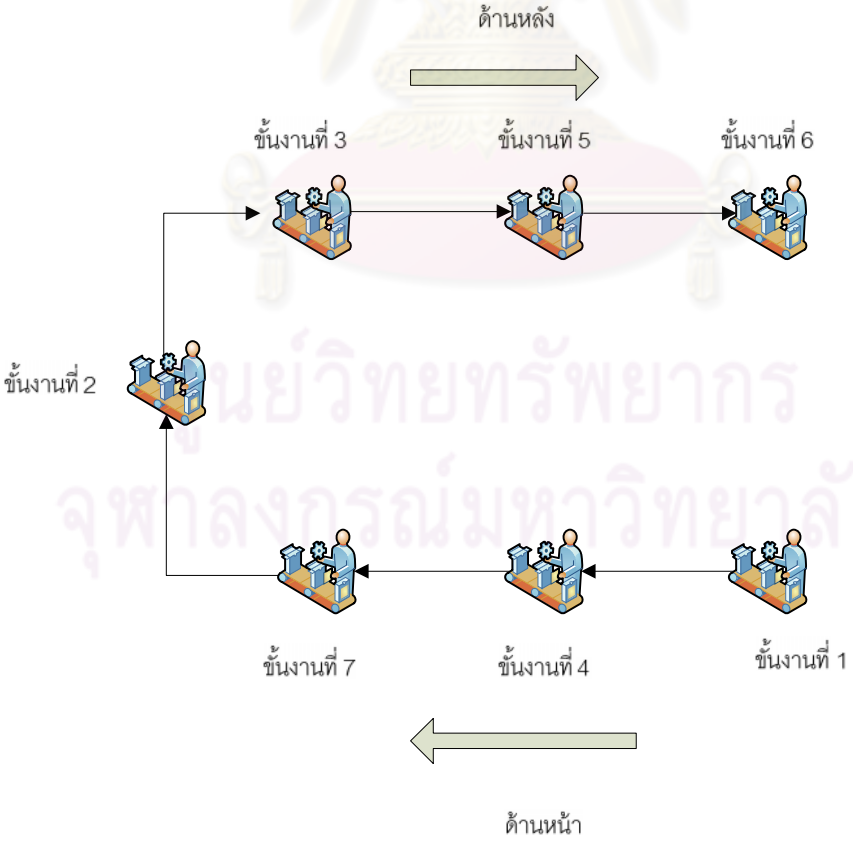
String Sequence 4: ลำดับของงาน = [3 7 1 6 5 2 4]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 2 2 1 1]
String Sequence 5: ลำดับของงาน = [1 6 7 3 5 2 4]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 2 1 1]

โดยค่าตำแหน่งของงานเท่ากับ 1 หมายความว่างานนั้นถูกจัดให้อยู่ด้านหน้าของสายการประกอบและค่าตำแหน่งของงานเท่ากับ 2 หมายความว่างานนั้นถูกจัดให้อยู่ในด้านหลังของสายการประกอบ

3.3.3.2 การจัดสรรงานให้กับพนักงาน

เมื่อเราทำการถอดรหัสและทราบลำดับของงานและตำแหน่งหน้าหลังของงานแล้วขั้นตอนต่อไปเราจะทำการจัดพนักงานลงในสายการประกอบ โดยจะจัดสรรพนักงานตาม String Sequence ที่ทำการถอดรหัสมาได้โดยเราสามารถจัดสรรพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1 ได้ดังนี้

String Sequence 1: ลำดับของงาน = [1 6 5 3 4 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 1 1 1]



รูปที่ 3.4 ลักษณะของตำแหน่งงานต่างๆในสตริงคำตอบที่ 1

ตารางที่ 3.6 การจัดสรรงานให้กับพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1

งาน	เวลาที่ใช้ในการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการเดินไปทำงานถัดไป	เวลาที่ใช้ในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก	เวลารวมในสถานีงาน	เวลาที่เหลือในสถานีงาน	สถานีงานที่
1	1	-	-	1	9	1
6	6	0.21	0.21	7.42	2.58	1
5	5	0.21	0.297	12.93	เกิน	
5	5	-	-	5	5	2
3	4	0.21	0.21	9.42	0.58	2
4	3	0.21	0.42	13.05	เกิน	
4	3	-	-	3	7	3
7	5	0.21	0.21	8.42	1.58	3
2	5	0.149	0.332	13.9	เกิน	
2	5	-	-	5	5	4

3.3.3.3 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อทำการจัดสรรพนักงานลงในสายการประกอบแล้วเราจะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทั้ง 3 วัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. เพื่อให้จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

$$f_2(x) = Minimum \quad (n)$$

2. ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(C - C_{jk})^2}{m}}$$

โดยที่ $C_{jk} = T_{jk} + WT_{jk}$

เมื่อ n = จำนวนพนักงาน

m = จำนวนงานทั้งหมด

C = รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

C_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ไปในงาน k

T_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ในการปฏิบัติงาน k

WT_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ในเดินไปทำงาน k

3. เวลาเดินของพนักงาน

$$WT = \alpha\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} l_{jk} + c_{jk} + r_{jk}$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์เวลาเดินของพนักงาน

l_{ij} = ระยะทางที่พนักงาน j ใช้เดินไปทำงาน k

c_{jk} = ระยะทางที่ใช้เดินข้ามฝั่งไปทำงาน k

r_{jk} = ระยะทางในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก

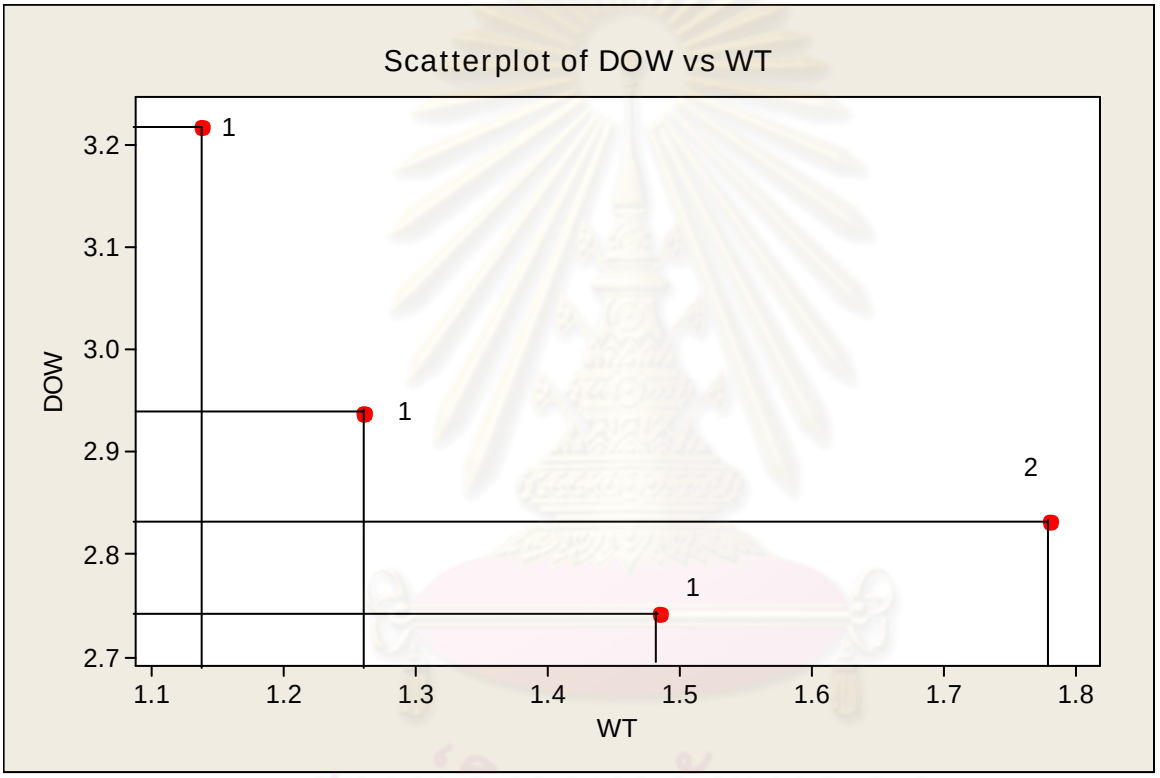
ซึ่งจากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้ในรอบการทำงานแรก

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	4	2.9364	1.2600
2	4	3.2178	1.1370
3	4	2.7419	1.4849
4	4	2.8320	1.7792
5	4	2.9364	1.2600

3.3.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงของประชากร

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 3.5 ค่า Dummy Fitness ของประชากร

ตารางที่ 3.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.9364	1.2600
2	1	3.2178	1.1370
3	1	2.7419	1.4849
4	2	2.8320	1.7792
5	1	2.9364	1.2600

3.4.1 การเก็บค่าทีดีทีสุด

จากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวที่ได้ จะทำการเก็บค่าทีดีทีสุดไว้ โดยพิจารณาจากค่า Dummy Fitness ทีมีค่าน้อยทีสุด เพือทำการเก็บค่าไว้เป็นคำตอบทีดีทีสุดในรอบนี้

ตารางที 3.9 การเก็บสตริงคำตอบทีดีทีสุด

สตริงคำตอบที	Task Sequence
1	1 6 5 3 4 7 2
2	6 5 1 4 3 7 2
3	6 5 1 7 4 3 2
5	1 6 7 3 5 2 4

3.4.2 การดำเนินการในรอบที 2

การดำเนินงานในรอบที 2 จะทำเช่นเดียวกับขั้นตอนในรอบแรกโดยจะสร้างสตริงคำตอบเริมต้นซึง จากตัวอย่างทีเราพิจารณาจะได้ผลในขั้นตอนต่างๆดังนี้

String Priority 1 = [2 4 1 6 3 5 7]

String Priority 2 = [5 3 4 2 7 6 1]

String Priority 3 = [4 7 2 6 5 3 1]

String Priority 4 = [3 1 2 5 4 6 7]

String Priority 5 = [6 5 4 7 2 1 3]

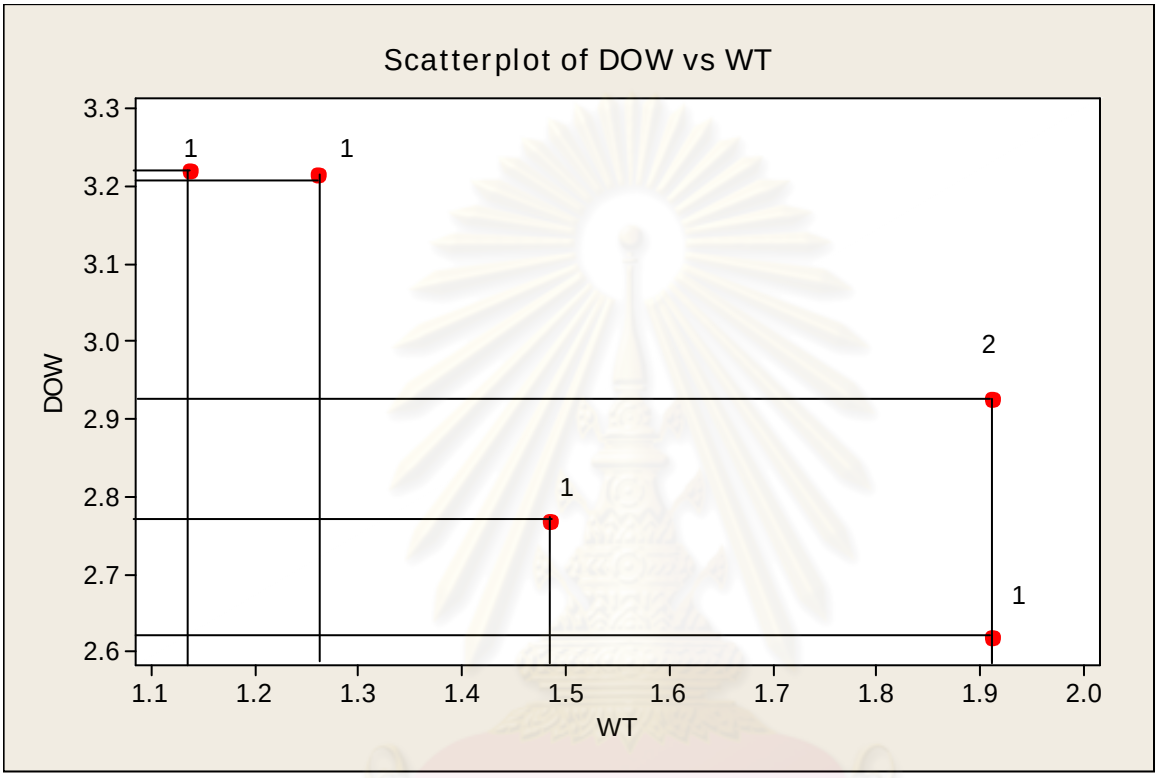
จากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัว สามารถคำนวณค่าวัตถุประสงค์ได้ดังตารางที 3.10

ตารางที 3.10 ค่าจากการคำนวณวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาทีพนักงานใช้เดิน
1	4	2.6179	1.9108
2	4	2.7689	1.4849
3	4	3.2157	1.2600
4	4	2.9263	1.9108
5	4	3.2218	1.1370

การประเมินค่า

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 3.6 ค่า Dummy Fitness วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg

ตารางที่ 3.11 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.6179	1.9108
2	1	2.7689	1.4849
3	1	3.2157	1.2600
4	2	2.9263	1.9108
5	1	3.2218	1.1370

การเก็บค่าทีดีทีสุด

เมือทำการจัดเรียงแล้ว จึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบ โดยพิจารณาจากค่า Dummy Fitness ทีมีค่าน้อยทีสุด คือ ซึงสตริงคำตอบทีจัดเก็บในรอบนีจะนำไปรวมกับคำตอบทีดีทีสุดทีได้มีการเก็บในรอบก่อนหน้าจะได้ผลดังตารางที 3.12

ตารางที 3.12 การรวมสตริงคำตอบ

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที	Task Sequence
1	1	1 6 5 3 4 7 2
	2	6 5 1 4 3 7 2
	3	6 5 1 7 4 3 2
	5	1 6 7 3 5 2 4
2	1	7 4 6 5 1 2 3
	2	6 5 1 3 2 4 7
	3	1 2 4 5 6 3 7
	5	1 4 2 3 7 5 6

และทำการประเมินหาคำตอบทีดีทีสุดเพือทำการเก็บค่าไว้เป็นคำตอบทีดีทีสุดในรอบถัดไป ด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) โดยจะใช้วิธีจัดอันดับแบบ Goldberg จะได้ผลดังนี้

ตารางที 3.13 ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

สตริงคำตอบที	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาทีพนักงานใช้เดิน
1	1	2.9364	1.2600
2	1	3.2178	1.1370
3	1	2.7419	1.4849
4	1	2.9364	1.2600
5	1	2.6179	1.9108
6	2	2.7689	1.4849
7	2	3.2157	1.2600
8	2	3.2218	1.1370

จากสตริงคำตอบทั้ง 8 ตัว จะทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้ โดยพิจารณาจากค่า Dummy Fitness ที่มีค่าน้อยที่สุด เพื่อทำการเก็บค่าไว้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดต่อไป

ตารางที่ 3.14 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1 6 5 3 4 7 2
2	6 5 1 4 3 7 2
3	6 5 1 7 4 3 2
4	1 6 7 3 5 2 4
5	7 4 6 5 1 2 3
6	6 5 1 3 2 4 7

3.4 สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการใช้ COMSOAL ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบมีหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว โดยจะทำการสุ่มประชากรและทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดของแต่ละรอบไว้เพื่อใช้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดต่อไป วิธี COMSOAL จะถูกนำไปใช้ในการทดลองเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมซึ่งได้มีการพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การประยุกต์ใช้ วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

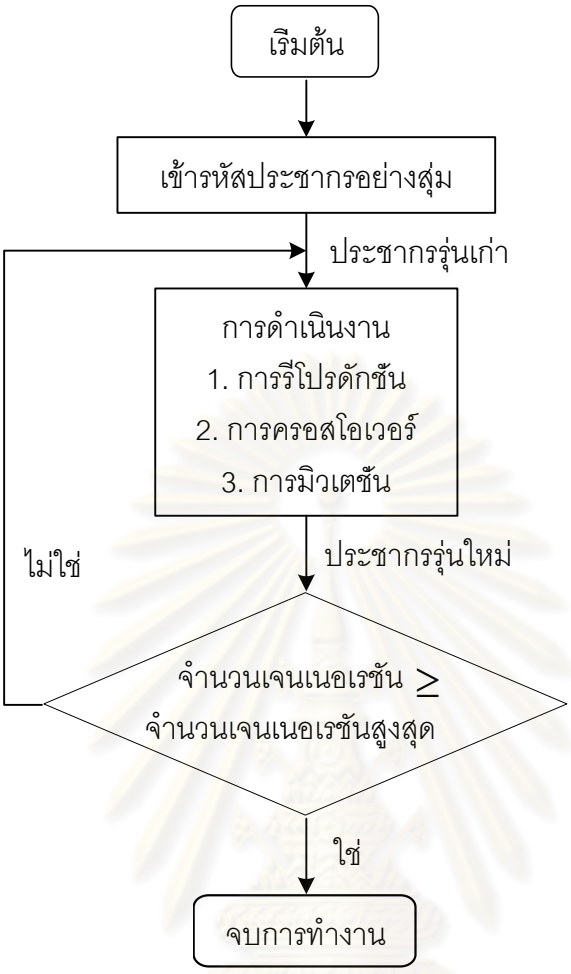
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิด ขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา เจนเนติกอัลกอริทึม (GA) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการเจนเนติกอัลกอริทึมที่เรานำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGAII) ซึ่งเป็นวิธีเมทธาฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบสูงและได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไป

4.1 หลักการและแนวคิดของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม

เจนเนติกอัลกอริมทึมเป็นเมธาฮิวริสติกที่ใช้หลักการและแนวคิดของพันธุศาสตร์มาใช้ในการหาคำตอบ ซึ่งตามหลักการของพันธุศาสตร์นั้นลักษณะของสิ่งมีชีวิตที่จะถูกถ่ายทอดไปยังรุ่นลูกรุ่นหลานและรุ่นต่อไปนั้น จะถูกกำหนดโดยโครโมโซม (Chromosome) ซึ่งในแต่ละโครโมโซมจะประกอบด้วย ยีน (Gene) ซึ่งจะเป็นตัวบอกลักษณะของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ และสิ่งมีชีวิตที่มีความเหมาะสมจะมีแนวโน้มที่จะมีลูกหลานมากกว่าสิ่งมีชีวิตที่ไม่มีความเหมาะสม และจะมีการการกลายพันธุ์ เกิดขึ้นและกำเนิดสิ่งมีชีวิตใหม่ๆที่มีความเหมาะสมเกิดขึ้นมา

ดังนั้นเจนเนติกอัลกอริทึมจึงได้นำแนวคิดนี้มาใช้ในฮิวริสติกการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบ โดยกำหนดให้สตริงคำตอบจะถูกนำมาใช้แทนโครโมโซมและ แต่ละตำแหน่งของโครโมโซมจะประกอบด้วยค่าของบิท (Bit) ที่แสดงความแตกต่างของคำตอบจะถูกนำมาใช้แทนยีน

การทำงานของวิธีเจนนิติกอัลกอริทึมนั้นจะทำงานเช่นเดียวกับหลักการของพันธุศาสตร์กล่าวคือ จะมีการสร้างสตริงคำตอบให้มีลักษณะเดียวกับ โครโมโซม ในสตริงคำตอบจะมีบิทที่แสดงความแตกต่างของคำตอบ จากนั้นก็จะมีการกำหนดค่าความเหมาะสมของแต่ละสตริงคำตอบซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะหมายถึงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดแนวโน้มของสตริงคำตอบที่จะมีโอกาสในการคลอสโอเวอร์ (Cross Over) มีสตริงคำตอบรุ่นลูกหลานต่อไป นอกจากนั้นแล้วยังมีโอกาสที่สตริงคำตอบที่เกิดมาจะเกิดการกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นคำตอบใหม่เช่นเดียวกับหลักการของพันธุ์ศาสตร์ ซึ่งเราสามารถสรุปกระบวนการทำงานเบื้องต้นของวิธีเจนเนติกอัลกอริทึมได้ดังรูป



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานเบื้องต้นของ GA

การเข้ารหัสประชากรอย่างสุ่ม

เป็นกระบวนการเริ่มแรกของ GA โดยจะเป็นการแปลงค่าพารามิเตอร์ให้มีลักษณะเหมือนโครโมโซม ซึ่งวิธีการเข้ารหัสนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาแต่ละปัญหา โดยในงานวิจัยนี้จะเข้ารหัสโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์เป็นสตริงคำตอบ

การดำเนินงาน

การดำเนินงานเพื่อทำการปรับปรุงคำตอบที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของ GA จะประกอบด้วย การรีโปรดักชัน การคลอสโอเวอร์ การมิวเตชัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

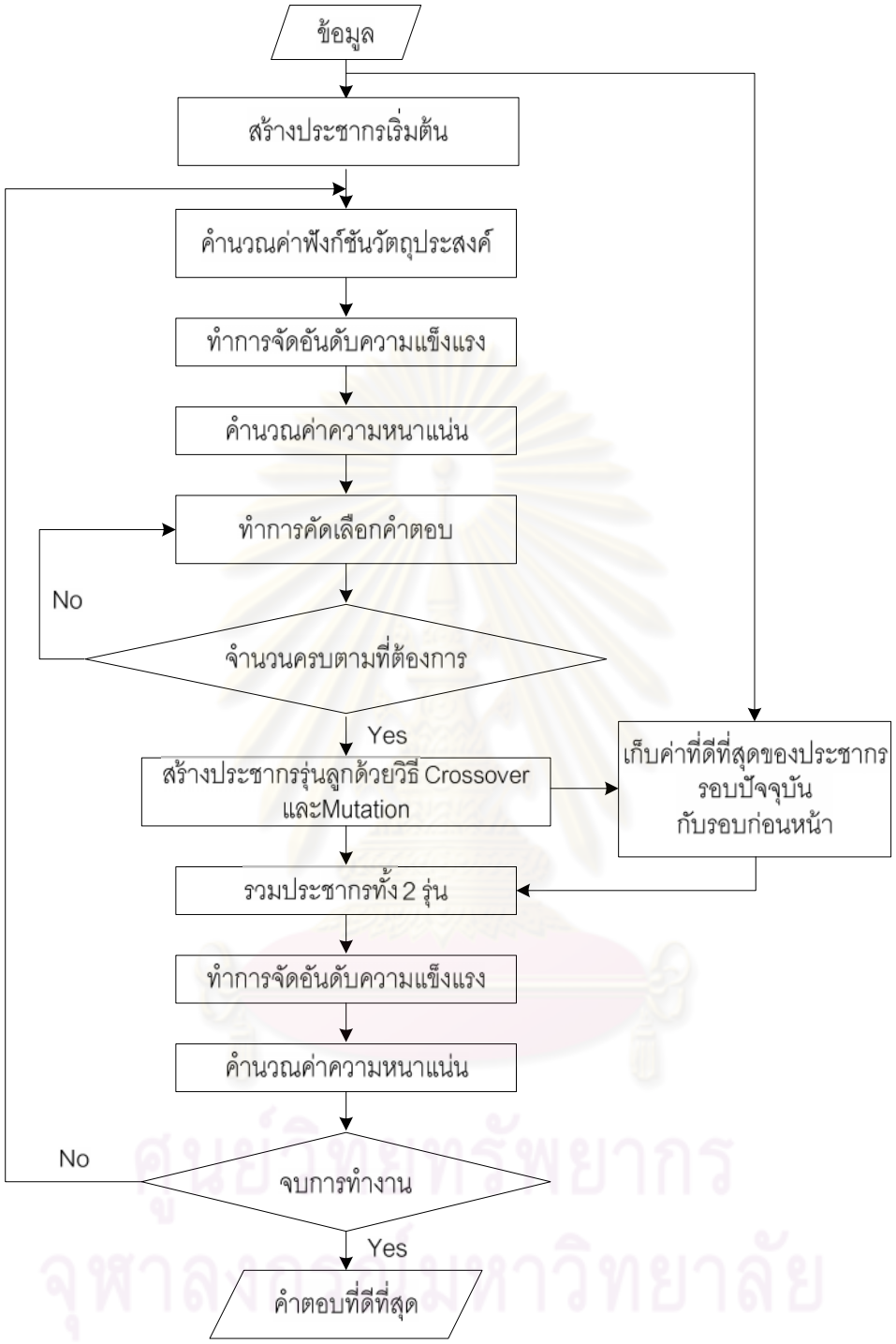
- การรีโปรดักชัน เป็นการกำหนดค่าความเหมาะสม(Fitness) ให้กับสตริงคำตอบซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณากำหนดค่าความเหมาะสมจาก ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความเหมาะสมที่กำหนดโดยการรีโปรดักชันนี้จะเป็นตัวกำหนดโอกาสที่สตริงจะสืบทอดลักษณะไปยังรุ่นลูกหลานต่อไป

- การคลอสโอเวอร์ เป็นกระบวนการในการสร้างประชากรรุ่นใหม่(Offspring) ที่มีลักษณะมาจากประชากรรุ่นพ่อแม่(Parent) โดยโอกาสในการที่ประชากรจะเกิดการคลอสโอเวอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมที่กำหนดมาจากการรีโปรดักชั้น ซึ่งวิธีการคลอสโอเวอร์ในงานวิจัยนี้ จะทำการจับคู่สมาชิกจากประชากรรุ่นพ่อแม่อย่างสุ่มและทำการสลับค่าในสตริงคำตอบ เพื่อสร้างเป็นประชากรรุ่นใหม่ออกมา การมิวเตชั้น เป็นกระบวนการกลายพันธุ์ของคำตอบเพื่อให้คำตอบที่เกิดจากการรีโปรดักชั้นและการคลอสโอเวอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้มีโอกาสที่จะหลุดออกจาก Local Optimal ซึ่งการมิวเตชั้นนั้นจะเกิดขึ้นที่น้อยในการสืบทอดลักษณะไปยังรุ่นลูกหลาน

4.2 ขั้นตอนการนำ NSGAII ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

ในการนำ GA ไปใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูนั้นเราสามารถสรุปขั้นตอนต่างๆได้ดังรูปที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II

รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปพร้อมกับการนำเสนอตัวอย่างการใช้ GA ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู

4.3 ตัวอย่างการการนำ NSGA-II ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

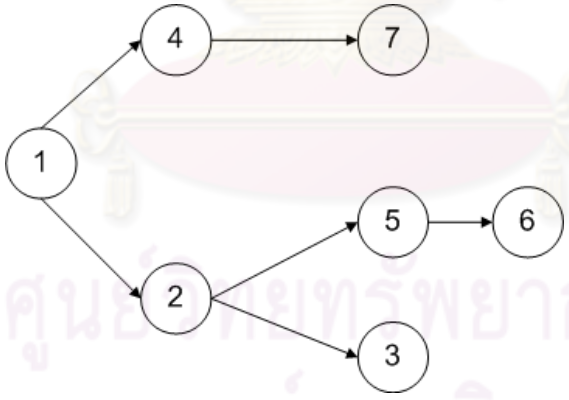
จากขั้นตอนที่ได้แสดงให้เห็นในหัวข้อ 4.2 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-II และแสดงตัวอย่างการนำ NSGA-II ไปใช้กับปัญหาขนาด 7 งานในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ได้ดังนี้

4.3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data Input)

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้

4.3.1.1 แผนภาพความสัมพันธ์รวม

แผนภาพความสัมพันธ์รวมจะแสดงถึงข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานในแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในตัวอย่างที่จะแสดงในหัวข้อนี้จะมีผลิตภัณฑ์เพียง 1 ชนิดเราสามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์รวมได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม

4.3.1.2 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

จะแสดงว่าแต่ละขั้นงานใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใดถ้าปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 ผลิตภัณฑ์เวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนจะต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ในขั้นงานนั้นๆ

ตาราง 4.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Time(s)
1	1
2	5
3	4
4	3
5	5
6	6
7	5

4.3.1.3 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

เป็นตารางแสดงเวลาทีพนักงานแต่ละคนจะใช้เมือเดินจากตำแหน่งหนึ่งในสายการประกอบไปยังอีกตำแหน่งหนึงซึงตำแหน่งในตารางจะหมายถึงตำแหน่งในสายการประกอบโดยตำแหน่งที 1 คือตำแหน่งของขั้นงานแรกในด้านหน้าของสายการประกอบ และตำแหน่งที 7 ซึงเป็นตำแหน่งสุดท้ายคือขั้นงานแรกทีเข้ามาจากด้านหลังของสายการประกอบ

ตาราง 4.2 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.21	0.42	0.5354	0.4696	0.297	0.21
2	0.21	0	0.21	0.332	0.297	0.21	0.297
3	0.42	0.21	0	0.1485	0.21	0.297	0.4696
4	0.5354	0.332	0.1485	0	0.1485	0.332	0.5354
5	0.4696	0.297	0.21	0.1485	0	0.21	0.42
6	0.297	0.21	0.297	0.332	0.21	0	0.21
7	0.21	0.297	0.4696	0.5354	0.42	0.21	0

4.3.1.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

จากแผนภาพความสัมพันธ์รวมเราจะนำความสัมพันธ์ทีได้มาสร้างเป็นตารางเพือให้ง่ายก็การนำไปใช้คำนวณ

ตาราง 4.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 4.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0

4.3.1.5 **พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง**

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที
- วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight mapping crossover (WMX)
- วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เท่ากับ 0.7
- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน เท่ากับ 0.3
- งานด้านหน้า:ด้านหลัง:ด้านข้าง เป็น 3:3:1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

ในงานวิจัยนี้จะใช้สตริงคำตอบแทนโครโมโซม และเนื่องจากสตริงคำตอบเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการบางอย่างของ NSGA-II เช่นการคลอสโอเวอร์หรือการมิวเตชัน จะเกิดการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ ทำให้คำตอบที่ได้ใหม่อาจจะเกิดปัญหากับข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสร้างสตริงคำตอบโดยวิธีกำหนดค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) ซึ่งสตริงที่ได้จากการสุ่มจะมีลักษณะดังนี้

รูปที่ 4.4 ลักษณะของสตริงคำตอบเริ่มต้น

ซึ่งจากรูปที่ 4.4 จะพบว่างานที่ 1 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเท่ากับ 7 ในขณะที่งานที่ 2 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเป็น 1 ซึ่งเราจะใช้ค่าสิทธิในการเลือกงานนี้ในกระบวนการดำเนินงานทั้งหมด

เมื่อทำการสร้างสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ได้สตริงเริ่มต้น 5 สตริงดังนี้

String Priority 1 = [7 1 4 3 6 5 2]
String Priority 2 = [4 1 3 5 7 6 2]
String Priority 3 = [5 1 2 3 7 6 4]
String Priority 4 = [5 2 7 1 3 4 6]
String Priority 5 = [7 2 4 1 3 6 5]

4.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้จะทำโดย นำ String Priority มาทำการถอดรหัสคำตอบ เพื่อให้ได้ลำดับขั้นการทำงาน (Sequence) และตำแหน่งของงาน (Position) จากนั้นจึงจัดงานให้กับคนงานแต่ละคน เมื่อจัดแล้วจึงทำการหาค่าวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการ

4.3.3.1 การถอดรหัสคำตอบ

สตริงคำตอบเริ่มต้นซึ่งเป็นค่าสิทธิในการเลือกงานข้างต้นยังไม่สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ ต้องทำการถอดรหัสคำตอบเพื่อให้ได้ Sequence และ Position ก่อนซึ่งการถอดรหัสคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

- พิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหน้างาน จะดูจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า โดยหาผลรวมของคอลัมน์ใดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งของลำดับงานได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดความสัมพันธ์ของขั้นงาน

- พิจารณาว่ามีขั้นงานใดที่สามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหลังงาน จะดูจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง โดยหาผลรวมของคอลัมน์ใดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งของลำดับงานได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดความสัมพันธ์ของขั้นงาน

- พิจารณาค่าสิทธิในการเลือกงานจากสตริงคำตอบตามตำแหน่งของงานที่ถูกเลือกลงในตำแหน่งข้างหน้างาน และถูกเลือกลงในตำแหน่งข้างหลังงาน ซึ่งขั้นงานที่สามารถถูกเลือกลงตำแหน่งข้างหน้าและข้างหลังงานใดมีค่ามากสุดจะถูกเลือกลงในลำดับขั้นงานก่อน

- ถ้างานที่ถูกเลือกมาจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ให้ตัดทิ้งโดยการเปลี่ยนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Font เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Back มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

- ถ้างานที่ถูกเลือกมาจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back)ให้ตัดทิ้งโดยการเปลี่ยนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Back เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Font มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก String Priority 1 เราจะสามารถถอดรหัสคำตอบและหาขั้นตอนการทำงานและตำแหน่งของงานได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การถอดรหัสคำตอบในสตริงคำตอบแรก

รอบที่	งานด้านหน้า	งานด้านหลัง	งานที่เลือก	ตำแหน่งของงาน
1	1	3,6,7	1	Front
2	2,4	3,6,7	6	Back
3	2,4	3,5,7	5	Back
4	2,4	3,7	3	Back
5	2,4	7	4	Front
6	2	7	7	Front
7	2	-	2	Front

ซึ่งเมื่อทำการถอดรหัสคำตอบทั้ง 5 สตริงคำตอบจะได้ลำดับของงานและตำแหน่งหน้าหลังดังนี้

String Sequence 1: ลำดับของงาน = [1 6 5 3 4 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 1 1 1]
String Sequence 2: ลำดับของงาน = [6 5 1 4 3 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 1 2 1 1]
String Sequence 3: ลำดับของงาน = [6 5 1 7 4 3 2]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 2 1 2 1]
String Sequence 4: ลำดับของงาน = [3 7 1 6 5 2 4]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 2 2 1 1]
String Sequence 5: ลำดับของงาน = [1 6 7 3 5 2 4]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 2 1 1]

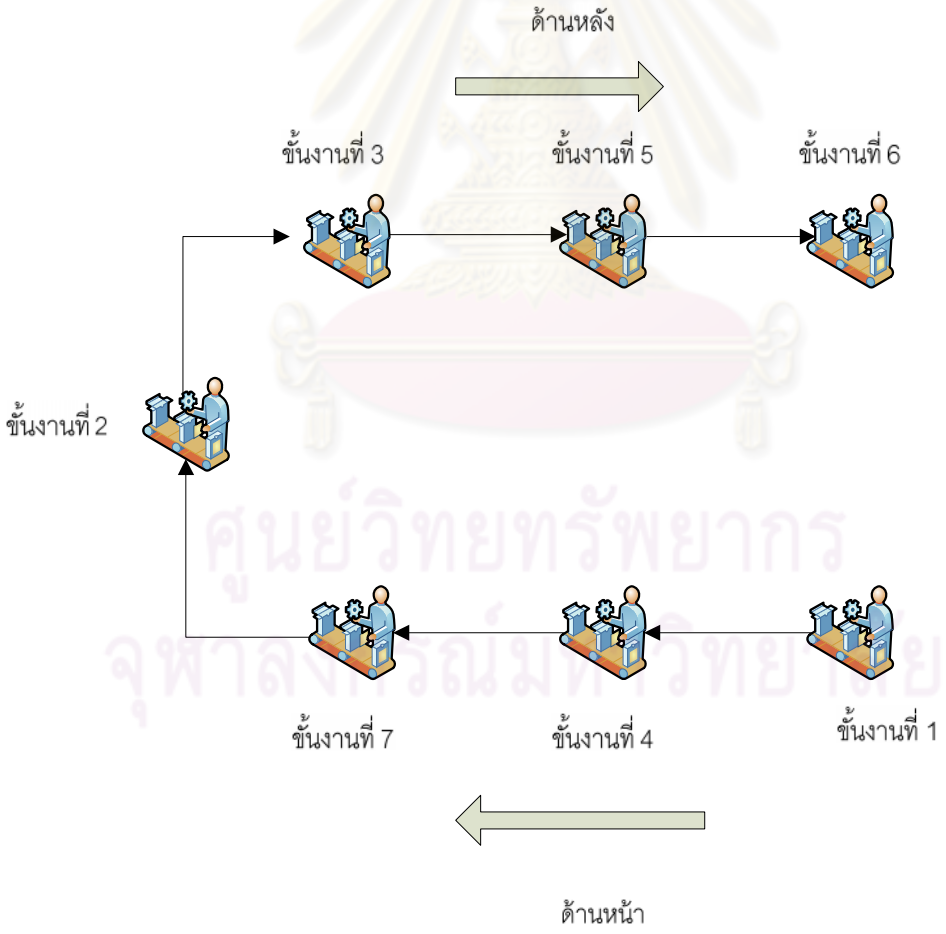
โดยค่าตำแหน่งของงานเท่ากับ 1 หมายความว่างานนั้นถูกจัดให้อยู่ด้านหน้าของสายการประกอบและค่าตำแหน่งของงานเท่ากับ 2 หมายความว่างานนั้นถูกจัดให้อยู่ในด้านหลังของสายการประกอบ

4.3.3.2 การจัดสรรงานให้กับพนักงาน

เมื่อเราทำการถอดรหัสและทราบลำดับของงานและตำแหน่งหน้าหลังของงานแล้วขั้นตอนต่อไปเราจะทำการจัดพนักงานลงในสายการประกอบ โดยจะจัดสรรพนักงานตาม String Sequence ที่ทำการถอดรหัสมาได้โดยเราสามารถจัดสรรพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1 ได้ดังนี้

String Sequence 1: ลำดับของงาน = [1 6 5 3 4 7 2]

ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 1 1 1]



รูปที่ 4.5 ลักษณะของตำแหน่งงานต่างๆในสตริงคำตอบแรก

ตารางที่ 4.6 การจัดสรรงานให้กับพนักงานในสถิงคำตอบแรก

งาน	เวลาที่ใช้ในการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการเดินไปทำงานถัดไป	เวลาที่ใช้ในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก	เวลารวมในสถานีงาน	เวลาที่เหลือในสถานีงาน	สถานีงานที่
1	1	-	-	1	9	1
6	6	0.21	0.21	7.42	2.58	1
5	5	0.21	0.297	12.93	เกิน	
5	5	-	-	5	5	2
3	4	0.21	0.21	9.42	0.58	2
4	3	0.21	0.42	13.05	เกิน	
4	3	-	-	3	7	3
7	5	0.21	0.21	8.42	1.58	3
2	5	0.149	0.332	13.9	เกิน	
2	5	-	-	5	5	4

4.3.3.3 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อทำการจัดสรรพนักงานลงในสายการประกอบแล้วเราจะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทั้ง 3 วัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. เพื่อให้จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

$$f_2(x) = Minimum \quad (n) \tag{4.1}$$

2. ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(C - C_{jk})^2}{m}} \tag{4.2}$$

โดยที่ $C_{jk} = T_{jk} + WT_{jk}$

เมื่อ n = จำนวนพนักงาน

m = จำนวนงานทั้งหมด

C = รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

C_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ไปในงาน k

T_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ในการปฏิบัติงาน k

WT_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ในเดินไปทำงาน k

3. เวลาเดินของพนักงาน

$$WT = \alpha \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} l_{jk} + c_{jk} + r_{jk} \qquad (4.3)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์เวลาเดินของพนักงาน

l_{ij} = ระยะทางที่พนักงาน j ใช้เดินไปทำงาน k

c_{jk} = ระยะทางที่ใช้เดินข้ามฝั่งไปทำงาน k

r_{jk} = ระยะทางในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก

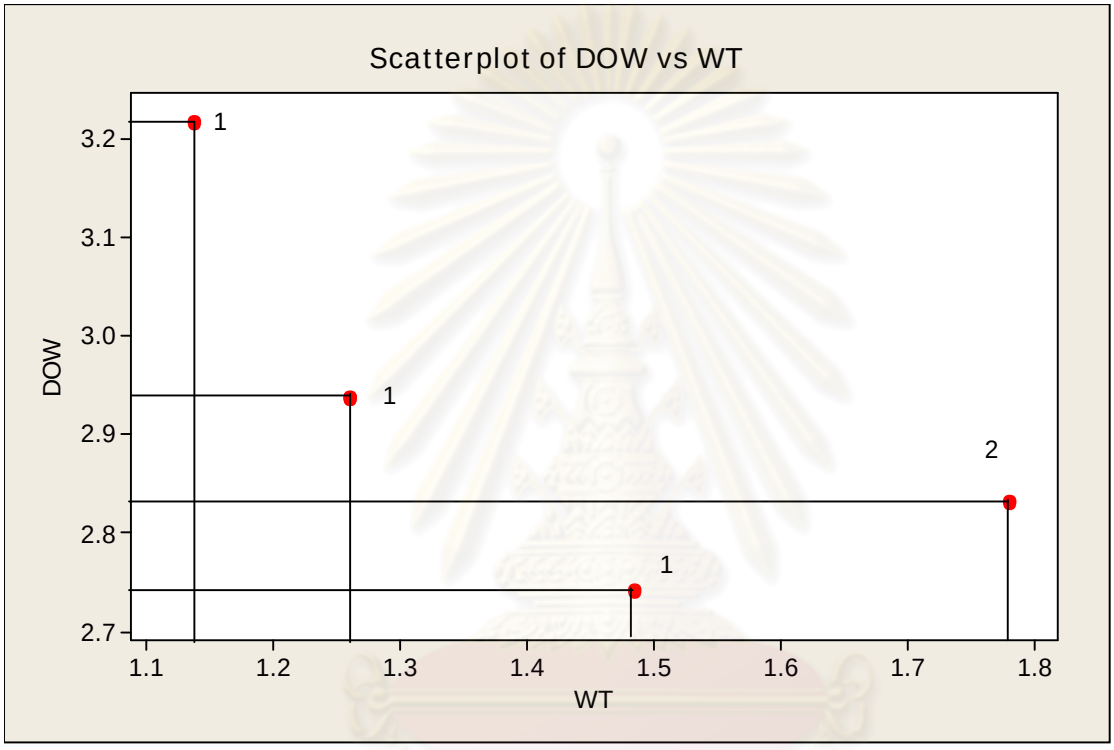
ซึ่งจากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตาราง

ตารางที่ 4.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	4	2.9364	1.2600
2	4	3.2178	1.1370
3	4	2.7419	1.4849
4	4	2.8320	1.7792
5	4	2.9364	1.2600

4.3.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของประชากร

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่า Dummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.6 ค่า Dummy Fitness ของประชากร

ตารางที่ 4.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.9364	1.2600
2	1	3.2178	1.1370
3	1	2.7419	1.4849
4	2	2.8320	1.7792
5	1	2.9364	1.2600

หลังจากทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงแล้วเราจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประชากร (Crowding Distance) โดย Crowding Distance เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกประชากรคำตอบภายในอันดับเดียวกัน เราสามารถคำนวณค่า Crowding Distance จาก

$$cd_k\left(x_{[i,k]}\right)=\frac{f_k\left(x_{[i+1,k]}\right)-f_k\left(x_{[i-1,k]}\right)}{f_k^{\max}-f_k^{\min}} \tag{4.4}$$

เมื่อ $x_{[i,k]}$ = สมาชิกคำตอบที่ i ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ที่ได้รับการเรียงลำดับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

จากนั้นเราจะคำนวณผลรวมของค่า Crowding Distance ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ตัว จะได้ว่า $cd(x)=\sum cd_k(x)$ โดยค่า Crowding Distance ของคำตอบนั้น ๆ จะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจายของคำตอบมากน้อยเพียงใด โดยค่า Crowding Distance มากจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจาย

ซึ่งเมื่อพิจารณาประชากรคำตอบทั้งหมดจะได้ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ดังนี้

ตารางที่ 4.9 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2	2.9364	1.2600
2	1	Inf	3.2178	1.1370
3	1	Inf	2.7419	1.4849
4	2	Inf	2.8320	1.7792
5	1	2	2.9364	1.2600

4.3.4 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการคัดเลือกคำตอบเพื่อเข้าสู่ Mating Pool จากการหาค่า Fitness Value ที่ได้จากการทำ Non-dominated Sorting โดยทำการสลับค่าให้ค่าจากค่าDummy Fitness จาก ค่าน้อยเป็นค่ามาก จากนั้นจึงสร้างวงล้อรูเล็ต และใช้วิธีการ Binary Tournament

Selection เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่างจากสตริงที่ 1 จะได้ว่า

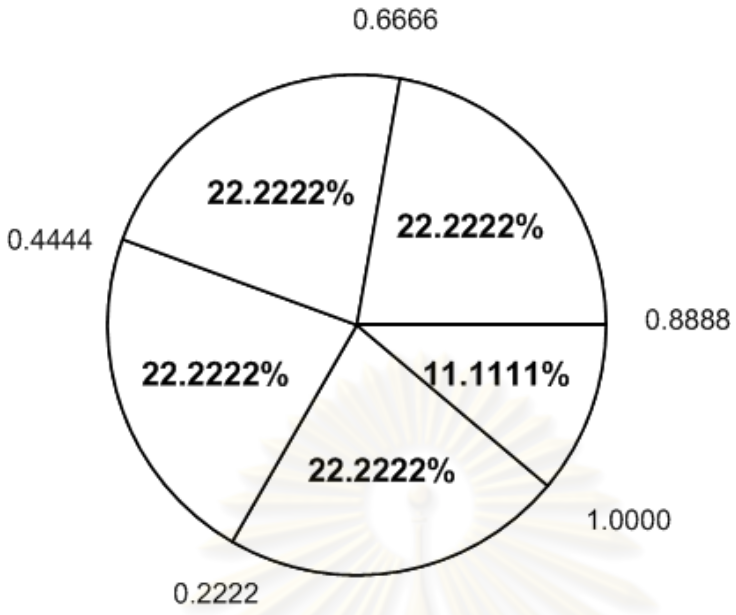
ตารางที่ 4.10 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2	2.9364	1.2600
2	1	2	3.2178	1.1370
3	1	2	2.7419	1.4849
4	2	1	2.8320	1.7792
5	1	2	2.9364	1.2600

ตารางที่ 4.11 การสร้างวงล้อรูเล็ต

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	2	0.2222	0.2222
2	2	0.2222	0.4444
3	2	0.2222	0.6666
4	1	0.1112	0.7778
5	2	0.2222	1
รวม	9	1	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 วงล้อรูเล็ต

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเข้าไปยัง Mating Pool ถ้าค่า Fitness Value เท่ากันจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้สตริงใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.12 การทำ Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				No_String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	
1	0.9125	1	5	2	0.3822	0.4444	2	2	2
2	0.0145	0.2222	1	2	0.2987	0.4444	2	2	2
3	0.0078	0.2222	1	2	0.6494	0.6666	3	2	3
4	0.1122	0.222	1	2	0.7342	0.7778	4	1	1
5	0.5741	0.6666	3	2	0.2890	0.4444	2	2	3

4.3.5 การคลอสโอเวอร์

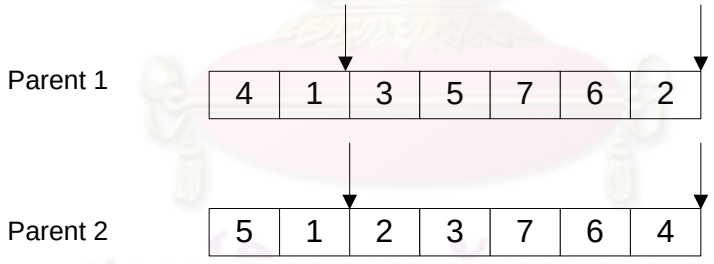
ในการทำคลอสโอเวอร์เราจะใช้สตริงจาก Mating Pool ที่ได้มาจากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยวิธีการเลือกจะทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะ

นำไปคลอสโอเวอร์จากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_c ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.7 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำ คลอสโอเวอร์ดังตาราง

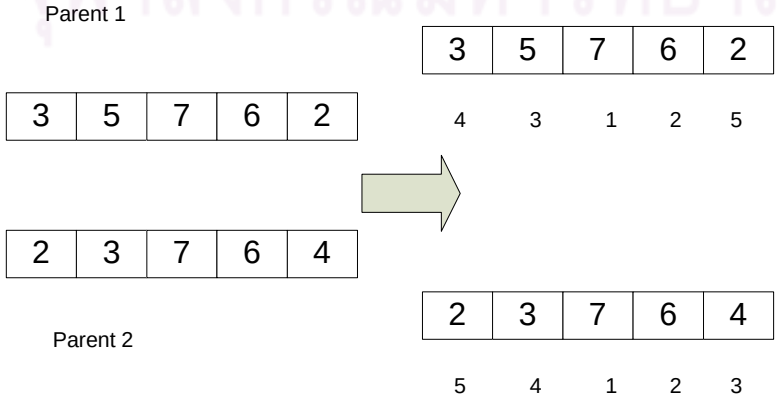
ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	[4 1 3 5 7 6 2]	0.3184	Selected
2	[4 1 3 5 7 6 2]	0.1578	Selected
3	[5 1 2 3 7 6 4]	0.6823	Selected
4	[7 1 4 3 6 5 2]	0.5655	Selected
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.9542	-

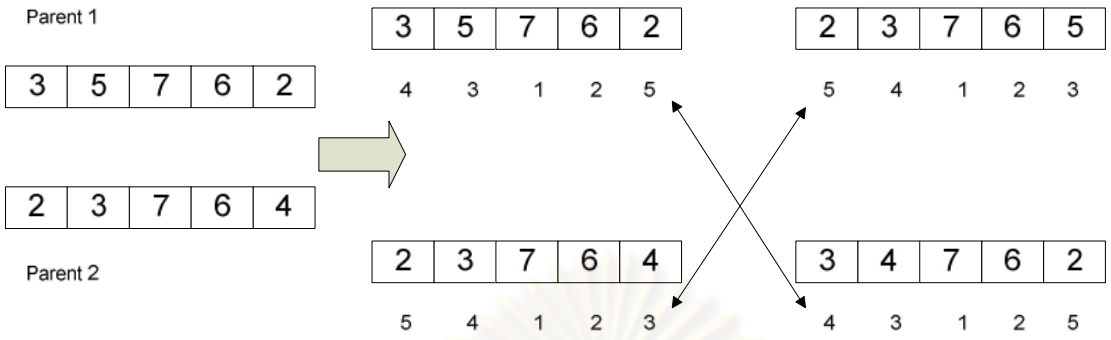
เมื่อได้สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่จะนำไปทำการคลอสโอเวอร์แล้วในงานวิจัยนี้จะทำการคลอสโอเวอร์ โดยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX) ซึ่งจะทำโดยสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์ จากนั้นก็จะทำการกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่ และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดในโครโมโซม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลดังรูปโดยในตัวอย่างนี้สตริงที่นำมาทำการคลอสโอเวอร์คือสตริงที่ 1 และสตริงที่ 3



ก) การสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์



ข) การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่



ค) การสลับค่าน้ำหนักและเปลี่ยนค่าในโครโมโซม

รูปที่ 4.8 การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX ในปัญหาตัวอย่าง

ซึ่งเมื่อทำการคลอสโอเวอร์ทั้งหมดแล้วจะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูก Offspring เป็น ดังตาราง

ตารางที่ 4.14 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์

Offspring No.	String Priority
1	[4 1 2 3 7 6 5]
2	[5 1 3 4 7 6 2]
3	[4 1 5 3 7 6 2]
4	[7 1 3 4 6 5 2]

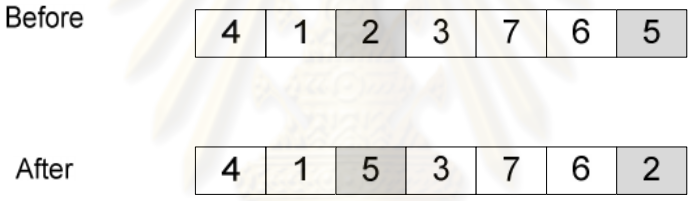
4.3.6 การมิวเตชัน

คือการผ่าเหล่าของประชากรวิธีการนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนักโดยจะพิจารณาจากประชากรใน Mating Pool และทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปทำการมิวเตชันจากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_m ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำการมิวเตชันดังตาราง

ตารางที่ 4.15 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[4 1 2 3 7 6 5]	0.1485	Selected
2	[5 1 3 4 7 6 2]	0.2875	Selected
3	[4 1 5 3 7 6 2]	0.7455	-
4	[7 1 3 4 6 5 2]	0.6742	-
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.4178	-

ในงานวิจัยนี้จะทำการมิวเตชันโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งจะทำการสลับที่ตำแหน่งของโครโมโซมที่ทำการสุ่มเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลดังรูป



รูปที่ 4.9 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่าง

ตารางที่ 4.16 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชัน

String No.	String Priority
1	[4 1 5 3 7 6 2]
2	[5 1 3 4 2 6 7]
3	[4 1 5 3 7 6 2]
4	[7 1 3 4 6 5 2]
5	[5 1 2 3 7 6 4]

4.3.7 การเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป

การเลือกสตริงทำตอบที่เหมาะสมจะเป็นประชากรในรอบถัดไปจะทำโดยนำประชากรเริ่มต้นมาพิจารณารวมกับประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชันดังนี้

ตารางที่ 4.17 สติงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูก

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[7 1 4 3 6 5 2]
	2	[4 1 3 5 7 6 2]
	3	[5 1 2 3 7 6 4]
	4	[5 2 7 1 3 4 6]
	5	[7 2 4 1 3 6 5]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[4 1 5 3 7 6 2]
	7	[5 1 3 4 2 6 7]
	8	[4 1 5 3 7 6 2]
	9	[7 1 3 4 6 5 2]
	10	[5 1 2 3 7 6 4]

จากนั้นจะทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดค่าความแข็งแรงรวมทั้งหาค่าความหนาแน่นของประชากรเพื่อที่จะจัดอันดับสตริงคำตอบที่ดีซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.18 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากร

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้ในการเดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
3	2.7419	1.4849	1	Inf
10	2.7419	1.4849	1	Inf
2	3.2178	1.1370	1	Inf
1	2.9364	1.2600	1	1.0551
9	2.9364	1.2600	1	1.0551
5	2.9364	1.2600	1	1.0551
4	2.8320	1.7792	2	Inf
7	4.1612	1.1879	2	Inf
6	3.2157	1.2600	3	Inf
8	3.2157	1.2600	3	Inf

เมื่อทำการจัดลำดับแล้วจะเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้นเพื่อนำไปใช้ในรอบถัดไปซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.19 สตริงคำตอบที่จะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป

String No.	String Priority
1	[5 1 2 3 7 6 4]
2	[5 1 2 3 7 6 4]
3	[4 1 3 5 7 6 2]
4	[7 1 4 3 6 5 2]
5	[7 1 3 4 6 5 2]

4.3.8 การดำเนินงานในรอบที่ 2

การดำเนินงานในรอบที่ 2 จะทำเช่นเดียวกับขั้นตอนในรอบแรกโดยจะใช้สตริงคำตอบที่ได้มาจากรอบแรกมาใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นซึ่งจากตัวอย่างที่เราพิจารณาจะได้ผลในขั้นตอนต่างๆดังนี้

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้

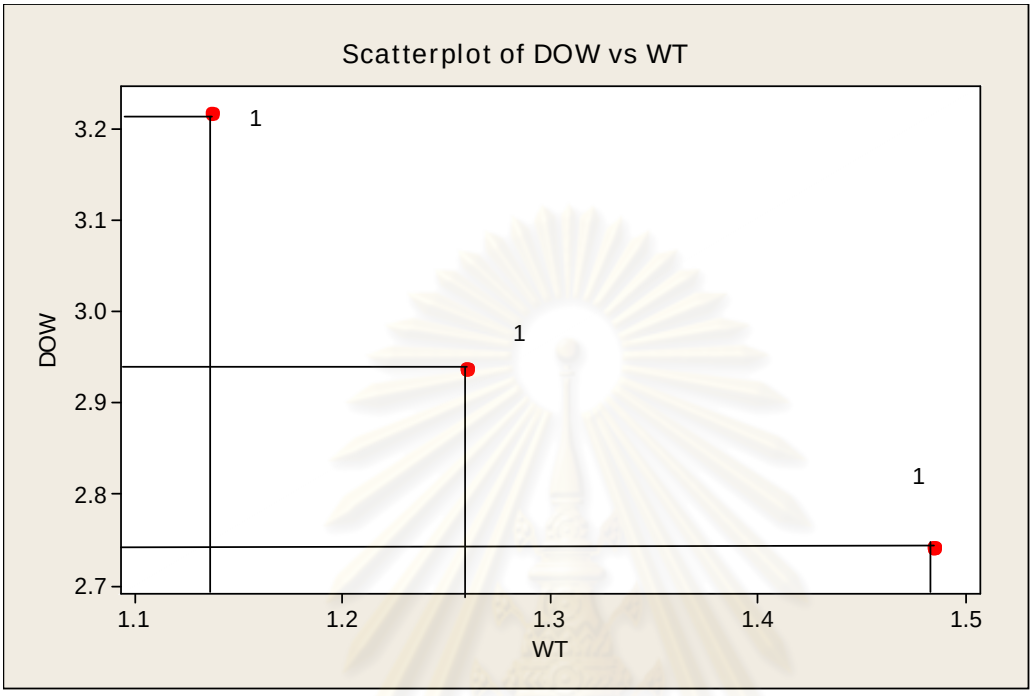
ตารางที่ 4.20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบการทำงานที่สอง

งาน	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	4	2.7419	1.4849
2	4	2.7419	1.4849
3	4	3.2178	1.1370
4	4	2.9364	1.2600
5	4	2.9364	1.2600

การกำหนดค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของประชากร

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.10 ค่าDummy Fitness ของประชากรในรอบการทำงานที่สอง

ตารางที่ 4.21 ค่า Dummy Fitness ของประชากรในรอบการทำงานที่สอง

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.7419	1.4849
2	1	2.7419	1.4849
3	1	3.2178	1.1370
4	1	2.9364	1.2600
5	1	2.9364	1.2600

หลังจากทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงแล้วเราจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประชากร (Crowding Distance) ซึ่งจะพิจารณาในแต่ละ Frontier ซึ่งจะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.22 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบในรอบที่สอง

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	Inf	2.7419	1.4849
2	1	Inf	2.7419	1.4849
3	1	Inf	3.2178	1.1370
4	1	2.0000	2.9364	1.2600
5	1	2.0000	2.9364	1.2600

การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการคัดเลือกคำตอบเพื่อเข้าสู่ Mating Pool จากการหาค่า Fitness Value ที่ได้จากการทำ Non-dominated Sorting โดยทำการสลับค่าให้ค่าจากค่าDummy Fitness จาก ค่าน้อยเป็นค่ามาก จากนั้นจึงสร้างวงล้อรูเล็ต และใช้วิธีการ Binary Tournament Selection เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่าง จะได้ว่า

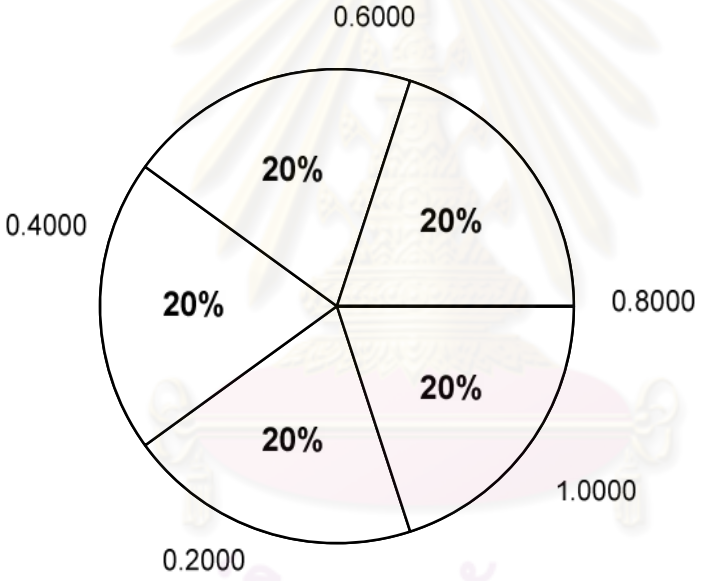
ตารางที่ 4.23 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Valueในรอบการทำงานที่สอง

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	1	2.7419	1.4849
2	1	1	2.7419	1.4849
3	1	1	3.2178	1.1370
4	1	1	2.9364	1.2600
5	1	1	2.9364	1.2600

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.24 การสร้างวงล้อรูเล็ตในรอบการทำงานที่สอง

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	1	0.2000	0.2000
2	1	0.2000	0.4000
3	1	0.2000	0.6000
4	1	0.2000	0.8000
5	1	0.2000	1.0000
รวม	5	1	



รูปที่ 4.11 วงล้อรูเล็ตในรอบการทำงานที่สอง

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเข้าไปยัง Mating Pool ถ้าค่า Fitness Value เท่ากับจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้สตริงใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.25 การทำ Binary Tournament Selection ในรอบการทำงานที่สอง

No.	Population 1				Population 2				No_String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	
1	0.3544	0.4000	2	1	0.5241	0.6000	3	1	2
2	0.4573	0.6000	3	1	0.4452	0.6000	3	1	3
3	0.0114	0.2000	1	1	0.4987	0.6000	3	1	1
4	0.8897	0.4000	5	1	0.7254	0.8000	4	1	5
5	0.2743	0.400	2	1	0.1784	0.2000	1	1	2

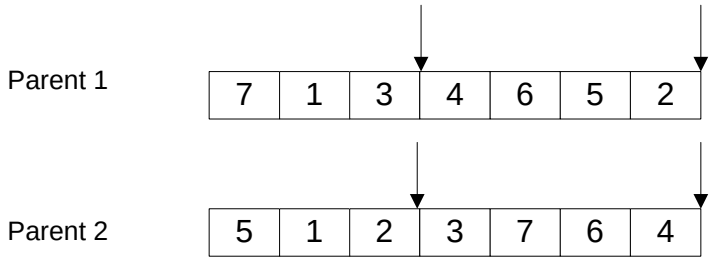
การคลอสโอเวอร์

ในการทำคลอสโอเวอร์เราจะใช้สตริงจาก Mating Pool ที่ได้มาจากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยวิธีการเลือกจะทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปคลอสโอเวอร์จากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_c ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.7 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำ คลอสโอเวอร์ดังตาราง

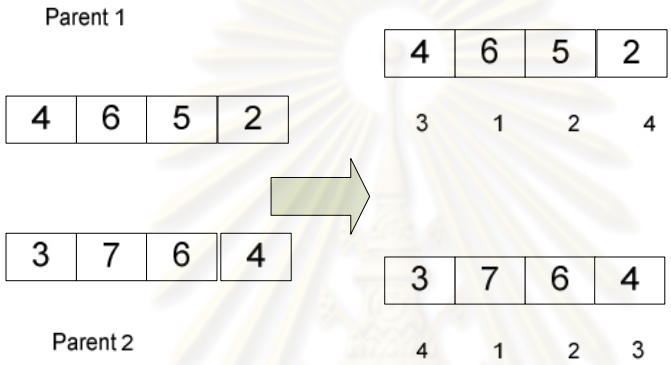
ตารางที่ 4.26 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์ในรอบการทำงานที่สอง

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	[5 1 2 3 7 6 4]	0.9477	-
2	[4 1 3 5 7 6 2]	0.6351	Selected
3	[5 1 2 3 7 6 4]	0.2522	Selected
4	[7 1 3 4 6 5 2]	0.1153	Selected
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.4855	Selected

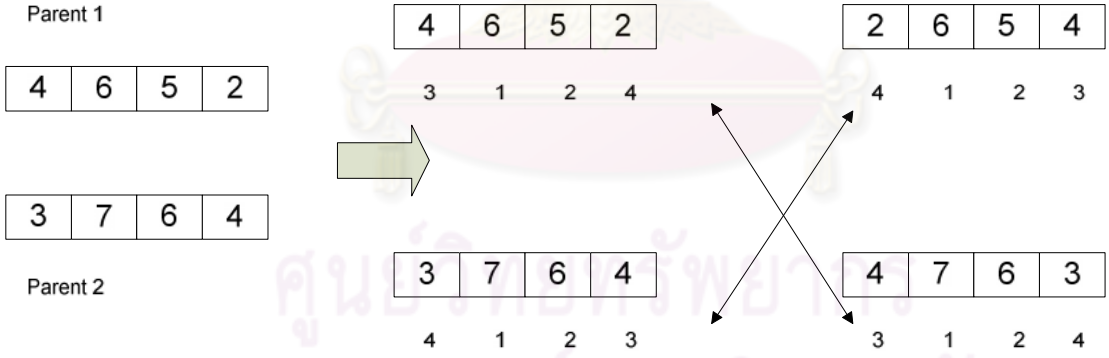
เมื่อได้สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่จะนำไปทำการคลอสโอเวอร์แล้วในงานวิจัยนี้จะทำการคลอสโอเวอร์ โดยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX) ซึ่งจะทำโดยสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์ จากนั้นก็จะทำการกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่ และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดในโครโมโซม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างเมื่อทำการคลอสโอเวอร์สตริงคำตอบที่ 4 และสตริงคำตอบที่ 2 จะได้ผลดังรูป



ก) การสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์



ข) การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่



ค) การสลับค่าน้ำหนักและเปลี่ยนค่าในโครโมโซม

รูปที่ 4.12 การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX รอบที่ 2 ในปัญหาตัวอย่างรอบที่สอง

ซึ่งเมื่อทำการคลอสโอเวอร์ทั้งหมดแล้วจะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูก Offspring เป็น ดังตารางซึ่งจะได้ Offspring เป็น [7 1 3 2 6 5 4] และ [5 1 2 4 7 6 3]

ตารางที่ 4.27 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์ในรอบที่สอง

Offspring No.	String Priority
1	[7 1 3 2 6 5 4]
2	[5 1 2 4 7 6 3]
3	[5 1 3 4 7 6 2]
4	[3 1 2 5 7 6 4]

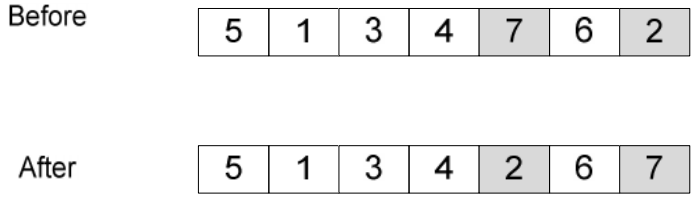
การมิวเตชัน

คือการผ่าเหล่าของประชากรวิธีการนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนักโดยจะพิจารณาจากประชากรใน Mating Pool และทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปทำการมิวเตชันจากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_m ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำการมิวเตชันดังตาราง

ตารางที่ 4.28 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชันในรอบที่สอง

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[7 1 3 2 6 5 4]	0.2478	-
2	[5 1 2 4 7 6 3]	0.37885	-
3	[5 1 3 4 7 6 2]	0.9647	Selected
4	[3 1 2 5 7 6 4]	0.0014	Selected
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.4457	-

ในงานวิจัยนี้จะทำการมิวเตชันโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งจะทำการสลับที่ตำแหน่งของโครโมโซมที่ทำการสุ่มเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลดังรูป



รูปที่ 4.13 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่างรอบที่สอง

ซึ่งจะได้ประชากรคำตอบรุ่นลูกหลังการมิวเตชันเป็น

ตารางที่ 4.29 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชันในรอบที่สอง

String No.	String Priority
1	[7 1 3 2 6 5 4]
2	[5 1 2 4 7 6 3]
3	[5 1 3 4 2 6 7]
4	[3 1 2 5 4 6 7]
5	[5 1 2 3 7 6 4]

การเก็บค่าที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป

การเลือกสตริงทำตอบที่เหมาะสมจะเป็นประชากรในรอบถัดไปจะทำโดยนำประชากรเริ่มต้นมาพิจารณารวมกับประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชันดังนี้

ตารางที่ 4.30 สติงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูกในรอบที่สอง

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[5 1 2 3 7 6 4]
	2	[5 1 2 3 7 6 4]
	3	[4 1 3 5 7 6 2]
	4	[7 1 4 3 6 5 2]
	5	[7 1 3 4 6 5 2]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[7 1 3 2 6 5 4]
	7	[5 1 2 4 7 6 3]
	8	[5 1 3 4 2 6 7]
	9	[3 1 2 5 4 6 7]
	10	[5 1 2 3 7 6 4]

จากนั้นจะทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดค่าความแข็งแรงรวมทั้งหาค่าความหนาแน่นของประชากรเพื่อที่จะจัดอันดับสตริงคำตอบที่ดีซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.31 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากรในรอบที่สอง

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	2.7419	1.4849	1	Inf
10	2.7419	1.4849	1	Inf
2	2.7419	1.4849	1	Inf
6	2.9431	1.1370	1	Inf
4	2.9364	1.2600	1	2.0000
5	2.9364	1.2600	1	2.0000
9	2.9263	1.9108	2	Inf
3	3.2178	1.1370	2	Inf
7	3.2178	1.1370	2	Inf
8	4.1612	1.1879	3	Inf

เมื่อทำการจัดลำดับแล้วจะเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้นเพื่อนำไปใช้ในรอบถัดไปซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.32 สตริงคำตอบที่จะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไปในการทำซ้ำรอบที่สาม

String No.	String Priority
1	[5 1 2 3 7 6 4]
2	[5 1 2 3 7 6 4]
3	[5 1 2 3 7 6 4]
4	[7 1 3 2 6 5 4]
5	[7 1 4 3 6 5 2]

หลังจากนั้นเราจะดำเนินการซ้ำตามตัวอย่างไปจนกว่าจะครบข้อกำหนดซึ่งคำตอบที่ได้หลังจากดำเนินการจะเป็นคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

4.4 สรุปท้ายบท

เนื้อหาที่ได้กล่าวไปแล้วในบทนี้คือการนำเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบมีหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู โดย NSGA-II จะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้หลักการเลือกตามธรรมชาติซึ่งจะคัดเลือกคำตอบที่มีลักษณะดีไว้ใช้ในการสร้างประชากรรุ่นลูกหลานต่อไป โดย NSGA-II จะมีกระบวนการครอสโอเวอร์ และ mutation เป็นกระบวนการหลักใน อัลกอริทึม ซึ่งจะทำการเปลี่ยนลักษณะของสตริงคำตอบเพื่อให้คำตอบมีความหลากหลายและลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจวบในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา อัลกอริทึมการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence : COIN) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธี อัลกอริทึมการบรรจวบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้แนวคิดในการตัดทอนคำตอบที่แย่ออกเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีในเวลาที่น้อยลง

5.1 หลักการและแนวคิดของอัลกอริทึมการบรรจวบ

อัลกอริทึมที่ได้กล่าวมาในบทก่อนหน้าจะมีการใช้คำตอบที่ดีในการปรับปรุงคำตอบแต่จะไม่มีการคำนึงถึงคำตอบที่แย่ ทำให้ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเป็นเวลานาน เพื่อแก้ปัญหานี้อัลกอริทึมการบรรจวบจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมา โดยอัลกอริทึมการบรรจวบจะใช้หลักการในการจดจำลำดับของงานที่อยู่ติดกัน หลักการที่เข้ามาใช้ในการจดจำลำดับของงานคือ หลักความน่าจะเป็น โดยการสร้างตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานถัดไปในรูปแบบเมตริกซ์ (Matrix Probability) ซึ่งนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกงานที่จะอยู่ในลำดับถัดไป งานที่มีความน่าจะเป็นสูงจะมีสิทธิ ถูกเลือกให้มากกว่าและจะเป็นลำดับที่เหมาะสมที่ควรเลือก วิธีการบรรจวบเป็นวิธีการที่ตัดทอนลำดับที่คิดว่าเป็นลำดับที่เมื่อจัดแล้วจะทำให้ได้ผลลัพธ์ยำแย่หรือไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ ซึ่งจะใช้วิธีการลงโทษหรือหักค่าความน่าจะเป็นกับลำดับงานที่จัดแล้ว ทำให้ได้คำตอบที่ยำแย่ และจะทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ของงานที่เมื่อจัดแล้วทำให้คำตอบที่ดีหรือเหมาะสม ทำให้คำตอบที่ได้มีลักษณะลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุด

5.2 ขั้นตอนการนำอัลกอริทึมการบรรจวบไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

ในการนำ อัลกอริทึมการบรรจวบ ไปใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูนั้นเราสามารถสรุปขั้นตอนต่างๆได้ดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของ อัลกอริทึมการบรรจวบ

รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปพร้อมกับการนำเสนอตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมการบรรจวบ ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 ตัวอย่างการนำอัลกอริทึมการบรรจวบไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

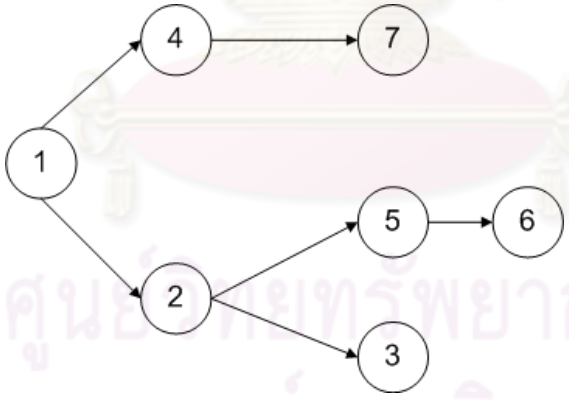
จากขั้นตอนที่ได้แสดงให้เห็นในหัวข้อ 4.2 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของ อัลกอริทึมการบรรจวบ และแสดงตัวอย่างการนำ อัลกอริทึมการบรรจวบ ไปใช้กับปัญหาขนาด 7 งาน ในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ได้ดังนี้

5.3.1 **ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล** (Data Input)

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้

5.3.1.1 **แผนภาพความสัมพันธ์รวม**

แผนภาพความสัมพันธ์รวมจะแสดงถึงข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานในแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในตัวอย่างที่จะแสดงในหัวข้อนี้จะมีผลิตภัณฑ์เพียง 1 ชนิดเราสามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์รวมได้ดังนี้



รูปที่ 5.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม

5.3.1.2 **เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน**

จะแสดงว่าแต่ละขั้นงานใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใดถ้าปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 ผลิตภัณฑ์เวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนจะต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ในขั้นงานนั้นๆ

ตาราง 5.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Time(s)
1	1
2	5
3	4
4	3
5	5
6	6
7	5

5.3.1.3 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

เป็นตารางแสดงเวลาทีพนักงานแต่ละคนจะใช้เมือเดินจากตำแหน่งหนึงในสายการประกอบไปยังอีกตำแหน่งหนึงซึงตำแหน่งในตารางจะหมายถึงตำแหน่งในสายการประกอบโดยตำแหน่งที 1 คือตำแหน่งของขั้นงานแรกในด้านหน้าของสายการประกอบ และตำแหน่งที 7 ซึงเป็นตำแหน่งสุดท้ายคือขั้นงานแรกทีเข้ามาจากด้านหลังของสายการประกอบ

ตาราง 5.2 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.21	0.42	0.5354	0.4696	0.297	0.21
2	0.21	0	0.21	0.332	0.297	0.21	0.297
3	0.42	0.21	0	0.1485	0.21	0.297	0.4696
4	0.5354	0.332	0.1485	0	0.1485	0.332	0.5354
5	0.4696	0.297	0.21	0.1485	0	0.21	0.42
6	0.297	0.21	0.297	0.332	0.21	0	0.21
7	0.21	0.297	0.4696	0.5354	0.42	0.21	0

5.3.1.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

จากแผนภาพความสัมพันธ์รวมเราจะนำความสัมพันธ์ทีได้มาสร้างเป็นตารางเพือให้ง่ายก็การนำไปใช้คำนวณ

ตาราง 5.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 5.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0

5.3.1.5 **พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง**

พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่างนี้คือ

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที
- งานด้านหน้า:ด้านหลัง:ด้านข้าง เป็น 3:3:1
- ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง เท่ากับ 0.2
- ค่าสัมประสิทธิ์ในการให้รางวัลและลงโทษ เท่ากับ 0.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.2 การสร้างค่าเริ่มต้นของตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกและตารางความน่าจะเป็นร่วม

ขั้นตอนนี้จะทำการสร้างตารางความน่าจะเป็นเริ่มต้น2ตารางด้วยกันเพื่อที่จะใช้ตารางนี้ในการสร้างประชากรเริ่มต้น โดยตารางความน่าจะเป็นทั้ง 2 ตารางนี้จะเป็นตารางที่กำหนดลักษณะในการจัดเรียงของสตริงคำตอบ

ตารางความน่าจะเป็นที่ต้องสร้างเป็นตารางแรกคือตารางความน่าเป็นในการเลือกงานแรกจะเป็นตารางที่กำหนดความน่าจะเป็นของแต่ละงานที่จะถูกจัดให้เป็นงานแรกของสายการประกอบซึ่งจะมีขนาด $1\times n$ และจะมีค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ $1/n \ = 1/7 = 0.1428$ดังแสดงในตาราง

ตาราง 5.5 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

ตารางความน่าจะเป็นที่ต้องสร้างอีกตารางคือตารางความน่าจะเป็นร่วมจะเป็นตารางที่แสดงความน่าจะเป็นในการเลือกงานถัดไปยกตัวอย่างเช่นในคู่ลำดับ 2,3 จะแสดงถึงความน่าจะเป็นที่งาน 3 จะถูกเลือกทำต่อจากงาน 2 โดยตารางความน่าจะเป็นร่วมจะมีขนาด $n\times n$ และจะมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/m$ เมื่อ m คือจำนวนตำแหน่งรวมตามแนวแถวที่ยังไม่มีการกำหนดค่า ตัวอย่างเช่นในขั้นงานที่ 3 โดยมีงานก่อนหน้าที่ต้องทำให้เสร็จก่อนคืองานที่ 2 ดังนั้นจึงมีค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งที่ (3,2) จึงมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนตำแหน่งที่เหลือมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $1/m = 1/5 \ = 0.2000$ เป็นต้น

ตาราง 5.6 ตารางความน่าจะเป็นร่วม

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.0000	0.0000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
3	0.2000	0.0000	0.0000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
4	0.0000	0.2000	0.2000	0.0000	0.2000	0.2000	0.2000
5	0.2000	0.0000	0.2000	0.2000	0.0000	0.2000	0.2000
6	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000	0.2000
7	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.2000	0.2000	0.0000

5.3.3 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

ในงานวิจัยนี้จะใช้สตริงคำตอบแตกต่างกับขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II สตริงคำตอบเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการต่างๆ จะไม่มีการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ ทำให้คำตอบที่ได้ใหม่จะไม่เกิดปัญหากับข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสร้างสตริงคำตอบโดยวิธีกำหนดลำดับของงาน โดยการสร้างสตริงคำตอบในอันดับแรกจะสุ่มเลือกจากตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกก่อน โดยจะพิจารณาจากตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้า โดยดูจากผลรวมของคอลัมน์ที่มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งในตัวอย่างนี้จะพบว่ามีเพียงงาน 1 เท่านั้นที่สามารถจัดไว้เป็นงานอันดับแรกได้ จากนั้นเราจะเลือกงานถัดไปโดยพิจารณาจากตารางความน่าจะเป็นร่วมเพื่อจัดงานที่จะนำมาทำต่อจากงานที่ 1 โดยไม่ขัดกับความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

เมื่อทำการสร้างสตริงดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ได้สตริงเริ่มต้น 5 สตริงดังนี้

String 1 = [1 4 7 2 3 5 6]
String 2 = [1 4 7 2 3 5 6]
String 3 = [1 4 2 3 7 5 6]
String 4 = [1 2 4 5 6 7 3]
String 5 = [1 2 4 5 3 7 6]

ขั้นงานที่จะถูกเลือกมาทำการพิจารณาฮิวริกติกจะใช้วิธีการเลือกงานจากข้างหน้าและข้างหลังในลักษณะหักงอเส้นตรง ของสตริงคำตอบ จากสตริงคำตอบที่ 1 จะใช้ฮิวริกติกในการเลือกงานแบบ วิธีสุ่มเลือกขั้นงาน (Random Priority)งานที่ถูกเลือกมาในการพิจารณาครั้งที่ 1 ของสตริงคำตอบที่ 1 คืองาน 1 และ 6 ทำการสุ่มเลือกงานที่จะจัดสรรให้พนักงานที่ 1 สมมติสุ่มได้ ขั้นงานที่ 1 เวลารวมในสถานีงานที่ 1ยังไม่เกินรอบเวลาการทำงาน งานถัดไปที่จะทำการเลือกให้พนักงานที่ 1 คือขั้นงาน 4 และ 6 สมมติสุ่มได้ขั้นงานที่ 6 ให้พนักงานที่ 1 ซึ่งเมื่อจัดสรรให้พนักงานที่ 1 พบว่าเวลารวมของพนักงานยังไม่เกินรอบเวลาในการทำงานจึงยอมรับให้ขั้นงานที่ 6 ให้พนักงานที่ 1 ทำจนกว่างานทุกงานจะถูกจัดให้กับพนักงานจนหมด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสตริงตัวอย่างจะได้ผลของการจัดสรรงานให้กับพนักงานดังนี้

String 1 = [1 4 7 2 3 5 6]
Worker1= [1 3 3 4 2 2 1]
String 2 = [1 4 7 2 3 5 6]
Worker2= [2 2 3 4 3 2 1]
String 3 = [1 4 2 3 7 5 6]

Worker3= [2 3 4 4 3 2 1]

String 4 = [1 2 4 5 6 7 3]

Worker4= [2 4 4 3 2 1 1]

String 5 = [1 2 4 5 3 7 6]

Worker5= [1 4 4 3 2 2 1]

5.3.4 การคำนวณค่าวัตถุประสงค์

เมื่อทำการจัดสรรพนักงานลงในสายการประกอบแล้วเราจะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทั้ง 3 วัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. เพื่อให้จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

$$f_2(x) = Minimum \quad (n) \tag{5.1}$$

2. ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(C - C_{jk})^2}{m}} \tag{5.2}$$

โดยที่ $C_{jk} = T_{jk} + WT_{jk}$

เมื่อ n = จำนวนพนักงาน

m = จำนวนงานทั้งหมด

C = รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

C_{jk}= เวลาที่พนักงาน j ใช้ไปในงาน k

T_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ในการปฏิบัติงาน k

WT_{jk}= เวลาที่พนักงาน j ในเดินไปทำงาน k

3. เวลาเดินของพนักงาน

$$WT = \alpha\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} l_{jk} + c_{jk} + r_{jk} \tag{6.3}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์เวลาเดินของพนักงาน

l_{ij} = ระยะทางที่พนักงาน j ใช้เดินไปทำงาน k

c_{jk} = ระยะทางที่ใช้เดินข้ามฝั่งไปทำงาน k

r_{jk} = ระยะทางในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก

ซึ่งจากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตาราง

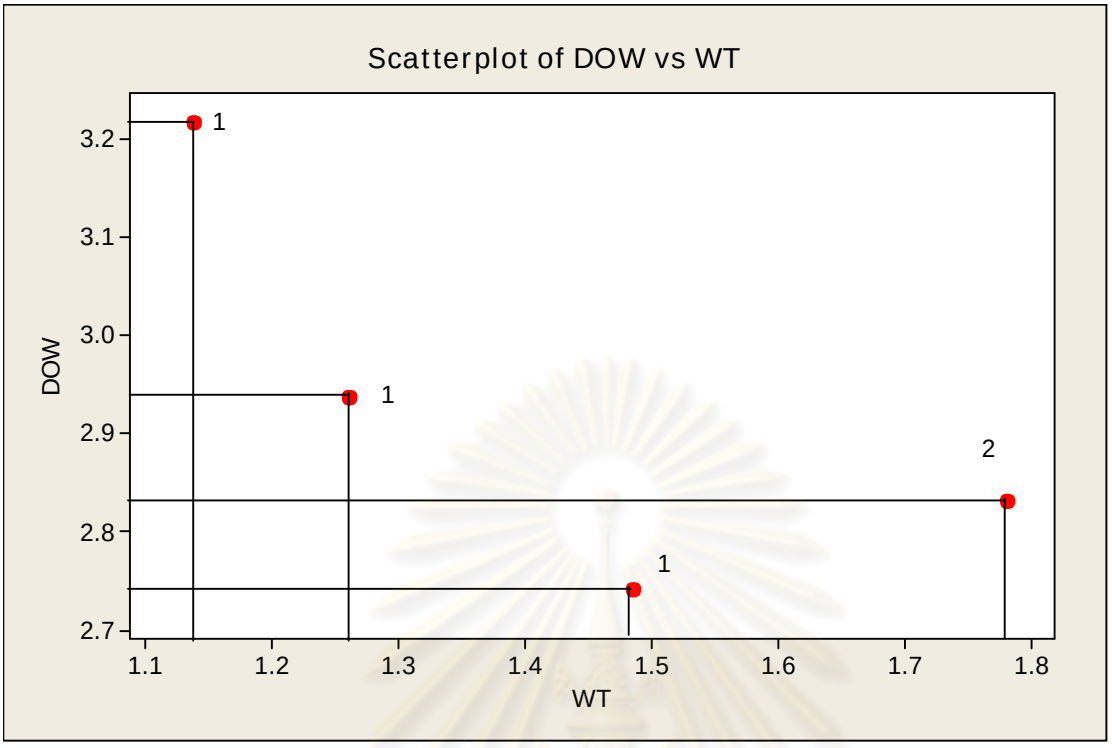
ตารางที่ 5.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	4	2.9364	1.2600
2	4	3.2178	1.1370
3	4	2.7419	1.4849
4	4	2.8320	1.7792
5	4	2.9364	1.2600

5.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่

ในการคัดเลือกคำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่เราจะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงของประชากรในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ค่า Dummy Fitness ของประชากร

ตารางที่ 5.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.9364	1.2600
2	1	3.2178	1.1370
3	1	2.7419	1.4849
4	2	2.8320	1.7792
5	1	2.9364	1.2600

หลังจากทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงแล้วเราจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประชากร (Crowding Distance) โดย Crowding Distance เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกประชากรคำตอบภายในอันดับเดียวกัน เราสามารถคำนวณค่า Crowding Distance จาก

$$cd_k\left(x_{[i,k]}\right)=\frac{f_k\left(x_{[i+1,k]}\right)-f_k\left(x_{[i-1,k]}\right)}{f_k^{\max}-f_k^{\min}} \quad (5.4)$$

เมื่อ $x_{[i,k]}$ = สมาชิกคำตอบที่ i ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ที่ได้รับการเรียงลำดับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

จากนั้นเราจะคำนวณผลรวมของค่า Crowding Distance ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ตัว จะได้ว่า $cd(x)=\sum cd_k(x)$ โดยค่า Crowding Distance ของคำตอบนั้น ๆ จะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจายของคำตอบมากน้อยเพียงใด โดยค่า Crowding Distance มากจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจายซึ่งเมื่อพิจารณาประชากรคำตอบทั้งหมดจะได้ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ดังนี้

ตารางที่ 5.9 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2	2.9364	1.2600
2	1	Inf	3.2178	1.1370
3	1	Inf	2.7419	1.4849
4	2	Inf	2.8320	1.7792
5	1	2	2.9364	1.2600

จากนั้นเราจะพิจารณาสตริงคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่แย่ (Bad Solution) จากผลการจัดลำดับความแข็งแรงซึ่งจะกำหนดจำนวนของสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ เป็นจำนวน ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง เท่ากับ 0.2 X 5 = 1 สตริงคำตอบซึ่งจะได้ผลการคัดเลือกดังนี้

ตารางที่ 5.10 สตริงคำตอบที่ดีและแย่

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	Selection
1	2.9364	1.2600	1	2	
2	3.2178	1.1370	1	Inf	
3	2.7419	1.4849	1	Inf	Good Solution
4	2.8320	1.7792	2	Inf	Bad Solution
5	2.9364	1.2600	1	2	

5.3.6 การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของตารางความน่าจะเป็นทั้ง 2 ตารางจะทำโดยการให้รางวัล (Reward) หรือเพิ่มความน่าจะเป็นในการถูกเลือกกับสตริงคำตอบที่ดี และทำการลงโทษ (Punish) หรือลดความน่าจะเป็นในการถูกเลือก กับสตริงคำตอบที่แย่ เพื่อปรับปรุงตารางไว้ใช้ในการสร้างประชากรรอบต่อไป และทำให้โอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่ดีในรอบถัดไปมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นการลดโอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่แย่ โดยกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish) เท่ากับ 0.1

จากสตริงคำตอบที่ทำการคัดเลือกได้สตริงคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่แย่ (Bad Solution) ดังนี้

Good Solution : String 3 = [1 4 2 3 7 5 6]

Bad Solution : String 4 = [1 2 4 5 6 7 3]

5.3.6.1 กรณีสตริงคำตอบที่ดี (Good Solution)

สตริงคำตอบที่ดีที่ถูกนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นจากตัวอย่างพบว่างานในขั้นแรกของสตริงคำตอบที่ดีคือขั้นงานที่ 1 โดยจะทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นที่ตำแหน่ง (1,1) เท่ากับ $k/n = 0.1/7 = 0.0143$ และลดค่าที่ตำแหน่ง (1,1), (1,2), (1,3),..., (1,11), (1,12) เท่ากับ $k/(n)^2 = 0.1/49 = 0.0020$ ดังนี้

คู่ลำดับที่มีการให้รางวัล (Reward)

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1429+0.0143 = 0.1572

คู่ลำดับที่มีลดค่าความน่าจะเป็น

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1572-0.0020 = 0.1552
ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0020 = 0.1409
ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0020 = 0.1409
ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0020 = 0.1409
ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0020 = 0.1409
ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0020 = 0.1409
ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0020 = 0.1409

ตารางที่ 5.11 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่ดี

1	2	3	4	5	6	7
0.1552	0.1409	0.1409	0.1409	0.1409	0.1409	0.1409

จากนั้นทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) โดยสตริงคำตอบที่ดีจะมีคู่ลำดับที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น คือ (1,4), (4,2), (2,3), (3,7), (7,5), (5,6) โดยในลำดับแรกจะทำการให้รางวัล (Reward) หรือการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับแรกที่ตำแหน่ง (1,4) เท่ากับ $k/m = 0.1/6 = 0.0167$ และลดค่าแก่คู่ลำดับในตำแหน่งที่เหลือเท่ากับ $k/(m)^2 = 0.1/36 = 0.0028$ ยกเว้นในคอลัมน์ที่มีค่าเป็น 0

คู่ลำดับที่มีการให้รางวัล (Reward)

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1667+0.0167 = 0.1834

คู่ลำดับที่มีการลดค่าความน่าจะเป็น

ตำแหน่งที่ (1,1) ไม่มีการลดค่า
ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1667-0.0028 = 0.1639
ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1667-0.0028 = 0.1639

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1834-0.0028 = 0.1806

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1667-0.0028 = 0.1639

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1667-0.0028 = 0.1639

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1667-0.0028 = 0.1639

คู่ลำดับทีสองทีตำแหน่ง (4,2) โดยทำการให้รางวัล (Reward) หรือการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับแรกทีตำแหน่ง (4,2) เท่ากับ $k/m = 0.1/5 = 0.0200$ และลดค่าแก่คู่ลำดับในตำแหน่งทีเหลือเท่ากับ $k/(m)^2 = 0.1/25 = 0.0040$ ยกเว้นในคอลัมน์ทีมีค่าเป็น 0

คู่ลำดับทีมีการให้รางวัล (Reward)

ตำแหน่งที (4,2) มีค่าเท่ากับ 0.2000+0.0200 = 0.2200

คู่ลำดับทีมีการลดค่า

ตำแหน่งที (4,1)) ไม่มีการลดค่า

ตำแหน่งที (4,2) มีค่าเท่ากับ 0.2200-0.0040 = 0.2160

ตำแหน่งที่ (4,3) มีค่าเท่ากับ 0.2000-0.0040 = 0.1960

ตำแหน่งที่ (4,4)) ไม่มีการลดค่า

ตำแหน่งที่ (4,5) มีค่าเท่ากับ 0.2000-0.0040 = 0.1960

ตำแหน่งที่ (4,6) มีค่าเท่ากับ 0.2000-0.0040 = 0.1960

ตำแหน่งที่ (4,7) มีค่าเท่ากับ 0.2000-0.0040 = 0.1960

และทำการปรับปรุงตารางจนครบทุกคู่ลำดับสตริงคำตอบทีดี จะได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.12 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่ดี

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.1639	0.1639	0.1806	0.1639	0.1639	0.1639
2	0.000	0.0000	0.2160	0.1960	0.1960	0.1960	0.1960
3	0.196	0.0000	0.0000	0.1960	0.1960	0.1960	0.2160
4	0.000	0.2160	0.1960	0.0000	0.1960	0.1960	0.1960
5	0.196	0.0000	0.1960	0.1960	0.0000	0.2160	0.1960
6	0.200	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000	0.2000
7	0.196	0.1960	0.1960	0.0000	0.2160	0.1960	0.0000

5.3.6.2 **กรณีสตริงคำตอบทีแย่** (Bad Solution)

สตริงคำตอบทีแย่ที่ถูกนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นจากตัวอย่างพบว่างานในขั้นแรกของสตริงคำตอบทีดีคือข้นงานที 1 โดยจะทำการลดค่าความน่าจะเป็นที่ตำแหน่ง (1,1) เท่ากับ $k/n = 0.1/7 = 0.0143$ และเพิ่มค่าที่ตำแหน่ง (1,1), (1,2), (1,3),…, (1,11), (1,12) เท่ากับ $k/(n)^2 = 0.1/49 = 0.0020$ ดังนี้

คู่ลำดับที่มีการลงโทษ (Punish)

ตำแหน่งที (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1552-0.0083 = 0.1409

คู่ลำดับที่มีการเพิ่มค่า

ตำแหน่งที (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1409+0.0020 = 0.1429

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.13 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่แย่

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

จากนั้นทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) โดยสตริงคำตอบที่แย่จะมีคู่ลำดับที่จะนำมาปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น คือ (1,2), (2,4), (4,5), (5,6), (6,7), (7,3) โดยในลำดับแรกจะทำการให้ลงโทษ (Punish) หรือการลดค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับแรกที่ตำแหน่ง (1,4) เท่ากับ $k/m = 0.1/6 = 0.0167$ และเพิ่มค่าแก่คู่ลำดับในตำแหน่งที่เหลือเท่ากับ $k/(m)^2 = 0.1/36 = 0.0028$ ยกเว้นในคอลัมน์ที่มีค่าเป็น 0

คู่ลำดับที่มีการลงโทษ (Punish)

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1639-0.0167 = 0.1472

คู่ลำดับที่มีการเพิ่มค่า

ตำแหน่งที่ (1,1) ไม่มีการเพิ่มค่า
ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1472+0.0028 = 0.1500
ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1639+0.0028 = 0.1667
ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1806+0.0028 = 0.1834
ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1639+0.0028 = 0.1667
ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1639+0.0028 = 0.1667
ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1639+0.0028 = 0.1667

คู่ลำดับที่สองที่ตำแหน่ง (2,4) โดยเริ่มจากการลงโทษ (Punish) หรือการลดค่า เท่ากับ $k/m = 0.1/5 = 0.0200$ และลดค่าแก่คู่ลำดับในตำแหน่งที่เหลือเท่ากับ $k/(m)^2 = 0.1/25 = 0.0040$ ยกเว้นในคอลัมน์ที่มีค่าเป็น 0

คู่ลำดับที่มีการลงโทษ (Punish)

ตำแหน่งที่ (2,4) มีค่าเท่ากับ 0.1960-0.0200 = 0.1760

คู่ลำดับที่มีการเพิ่มค่า

ตำแหน่งที่ (2,1) ไม่มีการลดค่า

ตำแหน่งที่ (2,2) ไม่มีการลดค่า

ตำแหน่งที่ (2,3) มีค่าเท่ากับ 0.2160+0.0040 = 0.2200

ตำแหน่งที่ (2,4) มีค่าเท่ากับ 0.1760+0.0040 = 0.1800

ตำแหน่งที่ (2,5) มีค่าเท่ากับ 0.1960+0.0040 = 0.2000

ตำแหน่งที่ (2,6) มีค่าเท่ากับ 0.1960+0.0040 = 0.2000

ตำแหน่งที่ (2,7) มีค่าเท่ากับ 0.1960+0.0040 = 0.2000

และทำการปรับปรุงตารางจนครบทุกคู่ลำดับสตริงคำตอบที่แย่ จะได้ดังนี้

ตารางที่ 5.14 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) หลังการปรับปรุงจากสตริงคำตอบที่แย่

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1500	0.1667	0.1834	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.0000	0.0000	0.2200	0.1800	0.2000	0.2000	0.2000
3	0.2000	0.0000	0.0000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
4	0.0000	0.2200	0.2000	0.0000	0.1800	0.2000	0.2000
5	0.2000	0.0000	0.1800	0.2000	0.0000	0.2200	0.2000
6	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000	0.2000
7	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.2200	0.1800	0.0000

ซึ่งตารางความน่าจะเป็นที่ได้จะถูกนำไปใช้เพื่อสร้างประชากรในรอบต่อไป

5.3.7 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเก็บค่าที่ดีสุดจะทำการเก็บค่าที่อยู่ใน frontier ที่ 1 ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นรอบการทำงานรอบแรกเราจะได้สตริงคำตอบซึ่งให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดเป็น

ตารางที่ 5.15 สตริงคำตอบทีดีทีสุดในรอบที่ 1

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[1 4 7 2 3 5 6]
2	[1 4 7 2 3 5 6]
3	[1 4 2 3 7 5 6]
5	[1 2 4 5 3 7 6]

5.3.8 การดำเนินการในรอบที่ 2

การสร้างประชากรเริ่มต้น

ประชากรเริ่มต้นในรอบที่ 2 จะสร้างจากตารางความน่าจะเป็นในตารางที่ 5.13 และตารางที่ 5.14 ซึ่งจะได้ประชากรเป็น

ตารางที่ 5.16 ประชากรเริ่มต้นในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[1 2 3 5 6 4 7]
2	[1 2 4 7 3 5 6]
3	[1 2 4 5 6 3 7]
4	[1 2 3 5 4 6 7]
5	[1 4 2 3 7 5 6]

การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

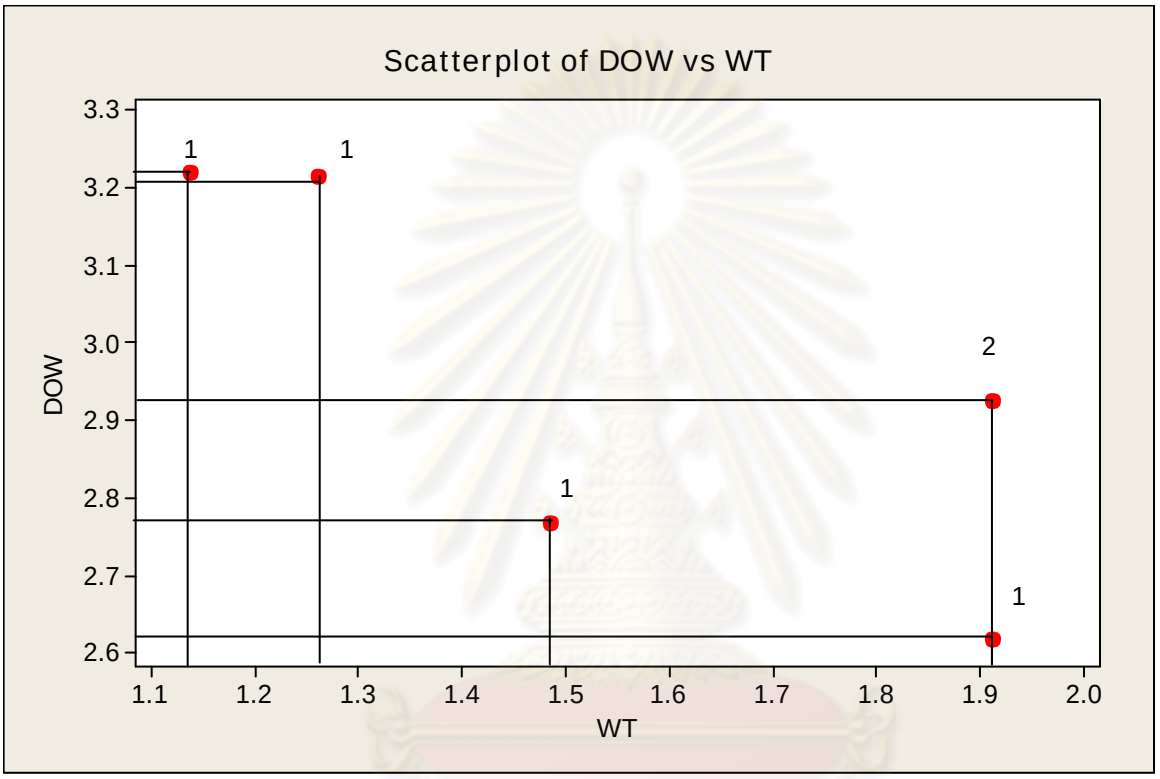
จากค่าประชากรในตารางที่ 5.16 เราสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้เป็น

ตารางที่ 5.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้นในรอบที่ 2

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	4	2.6179	1.9108
2	4	2.7689	1.4849
3	4	3.2157	1.2600
4	4	2.9263	1.9108
5	4	3.2218	1.1370

การคัดเลือกคำตอบที่ดีและแย่

ในการคัดเลือกคำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่เราจะพิจารณาจากค่าความแข็งแรงของประชากรในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 5.4 ค่า Dummy Fitness ของประชากรในรอบที่ 2

ตารางที่ 5.18 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบในรอบที่ 2

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.6179	1.9108
2	1	2.7689	1.4849
3	1	3.2157	1.2600
4	1	2.9263	1.9108
5	2	3.2218	1.1370

หลังจากทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงแล้วเราจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประชากร (Crowding Distance) ได้เป็น

ตารางที่ 5.19 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	Inf	2.6179	1.9108
2	1	1.8309	2.7689	1.4849
3	1	1.1996	3.2157	1.2600
4	1	Inf	2.9263	1.9108
5	2	Inf	3.2218	1.1370

จากนั้นเราจะพิจารณาสตริงคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่แย่ (Bad Solution) จากผลการจัดลำดับความแข็งแรงซึ่งจะกำหนดจำนวนของสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ เป็นจำนวน ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบเพื่อปรับปรุงตาราง เท่ากับ 0.2 X 5 = 1 สตริงคำตอบซึ่งจะได้ผลการคัดเลือกดังนี้

ตารางที่ 5..20 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	Selection
1	2.6179	1.9108	1	Inf	
2	2.7689	1.4849	1	1.8309	
3	3.2157	1.2600	1	1.1996	Good Solution
4	2.9263	1.9108	1	Inf	
5	3.2218	1.1370	2	Inf	Bad Solution

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น

จากตารางที่ 5.19 เราจะได้สตริงคำตอบที่ดีและแย่เป็น

Good Solution : String 3 = [1 2 4 5 6 3 7]

Bad Solution : String 5 = [1 4 2 3 7 5 6]

ซึ่งเมื่อทำการปรับปรุงตารางการขั้นตอนที่ได้แสดงในรอบแรกจะได้ตารางความน่าจะเป็นใหม่คือ

ตารางที่ 5.21 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) หลังการปรับปรุงในรอบที่ 2

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

ตารางที่ 5.22 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) หลังการปรับปรุงในรอบที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0	0.1333	0.1667	0.2001	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.0	0.0000	0.2400	0.1600	0.2000	0.2000	0.2000
3	0.2	0.0000	0.0000	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
4	0.0	0.2400	0.2000	0.0000	0.1600	0.2000	0.2000
5	0.2	0.0000	0.1600	0.2000	0.0000	0.2400	0.2000
6	0.2	0.2000	0.2000	0.2000	0.0000	0.0000	0.2000
7	0.2	0.2000	0.2000	0.0000	0.2400	0.1600	0.0000

ซึ่งตารางความน่าจะเป็นที่ได้จะถูกนำไปใช้เพื่อสร้างประชากรในรอบต่อไป

การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเก็บค่าที่ดีสุดจะทำการเก็บค่าที่อยู่ใน frontier ที่ 1 ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5.23 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
รอบก่อนหน้า	1	[1 4 7 2 3 5 6]
	2	[1 4 7 2 3 5 6]
	3	[1 4 2 3 7 5 6]
	4	[1 2 4 5 3 7 6]
รอบปัจจุบัน	5	[1 2 3 5 6 4 7]
	6	[1 2 4 7 3 5 6]
	7	[1 2 4 5 6 3 7]
	8	[1 2 3 5 4 6 7]

ซึ่งเราจะสามารถหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจัดอันดับความแข็งแรงได้เป็น

ตารางที่ 5.24 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
5	2.6179	1.9108	1	Inf
3	2.7419	1.4849	1	1.3720
1	2.9364	1.2600	1	0.6149
4	2.9364	1.2600	1	0.6149
2	3.2178	1.1370	1	Inf
6	2.7689	1.4849	2	Inf
7	3.2157	1.2600	2	Inf
8	2.9263	1.9108	3	Inf

ซึ่งผลจากการจัดลำดับความแข็งแรงในตารางที่ 6.24 เราจะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งเราจะทำการเก็บไว้เพื่อใช้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าสำหรับรอบการทำงานถัดไปเป็น

ตารางที่ 5.25 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[1 2 3 5 6 4 7]
2	[1 4 2 3 7 5 6]
3	[1 4 7 2 3 5 6]
4	[1 2 4 5 3 7 6]
5	[1 4 7 2 3 5 6]

5.4 สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการนำอัลกอริทึมการบรรจวบ (Combinatorial Optimization with Coincidence : COIN) มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบมีหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งอัลกอริทึมการบรรจวบเป็นอัลกอริทึมแบบใหม่ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา โดยจะนำเอาคำตอบที่แย่เข้ามาใช้ในอัลกอริทึมด้วย อัลกอริทึมการบรรจวบนี้เป็นวิธีการทางฮิวริสติกที่มีพื้นฐานมาจากการใช้หลักการความน่าจะเป็นในการค้นหาคำตอบ โดยให้ความสำคัญกับคำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ เพื่อให้กระบวนการค้นหาคำตอบได้หลีกเลี่ยงการนำไปสู่คำตอบที่แย่ ส่งผลให้คำตอบในกระบวนการลดน้อยลง และสามารถทำให้ลดระยะเวลาในการค้นหาคำตอบลงได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและขั้นตอน และตัวอย่าง การวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธี วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคที่นำมาใช้นี้จะนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization) (Liao, Tseng, and Luarn, 2007) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

6.1 หลักการและแนวคิดของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) เป็นฮิวริสติกที่ได้แนวคิดมาจากการสังเกตฝูงนก (Kennedy and Eberhart, 1995) ซึ่งพบว่าเส้นทางในการหาอาหารของนกแต่ละตัวจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ส่วนคือ ประสบการณ์ส่วนตัวและประสบการณ์ของกลุ่ม ซึ่งได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในฮิวริสติกการหาค่าที่เหมาะสม วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคที่นำมาใช้นี้จะนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization) (Liao, et al., 2007) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยจะแทนที่นกแต่ละตัวด้วยอนุภาค ซึ่งแต่ละอนุภาคจะแสดงถึงคำตอบ 1 คำตอบในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแต่ละอนุภาคจะปรับเปลี่ยนเส้นทางของตัวเองโดยใช้ประสบการณ์ส่วนตัวและประสบการณ์ของกลุ่ม

6.2 ขั้นตอนการนำ DPSO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

ในการนำ DPSO ไปใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูนั้นเราสามารถสรุปขั้นตอนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 6.1

รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการทำงานของ DPSO

รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปพร้อมกับการนำเสนอตัวอย่างการใช้ DPSO ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 ตัวอย่างการนำ DPSO ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

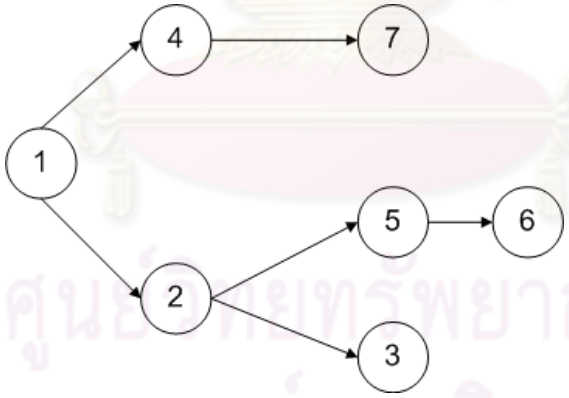
จากขั้นตอนที่ได้แสดงให้เห็นในหัวข้อ 6.2 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของ DPSO และแสดงตัวอย่างการนำ DPSO ไปใช้กับปัญหาขนาด 7 งานในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ได้ดังนี้

6.3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data Input)

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้

6.3.1.1 แผนภาพความสัมพันธ์รวม

แผนภาพความสัมพันธ์รวมจะแสดงถึงข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานในแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในตัวอย่างที่จะแสดงในหัวข้อนี้จะมีผลิตภัณฑ์เพียง 1 ชนิดเราสามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์รวมได้ดังนี้



รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม

6.3.1.2 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

จะแสดงว่าแต่ละขั้นงานใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใดถ้าปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 ผลิตภัณฑ์เวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนจะต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ในขั้นงานนั้นๆ

ตาราง 6.1 เวลาทำงานเฉลียของแต่ละข้นงาน

Task	Time(s)
1	1
2	5
3	4
4	3
5	5
6	6
7	5

6.3.1.3 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

เป็นตารางแสดงเวลาทีพนักงานแต่ละคนจะใช้เมือเดินจากตำแหน่งหนึงในสายการประกอบไปยังอีกตำแหน่งหนึงซึงตำแหน่งในตารางจะหมายถึงตำแหน่งในสายการประกอบโดยตำแหน่งที 1 คือตำแหน่งของข้นงานแรกในด้านหน้าของสายการประกอบ และตำแหน่งที 7 ซึงเป็นตำแหน่งสุดท้ายคือข้นงานแรกทีเข้ามาจากด้านหลังของสายการประกอบ

ตาราง 6.2 เวลาทีพนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.21	0.42	0.5354	0.4696	0.297	0.21
2	0.21	0	0.21	0.332	0.297	0.21	0.297
3	0.42	0.21	0	0.1485	0.21	0.297	0.4696
4	0.5354	0.332	0.1485	0	0.1485	0.332	0.5354
5	0.4696	0.297	0.21	0.1485	0	0.21	0.42
6	0.297	0.21	0.297	0.332	0.21	0	0.21
7	0.21	0.297	0.4696	0.5354	0.42	0.21	0

6.3.1.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

จากแผนภาพความสัมพันธ์รวมเราจะนำความสัมพันธ์ทีได้มาสร้างเป็นตารางเพือให้ง่ายก็การนำไปใช้คำนวณ

ตาราง 6.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 6.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0

6.3.1.5 **พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง**

พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่างนี้คือ

- จำนวนฝูง 2 ฝูง
- จำนวนประชากรในแต่ละฝูง 3 ตัว
- รอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที
- งานด้านหน้า:ด้านหลัง:ด้านข้าง เป็น 3:3:1
- ค่า ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ C_1 C_2 มีค่า = 0.1
- ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง เท่ากับ 1
- ค่าสุ่ม r มีค่าเท่ากับ 1

6.3.2 การสร้างตัวดำเนินการเริ่มต้น

ตารางเส้นทางการเคลื่อนที

การสร้างตารางเส้นทางการเคลื่อนทีจะสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเลือกเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆ ซึ่งค่าในตารางเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ 0 โดยมีขนาดเท่ากับ $n \times n$ เมื่อ n คือ จำนวนงานทั้งหมด

ตารางตำแหน่งของอนุภาค

จะเป็นตารางที่แสดงลำดับของงานเป็นลักษณะ Job to Priority โดยตำแหน่งของอนุภาคที่ได้จะอยู่ในตำแหน่งของตารางเช่น ถ้าคู่ลำดับ (1,4) มีค่าเท่ากับ 1 จะหมายความว่างานที่ 1 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเท่ากับ 4 เป็นต้นในการสร้างตารางตำแหน่งของอนุภาคในรอบการทำงานแรกจะสุ่มค่าสตริงมาจำนวนเท่ากับจำนวนฝูงโดยในงานวิจัยนี้เราจะสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นเป็นค่าสิทธิในการเลือกงานเช่นเดียวกับ NSGAII ซึ่งจะได้ค่าสตริงคำตอบเริ่มต้นเป็น

String 11 = [7 1 4 3 6 5 2]

String 21 = [4 1 3 5 7 6 2]

โดย String11จะหมายถึงอนุภาคที่1 ของฝูงที่ 1 ในขณะที่ String 21 จะหมายถึงอนุภาคที่ 1 ของฝูงที่ 2 ซึ่งจากทั้ง 2 สตริงคำตอบข้างต้นเราจะสามารถสร้างตารางตำแหน่งของอนุภาคได้เป็น

ตาราง 6.5 ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0

ตาราง 6.6 ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	1	0
7	0	1	0	0	0	0	0

6.3.3 การประเมินค่า

เมื่อทำการจัดสรรพนักงานลงในสายการประกอบแล้วเราจะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทั้ง 3 วัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. เพื่อให้จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

$$f_2(x) = Minimum \quad (n) \tag{6.1}$$

2. ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(C - C_{jk})^2}{m}} \tag{6.2}$$

โดยที่ $C_{jk} = T_{jk} + WT_{jk}$

เมื่อ n = จำนวนพนักงาน

m = จำนวนงานทั้งหมด

C = รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

C_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ไปในงาน k

T_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ในการปฏิบัติงาน k

WT_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ในเดินไปทำงาน k

3. เวลาเดินของพนักงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$WT = \alpha \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} l_{jk} + c_{jk} + r_{jk} \qquad (6.3)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์เวลาเดินของพนักงาน

l_{ij} = ระยะทางที่พนักงาน j ใช้เดินไปทำงาน k

c_{jk} = ระยะทางที่ใช้เดินข้ามฝั่งไปทำงาน k

r_{jk} = ระยะทางในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก

ซึ่งจากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตาราง

ตารางที่ 6.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
11	1	2.9364	1.260
21	1	3.2178	1.137

6.3.4 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

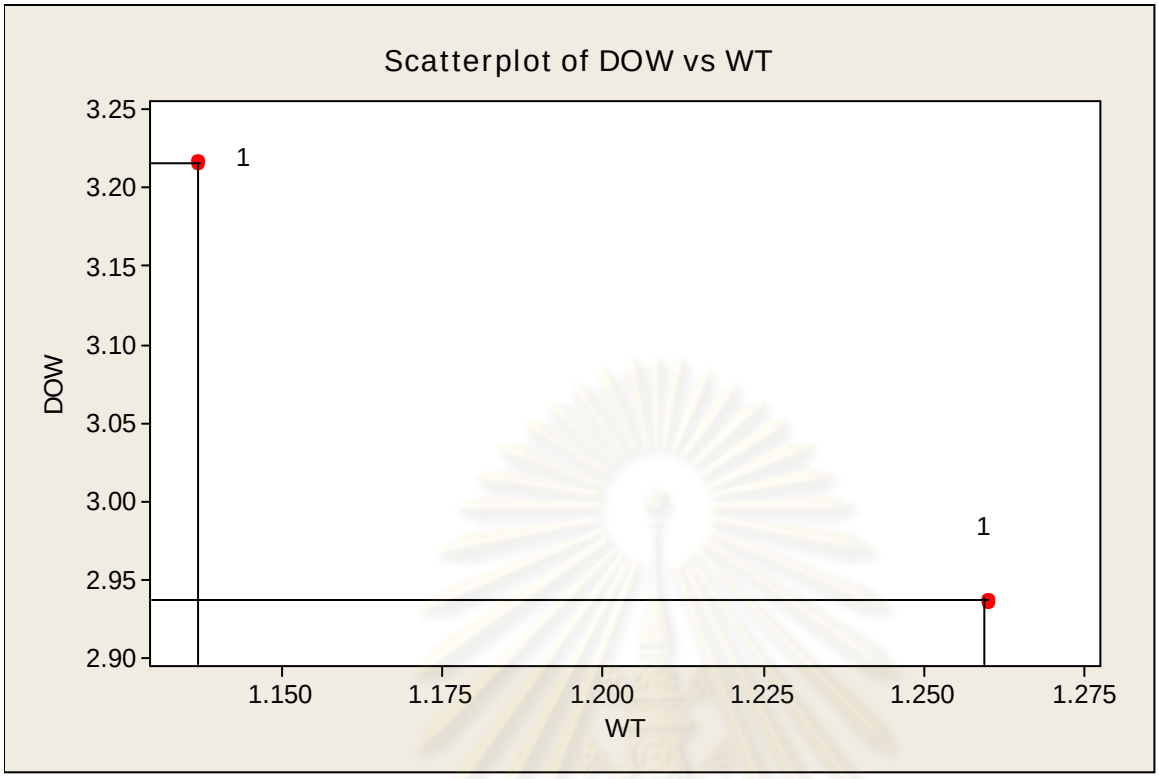
ในขั้นตอนนี้เราจะทำการประเมินค่าสตริงคำตอบที่ได้ โดยการกำหนดค่าความแข็งแรงเพื่อจะนำมาคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Local Best Solution : Lbest) และหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Global Best Solution : Gbest)

Lbest ของประชากรแต่ละฝูงจะหมายถึงประชากรที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงซึ่งในการดำเนินการรอบแรกแต่ละฝูงจะมีประชากรเพียง 1 ประชากรดังนั้นเราจะได้ค่า Lbest เป็น

ตารางที่ 6.8 ค่า Lbest ของประชากรในรอบแรก

ฝูงที่	สตริงคำตอบ	String Priority
1	11	[7 1 4 3 6 5 2]
2	21	[4 1 3 5 7 6 2]

ในส่วนของ Gbest จะหมายถึงประชากรที่ดีที่สุดของประชากรรวมทุกฝูงซึ่งในรอบการทำงานแรกจะมีจำนวนประชากรเพียง 2 ตัวซึ่งทำการหาค่าความแข็งแรงจะได้ผลคือ



รูปที่ 6.3 ค่าความแข็งแรงของประชากรเริ่มต้น

เนื่องจากคำตอบทั้ง 2 มีอัดับความแข็งแรงเท่ากันดังนั้นเราจะทำการสุ่มคำตอบเพื่อเป็น Gbest เพียง 1 คำตอบซึ่งในที่นี้สุ่มได้ $String_{11}$

ตารางที่ 6.9 ค่า Gbest ของประชากรในรอบแรก

สตริงคำตอบ	String Priority
11	[7 1 4 3 6 5 2]

6.3.5 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) โดยอาศัยค่า Lbest และ Gbest ตามสมการ

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \tag{6.4}$$

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1 r_1 \left(L_{(i,j)} - X_{(i,j)}\right) + c_2 r_2 \left(G_{(i,j)} - X_{(i,j)}\right) \tag{6.5}$$

เมื่อ i คือ รอบในการทำงาน

j คือ สัญลักษณ์แทนฝูงที่ j

w คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง (Inertia weight)

c_1 และ c_2 คือ สัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning factor)

r_1 และ r_2 คือ ค่าสุ่มในช่วง (0,1)

$L_{(i,j)}$ คือ ค่าตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i

$G_{(i,j)}$ คือ ค่าตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรในรอบการทำงานที่ i

$X_{(i,j)}$ คือ ค่าตำแหน่งของคำตอบของประชากรของฝูงที่ j ในรอบการทำงานที่ i

จากสมการที่ เราจะทำการปรับปรุงค่าตำแหน่งของอนุภาคโดย $X_{(i-1,j)}$ ของการทำงานในรอบแรกจะเป็น zero matrix ซึ่งจะทำให้เราได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

ตารางที่ 6.10 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.11 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	1	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	1	0
7	0	1	0	0	0	0	0

จากสมการที่ 6.5 จะทำให้เราสามารถปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้เป็น

ตารางที่ 6.12 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.13 ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.1
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-0.1
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-0.1	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.6 การสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไป

เราสามารถสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไปจาก การใช้ Sigmoid Function ซึ่งจะทำการแปลงค่าตารางทิศทางการเคลื่อนที่ให้เป็นตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรในรอบถัดไปโดยใช้สมการ

$$s(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1+\exp(-V_{(i,j)})} \qquad (6.6)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรในรอบการทำงานที่ 2 เป็น

ตารางที่ 6.14 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
3	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
4	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
5	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
6	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
7	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

ตารางที่ 6.15 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.500	0.500	0.500	0.475	0.500	0.500	0.525
2	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
3	0.500	0.500	0.475	0.525	0.500	0.500	0.500
4	0.500	0.500	0.525	0.500	0.475	0.500	0.500
5	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.525	0.475
6	0.500	0.500	0.500	0.500	0.525	0.475	0.500
7	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

6.3.7 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเก็บค่าที่ดีสุดจะทำการเก็บค่าที่มีค่าความแข็งแรงดีที่สุด ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นรอบการทำงานรอบแรกเราจะได้สตริงคำตอบซึ่งให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดเป็น

ตารางที่ 6.16 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 1

สตริงคำตอบที่	String Priority
1	[7 1 4 3 6 5 2]
2	[4 1 3 5 7 6 2]

6.3.8 การดำเนินการในรอบที่ 2

การดำเนินการในรอบที่ 2 จะเริ่มต้นจากการสร้างประชากรเริ่มต้นโดยจะสร้างประชากรจำนวนทั้งหมด 2 ฝูงแต่ละฝูงมีประชากร 3 ประชากรโดยในฝูงที่ 1 จะสร้างประชากรจากตารางที่ 6.14 และประชากรในฝูงที่ 2 จะสร้างจากตารางที่ 6.15 โดยจะสร้าง โดยดูจากคอลัมน์ในตารางเช่น ในคอลัมน์ที่ 1 จะทำการสุ่มค่าสิทธิในการเลือกงานในตำแหน่งแรกออกมา โดยค่าในตารางจะแสดงถึงโอกาสที่จะถูกเลือกสมมุติว่าสุ่มได้งาน 7 ให้ทำการปรับค่าในแถวที่ 7 เป็น 0 จากนั้นก็พิจารณาในคอลัมน์ที่ 2 ทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าสิทธิในการเลือกงานครบตามจำนวนงาน ซึ่งจะได้ประชากรเริ่มต้นของการดำเนินงานในรอบที่ 2 ดังนี้

ฝูงที่ 1 : String Priority 11 = [7 1 4 3 6 5 2]
String Priority 12 = [4 1 3 5 7 6 2]
String Priority 13 = [5 1 2 3 7 6 4]
ฝูงที่ 2 : String Priority 21 = [5 2 7 1 3 4 6]
String Priority 22 = [7 2 4 1 3 6 5]
String Priority 23 = [5 1 2 3 7 6 4]

จากสตริงคำตอบข้างต้นเราสามารถหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้เป็น

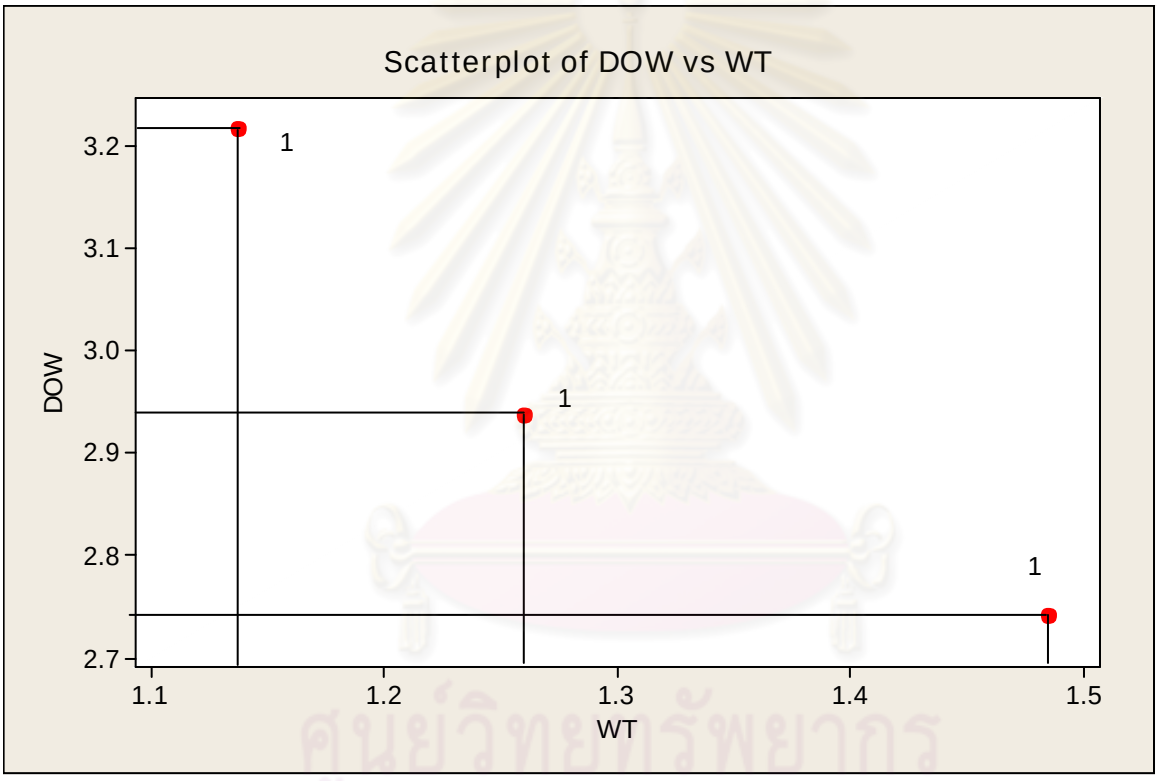
ตารางที่ 6.17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้นในการดำเนินการรอบที่ 2

ฝูงที่	สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	11	4	2.9364	1.2600
	12	4	3.2178	1.1370
	13	4	2.7419	1.4849
2	21	4	2.8320	1.7792
	22	4	2.9364	1.2600
	23	4	2.7419	1.4849

การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการประเมินค่าสตริงคำตอบที่ได้ โดยการกำหนดค่าความแข็งแรงเพื่อจะนำมาคัดเลือกหาสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Local Best Solution : Lbest) และหาสตริงคำตอบที่ดีของประชากรทั้งหมด (Global Best Solution : Gbest)

Lbest ของประชากรแต่ละฝูงจะหมายถึงประชากรที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงซึ่งในการดำเนินการรอบที่สองแต่ละฝูงจะมีประชากร 3 ประชากรดังนั้นเราจะทำการจัดลำดับความแข็งแรงของประชากรในแต่ละฝูงได้เป็น

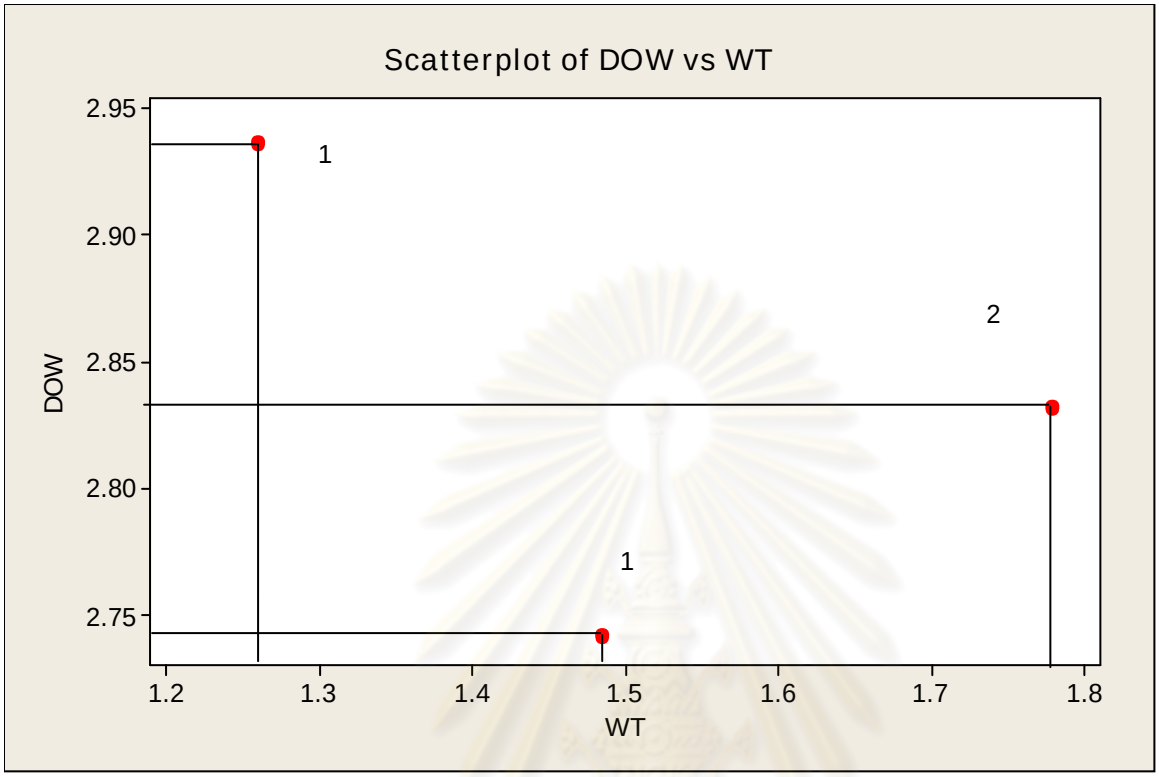


รูปที่ 6.4 การจัดอันดับแบบ Goldberg ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

ตารางที่ 6.18 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1ในรอบการดำเนินการรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	Front	Crowding Distance	Selection
11	2.9364	1.2600	1	2.000	
12	3.2178	1.1370	1	Inf	Lbest
13	2.7419	1.4849	1	Inf	

ในขณะที่ฝูงที่ 2 เราจะสามารถจัดลำดับความแข็งแรงได้เป็น



รูปที่ 6.5 การจัดอันดับแบบ Goldberg ของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1 ในรอบที่ 2

ตารางที่ 6.19 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบในฝูงที่ 1ในรอบการดำเนินการรอบที่ 2

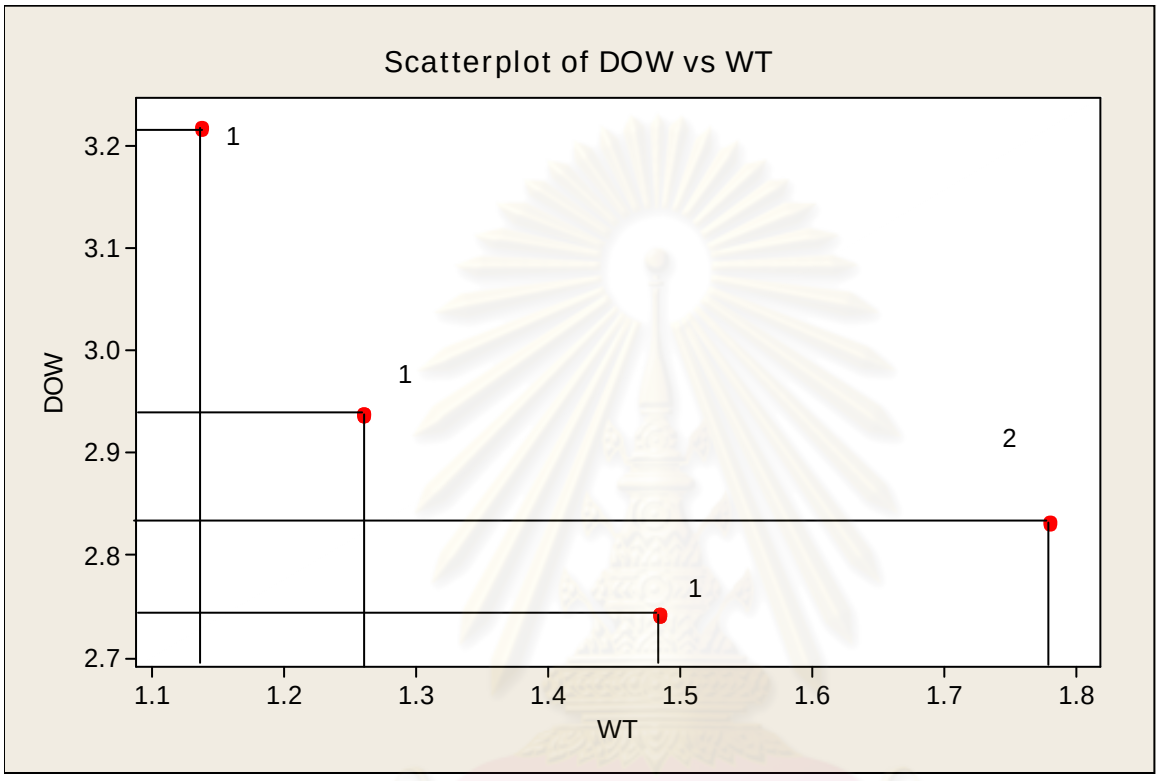
สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	Front	Crowding Distance	Selection
21	2.8320	1.7792	2	Inf	
22	2.9364	1.2600	1	Inf	
23	2.7419	1.4849	1	Inf	Lbest

จากตารางที่ 6.18 และ 6.19 จะทำให้ได้ค่า Lbest เป็น

ตารางที่ 6.20 ค่า Lbest ของประชากรในรอบที่ 2

ฝูงที่	สตริงคำตอบ	String Priority
1	11	[4 1 3 5 7 6 2]
2	21	[5 1 2 3 7 6 4]

ในส่วนของ Gbest จะหมายถึงประชากรที่ดีที่สุดของประชากรรวมทุกฝูงซึ่งในรอบการทำงานรอบที่ 2 จะมีจำนวนประชากร 6 ตัวซึ่งทำการหาค่าความแข็งแรงจะได้ผลคือ



รูปที่ 6.6 การจัดอันดับแบบ Goldberg ของสตริงคำตอบทั้งหมด ในรอบที่ 2

ตารางที่ 6.21 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบทั้งหมดในรอบการดำเนินการรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	Front	Crowding Distance	Selection
11	2.9364	1.2600	1	2.000	
12	3.2178	1.1370	1	Inf	Lbest
13	2.7419	1.4849	1	Inf	
21	2.8320	1.7792	2	Inf	
22	2.9364	1.2600	2	Inf	
23	2.7419	1.4849	1	Inf	

จากตารางที่ 6.21 จะทำให้เราสรุปค่า Gbest ได้เป็น

ตารางที่ 6.22 ค่า Gbest ของประชากรในรอบการดำเนินการที่ 2

สตริงคำตอบ	String Priority
12	[4 1 3 5 7 6 2]

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) โดยอาศัยค่า Lbest และ Gbest

ตารางที่ 6.23 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.24 ตารางตำแหน่งของอนุภาค ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.1
2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.9	0.1	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.9	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	0.0
7	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

จากสมการที่ 6.5 จะทำให้เราสามารถปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของประชากรในฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 ได้เป็น

ตารางที่ 6.25 ตารางทิศทางการเคลื่อนทีของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6.26 ตารางทิศทางการเคลื่อนทีของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.00	0.00	0.00	-0.18	0.10	0.00	0.08
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.10	-0.18	0.08	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.18	0.00	-0.18	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	-0.08
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	-0.08	0.00
7	0.00	-0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00

การสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไป

เราสามารถสร้างสตริงคำตอบเพื่อใช้ในรอบถัดไปจาก การใช้ Sigmoid Function ซึ่งจะทำการแปลงค่าตารางทิศทางการเคลื่อนทีให้เป็นตารางทีใช้ในการสร้างประชากรในรอบถัดไปโดยซึ่งจะทำให้ได้ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรในรอบการทำงานที่ 3 เป็น

ตารางที่ 6.27 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 3

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
2	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
3	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
4	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
5	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
6	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
7	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500

ตารางที่ 6.28 ตารางที่ใช้ในการสร้างประชากรฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 3

	1	2	3	4	5	6	7
1	0.50	0.50	0.50	0.46	0.53	0.50	0.52
2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
3	0.50	0.53	0.46	0.52	0.50	0.50	0.50
4	0.50	0.50	0.54	0.50	0.46	0.50	0.50
5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.52	0.48
6	0.50	0.50	0.50	0.50	0.52	0.48	0.50
7	0.50	0.47	0.50	0.53	0.50	0.50	0.50

การเก็บค่าทีดีทีสุด

การเก็บค่าทีดีสุดจะทำการเก็บค่าทีมีค่าความแข็งแรงดีทีสุด ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบทีดีทีสุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบทีดีทีสุด เราจะได้สตริงคำตอบซึงให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทีดีทีสุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบันเป็น

ตารางที่ 6.29 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
รอบก่อนหน้า	1	[7 1 4 3 6 5 2]
	2	[4 1 3 5 7 6 2]
รอบปัจจุบัน	3	[7 1 4 3 6 5 2]
	4	[4 1 3 5 7 6 2]
	5	[5 1 2 3 7 6 4]
	6	[5 1 2 3 7 6 4]

ซึ่งเราจะสามารถหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจัดอันดับความแข็งแรงได้เป็น

ตารางที่ 6.30 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
5	2.7419	1.4849	1	Inf
1	2.9364	1.2600	1	1.0551
3	2.9364	1.2600	1	1.0551
2	3.2178	1.1370	1	0.9449
4	3.2178	1.1370	1	0.9449
6	2.7419	1.4849	1	Inf

ซึ่งผลจากการจัดลำดับความแข็งแรงในตารางที่ 6.29 เราจะได้สตริงคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งเราจะทำการเก็บไว้เพื่อใช้เป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าสำหรับรอบการทำงานถัดไปเป็น

ตารางที่ 6.31 สตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบการทำงานที่ 2

สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	[7 1 4 3 6 5 2]
2	[4 1 3 5 7 6 2]
3	[5 1 2 3 7 6 4]

6.4 สรุปท้ายบท

เนื้อหาที่กล่าวในบทนี้เป็นการนำวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคแบบ DPSO มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบมีหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่ง DPSO เป็นอัลกอริทึมที่มีพื้นฐานมาจากการพฤติกรรมการบินหาอาหารของฝูงนก ซึ่งได้ทำการจดจำเส้นทางจากประสบการณ์ที่เคยผ่านมาทั้งประสบการณ์ส่วนตัวและประสบการณ์ของฝูง โดยนกแต่ละตัวจะแทนด้วยอนุภาค (Particle) โดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ (Velocity) ไปในจุดหมายและทิศทางต่าง ๆ และทำการจดจำคำตอบที่ได้พบ ซึ่งอนุภาคทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ๆ เรียกว่า ฝูง (Swarm) โดยตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution : Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution : Gbest) ซึ่งสตริงคำตอบจะจดจำไว้เป็นประสบการณ์และใช้ในการปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่เพื่อให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนออัลกอริทึมใหม่คือ วิธีการหาค่าทีเหมาะสมทีสุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization With Negative Knowledge: PSONK) ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ วิธีการหาค่าทีเหมาะสมทีสุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ร่วมกับหลักการของอัลกอริทึมบรรจวบ (COIN) ซึ่งมีการใช้ความรู้เชิงลบเข้ามาช่วยในการหาคำตอบ ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและแนวคิด ขั้นตอนวิธีการทำงานและตัวอย่างการคำนวณ นอกจากนี้ยังจะอธิบายและยกตัวอย่างการใช้ M-PSONK ซึ่งเป็นการใช้การค้นหาเฉพาะทีเข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการหาค่าทีเหมาะสมทีสุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบอีกด้วย

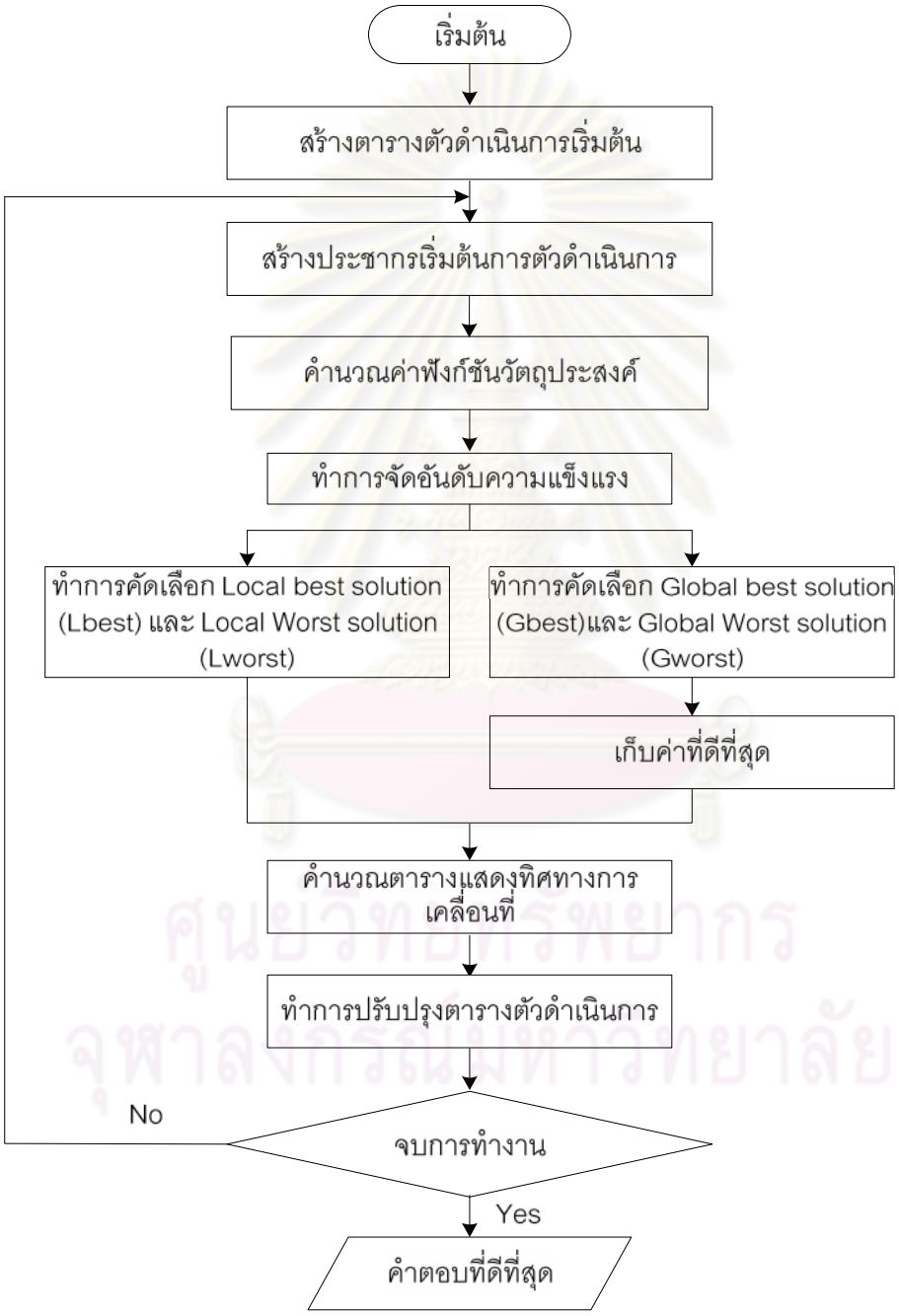
7.1หลักการและแนวคิดวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ

วิธีการหาค่าทีเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) จะเป็นฮิวริสติกทีประยุกต์ใช้แนวคิดของ วิธีการหาค่าทีเหมาะสมทีสุดแบบฝูงอนุภาค (PSO) ร่วมกับแนวความคิดในเรืองความรู้เชิงลบ(Negative Knowledge) โดยจะทำการตัดทอนคำตอบทีคิดว่าเป็นคำตอบทีแย่เพือมุ่งไปสู่ยังคำตอบทีคิดว่าเป็นคำตอบทีดี ดังนั้นจึงต้องมีการตัดลำดับของงานทีทำให้คำตอบแย่ โดยการลดความน่าจะเป็นและเพิมความน่าจะเป็นเมือลำดับของงานทำให้เกิดคำตอบทีแย่หรือคำตอบทีดี วิธีการทำลักษณะนี้ทำให้มีการตัดทอนลำดับของงานเพือให้พืนทีในการหาคำตอบแคบลง ลำดับของงานทีเหมาะสมจะมีให้เราเลือกตัดสินใจน้อยลง ซึงลำดับของงานทีเหลือในการเลือก จะเป็นเส้นทางทีมีความเหมาะสมตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทีเราสนใจ

กระบวนการหาคำตอบของวิธีการหาค่าทีเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ อัลกอริทึมบรรจวบทีได้กล่าวถึงในบทที 5 แต่จะแตกต่างกันทีลักษณะของการแบ่งประชากรออกเป็นกลุ่มย่อยๆตามลักษณะแนวคิดของ PSO โดยจะมีการสร้างตารางความน่าจะเป็นขึนมาเพือใช้ในการจัดลำดับของงาน และจะมีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น โดยความน่าจะเป็นในการเลือกลำดับของงานทีดีจะมีค่าเพิมขึน และลดความน่าจะเป็นของลำดับงานทีทำให้เกิดคำตอบทีแย่ลง โดยสตริงคำตอบทีมีส่วนการปรับปรุงตารางจะใช้ คำตอบทีดีทีสุดของแต่ละฝูงย่อย (Local Best Solution : L_{Best}) คำตอบทีแย่ทีสุดของแต่ละฝูงเรียกว่า ค่าทีไม่ (Local Worst Solution : L_{worst}) และคำตอบทีดีทีสุดของประชากร (Global Best Solution : G_{best}) คำตอบทีแย่ทีสุดของประชากร (Global Worst Solution : G_{worst}) ซึงสตริงคำตอบข้างต้นจะนำมาใช้ในการสร้างเส้นทางการเคลือนทีของอนุภาค(Velocity) ตามหลักการของ PSO เพือปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นต่อไป

7.2ขั้นตอนการนำ PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

เราสามารถแบ่งขั้นตอนวิธีการทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคได้ดังนี้



รูปที่ 7.1 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK

7.3ตัวอย่างการนำ PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

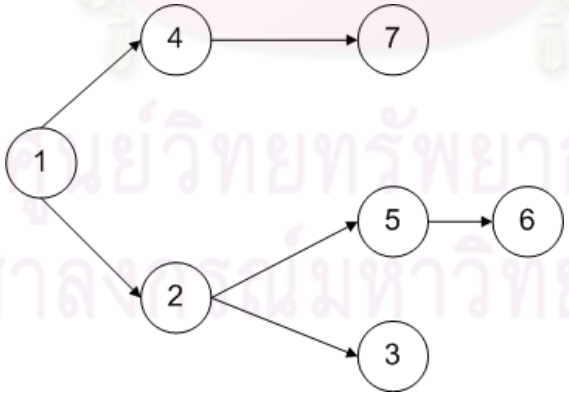
จากขั้นตอนของ PSONK ที่ได้นำเสนอมาข้างต้นเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูได้โดยในตัวอย่างที่จะแสดงต่อไปนี้เป็นปัญหาของ Merten ซึ่งมีจำนวนงานทั้งหมด 7 งาน และมีรอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที โดยมีขั้นตอนการแก้ปัญหาดังนี้

7.3.1 การเตรียมข้อมูล

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้

7.3.1.1 แผนภาพความสัมพันธ์รวม

แผนภาพความสัมพันธ์รวมจะแสดงถึงข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานในแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในตัวอย่างที่จะแสดงในหัวข้อนี้จะมีผลิตภัณฑ์เพียง 1 ชนิดเราสามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์รวมได้ดังนี้



รูปที่ 7.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม

7.3.1.2 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

จะแสดงว่าแต่ละขั้นงานใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใดถ้าปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 ผลิตภัณฑ์เวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนจะต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ในขั้นงานนั้นๆ

ตาราง 7.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Time(s)
1	1
2	5
3	4
4	3
5	5
6	6
7	5

7.3.1.3 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

เป็นตารางแสดงเวลาที่พนักงานแต่ละคนจะใช้เมื่อเดินจากตำแหน่งหนึ่งในสายการประกอบไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งซึ่งตำแหน่งในตารางจะหมายถึงตำแหน่งในสายการประกอบโดยตำแหน่งที่ 1 คือตำแหน่งของขั้นงานแรกในด้านหน้าของสายการประกอบ และตำแหน่งที่ 7 ซึ่งเป็นตำแหน่งสุดท้ายคือขั้นงานแรกที่เข้ามาจากด้านหลังของสายการประกอบ

ตาราง 7.2 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.21	0.42	0.5354	0.4696	0.297	0.21
2	0.21	0	0.21	0.332	0.297	0.21	0.297
3	0.42	0.21	0	0.1485	0.21	0.297	0.4696
4	0.5354	0.332	0.1485	0	0.1485	0.332	0.5354
5	0.4696	0.297	0.21	0.1485	0	0.21	0.42
6	0.297	0.21	0.297	0.332	0.21	0	0.21
7	0.21	0.297	0.4696	0.5354	0.42	0.21	0

7.3.1.4 **ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน**

จากแผนภาพความสัมพันธ์รวมเราจะนำความสัมพันธ์ที่ได้มาสร้างเป็นตารางเพื่อให้ง่ายก็การนำไปใช้คำนวณ

ตาราง 7.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า

Task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 7.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง

Task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0

7.3.1.5 **พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่าง**

พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่างนี้คือ

- จำนวน Swarm 2 กลุ่ม
- จำนวนอนุภาคในแต่ละSwarmมีจำนวน 3 อนุภาค
- รอบระยะเวลาการทำงาน 10 วินาที
- ค่า C_1 C_2 มีค่า = 0.1

- ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง w = 1

7.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างประชากรเบื้องต้นจะทำการเลือกสร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) เพื่อใช้ในการเลือกงานอันดับแรกที่จัดถูกเลือก

ในการสร้างตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ 1× n = 1×7 โดย n คือจำนวนข้นงานทั้งหมด และมีค่าความน่าจะเป็นเริมต้นเท่ากันทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1/7 = 0.1429

ตาราง 7.5 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของ ฝูง ที 1 ในรอบการทำงานแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

ตาราง 7.6 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของ ฝูง ที 2 ในรอบการทำงานแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

ในการสร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability)ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ n × n = 7×7 โดย n คือจำนวนข้นงานทั้งหมด โดยเส้นทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 หมด นอกจากเส้นแทยงมุมแล้วจะมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากันทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1/(7-1) = 0.1667

ตาราง 7.7 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ของฝูงที1ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
4	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0

ตาราง 7.8 ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ของฝูงที่2ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
4	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0

การสุ่มเลือกงานจากตารางความน่าจะเป็นข้างต้นเราจะทำการสุ่มเลือกงานแรกจากตารางความน่าจะเป็นสำหรับเลือกงานแรก โดยจะพิจารณาจากตารางความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) โดยจะพิจารณางานที่มีผลรวมในคอลัมน์เป็น 0 โดยในตัวอย่างนี้พบว่า งานที่เราสามารถเลือกจัดลงสถานีงานเป็นอันดับแรกมีเพียงงาน 1 เท่านั้น จากนั้นจะทำการปรับปรุงตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้า โดยให้แถวที่ 1 เท่ากับ 0 ทั้งหมด และให้คอลัมน์ที่ 1 เท่ากับ 1 ทั้งหมด เช่นเดียวกับตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหลังโดยจะทำการปรับปรุงให้แถวที่ 1 มีค่าเป็น 1 ทั้งหมดและให้คอลัมน์ที่ 1 เป็น 0 ทั้งหมด จากนั้นจึงทำการสุ่มเลือกงานลำดับถัดมาโดยพิจารณาตารางความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจะพบว่าคอลัมน์ที่มีผลรวมเป็น 0 ได้แก่งาน 2 และ และงาน 4 เท่านั้นซึ่งทั้ง 2 งานจะมีความน่าจะเป็นในการเลือกงานเท่ากัน สมมุติว่าสุ่มได้งาน 4 ทำการปรับปรุงตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหน้า และตารางความสัมพันธ์ในการทำงานข้างหลัง ทำซ้ำจนจัดงานทั้งหมดลงสายการประกอบจนครบ ดังแสดงในตาราง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7.9 ตารางการสร้างประชากรเริ่มต้น

NO.	TASK(font)	Task Sequence
1	1	1
2	2,4	4
3	2,7	2
4	3,5,7	5
5	3,6,7	3
6	6,7	7
7	6	6

ซึ่งสตริงคำตอบที่เราจะทำการสร้างขึ้นมาจะมีจำนวน 2 กลุ่มกลุ่มละ 3 คำตอบรวมทั้งสิ้น 6 คำตอบดังนี้โดย $String_{ij}$ จะหมายถึงคำตอบในรอบที่ I ของ Swarm ที่ j

ตารางที่ 7.10 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence						
11	1	4	2	5	3	7	6
12	1	2	3	4	7	5	6
13	1	2	4	7	5	6	3

ตารางที่ 7.11 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

Particle	Sequence						
21	1	2	3	5	6	4	7
22	1	2	5	4	6	3	7
23	1	4	2	3	7	5	6

7.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์

เราจะทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ด้วยกันได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงานน้อยที่สุด และเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

1. เพื่อให้จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

$$f_2(x) = Minimum \quad (n) \tag{7.1}$$

2. ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(C - C_{jk})^2}{m}} \tag{7.2}$$

โดยที่ $C_{jk} = T_{jk} + WT_{jk}$

เมื่อ n = จำนวนพนักงาน

m = จำนวนงานทั้งหมด

C = รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

C_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ไปในงาน k

T_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ใช้ในการปฏิบัติงาน k

WT_{jk} = เวลาที่พนักงาน j ในเดินไปทำงาน k

3. เวลาเดินของพนักงาน

$$WT = \alpha\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m} l_{jk} + c_{jk} + r_{jk} \tag{7.3}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์เวลาเดินของพนักงาน

l_{ij} = ระยะทางที่พนักงาน j ใช้เดินไปทำงาน k

c_{jk} = ระยะทางที่ใช้เดินข้ามฝั่งไปทำงาน k

r_{jk} = ระยะทางในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก

โดยงานที่ถูกเลือกมาทั้งหมดนั้นจะนำมาพิจารณางานในลักษณะของการหักงอเส้นตรงของสตริงคำตอบโดยจะใช้ฮิวริสติกในการเลือกงานแบบสุ่ม (Random Priority) ในที่นี้จะใช้ตัวอย่างจาก $String_{11}$ Particle ที่ 1 ซึ่งมีลำดับของงานคือ [1 4 2 5 3 7 6] งานที่ถูกพิจารณาเป็นคู่แรกที่จะทำการจัดลงสถานีที่ 1 คือ งานที่1 และ งานที่ 6 สมมุติว่าสุ่มได้งานที่ 1 เวลารวมในสถานีงานที่ 1 เท่ากับ 1 วินาทีงานถัดไปที่จะจัดสรรลงสถานีงานที่ 1 คืองาน 4 และงาน 6 สมมุติว่าสุ่มได้งาน 4 พบว่าเวลารวมในสถานีงานยังไม่เกินรอบเวลาในการทำงานจึงยอมรับให้ข้นงานที่ 4 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ทำจนกว่าจะจัดงานทุกงานลงทุกสถานีซึ่งจะได้ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ดังนี้

ตารางที่ 7.12 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Number of Workers	Dow	WT
11	4	3.2218	1.347
12	4	4.1502	0.717
13	4	4.5172	1.050

ตารางที่ 7.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Number of Workers	DOW	WT
22	4	2.8308	1.137
21	4	3.1083	1.137
23	4	3.2218	1.347

7.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มทีดีทีสุด

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่คำตอบ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness Value) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดี (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่า Dummy Fitness

ตารางที่ 7.14 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการแรก

String	Dow	WT	Dummy Fitness
11	3.2218	1.347	1
12	4.1502	0.717	1
13	4.5172	1.050	2

ตารางที่ 7.15 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการแรก

String	Dow	WT	Dummy Fitness
22	3.2218	1.347	1
21	4.1502	0.717	2
23	4.5172	1.050	3

7.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและแย่

เราจะมีการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดี (Good Solution) และสตริงคำตอบที่แย่ (Bad Solution) โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ หาคำตอบที่ดีและแย่ในแต่ละ swarm (L_{best} ,L_{worst})และหาคำตอบที่ดีและแย่ของทุกอนุภาคในแต่ละรอบ(G_{best} ,G_{worst}) ซึ่งคำตอบที่ดีจะหาได้จากคำตอบที่เป็น Frontier แรกและคำตอบที่แย่จะหาได้จากคำตอบที่เป็น Frontier สุดท้ายดังนั้นสตริงคำตอบที่เลือกในตัวอย่างนี้เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงตารางคือ

ตารางที่ 7.16 การคัดเลือกสตริงคำตอบของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการแรก

String	Dow	WT	Dummy Fitness	Selection
11	3.2218	1.347	1	L_{best}
12	4.1502	0.717	1	L_{best}
13	4.5172	1.050	2	L_{worst}

ตารางที่ 7.17 การคัดเลือกสตริงคำตอบของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการแรก

String	Dow	WT	Dummy Fitness	Selection
22	3.2218	1.347	1	L_{best}
21	4.1502	0.717	2	
23	4.5172	1.050	3	L_{worst}

ในการหา ค่า G_{best} และ G_{worst} นั้นเราจะหาโดยการนำคำตอบทั้งหมดของแต่ละ Swarm มาเรียงกันซึ่งจะได้เป็น

ตารางที่ 7.18 ประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence						
11	1	4	2	5	3	7	6
12	1	2	3	4	7	5	6
13	1	2	4	7	5	6	3
21	1	2	3	5	6	4	7
22	1	2	5	4	6	3	7
23	1	4	2	3	7	5	6

จากนั้นทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และทำการกำหนดค่าความแข็งแรงจากนั้นทำการเลือก G_{best} จาก Frontier ที่ 1 และ G_{worst} จาก Frontier สุดท้ายเราจะได้ค่า G_{best} และ G_{worst} ที่จะนำไปใช้ในการอัพเดทตารางดังนี้

ตารางที่ 7.19 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	DOW	WT	Font	Selection
22	2.8308	1.137	1	G_{best}
12	4.1502	0.717	1	G_{best}
21	3.1083	1.137	2	
13	4.5172	1.050	2	
11	3.2218	1.347	3	G_{worst}
23	3.2218	1.347	3	G_{worst}

โดยค่าคำตอบที่ดี และคำตอบที่แย่ซึ่งมีการหามาข้างต้นจะนำไปใช้ในการหาค่า Velocity เพื่อทำการปรับปรุงตารางต่อไป

7.3.6 การคำนวณหาค่า Velocity และการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) นั้นเราจะทำการปรับปรุงโดยการสร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) โดยการปรับปรุงความ

น่าจะเป็นในตารางจะเป็นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่สตริงคำตอบที่ดี และลดค่าความน่าจะเป็นในสตริงคำตอบที่แย่ เพื่อให้โอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่ดีในรอบถัดไปมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นการลดโอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่แย่ โดยเราสามารถคำนวณหาค่า Velocity ได้จาก

$$V_{ij} = wV_{(i-1)j} + c_1 r_1 D_1 + c_2 r_2 D_2 \qquad (7.4)$$

เมื่อ i คือ รอบในการทำงาน

j คือ สัญลักษณ์แทนฝูงที่ j

w คือ สัมประสิทธิ์การหน่วง (Inertia weight)

c_1 และ c_2 คือ ตัวประกอบการเรียนรู้ (Learning factor)

r_1 และ r_2 คือ ค่าสุ่มในช่วง (0,1)

D_1 คือผลการปรับปรุงตารางเนื่องจาก Local (L_{best} , L_{worst})

D_2 คือผลการปรับปรุงตารางเนื่องจาก Global (G_{best} , G_{worst})

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability)

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานอันดับแรกเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตารางการปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรก เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)}$ $= 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworst โดยจะแสดงตัวอย่างการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 7.20 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence							Selection
11	1	4	2	5	3	7	6	L_{best}
12	1	2	3	4	7	5	6	L_{best}
13	1	2	4	7	5	6	3	L_{worst}

ตารางที่ 7.21 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรทั้งหมดในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence							Selection
22	1	2	5	4	6	3	7	G_{best}
12	1	2	3	4	7	5	6	G_{best}
11	1	4	2	5	3	7	6	G_{worst}
23	1	4	2	3	7	5	6	G_{worst}

กรณีสตริงคำตอบที่ดี

การปรับปรุงตารางเนื่องจากสตริง L_{best} Stringที่ 1 ซึ่งงานอันดับแรก คือ งานที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่น ๆ เท่ากับ 0.0028 ดังนี้

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ 1

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1429+0.0167 = 0.1596

การลดค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ 1

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1429-0.0028 = 0.1401

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึงเราจะได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกหลังการปรับปรุงเป็น

ตารางที่ 7.22 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงสตริงแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.1596	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401

การปรับปรุงตารางเนื่องจากสตริง L_{best} Stringที่ 2 ซึงงานอันดับแรก คือ งานที่ 1 จึงทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่น ๆ เท่ากับ 0.0028 ดังนี้

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ 2

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1596+0.0167 = 0.1763

การลดค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ 2

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1401-0.0028 = 0.1373

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1401-0.0028 = 0.1373

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1401-0.0028 = 0.1373

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1401-0.0028 = 0.1373

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1401-0.0028 = 0.1373

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1401-0.0028 = 0.1373

ซึงเราจะได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกหลังการปรับปรุงเป็น

ตารางที่ 7.23 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงสตริงทีสอง

1	2	3	4	5	6	7
0.1763	0.1373	0.1373	0.1373	0.1373	0.1373	0.1373

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีสตริงคำตอบทีแย่

การปรับปรุงตารางเนื่องจากสตริง L_{worst} Stringที่ 3 ซึ่งงานอันดับแรก คือ งานที่ 1 จึงทำการลดค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 0.0167 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตำแหน่งอื่น ๆ เท่ากับ 0.0028 ดังนี้

การลดค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ 3

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0.1763-0.0167 = 0.1596

การลดค่าความน่าจะเป็นจากสตริงคำตอบที่ 3

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.1373+0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0.1373+0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.1373+0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0.1373+0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0.1373+0.0028 = 0.1401

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0.1373+0.0028 = 0.1401

ซึ่งเราจะได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกหลังการปรับปรุงเป็น

ตารางที่ 7.24 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงสตริงที่สาม

1	2	3	4	5	6	7
0.1596	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401

หลังจากที่เราทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานอันดับแรกโดยใช้ผลจาก กลุ่มย่อย (L_{best} ,L_{worst}) แล้วเราจะต้องทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกโดยใช้ผลของสตริงคำตอบทั้งหมด (G_{best} ,G_{worst}) ด้วยโดยจะใช้วิธีการปรับปรุงตารางเช่นเดียวกับ L_{best} และ L_{worst} โดยจะได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกหลังการปรับปรุงเป็น

ตารางที่ 7.25 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุง

1	2	3	4	5	6	7
0.1596	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401	0.1401

ในขณะเดียวกันสำหรับ Swarm ที่ 2 เราจะทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกโดยใช้วิธีการเดียวกับที่ได้ทำการปรับปรุงตารางใน Swarm ที่ 1 ซึ่งเมื่อทำการปรับปรุงเสร็จสิ้นจะได้ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของ Swarm ที่ 2 เป็น

ตารางที่ 7.26 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุง

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตาราง การปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดี ในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นของลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค(Velocity Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworst โดยจะแสดงตัวอย่างการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของ Swarm ที่ 1 ได้ดังนี้

โดยในตอนเริ่มแรกนั้นค่า Velocity เริ่มต้นจะเป็นมีค่าเป็น 0 ทั้งหมด

ตารางที่ 7.27 ตารางแสดง ทิศทางการเคลื่อนที่เริ่มต้นของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก (V_{01})

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

จากนั้นเราจะทำการปรับปรุงตาราง Velocity โดยใช้สตริงคำตอบที่ได้ทำการคัดเลือกมาในข้างต้นโดยมีวิธีการปรับปรุงตารางดังนี้

กรณีสตริงคำตอบที่ดี

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของ Swarm ที่ 1 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่ดีของฝูงที่ 1 (L_{best}) ใน สตริงคำตอบที่ 1 ซึ่งจะพิจารณาคู่ลำดับ โดยทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบคือ (1,4), (4,2), (2,5), …, (3,7), (7,6) เท่ากับ 0.02 และลดค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับอื่น ๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับ (1,4) จากสตริงคำตอบที่ 1

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0+0.02 = 0.02

ทำการลดค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับอื่น ๆ จากสตริงคำตอบที่ 1

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับ (4,2) จากสตริงคำตอบที่ 1

ตำแหน่งที่ (4,2) มีค่าเท่ากับ 0+0.02 = 0.02

การลดค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับอื่น ๆ จากสตริงคำตอบที่ 1

ตำแหน่งที่ (4,1) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004
ตำแหน่งที่ (4,3) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004
ตำแหน่งที่ (4,4) มีค่าเท่ากับ 0
ตำแหน่งที่ (4,5) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004
ตำแหน่งที่ (4,6) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004
ตำแหน่งที่ (4,7) มีค่าเท่ากับ 0-0.004 = -0.004

จากนั้นเราจะทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ตามคู่ลำดับที่เหลือจนครบทุกคู่ลำดับของสตริงคำตอบที่ดีใน Swarm ซึ่งเมื่อเราปรับปรุงตารางโดยใช้ L_{best} ทุกสตริงแล้วเราจะได้ Velocity Matrix เป็น

ตารางที่ 7.28 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก หลังปรับปรุงด้วย L_{best}

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.016	-0.008	0.016	-0.008	-0.008	-0.008
2	-0.008	0.000	0.016	-0.008	0.016	-0.008	-0.008
3	-0.008	-0.008	0.000	0.016	-0.008	-0.008	0.016
4	-0.008	0.016	-0.008	0.000	-0.008	-0.008	0.016
5	-0.008	-0.008	0.016	-0.008	0.000	0.016	-0.008
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	0.016	0.016	0.000

กรณีสตริงคำตอบที่แย่

ทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของ Swarm ที่ 1 โดยเริ่มจากสตริงคำตอบที่แย่ของฝูงที่ 1 (L_{worst}) ใน สตริงคำตอบที่ 3 ซึ่งจะพิจารณาคู่ลำดับ โดยทำการลดค่าความน่าจะเป็นให้กับคู่ลำดับในสตริงคำตอบคือ (1,2), (4,7), (5,6), …, (5,6), (6,3) เท่ากับ 0.02 และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับอื่น ๆ เท่ากับ 0.004 ดังนี้

ทำการลดค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับ (1,4) จากสตริงคำตอบที่ 3

ตำแหน่งที่ (1,2) มีค่าเท่ากับ 0.016-0.02 = 0.014

ทำการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับอื่น ๆ จากสตริงคำตอบที่ 3

ตำแหน่งที่ (1,1) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (1,3) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,4) มีค่าเท่ากับ 0.016+0.004 = -0.020

ตำแหน่งที่ (1,5) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,6) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (1,7) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

การลดค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับ (4,7) จากสตริงคำตอบที่ 3

ตำแหน่งที่ (4,7) มีค่าเท่ากับ 0.016-0.02 = 0.014

การเพิ่มค่าความน่าจะเป็นแก่คู่ลำดับอื่น ๆ จากสตริงคำตอบที่ 3

ตำแหน่งที่ (4,1) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (4,2) มีค่าเท่ากับ 0.016+0.004 = -0.020

ตำแหน่งที่ (4,3) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (4,4) มีค่าเท่ากับ 0

ตำแหน่งที่ (4,5) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

ตำแหน่งที่ (4,6) มีค่าเท่ากับ -0008+0.004 = -0.004

จากนั้นเราจะทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) ของฝูงที่ 1 ตามคู่ลำดับที่เหลือจนครบทุกคู่ลำดับของสตริงคำตอบที่แย่ใน Swarm ซึ่งเมื่อเราปรับปรุงตารางโดยใช้ L_{worst} ทุกสตริงแล้วเราจะได้ Velocity Matrix เป็น

ตารางที่ 7.29 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก หลังปรับปรุงด้วย L_{best}

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	-0.004	-0.004	0.020	-0.004	-0.004	-0.004
2	-0.004	0.000	0.020	-0.028	0.020	-0.004	-0.004
3	-0.008	-0.008	0.000	0.016	-0.008	-0.008	0.016
4	-0.004	0.020	-0.004	0.000	-0.004	-0.004	-0.004
5	-0.004	-0.004	0.020	-0.004	0.000	-0.004	-0.004
6	0.004	0.004	-0.020	0.004	0.004	0.000	0.004
7	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	0.020	0.000

หลังจากที่เราทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้ผลจากกลุ่มย่อย (L_{best} ,L_{worst}) แล้วเราจะต้องทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้ผลของสตริงคำตอบทั้งหมด (G_{best} ,G_{worst}) ด้วยโดยจะใช้วิธีการปรับปรุงตารางเช่นเดียวกับ L_{best} และ L_{worst} โดยจะได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหลังการปรับปรุงเป็นด้วยสตริงคำตอบที่ถูกเลือกทั้งหมดเป็น

ตารางที่ 7.30 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.044	-0.004	-0.028	-0.004	-0.004	-0.004
2	-0.004	0.000	0.020	-0.028	0.020	-0.004	-0.004
3	-0.008	-0.008	0.000	0.040	-0.008	-0.008	-0.008
4	-0.004	-0.028	-0.004	0.000	-0.004	0.020	0.020
5	-0.004	-0.004	-0.004	0.020	0.000	-0.004	-0.004
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

ในขณะเดียวกันสำหรับ Swarm ที่ 2 เราจะทำการปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้วิธีการเดียวกับที่ได้ทำการปรับปรุงตารางใน Swarm ที่ 1 ซึ่งเมื่อทำการปรับปรุงเสร็จสิ้นจะได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของ Swarm ที่ 2 เป็น

ตารางที่ 7.31 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.072	0.000	-0.072	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.024	0.024	0.000	-0.048
4	0.000	-0.072	0.000	0.000	0.000	0.024	0.048
5	0.000	0.000	-0.024	0.024	0.000	0.000	0.000
6	-0.008	-0.008	0.016	0.016	-0.008	0.000	-0.008
7	0.008	0.008	0.008	0.008	-0.016	-0.016	0.000

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

ในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เราสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$x_{(i,j)} = x_{(i-1,j)} + V_{(i-1,j)} \qquad (7.5)$$

เมื่อ $x_{(i,j)}$ คือ ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ j ในรอบที่ i

$V_{(i,j)}$ คือ ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ j ในรอบที่ i

โดยจะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

ตารางที่ 7.32 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.2107	0.1627	0.1387	0.1627	0.1627	0.1627
2	0.1627	0.0000	0.1867	0.1387	0.1867	0.1627	0.1627
3	0.1587	0.1587	0.0000	0.2067	0.1587	0.1587	0.1587
4	0.1627	0.1387	0.1627	0.0000	0.1627	0.1867	0.1867
5	0.1627	0.1627	0.1627	0.1867	0.0000	0.1627	0.1627
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000

ตารางที่ 7.33 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.2387	0.1667	0.0947	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1667	0.1667	0.0000	0.1907	0.1907	0.1667	0.1187
4	0.1667	0.0947	0.1667	0.0000	0.1667	0.1907	0.2147
5	0.1667	0.1667	0.1427	0.1907	0.0000	0.1667	0.1667
6	0.1587	0.1587	0.1827	0.1827	0.1587	0.0000	0.1587
7	0.1747	0.1747	0.1747	0.1747	0.1507	0.1507	0.0000

7.3.7 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเก็บค่าที่ดีสุดจะทำการเก็บค่าที่อยู่ใน frontier ที่ 1 ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นรอบการทำงานรอบแรกเราจะได้สตริงคำตอบซึ่งให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดเป็น

ตารางที่ 7.34 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการรอบแรก

String	Sequence						
22	1	2	5	4	6	3	7
12	1	2	3	4	7	5	6

7.3.8 การดำเนินการในรอบถัดไป

การแก้ปัญหาในรอบการดำเนินการที่ 2 จะเริ่มต้นจากการสร้างประชากรคำตอบโดยจะสร้างประชากรคำตอบจาก ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตารางที่ 7.25 และตารางที่ 7.26 ตารางความน่าจะเป็นร่วมในตารางที่ 7.30 และตารางที่ 7.31 ซึ่งจะทำให้ได้ผลการสร้างประชากรคำตอบเป็น

ตารางที่ 7.35 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Sequence						
11	1	4	7	2	3	5	6
12	1	2	5	4	3	6	7
13	1	2	5	4	6	7	3

ตารางที่ 7.36 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

Particle	Sequence						
21	1	4	7	2	3	5	6
22	1	4	7	2	5	6	3
23	1	2	3	5	4	6	7

การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เราจะทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ด้วยกันได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงานน้อยที่สุด และเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

โดยงานที่ถูกเลือกมาทั้งหมดนั้นจะนำมาพิจารณางานในลักษณะของการหักงอเส้นตรงของสตริงคำตอบโดยจะใช้ฮิวริสติกในการเลือกงานแบบสุ่ม (Random Priority) ในที่นี้จะใช้ตัวอย่างจาก $String_{11}$ Particle ที่ 1 ซึ่งมีลำดับของงานคือ [1 2 4 3 7 5 6] งานที่ถูกพิจารณาเป็นคู่แรกที่จะทำการจัดลงสถานีที่ 1 คือ งานที่1 และ งานที่ 6 สมมุติว่าสุ่มได้งานที่ 1 เวลารวมในสถานีงานที่ 1 เท่ากับ 1 วินาทีงานถัดไปที่จะจัดสรรลงสถานีงานที่ 1 คืองาน 2 และงาน 6 สมมุติว่าสุ่มได้งาน 2 พบว่าเวลารวมในสถานีงานยังไม่เกินรอบเวลาในการทำงานจึงยอมรับให้ขั้นงานที่ 2 อยู่ในสถานีงานที่ 1 ทำจนกว่าจะจัดงานทุกงานลงทุกสถานีซึ่งจะได้ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ดังนี้

ตารางที่ 7.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Number of Workers	Dow	WT
11	4	2.9431	1.1370
12	4	2.8232	1.3109
13	4	2.9923	1.5570

ตารางที่ 7.38 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Number of Workers	DOW	WT
21	4	2.9431	1.1370
22	4	3.2036	1.6800
23	4	2.8160	1.6561

การคัดเลือกสตริงคำตอบทีดีและสตริงคำตอบทีแย่

จากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้เราจะสามารถคัดเลือกสตริงคำตอบทีดีและสตริงคำตอบทีแย่ได้เช่นเดียวกับการดำเนินการในรอบแรกโดยการจัดอันดับความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบซึ่งจะทำให้สามารถหา L_{best} , L_{worst} , G_{best} และ G_{worst} ได้เป็น

ตารางที่ 7.39 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 1 ในการดำเนินการรอบสอง

String	Dow	WT	Dummy Fitness
11	2.9431	1.1370	1
12	2.8232	1.3109	1
13	2.9923	1.5570	2

ตารางที่ 7.40 สตริงคำตอบทีดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในการดำเนินการรอบสอง

String	Sequence							Selection
1	1	4	7	2	3	5	6	L_{best}
2	1	2	5	4	3	6	7	L_{best}
3	1	2	5	4	6	7	3	L_{worst}

ในขณะทีประชากรในฝูงที่ 2 เราสามารถคัดเลือกสตริงทำตอบทีดีและแย่ได้เป็น

ตารางที่ 7.41 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรในฝูงที่ 2 ในการดำเนินการรอบสอง

String	Dow	WT	Dummy Fitness
21	2.9431	1.1370	1
22	3.2036	1.6800	2
23	2.8160	1.6561	1

ตารางที่ 7.42 สตริงคำตอบทีดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในการดำเนินการรอบสอง

String	Sequence							Selection
21	1	4	7	2	3	5	6	L_{best}
22	1	4	7	2	5	6	3	L_{worst}
23	1	2	3	5	4	6	7	L_{best}

ในส่วนของ G_{best} และ G_{worst} เราจะสามารถคัดเลือกสตริงคำตอบได้โดยการจัดลำดับความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบรวมของทุกฝูงซึ่งจะได้ผลเป็น

ตารางที่ 7.43 การจัดอันดับความแข็งแรงของประชากรรวม ในการดำเนินการรอบสอง

String	DOW	WT	Font	Selection
23	2.8160	1.6561	1	G_{best}
12	2.8232	1.3109	1	G_{best}
11	2.9431	1.1370	1	G_{best}
21	2.9431	1.1370	1	G_{best}
13	2.9923	1.5570	2	
22	3.2036	1.6800	3	G_{worst}

การคำนวณหาค่า Velocity และการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) นั้นเราจะทำการปรับปรุงโดยการสร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที (Velocity Matrix) โดยการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางจะเป็นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่สตริงคำตอบที่ดีและลดค่าความน่าจะเป็นในสตริงคำตอบที่แย่ เพื่อให้โอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่ดีในรอบถัดไปมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นการลดโอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่แย่

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability)

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานอันดับแรกเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตาราง การปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรก เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางความ

น่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworst ทำให้จะได้ผลเป็น

ตารางที่ 7.44 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงในรอบ 2

1	2	3	4	5	6	7
0.2263	0.1290	0.1290	0.1290	0.1290	0.1290	0.1290

ตารางที่ 7.45 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงในรอบ 2

1	2	3	4	5	6	7
0.2096	0.1318	0.1318	0.1318	0.1318	0.1318	0.1318

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตารางการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดี ในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นของลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค(Velocity Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworst จะทำให้ได้ผลเป็น

ตารางที่ 7.46 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สอง หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.076	-0.020	0.004	-0.020	-0.020	-0.020
2	-0.020	0.000	0.100	-0.044	0.004	-0.020	-0.020
3	-0.032	-0.032	0.000	0.016	0.064	0.016	-0.032
4	-0.020	-0.044	0.028	0.000	-0.020	0.004	0.052
5	-0.020	-0.020	-0.020	0.052	0.000	0.028	-0.020
6	-0.004	-0.004	-0.028	-0.004	-0.004	0.000	0.044
7	-0.004	0.044	-0.028	-0.004	-0.004	-0.004	0.000

ตารางที่ 7.47 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สอง หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.128	-0.016	-0.064	-0.016	-0.016	-0.016
2	-0.016	0.000	0.104	-0.016	-0.040	-0.016	-0.016
3	-0.024	-0.024	0.000	0.000	0.120	0.000	-0.072
4	-0.016	-0.088	0.008	0.000	-0.016	0.056	0.056
5	-0.016	-0.016	-0.040	0.080	0.000	0.008	-0.016
6	-0.012	-0.012	-0.036	0.012	-0.012	0.000	0.060
7	0.004	0.028	0.004	0.004	-0.020	-0.020	0.000

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

ในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เราสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 7.5

โดยจะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

ตารางที่ 7.48 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สอง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.2867	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427	0.1427
2	0.1427	0.0000	0.2867	0.0947	0.1907	0.1427	0.1427
3	0.1267	0.1267	0.0000	0.2227	0.2227	0.1747	0.1267
4	0.1427	0.0947	0.1907	0.0000	0.1427	0.1907	0.2387
5	0.1427	0.1427	0.1427	0.2387	0.0000	0.1907	0.1427
6	0.1627	0.1627	0.1387	0.1627	0.1627	0.0000	0.2107
7	0.1627	0.2107	0.1387	0.1627	0.1627	0.1627	0.0000

ตารางที่ 7.49 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สอง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.3667	0.1507	0.0307	0.1507	0.1507	0.1507
2	0.1507	0.0000	0.2707	0.1507	0.1267	0.1507	0.1507
3	0.1427	0.1427	0.0000	0.1907	0.3107	0.1667	0.0467
4	0.1507	0.0067	0.1747	0.0000	0.1507	0.2467	0.2707
5	0.1507	0.1507	0.1027	0.2707	0.0000	0.1747	0.1507
6	0.1467	0.1467	0.1467	0.1947	0.1467	0.0000	0.2187
7	0.1787	0.2027	0.1787	0.1787	0.1307	0.1307	0.0000

ซึ่งตารางที่ 7.48 และตารางที่ 7.49 จะถูกนำไปใช้ในการสร้างประชากรเริ่มต้นในการดำเนินการรอบที่ 3 ต่อไป

การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเก็บค่าที่ดีสุดจะทำการเก็บค่าที่อยู่ใน frontier ที่ 1 ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจะได้ผลคือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.50 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการแต่ละรอบ

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	22	[1 2 5 4 6 3 7]
	12	[1 2 3 4 7 5 6]
2	23	[1 2 3 5 4 6 7]
	12	[1 2 5 4 3 6 7]
	11	[1 4 7 2 3 5 6]
	21	[1 4 7 2 3 5 6]

จากนั้นเราจะทำการประเมินหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าไว้เป็นค่าที่ดีที่สุดในรอบถัดไป ด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ซึ่งจะได้ผลเป็น

ตาราง 7.51 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
3	2.8160	1.6561	1	Inf
4	2.8232	1.3109	1	0.5639
1	2.8308	1.1370	1	1.6270
2	4.1502	0.7170	1	Inf
5	2.9431	1.1370	2	Inf
6	2.9431	1.1370	2	Inf

ซึ่งจากตารางที่ 7.51 เราจะได้ค่าสตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการในรอบที่ 2

7.4สรุปท้ายบท

เนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงอัลกอริทึมที่งานวิจัยนี้พัฒนาขึ้นมาเรียกว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : PSONK) ซึ่งใช้หลักการของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (PSO) ร่วมกับการใช้หลักความน่าจะเป็นในการคัดเลือกคำตอบและการคำนึงถึงคำตอบที่แย่เช่นเดียวกับอัลกอริทึมการบรรจวบ (COIN) โดยจะทำการหาตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดของแต่ละฝูง รวมถึงการหาตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดและแย่ที่สุดของประชากร ซึ่งเรียกตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution : Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่แย่ที่สุดของแต่ละฝูงเรียกว่า ค่าที่ไม่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Worst Solution : Lworst) รวมถึงตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution : Gbest) และตำแหน่งของคำตอบที่แย่ที่สุดของประชากรจะเรียกว่า ค่าที่ไม่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Worst Solution : Gworst) ซึ่งค่าประสบการณ์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อช่วยในการปรับปรุงคำตอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

การประยุกต์ใช้วิธีเมมเมติกอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและขั้นตอน และตัวอย่าง การนำเอา เมมเมติกอัลกอริทึม (MA) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการเมมเมติกอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนามาจากวิธีการเจนเนติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (PSONK) ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า NSGAII และ PSONK

8.1 หลักการและแนวคิดของการประยุกต์ใช้วิธีเมมเมติกอัลกอริทึม

เมมเมติกอัลกอริทึมเป็นอัลกอริทึมซึ่งใช้กระบวนการเช่นเดียวกันกับเจนเนติกอัลกอริทึม(GA) และ PSONK แต่จะมีการพัฒนาโดยใช้วิธีการค้นหาเฉพาะทีเข้ามาเพิ่มเติมใน GA และ PSONK ซึ่งจะใช้การค้นหาเฉพาะทีเพิ่มเข้าไปในกระบวนการทำงานของ GA ก่อน หรือหลังการดำเนินงานต่างๆเช่น การสร้างประชากรเริ่มต้น การคลอสโอเวอร์ หรือการมิวเตชัน

8.1.1 การค้นหาเฉพาะที

เป็นวิธีการหาค่าทีดีที่สุดโดยวิธีการทำซ้ำอย่างง่ายๆ ใช้การลองผิดลองถูก การเริ่มต้นการค้นหาเฉพาะทีจะทำการสุ่มเลือกสมาชิกคำตอบเพื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสตริงคำตอบ เพื่อให้ได้สตริงคำตอบทีดีกว่าเดิม ทำการค้นหาซ้ำไปเรือย ๆ จนกระทั่งครบจำนวนครั้งในการทำการซ้ำ หรือสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ไม่สามารถปรับปรุงคำตอบให้มีค่าทีดีกว่าเดิมได้

วิธีการค้นหาเฉพาะทีนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกันแต่ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการใช้เพียง 3 วิธีด้วยกันคือ Pairwise Interchange(PI) Insertion Procedure(IP) และ 2-Opt ซึ่งรายละเอียดของวิธีการค้นหาเฉพาะทีแบบอื่นสามารถหาข้อมูลได้จาก (เพ็ญพักตร์, 2551 และ ภาณุวัฒน์, 2551)

8.1.1.1 วิธีการ Pairwise Interchange (PI)

เป็นวิธีการปรับปรุงคำตอบโดยโดยการจับคู่ตำแหน่ง 2 ตำแหน่งในสตริงคำตอบโดยการสุ่มและทำการสลับทีตำแหน่งสองตำแหน่งนั้นยกตัวอย่างเช่น สตริงคำตอบก่อนทำการ PI เป็น 1-2-3-4-5 เมื่อทำการ PI ตามตำแหน่งทีได้มีการสุ่มจะได้สตริงคำตอบใหม่เป็น 1-4-3-2-5

8.1.1.2 วิธีการ Insertion Procedure(IP)

เป็นวิธีการค้นหาเฉพาะทีโดยใช้การสุ่มเลือกตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในสตริงคำตอบและทำการใส่ตำแหน่งนั้นคืนไปยังสตริงคำตอบในตำแหน่งทีไม่ใช่ตำแหน่งเดิมยกตัวอย่างเช่นสตริงคำตอบก่อนการทำ IP เป็น 1-2-3-4-5 เมือทำการสุ่มเลือกค่าในสตริงทีมีค่าเป็น 2 จะทำการดึงค่า 2 ออกจากคำตอบจะได้สตริงคำตอบเป็น 1-3-4-5 จากนั้นทำการสุ่มใส่ค่าง 2 เข้าไปยังตำแหน่งใหม่จะได้สตริงคำตอบหลังการทำ IP เป็น 1-3-4-2-5

8.1.1.3 วิธีการ 2-Opt

เป็นวิธีการซึงสุ่มเลือกจุด 2 จุดในสตริงคำตอบจากนั้นทำการลบค่าในสตริงคำตอบระหว่าง 2 จุดนั้นออก และทำการเชือมต่อในตำแหน่งอืนทีเป็นไปได้ยกตัวอย่างเช่น สตริงคำตอบก่อนทำ 2-Opt เป็น 1-2-3-4-5 เมือสุ่มได้ตำแหน่ง 2 ตำแหน่งคือ 2 และ 5 เมือทำการนำสตริงคำตอบระหว่าง 2 ตำแหน่งนั้นออกจะได้สตริงคำตอบเป็น 1 เมือทำการใส่เข้าไปในตำแหน่งอืนจะได้ สตริงคำตอบหลังการทำ 2-Opt เป็น 1-5-4-3-2

8.1.2 สิงทีควรคำนึงถึงในการใช้การค้นหาเฉพาะที

การค้นหาเฉพาะทีเมือนำมาใช้ในการหาคำตอบจะช่วยให้ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมดีขึ้น ซึงบ่อยครั้งทีการประยุกต์การค้นหาเฉพาะทีแล้วทำให้สูญเสียเวลาในการคำนวณอย่างมาก แม้ว่าคุณภาพคำตอบทีได้จะดีขึ้นก็ตาม ดังนั้นในการออกแบบ จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยทีส่งผลต่อการนำการค้นหาเฉพาะทีไปใช้ (Hart, 1994) ดังนี้

8.1.2.1 ความถีในการใช้การค้นหาเฉพาะที

ความถีในการใช้การค้นหาเฉพาะทีจะส่งผลโดยตรงต่อเวลาทีใช้ในการคำนวณซึงเมือกำหนดให้ T แทนระหว่างของแต่ละรอบทีจะทำการค้นหาเฉพาะที เมือ T = 1 จะทำการค้นหาเฉพาะทีในรอบที 1,2,3,4,….,n ในขณะทีถ้าใช้ T = 10 จะทำการค้นหาเฉพาะทีในรอบที 10,20,30,….n ซึงในการออกแบบจะต้องพิจารณาความถีในการค้นหาเฉพาะทีให้ดีเพราะถ้ากำหนดค่า T น้อยเกินไปจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากแต่ถ้า T มากเกินไปก็จะไม่เกิดการปรับปรุงคำตอบ

8.1.2.2 จำนวนคำตอบทีนำไปใช้ในการค้นหาเฉพาะที

จำนวนคำตอบทีใช้ในการค้นหาเฉพาะทีจะส่งผลต่อเวลาทีใช้ในการคำนวณซึงจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์คือ ความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที (P_{LS})

8.1.2.3 จำนวนการทำการค้นหาเฉพาะทีซ้ำ

ในการค้นหาเฉพาะทีจะมีการกำหนดพารามิเตอร์ k เป็นจำนวนครั้งในการค้นหาเฉพาะทีทีไม่สามารถปรับปรุงคำตอบได้ ติดต่อกัน ซึ่งจะเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหยุดการค้นหาเฉพาะทีของคำตอบ

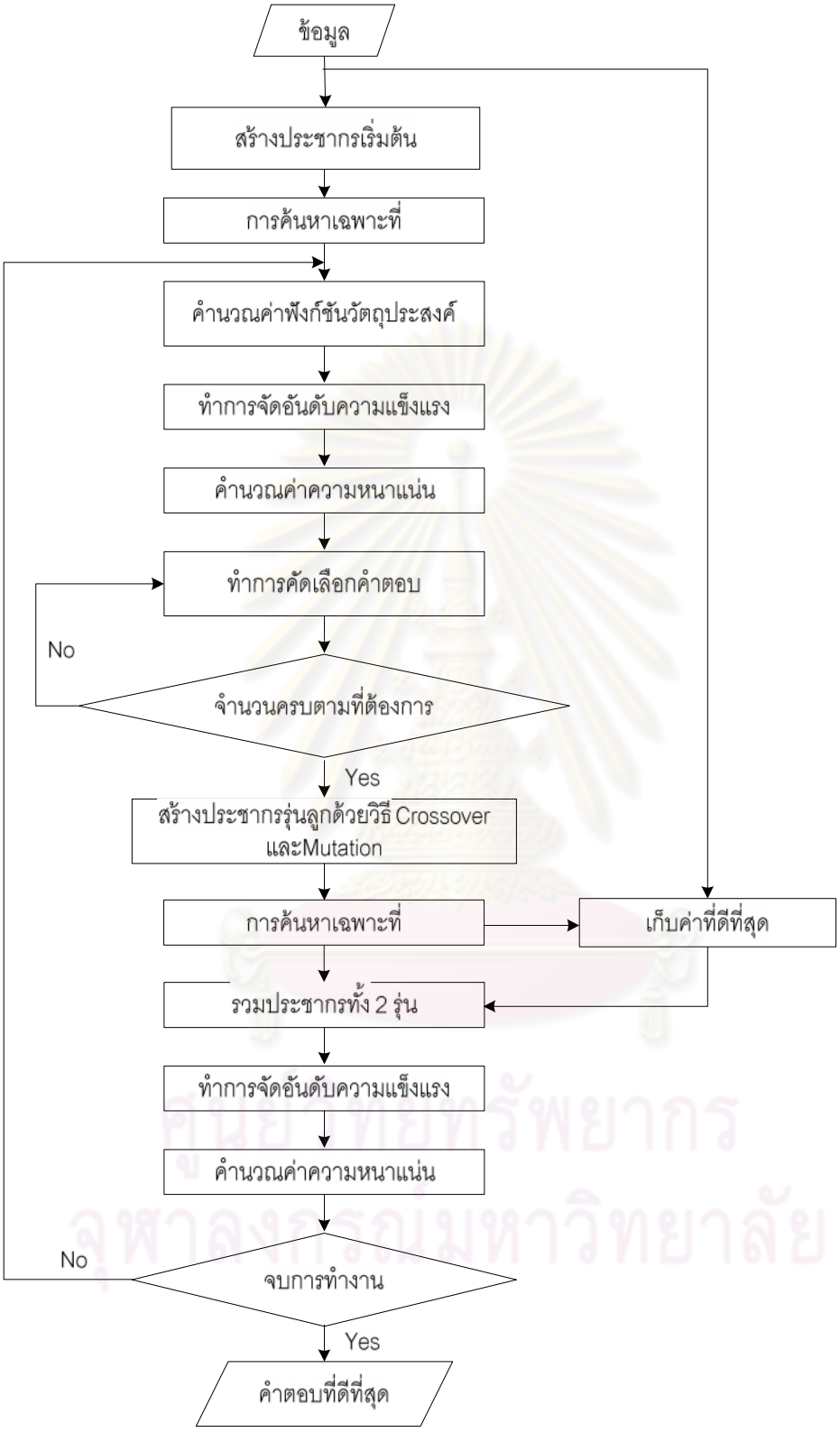
8.1.2.4 ขั้นตอนทีควรใช้การค้นหาเฉพาะที

การประยุกต์การค้นหาเฉพาะทีนั้นส่วนใหญ่จะทำเมือ (Merz and Freisleben, 1997) หลังจากการสร้างประชากรเริมต้น เกิดประชากรใหม่หรือเกิดประชากรรุ่นลูก หลังจากประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการทางพันธุ์กรรมเช่น คลอสโอเวอร์ หรือ มิวเทชัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกทีจะทำการค้นหาเฉพาะที 2 ส่วนคือ หลังจากการสร้างประชากรเริมต้น และ หลังจากการมิวเทชัน

8.2 ขั้นตอนการนำM-NSGA-II ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

ในการนำ M-NSGA-II ไปใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูนั้นเราสามารถสรุปขั้นตอนต่างๆได้ดังรูปที 8.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.1 ขั้นตอนการทำงานของ M-NSGA-II

รายละเอียดของขั้นตอนต่างๆจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไปพร้อมกับการนำเสนอตัวอย่างการใช้ MA ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู

8.3 ตัวอย่างการนำM-NSGA-IIไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

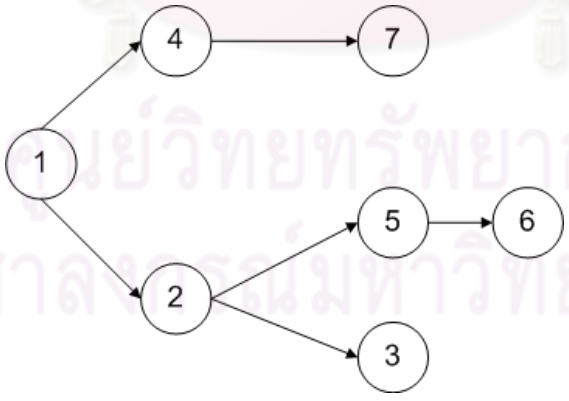
จากขั้นตอนที่ได้แสดงให้เห็นในหัวข้อ 8.2 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของ M-NSGA-II และแสดงตัวอย่างการนำ M-NSGA-II ไปใช้กับปัญหาขนาด 7 งานในรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ได้ดังนี้

8.3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล (Data Input)

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้

8.3.1.1 แผนภาพความสัมพันธ์รวม

แผนภาพความสัมพันธ์รวมจะแสดงถึงข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานในแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ซึ่งในตัวอย่างที่จะแสดงในหัวข้อนี้จะมีผลิตภัณฑ์เพียง 1 ชนิดเราสามารถเขียนแผนภาพความสัมพันธ์รวมได้ดังนี้



รูปที่ 8.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์รวม

8.3.1.2 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

จะแสดงว่าแต่ละขั้นงานใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากน้อยเพียงใดถ้าปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนผลิตภัณฑ์มากกว่า 1 ผลิตภัณฑ์เวลาทำงานในแต่ละขั้นตอนจะต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละผลิตภัณฑ์ในขั้นงานนั้นๆ

ตาราง 8.1 เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน

Task	Time(s)
1	1
2	5
3	4
4	3
5	5
6	6
7	5

8.3.1.3 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

เป็นตารางแสดงเวลาที่พนักงานแต่ละคนจะใช้เมื่อเดินจากตำแหน่งหนึ่งในสายการประกอบไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งซึ่งตำแหน่งในตารางจะหมายถึงตำแหน่งในสายการประกอบโดยตำแหน่งที่ 1 คือตำแหน่งของขั้นงานแรกในด้านหน้าของสายการประกอบ และตำแหน่งที่ 7 ซึ่งเป็นตำแหน่งสุดท้ายคือขั้นงานแรกที่เข้ามาจากด้านหลังของสายการประกอบ

ตาราง 8.2 เวลาที่พนักงานใช้เดินในสายการประกอบ

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.21	0.42	0.5354	0.4696	0.297	0.21
2	0.21	0	0.21	0.332	0.297	0.21	0.297
3	0.42	0.21	0	0.1485	0.21	0.297	0.4696
4	0.5354	0.332	0.1485	0	0.1485	0.332	0.5354
5	0.4696	0.297	0.21	0.1485	0	0.21	0.42
6	0.297	0.21	0.297	0.332	0.21	0	0.21
7	0.21	0.297	0.4696	0.5354	0.42	0.21	0

8.3.1.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน

จากแผนภาพความสัมพันธ์รวมเราจะนำความสัมพันธ์ที่ได้มาสร้างเป็นตาราง เพื่อให้ง่ายก็การนำไปใช้คำนวณ

ตาราง 8.3 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหน้า

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

ตาราง 8.4 ตารางความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานด้านหลัง

task	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	1	0	0	0

8.3.1.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

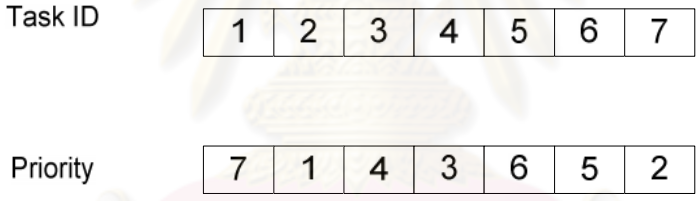
พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่างนี้คือ

- จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว
- รอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที
- วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight mapping crossover (WMX)
- วิธีการมิวเตชั้นแบบ Reciprocal Exchange Mutation
- ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ เท่ากับ 0.7

- ความน่าจะเป็นในการมิวเตชั้น เท่ากับ 0.3
- งานด้านหน้า:ด้านหลัง:ด้านข้าง เป็น 3:3:1
- วิธีการค้นหาเฉพาะทีหลังการสร้างประชากรเริมต้นใช้วิธี แบบ Pairwise Interchange (PI)
- วิธีการค้นหาเฉพาะทีหลังการทำมิวเตชั้นแบบ Insertion Procedure (IP)
- ความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะทีมีค่าเป็น 0.8

8.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

ในงานวิจัยนี้จะใช้สตริงคำตอบแทนโครโมโซม และเช่นเดียวกับขั้นตอนการทำงานของ NSGA-II สตริงคำตอบเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการต่างๆ จะเกิดการสลับตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ ทำให้คำตอบทีได้ใหม่อาจจะเกิดปัญหากับข้อจำกัดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสร้างสตริงคำตอบโดยวิธีกำหนดค่าสิทธิในการเลือกงาน (Priority) ซึงสตริงทีได้จากการสุ่มจะมีลักษณะดังนี้



รูปที 8.3 ลักษณะของสตริงคำตอบเริมต้น

ซึงจากรูปที 8.3 จะพบว่างานที 1 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเท่ากับ 7 ในขณะทีงานที 2 จะมีค่าสิทธิในการเลือกงานเป็น 1 ซึงเราจะใช้ค่าสิทธิในการเลือกงานนี้ในกระบวนการดำเนินงานทั้งหมด

เมือทำการสร้างสตริงค่าสิทธิในการเลือกงานดังทีได้กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ได้สตริงเริมต้น 5 สตริงดังนี้

String Priority 1 = [7 1 4 3 6 5 2]
String Priority 2 = [4 1 3 5 7 6 2]
String Priority 3 = [5 1 2 3 7 6 4]
String Priority 4 = [5 2 7 1 3 4 6]
String Priority 5 = [7 2 4 1 3 6 5]

8.3.3 การค้นหาเฉพาะทีหลังการสร้างประชากรเริมต้น

ก่อนการทำการค้นหาเฉพาะทีเราจำเป็นต้องทำการเลือกสตริงคำตอบทีจะนำไปใช้ในการค้นหาเฉพาะทีดังนั้นเราจึงต้องทำการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และทำการจัดลำดับความแข็งแรงก่อน ซึงค่าสิทธิในการเลือกงานข้างต้นยังไม่สามารถนำมาใช้เพือหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ ต้องทำการถอดรหัสคำตอบเพือให้ได้ Sequence และ Position ก่อนซึงการถอดรหัสคำตอบมีขั้นตอนดังนี้

- พิจารณาว่ามีขั้นงานใดทีสามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหน้างาน จะดูจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า โดยหาผลรวมของคอลัมน์ใดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งของลำดับงานได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดความสัมพันธ์ของขั้นงาน

- พิจารณาว่ามีขั้นงานใดทีสามารถเลือกทำได้ลงในตำแหน่งข้างหลังงาน จะดูจากตารางแสดงความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง โดยหาผลรวมของคอลัมน์ใดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าขั้นงานนั้นสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งของลำดับงานได้โดยไม่ผิดข้อจำกัดความสัมพันธ์ของขั้นงาน

- พิจารณาค่าสิทธิในการเลือกงานจากสตริงคำตอบตามตำแหน่งของงานทีถูกเลือกลงในตำแหน่งข้างหน้างาน และถูกเลือกลงในตำแหน่งข้างหลังงาน ซึงขั้นงานทีสามารถถูกเลือกลงตำแหน่งข้างหน้าและข้างหลังงานใดมีค่ามากสุดจะถูกเลือกลงในลำดับขั้นงานก่อน

- ถ้างานทีถูกเลือกมาจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) ให้ตัดทิ้งโดยการเปลียนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Font เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Back มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

- ถ้างานทีถูกเลือกมาจากความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหลัง (Precedence Matrix Back)ให้ตัดทิ้งโดยการเปลียนตัวเลข ในแถว Precedence Matrix Back เป็น 0 ทั้งหมด และในคอลัมน์ของงานนั้นเท่ากับ 1 ทั้งหมด และทำให้คอลัมน์งานนั้นใน Precedence Matrix Font มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งหมด

ซึงเมือพิจารณาจาก String Priority 1 เราจะสามารถถอดรหัสคำตอบและหาขั้นตอนการทำงานและตำแหน่งของงานได้ดังตารางที 8.5

ตารางที่ 8.5 การถอดรหัสคำตอบในสตริงคำตอบแรก

รอบที่	งานด้านหน้า	งานด้านหลัง	งานที่เลือก	ตำแหน่งของงาน
1	1	3,6,7	1	Front
2	2,4	3,6,7	6	Back
3	2,4	3,5,7	5	Back
4	2,4	3,7	3	Back
5	2,4	7	4	Front
6	2	7	7	Front
7	2	-	2	Front

ซึ่งเมื่อทำการถอดรหัสคำตอบทั้ง 5 สตริงคำตอบจะได้ลำดับของงานและตำแหน่งหน้าหลังดังนี้

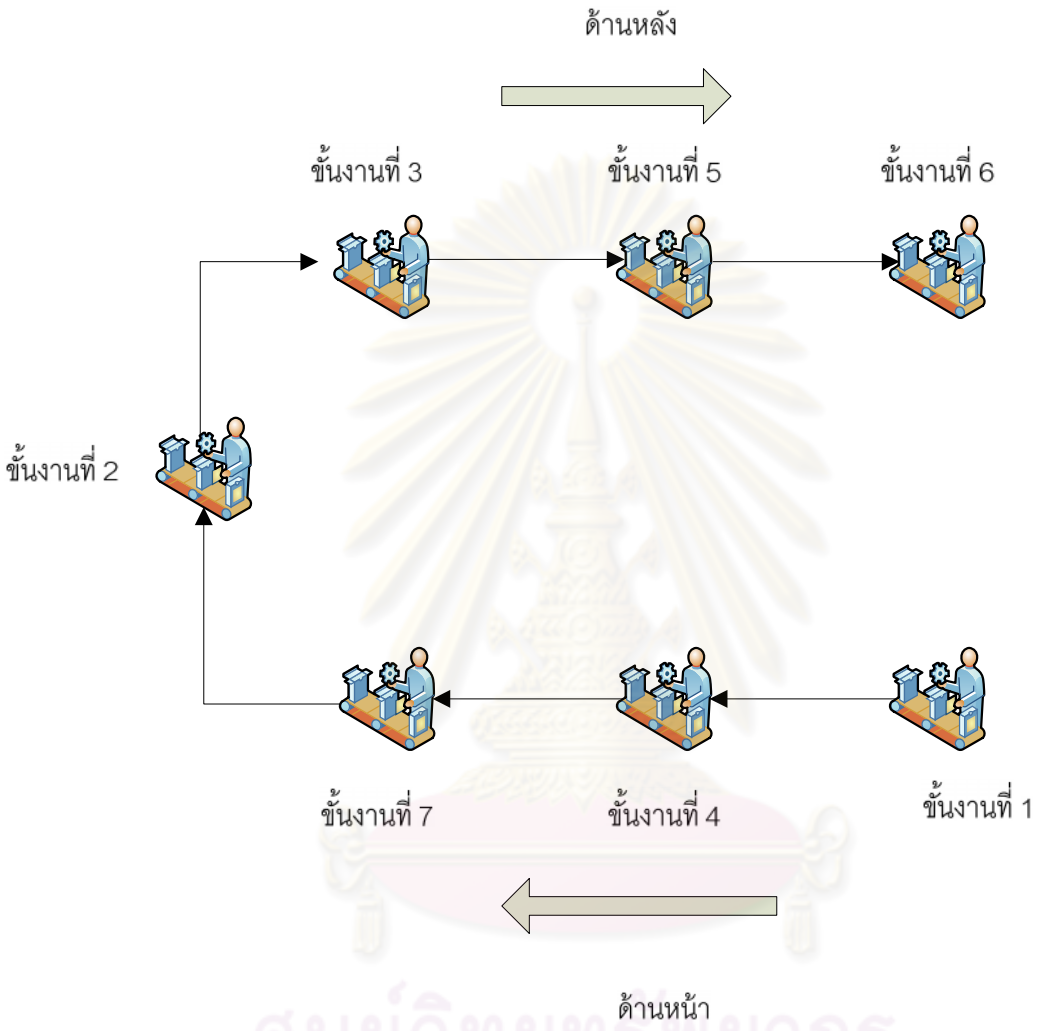
String Sequence 1: ลำดับของงาน = [1 6 5 3 4 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 1 1 1]
String Sequence 2: ลำดับของงาน = [6 5 1 4 3 7 2]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 1 2 1 1]
String Sequence 3: ลำดับของงาน = [6 5 1 7 4 3 2]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 2 1 2 1]
String Sequence 4: ลำดับของงาน = [3 7 1 6 5 2 4]
ตำแหน่งของงาน = [2 2 1 2 2 1 1]
String Sequence 5: ลำดับของงาน = [1 6 7 3 5 2 4]
ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 2 1 1]

โดยค่าตำแหน่งของงานเท่ากับ 1 หมายความว่างานนั้นถูกจัดให้อยู่ด้านหน้าของสายการประกอบและค่าตำแหน่งของงานเท่ากับ 2 หมายความว่างานนั้นถูกจัดให้อยู่ในด้านหลังของสายการประกอบ

เมื่อเราทำการถอดรหัสและทราบลำดับของงานและตำแหน่งหน้าหลังของงานแล้วขั้นตอนต่อไปเราจะทำการจัดพนักงานลงในสายการประกอบ โดยจะจัดสรรพนักงานตาม String Sequence ที่ทำการถอดรหัสมาได้โดยเราสามารถจัดสรรพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1 ได้ดังนี้

String Sequence 1: ลำดับของงาน = [1 6 5 3 4 7 2]

ตำแหน่งของงาน = [1 2 2 2 1 1 1]



รูปที่ 8.4 ลักษณะของตำแหน่งงานต่างๆในสตริงคำตอบที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.6 การจัดสรรงานให้กับพนักงานในสตริงคำตอบที่ 1

งาน	เวลาที่ใช้ในการทำงาน	เวลาที่ใช้ในการเดินไปทำงานถัดไป	เวลาที่ใช้ในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก	เวลารวมในสถานีงาน	เวลาที่เหลือในสถานีงาน	สถานีงานที่
1	1	-	-	1	9	1
6	6	0.21	0.21	7.42	2.58	1
5	5	0.21	0.297	12.93	เกิน	
5	5	-	-	5	5	2
3	4	0.21	0.21	9.42	0.58	2
4	3	0.21	0.42	13.05	เกิน	
4	3	-	-	3	7	3
7	5	0.21	0.21	8.42	1.58	3
2	5	0.149	0.332	13.9	เกิน	
2	5	-	-	5	5	4

เมื่อทำการจัดสรรพนักงานลงในสายการประกอบแล้วเราจะสามารถคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการทั้ง 3 วัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. เพื่อให้จำนวนพนักงานน้อยที่สุด

$$f_2(x) = Minimum \quad (n) \tag{8.1}$$

2. ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน

$$f_2(x) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{m}(C - C_{jk})^2}{m}} \tag{8.2}$$

โดยที่ $C_{jk} = T_{jk} + WT_{jk}$

เมื่อ n = จำนวนพนักงาน

m = จำนวนงานทั้งหมด

C = รอบเวลาการทำงาน (Cycle Time)

C_{jk} = เวลาทีพนักงาน j ใช้ไปในงาน k

T_{jk} = เวลาทีพนักงาน j ใช้ในการปฏิบัติงาน k

WT_{jk} = เวลาทีพนักงาน j ในเดินไปทำงาน k

3. เวลาเดินของพนักงาน

$$WT = \alpha \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} l_{jk} + c_{jk} + r_{jk} \qquad (8.3)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์เวลาเดินของพนักงาน

l_{ij} = ระยะทางทีพนักงาน j ใช้เดินไปทำงาน k

c_{jk} = ระยะทางทีใช้เดินข้ามฝั่งไปทำงาน k

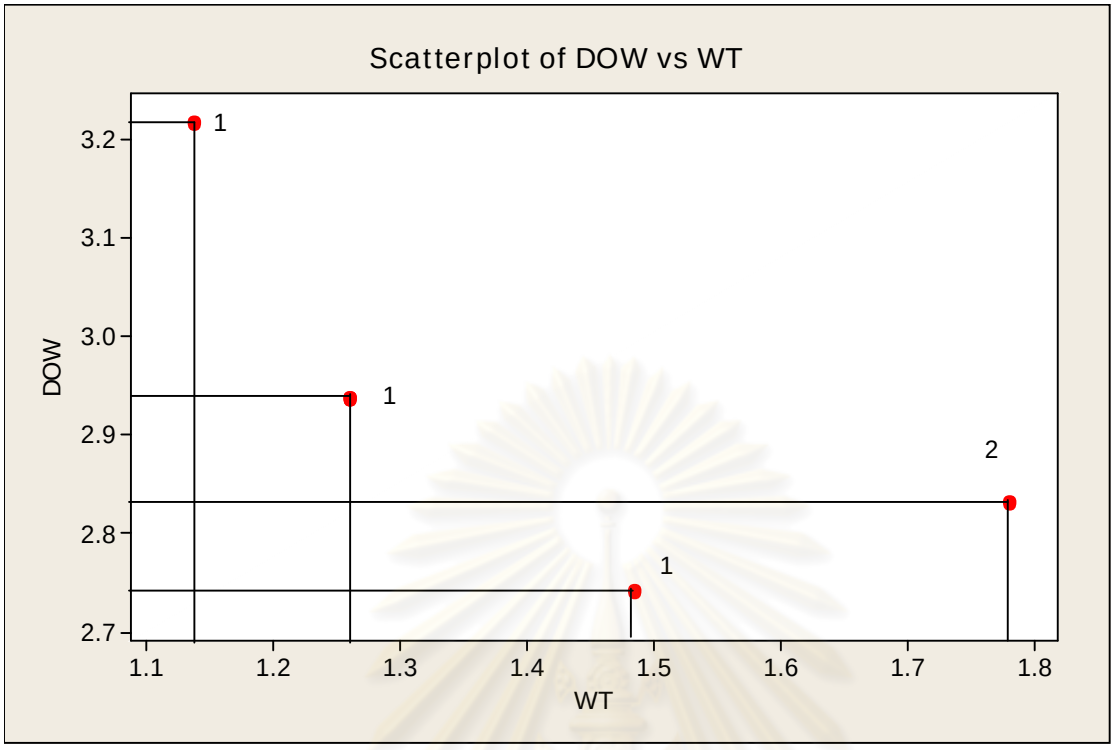
r_{jk} = ระยะทางในการเดินกลับเพื่อทำงานแรก

ซึ่งจากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังตาราง

ตารางที่ 8.7 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้

สตริง	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาทีพนักงานใช้เดิน
1	4	2.9364	1.2600
2	4	3.2178	1.1370
3	4	2.7419	1.4849
4	4	2.8320	1.7792
5	4	2.9364	1.2600

จากนั้นเราจะต้องทำการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบโดยในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับที่ได้นี้จะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนี้จะได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 8.5 ค่า Dummy Fitness ของประชากร

ตารางที่ 8.8 ค่า Dummy Fitness ของสตริงคำตอบแต่ละคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.9364	1.2600
2	1	3.2178	1.1370
3	1	2.7419	1.4849
4	2	2.8320	1.7792
5	1	2.9364	1.2600

หลังจากทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงแล้วเราจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประชากร (Crowding Distance) โดย Crowding Distance เป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกประชากรคำตอบภายในอันดับเดียวกัน เราสามารถคำนวณค่า Crowding Distance จาก

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

เมื่อ $x_{[i,k]}$ = สมาชิกคำตอบที่ i ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ที่ได้รับการเรียงลำดับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากน้อยไปมาก

จากนั้นเราจะคำนวณผลรวมของค่า Crowding Distance ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ k ตัว จะได้ว่า $cd(x) = \sum cd_k(x)$ โดยค่า Crowding Distance ของคำตอบนั้น ๆ จะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจายของคำตอบมากน้อยเพียงใด โดยค่า Crowding Distance มากจะแสดงถึงกลุ่มคำตอบในอันดับนั้นมีการกระจาย

ซึ่งเมื่อพิจารณาประชากรคำตอบทั้งหมดจะได้ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ดังนี้

ตารางที่ 8.9 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบ

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2	2.9364	1.2600
2	1	Inf	3.2178	1.1370
3	1	Inf	2.7419	1.4849
4	2	Inf	2.8320	1.7792
5	1	2	2.9364	1.2600

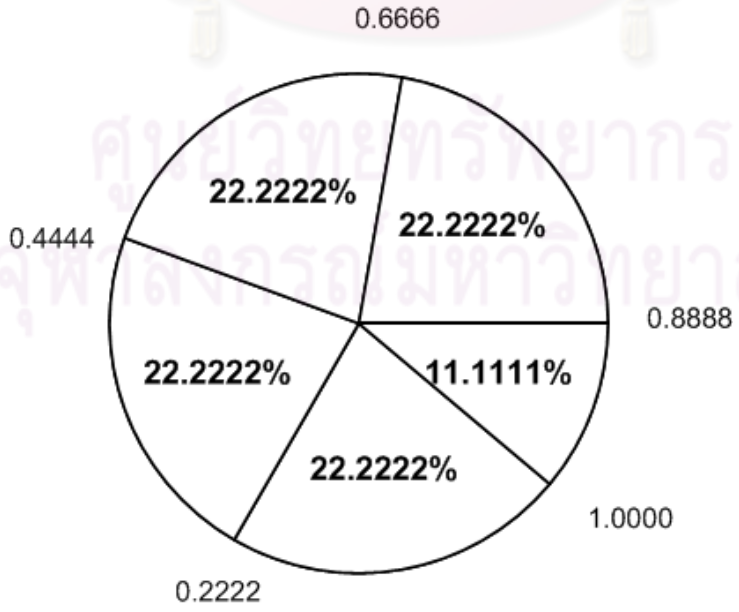
จากนั้นเราจะทำการคัดเลือกคำตอบเพื่อนำไปทำการค้นหาเฉพาะที่ จากการหาค่า Fitness Value ที่ได้จากการทำ Non-dominated Sorting โดยทำการสลับค่าให้ค่าจากค่าDummy Fitness จาก ค่าน้อยเป็นค่ามาก จากนั้นจึงสร้างวงล้อรูเล็ต และใช้วิธีการ Binary Tournament Selection เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบคำตอบเพื่อนำไปทำการค้นหาเฉพาะที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่างจากสตริงที่ 1 จะได้ว่า

ตารางที่ 8.10 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2	2.9364	1.2600
2	1	2	3.2178	1.1370
3	1	2	2.7419	1.4849
4	2	1	2.8320	1.7792
5	1	2	2.9364	1.2600

ตารางที่ 8.11 การสร้างวงล้อรูเล็ต

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	2	0.2222	0.2222
2	2	0.2222	0.4444
3	2	0.2222	0.6666
4	1	0.1112	0.7778
5	2	0.2222	1
รวม	9	1	



รูปที่ 8.6 วงล้อรูเล็ต

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเพื่อทำการค้นหาเฉพาะที ถ้าค่า Fitness Value เท่ากันจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้ที่จะถูกคัดเลือกไปทำการค้นหาเฉพาะที เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.12 การทำ Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				No_String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	
1	0.8125	0.8888	5	2	0.3822	0.4444	2	2	2
2	0.0145	0.2222	1	2	0.2987	0.4444	2	2	2
3	0.0078	0.2222	1	2	0.6494	0.6666	3	2	3
4	0.1122	0.222	1	2	0.7342	0.7778	4	1	1
5	0.5741	0.6666	3	2	0.2890	0.4444	2	2	3

ในการทำการค้นหาเฉพาะทีเราจะสุ่มสตริงที่ได้จากการคัดเลือกโดยวิธี Binary Tournament Selection โดยจะสุ่มค่า r ให้กับสตริงและละสตริงและเลือกสตริงที่จะนำไปทำการค้นหาเฉพาะทีจากสตริงที่มีการสุ่มค่า r ได้ต่ำกว่าค่า P_{LS} = 0.8 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการคัดเลือกดังตาราง

ตารางที่ 8.13 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.8$
1	[4 1 3 5 7 6 2]	0.3184	Selected
2	[4 1 3 5 7 6 2]	0.1578	Selected
3	[5 1 2 3 7 6 4]	0.6823	Selected
4	[7 1 4 3 6 5 2]	0.5655	Selected
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.9542	-

หลังจากเราได้ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะนำไปใช้ในการค้นหาเฉพาะทีซึ่งเราจะใช้วิธี Pairwise Interchange(PI) ซึ่งจะทำการสุ่มตำแหน่งในสตริงคำตอบและทำการสลับตำแหน่งดังนี้

รูปที่ 8.7 การทำการค้นหาเฉพาะทีจากวิธี Pairwise Interchange

ซึงจะทำให้สตริงคำตอบทีถูกคัดเลือกมาเปลียนแปลงเป็น

ตารางที่ 8.14 สตริงคำตอบจากการทำการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority
1	[4 5 3 1 7 6 2]
2	[4 1 6 5 7 3 2]
3	[2 1 5 3 7 6 4]
4	[7 1 4 3 6 2 5]

ซึงเมือทำการเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก่อนและหลังการทำการค้นหาเฉพาะที จะพบว่าจากปัญหาตัวอย่างจะได้

ตารางที่ 8.15 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบก่อนและหลังทำการค้นหาเฉพาะที

สตริงคำตอบที	ลักษณะคำตอบ	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาทีพนักงานใช้ในการเดิน
1	ก่อน	4	3.2178	1.1370
	หลัง	4	2.7766	1.3109
2	ก่อน	4	3.2178	1.1370
	หลัง	5	4.3046	0.7170
3	ก่อน	4	2.7419	1.4849
	หลัง	4	2.8308	1.1370
4	ก่อน	4	2.9364	1.2600
	หลัง	5	4.1346	0.8400

จากตารางที่ 8.15 จะพบว่าหลังจากทำการค้นหาเฉพาะทีสตริงทำตอบที 2 และสตริงคำตอบที 4 ได้คำตอบทีแย่กว่าก่อนทำการค้นหาเฉพาะทีในขณะทีสตริงคำตอบที 1 และ 3 ให้คำตอบทีไม่แย่กว่าสตริงเดิมเมือเรานำสตริงคำตอบทีได้จากการค้นหาเฉพาะทีมารวมกับสตริงคำตอบเริมต้นจะได้

ตารางที่ 8.16 สตริงคำตอบเริมต้นรวมกับสตริงทีได้จากการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority
1	[4 1 3 5 7 6 2]
2	[4 1 3 5 7 6 2]
3	[5 1 2 3 7 6 4]
4	[7 1 4 3 6 5 2]
5	[5 1 2 3 7 6 4]
6	[4 5 3 1 7 6 2]
7	[2 1 5 3 7 6 4]

เมือนำมาจัดลำดับความแข็งแรงจะได้จะได้ผลดังตารางที่ 8.17

ตารางที่ 8.17 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริมต้นรวมกับสตริงทีได้จากการค้นหาเฉพาะที

สตริงคำตอบที	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาทีพนักงานใช้ในการเดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
3	2.7419	1.4849	1	Inf
6	2.7766	1.3109	1	2.0000
7	2.8308	1.1370	1	Inf
5	2.7419	1.4849	1	Inf
4	2.9364	1.2600	2	Inf
1	3.2178	1.1370	2	Inf
2	3.2178	1.1370	2	Inf

ซึงจากตารางที่ 8.17จะได้ประชากรหลังจากการทำการค้นหาเฉพาะทีหลังจากการสร้างประชากรเริมต้น ซึงคัดเลือกจากสตริงคำตอบทีดีทีสุดจำนวนเท่ากับจำนวนประชากรเป็นดังตารางที่ 8.18

ตารางที่ 8.18 ประชากรหลังจากการทำการค้นหาเฉพาะที่หลังจากการสร้างประชากรเริ่มต้น

String No.	String Priority
1	[5 1 2 3 7 6 4]
2	[4 5 3 1 7 6 2]
3	[2 1 5 3 7 6 4]
4	[5 1 2 3 7 6 4]
5	[7 1 4 3 6 5 2]

8.3.4 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากตารางที่ 8.17 เราจะได้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น

ตารางที่ 8.19 ผลการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรง

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้ในการเดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	2.7419	1.4849	1	Inf
2	2.7766	1.3109	1	2.0000
3	2.8308	1.1370	1	Inf
4	2.7419	1.4849	1	Inf
5	2.9364	1.2600	2	Inf

8.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

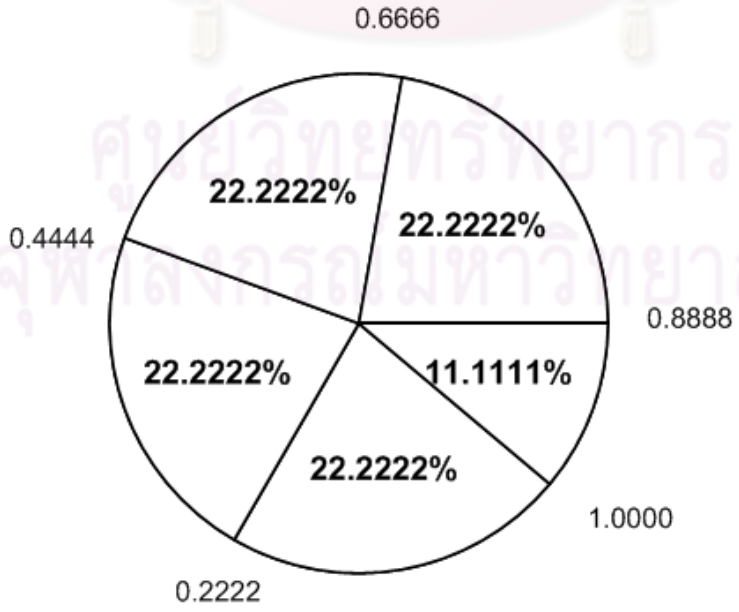
ในขั้นตอนนี้เราจะทำการคัดเลือกคำตอบเพื่อเข้าสู่ Mating Pool จากการหาค่า Fitness Value ที่ได้จากการทำ Non-dominated Sorting โดยทำการสลับค่าให้ค่าจากค่าDummy Fitness จาก ค่าน้อยเป็นค่ามาก จากนั้นจึงสร้างวงล้อรูเล็ต และใช้วิธีการ Binary Tournament Selection เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่าง จะได้ว่า

ตารางที่ 8.20 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2	2.7419	1.4849
2	1	2	2.7766	1.3109
3	1	2	2.8308	1.1370
4	1	2	2.7419	1.4849
5	2	1	2.9364	1.2600

ตารางที่ 8.21 การสร้างวงล้อรูเล็ต

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	2	0.2222	0.2222
2	2	0.2222	0.4444
3	2	0.2222	0.6666
4	2	0.2222	0.8888
5	1	0.1112	1
รวม	9	1	



รูปที่ 8.8 วงล้อรูเล็ต

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเข้าไปยัง Mating Pool ถ้าค่า Fitness Value เท่ากันจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้สตริงใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.22 การทำ Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				No_String
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	Selected
1	0.9125	1	5	1	0.3822	0.4444	2	2	2
2	0.0145	0.2222	1	2	0.2987	0.4444	2	2	1
3	0.0078	0.2222	1	2	0.6994	0.8888	4	2	4
4	0.5887	0.6666	3	2	0.7342	0.8888	4	2	3
5	0.8544	0.8888	4	2	0.2890	0.4444	2	2	4

8.3.6 การคลอสโอเวอร์

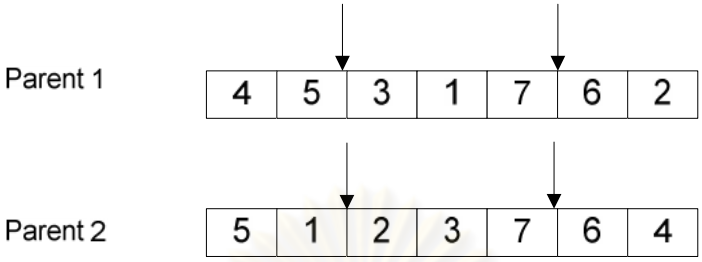
ในการทำคลอสโอเวอร์เราจะใช้สตริงจาก Mating Pool ที่ได้มาจากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยวิธีการเลือกจะทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปคลอสโอเวอร์จากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_c ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.7 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำ คลอสโอเวอร์ดังตาราง

ตารางที่ 8.23 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์

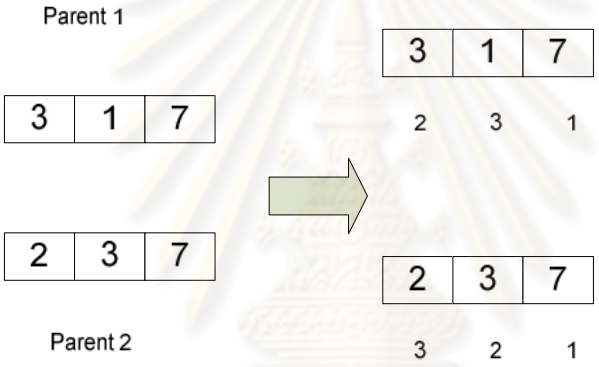
String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	[4 5 3 1 7 6 2]	0.6154	Selected
2	[5 1 2 3 7 6 4]	0.1779	Selected
3	[5 1 2 3 7 6 4]	0.9823	-
4	[2 1 5 3 7 6 4]	0.1753	Selected
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.1115	Selected

เมื่อได้สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่จะนำไปทำการคลอสโอเวอร์แล้วในงานวิจัยนี้จะทำการคลอสโอเวอร์ โดยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX) ซึ่งจะทำโดยสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์ จากนั้นก็จะทำการกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่ และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดในโครโมโซม

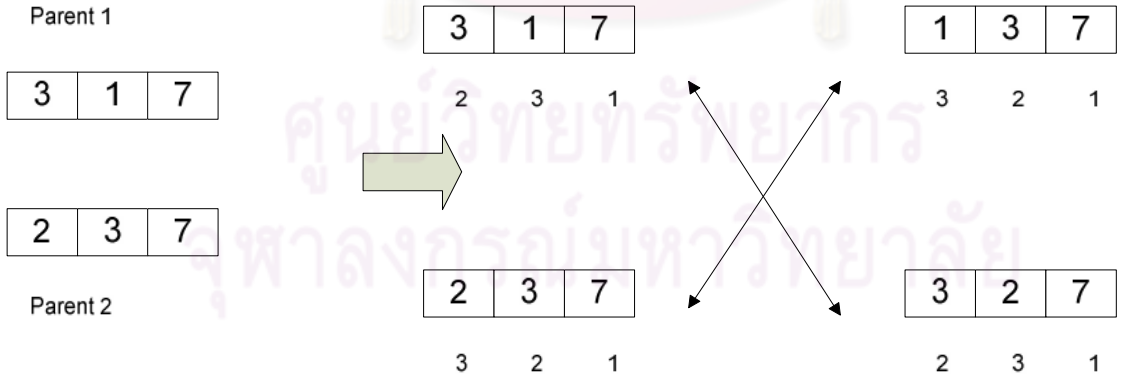
ซึงเมือพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลดังรูปโดยในตัวอย่างนี้สตริงทีนำมาทำการคลอสโอเวอร์คือสตริงที 1 และสตริงที 2



ก) การสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์



ข) การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่



ค) การสลับค่าน้ำหนักและเปลียนค่าในโครโมโซม

รูปที 8.9 การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX ในปัญหาตัวอย่าง

ซึงเมือทำการคลอสโอเวอร์ทั้งหมดแล้วจะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูก Offspring เป็น ดังตาราง

ตารางที่ 8.24 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์

Offspring No.	String Priority
1	[4 5 1 3 7 6 2]
2	[5 1 3 2 7 6 4]
3	[2 1 5 3 7 6 4]
4	[5 1 2 3 7 6 4]

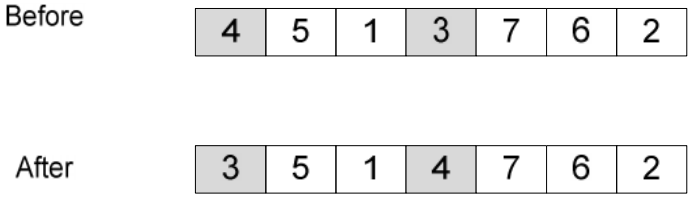
8.3.7 การมิวเตชัน

คือการผ่าเหล่าของประชากรวิธีการนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนักโดยจะพิจารณาจากประชากรใน Mating Pool และทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปทำการมิวเตชันจากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_m ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำการมิวเตชันดังตาราง

ตารางที่ 8.25 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[4 5 1 3 7 6 2]	0.2725	Selected
2	[5 1 3 2 7 6 4]	0.7875	-
3	[2 1 5 3 7 6 4]	0.2455	Selected
4	[5 1 2 3 7 6 4]	0.5741	-
5	[5 1 2 3 7 6 4]	0.9273	-

ในงานวิจัยนี้จะทำการมิวเตชันโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งจะทำการสลับที่ตำแหน่งของโครโมโซมที่ทำการสุ่มเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลดังรูป



รูปที่ 8.9 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่าง

ซึ่งจะได้ประชากรคำตอบรุ่นลูกหลังการมิวเตชันเป็น

ตารางที่ 8.26 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชัน

String No.	String Priority
1	[3 1 5 4 7 6 2]
2	[5 1 3 2 7 6 4]
3	[2 3 5 1 7 6 4]
4	[5 1 2 3 7 6 4]
5	[5 1 2 3 7 6 4]

8.3.8 การค้นหาเฉพาะทีหลังทำการมิวเตชัน

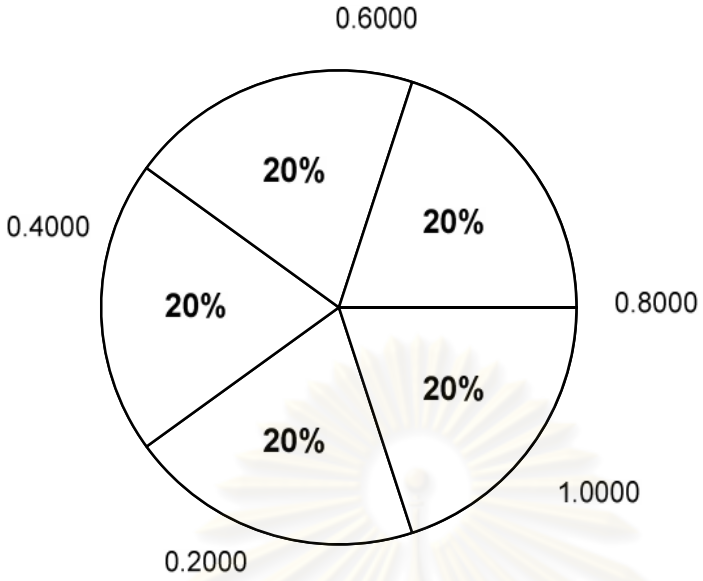
จากสตริงคำตอบที่ได้หลังจากการ มิวเตชันเราสามารถหาสร้างวงล้อรูเล็ตเพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบในการทำการค้นหาเฉพาะทีหลังการทำมิวเตชันได้เป็น

ตารางที่ 8.27 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	1	Inf	3.2157	1.2600
2	1	1	2.000	2.7655	1.3109
3	1	1	Inf	3.2157	1.2600
4	1	1	Inf	2.7419	1.4849
5	1	1	Inf	2.7419	1.4849

ตารางที่ 8.28 การสร้างวงล้อรูเล็ต

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	1	0.2	0.2
2	1	0.2	0.4
3	1	0.2	0.6
4	1	0.2	0.8
5	1	0.2	1
รวม	9	1	



รูปที่ 8.11 วงล้อรูเล็ต

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเพื่อทำการค้นหาเฉพาะที ถ้าค่า Fitness Value เท่ากันจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้ที่จะถูกคัดเลือกไปทำการค้นหาเฉพาะที เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.29 การทำ Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				No_String
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	Selected
1	0.8125	1	5	1	0.3822	0.4	2	1	5
2	0.3448	0.4	2	1	0.2987	0.4	2	2	2
3	0.2478	0.4	2	1	0.3357	0.4	2	2	2
4	0.1122	0.2	1	1	0.7342	0. 8	4	1	1
5	0.5741	0.6	3	1	0.2890	0.4	2	1	3

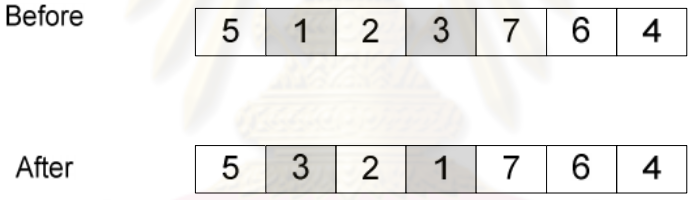
ในการทำการค้นหาเฉพาะทีเราจะสุ่มสตริงที่ได้จากการคัดเลือกโดยวิธี Binary Tournament Selection โดยจะสุ่มค่า r ให้กับสตริงและละสตริงและเลือกสตริงที่จะนำไปทำการค้นหา

เฉพาะทีจากสตริงทีมีการสุ่มค่า r ได้ต่ำกว่าค่า P_{LS} = 0.8 ซึ่งเมือพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการคัดเลือกดังตาราง

ตารางที่ 8.30 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.8$
1	[5 1 2 3 7 6 4]	0.3184	Selected
2	[5 1 3 2 7 6 4]	0.1578	Selected
3	[5 1 3 2 7 6 4]	0.6823	Selected
4	[3 1 5 4 7 6 2]	0.5655	Selected
5	[2 3 5 1 7 6 4]	0.9542	-

หลังจากเราได้ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบทีจะนำไปใช้ในการค้นหาเฉพาะทีซึงเราจะใช้วิธี Pairwise Interchange(PI) ซึงจะทำการสุ่มตำแหน่งในสตริงคำตอบและทำการสลับตำแหน่งดังนี้



รูปที่ 8.12 การทำการค้นหาเฉพาะทีจากวิธี Pairwise Interchange

ซึงจะทำให้สตริงคำตอบทีถูกคัดเลือกมาเปลียนแปลงเป็น

ตารางที่ 8.31 สตริงคำตอบจากการทำการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority
1	[5 3 2 1 7 6 4]
2	[2 1 3 5 7 6 4]
3	[5 1 7 2 3 6 4]
4	[3 1 2 4 7 6 5]

ซึงเมือทำการเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก่อนและหลังการทำการค้นหาเฉพาะทีจะพบว่าจากปัญหาตัวอย่างจะได้

ตารางที่ 8.32 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบก่อนและหลังทำการค้นหาเฉพาะที่

สตริงคำตอบที่	ลักษณะคำตอบ	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้ในการเดิน
1	ก่อน	4	3.2157	1.2600
	หลัง	5	4.5153	1.014
2	ก่อน	4	2.7655	1.3109
	หลัง	5	4.1522	1.137
3	ก่อน	4	3.2157	1.2600
	หลัง	5	4.3261	1.258
4	ก่อน	4	2.7419	1.4849
	หลัง	5	4.1522	1.137

จากตารางที่ 8.32 จะพบว่าหลังจากทำการค้นหาเฉพาะทีสตริงทำตอบทั้งหมดได้คำตอบทีแย่กว่าก่อนทำการค้นหาเฉพาะทีดังนั้นประชากรคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะทีจะเป็นประชากรเดียวกับก่อนการค้นหาเฉพาะที

ตารางที่ 8.33 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะทีหลังการมิวเตชัน

String No.	String Priority
1	[3 1 5 4 7 6 2]
2	[5 1 3 2 7 6 4]
3	[2 3 5 1 7 6 4]
4	[5 1 2 3 7 6 4]
5	[5 1 2 3 7 6 4]

8.3.9 การเก็บค่าทีดีทีสุดเพื่อนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป

การเลือกสตริงทำตอบทีเหมาะสมจะเป็นประชากรในรอบถัดไปจะทำโดยนำประชากรเริมต้นมาพิจารณารวมกับประชากรรุ่นลูกหลังทำการค้นหาเฉพาะทีหลังการทำมิวเตชันดังนี้

ตารางที่ 8.34 สติงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูก

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[7 1 4 3 6 5 2]
	2	[4 1 3 5 7 6 2]
	3	[5 1 2 3 7 6 4]
	4	[5 2 7 1 3 4 6]
	5	[7 2 4 1 3 6 5]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[3 1 5 4 7 6 2]
	7	[5 1 3 2 7 6 4]
	8	[2 3 5 1 7 6 4]
	9	[5 1 2 3 7 6 4]
	10	[5 1 2 3 7 6 4]

จากนั้นจะทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดค่าความแข็งแรงรวมทั้งหาค่าความหนาแน่นของประชากรเพื่อที่จะจัดอันดับสตริงคำตอบที่ดีซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.35 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากร

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้ในการเดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
3	2.7419	1.4849	1	Inf
9	2.7419	1.4849	1	Inf
7	2.7655	1.3109	1	1.0551
1	2.9364	1.2600	1	1.4504
2	3.2178	1.1370	1	Inf
10	2.7419	1.4849	1	Inf
4	2.8320	1.7792	2	Inf
5	2.9364	1.2600	2	Inf
6	3.2157	1.2600	3	Inf
8	3.2157	1.2600	3	Inf

เมือทำการจัดลำดับแล้วจะเลือกสตริงคำตอบทีดีทีสุดเท่ากับจำนวนประชากรเริมต้นเพือนำไปใช้ในรอบถัดไปซึงจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.36 สตริงคำตอบทีจะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไป

String No.	String Priority
1	[5 1 2 3 7 6 4]
2	[5 1 2 3 7 6 4]
3	[4 1 3 5 7 6 2]
4	[5 1 2 3 7 6 4]
5	[7 1 4 3 6 5 2]

8.3.10 การดำเนินงานในรอบที 2

การดำเนินงานในรอบที 2 จะทำเช่นเดียวกับขั้นตอนในรอบแรกโดยจะใช้สตริงคำตอบทีได้มาจากรอบแรกมาใช้เป็นสตริงคำตอบเริมต้นซึงจากตัวอย่างทีเราพิจารณาจะได้ผลในขั้นตอนต่างๆดังนี้

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จากสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวเราจะสามารถคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้

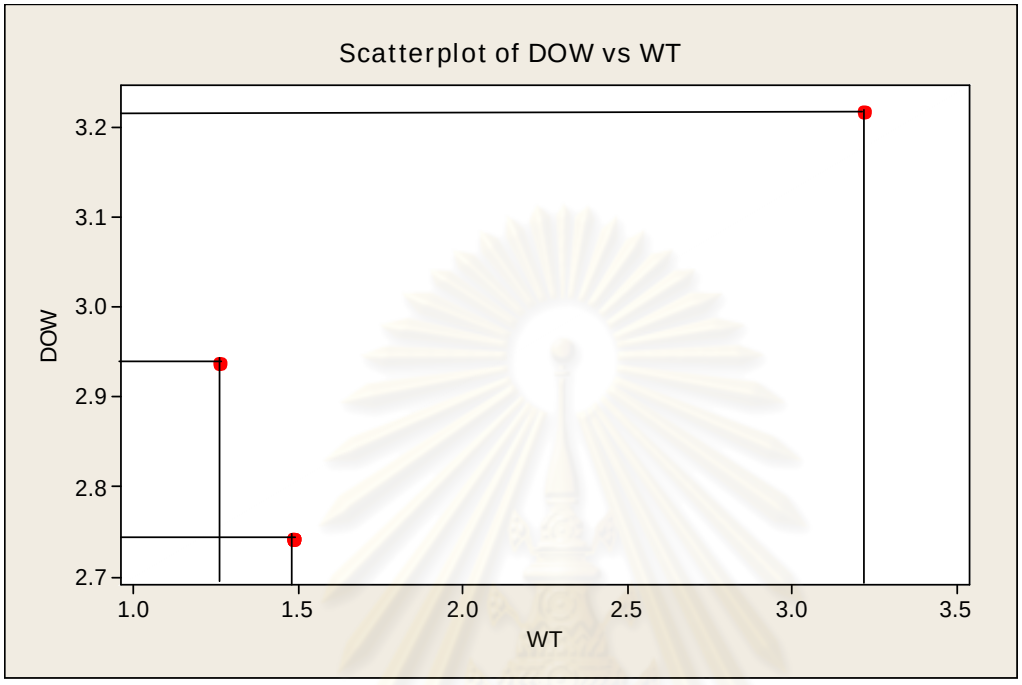
ตารางที่ 8.37 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบที 2

งาน	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาทีพนักงานใช้เดิน
1	4	2.7419	1.4849
2	4	2.7419	1.4849
3	4	3.2178	3.2178
4	4	2.7419	1.4849
5	4	2.9364	1.2600

การกำหนดค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของประชากร

ในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ให้แก่สตริงคำตอบ จะใช้วิธีการจัดอันดับแบบ Goldberg โดยค่าอันดับทีได้นีจะเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) โดยขั้นตอนนีจะ

ได้เส้นขอบเขตกลุ่มคำตอบ (Frontier) ออกมาหลายกลุ่มตามค่าDummy Fitness ซึ่งจากค่าตัวอย่างจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 8.13 ค่าDummy Fitness ของประชากรในรอบที่ 2

ตารางที่ 8.38 ค่า Dummy Fitness ของประชากรในรอบที่ 2

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	2.7419	1.4849
2	1	2.7419	1.4849
3	1	3.2178	3.2178
4	1	2.7419	1.4849
5	1	2.9364	1.2600

หลังจากทำการกำหนดค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงแล้วเราจะทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของประชากร (Crowding Distance) ซึ่งจะพิจารณาในแต่ละ Frontier ซึ่งจะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 8.39 ค่า Dummy Fitness และ Crowding Distance ของประชากรคำตอบในรอบที่ 2

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	ค่าความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	Inf	2.7419	1.4849
2	1	Inf	2.7419	1.4849
3	1	Inf	3.2178	3.2178
4	1	Inf	2.7419	1.4849
5	1	1.0551	2.9364	1.2600

การคัดเลือกสตริงคำตอบ

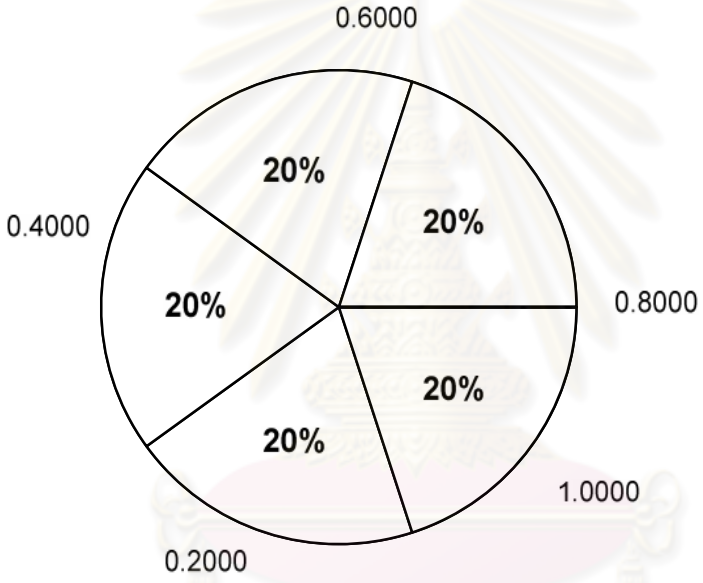
ในขั้นตอนนี้เราจะทำการคัดเลือกคำตอบเพื่อเข้าสู่ Mating Pool จากการหาค่า Fitness Value ที่ได้จากการทำ Non-dominated Sorting โดยทำการสลับค่าให้ค่าจากค่าDummy Fitness จาก ค่าน้อยเป็นค่ามาก จากนั้นจึงสร้างวงล้อรูเล็ต และใช้วิธีการ Binary Tournament Selection เพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบเข้าสู่ Mating Pool ซึ่งเมื่อพิจารณาตัวอย่าง จะได้ว่า

ตารางที่ 8.40 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Valueในรอบที่ 2

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	1	1	2.7419	1.4849
2	1	1	2.7419	1.4849
3	1	1	3.2178	3.2178
4	1	1	2.7419	1.4849
5	1	1	2.9364	1.2600

ตารางที่ 8.41 การสร้างวงล้อรูเล็ตในรอบที่ 2

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	1	0.2000	0.2000
2	1	0.2000	0.4000
3	1	0.2000	0.6000
4	1	0.2000	0.8000
5	1	0.2000	1.0000
รวม	5	1	



รูปที่ 8.14 วงล้อรูเล็ตในรอบที่ 2

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเข้าไปยัง Mating Pool ถ้าค่า Fitness Value เท่ากับจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้สตริงใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.42 การทำ Binary Tournament Selection ในรอบที่ 2

No.	Population 1				Population 2				No_String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	
1	0.8544	1	5	1	0.9241	1	5	1	5
2	0.4573	0.6000	3	1	0.2452	0.4000	2	1	2
3	0.0114	0.2000	1	1	0.4987	0.6000	3	1	3
4	0.8897	0.4000	5	1	0.7254	0.8000	4	1	4
5	0.5743	0.600	3	1	0.1784	0.2000	1	1	3

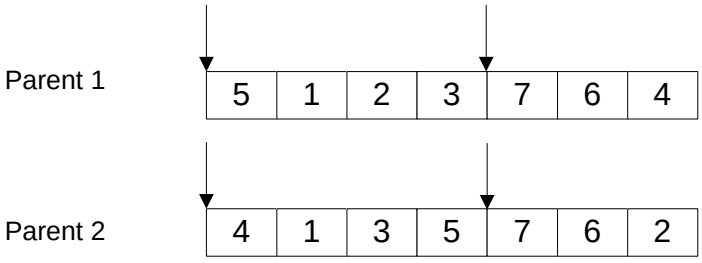
การคลอสโอเวอร์

ในการทำคลอสโอเวอร์เราจะใช้สตริงจาก Mating Pool ที่ได้มาจากการคัดเลือกสตริงคำตอบโดยวิธีการเลือกจะทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปคลอสโอเวอร์จากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_c ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.7 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำ คลอสโอเวอร์ดังตาราง

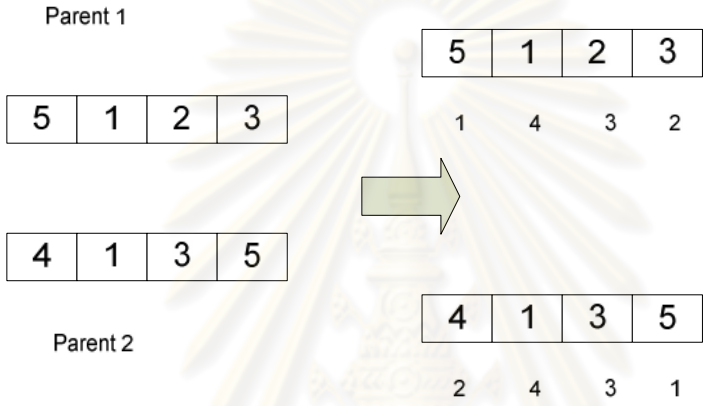
ตารางที่ 8.43 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการคลอสโอเวอร์ในรอบที่ 2

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	[7 1 4 3 6 5 2]	0.9477	-
2	[5 1 2 3 7 6 4]	0.6351	Selected
3	[4 1 3 5 7 6 2]	0.2522	Selected
4	[5 1 2 3 7 6 4]	0.1153	Selected
5	[4 1 3 5 7 6 2]	0.4855	Selected

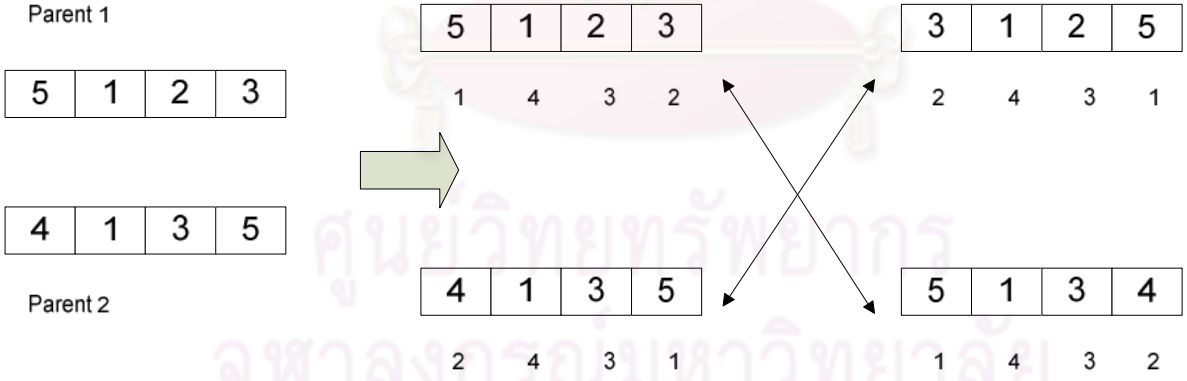
เมื่อได้สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ที่จะนำไปทำการคลอสโอเวอร์แล้วในงานวิจัยนี้จะทำการคลอสโอเวอร์ โดยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX) ซึ่งจะทำโดยสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์ จากนั้นก็จะทำการกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่ และทำการสลับค่าน้ำหนักที่กำหนดในโครโมโซม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างเมื่อทำการคลอสโอเวอร์สตริงคำตอบที่ 2 และสตริงคำตอบที่ 3 จะได้ผลดังรูป



ก) การสุ่มเลือกตำแหน่งการคลอสโอเวอร์



ข) การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับสตริงพ่อแม่



ค) การสลับค่าน้ำหนักและเปลี่ยนค่าในโครโมโซม

รูปที่ 8.15 การคลอสโอเวอร์ด้วยวิธี WMX รอบที่ 2 ในปัญหาตัวอย่างรอบที่ 2

ซึ่งเมื่อทำการคลอสโอเวอร์ทั้งหมดแล้วจะได้สตริงคำตอบในรุ่นลูก Offspring เป็น ดังตารางซึ่งจะได้ Offspring เป็น [3 1 2 5 7 6 4] และ [5 1 3 4 7 6 2]

ตารางที่ 8.44 ประชากรรุ่นลูกหลังการคลอสโอเวอร์ในรอบที่ 2

Offspring No.	String Priority
1	[3 1 2 5 7 6 4]
2	[5 1 3 4 7 6 2]
3	[4 1 2 3 7 6 5]
4	[5 1 3 4 7 6 2]

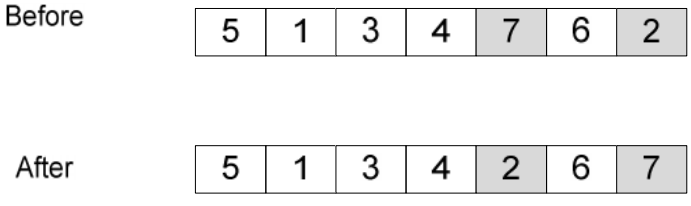
การมิวเตชัน

คือการผ่าเหล่าของประชากรวิธีการนี้จะเกิดขึ้นไม่บ่อยนักโดยจะพิจารณาจากประชากรใน Mating Pool และทำการสุ่มค่า r ให้แต่ละสตริงใน Mating Pool และเลือกสตริงที่จะนำไปทำการมิวเตชันจากค่า r ของสตริงที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่า P_m ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็น 0.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการเลือกสตริงในการทำการมิวเตชันดังตาราง

ตารางที่ 8.45 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการมิวเตชันในรอบที่ 2

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	[3 1 2 5 7 6 4]	0.2478	-
2	[5 1 3 4 7 6 2]	0.37885	-
3	[4 1 2 3 7 6 5]	0.2647	-
4	[5 1 3 4 7 6 2]	0.0014	Selected
5	[7 1 4 3 6 5 2]	0.8457	Selected

ในงานวิจัยนี้จะทำการมิวเตชันโดยใช้วิธี Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งจะทำการสลับที่ตำแหน่งของโครโมโซมที่ทำการสุ่มเมื่อพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลดังรูป



รูปที่ 8.16 การมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange ในปัญหาตัวอย่างรอบที่2

ซึ่งจะได้ประชากรคำตอบรุ่นลูกหลังการมิวเตชันเป็น

ตารางที่ 8.46 ประชากรรุ่นลูกหลังการมิวเตชันในรอบที่ 2

String No.	String Priority
1	[3 1 2 5 7 6 4]
2	[5 1 3 4 7 6 2]
3	[4 1 2 3 7 6 5]
4	[5 1 3 4 2 6 7]
5	[2 1 5 3 7 6 4]

การค้นหาเฉพาะทีหลังทำการมิวเตชัน

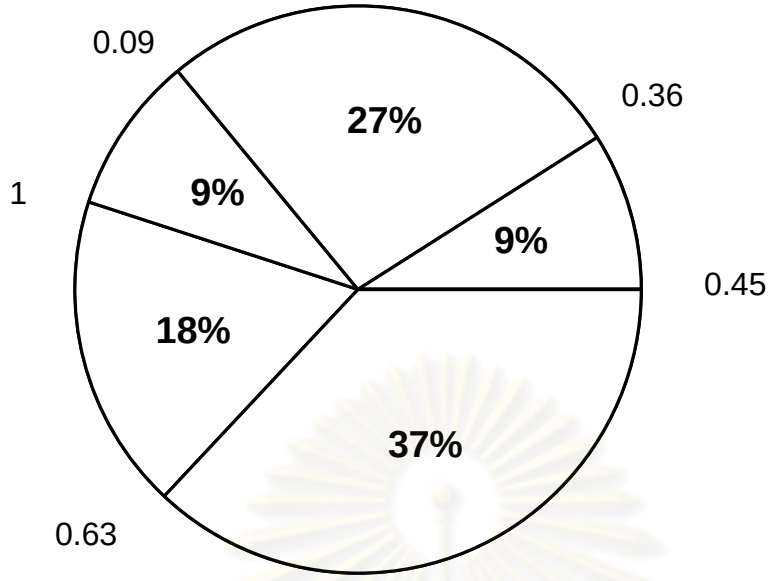
จากสตริงคำตอบที่ได้หลังจากการ มิวเตชันเราสามารถหาสร้างวงล้อรูเล็ตเพื่อคัดเลือกสตริงคำตอบในการทำการค้นหาเฉพาะทีหลังการทำมิวเตชันได้เป็นโดยสตริงคำตอบที่ 1 และ 3 จะมีจำนวนพนักงานมากกว่าสถานีอื่นดังนั้นจะมีค่า Fitness Value ต่ำกว่าสตริงคำตอบอื่น

ตารางที่ 8.47 การแปลง Dummy Fitness เป็น Fitness Value

สตริง	ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง	Fitness Value	ความหนาแน่นของประชากร	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน
1	4	1	Inf	4.1522	1.1370
2	2	3	Inf	3.2178	1.1370
3	4	1	Inf	3.2208	1.2735
4	3	2	Inf	4.1612	1.1879
5	1	4	Inf	2.8308	1.1370

ตารางที่ 8.48 การสร้างวงล้อรูเล็ตสำหรับการค้นหาเฉพาะทีหลังการมิวเตชันในรอบที่ 2

สตริง	Fitness Value	p_i	q_i
1	1	0.09	0.09
2	3	0.27	0.36
3	1	0.09	0.45
4	2	0.18	0.63
5	4	0.37	1
รวม	11	1	



รูปที่ 8.17 วงล้อรูเล็ตในรอบที่ 2

ทำการสุ่มสตริงคำตอบจากวงล้อรูเล็ตโดยการสุ่มค่า r และเลือกสตริงที่มีค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่ในช่วงนั้น (q) มา 2 สตริงและทำการเปรียบเทียบกับสตริงที่มีค่า Fitness Value มากกว่าจะถูกคัดเลือกเพื่อทำการค้นหาเฉพาะที ถ้าค่า Fitness Value เท่ากันจะพิจารณาความหนาแน่นของประชากรที่มีค่ามากกว่าก่อนถ้ามีค่าความหนาแน่นของประชากรเท่ากันจะทำการสุ่ม ทำเช่นนี้จนกว่าจะได้ที่จะถูกคัดเลือกไปทำการค้นหาเฉพาะที เท่ากับจำนวนประชากรซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.49 การทำBinary Tournament Selectionสำหรับการค้นหาเฉพาะที่หลังการมิวเตชันในรอบที่ 2

No.	Population 1				Population 2				No_String
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Fitness	Selected
1	0.1754	0.36	2	3	0.3324	0.36	2	3	2
2	0.0078	0.09	1	1	0.2987	0.45	3	1	1
3	0.4257	0.45	3	1	0.3957	045	3	1	3
4	0.9785	1	5	4	0.6111	0.63	4	2	5
5	0.4335	0.45	3	1	0.2890	0.63	4	2	4

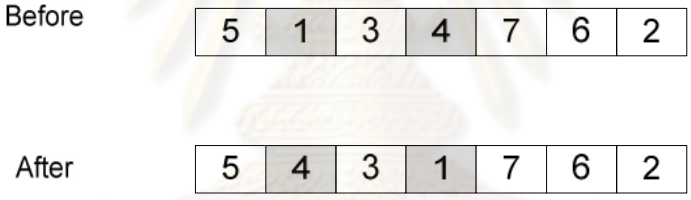
ในการทำการค้นหาเฉพาะทีเราจะสุ่มสตริงที่ได้จากการคัดเลือกโดยวิธี Binary Tournament Selection โดยจะสุ่มค่า r ให้กับสตริงและละสตริงและเลือกสตริงที่จะนำไปทำการค้นหา

เฉพาะทีจากสตริงทีมีการสุ่มค่า r ได้ต่ำกว่าค่า P_{LS} = 0.8 ซึ่งเมือพิจารณาจากตัวอย่างจะได้ผลการคัดเลือกดังตาราง

ตารางที่ 8.50 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกมาทำการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.8$
1	[5 1 3 4 7 6 2]	0.3184	Selected
2	[3 1 2 5 7 6 4]	0.1578	Selected
3	[4 1 2 3 7 6 5]	0.6823	Selected
4	[2 1 5 3 7 6 4]	0.5655	Selected
5	[5 1 3 4 2 6 7]	0.9542	-

หลังจากเราได้ทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่จะนำไปใช้ในการค้นหาเฉพาะทีซึ่งเราจะใช้วิธี Pairwise Interchange(PI) ซึ่งจะทำการสุ่มตำแหน่งในสตริงคำตอบและทำการสลับตำแหน่งดังนี้



รูปที่ 8.18 การทำการค้นหาเฉพาะทีจากวิธี Pairwise Interchange

ซึ่งจะทำให้สตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกมาเปลียนแปลงเป็น

ตารางที่ 8.51 สตริงคำตอบจากการทำการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority
1	[5 4 3 1 7 6 2]
2	[3 1 2 5 7 4 6]
3	[4 1 2 5 7 6 3]
4	[2 7 5 3 1 6 4]

ซึ่งเมือทำการเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ก่อนและหลังการทำการค้นหาเฉพาะทีจะพบว่าจากปัญหาตัวอย่างจะได้

ตารางที่ 8.52 ค่าฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบก่อนและหลังทำการค้นหาเฉพาะที

สตริงคำตอบที	ลักษณะคำตอบ	จำนวนพนักงาน	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้ในการเดิน
1	ก่อน	4	3.2178	1.1370
	หลัง	4	2.7766	1.3109
2	ก่อน	5	4.1522	1.1370
	หลัง	4	2.6179	1.9108
3	ก่อน	4	3.2208	1.2735
	หลัง	4	3.2178	1.1370
4	ก่อน	4	2.8308	1.1370
	หลัง	5	4.2575	1.4908

จากตารางที่ 8.52 จะพบว่าหลังจากทำการค้นหาเฉพาะทีสตริงทำตอบที่4ได้คำตอบที่แย่กว่าก่อนทำการค้นหาเฉพาะทีในขณะทีสตริงคำตอบที่ 1 2 และ 3 ให้คำตอบทีดีขึ้นดังนั้นประชากรคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะทีจะเป็น

ตารางที่ 8.53 สตริงคำตอบรวมก่อนและหลังการค้นหาเฉพาะที

String No.	String Priority
1	[3 1 2 5 7 6 4]
2	[5 1 3 4 7 6 2]
3	[4 1 2 3 7 6 5]
4	[5 1 3 4 2 6 7]
5	[2 1 5 3 7 6 4]
6	[5 4 3 1 7 6 2]
7	[3 1 2 5 7 4 6]
8	[4 1 2 5 7 6 3]

เมือนำมาจัดลำดับความแข็งแรงจะได้จะได้ผลดังตารางที่ 8.54

ตารางที่ 8.54 การจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงที่ได้จากการค้นหาเฉพาะที่

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้ในการเดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
7	2.6179	1.9108	1	Inf
6	2.7766	1.3109	1	2.0000
5	2.8308	1.1370	1	Inf
2	3.2178	1.1370	2	Inf
8	3.2178	1.1370	2	Inf
3	3.2208	1.2735	3	Inf
1	4.1522	1.1370	3	Inf
4	4.1612	1.1879	4	Inf

ซึ่งจากตารางที่ 8.54จะได้ประชากรหลังจากการทำการค้นหาเฉพาะที่ ซึ่งคัดเลือกจากสตริงคำตอบที่ดีที่สุดจำนวนเท่ากับจำนวนประชากรเป็นดังตารางที่ 8.55

ตารางที่ 8.55 ประชากรรุ่นลูกหลังการค้นหาเฉพาะที่

String No.	String Priority
1	[3 1 2 5 7 4 6]
2	[5 4 3 1 7 6 2]
3	[2 1 5 3 7 6 4]
4	[5 1 3 4 7 6 2]
5	[4 1 2 5 7 6 3]

การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเลือกสตริงทำตอบที่เหมาะสมจะเป็นประชากรในรอบถัดไปจะทำโดยนำประชากรเริ่มต้นมาพิจารณารวมกับประชากรรุ่นลูกดังนี้

ตารางที่ 8.56 สติงคำตอบเริ่มต้นรวมกับสตริงคำตอบรุ่นลูกในรอบที่ 2

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบเริ่มต้น (P)	1	[5 1 2 3 7 6 4]
	2	[5 1 2 3 7 6 4]
	3	[4 1 3 5 7 6 2]
	4	[5 1 2 3 7 6 4]
	5	[7 1 4 3 6 5 2]
สตริงคำตอบรุ่นลูก (Q)	6	[3 1 2 5 7 4 6]
	7	[5 4 3 1 7 6 2]
	8	[2 1 5 3 7 6 4]
	9	[5 1 3 4 7 6 2]
	10	[4 1 2 5 7 6 3]

จากนั้นจะทำการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และกำหนดค่าความแข็งแรงรวมทั้งหาค่าความหนาแน่นของประชากรเพื่อที่จะจัดอันดับสตริงคำตอบที่ดีซึ่งจะได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 8.57 ผลการจัดลำดับความเหมาะสมของประชากรในรอบที่ 2

สตริงคำตอบที่	ผลต่างความสัมพันธ์ของงานในสถานีงาน	ความแตกต่างของภาระงานระหว่างสถานีงาน	Dummy Fitness	Crowding Distance
6	2.6179	1.9108	1	Inf
1	2.7419	1.4849	1	1.5207
7	2.7766	1.3109	1	0.8670
8	2.8308	1.1370	1	Inf
2	2.7419	1.4849	1	1.5207
4	2.7419	1.4849	1	1.5207
5	2.9364	1.2600	2	Inf
3	3.2178	1.1370	2	2.0000
9	3.2178	1.1370	2	2.0000
10	3.2178	1.1370	2	2.0000

เมือทำการจัดลำดับแล้วจะเลือกสตริงคำตอบทีดีทีสุดเท่ากับจำนวนประชากรเริมต้นเพือนำไปใช้ในรอบถัดไปซึงจะได้ผลดังตาราง

ตารางที 8.58 สตริงคำตอบทีจะนำไปใช้เป็นประชากรในรอบถัดไปในการทำซ้ำรอบที 3

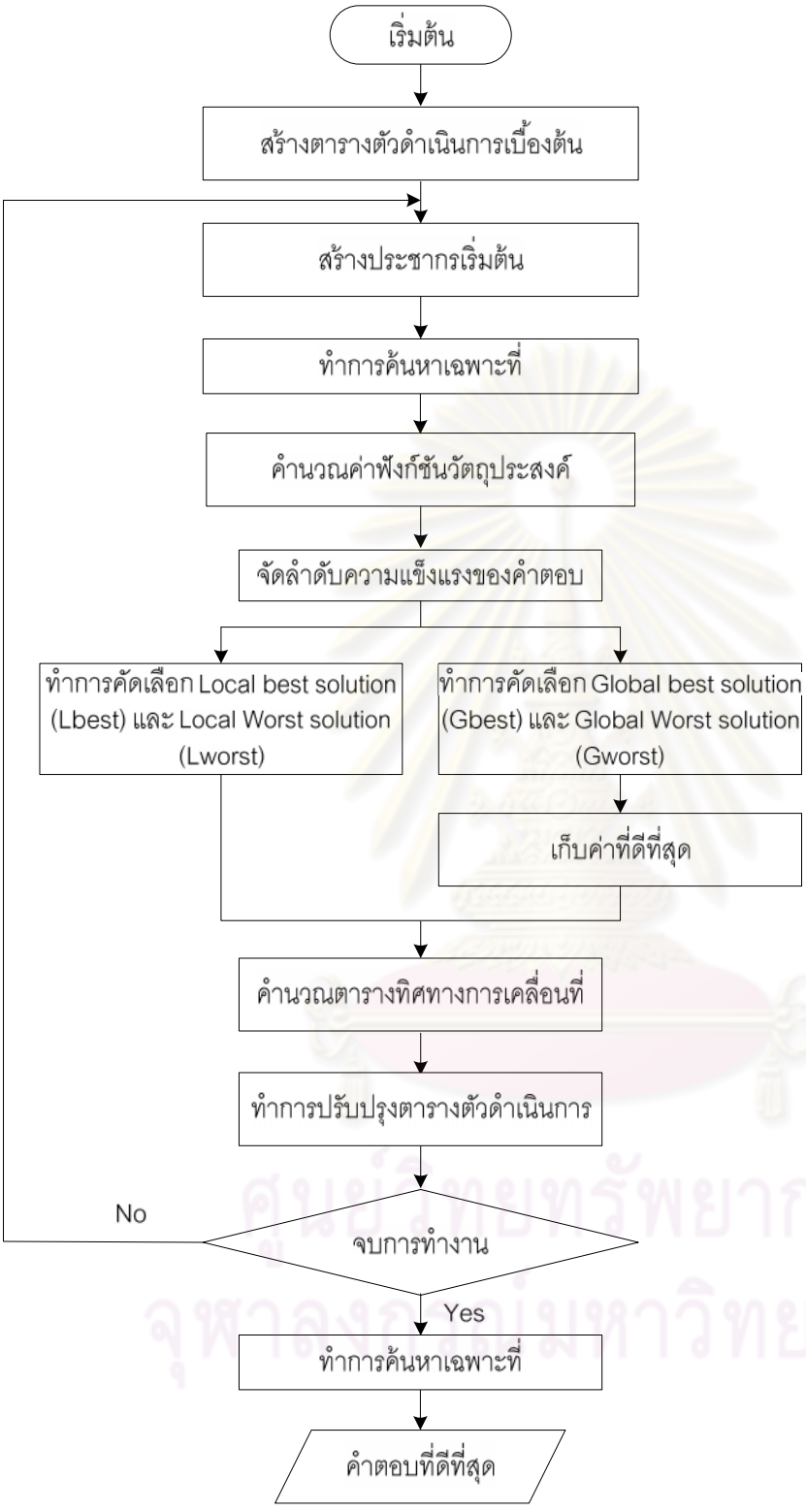
String No.	String Priority
1	[3 1 2 5 7 4 6]
2	[5 1 2 3 7 6 4]
3	[5 4 3 1 7 6 2]
4	[2 1 5 3 7 6 4]
5	[5 1 2 3 7 6 4]

หลังจากนั้นเราจะดำเนินการซ้ำตามตัวอย่างไปจนกว่าจะครบข้อกำหนดซึงคำตอบทีได้หลังจากดำเนินการจะเป็นคำตอบทีได้จากอัลกอริทึม

8.4 การประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะทีร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Memetic Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : M-PSONK)

ในหัวข้อนี้เราจะใช้การค้นหาเฉพาะที เข้ามาร่วมกับวิธีการหาค่าเหมาะสมทีสุดแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ ซึงขั้นตอนโดยมากแล้วจะเหมือนกับ PSONK ซึงได้กล่าวไว้ในบทที 7 โดยจะมีการเพิมเติมการค้นหาเฉพาะที หลังการสร้างประชากรเริมต้นและหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการซึงแสดงได้ดังรูป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.19 ขั้นตอนการทำงานของ PSONK ร่วมกับการค้นหาเฉพาะที่

8.5 ตัวอย่างการนำวิธี M-PSONK ไปใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยู

จากขั้นตอนของ PSONK ที่ได้นำเสนอมาข้างต้นเราสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูได้โดยในตัวอย่างที่จะแสดงต่อไปนี้เป็นปัญหาของ Merten ซึ่งมีจำนวนงานทั้งหมด 7 งาน และมีรอบเวลาการทำงานคือ 10 วินาที โดยมีขั้นตอนการแก้ปัญหาดังนี้

8.5.1 การเตรียมข้อมูล

ขั้นตอนนี้จะทำการรับข้อมูลที่จำเป็นในการใช้งานซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบในงานวิจัยนี้ได้แก่แผนภาพความสัมพันธ์รวม เวลาทำงานเฉลี่ยของแต่ละขั้นงาน เวลาที่พนักงานใช้เดิน ตารางความสัมพันธ์ของแต่ละขั้นงาน และพารามิเตอร์ที่ใช้ซึ่งข้อมูลที่จะใช้ในตัวอย่างนี้จะเป็นข้อมูลเช่นเดียวกับที่ใช้ ใน หัวข้อ 8.3.1 โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

พารามิเตอร์ที่ใช้ในตัวอย่าง

- จำนวน Swarm 2 กลุ่ม
- จำนวนอนุภาคในแต่ละSwarmมีจำนวน 3 อนุภาค
- รอบระยะเวลาการทำงาน 10 วินาที
- ค่า C_1 C_2 มีค่า = 0.1
- ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง w = 1
- ค่า r_1, r_2 = 1
- วิธีการค้นหาเฉพาะทีแบบ 2-Opt
- จำนวนการทำซ้ำในการค้นหาเฉพาะที เท่ากับ 5 ครั้ง

การสร้างประชากรเริ่มต้น

การสร้างประชากรเบื้องต้นจะทำการเลือกสร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) เพื่อใช้ในการเลือกงานอันดับแรกที่จัดถูกเลือก

ในการสร้างตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ 1× n = 1×7 โดย n คือจำนวนขั้นงานทั้งหมด และมีค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นเท่ากันทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1/7 = 0.1429

ตาราง 8.59 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของฝูง ที 1 ในรอบการทำงานแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

ตาราง 8.60 ตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) ของฝูง ที 2 ในรอบการทำงานแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429	0.1429

ในการสร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability)ซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ $n \times n = 7 \times 7$ โดย n คือจำนวนข้นงานทั้งหมด โดยเส้นทแยงมุมจะมีค่าเท่ากับ 0 หมด นอกจากเส้นแทยงมุมแล้วจะมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากันทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1/(7-1) = 0.1667

ตาราง 8.61 ตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability)ของฝูงที่1ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
4	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 8.62 ตารางความน่าจะเป็นร่วม(Matrix Join Probability)ของฝูงที่2ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
2	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
4	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667	0.1667
6	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0	0.1667
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0

การสุ่มเลือกงานจากตารางความน่าจะเป็นข้างต้นเราจะทำการสุ่มเลือกงานแรกจากตารางความน่าจะเป็นสำหรับเลือกงานแรก โดยจะพิจารณาจากตารางความสัมพันธ์ของขั้นงานในการทำงานข้างหน้า (Precedence Matrix Font) โดยจะพิจารณางานที่มีผลรวมในคอลัมน์เป็น 0 โดย

ซึ่งสตริงคำตอบที่เราจะทำการสร้างขึ้นมาจะมีจำนวน 2 กลุ่มกลุ่มละ 3 คำตอบรวมทั้งสิ้น 6 คำตอบดังนี้โดย $String_{ij}$ จะหมายถึงคำตอบในรอบที่ I ของ Swarm ที่ j

ตารางที่ 8.63 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence
11	[1 2 4 3 5 7 6]
12	[1 2 5 4 3 6 7]
13	[1 4 7 2 3 5 6]

ตารางที่ 8.64 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

Particle	Sequence
21	[1 4 2 5 3 6 7]
22	[1 2 3 4 5 6 7]
23	[1 2 4 5 6 7 3]

8.5.2 การค้นหาเฉพาะทีหลังการสร้างประชากรเริ่มต้น

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการค้นหาเฉพาะทีโดยใช้วิธี 2-Opt ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที 5 งานวิจัยได้กำหนดให้มีการทำซ้ำในการค้นหาเฉพาะทีหลังการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้นจำนวน 5 ครั้ง และสตริงคำตอบทีได้จากการค้นหาเฉพาะทีจะต้องไม่ขัดกับความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานถ้าขัดกับความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานจะต้องมีการซ่อมแซมคำตอบซึงจะทำให้ได้ผลดังนี้

ตารางที 8.65 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที ของฝูงที 1 ในรอบการทำงานแรก

ครั้งที	String No.	Task Sequence
เริมต้น	1-1	[1 2 4 3 5 7 6]
	1-2	[1 2 5 4 3 6 7]
	1-3	[1 4 7 2 3 5 6]
1	1-4	[1 4 7 2 5 3 6]
	1-5	[1 2 5 3 4 7 6]
	1-6	[1 4 7 2 5 6 3]
2	1-7	[1 4 2 3 5 7 6]
	1-8	[1 2 5 3 4 7 6]
	1-9	[1 2 5 3 4 6 7]
3	1-10	[1 2 5 4 3 7 6]
	1-11	[1 2 5 4 3 7 6]
	1-12	[1 2 4 5 3 6 7]
4	1-13	[1 4 2 5 3 6 7]
	1-14	[1 2 3 4 7 5 6]
	1-15	[1 4 2 5 3 7 6]
5	1-16	[1 4 2 5 6 3 7]
	1-17	[1 4 7 2 3 5 6]
	1-18	[1 4 2 7 3 5 6]

ตารางที่ 8.66 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก

ครั้งที่	String No.	Task Sequence
เริ่มต้น	2-1	[1 4 2 5 3 6 7]
	2-2	[1 2 3 4 5 6 7]
	2-3	[1 2 4 5 6 7 3]
1	2-4	[1 4 7 2 3 5 6]
	2-5	[1 2 3 5 6 4 7]
	2-6	[1 4 2 3 5 6 7]
2	2-7	[1 4 2 5 3 7 6]
	2-8	[1 2 5 4 3 6 7]
	2-9	[1 4 2 5 6 3 7]
3	2-10	[1 2 5 6 4 3 7]
	2-11	[1 2 3 4 5 6 7]
	2-12	[1 2 5 6 4 3 7]
4	2-13	[1 2 3 4 5 6 7]
	2-14	[1 2 5 6 4 7 3]
	2-15	[1 4 2 5 6 7 3]
5	2-16	[1 4 2 5 6 7 3]
	2-17	[1 2 5 6 4 7 3]
	2-18	[1 4 2 5 6 7 3]

8.5.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เราจะทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ด้วยกันได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงานน้อยที่สุด และเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

โดยงานที่ถูกเลือกมาทั้งหมดนั้นจะนำมาพิจารณางานในลักษณะของการหักงอเส้นตรงของสตริงคำตอบโดยจะใช้ฮิวริสติกในการเลือกงานแบบสุ่ม (Random Priority) ซึ่งจะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

ตารางที่ 8.67 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Dow	WT
1-1	2.9431	1.1370
1-2	2.8232	1.3109
1-3	2.9059	1.5041
1-4	3.2157	1.2600
1-5	3.0958	1.5570
1-6	4.3046	0.7170
1-7	2.9268	1.5041
1-8	2.9431	1.1370
1-9	3.0930	1.5041
1-10	2.8308	1.1370
1-11	2.9059	1.5041
1-12	2.8199	1.1370
1-13	3.2239	1.0140
1-14	2.9535	1.1370
1-15	2.9364	1.2600
1-16	3.2157	1.2600
1-17	2.9364	1.2600
1-18	2.9059	1.5041

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.68 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Dow	WT
2-1	3.2178	1.1370
2-2	2.8308	1.1370
2-3	2.8320	1.7792
2-4	3.2218	1.1370
2-5	3.2178	1.1370
2-6	3.2239	1.0140
2-7	2.9059	1.5041
2-8	4.3062	0.7170
2-9	3.2111	1.3109
2-10	3.1083	1.1370
2-11	2.8308	1.1370
2-12	3.1083	1.1370
2-13	3.0930	1.5041
2-14	4.2302	0.8400
2-15	4.3046	0.7170
2-16	4.3046	0.7170
2-17	3.0949	1.6561
2-18	3.2157	1.2600

8.5.4 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่

จากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้เราจะสามารถคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ได้เช่นเดียวกับการดำเนินการในรอบแรกโดยการจัดอันดับความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบซึ่งจะทำให้สามารถหา L_{best} , L_{worst} , G_{best} และ G_{worst} ได้เป็น

ตารางที่ 8.69 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Dow	WT	Dummy Fitness	Selection
1-12	2.8199	1.1370	1	L_{best}
1-13	3.2239	1.0140	1	L_{best}
1-6	4.3046	0.7170	1	L_{best}
1-2	2.8232	1.3109	2	
1-10	2.8308	1.1370	2	
1-3	2.9059	1.5041	3	
1-11	2.9059	1.5041	3	
1-18	2.9059	1.5041	3	
1-15	2.9364	1.2600	3	
1-1	2.9431	1.1370	3	
1-8	2.9431	1.1370	3	
1-17	2.9364	1.2600	3	
1-7	2.9268	1.5041	4	
1-14	2.9535	1.1370	4	
1-9	3.0930	1.5041	5	
1-4	3.2157	1.2600	5	
1-16	3.2157	1.2600	5	
1-5	3.0958	1.5570	6	L_{worst}

ตารางที่ 8.70 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Dow	WT	Dummy Fitness	Selection
2-2	2.8308	1.1370	1	L_{best}
2-11	2.8308	1.1370	1	L_{best}
2-6	3.2239	1.0140	1	L_{best}
2-14	4.2302	0.8400	1	L_{best}
2-15	4.3046	0.7170	1	L_{best}
2-16	4.3046	0.7170	1	L_{best}
2-3	2.8320	1.7792	2	
2-7	2.9059	1.5041	2	
2-10	3.1083	1.1370	2	
2-8	4.3062	0.7170	2	
2-12	3.1083	1.1370	2	
2-13	3.0930	1.5041	3	
2-9	3.2111	1.3109	3	
2-18	3.2157	1.2600	3	
2-1	3.2178	1.1370	3	
2-5	3.2178	1.1370	3	
2-17	3.0949	1.6561	4	L_{worst}
2-4	3.2218	1.1370	4	L_{worst}

ซึ่งจากตารางที่ 8.69 และ 8.70 จะทำให้เราสามารถหาสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 ได้ดังตาราง 8.71 และ ตาราง 8.72 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.71 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence	Selection
1-12	[1 2 4 5 3 6 7]	L_{best}
1-13	[1 4 2 5 3 6 7]	L_{best}
1-6	[1 4 7 2 5 6 3]	L_{best}
1-5	[1 2 5 3 4 7 6]	L_{worst}

ตารางที่ 8.72 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence	Selection
2-2	[1 2 3 4 5 6 7]	L_{best}
2-11	[1 2 3 4 5 6 7]	L_{best}
2-6	[1 4 2 3 5 6 7]	L_{best}
2-14	[1 2 5 6 4 7 3]	L_{best}
2-15	[1 4 2 5 6 7 3]	L_{best}
2-16	[1 4 2 5 6 7 3]	L_{best}
2-17	[1 2 5 6 4 7 3]	L_{worst}
2-4	[1 4 7 2 3 5 6]	L_{worst}

ในส่วนของ G_{best} และ G_{worst} เราจะสามารถคัดเลือกสตริงคำตอบได้โดยการจัดลำดับความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบรวมของทุกฝูงซึ่งจะได้ผลเป็น

ตารางที่ 8.73 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	DOW	WT	Font	Selection
12	2.8199	1.1370	1	G_{best}
13	3.2239	1.0140	1	G_{best}
32	4.2302	0.8400	1	G_{best}
6	4.3046	0.7170	1	G_{best}
33	4.3046	0.7170	1	G_{best}
34	4.3046	0.7170	1	G_{best}
2	2.8232	1.3109	2	
10	2.8308	1.1370	2	
29	2.8308	1.1370	2	
24	3.2239	1.0140	2	
26	4.3062	0.7170	2	
20	2.8308	1.1370	2	
21	2.8320	1.7792	3	
3	2.9059	1.5041	3	

ตารางที่ 8.73 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก(ต่อ)

String	DOW	WT	Font	Selection
11	2.9059	1.5041	3	
18	2.9059	1.5041	3	
25	2.9059	1.5041	3	
15	2.9364	1.2600	3	
1	2.9431	1.1370	3	
8	2.9431	1.1370	3	
17	2.9364	1.2600	3	
7	2.9268	1.5041	4	
14	2.9535	1.1370	4	
9	3.0930	1.5041	5	
31	3.0930	1.5041	5	
28	3.1083	1.1370	5	
30	3.1083	1.1370	5	
35	3.0949	1.6561	6	
5	3.0958	1.5570	6	
27	3.2111	1.3109	6	
4	3.2157	1.2600	6	
16	3.2157	1.2600	6	
36	3.2157	1.2600	6	
19	3.2178	1.1370	6	
23	3.2178	1.1370	6	
22	3.2218	1.1370	7	G_{worst}

ซึ่งจากตารางที่ 8.73 จะทำให้เราสามารถหาสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวมได้เป็น ดังตารางที่ 8.74

ตารางที่ 8.74 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบแรก

String	Sequence	Selection
12	[1 2 4 5 3 6 7]	G_{best}
13	[1 4 2 5 3 6 7]	G_{best}
32	[1 2 5 6 4 7 3]	G_{best}
6	[1 4 7 2 5 6 3]	G_{best}
33	[1 4 2 5 6 7 3]	G_{best}
34	[1 4 2 5 6 7 3]	G_{best}
22	[1 4 7 2 3 5 6]	G_{worst}

8.5.5 การคำนวณหาค่า Velocity และการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) นั้นเราจะทำการปรับปรุงโดยการสร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) โดยการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางจะเป็นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่สตริงคำตอบที่ดี และลดค่าความน่าจะเป็นในสตริงคำตอบที่แย่ เพื่อให้โอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่ดีในรอบถัดไปมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นการลดโอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่แย่

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability)

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานอันดับแรกเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตารางการปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรก เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจาก

งานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworst ทำให้จะได้ผลเป็น

ตารางที่ 8.75 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงในรอบแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.2595	0.1234	0.1234	0.1234	0.1234	0.1234	0.1234

ตารางที่ 8.76 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงในรอบแรก

1	2	3	4	5	6	7
0.2929	0.1179	0.1179	0.1179	0.1179	0.1179	0.1179

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตารางการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดี ในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2}$ $= 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นของลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค(Velocity Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworstจะทำให้ได้ผลเป็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.77 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.020	-0.028	0.092	-0.028	-0.028	-0.028
2	-0.028	0.000	-0.052	0.020	0.116	-0.028	-0.028
3	-0.008	-0.008	0.000	-0.032	-0.032	0.088	-0.008
4	-0.028	0.068	-0.028	0.000	0.020	-0.028	-0.004
5	-0.028	-0.028	0.044	-0.028	0.000	0.068	-0.028
6	-0.036	-0.036	0.012	-0.012	-0.036	0.000	0.108
7	-0.012	0.012	0.060	-0.012	-0.012	-0.036	0.000

ตารางที่ 8.78 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.060	-0.036	0.084	-0.036	-0.036	-0.036
2	-0.036	0.000	-0.012	-0.012	0.132	-0.036	-0.036
3	-0.012	-0.012	0.000	0.036	-0.036	0.036	-0.012
4	-0.036	0.108	-0.036	0.000	0.036	-0.036	-0.036
5	-0.036	-0.036	0.012	-0.036	0.000	0.132	-0.036
6	-0.044	-0.044	-0.020	-0.020	-0.044	0.000	0.172
7	-0.016	-0.040	0.104	-0.016	-0.016	-0.016	0.000

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

ในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เราสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$x_{(i,j)} = x_{(i-1,j)} + V_{(i-1,j)}$$

เมื่อ $x_{(i,j)}$ คือ ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ j ในรอบที่ i

$V_{(i,j)}$ คือ ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ j ในรอบที่ i

โดยจะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

ตารางที่ 8.79 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1867	0.1387	0.2587	0.1387	0.1387	0.1387
2	0.1387	0.0000	0.1147	0.1867	0.2827	0.1387	0.1387
3	0.1587	0.1587	0.0000	0.1347	0.1347	0.2547	0.1587
4	0.1387	0.2347	0.1387	0.0000	0.1867	0.1387	0.1627
5	0.1387	0.1387	0.2107	0.1387	0.0000	0.2347	0.1387
6	0.1307	0.1307	0.1787	0.1547	0.1307	0.0000	0.2747
7	0.1547	0.1787	0.2267	0.1547	0.1547	0.1307	0.0000

ตารางที่ 8.80 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.2267	0.1307	0.2507	0.1307	0.1307	0.1307
2	0.1307	0.0000	0.1547	0.1547	0.2987	0.1307	0.1307
3	0.1547	0.1547	0.0000	0.2027	0.1307	0.2027	0.1547
4	0.1307	0.2747	0.1307	0.0000	0.2027	0.1307	0.1307
5	0.1307	0.1307	0.1787	0.1307	0.0000	0.2987	0.1307
6	0.1227	0.1227	0.1467	0.1467	0.1227	0.0000	0.3387
7	0.1507	0.1267	0.2707	0.1507	0.1507	0.1507	0.0000

ซึงตารางที่ 8.79 และตารางที่ 8.80 จะถูกนำไปใช้ในการสร้างประชากรเริมต้นในการดำเนินการรอบที่ 2 ต่อไป

8.5.6 การเก็บค่าทีดีทีสุด

การเก็บค่าทีดีสุดจะทำการเก็บค่าทีอยู่ใน frontier ที่ 1 ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบทีดีทีสุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบทีดีทีสุด ซึงจะได้ผลคือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.81 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการรอบแรก

String	Sequence
1	[1 2 4 5 3 6 7]
2	[1 4 2 5 3 6 7]
3	[1 2 5 6 4 7 3]
4	[1 4 7 2 5 6 3]
5	[1 4 2 5 6 7 3]
6	[1 4 2 5 6 7 3]

8.5.7 การดำเนินการในรอบถัดไป

การแก้ปัญหาในรอบการดำเนินการที่ 2 จะเริ่มต้นจากการสร้างประชากรคำตอบโดยจะสร้างประชากรคำตอบจาก ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกในตารางที่ 8.75 และตารางที่ 8.76 ตารางความน่าจะเป็นร่วมในตารางที่ 8.79 และตารางที่ 8.80 ซึ่งจะทำให้ได้ผลการสร้างประชากรคำตอบเป็น

ตารางที่ 8.82 สตริงประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Sequence
11	[1 4 2 5 7 3 6]
12	[1 4 7 2 5 3 6]
13	[1 2 3 5 4 7 6]

ตารางที่ 8.83 สตริงประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

Particle	Sequence
21	[1 4 2 5 7 3 6]
22	[1 2 5 3 6 4 7]
23	[1 2 5 3 4 6 7]

การค้นหาเฉพาะทีหลังการสร้างประชากรเริ่มต้น

ในขั้นตอนนี้เราจะทำการค้นหาเฉพาะทีโดยใช้วิธี 2-Opt ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้น งานวิจัยได้กำหนดให้มีการทำซ้ำในการค้นหาเฉพาะทีหลังการสร้างประชากรคำตอบเบื้องต้นจำนวน 5 ครั้ง และสตริงคำตอบทีได้จากการค้นหาเฉพาะทีจะต้องไม่ขัดกับความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานถ้าขัดกับความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานจะต้องมีการซ่อมแซมคำตอบซึ่งจะทำให้ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 8.84 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที ของฝูงที 1 ในรอบการทำงานทีสอง

ครั้งที่	String No.	Task Sequence
เริมต้น	1-1	[1 4 2 5 7 3 6]
	1-2	[1 4 7 2 5 3 6]
	1-3	[1 2 3 5 4 7 6]
1	1-4	[1 4 2 5 7 6 3]
	1-5	[1 4 7 2 5 3 6]
	1-6	[1 4 2 7 5 3 6]
2	1-7	[1 4 7 2 3 5 6]
	1-8	[1 2 5 4 7 3 6]
	1-9	[1 4 2 5 7 3 6]
3	1-10	[1 4 7 2 5 3 6]
	1-11	[1 4 7 2 3 5 6]
	1-12	[1 2 3 5 6 4 7]
4	1-13	[1 2 3 5 6 4 7]
	1-14	[1 4 2 5 3 7 6]
	1-15	[1 2 3 5 4 7 6]
5	1-16	[1 2 3 5 4 7 6]
	1-17	[1 4 7 2 5 6 3]
	1-18	[1 2 5 3 4 7 6]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.85 สตริงคำตอบหลังการค้นหาเฉพาะที ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สอง

ครั้งที่	String No.	Task Sequence
เริ่มต้น	2-1	[1 4 2 5 7 3 6]
	2-2	[1 2 5 3 6 4 7]
	2-3	[1 2 5 3 4 6 7]
1	2-4	[1 4 7 2 5 3 6]
	2-5	[1 4 2 5 3 7 6]
	2-6	[1 2 3 5 6 4 7]
2	2-7	[1 4 2 3 7 5 6]
	2-8	[1 4 2 5 7 3 6]
	2-9	[1 2 3 5 6 4 7]
3	2-10	[1 4 2 3 5 6 7]
	2-11	[1 2 5 6 3 4 7]
	2-12	[1 2 3 5 6 4 7]
4	2-13	[1 4 7 2 3 5 6]
	2-14	[1 2 3 5 4 6 7]
	2-15	[1 4 2 3 5 6 7]
5	2-16	[1 2 5 3 6 4 7]
	2-17	[1 2 5 6 4 3 7]
	2-18	[1 2 5 3 4 6 7]

8.5.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เราจะทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 วัตถุประสงค์ด้วยกันได้แก่ จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงานน้อยที่สุด และเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

โดยงานที่ถูกเลือกมาทั้งหมดนั้นจะนำมาพิจารณางานในลักษณะของการหักงอเส้นตรงของสตริงคำตอบโดยจะใช้ฮิวริสติกในการเลือกงานแบบสุ่ม (Random Priority) ซึ่งจะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

ตารางที่ 8.86 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Dow	WT
1-1	3.2070	1.5041
1-2	4.2027	0.8400
1-3	3.0958	1.5570
1-4	3.2036	1.6800
1-5	4.2027	0.8400
1-6	2.9364	1.2600
1-7	2.9364	1.2600
1-8	2.9535	1.1370
1-9	2.9268	1.5041
1-10	2.9364	1.2600
1-11	2.9431	1.1370
1-12	3.2178	1.1370
1-13	3.2239	1.0140
1-14	2.9431	1.1370
1-15	2.9431	1.1370
1-16	2.9364	1.2600
1-17	4.3046	0.7170
1-18	3.0958	1.5570

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.87 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Dow	WT
2-1	4.2027	0.8400
2-2	3.2239	1.0140
2-3	3.1083	1.1370
2-4	4.2027	0.8400
2-5	3.2218	1.1370
2-6	3.2178	1.1370
2-7	2.9431	1.1370
2-8	3.2157	1.2600
2-9	3.0885	1.7792
2-10	3.2239	1.0140
2-11	4.2968	0.8400
2-12	2.8199	1.1370
2-13	2.9364	1.2600
2-14	2.7684	1.5570
2-15	3.2239	1.0140
2-16	3.2091	1.3810
2-17	4.1346	0.8400
2-18	3.1083	1.1370

การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่

จากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้เราจะสามารถคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ได้เช่นเดียวกับการดำเนินการในรอบแรกโดยการจัดอันดับความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบซึ่งจะทำให้สามารถหา L_{best} , L_{worst} , G_{best} และ G_{worst} ได้เป็น

ตารางที่ 8.88 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Dow	WT	Dummy Fitness	Selection
1-9	2.9268	1.5041	1	L_{best}
1-6	2.9364	1.2600	1	L_{best}
1-10	2.9364	1.2600	1	L_{best}
1-16	2.9364	1.2600	1	L_{best}
1-11	2.9431	1.1370	1	L_{best}
1-14	2.9431	1.1370	1	L_{best}
1-13	3.2239	1.0140	1	L_{best}
1-2	4.2027	0.8400	1	L_{best}
1-17	4.3046	0.7170	1	L_{best}
1-5	4.2027	0.8400	1	L_{best}
1-7	2.9364	1.2600	1	L_{best}
1-15	2.9431	1.1370	1	L_{best}
1-8	2.9535	1.1370	2	
1-3	3.0958	1.5570	3	
1-18	3.0958	1.5570	3	
1-1	3.2070	1.5041	3	
1-12	3.2178	1.1370	3	
1-4	3.2036	1.6800	4	L_{worst}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.89 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Dow	WT	Dummy Fitness	Selection
2-14	2.7684	1.5570	1	L_{best}
2-12	2.8199	1.1370	1	L_{best}
2-10	3.2239	1.0140	1	L_{best}
2-17	4.1346	0.8400	1	L_{best}
2-13	2.9364	1.2600	2	
2-7	2.9431	1.1370	2	
2-2	3.2239	1.0140	2	
2-15	3.2239	1.0140	2	
2-1	4.2027	0.8400	2	
2-4	4.2027	0.8400	2	
2-9	3.0885	1.7792	3	
2-3	3.1083	1.1370	3	
2-11	4.2968	0.8400	3	
2-18	3.1083	1.1370	4	
2-16	3.2091	1.3810	5	
2-8	3.2157	1.2600	5	
2-6	3.2178	1.1370	5	
2-5	3.2218	1.1370	6	L_{worst}

ซึ่งจากตารางที่ 8.88 และ 8.89 จะทำให้เราสามารถหาสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ในฝูงที่ 1 และฝูงที่ 2 ได้ดังตาราง 8.90 และ ตาราง 8.91 ตามลำดับ

ตารางที่ 8.90 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 1 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Sequence	Selection
1-9	[1 4 2 5 7 3 6]	L_{best}
1-6	[1 4 2 7 5 3 6]	L_{best}
1-10	[1 4 7 2 5 3 6]	L_{best}
1-16	[1 2 3 5 4 7 6]	L_{best}
1-11	[1 4 7 2 3 5 6]	L_{best}
1-14	[1 4 2 5 3 7 6]	L_{best}
1-13	[1 2 3 5 6 4 7]	L_{best}
1-2	[1 4 7 2 5 3 6]	L_{best}
1-17	[1 4 7 2 5 6 3]	L_{best}
1-5	[1 4 7 2 5 3 6]	L_{best}
1-7	[1 4 7 2 3 5 6]	L_{best}
1-15	[1 2 3 5 4 7 6]	L_{best}
1-4	[1 4 2 5 7 6 3]	L_{worst}

ตารางที่ 8.91 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรในฝูงที่ 2 ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Sequence	Selection
2-14	[1 2 3 5 4 6 7]	L_{best}
2-12	[1 2 3 5 6 4 7]	L_{best}
2-10	[1 4 2 3 5 6 7]	L_{best}
2-17	[1 2 5 6 4 3 7]	L_{best}
2-5	[1 4 2 5 3 7 6]	L_{worst}

ในส่วนของ G_{best} และ G_{worst} เราจะสามารถคัดเลือกสตริงคำตอบได้โดยการจัดลำดับความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบรวมของทุกฝูงซึ่งจะได้ผลเป็น

ตารางที่ 8.92 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	DOW	WT	Font	Selection
32	2.7684	1.5570	1	G_{best}
30	2.8199	1.1370	1	G_{best}
13	3.2239	1.0140	1	G_{best}
28	3.2239	1.0140	1	G_{best}
35	4.1346	0.8400	1	G_{best}
17	4.3046	0.7170	1	G_{best}
9	2.9268	1.5041	2	
6	2.9364	1.2600	2	
10	2.9364	1.2600	2	
16	2.9364	1.2600	2	
31	2.9364	1.2600	2	
11	2.9431	1.1370	2	
25	2.9431	1.1370	2	
20	3.2239	1.0140	2	
33	3.2239	1.0140	2	
2	4.2027	0.8400	2	
19	4.2027	0.8400	2	
22	4.2027	0.8400	2	
5	4.2027	0.8400	2	
7	2.9364	1.2600	2	
14	2.9431	1.1370	2	
15	2.9431	1.1370	2	
8	2.9535	1.1370	3	
29	4.2968	0.8400	3	
27	3.0885	1.7792	4	
3	3.0958	1.5570	4	
21	3.1083	1.1370	4	

ตารางที่ 8.92 การจัดอันดับความแข็งแรงและการคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง(ต่อ)

String	DOW	WT	Font	Selection
18	3.0958	1.5570	4	
36	3.1083	1.1370	5	
4	3.2036	1.6800	6	
1	3.2070	1.5041	6	
34	3.2091	1.3810	6	
26	3.2157	1.2600	6	
12	3.2178	1.1370	6	
24	3.2178	1.1370	6	
23	3.2218	1.1370	7	G_{worst}

ซึ่งจากตารางที่ 8.92 จะทำให้เราสามารถหาสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่แย่ของประชากรรวมได้เป็นดังตารางที่ 8.93

ตารางที่ 8.93 สตริงคำตอบที่ดีและแย่ของประชากรรวม ในรอบการดำเนินการรอบที่สอง

String	Sequence	Selection
32	[1 2 3 5 4 6 7]	G_{best}
30	[1 2 3 5 6 4 7]	G_{best}
13	[1 2 3 5 6 4 7]	G_{best}
28	[1 4 2 3 5 6 7]	G_{best}
35	[1 2 5 6 4 3 7]	G_{best}
17	[1 4 7 2 5 6 3]	G_{best}
23	[1 4 2 5 3 7 6]	G_{worst}

การคำนวณหาค่า Velocity และการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตาราง

การปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) และตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability) นั้นเราจะทำการปรับปรุงโดยการสร้างตารางทิศทางการเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) โดยการปรับปรุงความน่าจะเป็นในตารางจะเป็นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นให้แก่สตริงคำตอบที่ดี และลดค่าความน่าจะเป็นในสตริงคำตอบที่

แย่ เพื่อให้โอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่ดีในรอบถัดไปมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นการลดโอกาสในการเลือกสตริงคำตอบที่แย่

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกงานอันดับแรก (First Walk Matrix Probability)

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานอันดับแรกเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตารางการปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรก เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรก (First Walk Probability Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากงานที่ถูกเลือกเป็นอันดับแรกในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworst ทำให้จะได้ผลเป็น

ตารางที่ 8.94 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 1 หลังการปรับปรุงในรอบ 2

1	2	3	4	5	6	7
0.5262	0.0790	0.0790	0.0790	0.0790	0.0790	0.0790

ตารางที่ 8.95 ตารางความน่าจะเป็นในการเลือกงานแรกของฝูงที่ 2 หลังการปรับปรุงในรอบ 2

1	2	3	4	5	6	7
0.4262	0.0957	0.0957	0.0957	0.0957	0.0957	0.0957

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเราจะทำการปรับปรุงโดยใช้คำตอบที่ดีและคำตอบที่แย่ที่ได้คัดเลือกจากข้างต้นมาทำการปรับปรุงตารางการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดี ในแต่ละฝูง (Lbest) ด้วยการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานลำดับแรกเท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = \frac{0.1\times1}{(7-1)}$ 0.0167 และลดค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = \frac{0.1\times1}{(12-1)^2} = 0.0028$ จากนั้นในสตริงคำตอบที่แย่ในแต่ละฝูง (Lworst) จะทำการลดค่าความน่าจะเป็นของลำดับงาน

ที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่แย่ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเลือกงานอื่น ๆ เท่ากับ $\frac{cr}{(n-1)^2} = 0.0028$ และนำตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค(Velocity Matrix) ที่ได้จากการเพิ่มและลดค่าความน่าจะเป็นในแต่ละฝูงมาทำการปรับปรุงโดยดูจากลำดับงานที่อยู่ติดกันในสตริงคำตอบที่ดีของประชากร (Gbest) และสตริงคำตอบที่แย่ของประชากร (Gworst) โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับ Lbest และ Lworstจะทำให้ได้ผลเป็น

ตารางที่ 8.96 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่สอง หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.124	-0.092	0.244	-0.092	-0.092	-0.092
2	-0.092	0.000	0.100	-0.044	0.196	-0.092	-0.068
3	-0.068	-0.068	0.000	-0.092	0.124	0.148	-0.044
4	-0.092	0.052	-0.068	0.000	-0.044	-0.068	0.220
5	-0.092	-0.092	0.076	-0.020	0.000	0.220	-0.092
6	-0.064	-0.064	0.008	0.056	-0.064	0.000	0.128
7	-0.052	0.140	0.044	-0.052	-0.028	-0.052	0.000

ตารางที่ 8.97 ตารางแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่สอง หลังปรับปรุง

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.000	0.196	-0.068	0.076	-0.068	-0.068	-0.068
2	-0.068	0.000	0.124	-0.044	0.124	-0.068	-0.068
3	-0.040	-0.040	0.000	0.008	0.104	0.008	-0.040
4	-0.068	0.076	-0.020	0.000	0.004	-0.020	0.028
5	-0.068	-0.068	-0.068	-0.020	0.000	0.292	-0.068
6	-0.084	-0.084	-0.036	0.060	-0.084	0.000	0.228
7	-0.012	-0.012	0.108	-0.012	-0.012	-0.060	0.000

การปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix)

ในการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) เราสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$x_{(i,j)} = x_{(i-1,j)} + V_{(i-1,j)}$$

เมื่อ $x_{(i,j)}$ คือ ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ j ในรอบที่ i

$V_{(i,j)}$ คือ ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของฝูงที่ j ในรอบที่ i

โดยจะได้ตารางความน่าจะเป็นร่วม (Joint Probability Matrix) ของฝูงที่ 1 และ 2 ดังนี้

ตารางที่ 8.98 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.3107	0.0467	0.5027	0.0467	0.0467	0.0467
2	0.0467	0.0000	0.2147	0.1427	0.4787	0.0467	0.0707
3	0.0907	0.0907	0.0000	0.0427	0.2587	0.4027	0.1147
4	0.0467	0.2867	0.0707	0.0000	0.1427	0.0707	0.3827
5	0.0467	0.0467	0.2867	0.1187	0.0000	0.4547	0.0467
6	0.0667	0.0667	0.1867	0.2107	0.0667	0.0000	0.4027
7	0.1027	0.3187	0.2707	0.1027	0.1267	0.0787	0.0000

ตารางที่ 8.99 ตารางความน่าจะเป็นร่วมของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานแรก

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.4227	0.0627	0.3267	0.0627	0.0627	0.0627
2	0.0627	0.0000	0.2787	0.1107	0.4227	0.0627	0.0627
3	0.1147	0.1147	0.0000	0.2107	0.2347	0.2107	0.1147
4	0.0627	0.3507	0.1107	0.0000	0.2067	0.1107	0.1587
5	0.0627	0.0627	0.1107	0.1107	0.0000	0.5907	0.0627
6	0.0387	0.0387	0.1107	0.2067	0.0387	0.0000	0.5667
7	0.1387	0.1147	0.3787	0.1387	0.1387	0.0907	0.0000

ซึ่งตารางที่ 8.98 และตารางที่ 8.99 จะถูกนำไปใช้ในการสร้างประชากรเริ่มต้นในการดำเนินการรอบที่ 3 ต่อไป

การเก็บค่าที่ดีที่สุด

การเก็บค่าที่ดีสุดจะทำการเก็บค่าที่อยู่ใน frontier ที่ 1 ทั้งหมดในรอบนี้มารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามาทำการคัดเลือกเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจะได้ผลคือ

ตารางที่ 8.100 สตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการแต่ละรอบ

รอบการทำงาน	สตริงคำตอบที่	Task Sequence
1	1	[1 2 4 5 3 6 7]
	2	[1 4 2 5 3 6 7]
	3	[1 2 5 6 4 7 3]
	4	[1 4 7 2 5 6 3]
	5	[1 4 2 5 6 7 3]
	6	[1 4 2 5 6 7 3]
2	7	[1 2 3 5 4 6 7]
	8	[1 2 3 5 6 4 7]
	9	[1 2 3 5 6 4 7]
	10	[1 4 2 3 5 6 7]
	11	[1 2 5 6 4 3 7]
	12	[1 4 7 2 5 6 3]

จากนั้นเราจะทำการประเมินหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อทำการเก็บค่าไว้เป็นค่าที่ดีที่สุดในรอบถัดไป ด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ซึ่งจะได้ผลเป็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 8.101 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และการจัดลำดับความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

สตริงคำตอบที่	ความแปรผันของเวลาทำงานของพนักงาน	เวลาที่พนักงานใช้เดิน	Dummy Fitness	Crowding Distance
7	2.7684	1.557	1	Inf
1	2.8199	1.137	1	0.5335
8	2.8199	1.137	1	0.5335
2	3.2239	1.014	1	0.4094
9	3.2239	1.014	1	0.4094
11	4.1346	0.840	1	1.0571
4	4.3046	0.717	1	0.2571
12	4.3046	0.717	1	0.2571
5	4.3046	0.717	1	0.2571
6	4.3046	0.717	1	0.2571
10	3.2239	1.014	1	0.4094
3	4.2302	0.840	2	Inf

ซึ่งจากตารางที่ 8.101 เราจะได้ค่าสตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการในรอบที่ 2 เป็น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.102 ค่าสตริงที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่ทำการเก็บในรอบดำเนินการในรอบที่ 2

String	Sequence
1	[1 2 3 5 4 6 7]
2	[1 2 4 5 3 6 7]
3	[1 2 3 5 6 4 7]
4	[1 4 2 5 3 6 7]
5	[1 2 3 5 6 4 7]
6	[1 2 5 6 4 3 7]
7	[1 4 7 2 5 6 3]
8	[1 4 7 2 5 6 3]
9	[1 4 2 5 6 7 3]
10	[1 4 2 5 6 7 3]
11	[1 4 2 3 5 6 7]

8.6 สรุปท้ายบท

เนื้อหาที่ได้กล่าวไปแล้วในบทนี้คือการนำเมมเมติกอัลกอริทึมแบบ M-NSGAII และ M-PSONK มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบมีหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู และอธิบายถึงฮิวริสติกการค้นหาเฉพาะที ซึงการค้นหาเฉพาะที (Local Search) หรือ Hill Climbing เป็นฮิวริสติกพื้นฐานที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงจัด โดยการค้นหาเฉพาะที คือวิธีการทำซ้ำอย่างง่าย เพื่อประมาณหาคำตอบที่ดี ซึงกระบวนการค้นหาเฉพาะที่จะช่วยให้การหาคำตอบของอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพมากยิงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 9

การทดลองและการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเช่น จำนวนประชากรเบื้องต้น จำนวนรอบการดำเนินงาน เป็นต้น จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึมโดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะ 4 ตัว ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาในการคำนวณ (Computation time to solution)

9.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ต่างๆที่จะมีผลต่อการทดลองโดยการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยูจะมีพารามิเตอร์ที่เกียวข้องดังนี้

9.1.1 จำนวนรอบในการทำงาน

จำนวนรอบในการทำงานจำเป็นต้องมีการกำหนดให้เหมาะสมเนื่องจากถ้าจำนวนรอบในการทำงานมีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพไม่ดีในขณะที่ถ้าจำนวนรอบมีจำนวนมากเกินไปจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้แบ่ง งานออกเป็น 3 ประเภทคือ งานขนาดเล็กคืองานที่มีขนาด 7-45 ข้นงาน งานขนาดกลางคืองาน ทีมีขนาด 61-70 ข้นงาน และงานขนาดใหญ่คืองานที่มีขนาดตั้งแต่ 111 ข้นงานขึ้นไป โดยจะกำหนดจำนวนรอบการทำงานของงานขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ เป็น 100รอบ 150 รอบ และ 300รอบตามลำดับ ในขณะที่ปัญหา 297 ข้นงานในงานวิจัยนี้จะกำหนดจำนวนรอบในการทำงานไว้ที่ 50 รอบเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Olanviwatchai, 2009)

9.1.2 จำนวนประชากรเบื้องต้น

จำนวนประชากรเริมต้นถ้ามีจำนวนน้อยเกินไปจะทำให้คำตอบที่ได้ติด Local Optimum ได้ในขณะที่ถ้าจำนวนประชากรเบื้องต้นมีจำนวนมากเกินไปก็จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมาก โดย Hwang and Katayama (2008) ได้กำหนดค่าจำนวนประชากรที่ใช้ในการทดลองสำหรับสายการประกอบแบบตัวยูไว้เท่ากับ 100 ประชากร

9.1.3 การคัดเลือกสตริงคำตอบ

ในงานวิจัยนี้จะคัดเลือกงานโดยใช้วิธี Binary Tournament Selection (Olanviwatchai, 2009) ซึ่งจะทำการสุ่มคำตอบมา 2 ตัวแล้วทำการคัดเลือกคำตอบเพียงคำตอบเดียวโดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ

9.1.4 วิธีเชิงกลุ่มทีดีทีสุด

ในงานวิจัยนี้จะใช้การจัดอันดับแบบ Goldberg (Deb, et al. 2002) ซึ่งจะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรเป็นอันดับต่างๆ

9.1.5 การกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบ

ในงานวิจัยนี้จะใช้การกำหนดค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบด้วยวิธี Crowding Distance ซึ่งเป็นการคำนวณระยะทางระหว่างสมาชิกประชากรคำตอบภายในอันดับเดียวกัน ซึ่งค่า Crowding Distance มากจะหมายถึงสตริงคำตอบมีการกระจายของคำตอบที่ดี

9.1.6 วิธีการในการคลอสโอเวอร์

วิธีการที่ใช้ในการคลอสโอเวอร์มีหลายแบบด้วยกันเช่น Partially Mapped Crossover (PMX) , Order Crossover (OX) , Modified Order Crossover (ModOX) แต่ในงานวิจัยนี้เราจะเลือกให้วิธี Weight Mapping Crossover (WMX) โดยมีค่าความน่าจะเป็นในการคลอสโอเวอร์ (P_c) เท่ากับ 0.7 (Hwang and Katayama ,2008)

9.1.7 วิธีการในการมิวเตชัน

ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการมิว เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ โดยวิธี Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งจะทำการสุ่มตำแหน่งของสตริงคำตอบ 2 ตำแหน่งและทำการสลับที่กัน โดยความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) เท่ากับ 0.3 (Hwang, et al.,2007)

9.1.8 วิธีการในการค้นหาเฉพาะที

การค้นหาเฉพาะที (Local Search) จะต้องมีการเลือกทำในบางส่วนของอัลกอริทึมซึ่งในงานวิจัยนี้สำหรับเมมเมติกอัลกอริทึมจะมีการใช้ใน 2 ขั้นตอน คือ การค้นหาเฉพาะที่หลังการสร้างประชากรคำตอบ และการค้นหาเฉพาะที่หลังการมิวเตชัน โดยเลือกใช้วิธี Pairwise Interchange (PI) ในการค้นหาเฉพาะที่หลังการสร้างประชากร และวิธี Insertion Procedure (PI) ในการค้นหาเฉพาะที่หลังการ

มิวเตชั้น (Chutima and Pinkoompee,2008) ในขณะที่การใช้การค้นหาเฉพาะที่ในวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคจะมีการใช้ใน 2 ขั้นตอนคือหลังจากการสร้างประชากรและหลังจากเสร็จการดำเนินการในรอบสุดท้าย และกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นในการค้นหาเฉพาะที่(P_{LS}) เท่ากับ 0.8 (Ishibuchi, et al. , 2003)

9.1.9 ฮิวริสติกที่ใช้ในการเลือกงาน

ฮิวริสติกในการเลือกงานให้กับพนักงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำการเลือกแบบสุ่ม โดยทำการสุ่มงานในด้านหน้าและงานในด้านหลังจะมีโอกาสถูกจัดให้กับพนักงานเท่ากัน (Olanviwatchai, 2009)

9.1.10 ค่าน้ำหนักในการให้รางวัล (Reward) และลงโทษ (Punish)

Wattanapornprom, et al 2009 ได้ทำการทดลองกับปัญหา TSP แบบหลายวัตถุประสงค์ซึ่งในงานวิจัยนั้นได้ค่าน้ำหนักในการให้รางวัลและลงโทษเท่ากับ 0.1 ในขณะที่ Olanviwatchai, 2009 ได้ทำการทดลองกับปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบและได้ค่าน้ำหนักในการให้รางวัลและลงโทษเท่ากับ 0.1 เช่นกัน ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่า น้ำหนักในการให้รางวัลและลงโทษเป็น 0.1

9.1.11 ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้และค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ (Learning Factor) และค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (Inertia Weight) มีค่าเท่ากับ 1 (Salman, et al. 2002)

9.1.12 ลักษณะผังของสายการประกอบ

ลักษณะของผังสายการประกอบจะส่งผลต่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ โดยตรงเนื่องจากมีการพิจารณาการเดินของพนักงานด้วย ในงานวิจัยนี้เราจะทำการทดลองกับผังของสายการประกอบแบบสมมาตรที่มี Side Ratio เป็น 1:1:1 (1/3) และแบบ Rectangular ที่มี Side Ratio เป็น 1:4:4(1/9) ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 9.1 จำนวนงานในแต่ละด้านของผังสายการประกอบแบบสมมาตร

Problem	Number of Tasks	Side Tasks	Font Tasks	Back Tasks	Number of Product Models
Merten (1967)	7	1	3	3	1
Miltenburg (2001)	10	2	4	4	1
Jackson (1956)	11	3	4	4	1
Thomopoulos (1970)	19	7	6	6	3
Heskiaoff (1968)	28	10	9	9	1
Kilbridge&Wester (1961)	45	15	15	15	1
Kim (2006)	61	21	20	20	4
Tongue (1961)	70	24	23	23	1
Arcus (1963)	111	37	37	37	5
Scholl&Klein (1999)	297	99	99	99	1
This case study	36	12	12	12	3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9.2 จำนวนงานในแต่ละด้านของผังสายการประกอบแบบ Rectangular

Problem	Number of Tasks	Side Tasks	Font Tasks	Back Tasks	Number of Product Models
Merten (1967)	7	1	3	3	1
Miltenburg (2001)	10	2	4	4	1
Jackson (1956)	11	1	5	5	1
Thomopoulos (1970)	19	3	8	8	3
Heskiaoff (1968)	28	4	12	12	1
Kilbridge&Wester (1961)	45	5	20	20	1
Kim (2006)	61	7	27	27	4
Tongue (1961)	70	8	31	31	1
Arcus (1963)	111	11	50	50	5
Scholl&Klein (1999)	297	33	132	132	1
This case study	36	4	16	16	3

9.1.13 เวลาทีพนักงานใช้เดิน

ในการคำนวณเวลาการเดินของพนักงานในงานวิจัยนี้จะใช้ Matrix From-To ช่วยในคิดหาระยะเวลาทีพนักงานใช้เดินเช่นในคู่อันดับ 1,7 จะหมายถึงเวลาทีใช้เดินจากงานในตำแหน่งที่ 1 ของสายการประกอบไปยังงานตำแหน่งที่ 7 ของสายการประกอบซึงเวลาที่ใช้ในการเดินในแต่ละตำแหน่งจะคิดจาก ร้อยละของเวลาทำงานเฉลีย (Percent Average Processing Time : %APT) ในแต่ละปัญหาซึงจากงานวิจัยก่อนหน้า (Sirovetnukul R. and Chutima P. ,2010)เราจะสามารถหา %APT ทีใช้ในแต่ละปัญหาได้ดังนี้

ตารางที่ 9.3 % Average processing time ที่ใช้ในแต่ละปัญหา

Problem	% Average processing time	
	Symmetry	Rectangular
1. Merten / 7	5% = 0.21 s.	5% = 0.21 s.
2. Miltenburg /10	5% = 0.14 s.	5% = 0.14 s.
3. Jackson / 11	10% = 0.42 s.	15% = 0.63 s.
4. Thomopoulos / 19	15% = 3.06 s.	15% = 3.06 s.
5. Heskiaoff / 28	5% = 1.83 s.	5% = 1.83 s.
6. Kilbridge&Wester / 45	10% = 1.23 s.	5% = 0.61 s.
7. Kim / 61	5% = 4.33 s.	5% = 4.33 s.
8. Tongue / 70	5% = 2.51 s.	5% = 2.51 s.
9. Arcus / 111	5% = 65.61 s.	5% = 65.61 s.
10. Scholl&Klein / 297	5% = 11.73 s.	5% = 11.73 s.
11. Case Study / 36	5% = 9.25 s.	5% = 9.25 s.

9.1.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึม

จากการกำหนดค่าพารามิเคอร์ต่างๆข้างต้น ทำให้เราสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในอัลกอริทึมทั้ง 7 ทีเราจะทำการทดลองได้ดังตารางที่ 9.4 – 9.10

ตารางที่ 9.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ใน วิธี COMSOAL

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

ตารางที่ 9.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี NSGAII

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Crossover	WMX	Hwang and Katayama(2008)
Crossover probability	Pc = 0.7	Hwang et al. (2007)
Mutation	Swap or reciprocal mutation	Hwang and Katayama(2008)
Mutation probability	Pm = 0.3	Hwang et al. (2007)
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

ตารางที่ 9.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี M-NSGAII

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Crossover	WMX	Hwang and Katayama(2008)
Crossover probability	Pc = 0.7	Hwang et al. (2007)
Mutation	Swap or reciprocal mutation	Hwang and Katayama(2008)
Mutation probability	Pm = 0.3	Hwang et al. (2007)
Local search after initial population	Pairwise Interchange (PI)	Olanviwatchat (2009)
Local search after mutation	Insertion procedure (IP)	Olanviwatchat (2009)
Local search probability	P_{LS} = 0.8	Chutima and Pinkoompee(2009)

ตารางที่ 9.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี M-NSGAII (ต่อ)

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

ตารางที่ 9.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี COIN

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Learning Probability	K = 0.1	Wattanapornprom et al. (2009)
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี DPSO

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Number of Swarms	10	Assumption
Number of Particles in each Swarm	10	Assumption
Learning coefficient	$C_1 = C_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
Inertia Weight	w = 0.1	Assumption
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

ตารางที่ 9.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี PSONK

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Number of Swarms	10	Assumption
Number of Particles in each Swarm	10	Assumption
Cognitive component	$C_1 = 1$	Salman et al.(2002)
Social component	$C_2 = 1$	Salman et al.(2002)

ตารางที่ 9.9 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี PSONK (ต่อ)

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Learning coefficient	$C_1 = C_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
Inertia Weight	w = 0.1	Assumption
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

ตารางที่ 9.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี M-PSONK

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Fixed Layout	Side Ratio 1:1 Side Ratio 1:4	Assumption
Task assignment rule	Random	Hwang and Katayama(2008)
Number of Swarms	10	Assumption
Number of Particles in each Swarm	10	Assumption
Learning coefficient	$C_1 = C_2 = 0.1$	Wattanapornprom et al. (2009)
Inertia Weight	w = 0.1	Assumption
Local search method	2-opt	Assumption
Local search probability	$P_{LS} = 0.8$	Chutima and Pinkoompee(2009)
Walking Time	%APT ตามตารางที่ 9.3	Sirovetnukul R. and Chutima P. (2010)

ตารางที่ 9.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในวิธี M-PSONK (ต่อ)

Parameter	ค่าที่เลือกใช้	ที่มา
Population size	100	Hwang et al. (2007)
Generation	100 gen สำหรับ 7-45 tasks 150 gen สำหรับ 61-70 tasks 300 gen สำหรับ 111 tasks 50 gen สำหรับ 297 tasks	Olanviwatchat (2009)

9.2 การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

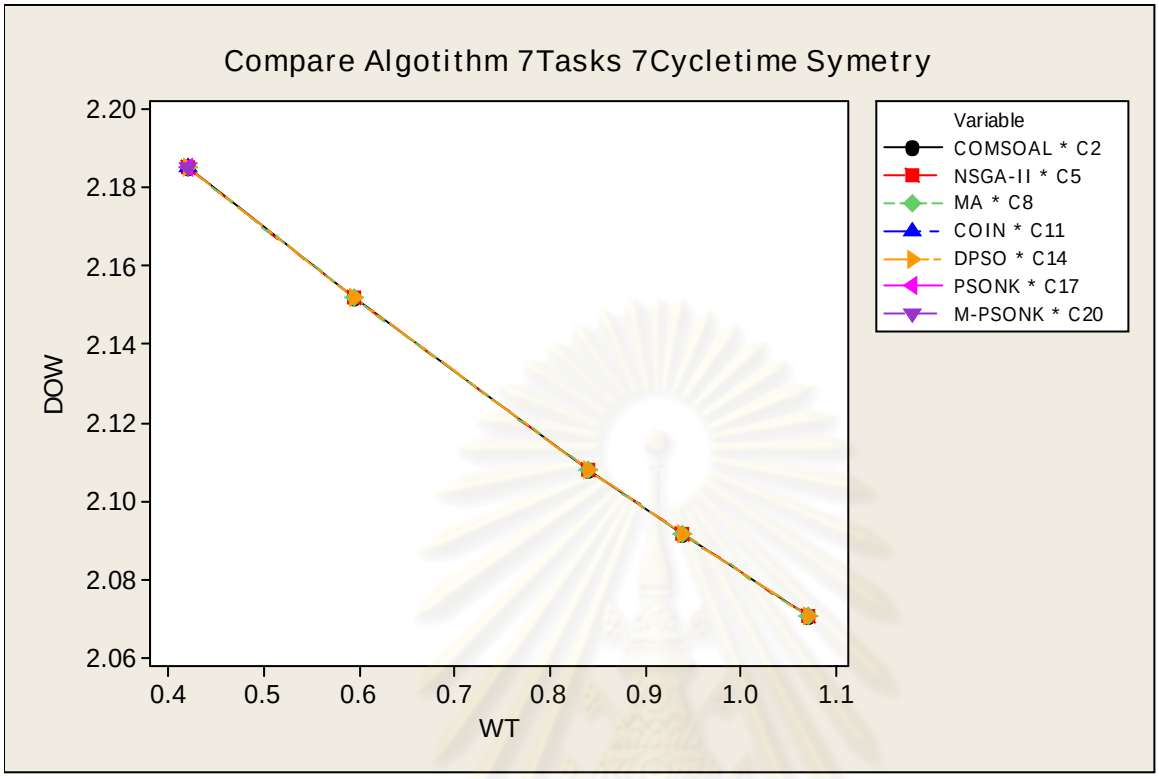
การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจะกระทำโดย นำผลการหาคำตอบของอัลกอริทึมมาเปรียบเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier เพื่อคำนวณหาตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาในการคำนวณ (Computation time to solution)

ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 ตัวในงานวิจัยนี้เราจะให้น้ำหนักกับ จำนวนพนักงานที่ใช้ในสายการประกอบก่อนเนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายมากที่สุดดังนั้นในการประเมินประสิทธิภาพคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมถ้าอัลกอริทึมใดสามารถหาจำนวนพนักงานได้น้อยที่สุดจะแสดงได้ว่าอัลกอริทึมนั้นมีประสิทธิภาพในการหาคำตอบสูงกว่าอัลกอริทึมอื่นโดยไม่จำเป็นต้องพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะอื่น

ในการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึมเราจะทำการทดสอบกับปัญหาทั้งหมด 11 ปัญหาซึ่งทำการรันการทดลองบนโปรแกรม MATLAB R2008a คอมพิวเตอร์ AMD Athlon™ 64 Processor 3500+ 2.21 GHz PC with 960 MB ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

9.2.1 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 7 ขั้นงาน

เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 7 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 7 10 และ 18 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



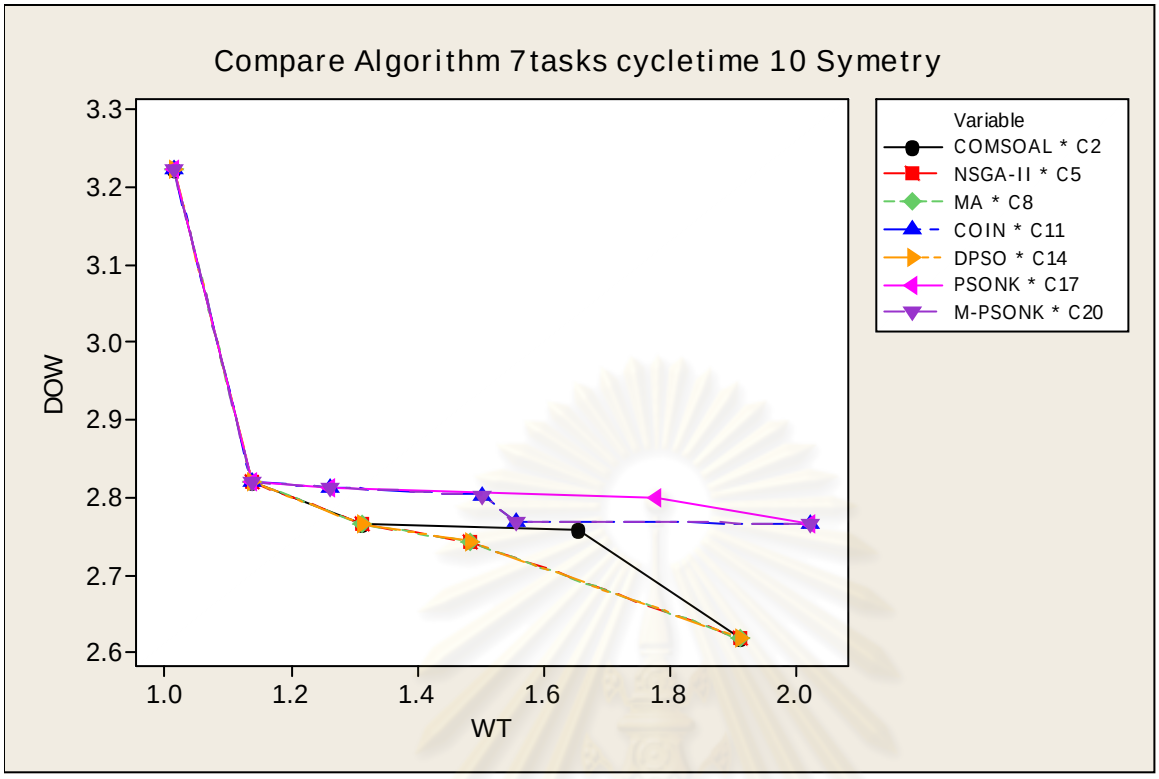
รูปที่ 9.1 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	6	0	0.5364	1	187
NSGA-II	6	0	0.5364	1	1,084
M-NSGA-II	6	0	0.6230	1	2,034
COIN	6	None**	None**	None**	246
DPSO	6	0	0.5364	1	211
PSONK	6	None**	None**	None**	109
M-PSONK	6	None**	None**	None**	1,512

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



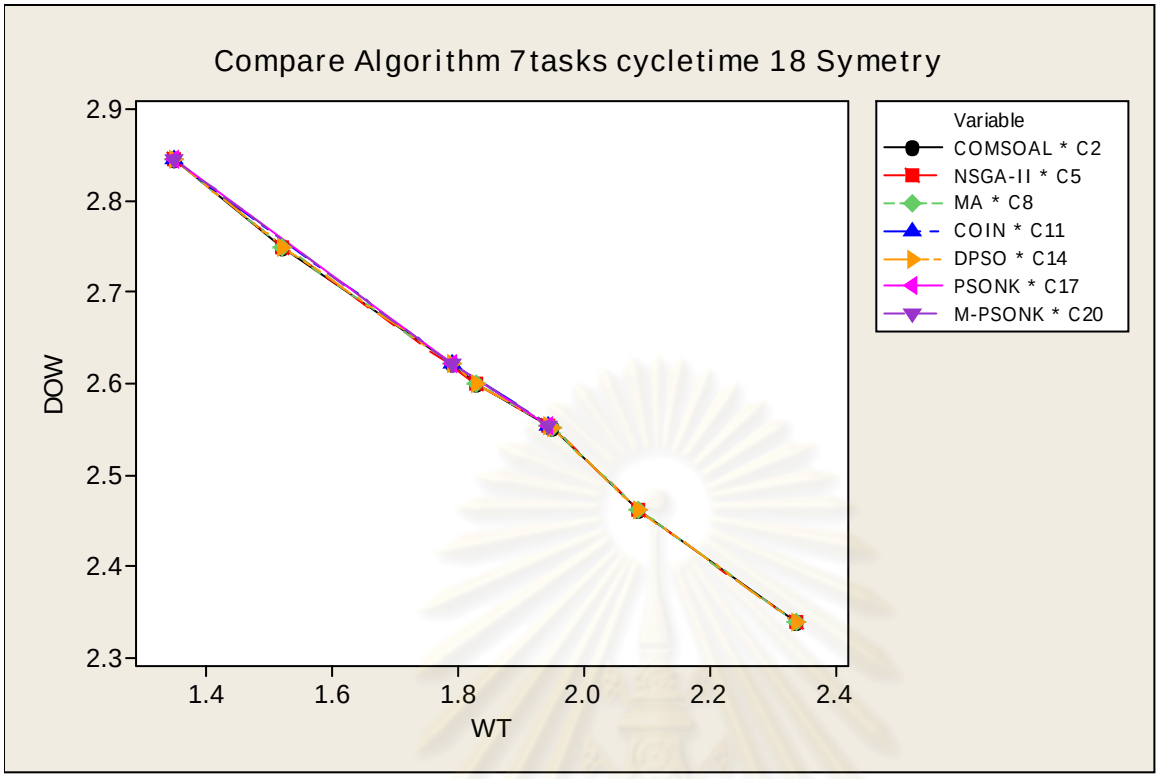
รูปที่ 9.2 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0482	0.5887	0.8	174
NSGA-II	4	0.1295	0.7188	1.0	1,569
M-NSGA-II	4	0.0161	0.7068	1.0	1,981
COIN	4	0.0743	0.8252	0.5	276
DPSO	4	0.0161	0.7068	1.0	392
PSONK	4	0.1023	0.7438	0.6	121
M-PSONK	4	0.0743	0.8252	0.5	1,472

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



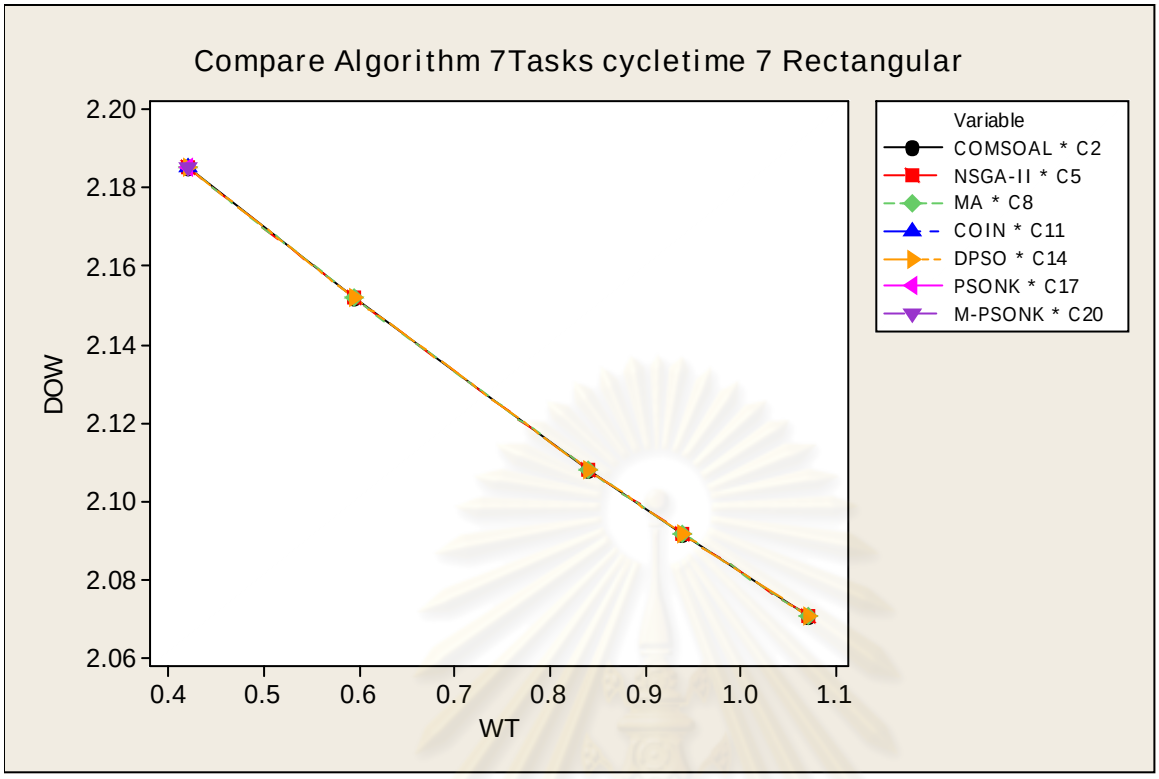
รูปที่ 9.3 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	2	0.0082	0.5077	1	159
NSGA-II	2	0.0000	0.6884	1	968
M-NSGA-II	2	0.1425	0.7559	1	1,301
COIN	2	0.0000	0.6884	1	255
DPSO	2	0.1425	0.7559	1	278
PSONK	2	0.1425	0.7559	1	103
M-PSONK	2	0.0082	0.5077	1	967

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



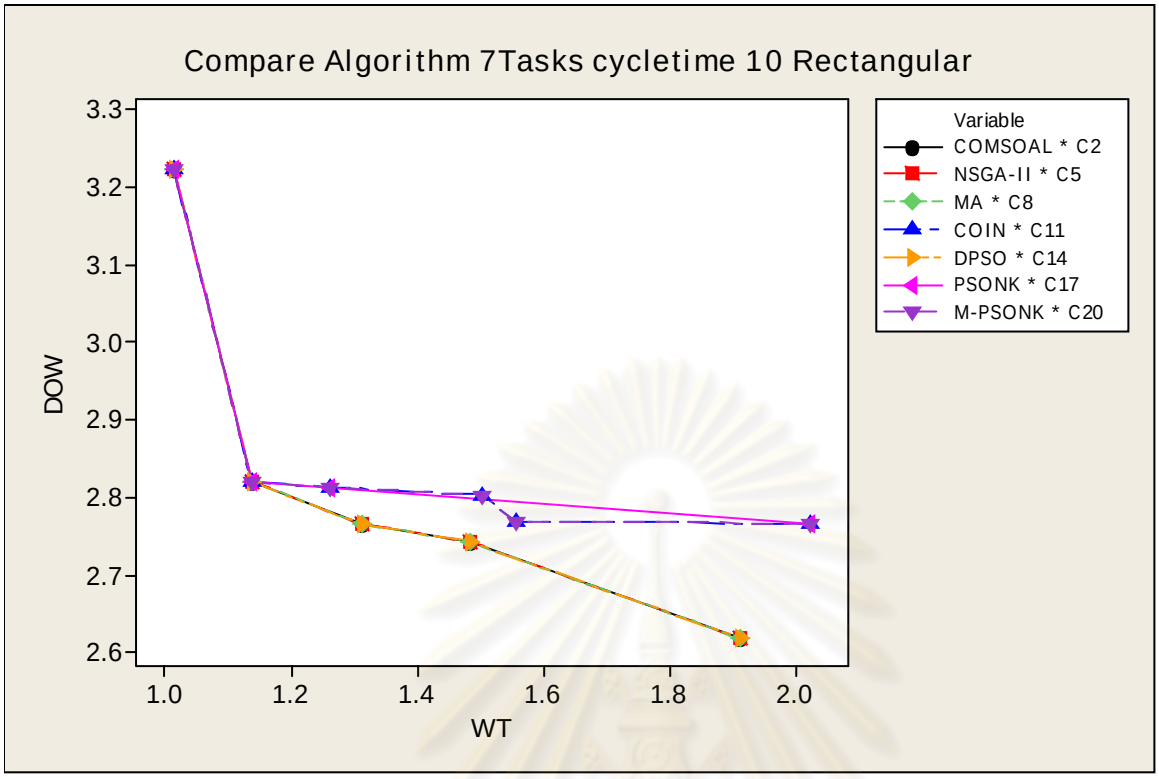
รูปที่ 9.4 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	6	0	0.5364	1	224
NSGA-II	6	0	0.5364	1	1,084
M-NSGA-II	6	0	0.6230	1	1,058
COIN	6	None**	None**	None**	221
DPSO	6	0	0.5364	1	302
PSONK	6	None**	None**	None**	117
M-PSONK	6	None**	None**	None**	1,307

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



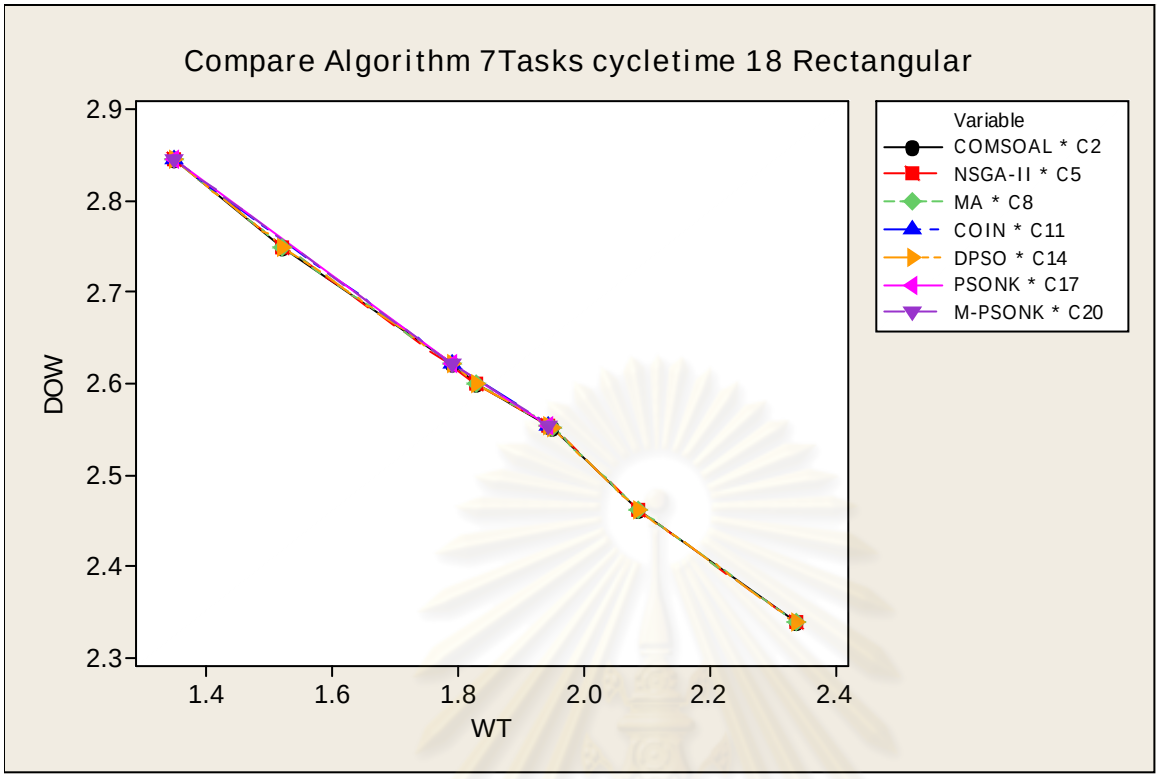
รูปที่ 9.5 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0161	0.7068	1.00	197
NSGA-II	4	0.0161	0.7068	1.00	1,459
M-NSGA-II	4	0.0161	0.7068	1.00	1,389
COIN	4	0.0743	0.8252	0.50	234
DPSO	4	0.0161	0.7068	1.00	227
PSONK	4	0.1023	0.7558	0.75	139
M-PSONK	4	0.0743	0.8252	0.50	1,153

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.6 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 7 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 18 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

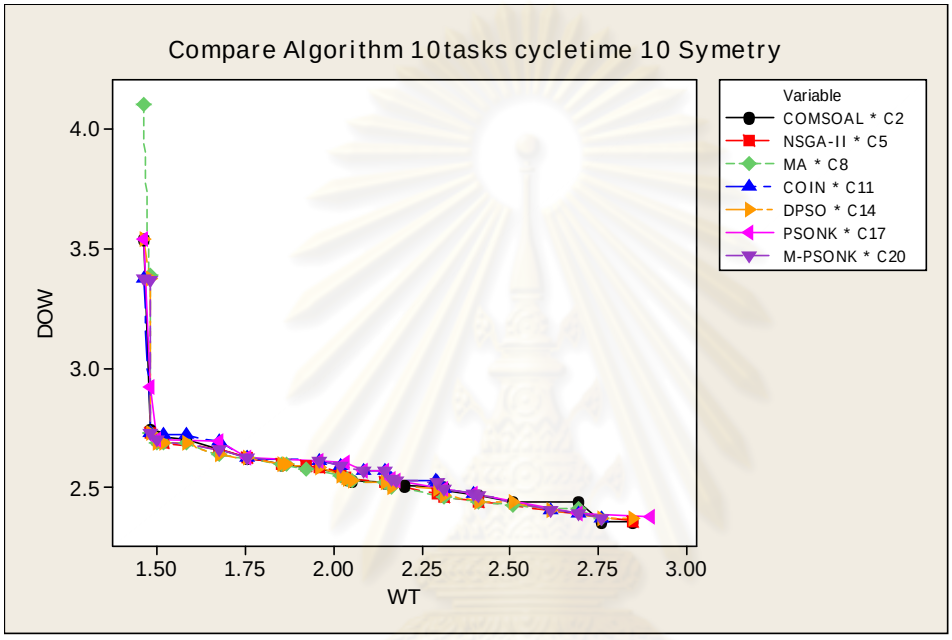
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	2	0.0000	0.6884	1	178
NSGA-II	2	0.0082	0.5077	1	1,503
M-NSGA-II	2	0.0000	0.6884	1	1,070
COIN	2	0.1425	0.7559	1	231
DPSO	2	0.0000	0.6884	1	315
PSONK	2	0.1425	0.7559	1	115
M-PSONK	2	0.1425	0.7559	1	2,066

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.2 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 10 ขั้นงาน

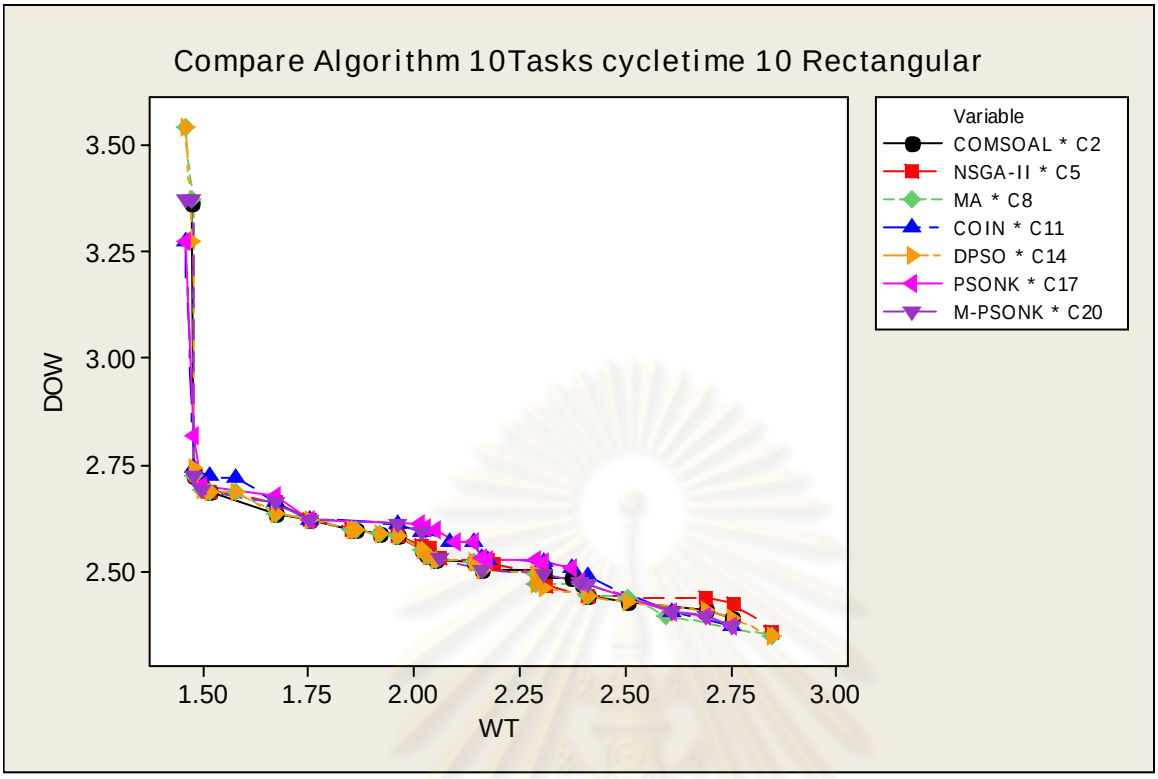
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 10 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 10 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.7 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0195	0.8030	0.7368	265
NSGA-II	4	0.4552	0.7500	0.5000	2,712
M-NSGA-II	4	0.2451	0.6390	0.7500	1,782
COIN	4	0.3166	0.7330	0.4000	354
DPSO	4	0.1581	0.6409	0.8182	385
PSONK	4	0.5083	0.7500	0.0000	155
M-PSONK	4	0.2571	0.7920	0.6667	1,325



รูปที่ 9.8 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 10 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 10 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

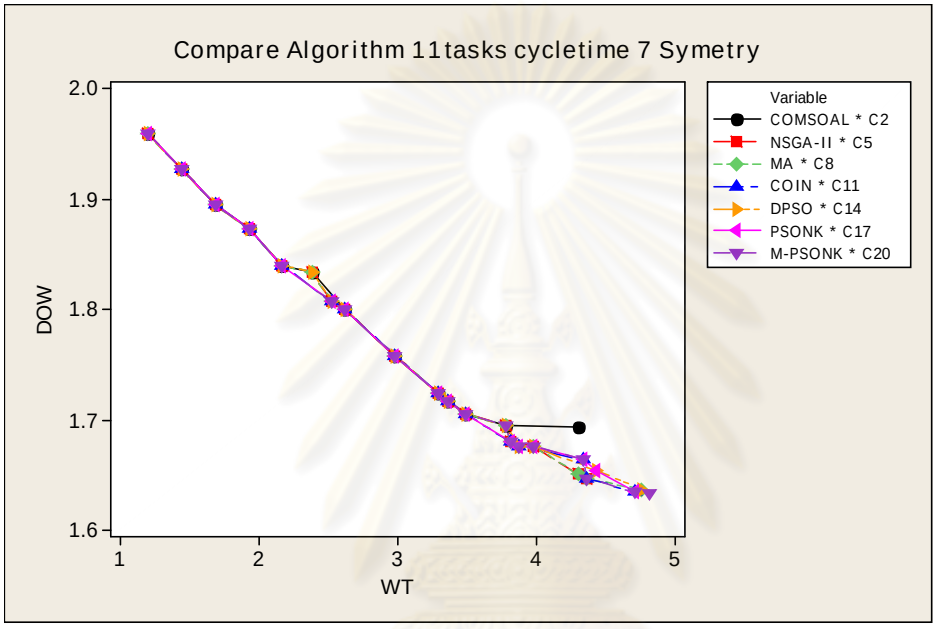
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0146	0.9026	0.6400	334
NSGA-II	4	0.0532	0.4861	0.3333	3,384
M-NSGA-II	4	0.0102	0.7949	0.8400	1,756
COIN	4	0.0382	0.8108	0.1765	353
DPSO	4	0.0045	0.7383	0.8400	316
PSONK	4	0.0392	0.8390	0.2105	158
M-PSONK	4	0.0310	0.7465	0.3750	2,965

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.3 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 11 ขั้นงาน

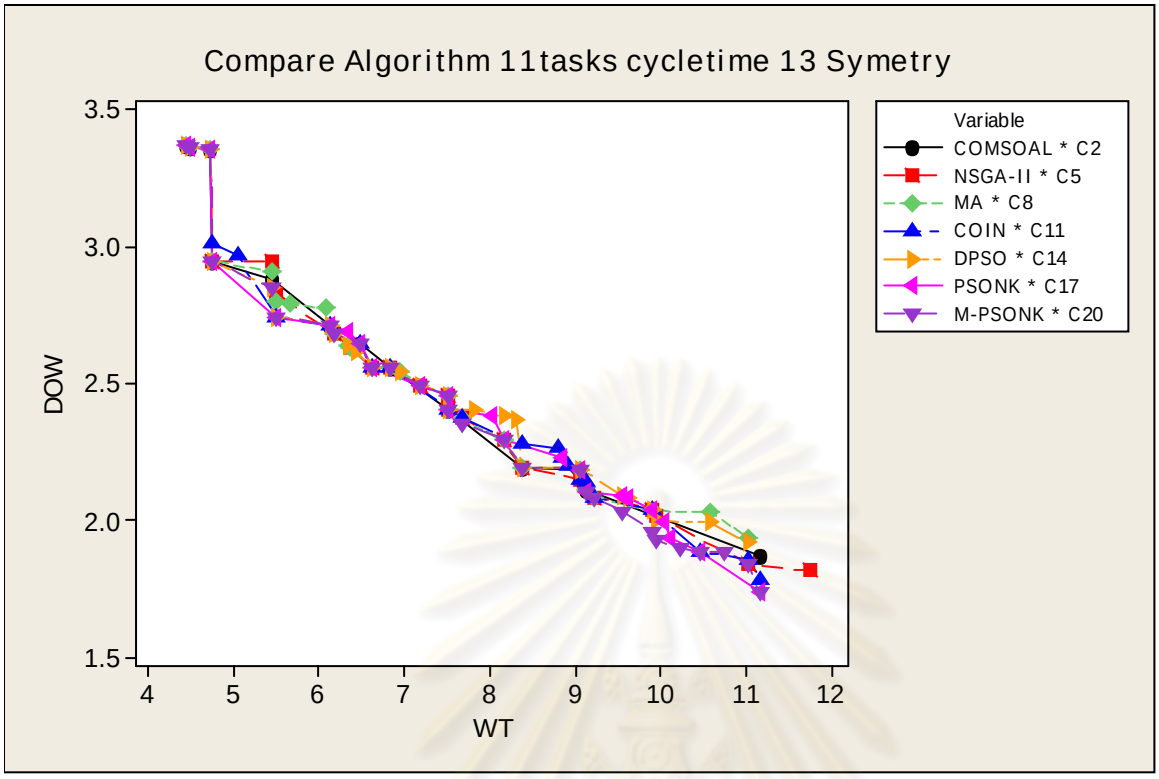
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 11 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 7 13 และ 21 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร และแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.9 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.19 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ สมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	9	0.0474	0.4383	0.9231	307
NSGA-II	9	0.0128	0.4849	1.0000	2,325
M-NSGA-II	9	0.0017	0.5543	0.9474	2,068
COIN	9	0.0152	0.5072	0.9333	278
DPSO	9	0.0061	0.4654	0.8824	499
PSONK	9	0.0102	0.5258	0.8824	168
M-PSONK	9	0.0041	0.5351	0.9474	1,537



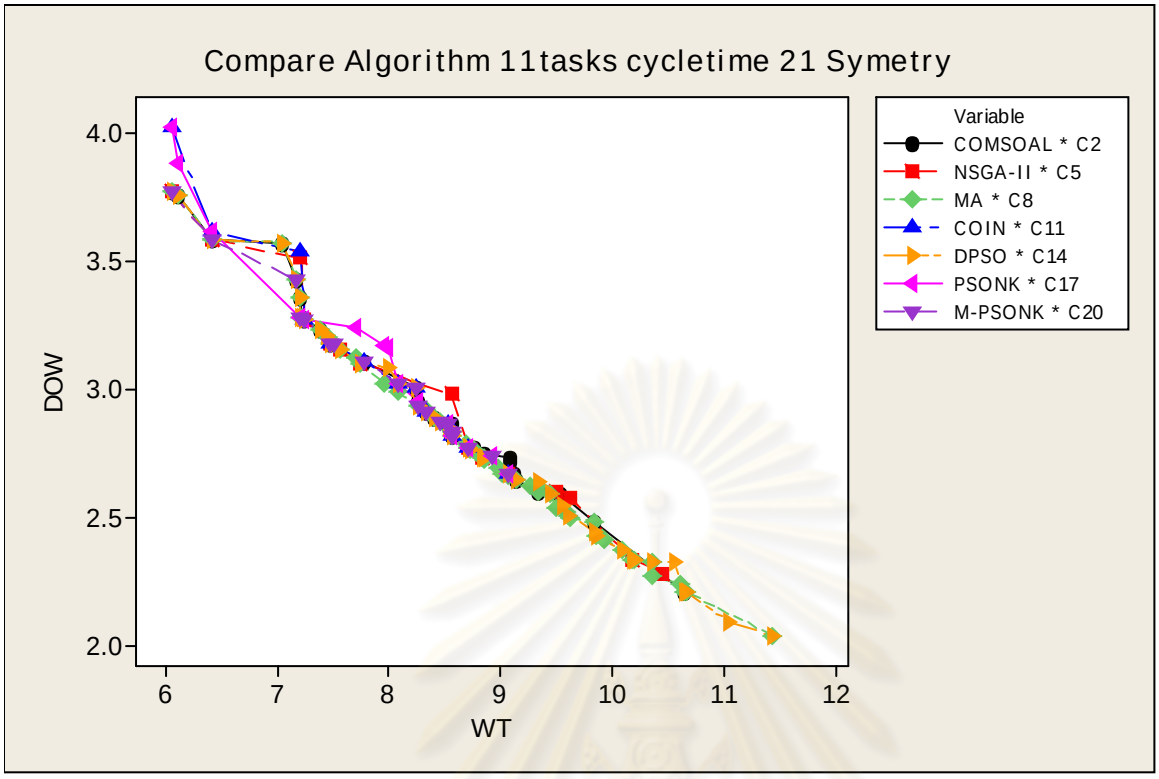
รูปที่ 9.10 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.20 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	5	0.0421	0.6577	0.6154	301
NSGA-II	5	0.0432	0.4894	0.6842	3,103
M-NSGA-II	5	0.0242	0.6141	0.6154	1,620
COIN	5	0.0434	0.5399	0.4000	350
DPSO	5	0.0219	0.6308	0.5556	534
PSONK	5	0.0192	0.5988	0.5417	153
M-PSONK	5	0.0034	0.4883	0.8929	1,204

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



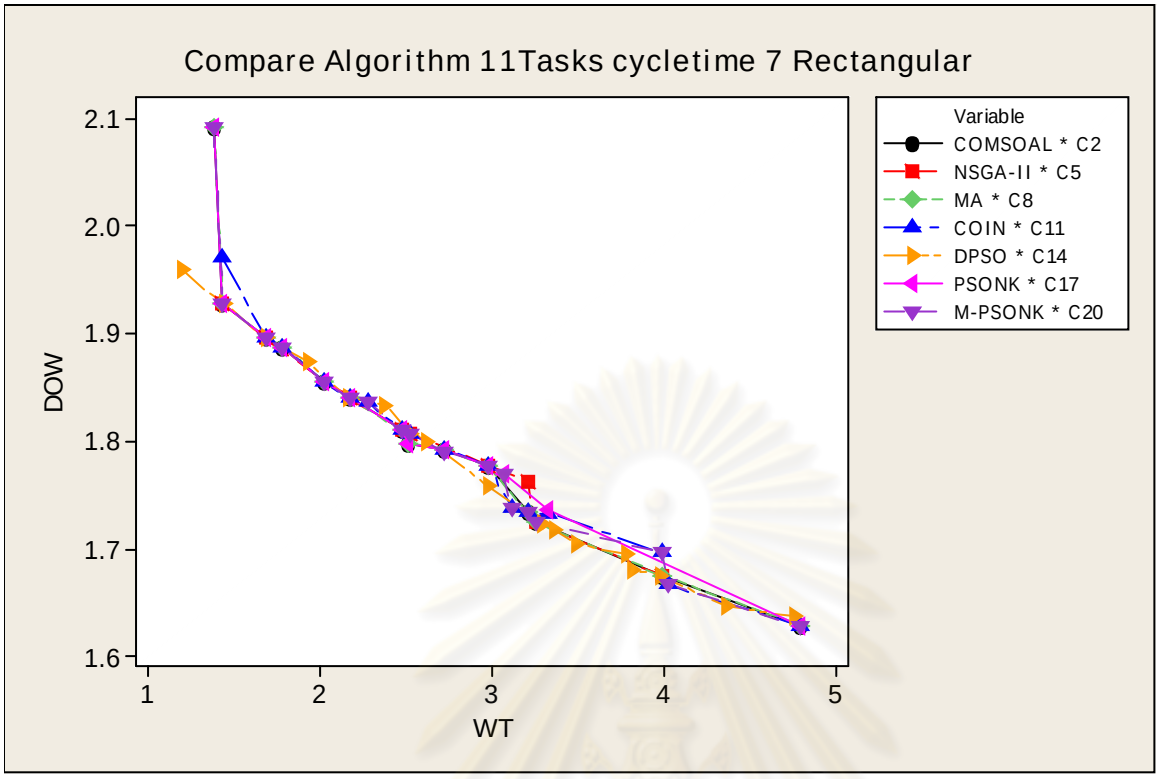
รูปที่ 9.11 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.21 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	3	0.0220	0.7125	0.6071	277
NSGA-II	3	0.0342	0.6846	0.6471	2,606
M-NSGA-II	3	0.0017	0.7806	0.9836	1,504
COIN	3	0.0885	0.6300	0.3846	423
DPSO	3	0.0042	0.7075	0.8627	386
PSONK	3	0.0937	0.6051	0.2667	129
M-PSONK	3	0.0877	0.7002	0.6842	1,118

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



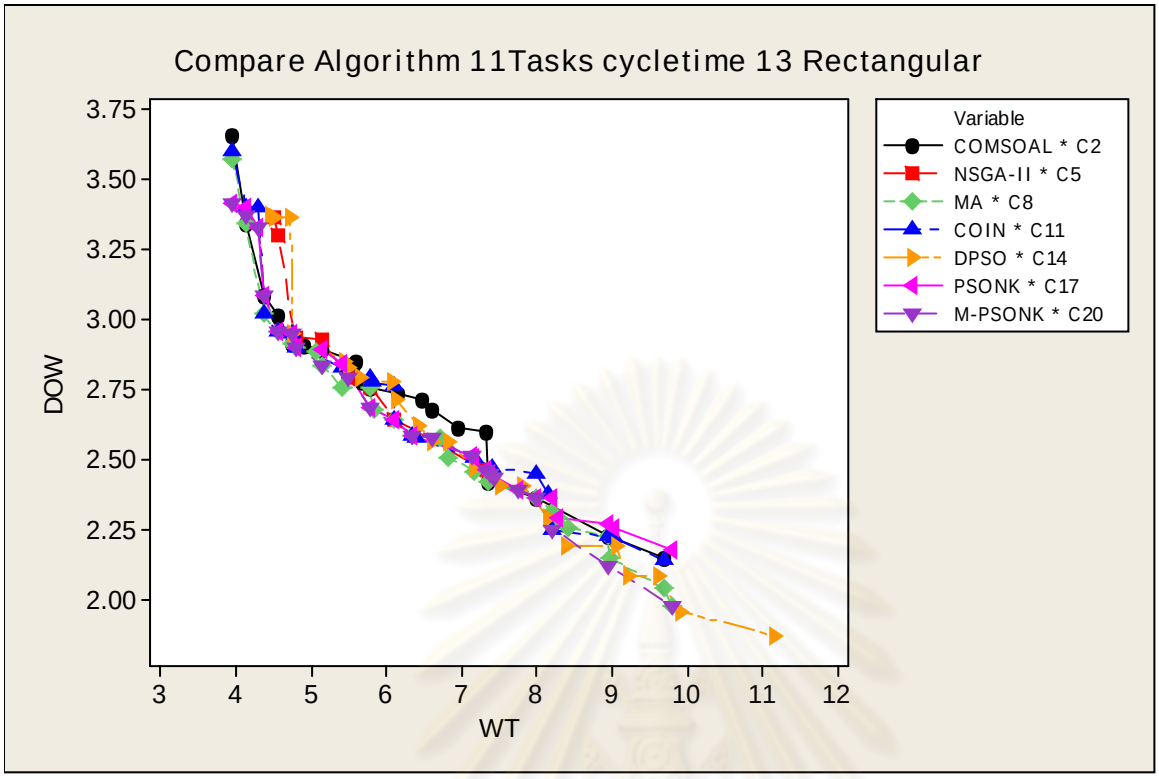
รูปที่ 9.12 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.22 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	9	0.0240	0.7350	0.8571	308
NSGA-II	9	0.0531	0.5744	0.7778	3,417
M-NSGA-II	9	0.0240	0.7350	0.8571	2,114
COIN	9	0.0334	0.6902	0.6875	315
DPSO	9	0.0147	0.4691	0.8824	598
PSONK	9	0.0570	0.8404	0.6923	164
M-PSONK	9	0.0215	0.7711	0.7778	2,000

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



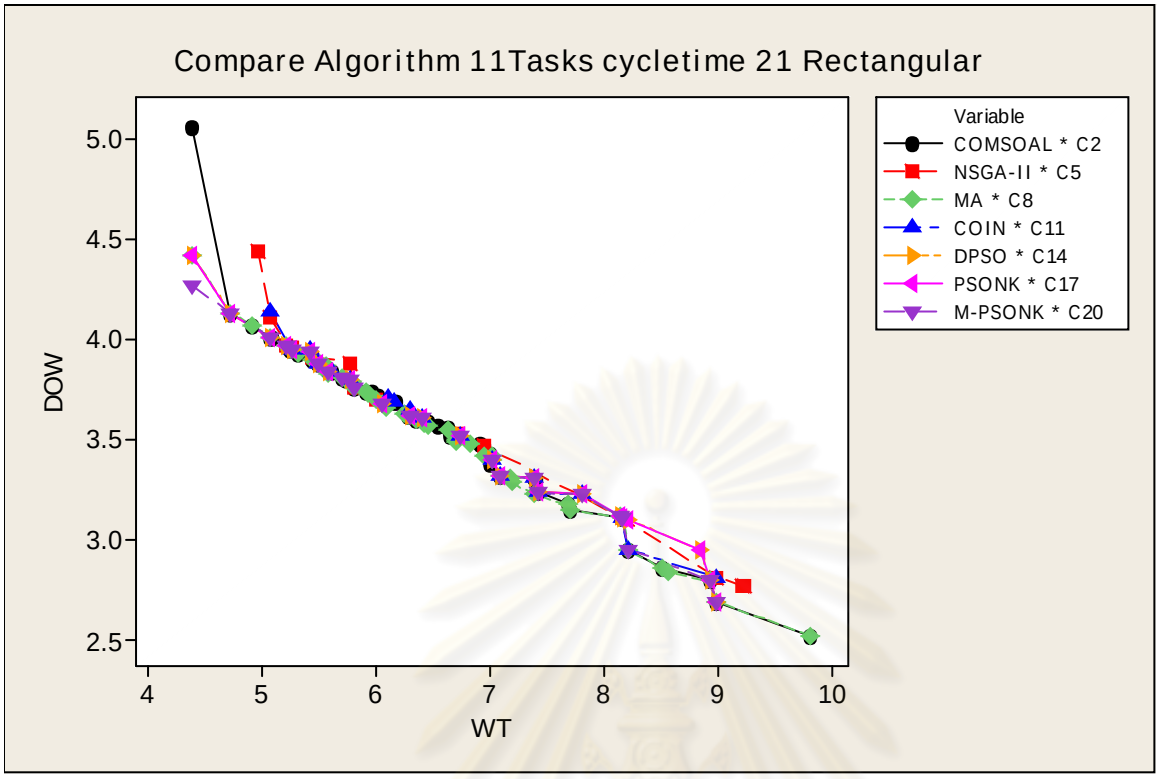
รูปที่ 9.13 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.23 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 13 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	5	0.0500	0.6049	0.2105	341
NSGA-II	5	0.1493	0.6738	0.1250	4,081
M-NSGA-II	5	0.0177	0.5363	0.6800	1,835
COIN	5	0.0415	0.6328	0.3182	489
DPSO	5	0.0276	0.5619	0.3636	665
PSONK	5	0.0427	0.5992	0.3478	161
M-PSONK	5	0.0239	0.5721	0.5238	2,557

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.14 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.24 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 11 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 21 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

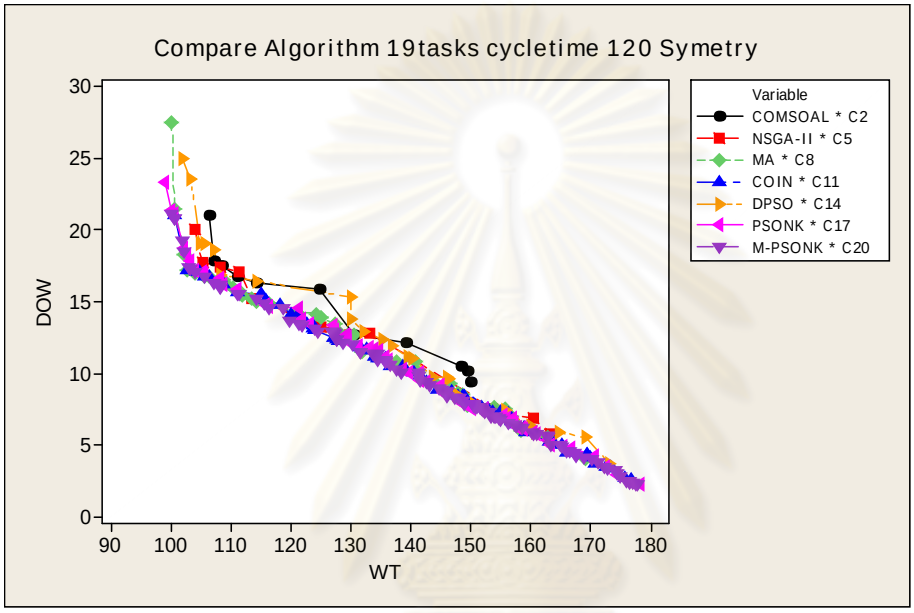
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	3	0.0059	0.8743	0.6136	299
NSGA-II	3	0.0433	0.7597	0.2857	3,053
M-NSGA-II	3	0.0183	0.7573	0.9318	1,618
COIN	3	0.0280	0.5706	0.2105	427
DPSO	3	0.0203	0.5928	0.4583	467
PSONK	3	0.0203	0.5928	0.4583	143
M-PSONK	3	0.0164	0.5718	0.6000	4,461

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.4 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 19 ขั้นงาน

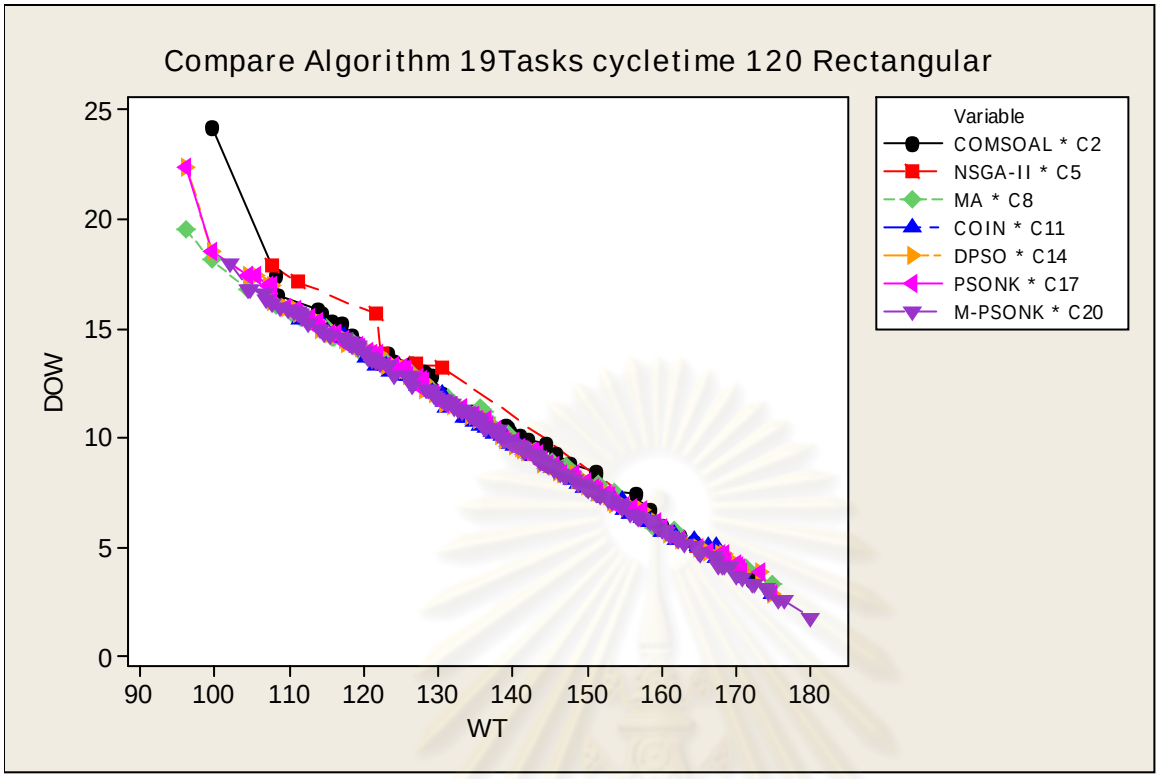
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 19 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 120 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.15 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.25 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	5	0.1583	0.6664	0.0000	621
NSGA-II	5	0.0778	0.6088	0.0833	4,557
M-NSGA-II	5	0.0271	0.7650	0.2826	2,941
COIN	5	0.0118	0.6563	0.2687	485
DPSO	5	0.0461	0.5601	0.0000	568
PSONK	5	0.0128	0.6101	0.3103	233
M-PSONK	5	0.0040	0.6242	0.6952	2,186



รูปที่ 9.16 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.26 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 19 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 120 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

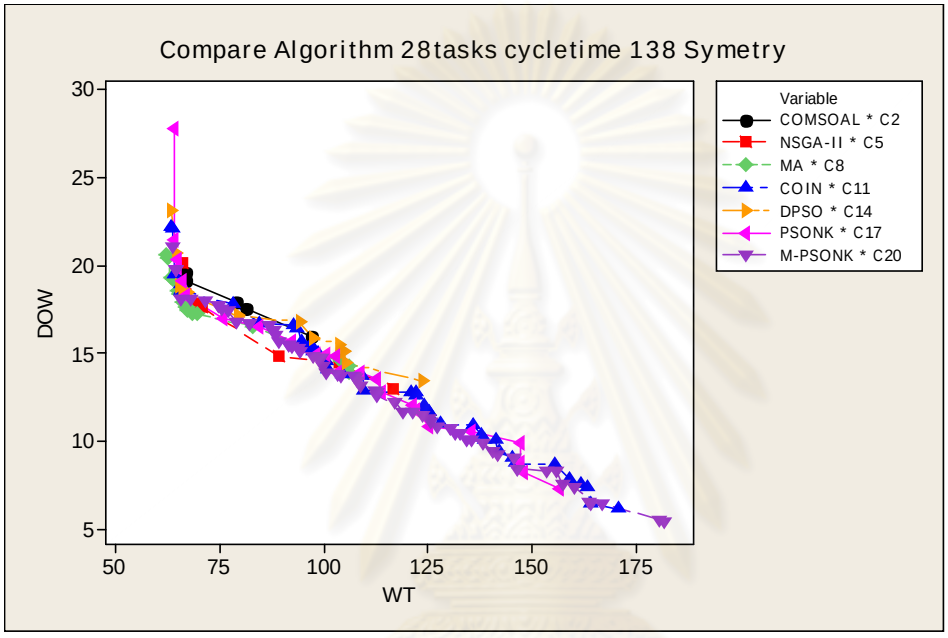
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	5	0.0261	0.7416	0.0000	689
NSGA-II	5	0.1350	0.9145	0.1429	5,101
M-NSGA-II	5	0.0127	0.6445	0.2388	2,901
COIN	5	0.0143	0.5269	0.5139	510
DPSO	5	0.0086	0.6418	0.1979	572
PSONK	5	0.0086	0.6418	0.1979	308
M-PSONK	5	0.0028	0.6045	0.6233	4,339

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.5 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 28 ขั้นงาน

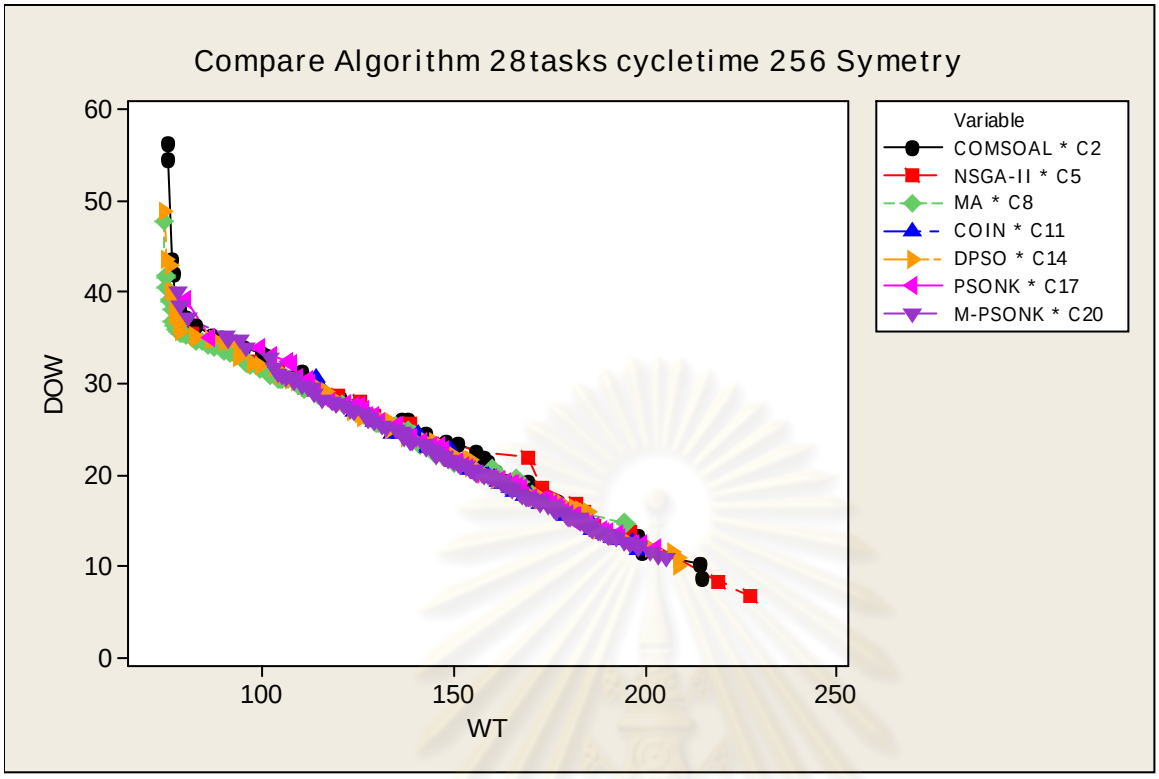
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 28 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 138 256 และ 342 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.17 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.27 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	9	0.3137	0.8757	0.0000	886
NSGA-II	9	0.1741	0.7571	0.1250	4,737
M-NSGA-II	9	0.2054	1.0028	0.7778	4,322
COIN	9	0.0298	0.6337	0.1220	638
DPSO	9	0.1587	0.7226	0.0000	1,093
PSONK	9	0.0342	0.6470	0.2500	437
M-PSONK	9	0.0108	0.6000	0.6032	3,213



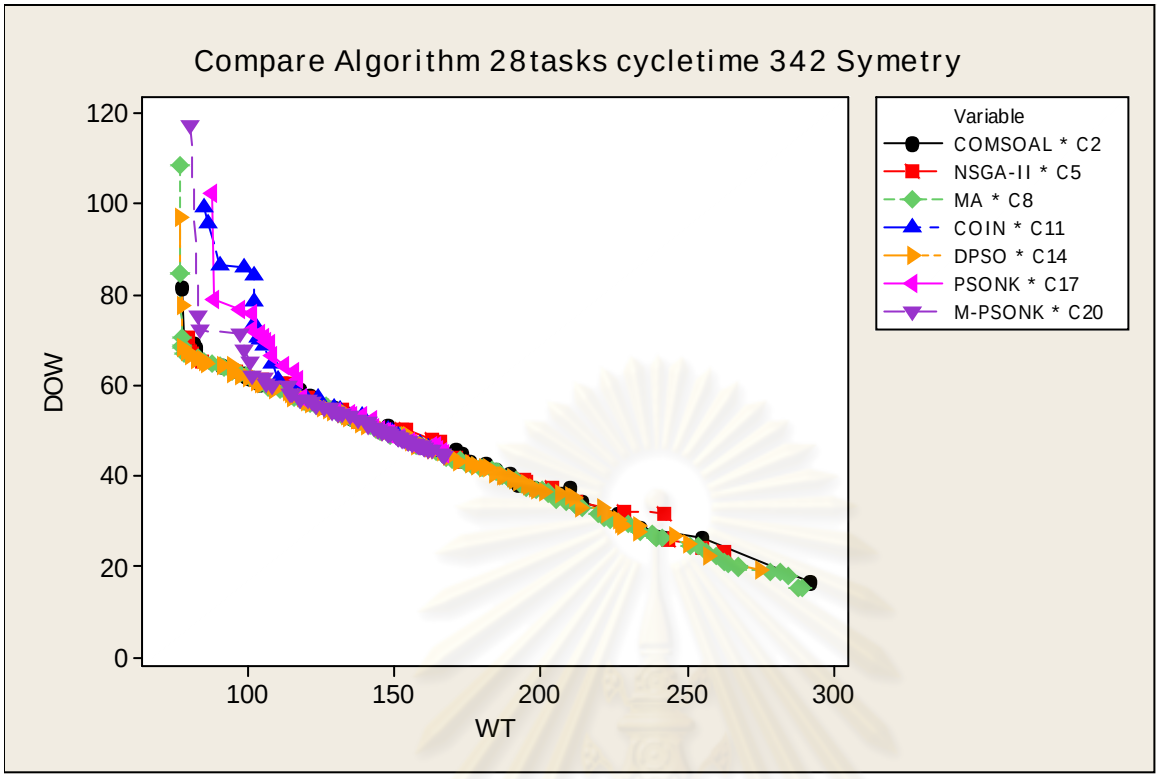
รูปที่ 9.18 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.28 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	5	0.0248	0.5880	0.0750	800
NSGA-II	5	0.0362	0.5136	0.1905	4,977
M-NSGA-II	5	0.0213	0.7675	0.6790	3,869
COIN	5	0.0636	0.7036	0.2969	591
DPSO	5	0.0124	0.5282	0.1549	978
PSONK	5	0.0207	0.6559	0.1250	315
M-PSONK	5	0.0123	0.6155	0.6475	2,876

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



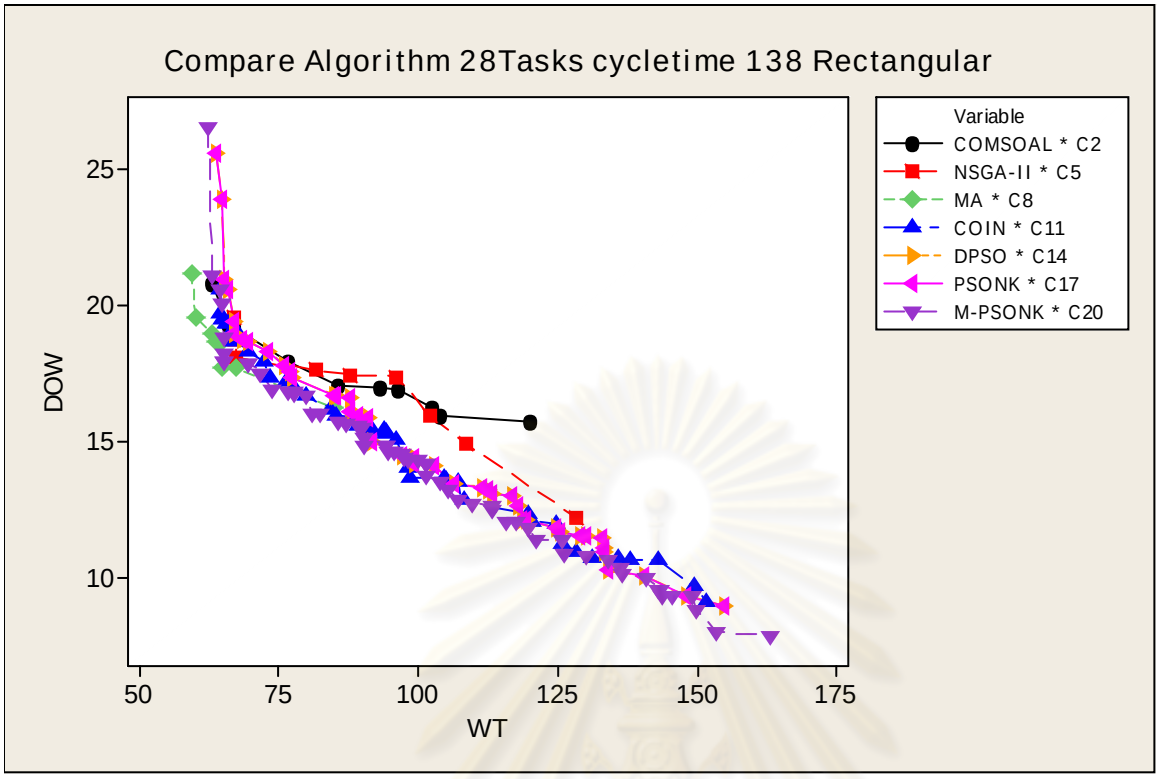
รูปที่ 9.19 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.29 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0180	0.7523	0.1591	891
NSGA-II	4	0.0276	0.5634	0.2069	6,836
M-NSGA-II	4	0.0027	0.6517	0.7778	3,727
COIN	4	0.1186	0.6953	0.1795	742
DPSO	4	0.0082	0.7642	0.4483	990
PSONK	4	0.1187	0.7903	0.2353	293
M-PSONK	4	0.1042	0.9964	0.5758	2,770

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



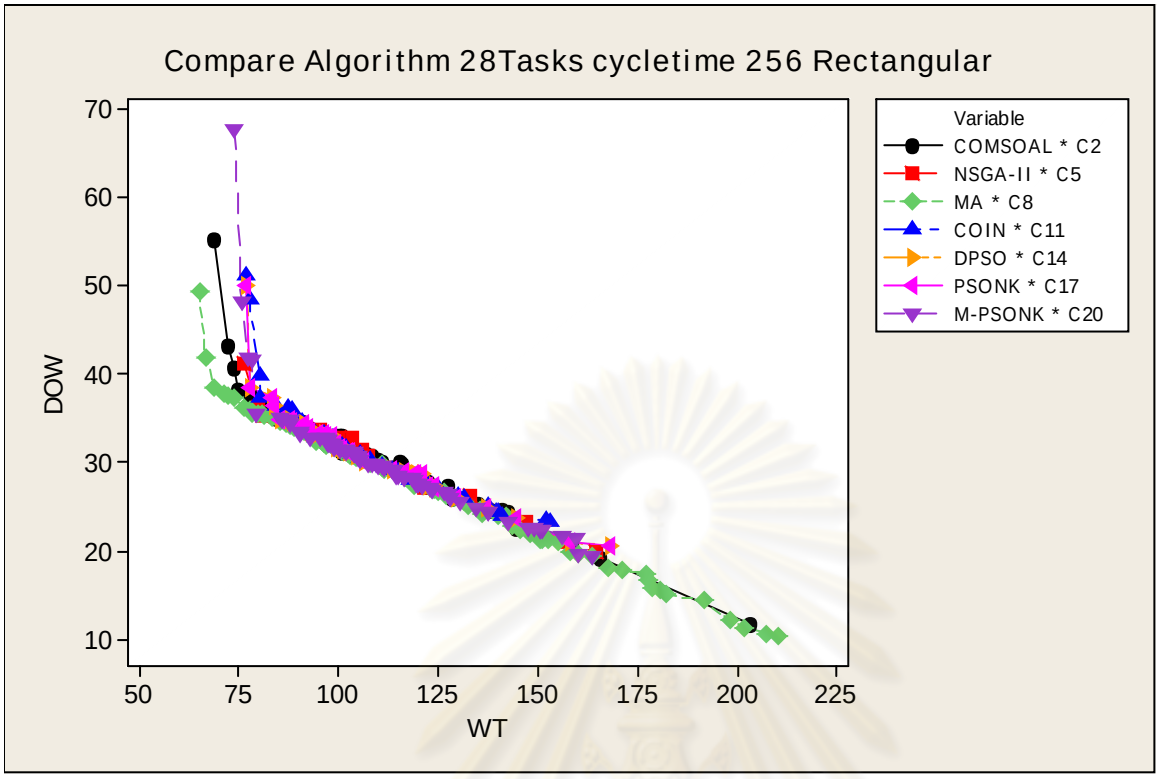
รูปที่ 9.20 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.30 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 138 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	9	0.2407	0.6488	0.0000	987
NSGA-II	9	0.1377	0.6077	0.0000	8,097
M-NSGA-II	9	0.3240	0.8562	0.8750	4,163
COIN	9	0.0303	0.5294	0.1795	834
DPSO	9	0.0305	0.6505	0.0952	1,145
PSONK	9	0.0305	0.6505	0.0952	451
M-PSONK	9	0.0053	0.6848	0.7167	4,387

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



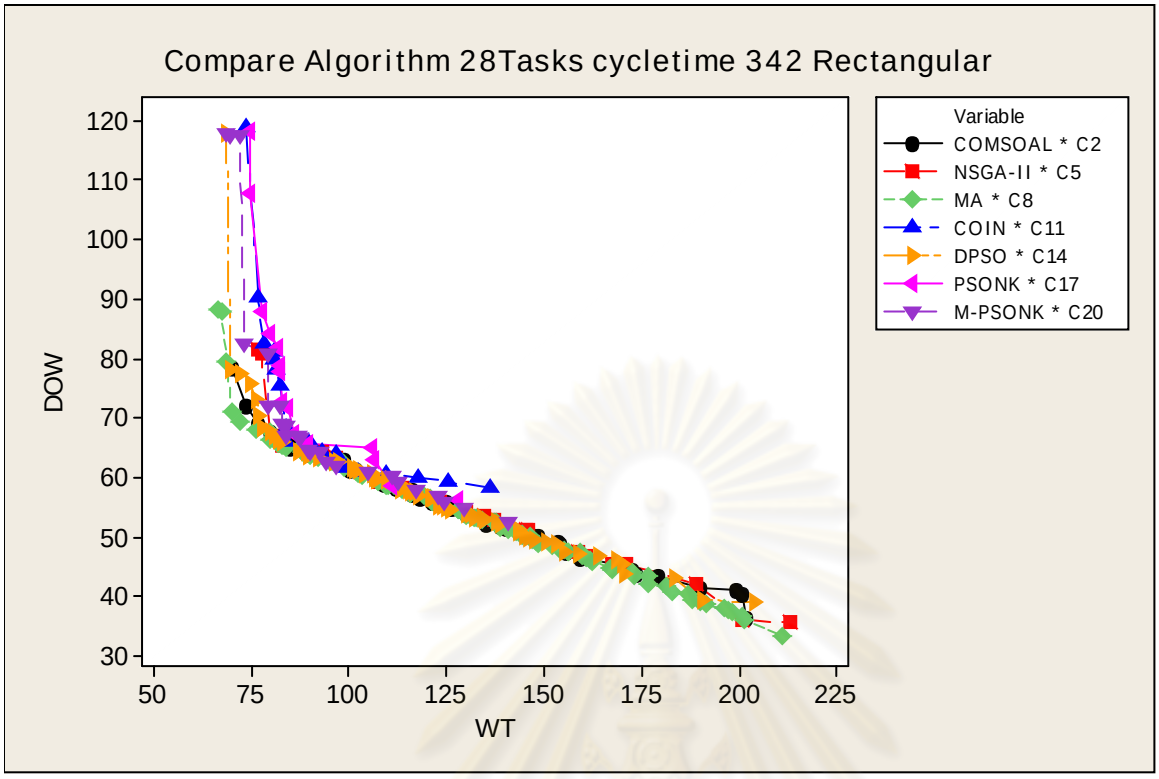
รูปที่ 9.21 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.31 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 256 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	5	0.0240	0.8786	0.0714	893
NSGA-II	5	0.0463	0.5073	0.1765	6,782
M-NSGA-II	5	0.0021	0.7024	0.8276	2,808
COIN	5	0.0589	0.7277	0.0750	787
DPSO	5	0.0404	0.9054	0.1111	897
PSONK	5	0.0404	0.9054	0.1111	430
M-PSONK	5	0.0290	0.9547	0.3529	8,941

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.22 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.32 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 28 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 342 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

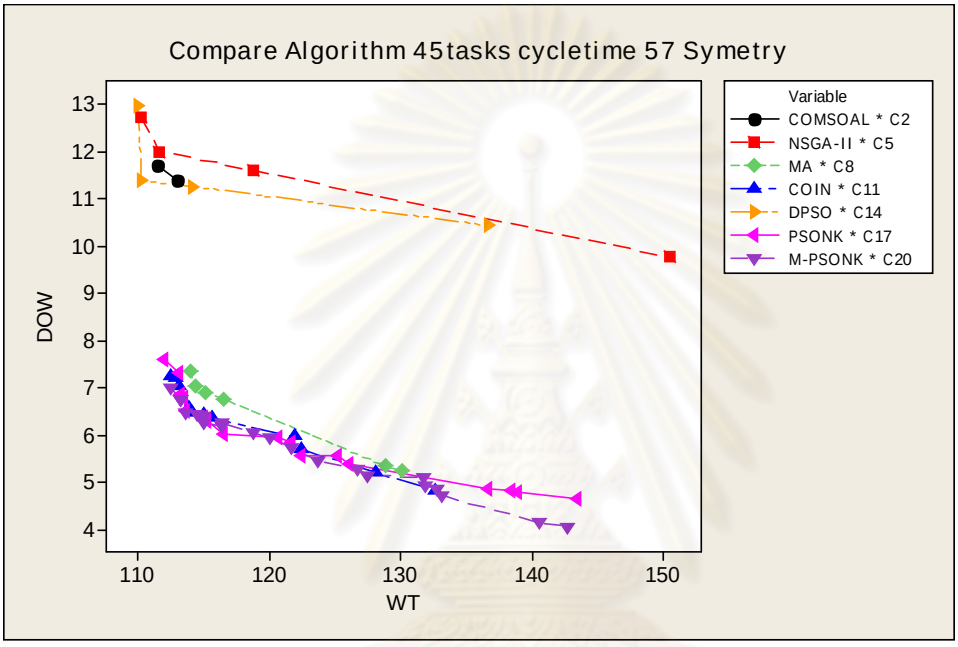
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0157	0.6420	0.2708	991
NSGA-II	4	0.0277	0.6507	0.0476	6,498
M-NSGA-II	4	0.0024	0.7258	0.7653	3,590
COIN	4	0.1159	0.7517	0.1053	869
DPSO	4	0.0121	0.8723	0.3443	906
PSONK	4	0.1305	0.7935	0.0000	430
M-PSONK	4	0.0850	0.7778	0.0800	11,812

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.6 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 45 ขั้นงาน

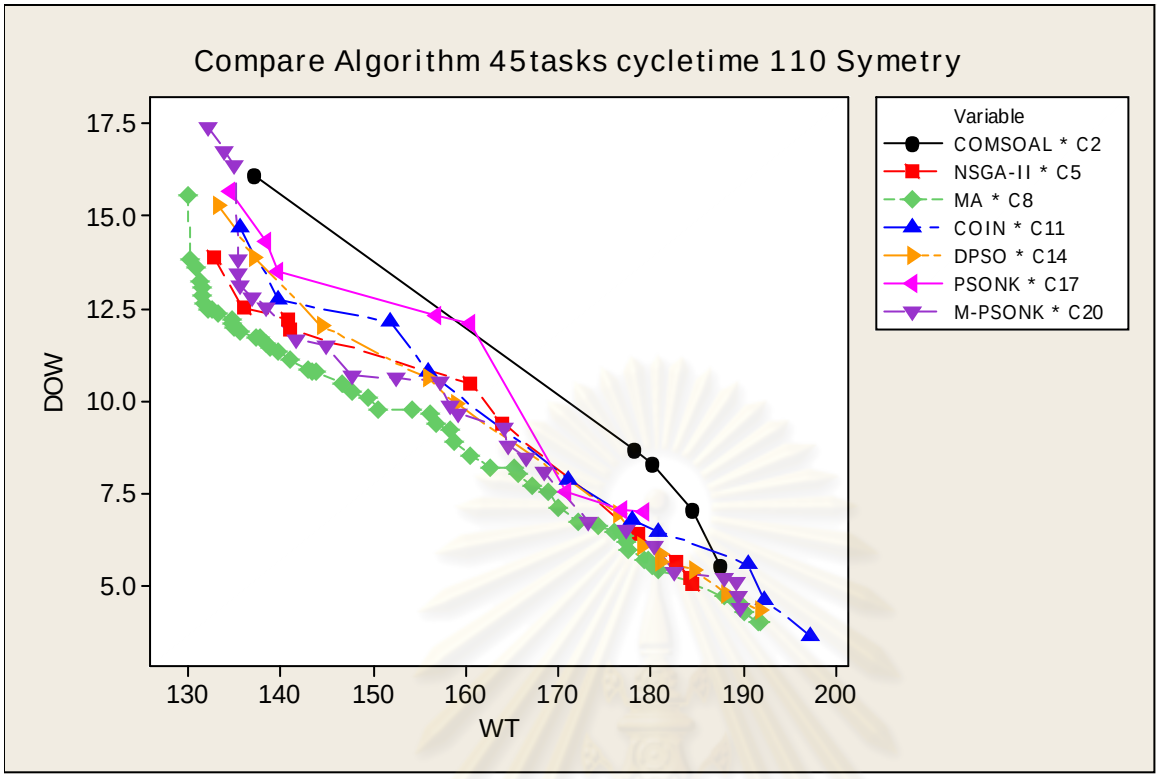
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 45 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 57 110 และ 184 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.23 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.33 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	14	-*	-*	-*	1,742
NSGA-II	14	-*	-*	-*	11,809
M-NSGA-II	13	0.1742	1.0029	0	4,928
COIN	13	0.0676	0.7726	0.1818	965
DPSO	14	-*	-*	-*	1,609
PSONK	13	0.0523	0.5921	0.3529	533
M-PSONK	13	0.0151	0.6422	0.8636	3,663



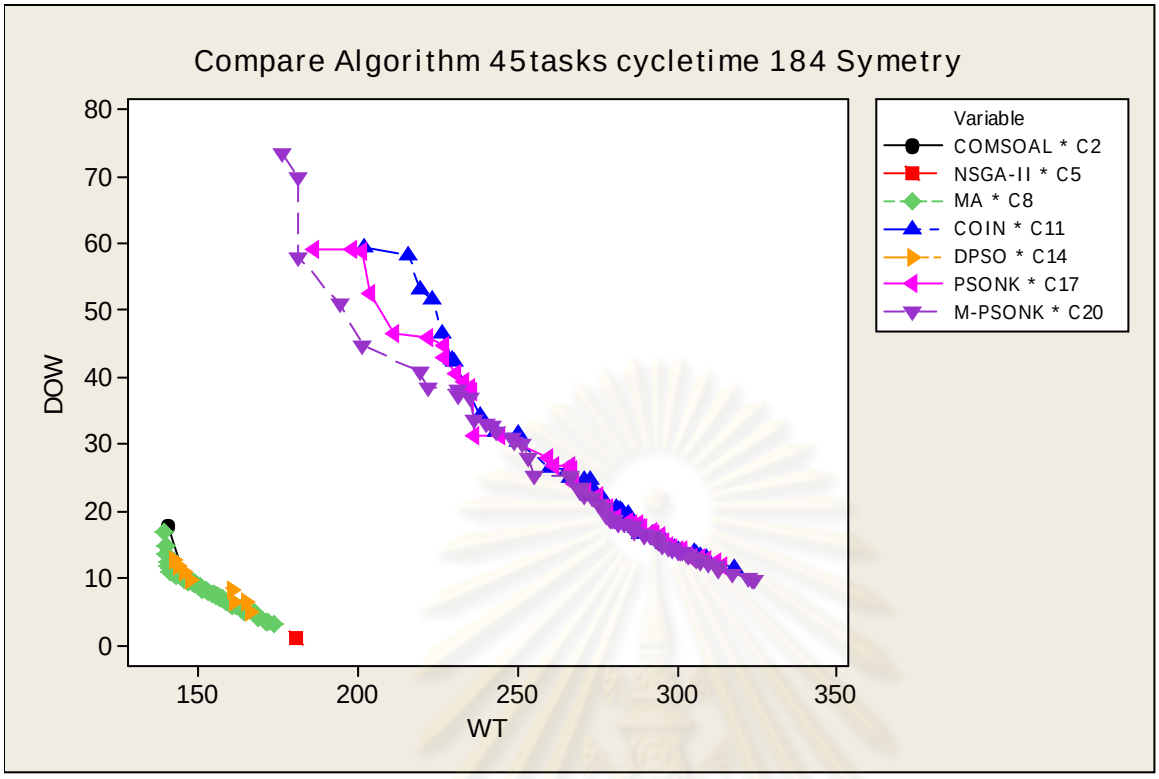
รูปที่ 9.24 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.34 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	7	0.2460	1.0022	0.0000	1,625
NSGA-II	7	0.0810	0.7459	0.2000	11,418
M-NSGA-II	7	0.0040	0.5763	0.9818	5,069
COIN	7	0.0958	0.4768	0.1000	1,029
DPSO	7	0.0853	0.6928	0.0000	1,261
PSONK	7	0.1609	0.7323	0.0000	510
M-PSONK	7	0.0453	0.4942	0.0741	3,768

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



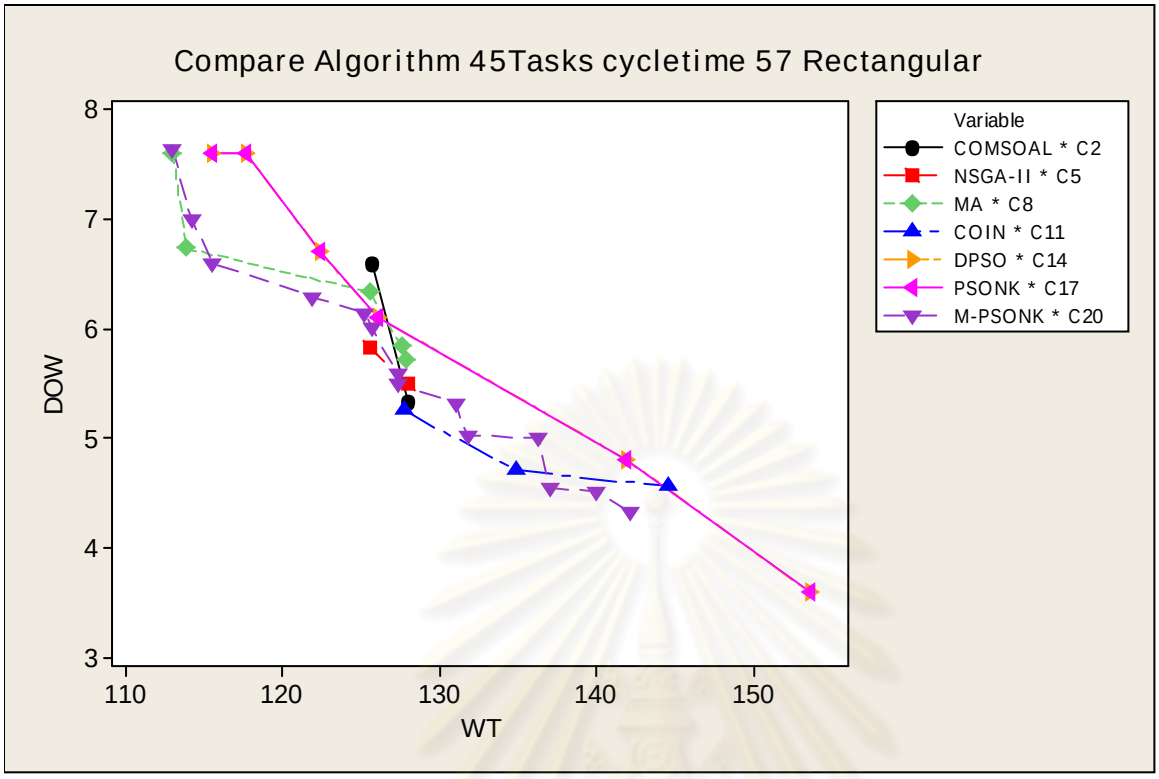
รูปที่ 9.25 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.35 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.2715	0.7500	0.0000	1,468
NSGA-II	4	None**	None**	None**	11,735
M-NSGA-II	4	0.0034	0.6911	0.9851	5,952
COIN	5	-*	-*	-*	1,134
DPSO	4	0.0844	0.5510	0.1250	1,265
PSONK	5	-*	-*	-*	532
M-PSONK	5	-*	-*	-*	4,424

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



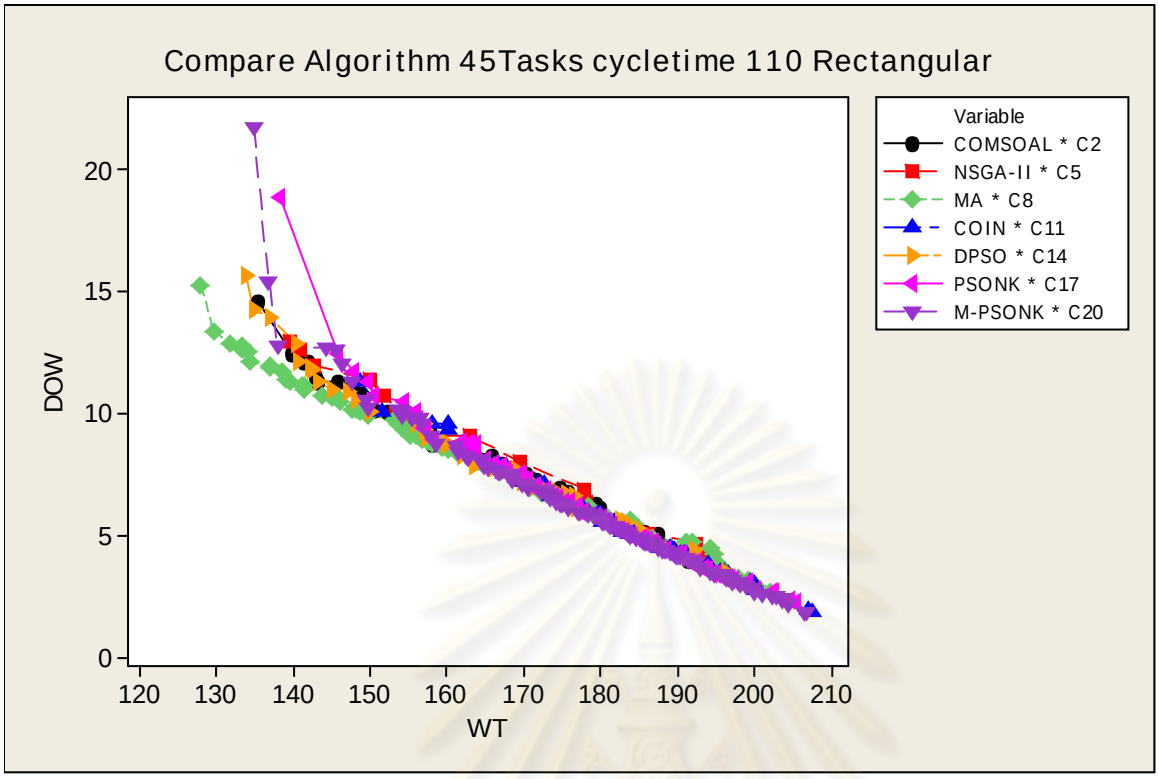
รูปที่ 9.26 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.36 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 57 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	13	0.2437	0.7500	0.0000	1,612
NSGA-II	13	0.2610	0.7500	0.5000	13,300
M-NSGA-II	13	0.2037	0.6652	0.4000	6,263
COIN	13	0.2106	0.5961	0.6667	1,072
DPSO	13	0.1277	0.6456	0.1667	1,360
PSONK	13	0.1277	0.6456	0.1667	742
M-PSONK	13	0.0379	0.4322	0.6429	11,865

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



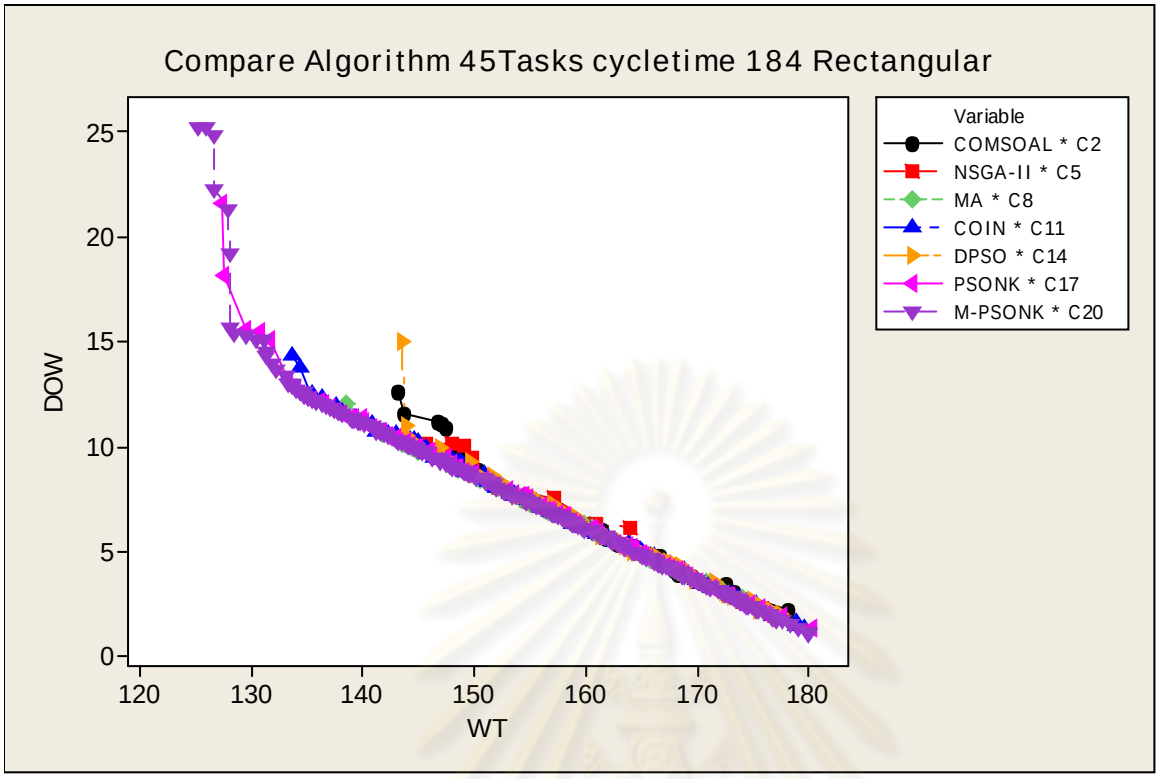
รูปที่ 9.27 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.37 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 110 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	7	0.0415	0.5858	0.0286	1,577
NSGA-II	7	0.0622	0.5194	0.0000	11,354
M-NSGA-II	7	0.0158	0.5992	0.5584	6,092
COIN	7	0.0322	0.7058	0.1250	926
DPSO	7	0.0336	0.6177	0.1190	1,156
PSONK	7	0.0237	0.8041	0.2727	730
M-PSONK	7	0.0113	0.8964	0.6917	11,673

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.28 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.38 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 45 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 184 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

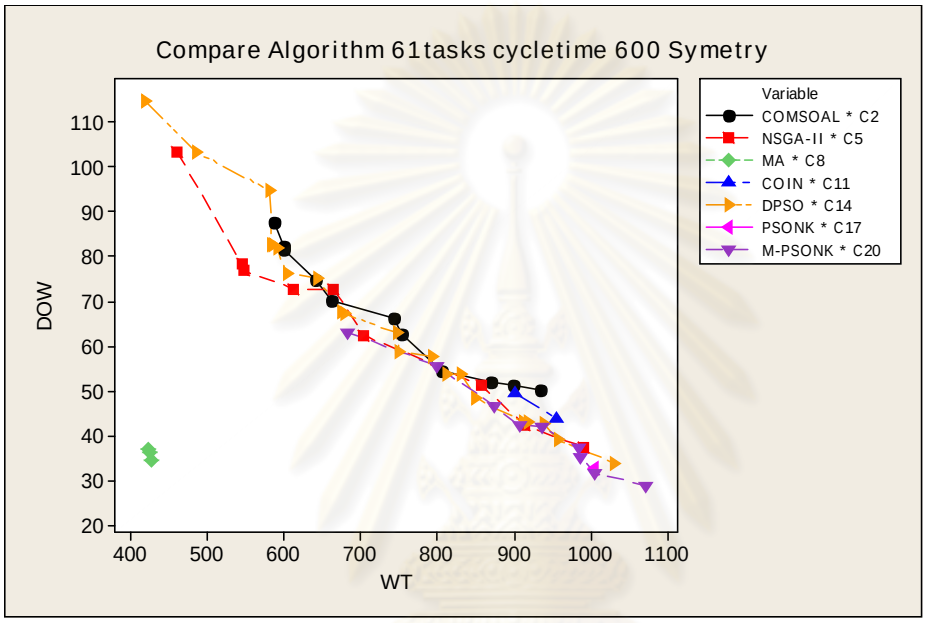
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	4	0.0503	0.5870	0.1081	1,221
NSGA-II	4	0.0718	0.5465	0.1333	10,358
M-NSGA-II	4	0.0292	0.6213	0.5326	6,159
COIN	4	0.0174	0.5256	0.1633	920
DPSO	4	0.0439	0.6734	0.1091	971
PSONK	4	0.0068	0.7459	0.3462	722
M-PSONK	4	0.0013	0.6834	0.7114	16,819

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.7 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 61 ขั้นงาน

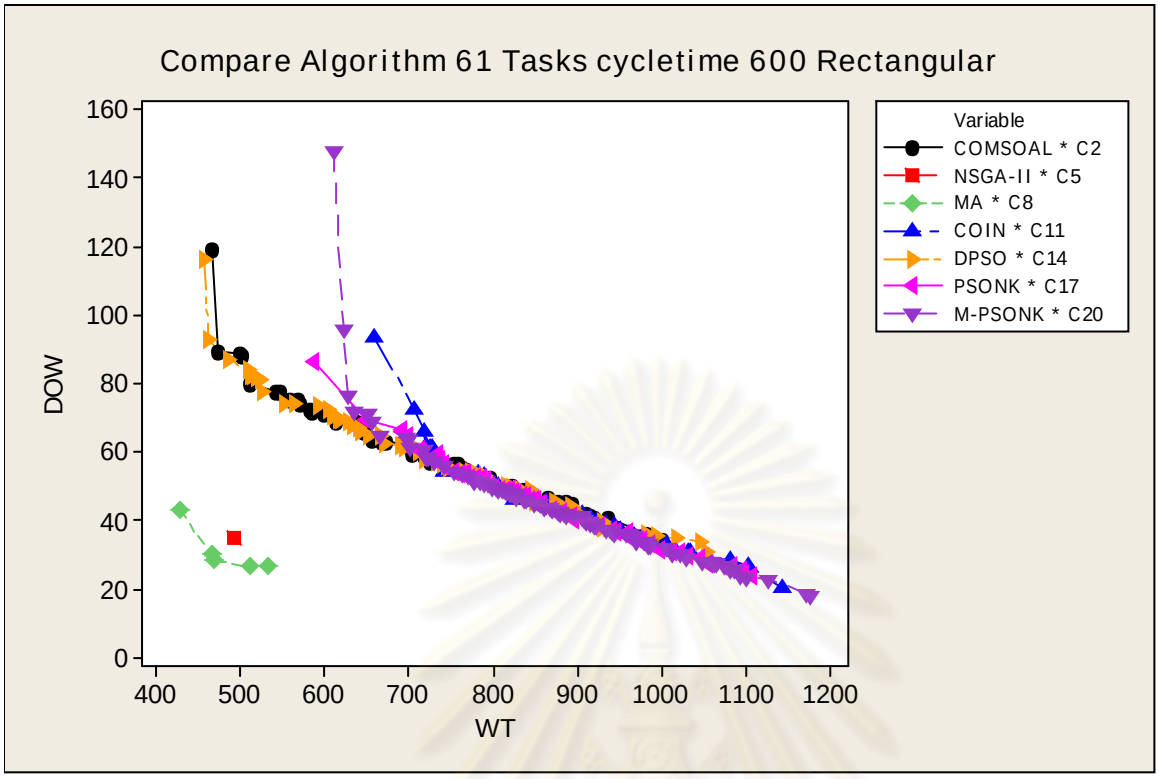
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 45 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 57 110 และ 184 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.29 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.39 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	11	- *	- *	- *	2,588
NSGA-II	11	- *	- *	- *	27,388
M-NSGA-II	10	0	0.5566	1.0000	13,079
COIN	11	- *	- *	- *	1,819
DPSO	11	- *	- *	- *	3,464
PSONK	11	- *	- *	- *	1,230
M-PSONK	11	- *	- *	- *	9,722



รูปที่ 9.30 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.40 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 61 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 600 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

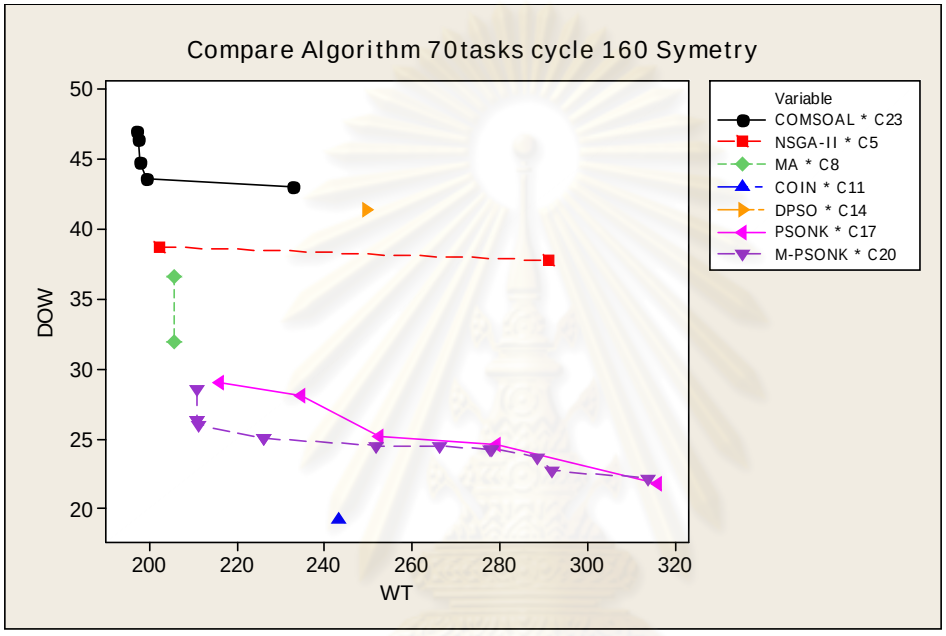
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	11	-*	-*	-*	2,882
NSGA-II	10	None**	None**	None**	21,015
M-NSGA-II	10	0	0.7651	1.0000	12,552
COIN	11	-*	-*	-*	1,859
DPSO	11	-*	-*	-*	2,507
PSONK	11	-*	-*	-*	1,420
M-PSONK	11	-*	-*	-*	9,376

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.8 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 70 ขั้นงาน

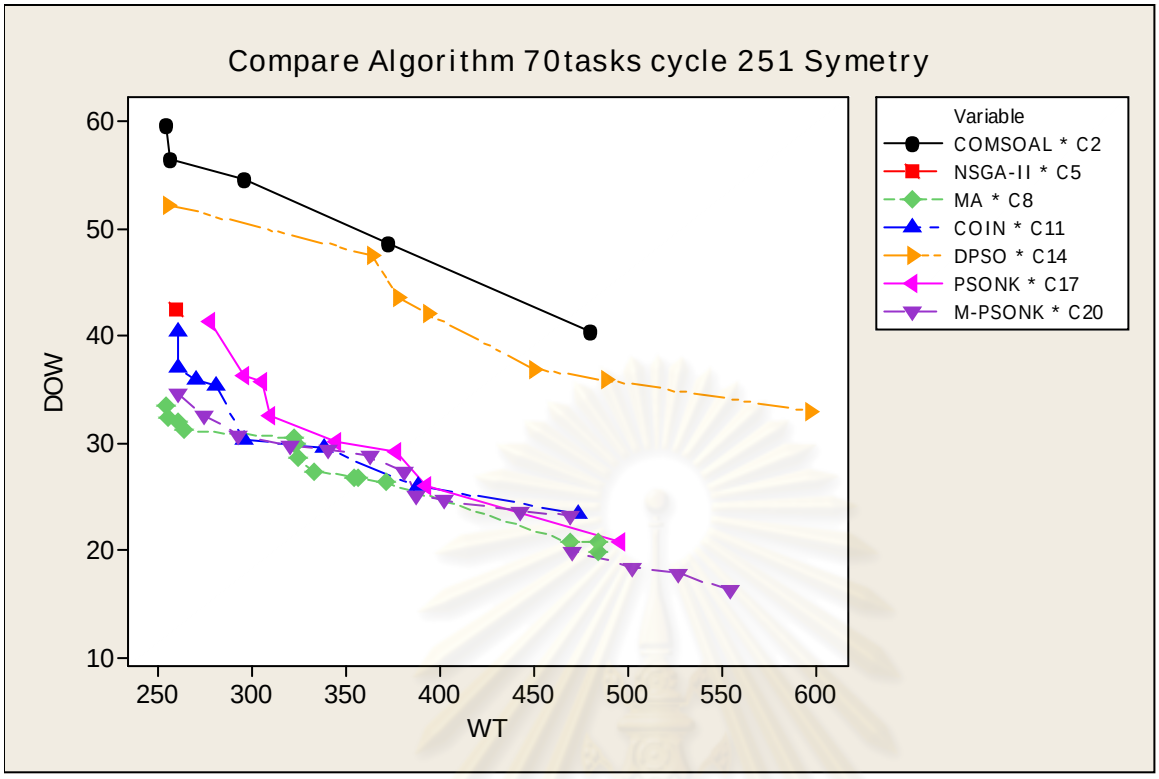
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 45 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 57 110 และ 184 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.31 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.41 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	30	-*	-*	-*	4,169
NSGA-II	29	-*	-*	-*	35,672
M-NSGA-II	28	-*	-*	-*	22,499
COIN	26	None**	None**	None**	2,298
DPSO	29	-*	-*	-*	5,980
PSONK	27	-*	-*	-*	1,578
M-PSONK	27	-*	-*	-*	16,724



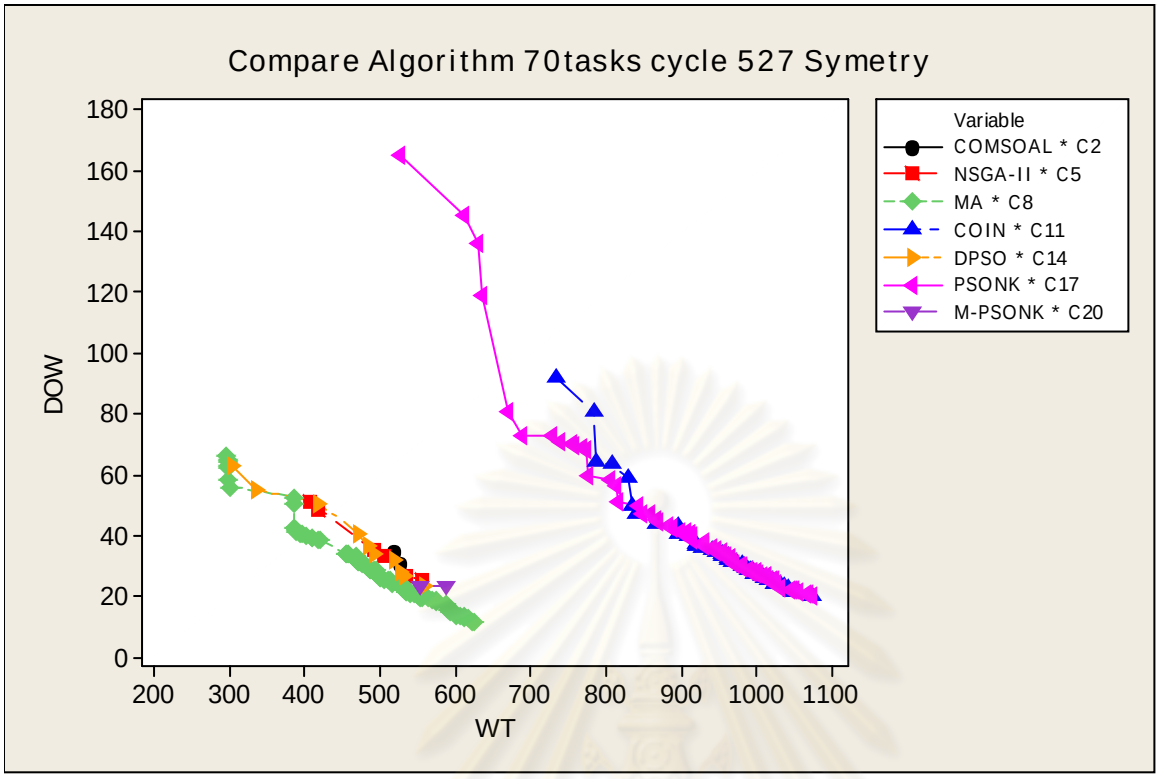
รูปที่ 9.32 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.42 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	18	-*	-*	-*	4,740
NSGA-II	17	None**	None**	None**	30,714
M-NSGA-II	17	0.0599	0.8065	0.7333	16,361
COIN	17	0.1234	0.6091	0.1250	2,562
DPSO	18	-*	-*	-*	4,347
PSONK	17	0.1199	0.6545	0	1,633
M-PSONK	17	0.0378	0.3353	0.6000	12,161

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



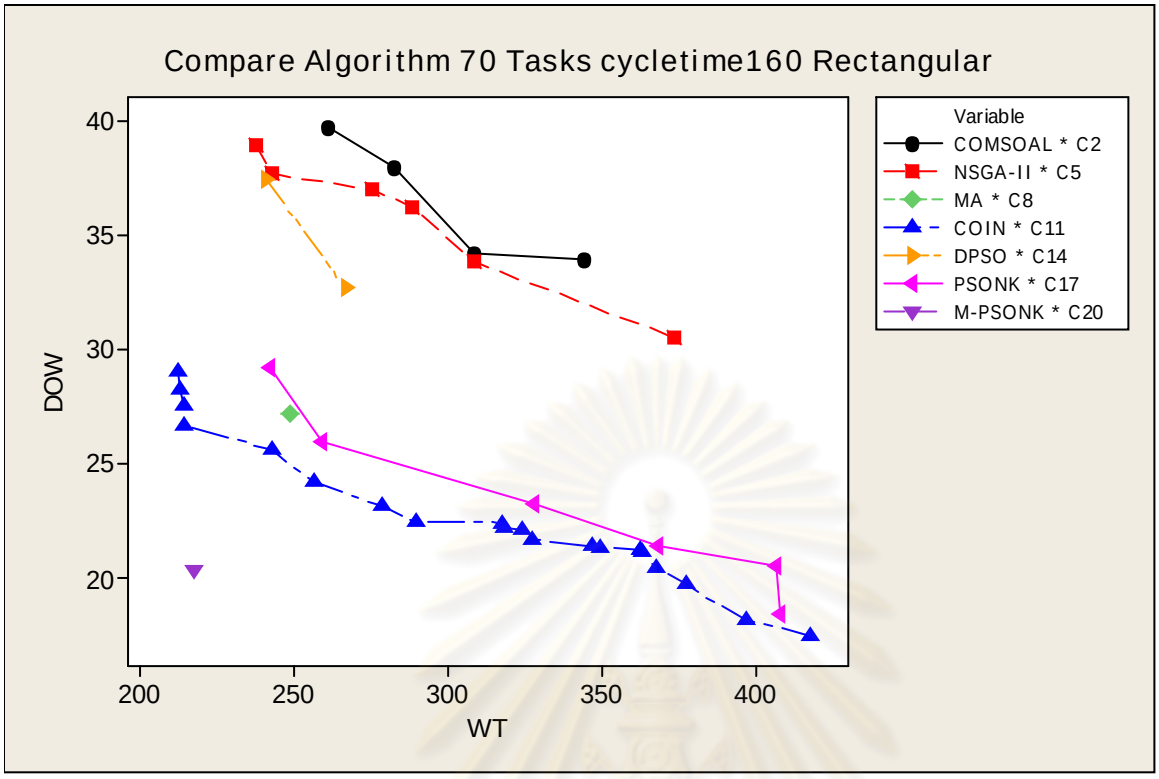
รูปที่ 9.33 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.43 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	8	0.2976	0.7500	0.0	5,097
NSGA-II	8	0.1585	0.7131	0.0	27,301
M-NSGA-II	8	0.0014	0.7841	1.0	16,118
COIN	9	-*	-*	-*	2,122
DPSO	8	0.1125	0.6355	0.1	4,164
PSONK	9	-*	-*	-*	1,462
M-PSONK	8	0.3294	0.7500	0.0	11,981

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



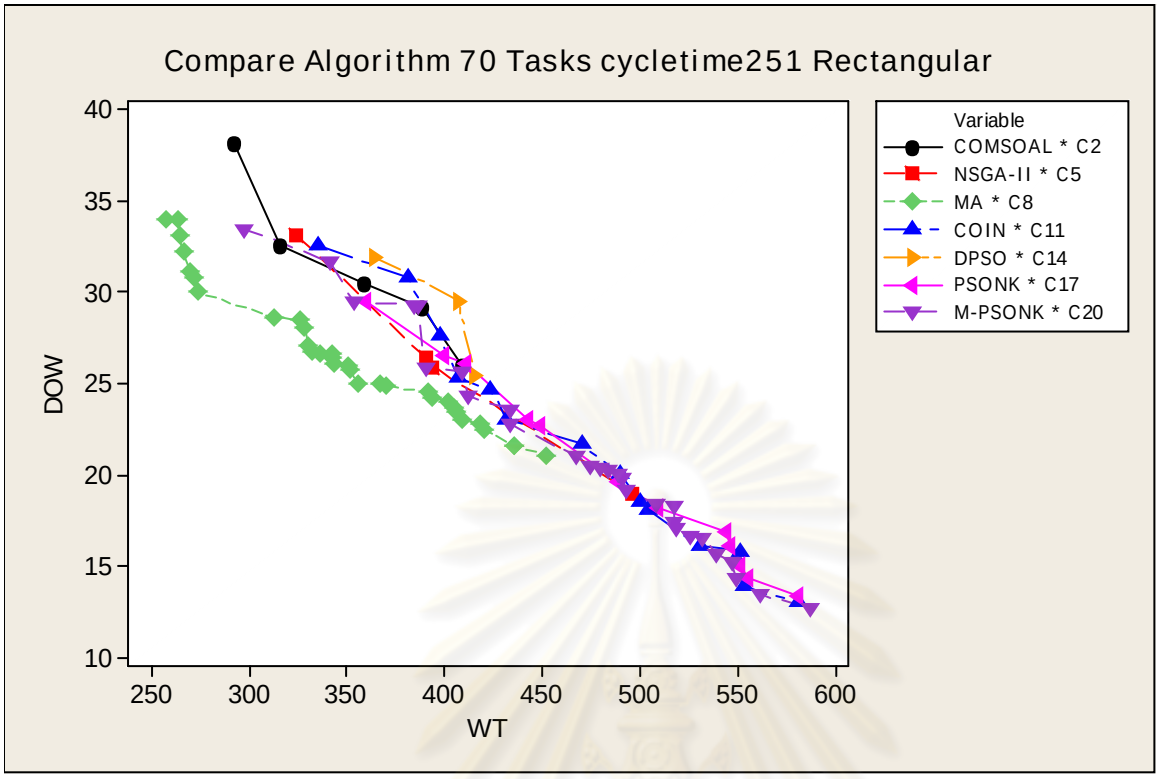
รูปที่ 9.34 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.44 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 160 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	29	-*	-*	-*	3,589
NSGA-II	29	-*	-*	-*	34,533
M-NSGA-II	27	-*	-*	-*	16,583
COIN	27	-*	-*	-*	2,271
DPSO	28	-*	-*	-*	3,542
PSONK	27	-*	-*	-*	1,853
M-PSONK	26	None**	None**	None**	12,388

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



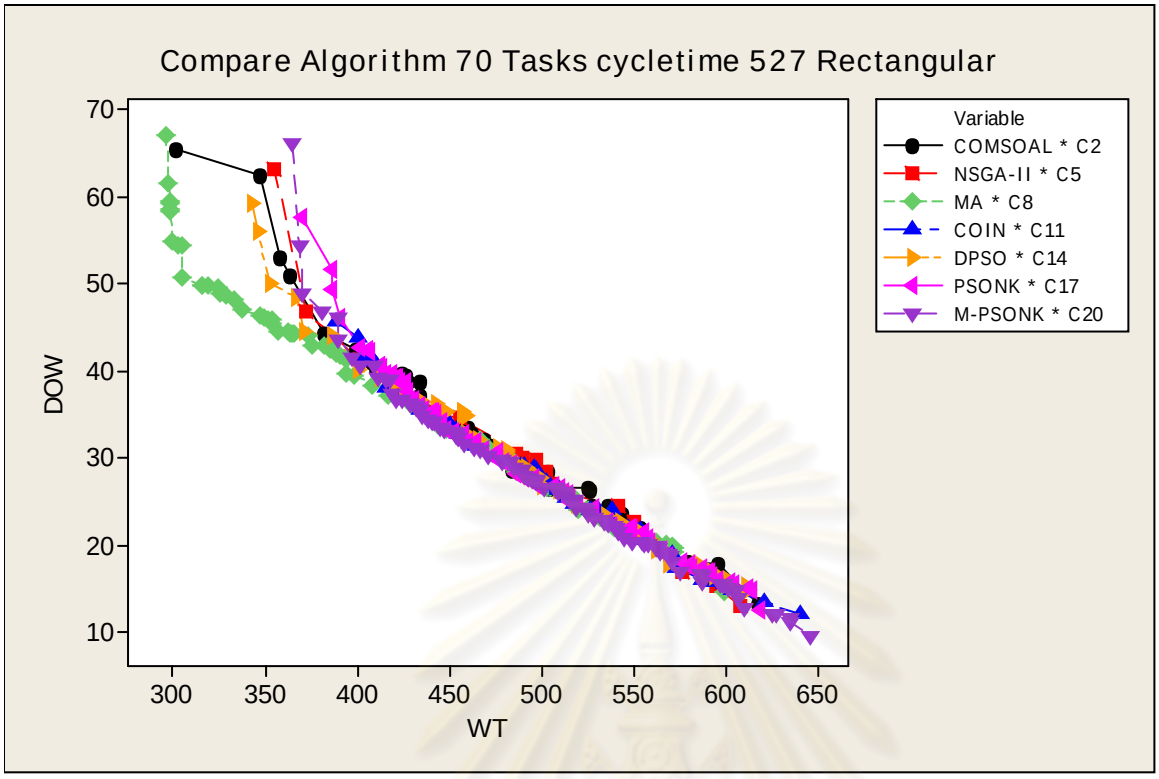
รูปที่ 9.35 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.45 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 251 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	17	0.2849	0.4921	0.0000	4,122
NSGA-II	17	0.1621	0.8016	0.2500	33,043
M-NSGA-II	17	0.1165	0.6058	1.0000	16,657
COIN	17	0.0991	0.4348	0.3571	2,323
DPSO	17	0.3277	0.5868	0.0000	4,056
PSONK	17	0.1111	0.6513	0.1667	1,880
M-PSONK	17	0.0632	0.6701	0.4286	12,443

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.36 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.46 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 70 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 527 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

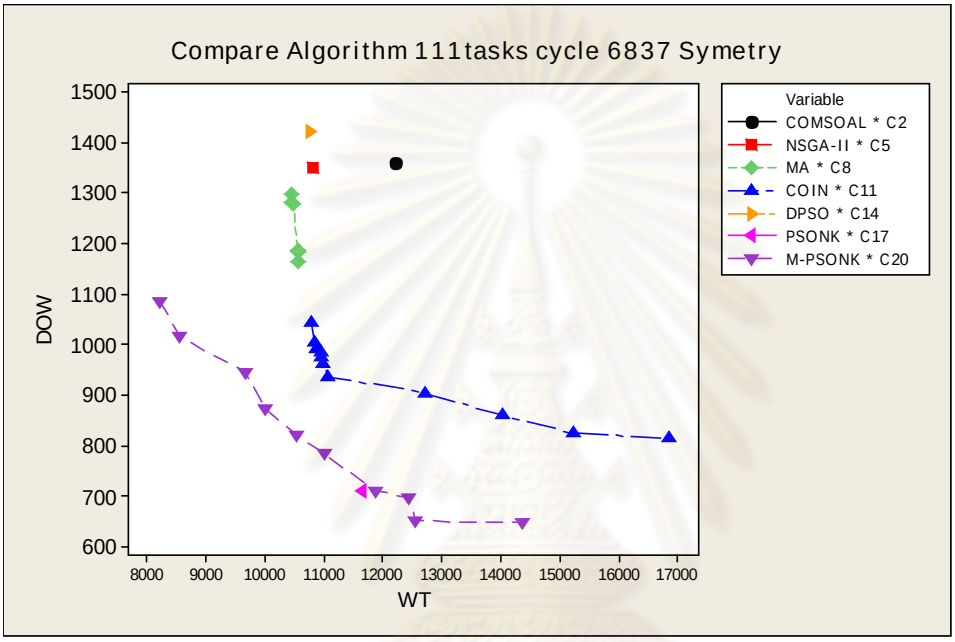
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	8	0.0397	0.7241	0.0270	4,893
NSGA-II	8	0.0516	0.7918	0.2222	20,188
M-NSGA-II	8	0.0095	0.6743	0.5833	16,388
COIN	8	0.0509	0.5745	0.1250	2,097
DPSO	8	0.0327	0.5699	0.0851	5,232
PSONK	8	0.0425	0.6105	0.1200	2,113
M-PSONK	8	0.0296	0.7437	0.6701	12,242

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.9 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 111 ขั้นงาน

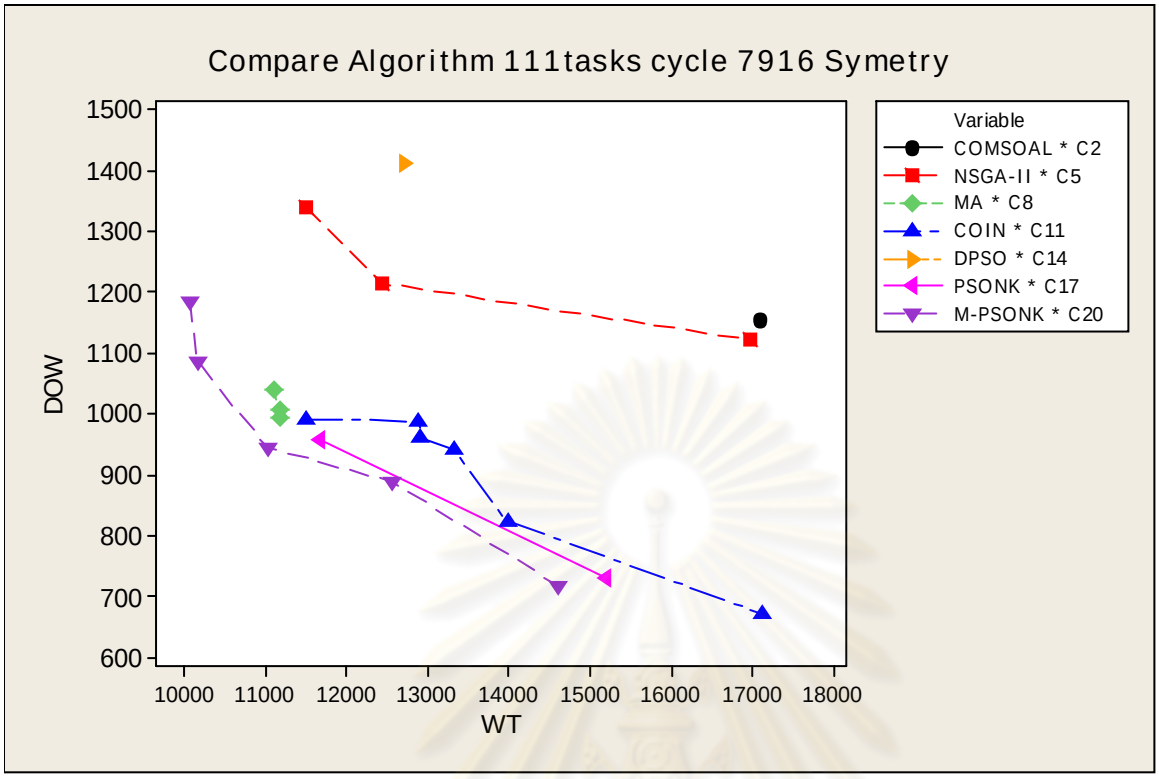
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 111 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 6837 7916 และ 17067 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.37 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.47 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	27	-*	-*	-*	16,156
NSGA-II	27	-*	-*	-*	159,981
M-NSGA-II	27	-*	-*	-*	122,022
COIN	26	-*	-*	-*	7,397
DPSO	27	-*	-*	-*	13,372
PSONK	25	None**	None**	None**	5,100
M-PSONK	25	0.0036	0.4606	0.9000	90,699



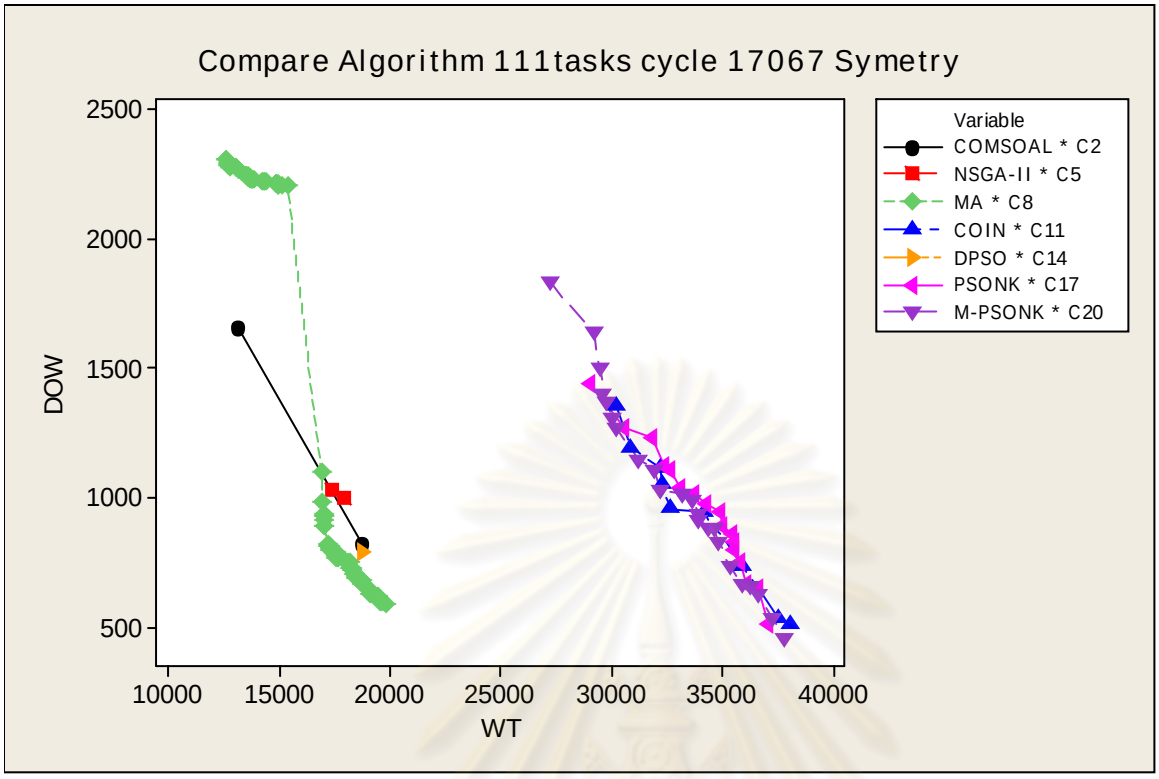
รูปที่ 9.38 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.48 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	23	-*	-*	-*	18,262
NSGA-II	23	-*	-*	-*	133,348
M-NSGA-II	22	0.4498	0.7798	0	113,651
COIN	22	0.1689	0.7818	0.3333	7,491
DPSO	23	-*	-*	-*	10,466
PSONK	22	0.2484	0.7500	0	5,712
M-PSONK	22	0.0849	0.5217	1.0000	84,477

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



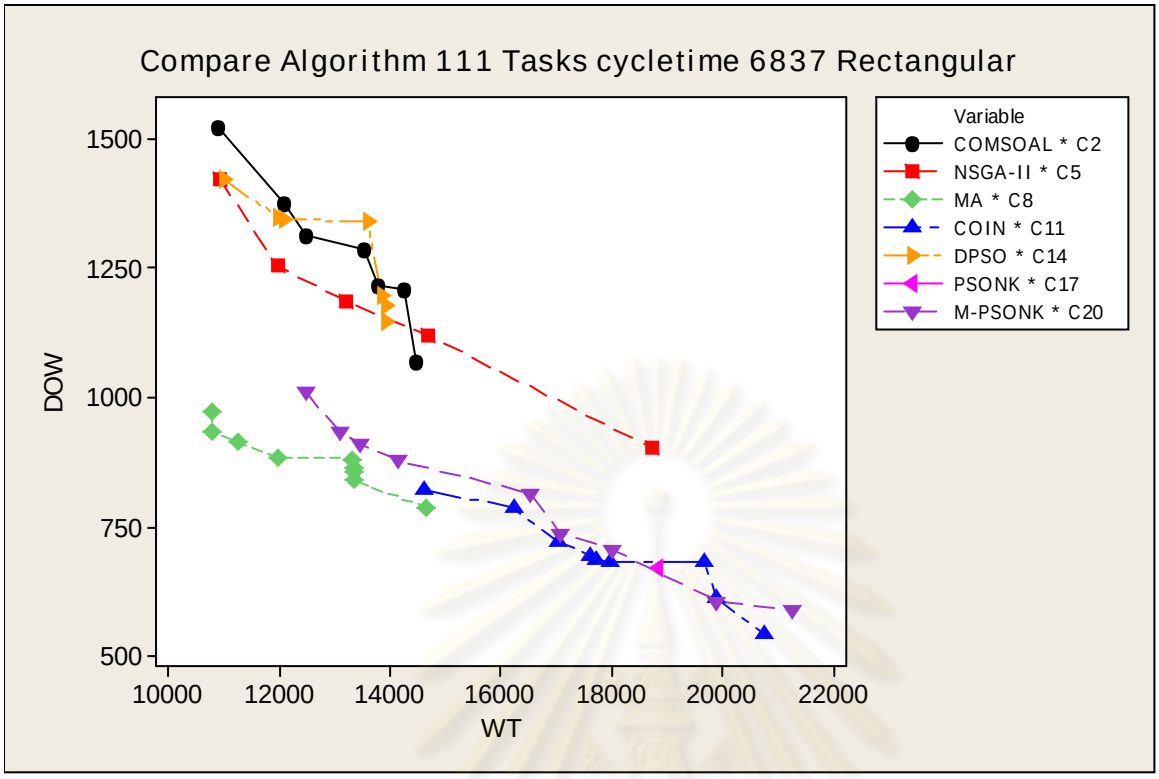
รูปที่ 9.39 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ชิ้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.49 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ชิ้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	10	0.2015	0.7500	0.5000	18,452
NSGA-II	10	0.3106	0.7500	0.0000	114,256
M-NSGA-II	10	0.0071	1.1392	0.6104	114,134
COIN	11	-*	-*	-*	7,631
DPSO	10	None**	None**	None**	11,651
PSONK	11	-*	-*	-*	5,114
M-PSONK	11	-*	-*	-*	84,836

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



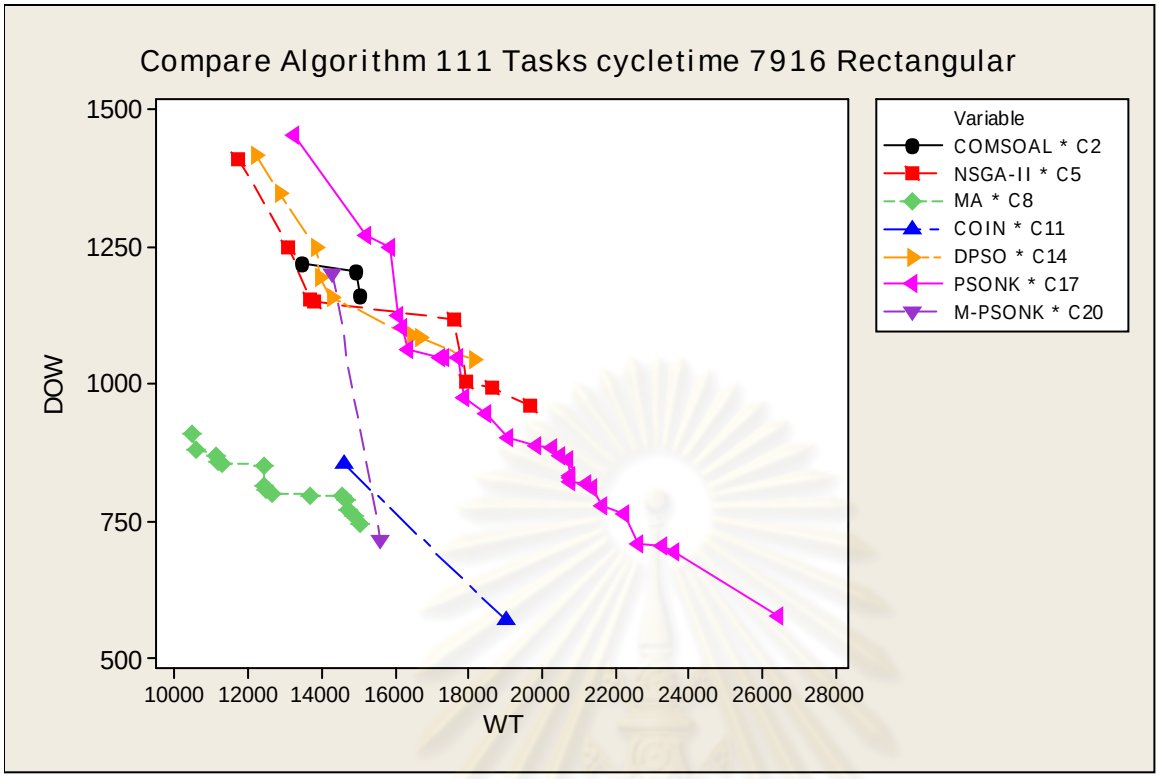
รูปที่ 9.40 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.50 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 6837 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	27	-*	-*	-*	16,839
NSGA-II	27	-*	-*	-*	103.151
M-NSGA-II	26	0.2096	0.6734	1.0000	107,847
COIN	26	0.1341	0.6210	0.8889	7,468
DPSO	27	-*	-*	-*	14,996
PSONK	26	None**	None**	None**	6,194
M-PSONK	26	0.1070	0.4881	0.1111	80,562

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



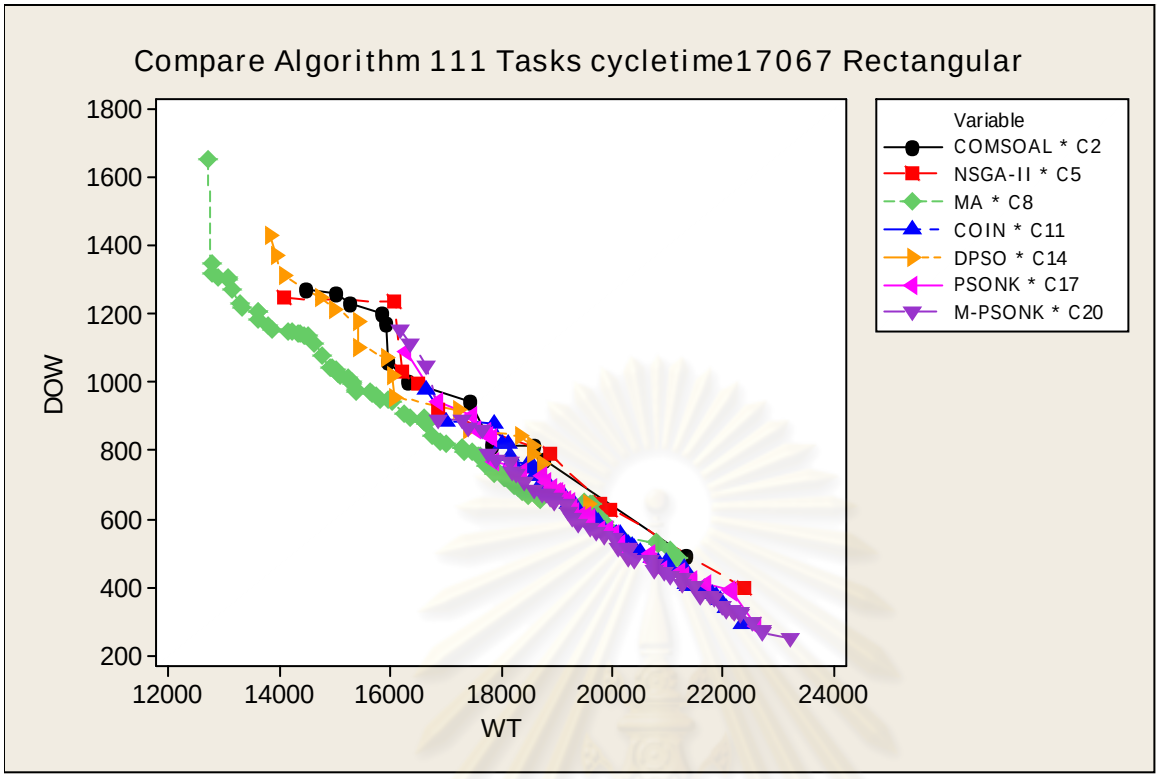
รูปที่ 9.41 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.51 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 7916 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	23	-*	-*	-*	17,145
NSGA-II	23	-*	-*	-*	95,679
M-NSGA-II	22	0.0470	0.5839	1.0000	105,640
COIN	22	0.3031	0.7500	0.5000	7,157
DPSO	23	-*	-*	-*	15,042
PSONK	23	-*	-*	-*	6,455
M-PSONK	22	0.3501	0.7500	0.5000	78,913

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.42 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.52 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 111 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 17067 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

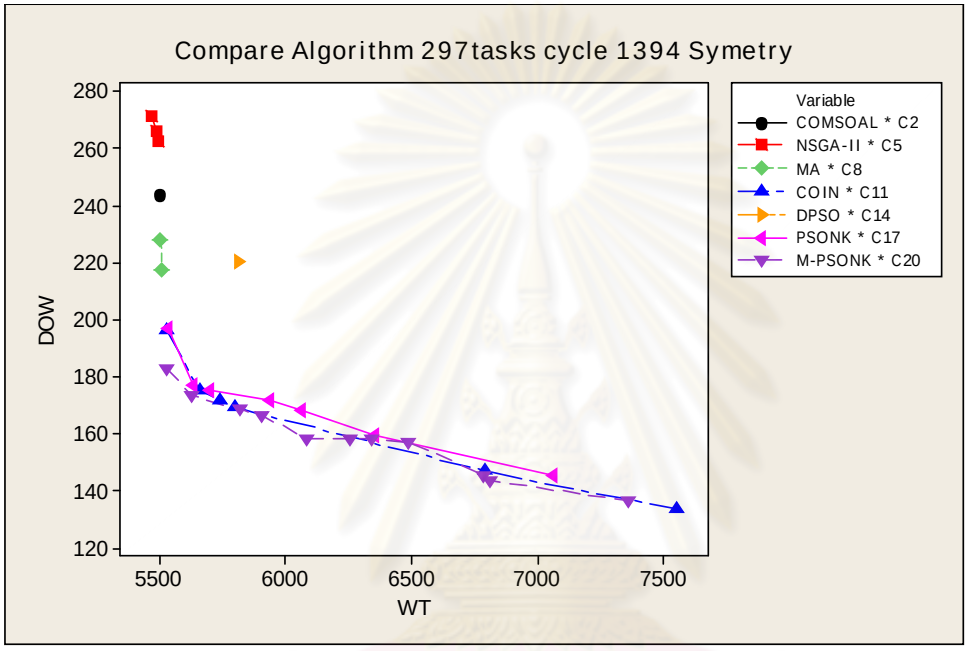
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	10	0.0960	0.7014	0.0000	17,773
NSGA-II	10	0.0883	0.6559	0.0000	95,257
M-NSGA-II	10	0.0225	0.7559	0.7931	102,541
COIN	10	0.1017	0.6521	0.1020	7,196
DPSO	10	0.1168	0.4024	0.0000	15,728
PSONK	10	0.0877	0.7579	0.0930	6,101
M-PSONK	10	0.0770	0.5253	0.5556	76,598

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.10 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 297 ขั้นงาน

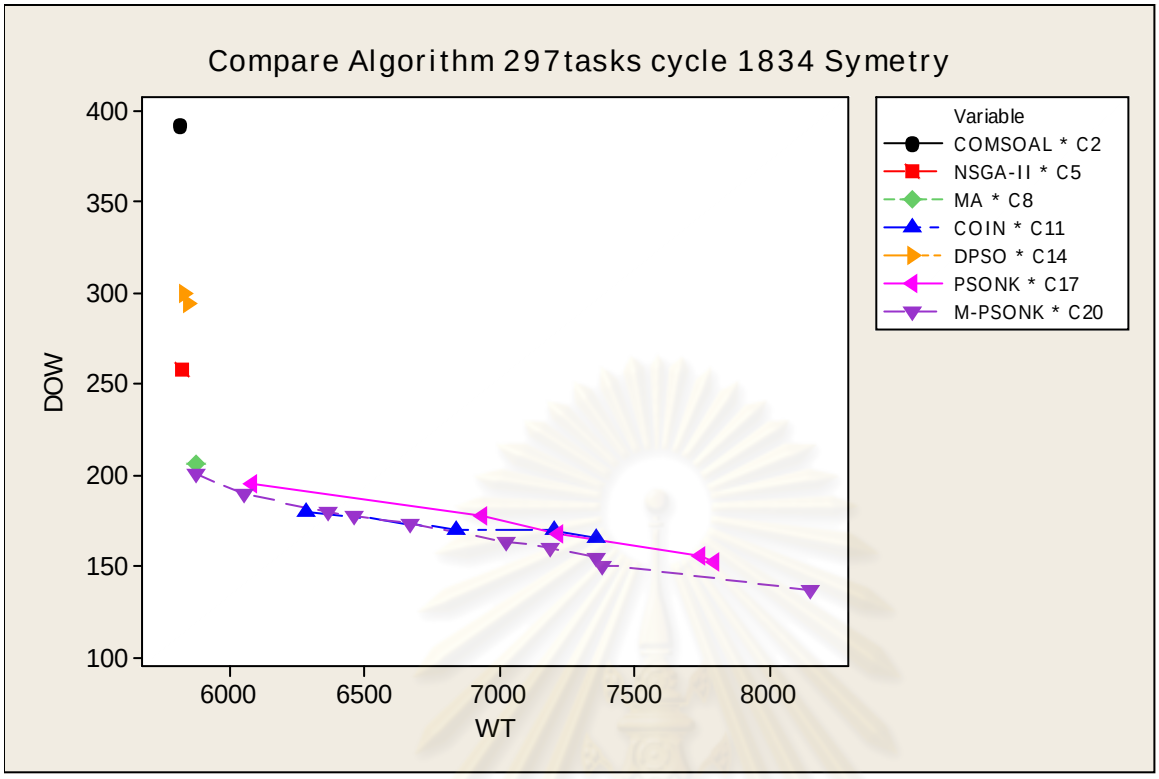
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 297 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 1394 1834 และ 2787 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.43 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.53 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	61	- *	- *	- *	19,220
NSGA-II	61	- *	- *	- *	144,817
M-NSGA-II	61	- *	- *	- *	485,946
COIN	60	0.0893	0.7667	0.5000	5,852
DPSO	61	- *	- *	- *	24,752
PSONK	60	0.1148	0.7277	0	5,522
M-PSONK	60	0.0147	0.6812	0.9091	361,204



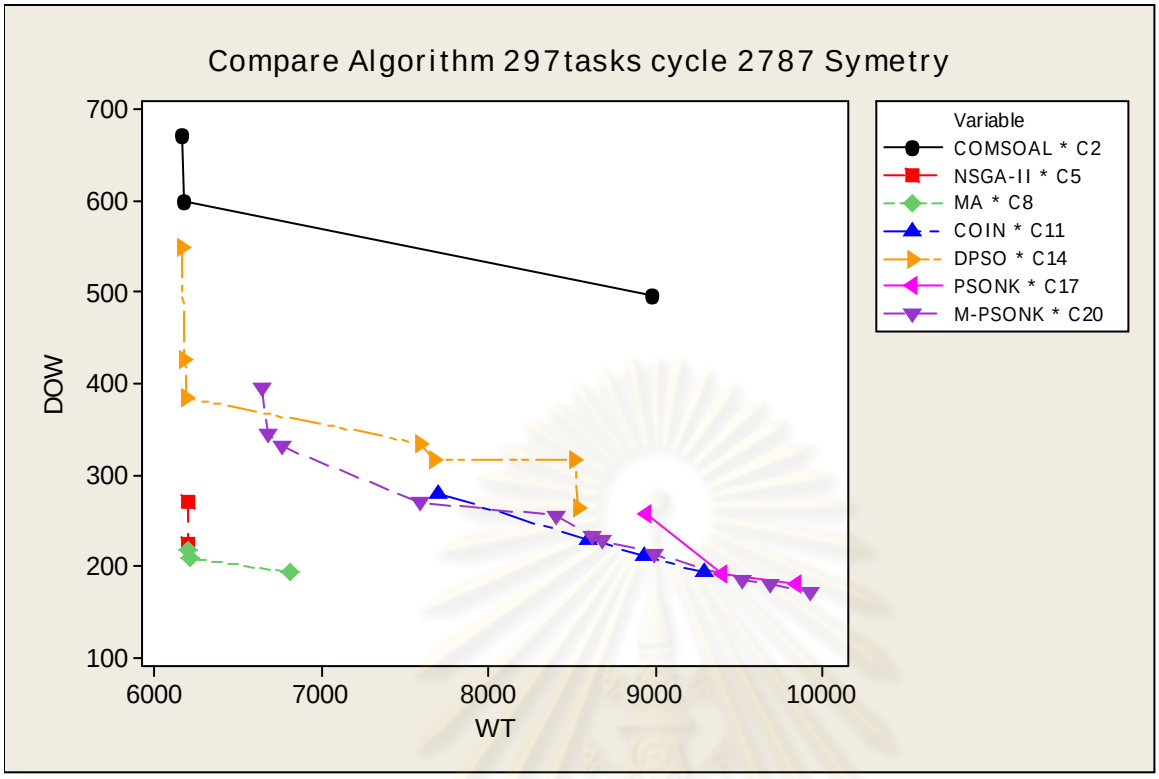
รูปที่ 9.44 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.54 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	47	-*	-*	-*	14,704
NSGA-II	45	-*	-*	-*	144,147
M-NSGA-II	45	None**	None**	None**	506,220
COIN	45	0.1628	0.6761	0.5000	5,716
DPSO	46	-*	-*	-*	24,989
PSONK	45	0.1703	0.6612	0	5,239
M-PSONK	45	0.0105	0.6633	1.0000	376,273

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



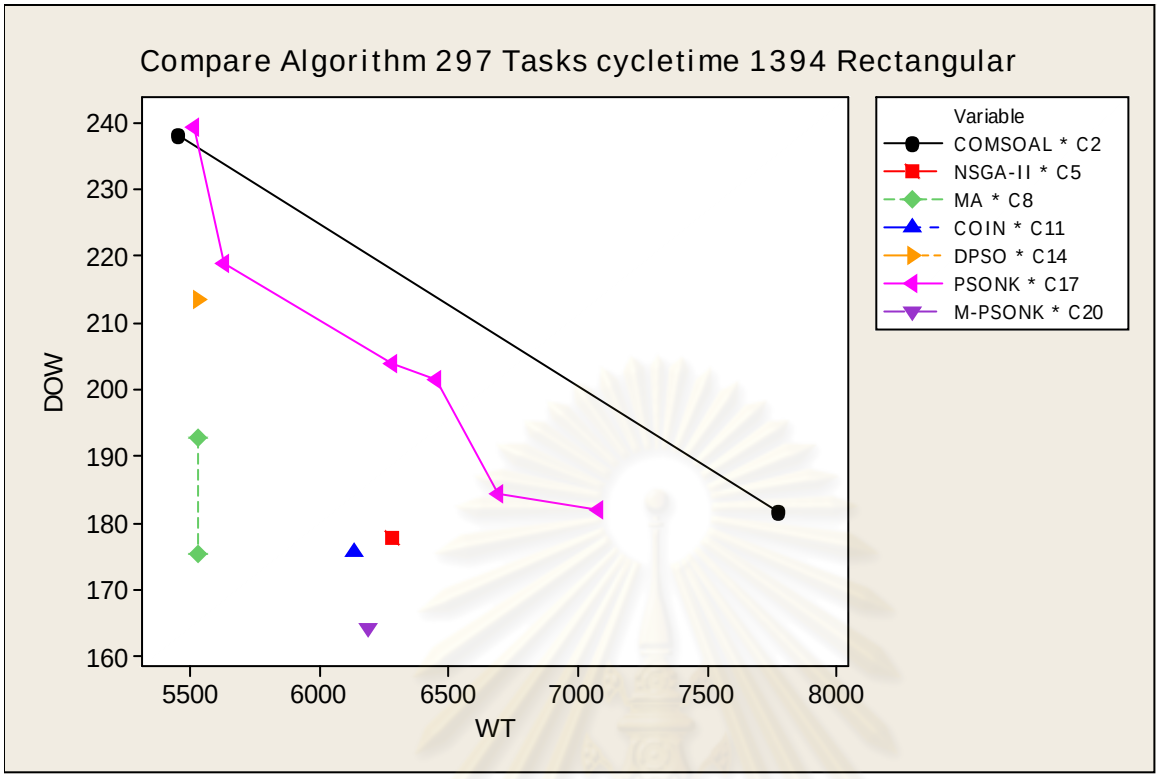
รูปที่ 9.45 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.55 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	31	-*	-*	-*	14,426
NSGA-II	29	0.3414	0.7500	0.5000	166,070
M-NSGA-II	29	0.1678	0.7518	1.0000	488,792
COIN	30	-*	-*	-*	5,744
DPSO	30	-*	-*	-*	20,492
PSONK	30	-*	-*	-*	5,503
M-PSONK	30	-*	-*	-*	363,319

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



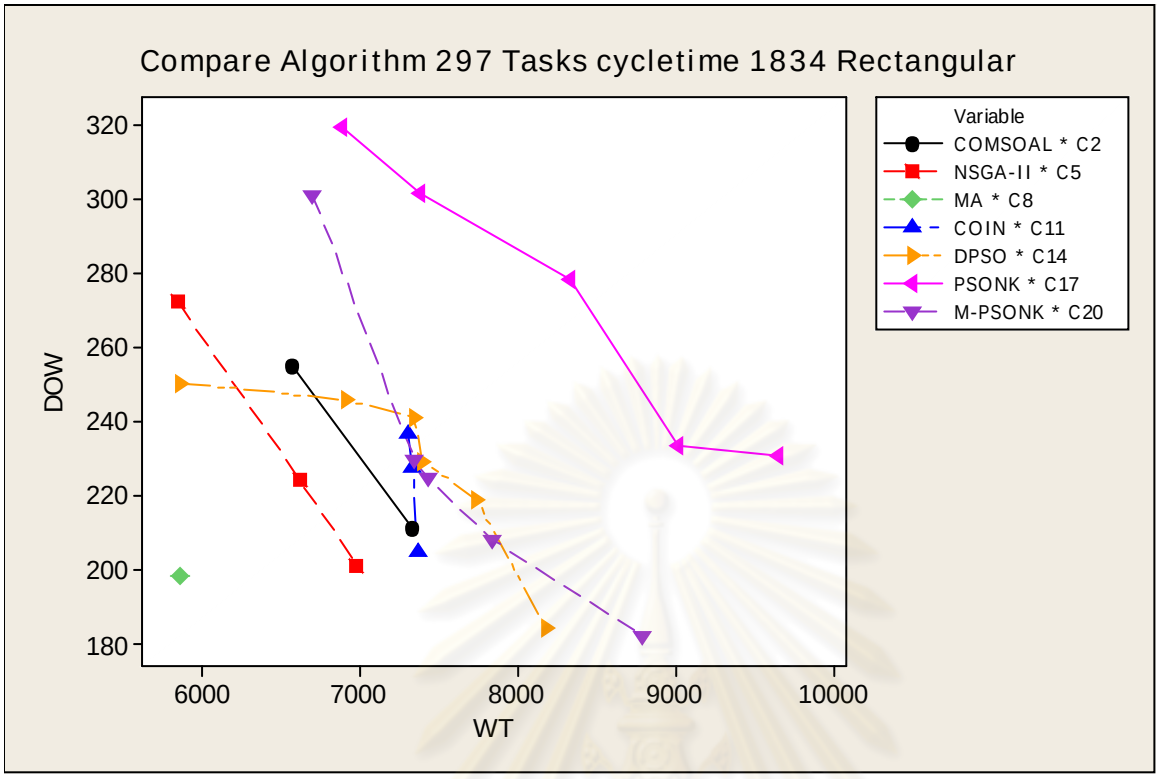
รูปที่ 9.46 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.56 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1394 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	62	-*	-*	-*	20,240
NSGA-II	60	None**	None**	None**	123,051
M-NSGA-II	60	0	0.7500	1.0000	483,324
COIN	60	None**	None**	None**	5,548
DPSO	61	-*	-*	-*	21,900
PSONK	61	-*	-*	-*	5,419
M-PSONK	60	None**	None**	None**	361,043

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



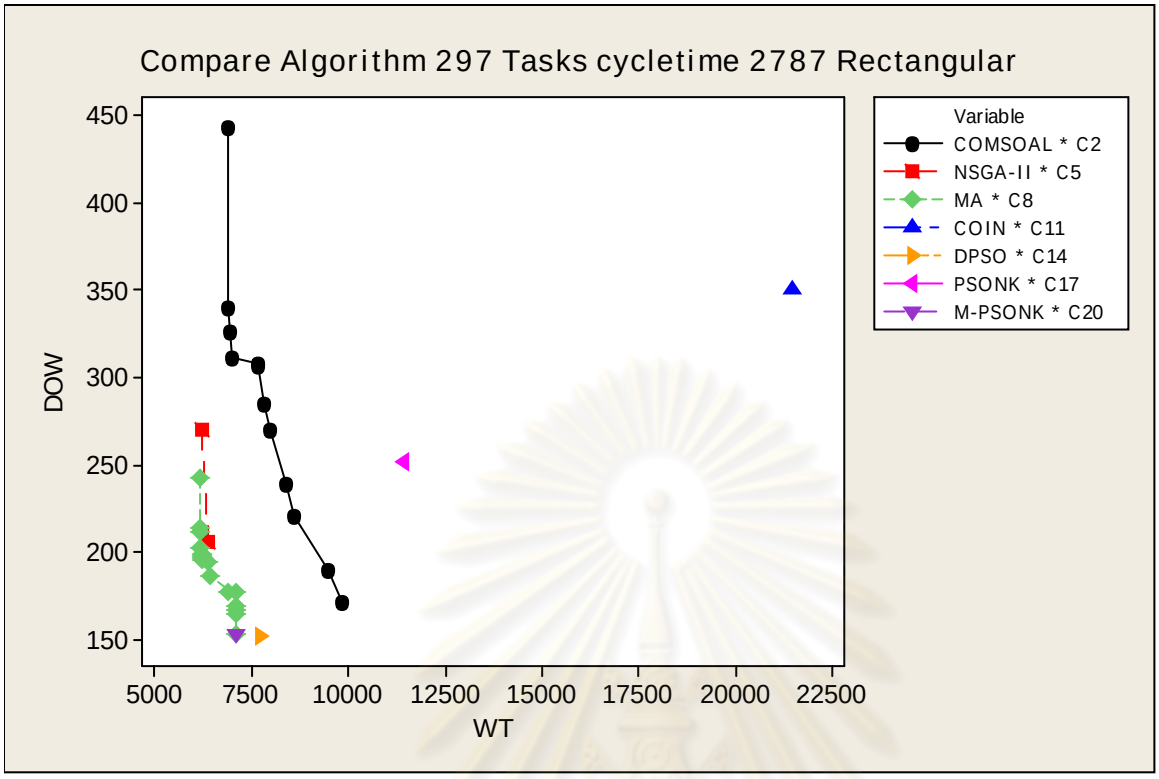
รูปที่ 9.47 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.57 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1834 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	46	-*	-*	-*	18,831
NSGA-II	46	-*	-*	-*	119,709
M-NSGA-II	44	None**	None**	None**	483,971
COIN	46	-*	-*	-*	5,621
DPSO	46	-*	-*	-*	21,439
PSONK	47	-*	-*	-*	5,203
M-PSONK	46	-*	-*	-*	361,526

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้



รูปที่ 9.48 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.58 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

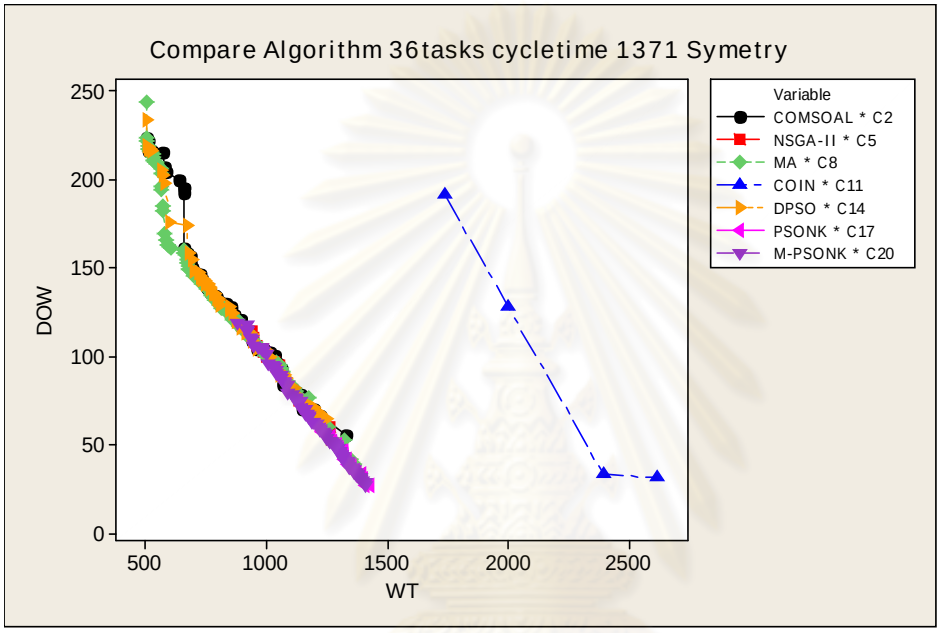
ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	30	-*	-*	-*	17,293
NSGA-II	29	0.4261	0.7500	0	120,788
M-NSGA-II	29	0	0.8645	1.0000	483,642
COIN	35	-*	-*	-*	5,589
DPSO	29	None**	None**	None**	21,306
PSONK	31	-*	-*	-*	5,305
M-PSONK	29	None**	None**	None**	361,281

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.2.11 การประเมินประสิทธิภาพของปัญหาขนาด 36 ขั้นงาน

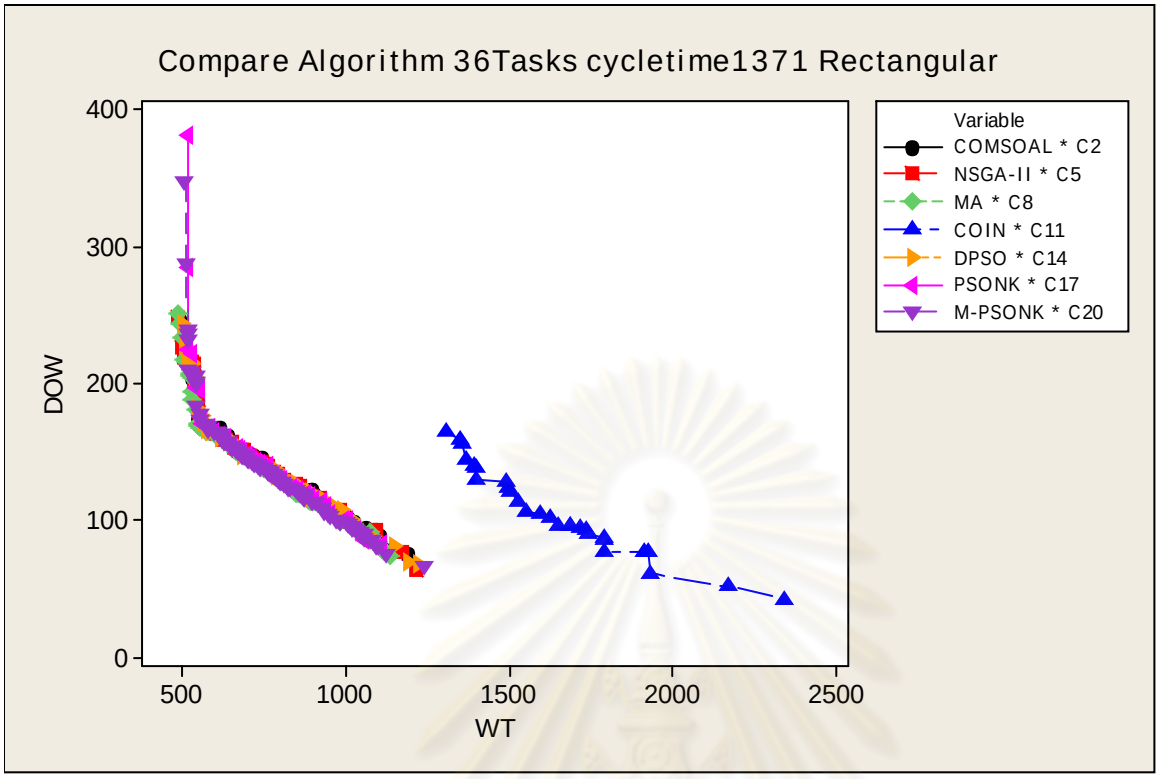
เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากทั้ง 7 อัลกอริทึมเราสามารถเปรียบเทียบผลการหาคำตอบ เมื่อเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier จะพบว่าผลการคำนวณตัวชี้วัดสมรรถนะของ อัลกอริทึมทั้ง 7 ในปัญหาขนาด 36 ขั้นงาน ที่มีรอบเวลาการทำงาน 1371 วินาที ในผังสายการประกอบแบบสมมาตรและแบบ Rectangular จะมีค่าดังนี้



รูปที่ 9.49 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

ตารางที่ 9.59 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 297 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 2787 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	6	0.0380	0.6287	0.1400	871
NSGA-II	6	0.1934	0.6151	0.2632	3,438
M-NSGA-II	6	0.0137	0.7007	0.6100	3,681
COIN	6	0.5159	0.5560	0.0000	801
DPSO	6	0.0365	0.7514	0.2000	1,077
PSONK	6	0.3974	0.5504	0.2581	374
M-PSONK	6	0.1329	0.5943	0.6705	2,736



รูปที่ 9.50 การเปรียบเทียบค่าวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตารางที่ 9.60 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว ของอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึม ในปัญหา 36 ขั้นงาน เมื่อรอบเวลาการทำงานเท่ากับ 1371 ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

ตัวชี้วัดสมรรถนะ	Number of worker	Convergence	Spread	Ratio	Time (s.)
COMSOAL	6	0.0256	0.6122	0.0400	973
NSGA-II	6	0.0258	0.6221	0.1304	3,489
M-NSGA-II	6	0.0180	0.7267	0.5976	3,707
COIN	6	0.3260	0.6739	0.1071	825
DPSO	6	0.0228	0.6791	0.1077	1,104
PSONK	6	0.0232	0.8548	0.1698	356
M-PSONK	6	0.0160	0.8494	0.5000	2,769

* เนื่องจากจำนวนพนักงานที่หาได้มีค่ามากกว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาตัววัดสมรรถนะที่เหลือ

** เนื่องจากกลุ่มของคำตอบที่หาได้มีเพียงคำตอบเดียวจึงไม่สามารถหาตัววัดสมรรถนะได้

9.3 การวิเคราะห์ผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม

จากผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม เราจะสามารถวิเคราะห์ผลการประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยทั้ง 7 อัลกอริทึมได้ดังนี้

ในปัญหาขนาด 7 งาน จะพบว่าอัลกอริทึมทั้ง 7 สามารถหาจำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดได้เท่ากันทุกอัลกอริทึม โดยตัววัดสมรรถนะทั้ง 3 ตัวจะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัลกอริทึมโดย COIN และ PSONK จะมีปัญหาในบาง cycle time โดยจะสามารถหาคำตอบได้จำนวนน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น

ในปัญหาขนาด 10 งานจะพบว่าผลจะเป็นเช่นเดียวกับปัญหาขนาด 7 งานโดยอัลกอริทึมทั้ง 7 สามารถหาจำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดได้เท่ากันและตัววัดสมรรถนะทั้ง 3 ตัวมีค่าใกล้เคียงกันโดน M-NSGAII จะมีสมรรถนะสูงกว่าอัลกอริทึมอื่นเล็กน้อย

ในปัญหาขนาด 11 ข้นงานจะพบว่าจำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดที่หาได้จากอัลกอริทึมทั้ง 7 ยังมีค่าเท่ากันอีกทั้งสมรรถนะก็ยังมีค่าใกล้เคียงกันอีกด้วย โดย COIN มีสมรรถนะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่นในปัญหานี้

ในปัญหาขนาด 19 ข้นงาน พบว่าอัลกอริทึมทั้ง 7 สามารถหาจำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดได้เท่ากันโดยผลการวัดสมรรถนะพบว่า M-PSONK จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่นในปัญหานี้

ในปัญหาขนาด 28 ข้นงานจะพบว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดที่หาได้จากอัลกอริทึมทั้ง 7 มีค่าเท่ากันและตัววัดสมรรถนะทั้ง 3 ตัวมีค่าใกล้เคียงกัน

ในปัญหาขนาด 45 ข้นงานจะพบว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดที่หาได้จากอัลกอริทึมทั้ง 7 จะมีค่าไม่เท่ากันโดย M-NSGAII และ M-PSONK จะสามารถหาค่าพนักงานที่น้อยที่สุดได้ครบทั้ง 6 การทดลองดังนั้น ในปัญหาขนาด 45 ข้นงาน M-NSGAII และ M-PSONK จะมีสมรรถนะดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น

ในปัญหาขนาด 61 ข้นงานจะพบว่า M-NSGAII จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างเห็นได้ชัดโดยสามารถหาจำนวนพนักงานน้อยที่สุดที่ใช้ในสายการประกอบได้เพียง 10 คน ในขณะที่อัลกอริทึมที่เหลือทั้ง 6 อัลกอริทึมสามารถหาจำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดได้เพียง 11 คนเท่านั้น

ในปัญหาขนาด 70 ข้นงานจะพบว่าจำนวนพนักงานน้อยที่สุดที่ใช้ในสายการประกอบที่หาได้จากอัลกอริทึมทั้ง 7 จะมีค่าไม่เท่ากันโดย M-NSGAII และ M-PSONK จะสามารถหาค่าพนักงานที่น้อย

ที่สุดได้ถึง 5 การทดลองจากการทดลองทั้งหมด 6 การทดลองในปัญหาขนาด 70 ขั้นงานดังนั้น ในปัญหาขนาด 70 ขั้นงานนี้ M-NSGAII และ M-PSONK จะมีสมรรถนะดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่นโดย PSONK และ COIN จะมีประสิทธิภาพรองลงมา

ในปัญหาขนาด 111 ขั้นงานจะพบว่า M-NSGAII และ M-PSONK จะสามารถหาค่าพนักงานที่น้อยที่สุดได้ถึง 4 การทดลองจากการทดลองทั้งหมด 6 การทดลอง โดย PSONK และ COIN จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ M-PSONK และ M-NSGAII

ในปัญหาขนาด 297 ขั้นงานจะพบว่า M-NSGAII จะสามารถหาค่าพนักงานที่น้อยที่สุดได้ถึง 4 การทดลองจากการทดลองทั้งหมด 6 การทดลองนั้นในปัญหาขนาด 297 ขั้นงานเราสามารถสรุปได้ว่า M-PNSGAII จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดย M-PSONK และ COIN จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับ M-NSGAII

9.4 สรุปท้ายบท

จากการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึมทั้ง 7 อัลกอริทึมโดยเปรียบเทียบกับ True-Pareto Optimal Frontier เพื่อคำนวณหาตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 4 ตัว คือ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution) และเวลาในการคำนวณ (Computation time to solution) และทดลองกับปัญหาทั้งหมด 11 ปัญหา

เมื่อพิจารณาในปัญหาขนาดเล็กในขนาดไม่เกิน 28 งานจะพบว่าทั้ง 7 อัลกอริทึมให้ผลต่างกันไม่มากนักเนื่องจากความซับซ้อนของปัญหามีน้อยโดย PSONK จะมีเวลาใช้เวลาในการลู่เข้าคำตอบที่แท้จริงเร็วที่สุดในขณะที่ M-PSONK และ M-NSGAII จะใช้เวลาในการคำนวณสูงกว่าอัลกอริทึมอื่นมาก

เมื่อพิจารณาในปัญหาขนาดกลางในปัญหาขนาด 45 61 และ 70 งานจะพบว่า M-PSONK จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยสามารถหาจำนวนพนักงานที่น้อยที่สุดได้ในทุกปัญหา ซึ่งใกล้เคียงกับ M-NSGAII โดย PSONK และ COIN จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าเล็กน้อยแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก

เมื่อพิจารณาในปัญหาขนาดใหญ่ที่ปัญหาขนาด 111 งาน และ ปัญหาขนาด 297 งานจะพบว่า M-NSGAII และ M-PSONK ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นอย่างเห็นได้ชัดแต่จะใช้เวลาในการคำนวณนานกว่าอัลกอริทึมอื่นมาก

ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าการใช้เมมเมติกอัลกอริทึมเข้ามาใช้ร่วมกับอัลกอริทึมอื่นซึ่งในที่นี้ได้แก่ M-NSGAII และ M-PSONK จะทำให้ประสิทธิภาพในการหาคำตอบมีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแต่จะมีข้อเสียคือใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากดังนั้นจึงเหมาะจะนำไปใช้ในปัญหาที่มีข้อจำกัดด้านเวลาน้อย หรืองานที่มีมูลค่าสูงและต้องการความละเอียดของคำตอบมากในการตัดสินใจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 10
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำเมมเมติกอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู ผลลัพธ์และข้อสรุปที่ได้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละอัลกอริทึม รวมถึงข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

10.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู โดยมีการพัฒนามาจากสายการประกอบแบบเส้นตรงและพบว่าประสิทธิภาพของสายการประกอบแบบตัวยู มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า อันเนื่องจากสถานีการประกอบและเวลาว่างงานในแต่ละสถานีงานมีปริมาณที่น้อยลง ทำให้เกิดความสามัคคีในการทำงาน เกิดการเรียนรู้ทักษะในการทำงานมากขึ้นกว่าในกรณีของสายการประกอบแบบเส้นตรง สายการประกอบที่มีลักษณะเป็นรูปตัวยูนั้นพนักงานที่ทำงานในสายการประกอบจำเป็นที่จะต้องได้รับการฝึกฝนให้ทำงานได้หลายประเภท ดังนั้นสายการประกอบแบบตัวยูนั้นจะเหมาะกับอุตสาหกรรมที่พนักงานไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญในการทำงานในขั้นตอนต่างๆมากนัก.เช่นอุตสาหกรรม ผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูป และอุตสาหกรรมผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง

ปัญหาของการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนจัดเป็นปัญหาแบบ NP-Hard ทำให้เราต้องใช้ฮิวริสติกเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ นำเมมเมติดอัลกอริทึม เข้ามาประยุกต์ใช้ในปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

10.1.1 ลักษณะของปัญหา

ปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยเป็นปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งปัญหาที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งสิ้น 11 ปัญหาโดยมีขนาดตั้งแต่มี 7 ถึง 297 ข้นงาน โดยมีปัญหาจริงของอุตสาหกรรมผลิตเสื้อผ้าสำเร็จรูปของ บริษัทไทยคาเนตะ จำกัด ในปัญหาขนาด 36 งานปัญหาการจัดสรรพนักงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 3

วัตถุประสงค์ คือ เพื่อให้มีจำนวนพนักงานน้อยที่สุด เพื่อให้ค่าการกระจายภาระงานในแต่ละสถานีงานมีค่าน้อยที่สุด และเพื่อให้เวลาเดินของพนักงานมีค่าน้อยที่สุด

10.1.2 การประยุกต์ใช้เมมเมติดอัลกอริทึมในปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

เมมเมติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้างโดยใช้การค้นหาเฉพาะทีประยุกต์เข้ากับอัลกอริทึมอื่น โดยในงานวิจัยนี้จะนำเมมเมติกอัลกอริทึมเข้ามาประยุกต์ใช้กับNon Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) และ วิธีหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบ (Particle Swarm Optimization with Negative Knowledge : PSONK) เป็น M-NSGA-II และ M-PSONK ตามลำดับ

จากนั้นเราจะทำการทดลองกับปัญหาที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นและทำการเปรียบเทียบกับ วิธี COMSOAL วิธีเจนเนติกอัลกอริทึม อัลกอริทึมการบรรจวบ และ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคเพื่อวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

10.1.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้เมมเมติดอัลกอริทึมในปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจะพบว่า เมื่อนำเมมเมติดอัลกอริทึม เข้ามาประยุกต์ใช้ในปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู จะมีประสิทธิภาพค่อนข้างดีกว่า COMSOAL NSGAII DPSO และ PSONKโดย ในปัญหาที่ทำการทดลองทั้ง 11 ปัญหาจะพบว่า M-NSGA-II และ M-PSONK จะให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นในทุกปัญหาแต่จะใช้เวลาในการคำนวณสูงขึ้น

ซึงเราสามารถสรุปได้ว่าการนำเมมเมติดอัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานในสายการประกอบแบบตัวยูที่มีหลายวัตถุประสงค์ จะทำให้ประสิทธิภาพในการหาคำตอบดีขึ้น เหมาะสมสำหรับการเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้แก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานแบบหลายวัตถุประสงค์ในสายการประกอบแบบตัวยู

10.2 ข้อเสนอแนะ

1. การนำการค้นหาเฉพาะที่มาประยุกต์ใช้กับวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคโดยใช้ความรู้เชิงลบให้ผลคำตอบที่ดีขึ้นแต่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่นานมาก ดังนั้นจึงไม่เหมาะในปัญหาที่มีขนาดใหญ่หรือปัญหาที่มีข้อจำกัดด้านเวลา

2. การกำหนดพารามิเตอร์ในบางพารามิเตอร์ถ้ามีการทดลองโดยละเอียดจะสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมได้เป็นอย่างมาก

3. ในงานวิจัยนี้ถือคนงานแต่ละคนมีความสามารถเท่ากัน ซึ่งเราสามารถตัดข้อจำกัดนี้ออกจากงานวิจัยได้เพื่อที่จะให้ลักษณะของปัญหามีความใกล้เคียงกับปัญหาจริงมากยิ่งขึ้น

4. ควรมีการนำ Learning Curve เข้ามาใช้ในปัญหาเพื่อให้ลักษณะของปัญหามีความใกล้เคียงกับปัญหาจริงมากยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรรณิกา ศิลานนท์. การประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึมในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบหลายวัตถุประสงค์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

จงกล เอียมมิ. การประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึมในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

เพ็ญพักตร์ ปิ่นกุมภีร์. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาณุวัฒน์ โอฬารวิวัฒน์ชัย. การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดสมดุลที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวยู ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Aase, G. R., Olson, J. R., and Chniederjans, M. J. U-shaped assembly line layouts and their impact on labour productivity: An experimental study. European Journal of Operational Research 56 (2004): 698-711.

Allahverdi, A., Ng, C. T., Cheng, T. C. E., and Kovalyov, M. Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs. European Journal of Operational Research 187 (2008): 985-1032.

Andres, C., Miralles, C., and Pastor, R. Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. European Journal of Operational Research 187(3) (2006): 1212-1223.

Arcus, A. L. COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines. International Journal of Production Research 4(4) (1966): 259-277.

Baker, K. R. Introduction to Sequencing and Scheduling. Canada, John Wiley&Sons.

Balakrishnan, J., Cheng, C. H., Ho, K. C., and Yang, K. K. 2009. The application of single-pass heuristics for U-lines. Journal of Manufacturing Systems 28(1) (1974): 28-40.

Bard, J. Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. International Journal of Production Research 27(6) (1989): 1005-1018.

Bard, J. F., Dar-El, E., and Shtub, A. An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. International Journal of Production Research 30 (1992): 35-48.

Baybars, I. An Efficient Heuristic Method for the Simple Assembly Line Balancing Problem. International Journal of Production Research 24(1) (1986): 149-166.

Baybars, I. and Frieze, A. Expected behavior of line balancing heuristics. IMA Journal of Mathematics in Management 10 (1986): 304-335.

Baykasoglu, A. Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems. Journal of Intelligent Manufacturing 17 (2006): 217-232.

Baykasoglu, A. and Dereli, T. Simple and U-type assembly line balancing by using an ant colony based algorithm. Mathematical and Computational Applications 14(1) (2009): 1-12.

Becker, C. and Scholl, A. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. European Journal of Operational Research 168 (2006):694-715.

Bhaskar, K. and Srinivasan, G. Static and dynamic operator allocation problems in cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research 35 (1997): 3467-3481.

Bowman, E. H. 1960. Assembly Line Balancing by Linear Programming. Operations Research 8(3) (1960): 385-389.

Boysen, N., Fliedner, M., and Scholl, A. A classification of assembly line balancing problems. European Journal of Operational Research 168 (2006): 694-715.

Bukchin, J., Dar-El, E. M., and Rubinovitz, J. Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. Computers & Industrial Engineering 41 (2002): 405-421.

Campbell, G. M. and Diaby, M. Development and evaluation of an assignment heuristic for allocating cross-trained workers. European Journal of Operational Research 138 (2002): 9-20.

Celano, G., Ficher, S., Grasso, V., La Commare, U., and Perrone, G. An evolutionary approach to multi-objective scheduling of mixed model assembly lines. Computers and Industrial Engineering 37(1-2) (1999): 69-73.

Cesani, V. I. and. Steudel, H. J. A study of labor assignment flexibility in cellular manufacturing systems. Computers and Industrial Engineering 48 (2005): 571-591.

Chen, H. G. A mixed integer programming model for operator cyclic walking pattern development in GT cells. Computers and Industrial Engineering 20 (1991):77-88.

Cheng, C. H., Miltenburg, J., and Motwani, J. The Effect of Straight- and UShaped Lines on Quality. IEEE Transactions on Engineering Management 47(3) (2000):321-334.

Chiang, W.-C. and Urban, T. L. The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure. European Journal of Operational Research 175 (2006): 1767-1781.

Chutima, P. and Pinkoompee, P. 2009. Multi-objective sequencing problems of mixed-model assembly systems using memetic algorithms. ScienceAsia 35 (2009): 295-305.

Cochran, J. and Horng, H. Dynamic dispatching rule-pairs for multitasking workers in JIT production systems. International Journal of Production Research 37(10) (1999): 2175-2190.

Coello Coello, C. A., Pulido, G. T. and Lechuga, M. S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization. IEEE Transations on Evolutionary Computation 8 (2004) : 256-279.

Dar-El, E. M. MALB-A heuristic technique for balancing large single-model assembly lines. AIIE Transactions 5(4) (1973): 343-356.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6(2) (2002): 182-197.

Deb, K., Sundar, J., Bhaskara, U. R. N., and Chaudhuri, S. Reference Point Based Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. International Journal of Computational Intelligence Research 2(3) (2006): 273-286.

Ebeling, A. and Lee, C. Cross-training effectiveness and profitability. International Journal of Production Research 32(12) (1994): 2843-2859.

Erel, E., Sabuncuoglu, I., and Aksu, B. A. Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. International Journal of Production Research 39 (2001): 3003-3015.

Ertay, T. and Ruan, D. Data envelopment analysis based decision model for optimal operator allocation in CMS. European Journal of Operational Research 164 (2005): 800-810.

Ghosh, S. and Gagnon, R. J. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. International Journal of Production Research 27 (1989): 637-670.

Guo, Z. X., Wong, W. K., Leung, S. Y. S., Fan, J. T., and Chan, S. F. Mathematical model and genetic optimization for the job shop scheduling problem in a mixed- and multi-product assembly environment: A case study based on the apparel industry. Computers & Industrial Engineering 50 (2006): 202-219.

Gupta, M., Gupta, Y., and Kumar, A. Minimizing flow time variance in single machine system using genetic algorithms. European Journal of Operational Research 70 (1993): 289-303.

Hackman, S. T., Magazine, M. J. and Wee, T. S. Fast, Effective Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problems. Operations Research 37(6) (1989):916-924.

Hoffmann, T. R. Assembly Line Balancing with a Precedence Matrix. Management Science 9(4) (1963): 551-562.

Hoogeveen, H. Multicriteria scheduling. European Journal of Operational Research 167(3) (2005): 592-623.

Hwang, R. K., Katayama, H., and Gen, M. U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. International Journal of Production Research 46(16) (2008): 4637-4649.

Hyun, C. J., Kim, Y., and Kim, Y. K. A GENETIC ALGORITHM FOR MULTIPLE OBJECTIVE SEQUENCING PROBLEMS IN MIXED MODEL ASSEMBLY LINES. Computers & Operations Research 25(7/8) (1998): 675-690.

Ishibuchi, H., Yoshida, T., and Murata, T. Balance Between Genetic Search and Local Search in Mematic Algorithms for Multiobjective Permutation Flowshop Scheduling. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 7(2) (2003): 204-223.

Kannan, V. R. and Jensen, J. B. Learning and labor assignment in a dual resource constrained cellular shop. International Journal of Production Research 42 (7) (2004): 1455-1470.

Kara, Y Line balancing and model sequencing to reduce work overload in mixed-model U-line production environments. Engineering Optimization 40(7) (. 2008): 669-684.

Kara, Y., Ozcan, U., and Peker, A. An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 32 (2007): 1218-1231.

Kara, Y., Ozcan, U., and Peker, A. Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives. Applied Mathematics and Computation 184 (2007): 566-588.

Kelner, V., Capitanescu, F., Leonard, O., and Wehenkel, L. A hybrid optimization technique coupling an evolutionary and a local search algorithm. Journal of Computational and Applied Mathematics 215 (2008): 448-456.

Kilbridge, M. D. and Wester, L. A Heuristic Method of Assembly Line Balancing. Journal of Industrial Engineering 12(4) (1961): 292-298.

Kilbridge, M. D. and Wester, L. A review of analytical systems of line balancing. Operations Research 10(5) (1962): 626-638.

Kim, Y. K., Kim, S. J., and Kim, J. Y. Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. Production Planning and Control 11(8) (2000): 754-764.

Kim, Y. K., Kim, Y. J., and Kim, Y. GENETIC ALGORITHMS FOR ASSEMBLY LINE BALANCING WITH VARIOUS OBJECTIVES. Computers & Industrial Engineering 30(3) (1996): 397-409.

Kim, Y. K., Kim, Y. J., and Kim, Y. An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. European Journal of Operational Research 168 (2006): 838-852.

Konno, H. and Yamazaki, H. Mean-Absolute Deviation Portfolio Optimization Model and Its Applications to Tokyo Stock Market. Management Science 39 (1992): 519-531.

Konak, A., Coit, D. W., and Smith, A. E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability Engineering and System Safety 91 (2006): 992-1007.

Koza, J. R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Cambridge, MA (1992): MIT Press.

Kriengkorakot, N. and Pianthong, N. The Assembly Line Balancing Problem: Review articles. KKU Engineering Journal 34(2) (2007): 133-140.

Kumar, R. and Singh, P. K. Pareto Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search for Biobjective TSP. Computational Intelligence (SCI) 75 (2007): 361-398.

Kuo, Y. and Yang, T. Optimization of mixed-skill multi-line operator allocation problem. Computers and Industrial Engineering 53 (2007): 386-393.

Lalsare, P. and Sen, S. Evaluating backward scheduling and sequencing rules for an assembly shop environment. Production and Inventory Management 36(4) (1995): 72-78.

Lee, C. and Vairaktarakis, G.. Workforce planning in mixed model assembly systems. Operations Research 45(4) (1997): 553-567.

Leu, Y. Y., Matheson, L. A., and Rees, L. P. Assembly line balancing using genetic algorithms with heuristic generated initial populations and multiple criteria. Decision Sciences 15 (1994): 581-606.

Liu, S. B., Ong, H. L., and Huang, H. C. Two bi-directional heuristics for the assembly line type II problem. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 22 (2003): 656-661.

Liu, S. B., Ong, H. L., and Huang, H. C. A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 25 (2005): 71-77.

Loukil, T., Teghem, J., and Tuyttens, D. Solving multi-objective production scheduling problems using metaheuristics. European Journal of Operational Research 161(1) (2005): 42-61.

Lu, H. and Yen, G. Rank-Density-Based Multiobjective Genetic Algorithm and Benchmark Test Function Study. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 7(4) (2003): 325-343.

Luthi, H. and Polymeris, A. Scheduling to Minimize Maximum Workload. Management Science 31(11) (1985): 1409-1415.

Mansouri, S. A. A Multi-Objective Genetic Algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. European Journal of Operational Research 167 (2005): 696-716.

Mantazeri, M. and Van Wassenhove, L. N. Analysis of scheduling rules for an FMS. International Journal of Production Research 28(4) (1990): 785-802.

McMullen, P. R.. JIT sequencing for mixed-model assembly lines with setups using Tabu search. Production Planning and Control 9(5) (1998): 504-510.

Merengo, C., Nava, F., and Pozzetti, A.. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. International Journal of Production Research 37(12) (1999): 2835-2860.

Miltenburg, J. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. European Journal of Operational Research 109 (1998): 1-23.

Miltenburg, J. One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: a tutorial. IIE Transactions 33 (2001): 303-321.

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

Miltenburg, J. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 14(2) (2002): 119- 151.

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

Montazeri, M. and Van Wassenhove, L. N. Analysis of Scheduling Rules for a FMS. International Journal of Production Research 28(4) (1990): 785-802.

Nakade, K. and Nishiwaki, R. Optimal allocation of heterogeneous workers in a U-shaped production line. Computers & Industrial Engineering 54 (2008): 432-440.

Nakade, K. and Ohno, K. Reversibility and dependence in a U-shaped production line. Queueing Systems 21 (1995): 183-197.

Nakade, K. and Ohno, K. Stochastic Analysis of a U-shaped Production Line with Multiple Workers. Computers and Industrial Engineering 3-4 (1997): 809- 812.

Nakade, K. and Ohno, K. An optimal worker allocation problem for a U-shaped production line. International Journal of Production Economics 60-61 (1999): 353-358.

Nakade, K. and Ohno, K. Separate and carousel type allocations of workers in a U-shaped production line. European Journal of Operational Research 145 (2003): 403-424.

Nakade, K., Ohno, K. and Shanthikumar, G. Bounds and approximations for cycle times of a U-shaped production line. Operations Research Letters 21 (1997): 191-200.

Noorul Haq, A., Jayaprakash, J., and Rengarajan, K.. A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 28 (2006): 337-341.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Nussbaum, M., Sepulveda, M., and Laval, E. An architecture for solving sequencing and resource allocation problems using approximation methods. Journal of the Operational Research Society 49 (1998): 52-65.

Ohno, K. and Nakade, K. ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF A USHAPED PRODUCTION LINE. Journal of the Operations Research Society of Japan 40(1) (1997): 90-104.

Poli, R., Kennedy, J., and Blackwell, T. Particle swarm optimization: an overview. Swarm Intelligence 1(1) (2007): 33-57.

Ponnambalam, S. G., Aravindan P., and Rao, M. S. Genetic algorithms for sequencing problems in mixed model assembly lines. Computers & Industrial Engineering 45 (2003): 669-690.

Prajogo, N. H. and Johnston, R. B. A Barriers Framework for Understanding Just-In-Time Implementation in Small Manufacturing Enterprises. Asia Pacific Management Journal 6(2) (2001): 175-195.

Prasad, P. and Maravelias, C. T. Batch selection, assignment and sequencing in multi-stage multi-product processes. Computers and Chemical Engineering 32 (2008): 1106-1119.

Rahimi-Vahed, A. R. A hybrid multi-objective shuffled frog-leaping algorithm for a mixed-model assembly line sequencing problem. Computers & Industrial Engineering 53 (2007): 642-666.

Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A. and Bratcu, A. State of art of optimization methods for assembly line design. Annual Reviews in Control 26 (2002): 163-174.

Reyes-Sierra, M. and Coello, C. A. C. Multi-objective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-art. International Journal of Computational Intelligence Research 2(3) (2006): 287-308.

Salman, A., Ahmad, I., and Al-Madani, S. Particle swarm optimization for task assignment problem. Microprocessors and Microsystems 26 (2002): 363-371.

Salveson, M. E. The Assembly Line Balancing Problem. Journal of Industrial Engineering 6(3) (1955): 18-25.

Sarker, R., Liang, K.-H., and Newton, C. A new multiobjective evolutionary algorithm. European Journal of Operational Research 140 (2002): 12-23.

Scholl, A. and Becker, C. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. European Journal of Operational Research 168 (2006): 666-693.

Scholl, A. and Klein, R. ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. International Journal of Production Research 37 (1999): 721-736.

Scholl, A., Klein, R., and Domschke, W. Pattern based vocabulary building for ffectively sequencing mixed model assembly lines. Journal of Heuristics 4(4) (1998): 359-381.

Scholl, A. and Voss, S. Simple assembly line balancing-heuristic approaches. Journal of Heuristics 2 (1996): 217-244.

Schrage, L. E. and Baker, K. R. Dynamic programming solution of sequencing problems with precedence constraints. Operations Research 26 (1978): 444-449.

Shewchuk, J. P. Worker allocation in lean U-shaped production lines. International Journal of Production Research 46(13) (2008): 3485-3502.

Simaria, A. S. and Vilarinho, P. M. A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. Computers and Industrial Engineering 47 (2004): 391-407.

Sirovetnukul, R. and Chutima, P. The Impact of Walking Time on U-shaped Assembly Line Worker Allocation Problems. Engineering Jounal 14(2) (2010.): 53-78.

Solimanpur, M., Vrat, P., and Shankar, R. A multi-objective genetic algorithm approach to the design of cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research 7 (2004): 1419-1441.

Song, B. L., Wong, W. K., Fan, J. T., and Chan, S. F. A recursive operator allocation approach for assembly line-balancing optimization problem with the consideration of operator efficiency. Computers and Industrial Engineering 51 (2006): 585-608.

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

Sprecher, A.. A competitive branch-and-bound algorithm for the simple assembly line balancing problem. International Journal of Production Research 37(8) (1999): 1787-1816.

Srinivas, N. and Deb, K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. Evolutionary Computation 2(3) (1994): 221-248.

Steiner, G. and Yeomans, S. Level schedules for mixed-model just-in-time processes. Management Science 39(6) (1993): 728-735.

Suresh, G. and Sahu, S. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. International Journal of Production Research 32(8) (1994): 1801-1810.

Taboada, H. A. and Coit, D. W. MOEA-DAP: A New Multiple Objective Evolutionary Algorithm for Solving Design Allocation Problems. IEEE Transactions on Reliability 57(1) (2008): 182-191.

Talbot, F. B., Patterson, J. H., and Gehrlein, W. V. A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. Management Science 32(4) (1986): 430-454.

Tavakkoli-Moghaddam, R. and Rahimi-Vahed, A. R. Multi-criteria sequencing problem for a mixed-model assembly line in a JIT production system. Applied Mathematics and Computation 181 (2006): 1471-1481.

Thomopoulos, N. T. Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. Management Science 14(2) (1967): B59-B75.

Thomopoulos, N. T. Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments. Management Science 16(9) (1970): 593-603.

Tseng, C. T. and Liao, C. J. A discrete particle swarm optimization for lotstreaming flowshop scheduling problem. Europeon Journal of Operational Research 191 (2008): 360-373.

Urban, T. L. Note. Optimal Balancing of U-shaped Assembly Lines. Management Science 44(5) (1998): 738-741.

Van Assche, F. and Herroelen, W. S. An Optimal Procedure for the Single- Model Deterministic Assembly Line Balancing Problem. European Journal of Operations Research 3 (1978): 142-149.

Vembu, S. and Srinivasan, G. HEURISTIC FOR OPERATOR ALLOCATION AND SEQUENCING IN JUST-IN-TIME FLOW LINE MANUFACTURING CELL. Computers and Industrial Engineering 29(1-4) (1995): 309-313.

Vembu, S. and Srinivasan, G. HEURISTICS FOR OPERATOR ALLOCATION AND SEQUENCING IN PRODUCT-LINE-CELLS WITH MANUALLY OPERATED MACHINES. Computers & Industrial Engineering 32(2) (1997): 265-279.

Venugopal, V. and Narendran, T. T. A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives. Computers and Industrial Engineering 22(4) (1992): 469-480.

Yano, C. and Rachamadugu, R. Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. Management Science 37(5) (1991): 572-586.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างผลการทดลอง

<u>ตัวอย่างผลการทดลองด้วย COMSOAL ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular</u>

7 tasks

Merten_7task_cycle7_3:3:1

TS_task_minWS =

6	3	7	4	1	2	5
3	7	4	1	2	5	6
3	6	5	7	4	1	2
7	4	1	2	5	6	3
7	6	3	5	2	4	1

position =

2	2	2	2	1	1	1
2	2	2	1	1	1	1
2	2	2	2	2	1	1
2	2	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

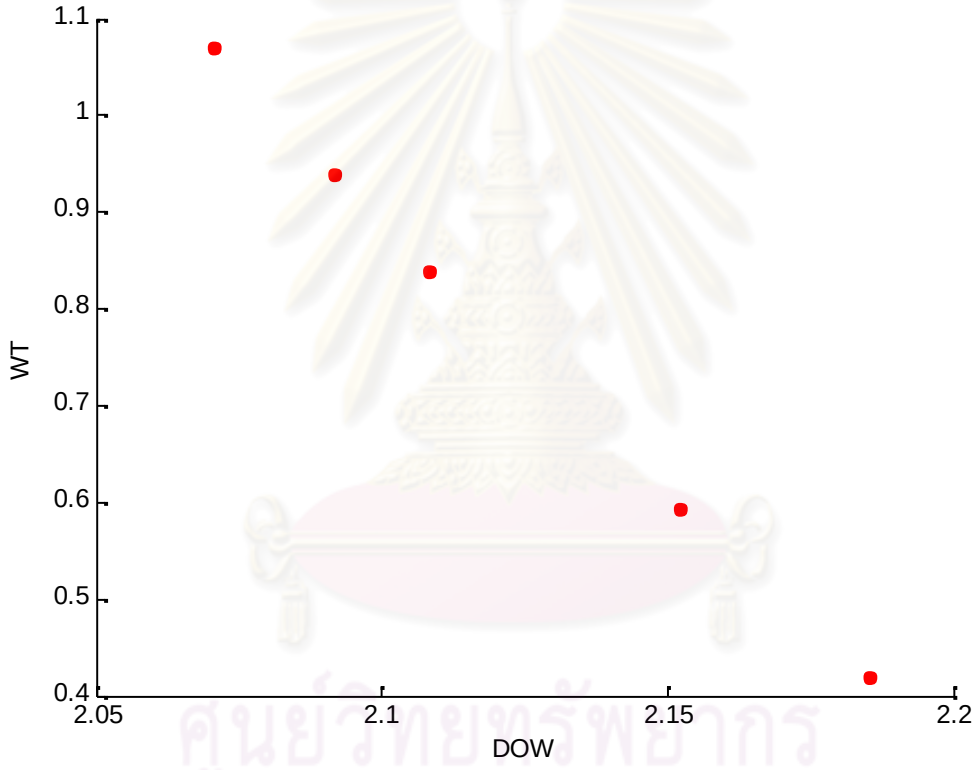
WT_DOW_J =

2.0705	1.0708	6.0000
2.0915	0.9392	6.0000
2.1081	0.8400	6.0000
2.1521	0.5940	6.0000
2.1854	0.4200	6.0000

Define_Station =

1	2	3	4	4	5	6
1	2	3	3	4	5	6
1	2	3	4	5	5	6
1	2	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	6

Elapsed time is 223.898874 seconds.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างผลการทดลองด้วย NSGA-II ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

10 tasks

Miltenburg_10task_cycle10_4:4:2

TS_task_minWS =

8	4	2	10	5	1	6	7	3	9
7	3	8	6	10	5	2	4	1	9

8	7	3	5	2	9	6	1	10	4
6	2	7	3	4	10	5	1	8	9
7	9	3	8	4	10	5	2	6	1
4	3	1	2	7	9	10	8	6	5
8	4	1	5	9	2	6	3	10	7
6	1	7	4	3	2	5	8	10	9
9	1	8	2	6	4	3	10	5	7
3	4	10	1	5	2	6	8	7	9
8	3	9	2	5	4	1	10	6	7
1	9	8	5	7	2	6	4	3	10
3	7	4	1	6	5	2	9	8	10
4	3	7	5	6	9	10	8	2	1
6	7	5	3	4	9	10	8	2	1

position =

1	1	1	2	1	2	1	1	1	1
1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
1	2	1	1	1	2	1	1	1	1
1	1	1	1	1	2	2	1	1	1
1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	2	1	1
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WT_DOW_J =

2.3569	2.8490	4.0000
2.4393	2.4108	4.0000
2.4599	2.3100	4.0000
2.4705	2.2918	4.0000
2.5208	2.1434	4.0000
2.5398	2.0314	4.0000
2.5596	2.0202	4.0000
2.5836	1.9600	4.0000
2.5868	1.9222	4.0000
2.5971	1.8536	4.0000
2.6208	1.7542	4.0000
2.6602	1.6730	4.0000
2.6869	1.5176	4.0000
2.6983	1.4994	4.0000
2.7246	1.4812	4.0000

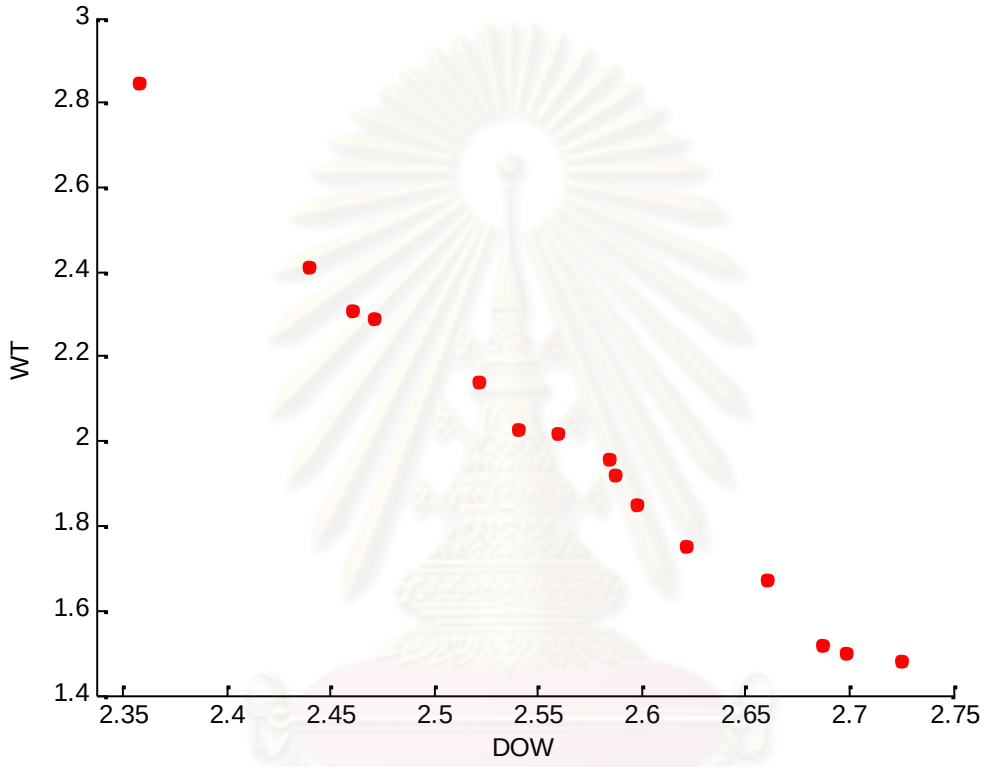
Define_Station =

1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
1	1	2	2	2	3	3	4	4	4
1	1	1	2	2	2	3	3	4	4
1	1	1	2	2	3	3	3	4	4
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
1	1	2	2	2	3	3	4	4	4
1	1	1	2	2	3	3	3	4	4
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
1	1	1	2	2	3	3	3	4	4
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1	1	1	2	2	3	3	4	4	4
1	1	1	2	2	3	3	3	4	4
1	1	2	2	2	3	3	3	4	4

Elapsed time is 2711.902717 seconds.



11 tasks

Jackson_11task_cycle7_4:4:3

TS_task_minWS =

11	10	8	1	5	6	3	9	7	2	4
1	11	10	9	8	5	6	4	2	7	3
11	1	4	10	8	5	6	9	7	2	3
1	11	10	8	9	5	6	3	4	7	2
1	11	10	9	8	3	6	5	7	2	4
1	4	11	10	8	6	5	9	3	2	7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11	1	4	3	10	8	6	5	7	2	9
11	9	1	3	10	8	6	5	4	2	7
1	3	11	9	4	10	8	6	5	2	7
11	1	2	6	3	8	9	7	5	4	10
11	9	7	5	10	4	1	8	6	2	3
11	1	4	3	2	6	9	7	5	10	8
11	9	10	8	6	2	1	4	5	7	3
11	9	10	1	4	3	2	6	7	5	8
11	9	7	5	4	10	8	1	2	6	3
11	10	9	8	6	2	1	4	3	7	5
11	10	8	6	2	1	3	4	5	7	9

position =

2	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1
1	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1
2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1
1	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1
1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1
1	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1
2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1
1	1	2	2	1	2	2	2	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1
2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1
2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1
2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1

WT_DOW_J =

1.6462	4.3596	9.0000
1.6501	4.3008	9.0000
1.6754	3.9816	9.0000
1.6799	3.8136	9.0000
1.6946	3.7800	9.0000
1.7048	3.4944	9.0000
1.7171	3.3600	9.0000
1.7237	3.2928	9.0000
1.7575	2.9820	9.0000
1.7998	2.6208	9.0000
1.8076	2.5200	9.0000
1.8337	2.3772	9.0000
1.8398	2.1672	9.0000
1.8731	1.9236	9.0000
1.8954	1.6800	9.0000
1.9277	1.4364	9.0000
1.9594	1.1928	9.0000

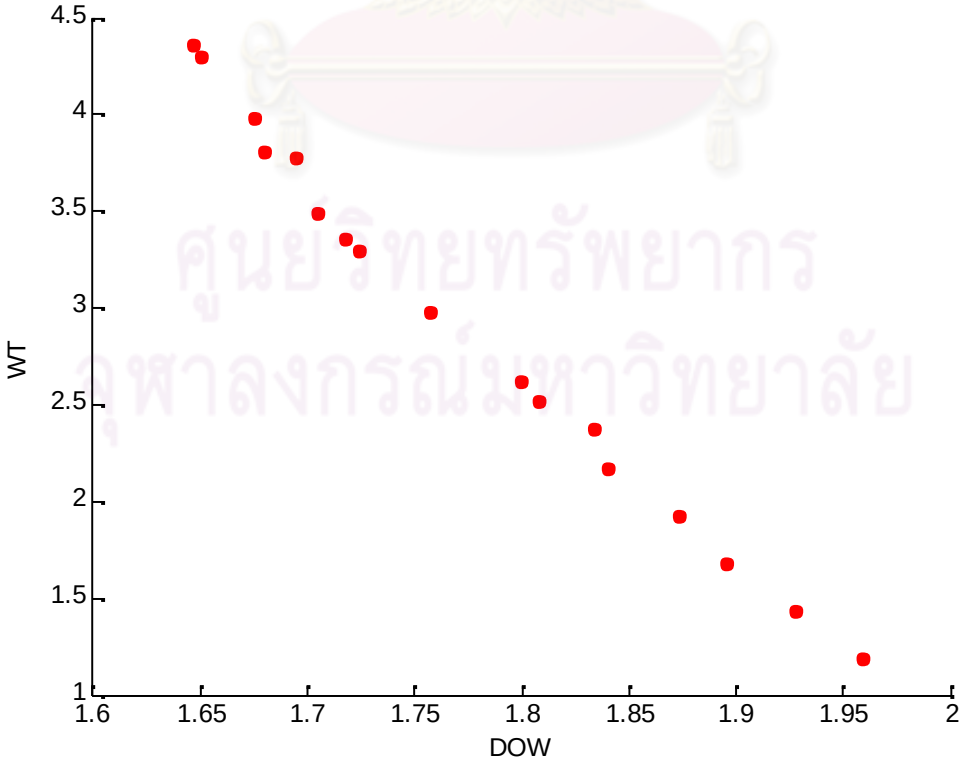
Define_Station =

1	2	3	4	5	5	6	7	8	8	9
1	2	3	4	5	6	6	7	8	8	9
1	2	3	4	5	6	6	7	8	8	9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	9
1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9
1	2	3	4	5	6	6	7	8	9	9
1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9
1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	9
1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	9
1	2	3	3	4	5	6	7	7	8	9
1	2	3	3	4	5	6	7	8	8	9
1	2	3	4	5	5	6	7	7	8	9
1	2	3	4	5	5	6	7	8	8	9
1	2	3	4	5	6	7	7	8	8	9
1	2	3	3	4	5	6	7	8	8	9
1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	9
1	2	3	4	4	5	6	7	8	8	9

Elapsed time is 2324.631174 seconds.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

19 tasks

Thomopoulos_19task_cycle120_6:6:7

TS_task_minWS =

Columns 1 through 17

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

Columns 18 through 19

17	13
9	13
19	16
12	11
12	17
11	5
1	3
5	3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 10

15 19

18 9

11 14

position =

Columns 1 through 17

2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2

2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 2

1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2

2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1

1 1 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 2 1 2

2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 2 2 1

2 2 2 2 2 1 1 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2

2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1

Columns 18 through 19

2 1

1 1

1 1

1 1

1 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 1

1 1

1 1

1 1

1 1

1 1

1 1

WT_DOW_J =

5.7170 163.4268 5.0000

6.8085 160.3289 5.0000

7.4435 154.6300 5.0000

7.5168 153.6773 5.0000

12.8303 133.1002 5.0000

13.1913 125.0797 5.0000

14.0443 120.9540 5.0000

15.2248 113.3620 5.0000

17.1428 111.3359 5.0000

17.4445 108.0596 5.0000

17.7075 105.1481 5.0000

20.0874 104.0367 5.0000

Define_Station =

Columns 1 through 17

1 1 2 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 5 5 5 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

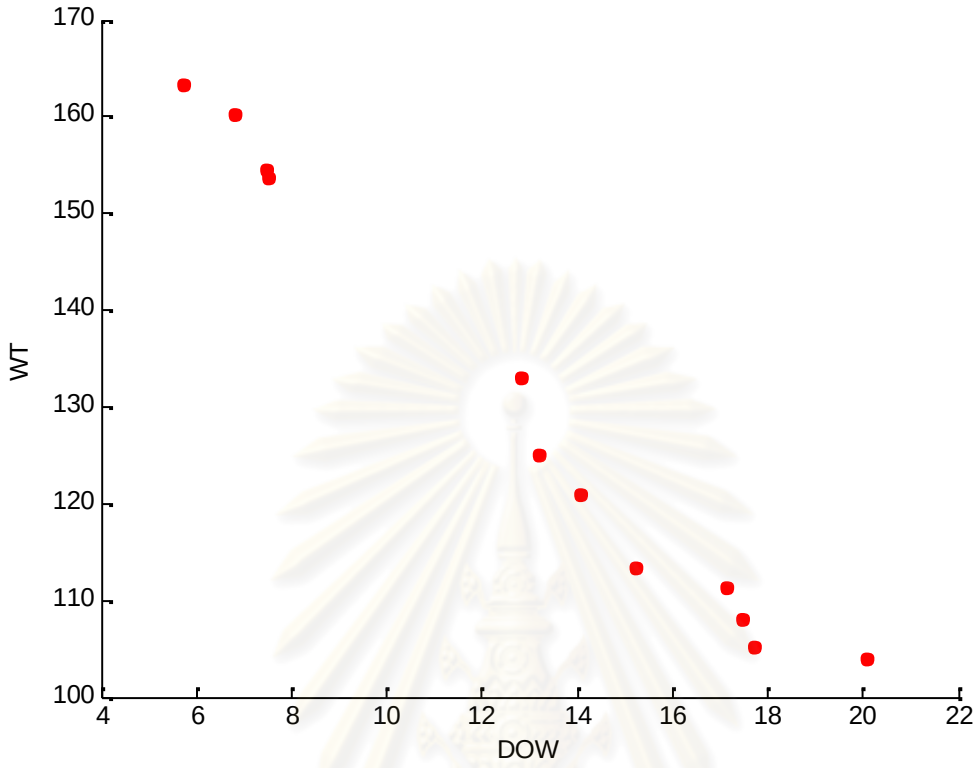
1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5
1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	5
1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5
1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	5
1	1	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5
1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5
1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5
1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5
1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5
1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5

Columns 18 through 19

5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5
5	5

Elapsed time is 4556.505591 seconds.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตัวอย่างผลการทดลองด้วย M-NSGA-II ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

28 tasks

Heskiaoff_28task_cycle138_9:9:10

WT_DOW =

13.9529	106.1965	9.0000
14.3253	106.1709	9.0000
14.5679	103.9122	9.0000
16.5615	82.7940	9.0000
17.2485	69.5400	9.0000
17.2720	68.2374	9.0000
17.5208	67.1076	9.0000
17.5801	67.0677	9.0000
17.6364	67.0521	9.0000
17.6626	66.8770	9.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
   17.9558   66.0355    9.0000
   18.2835   65.9473    9.0000
   18.3698   65.2519    9.0000
   18.5628   64.6784    9.0000
   19.2104   63.4884    9.0000
   19.2960   63.1079    9.0000
   20.4487   62.6526    9.0000
   20.6616   62.2760    9.0000
   29.7192   62.2352   10.0000
   29.8945   61.8599   10.0000
   29.9312   61.8020   10.0000
   29.9955   61.1632   10.0000
   30.1757   61.0184   10.0000
   30.4075   60.8748   10.0000
   31.0850   60.0912   10.0000
   31.2975   59.4479   10.0000
   33.5611   59.2175   10.0000
   33.6088   58.9926   10.0000
   40.3853   58.3761   10.0000
   41.1131   57.6435   11.0000
   41.6451   56.4312   11.0000
   42.6164   55.3326   11.0000
   45.7249   55.3165   11.0000
   52.6508   53.8953   12.0000
   53.7104   53.1999   12.0000
   54.6576   52.7446   12.0000
TS_task_minWS =
  Columns 1 through 18
    1    8   26   23    3   24   22    9   19    5   10   11   15   27   25   21   28   18
    1    3   26   23   22    5   19    8    9   10   11   15   27   24   25   21   28   18
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1	3	22	5	19	8	9	10	11	15	23	26	27	24	25	21	28	18	
1	3	19	2	21	8	6	7	18	20	9	4	23	26	27	10	12	11	
1	22	3	8	23	21	26	27	24	25	4	19	20	9	10	11	15	12	
1	21	23	24	3	8	22	26	25	27	4	19	20	9	10	11	15	12	
1	19	20	22	3	5	24	23	8	9	10	12	11	26	27	4	21	25	
1	22	23	3	8	5	24	9	10	11	12	26	27	4	21	25	19	20	
1	19	20	22	3	24	8	9	10	11	15	23	4	5	26	27	21	25	
1	19	21	20	5	4	24	3	22	8	9	10	11	15	23	25	26	27	
1	19	20	22	5	4	24	3	26	23	8	9	10	11	15	21	25	27	
1	19	21	23	8	24	3	22	4	5	20	25	26	27	9	10	11	12	
1	19	21	23	3	8	24	4	22	26	5	20	25	27	9	10	11	12	
2	6	7	17	18	1	5	4	22	21	23	8	3	24	25	26	27	9	
2	6	7	17	18	1	8	3	22	9	21	4	23	5	24	25	26	27	
2	6	7	28	16	3	25	22	21	23	27	5	14	24	26	4	20	19	
2	6	7	28	3	25	22	21	23	27	16	14	5	24	26	4	20	19	
2	6	7	17	28	14	25	22	21	4	27	24	16	5	3	26	23	20	

Columns 19 through 28

17	7	6	4	20	12	13	14	2	16
7	17	6	4	20	12	13	2	14	16
7	17	6	4	20	12	13	2	14	16
15	22	28	14	5	25	17	24	13	16
13	14	5	2	17	6	7	18	28	16
13	14	5	2	17	6	7	18	28	16
13	16	14	2	17	6	7	18	28	15
13	16	14	2	17	6	7	18	28	15
12	13	14	2	17	6	7	18	28	16
2	6	7	18	12	17	13	16	14	28
2	6	7	18	12	17	13	16	14	28
13	16	14	2	6	17	7	18	15	28
13	16	14	2	6	17	7	18	15	28

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

10 11 12 15 19 20 13 16 28 14

10 12 11 15 19 20 13 16 28 14

18 17 1 8 9 10 12 11 13 15

18 17 1 8 9 10 11 12 13 15

19 13 12 1 8 9 10 11 18 15

position =

Columns 1 through 18

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2

Columns 19 through 28

2 2 2 1 1 1 1 1 1 1

2 2 2 1 1 1 1 1 1 1

2 2 2 1 1 1 1 1 1 1

1 1 2 2 1 2 1 1 1 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     1     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     1     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     1     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     1     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     2     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     1     1
     1     1     1     1     1     1     1     1     1     1
     2     2     2     1     1     1     1     1     1     1
WT_DOW_J =
   13.9529  106.1965    9.0000
   14.3253  106.1709    9.0000
   14.5679  103.9122    9.0000
   16.5615   82.7940    9.0000
   17.2485   69.5400    9.0000
   17.2720   68.2374    9.0000
   17.5208   67.1076    9.0000
   17.5801   67.0677    9.0000
   17.6364   67.0521    9.0000
   17.6626   66.8770    9.0000
   17.9558   66.0355    9.0000
   18.2835   65.9473    9.0000
   18.3698   65.2519    9.0000
   18.5628   64.6784    9.0000
   19.2104   63.4884    9.0000
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

19.2960 63.1079 9.0000

20.4487 62.6526 9.0000

20.6616 62.2760 9.0000

Define_Station =

Columns 1 through 18

1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5
1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	4	4	5	5	5
1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5	5
1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5
1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	5	5	5	5	6
1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	5	5	6
1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5
1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5
1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5
1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5
1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5	5	5
1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	6	6
1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5
1	1	1	2	3	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6

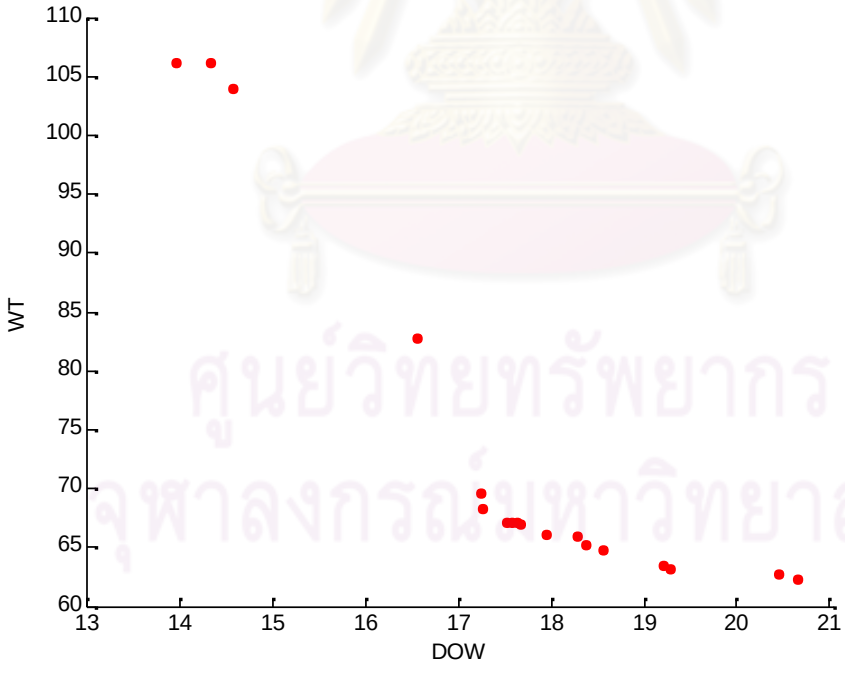
Columns 19 through 28

6	6	7	7	7	8	8	9	9	9
6	6	7	7	7	8	8	9	9	9
6	6	7	7	7	8	8	9	9	9
5	5	6	6	7	7	8	8	9	9
6	7	7	7	8	8	9	9	9	9
6	7	7	7	8	8	9	9	9	9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6	6	7	7	8	8	9	9	9	9
6	6	7	7	8	8	9	9	9	9
6	6	7	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	7	8	8	9	9
6	6	6	6	7	7	8	8	9	9
6	6	7	7	8	8	9	9	9	9
6	6	7	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	7	7	7	8	8	9	9
6	6	6	6	7	7	8	8	9	9
6	6	7	7	8	8	8	8	9	9
6	6	7	7	8	8	8	8	9	9
6	7	7	8	8	9	9	9	9	9

Elapsed time is 4322.047000 seconds.



45 tasks

Kilbridge&Wester_45task_cycle57_15:15:15

WT_DOW =

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2314	130.0924	13.0000
5.3248	128.8677	13.0000
6.7486	116.4503	13.0000
6.8824	115.1406	13.0000
7.0152	114.2945	13.0000
7.3550	113.9159	13.0000
10.5608	111.9243	14.0000
10.9090	109.3898	14.0000
11.5826	108.8132	14.0000
11.6783	108.6906	14.0000
14.3442	108.2443	15.0000
14.3887	106.8764	15.0000
14.4102	106.7877	15.0000
14.6812	106.5559	15.0000
14.8925	105.7098	15.0000
16.3437	105.1332	15.0000
17.2519	105.0106	15.0000
17.4005	103.4864	16.0000
17.4420	103.2545	16.0000
17.8959	103.1706	16.0000
17.9220	102.8177	16.0000
18.1122	102.0298	16.0000
19.1787	101.8319	16.0000
19.4764	101.3306	16.0000
19.9473	100.8995	16.0000
20.6480	99.1959	17.0000
20.9147	98.3498	17.0000
21.4975	98.1519	17.0000
21.9940	97.9712	17.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

22.2645 97.6506 17.0000
22.6352 97.2195 17.0000
23.1070 96.8256 18.0000
23.1240 95.4577 18.0000
23.6468 94.6698 18.0000
24.7868 94.4719 18.0000
24.8908 94.2912 18.0000
25.0783 92.1564 19.0000
25.4290 91.7777 19.0000
26.0253 91.5797 19.0000
26.2010 90.7919 19.0000
26.2817 89.9120 19.0000
27.0461 89.4809 19.0000
27.6037 88.1559 20.0000
28.0852 87.3098 20.0000
28.4192 86.9674 20.0000
28.6623 86.9312 20.0000
28.6684 86.7332 20.0000
29.4054 85.8009 20.0000
29.5490 85.6424 21.0000
29.5636 84.7077 21.0000
29.6970 84.4759 21.0000
29.9908 83.7767 21.0000
30.4399 82.5520 21.0000
31.0296 80.7377 22.0000
31.5058 79.9498 22.0000
31.7888 79.5712 22.0000
32.1652 78.4256 23.0000
32.5357 77.0577 23.0000
32.8124 76.4167 23.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

33.6898 76.2021 24.0000

34.2863 74.5185 24.0000

34.6191 72.7367 24.0000

34.8629 72.5898 24.0000

35.2223 70.3664 25.0000

35.2298 69.0567 25.0000

TS_task_minWS =

Columns 1 through 21

1 11 2 7 8 12 37 4 6 10 3 5 9 13 14 25 15 16 17 32 31

11 1 7 2 8 12 37 4 6 10 3 5 9 13 14 25 29 15 18 16 30

1 11 12 13 2 8 7 37 14 25 17 32 30 26 4 6 10 3 5 9 15

11 1 2 7 8 12 37 4 6 10 3 5 9 13 14 32 15 24 16 17 31

12 1 7 37 3 5 9 2 4 6 8 10 11 13 15 16 18 14 25 17 32

12 1 11 2 8 7 37 13 15 24 16 4 6 10 18 19 20 3 5 9 21

Columns 22 through 42

27 18 19 20 21 22 26 23 24 33 34 36 28 30 38 43 35 40 45 44 42

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

23 17 26 27 32 24 31 19 33 34 36 20 21 22 35 28 38
40 45 43 44

16 18 19 20 21 22 23 24 27 33 36 34 43 29 31 35 45
44 42 41 40

30 18 19 20 21 25 26 22 23 27 33 34 36 29 43 35 45
44 42 41 40

30 26 19 20 21 22 23 24 27 33 36 34 43 29 31 35 45
44 42 41 40

22 14 17 32 30 25 26 23 27 33 34 35 43 29 31 36 45
44 42 41 40

Columns 43 through 45

41 29 39
42 41 39
38 28 39
38 28 39
38 28 39
38 28 39

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

position =

Columns 1 through 21

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1

Columns 22 through 42

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2
2
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1
2
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2
2
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2
2
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2
2
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2
2

Columns 43 through 45

2 1 1
2 2 1
2 1 1
2 1 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 1 1

2 1 1

WT_DOW_J =

5.2314 130.0924 13.0000

5.3248 128.8677 13.0000

6.7486 116.4503 13.0000

6.8824 115.1406 13.0000

7.0152 114.2945 13.0000

7.3550 113.9159 13.0000

Define_Station =

Columns 1 through 21

1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 6 6 6 7
7

1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 6 6 6 6
6

1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 4 5 5 5 6 6
6

1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 5 6 6 7
7

1 1 1 1 2 2 2 3 3 3 4 4 4 5 5 5 5 6 6 7
7

1 1 1 1 2 2 2 2 3 3 4 4 4 5 5 5 5 5 6 6
7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Columns 22 through 42

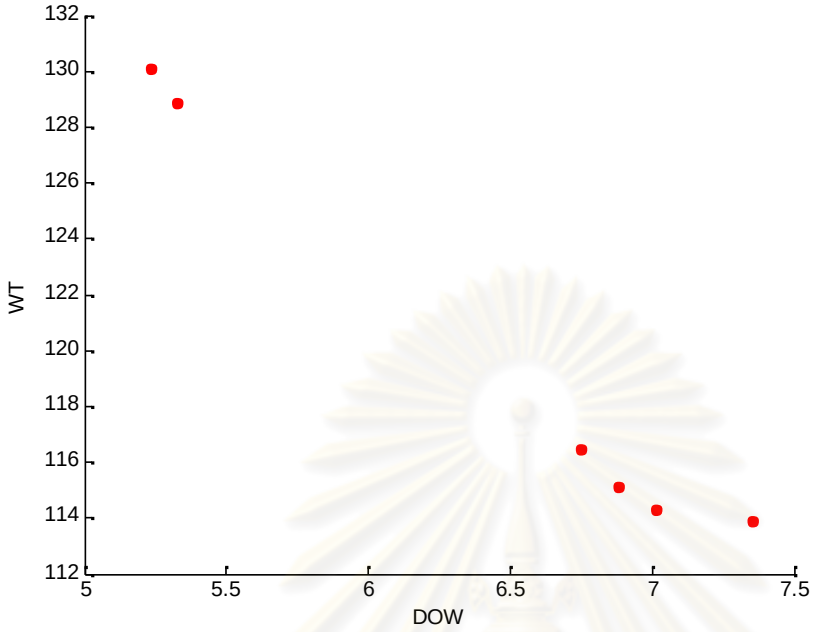
```
   7   7   7   7   8   9   9   9  10  10  10  11  11  11  11  12  12  12
12  12  13
   7   7   7   8   8   8   8   9   9   9   9   9  10  11  11  11  12  12  12
12  13
   7   7   7   7   8   9   9  10  10  10  11  11  11  11  11  11  12  12
12  12  13
   7   7   7   7   8   9   9   9  10  10  10  11  11  11  11  11  12  12
12  12  13
   7   7   7   7   8   9   9  10  10  10  11  11  11  11  11  11  12  12
12  12  13
   8   8   8   9   9   9   9  10  10  10  11  11  11  11  11  11  12  12
12  12  13
```

Columns 43 through 45

```
   13  13  13
   13  13  13
   13  13  13
   13  13  13
   13  13  13
   13  13  13
```

Elapsed time is 4928.255384 seconds.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



61 tasks

Kim_61task_cycle600_20:20:21

WT_DOW =

1.0e+003 *

0.0284	1.0509	0.0110
0.0331	1.0223	0.0110
0.0341	0.9959	0.0110
0.0345	0.4276	0.0100
0.0361	0.4257	0.0100
0.0368	0.4231	0.0100
0.0862	0.4187	0.0110
0.0865	0.4173	0.0110
0.0890	0.4170	0.0110
0.0904	0.4161	0.0110

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.0957	0.4151	0.0110
0.1387	0.4098	0.0120
0.1457	0.4091	0.0120
0.1468	0.4081	0.0120
0.1503	0.4071	0.0120
0.1532	0.4056	0.0120

TS_task_minWS =

Columns 1 through 16

28	51	1	2	3	52	18	19	20	21	22	23	24	25	26	29
4	35	36	18	19	20	28	1	2	3	24	25	29	30	34	31
4	18	19	20	28	1	2	3	24	25	29	30	34	31	32	33

Columns 17 through 32

30	31	34	32	33	27	35	36	37	38	4	5	6	7	10	11
5	21	6	7	8	13	14	32	33	37	38	39	40	41	42	43
5	21	6	7	8	13	14	35	36	37	38	39	40	41	42	43

Columns 33 through 48

12	13	14	8	9	39	40	41	42	43	44	48	47	45	49	50
22	23	27	9	61	60	59	56	55	51	52	44	47	45	48	49
22	23	27	9	61	60	59	56	55	51	52	44	47	45	48	49

Columns 49 through 61

53 54 59 60 55 56 57 58 15 61 16 17 46

26 50 53 54 57 15 58 16 46 10 11 12 17

26 50 53 54 57 15 58 16 46 10 11 12 17

position =

Columns 1 through 16

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Columns 17 through 32

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Columns 33 through 48

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1

Columns 49 through 61

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WT_DOW_J =

34.4597	427.6204	10.0000
36.0884	425.6624	10.0000
36.8225	423.0834	10.0000

Define_Station =

Columns 1 through 16

1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3

Columns 17 through 32

3	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	6	6
3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6
3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6

Columns 33 through 48

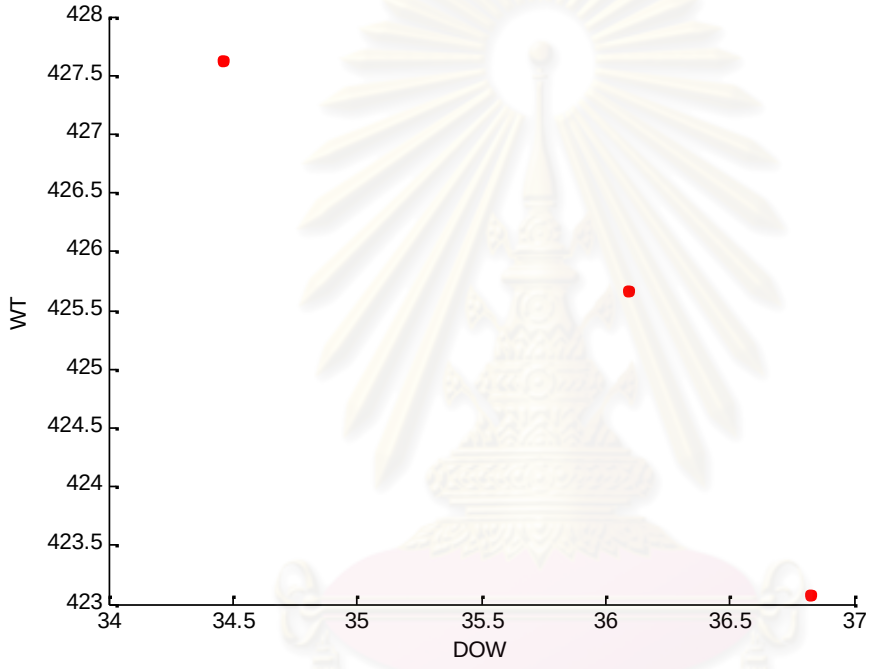
6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8
6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8

Columns 49 through 61

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8	8	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10
8	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10
8	9	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10

Elapsed time is 13079.118700 seconds.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างผลการทดลองด้วย COIN ในผังสายการประกอบแบบ Rectangular

70 tasks

Tongue_70task_cycle160_31:31:8

WT_DOW =

17.4780	417.3741	27.0000
18.1417	396.5127	27.0000

19.6941 377.0828 27.0000

20.4681 367.3877 27.0000

21.1519 362.8848 27.0000

21.2499 362.2660 27.0000

21.3387 349.3466 27.0000

21.3978 346.2916 27.0000

21.6947 327.1047 27.0000

22.1086 323.7714 27.0000

22.2173 318.0180 27.0000

22.4050 317.2821 27.0000

22.4605 289.7112 27.0000

23.1122 278.3264 27.0000

24.2301 256.0200 27.0000

25.6059 242.4068 27.0000

26.6449 214.0734 27.0000

27.5087 213.9941 27.0000

28.2338 212.5237 27.0000

29.0116 212.2074 27.0000

31.7883 209.0534 28.0000

34.0570 207.2668 28.0000

34.7016 206.1127 28.0000

37.3832 205.8200 29.0000

38.2535 204.0334 29.0000

38.2943 202.4837 29.0000

40.1409 202.2468 29.0000

42.1612 199.0134 30.0000

46.5199 197.5430 30.0000

46.9638 197.2268 30.0000

49.7457 195.7800 31.0000

55.6427 192.8393 31.0000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TS_task_minWS =

Columns 1 through 16

15	1	69	5	16	17	18	9	2	70	3	68	19	24	22	30
15	5	24	1	41	70	9	2	30	16	17	18	3	68	69	4
15	1	69	16	17	9	41	5	70	30	10	2	24	18	11	3
15	1	69	9	2	70	41	5	16	17	18	10	19	24	22	3
15	1	69	16	17	18	2	19	5	24	20	41	21	70	9	10
15	1	69	16	41	70	5	17	18	2	30	9	10	3	11	4
15	1	41	5	70	9	24	30	10	2	3	11	16	17	18	68
15	1	16	17	9	70	5	2	3	68	41	4	6	7	30	69
15	1	5	41	24	69	16	17	2	30	9	70	3	68	10	4
15	1	69	9	10	41	5	24	16	17	18	11	19	22	20	2
15	1	70	41	5	16	30	2	9	69	3	10	17	4	11	6
15	1	70	16	17	2	9	10	3	11	4	69	18	41	5	24
15	1	69	5	41	24	16	17	18	2	9	10	3	68	19	4
15	1	69	2	70	3	68	41	4	9	10	7	11	5	16	17
15	1	41	16	70	5	24	18	2	3	68	69	30	17	9	10
15	1	69	16	17	9	70	5	24	18	10	19	22	41	11	20
15	1	69	16	70	9	17	2	3	68	5	24	30	18	10	19
15	1	41	5	16	69	30	24	18	2	17	19	20	3	68	4
15	1	41	9	2	3	68	5	24	16	4	6	10	17	18	11
15	1	69	5	16	17	2	30	24	70	41	9	10	3	68	4

Columns 17 through 32

10	20	11	4	6	21	41	57	58	59	7	8	12	14	13	23

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6 7 8 10 19 20 21 11 22 57 58 59 12 13 14 23
68 19 4 6 57 22 20 58 7 8 12 59 13 21 14 23
68 57 4 6 7 30 8 11 58 20 21 59 12 13 14 23
3 57 11 58 59 30 4 6 7 22 68 8 12 14 13 23
6 24 7 19 68 22 57 8 12 58 20 21 14 59 13 23
4 6 7 8 12 19 14 13 57 69 22 20 58 21 23 31
18 10 19 24 22 20 11 57 8 12 14 13 58 21 23 59
6 7 8 11 12 14 13 18 19 20 21 57 22 23 31 33
70 30 3 68 4 6 57 58 7 8 12 14 13 59 21 23
7 24 18 8 12 14 19 13 57 68 58 59 22 20 21 23
68 19 22 20 7 57 30 21 6 58 8 12 59 13 14 23
6 7 8 30 11 20 21 70 22 57 12 14 13 23 31 33
18 30 24 19 22 20 6 57 58 8 12 13 14 59 21 23
19 4 20 11 22 57 58 59 7 21 6 8 12 13 14 23
21 57 2 30 3 68 4 6 7 8 12 58 14 13 23 59
20 21 11 4 6 57 41 22 7 8 12 14 13 58 59 23
6 21 70 9 22 10 57 11 7 8 12 14 13 23 31 33
69 30 7 8 12 14 19 20 21 57 13 58 22 23 33 34
6 11 7 18 8 12 14 13 19 22 57 20 21 58 59 23

Columns 33 through 48

31 33 34 25 27 32 26 28 29 35 48 49 61 36 53 51
31 33 34 25 27 32 26 28 29 35 44 60 53 51 45 61
31 33 34 25 28 29 27 32 26 35 56 60 53 36 44 51
31 33 34 25 29 26 28 32 27 35 44 53 62 45 63 64
31 33 34 25 27 32 26 28 29 35 48 56 60 36 37 49
31 33 34 25 26 28 29 27 32 35 36 37 60 53 38 61
33 34 25 26 28 29 59 32 27 35 60 53 51 61 62 56
25 31 33 34 28 29 27 32 26 35 53 51 48 49 60 36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

34	32	58	59	25	26	29	28	27	35	62	60	44	36	51	61
31	33	34	25	26	28	29	27	32	35	44	51	61	56	36	45
31	33	34	25	32	29	26	28	27	35	56	53	51	61	60	62
31	33	34	25	28	29	27	32	26	35	60	53	62	56	61	51
34	25	26	28	58	27	32	59	29	35	48	60	53	36	44	49
31	33	34	25	29	28	32	26	27	35	44	53	56	61	51	45
31	33	34	25	26	29	27	32	28	35	61	62	60	44	45	48
31	33	34	25	26	28	29	27	32	35	56	60	53	51	44	45
31	33	34	25	26	28	29	27	32	35	56	60	53	62	51	61
34	25	26	28	32	27	58	59	29	35	56	51	48	49	62	36
25	27	59	28	29	70	26	31	32	35	36	44	60	51	52	48
31	33	25	26	34	29	27	32	28	35	62	63	36	60	37	48

Columns 49 through 64

52	60	54	62	55	56	44	45	37	38	46	63	39	40	47	42
56	46	36	37	38	52	48	49	39	40	47	42	62	54	63	64
52	48	49	62	45	46	63	54	64	55	66	37	38	39	40	42
67	46	36	56	51	61	66	37	60	38	39	40	48	42	43	47
44	53	51	61	62	45	52	54	63	55	64	67	46	38	39	40
62	56	51	39	44	45	48	49	52	46	63	54	64	67	55	47
44	45	52	46	54	63	55	64	67	48	49	47	66	65	36	37
37	56	44	45	61	62	46	63	52	64	67	54	66	38	47	65
63	52	48	49	56	64	67	65	53	66	37	54	45	38	46	55
60	48	49	52	46	53	47	37	62	54	63	55	64	67	65	38
52	63	54	64	67	65	66	48	44	45	49	36	55	37	46	38
36	63	52	48	49	44	37	54	45	55	64	67	46	66	47	65
56	51	62	45	52	46	54	61	47	55	37	38	39	40	42	43
36	37	38	48	49	62	60	39	40	42	43	52	46	63	54	64
49	56	51	36	52	46	53	47	54	63	55	64	67	37	66	38

52	46	61	62	54	63	55	48	49	47	36	37	38	39	40	42
36	44	45	48	49	46	37	38	39	40	47	42	43	50	63	52
44	45	61	60	53	63	52	37	54	64	46	55	47	65	38	39
49	61	45	62	56	53	46	63	47	54	64	67	65	66	37	55
44	51	45	61	56	52	46	49	38	53	39	40	42	43	54	64

Columns 65 through 70

43	50	64	67	65	66
67	65	66	43	50	55
43	47	50	61	65	67
65	52	54	55	49	50
47	65	66	42	43	50
65	66	40	42	43	50
38	39	40	42	43	50
55	39	40	42	43	50
47	39	40	42	43	50
39	40	42	43	50	66
39	40	42	47	43	50
38	39	40	42	43	50
63	50	64	67	65	66
55	66	67	47	65	50
65	39	40	42	43	50
43	50	64	67	65	66
54	64	67	65	55	66
66	67	40	42	43	50
38	39	40	42	43	50
67	47	55	66	65	50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Station =

Columns 1 through 16

1 1 1 1 2 2 5 6 6 7 7 8 8 8 8 10

1 1 1 1 2 3 4 7 7 9 9 14 17 17 17 18

2 2 2 3 3 4 4 4 4 4 5 5 5 6 7 7

3 3 3 4 5 5 5 5 9 9 10 12 12 12 12 13

1 1 1 2 2 4 7 8 8 8 8 8 9 9 9 11

1 1 1 2 2 2 2 3 4 7 7 7 11 11 14 14

1 1 1 1 2 3 4 4 8 8 9 9 12 12 14 15

2 2 4 4 5 7 7 11 11 12 12 12 14 14 14 14

2 2 2 2 4 4 4 6 6 6 7 7 7 8 8 9

4 4 4 6 8 8 8 8 12 12 14 15 15 15 18 18

1 1 1 2 2 7 7 8 10 10 10 14 14 15 15 17

2 2 2 3 3 4 4 5 5 6 6 8 10 12 12 12

1 1 1 1 2 2 2 5 10 13 13 16 16 17 17 17

1 1 1 2 2 2 4 4 4 5 5 6 6 6 7 7

8 8 8 20 20 20 20 21 24 24 25 26 26 27 27 26

4 4 4 12 12 14 14 14 14 16 19 19 19 22 22 25

2 2 2 3 3 5 5 8 8 9 9 9 9 10 11 11

1 1 1 1 9 9 9 9 12 13 13 13 17 17 19 19

4 4 4 6 6 15 15 15 15 18 18 19 20 20 21 23

5 5 5 5 10 10 14 14 14 14 14 15 15 19 19 20

Columns 17 through 32

11 12 14 14 15 15 17 17 17 17 18 18 19 21 24 25

18 19 19 21 21 21 22 22 23 23 23 24 25 27 26 25

9 10 12 12 13 13 13 13 15 15 18 18 19 20 24 26

15	15	15	16	16	16	17	19	19	19	20	20	21	22	23	26
11	11	13	14	14	14	14	15	15	15	16	17	17	23	25	26
15	15	15	15	16	16	16	17	17	18	19	20	27	26	26	25
15	16	16	18	18	22	23	25	27	27	27	27	26	26	26	24
15	16	16	16	16	18	20	20	21	21	24	26	26	27	27	27
9	11	11	12	12	14	15	16	17	19	19	19	20	20	20	21
18	21	21	21	22	24	24	24	24	26	26	27	25	23	23	23
17	17	18	19	19	20	20	22	24	24	24	24	25	25	25	26
13	13	13	14	14	14	14	16	16	16	20	20	21	22	24	25
18	18	19	19	20	20	21	22	22	22	22	23	25	26	27	27
9	9	10	10	10	10	11	11	11	14	14	15	16	16	17	17
26	25	23	23	22	22	22	22	22	19	19	18	18	17	16	15
26	26	26	27	27	27	25	24	24	23	23	21	21	20	18	18
11	12	12	13	13	14	14	14	14	15	15	17	18	18	21	21
20	20	21	21	21	23	23	24	24	26	26	27	25	22	22	18
23	23	23	24	24	27	27	26	26	26	25	22	22	22	17	17
20	21	21	22	25	25	26	27	24	24	24	24	23	23	23	23

Columns 33 through 48

25	27	27	26	23	23	23	22	22	22	20	20	20	19	19	17
25	24	23	20	16	16	16	15	15	15	13	13	13	12	12	12
26	27	27	25	23	23	23	22	22	22	21	21	21	20	18	18
26	27	27	25	24	24	24	21	21	20	18	18	18	18	14	13
27	27	26	24	22	22	22	21	21	21	20	20	19	19	19	19
25	24	24	23	22	22	22	21	21	21	20	19	19	18	18	18
24	22	21	20	20	20	19	19	19	19	17	17	17	17	13	13
25	23	23	22	22	22	19	19	19	18	17	17	17	13	13	13
21	23	23	24	26	27	27	27	25	25	25	25	24	24	23	23
22	20	20	19	17	17	16	16	16	13	13	13	13	11	11	11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

27 27 26 23 21 21 21 16 16 13 13 13 12 12 12 12
25 26 26 27 23 23 23 21 21 19 19 19 19 18 18 18
26 24 21 15 15 15 14 14 14 14 12 12 12 11 11 11
21 21 22 24 25 27 27 26 26 26 25 25 23 23 23 23
15 14 14 13 12 12 12 11 11 10 10 10 10 9 9 9
18 17 17 15 13 13 11 11 11 10 10 10 9 9 9 9
21 23 23 27 26 26 26 25 25 25 24 24 24 22 22 22
18 16 15 15 14 14 14 14 11 11 11 10 10 10 8 8
16 14 14 14 13 13 13 13 12 12 12 11 11 11 11 10
18 18 17 16 16 13 13 13 12 12 12 11 9 9 9 8

Columns 49 through 64

17 16 16 13 13 13 12 11 10 10 10 9 7 7 4 4
12 11 11 11 10 10 10 10 8 8 8 7 6 6 5 4
17 17 17 16 16 16 14 11 11 10 10 9 9 9 9 8
11 11 11 8 8 8 8 7 7 7 7 7 7 6 6 6
18 18 18 18 16 13 12 12 10 7 6 6 6 5 5 5
18 13 13 13 13 12 12 12 10 10 9 8 8 6 6 6
13 11 11 11 10 7 6 6 6 6 5 5 4 4 4 4
10 10 10 10 9 9 9 8 7 7 6 6 5 3 3 3
22 18 18 18 17 13 13 13 13 10 10 10 5 5 5 3
10 10 10 9 9 7 7 6 5 5 3 2 2 2 2 2
12 11 9 9 8 6 6 6 6 5 5 5 4 4 4 3
18 17 15 15 15 12 11 11 9 9 9 9 8 7 7 1
9 9 9 8 8 8 7 7 6 6 6 6 6 5 5 5
22 20 20 20 20 19 19 19 19 19 18 18 18 13 12 8
7 7 7 6 6 6 5 5 4 3 2 2 2 2 2 1
8 8 8 7 7 6 5 5 3 3 2 2 2 2 2 2
22 20 20 20 19 19 16 16 16 16 16 7 7 7 6 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8	7	7	7	7	6	5	5	5	4	4	4	3	3	3	3
10	10	9	9	9	8	8	7	5	3	2	2	2	2	2	2
8	8	8	7	7	7	6	6	4	4	4	4	4	3	3	2

Columns 65 through 70

4	3	3	3	3	3
3	3	3	3	2	2
8	8	1	1	1	1
4	2	2	1	1	1
5	3	3	3	3	3
5	5	5	5	5	3
3	3	3	3	2	2
3	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	2	2
1	1	1	1	1	1
4	3	3	3	3	3
8	8	8	3	3	3
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
3	2	2	2	2	2
1	1	1	1	1	1
2	2	1	1	1	1

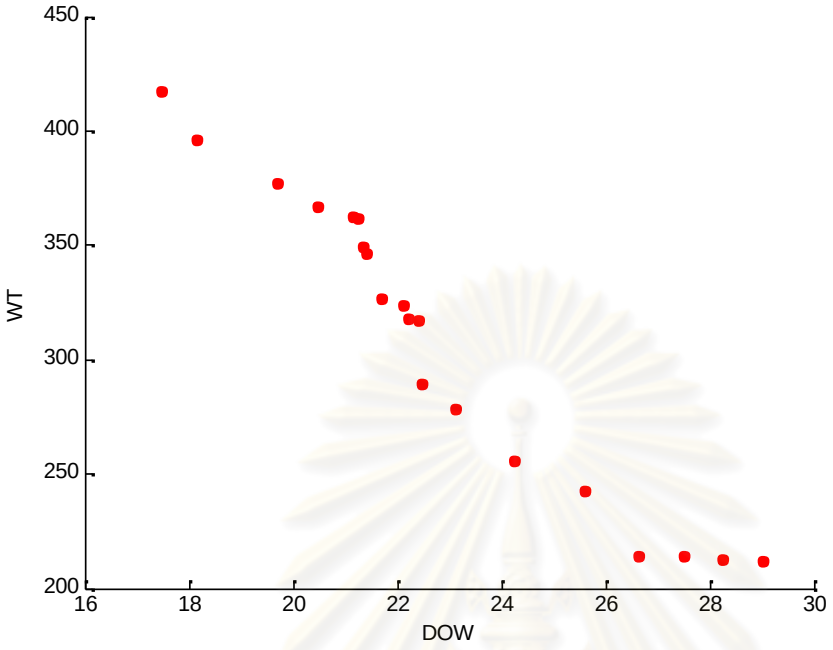
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WT_DOW_J =

17.4780	417.3741	27.0000
18.1417	396.5127	27.0000
19.6941	377.0828	27.0000
20.4681	367.3877	27.0000
21.1519	362.8848	27.0000
21.2499	362.2660	27.0000
21.3387	349.3466	27.0000
21.3978	346.2916	27.0000
21.6947	327.1047	27.0000
22.1086	323.7714	27.0000
22.2173	318.0180	27.0000
22.4050	317.2821	27.0000
22.4605	289.7112	27.0000
23.1122	278.3264	27.0000
24.2301	256.0200	27.0000
25.6059	242.4068	27.0000
26.6449	214.0734	27.0000
27.5087	213.9941	27.0000
28.2338	212.5237	27.0000
29.0116	212.2074	27.0000

Elapsed time is 2270.86259 seconds.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



111 tasks

Arcus_111task_cycle6837_50:50:11

WT_DOW =

1.0e+004 *

0.0541	2.0766	0.0026
0.0611	1.9910	0.0026
0.0680	1.9665	0.0026
0.0682	1.7974	0.0026
0.0685	1.7734	0.0026
0.0694	1.7627	0.0026
0.0720	1.7025	0.0026
0.0786	1.6243	0.0026
0.0821	1.4612	0.0026
0.1090	1.4504	0.0027

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.1108 1.4327 0.0027

0.1178 1.4233 0.0027

0.1215 1.3213 0.0027

0.1222 1.1649 0.0027

0.1748 1.1522 0.0028

0.2145 1.1385 0.0030

TS_task_minWS =

Columns 1 through 16

85 84 88 81 89 87 90 80 86 1 2 3 4 9 6 8

1 85 80 86 84 81 88 2 3 87 89 4 9 10 12 90

80 1 85 2 3 84 81 89 88 86 4 9 8 5 6 10

1 85 80 86 81 84 87 90 2 3 89 88 4 9 6 10

1 81 85 80 86 84 87 90 2 3 89 88 4 9 8 7

85 80 84 1 86 88 89 2 3 4 9 6 8 10 12 7

1 85 80 86 81 84 87 88 90 2 3 89 4 7 10 11

85 1 80 81 87 86 84 88 90 2 89 3 4 10 8 12

81 1 85 80 86 84 88 2 3 89 4 8 7 10 6 9

Columns 17 through 32

5 7 10 12 11 19 30 16 27 14 23 32 41 33 35 18

7 8 5 11 19 16 17 18 15 6 28 36 29 26 44 20

11 7 12 13 14 23 32 25 33 34 20 18 24 17 19 30

7 8 5 11 12 18 15 29 26 19 30 20 37 21 13 14

10 12 11 13 14 22 5 21 20 17 16 18 27 29 31 37

11 13 14 5 18 81 24 29 22 25 83 16 37 45 23 21

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8	5	9	12	20	17	18	15	14	23	21	33	25	13	24	32
9	11	7	21	17	6	13	20	5	14	23	18	33	15	26	16
5	87	12	90	11	16	18	20	13	29	37	17	27	21	35	14

Columns 33 through 48

25	24	22	17	31	34	83	42	38	29	46	37	45	15	43	49
30	13	37	50	14	23	27	82	24	45	51	22	33	25	31	34
38	29	46	52	42	47	58	28	60	22	83	16	87	57	66	68
23	82	32	17	16	33	25	45	51	28	27	35	22	83	38	41
24	6	15	23	26	19	30	28	45	51	25	83	34	32	41	33
27	35	51	32	41	33	20	19	31	34	17	28	87	90	36	30
41	22	83	34	29	37	6	45	19	30	38	26	28	46	36	51
19	28	25	36	22	83	31	34	82	30	38	44	27	35	39	50
23	32	41	22	83	25	33	28	36	43	48	53	49	31	34	44

Columns 49 through 64

51	52	21	13	20	26	28	48	39	40	47	57	56	59	65	53
83	38	46	52	42	39	40	47	57	55	62	61	71	65	35	43
31	37	21	59	27	56	54	64	65	72	74	36	35	67	15	41
36	43	44	48	31	34	49	53	24	39	40	42	47	57	56	54
39	40	42	47	58	66	57	59	35	67	60	68	36	44	50	65
38	42	47	58	56	59	46	64	15	57	60	66	54	43	48	55
31	52	82	42	47	57	16	65	44	50	39	40	55	62	61	56
43	42	47	58	40	55	62	61	71	60	56	46	66	63	29	37
24	45	50	39	40	42	47	57	56	59	55	64	51	15	62	19

Columns 65 through 80

82	55	62	61	64	71	63	67	36	60	58	66	72	44	50	68
58	56	59	67	64	72	21	63	48	53	60	68	54	66	49	74
45	44	55	62	61	26	69	82	76	50	39	40	51	90	63	70
58	66	65	64	72	60	68	55	62	61	71	63	69	70	73	50
82	38	55	62	61	46	52	54	43	69	49	48	53	56	70	73
62	61	53	26	82	68	39	40	71	52	63	69	44	67	49	65
54	27	59	64	67	60	35	43	48	69	53	49	72	68	70	73
48	24	64	72	53	52	54	68	57	45	51	65	74	59	76	67
65	72	54	30	38	26	74	71	63	76	67	60	58	66	46	52

Columns 81 through 96

54	74	76	69	70	73	75	78	77	79	91	92	94	93	95	98
76	32	41	70	73	75	91	92	94	93	79	69	78	77	95	96
73	71	75	78	77	79	43	49	91	92	94	48	53	93	95	98
59	75	78	77	79	91	92	94	67	46	52	74	76	93	95	98
75	78	77	79	63	64	72	74	76	71	91	92	93	94	95	98
72	74	76	50	70	73	75	78	77	79	91	92	94	93	95	96
71	63	58	66	74	76	75	91	79	93	78	77	94	92	95	96
49	32	41	70	69	73	75	91	78	92	79	77	94	93	95	96
82	68	61	69	70	73	75	78	77	79	91	92	94	93	95	96

Columns 97 through 111

97	103	108	110	102	107	106	109	100	96	104	101	105	99	111
101	105	99	97	100	98	103	108	110	102	106	104	109	107	111
97	103	104	96	100	102	106	99	109	101	107	105	108	110	111
103	99	96	104	100	97	108	101	105	102	107	106	109	110	111
97	100	103	99	96	104	101	105	102	106	109	107	108	110	111
104	98	97	102	103	108	110	99	100	106	109	107	101	105	111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

99	104	98	97	101	105	100	103	108	102	106	107	109	110	111	
100	97	98	103	101	105	102	108	104	107	99	110	106	109	111	
99	101	98	97	102	106	100	103	108	110	107	105	104	109	111	

Station =

Columns 1 through 16

1	2	2	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6
1	1	1	1	2	2	3	3	3	5	5	5	5	5	5	7
1	1	1	2	2	3	4	4	4	5	5	6	6	6	6	6
1	1	1	1	2	3	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6
1	1	1	2	2	4	4	4	4	6	6	6	6	7	7	7
1	1	1	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	6	6	6
1	1	1	3	3	3	3	4	4	12	12	12	12	12	12	16
1	1	1	2	2	2	4	4	5	5	5	5	5	5	8	8
1	1	1	2	2	4	4	4	4	6	6	7	7	7	7	7

Columns 17 through 32

6	6	6	7	7	7	7	7	7	7	8	8	12	13	13	13
8	8	8	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	11	11	14
7	7	7	7	7	8	8	9	9	10	10	10	10	10	10	10
6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	13
7	7	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10
16	16	16	17	17	17	17	20	20	21	21	22	22	22	22	23
8	8	9	9	9	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	11
7	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10	10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Columns 33 through 48

14	14	14	14	14	15	15	16	16	16	16	16	16	18	18	18
14	14	14	14	15	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17	19
10	10	10	10	16	18	18	19	19	19	19	19	19	22	22	22
14	14	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16
10	11	12	12	13	13	13	13	13	13	13	15	15	17	17	17
10	10	10	10	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
23	23	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
11	12	12	12	12	12	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
11	11	12	12	12	13	13	13	13	13	13	13	13	14	14	14

Columns 49 through 64

18	18	19	19	19	19	19	19	20	20	21	21	23	23	24	24
19	19	19	19	21	23	23	24	24	25	25	26	26	26	25	25
22	22	24	24	24	26	26	25	25	25	25	24	23	23	23	23
16	16	16	16	17	17	17	17	17	18	18	21	24	24	25	25
19	19	20	23	23	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25	26
12	13	14	14	17	17	17	20	20	21	21	21	21	21	21	21
25	25	26	26	19	19	18	18	18	18	18	17	15	15	15	14
14	15	19	19	20	20	20	22	24	24	25	25	25	26	26	26
14	14	14	15	15	20	24	24	26	26	25	25	25	25	23	23

Columns 65 through 80

24	24	26	26	25	25	24	24	24	22	22	22	22	18	18	18
25	22	22	20	20	20	18	18	15	15	15	14	14	14	13	13
22	21	21	21	21	20	20	20	20	19	17	17	17	15	15	15

26	26	26	26	23	23	23	22	22	22	20	20	19	19	19	13
26	26	26	26	24	24	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21
22	22	22	24	24	24	25	25	26	26	26	24	24	24	24	24
14	13	13	13	11	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10	10
26	26	26	23	23	23	23	23	22	22	22	22	21	21	21	18
23	22	22	22	22	22	21	21	21	19	19	19	18	18	18	18

Columns 81 through 96

17	17	17	13	13	12	11	11	11	11	10	10	10	10	9	4
13	13	12	12	10	9	9	8	8	8	8	7	7	7	6	4
14	14	14	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12	12	11	5
13	12	12	12	11	11	10	10	10	10	10	10	10	10	9	5
18	18	18	16	16	16	14	14	14	11	8	6	6	5	5	3
23	23	23	19	19	19	18	18	18	18	16	16	16	16	15	5
9	9	8	8	8	8	7	7	6	6	6	6	6	6	5	4
18	18	18	17	17	17	16	16	7	7	7	7	7	7	6	4
18	18	18	17	17	17	16	16	16	8	8	6	6	6	5	3

Columns 97 through 111

4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1
4	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1
5	5	4	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1
4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1
4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1

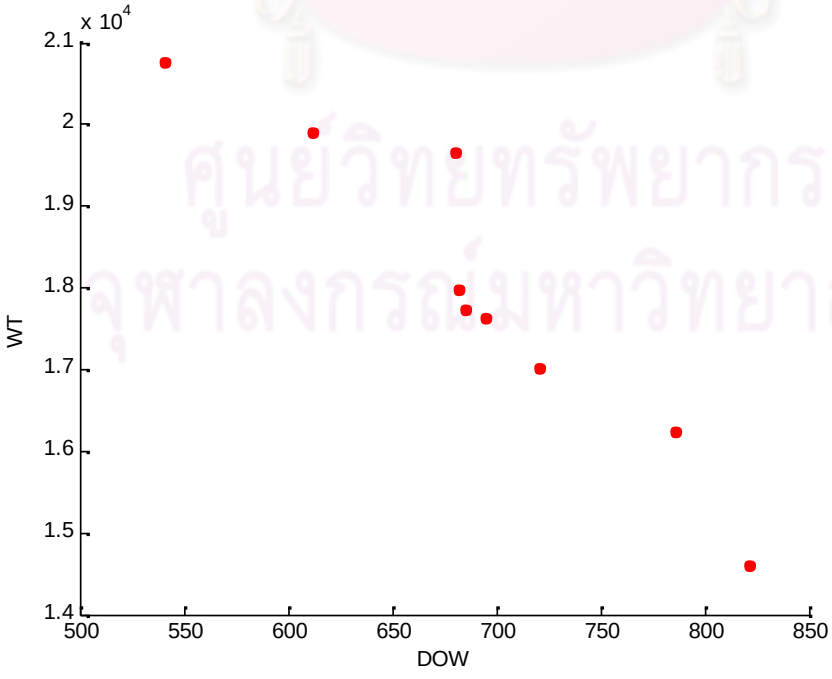
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WT_DOW_J =

1.0e+004 *

0.0541	2.0766	0.0026
0.0611	1.9910	0.0026
0.0680	1.9665	0.0026
0.0682	1.7974	0.0026
0.0685	1.7734	0.0026
0.0694	1.7627	0.0026
0.0720	1.7025	0.0026
0.0786	1.6243	0.0026
0.0821	1.4612	0.0026

Elapsed time is 7468.084673 seconds.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างผลการทดลองด้วย PSONK ในผังสายการประกอบแบบสมมาตร

297 tasks

Scholl&Klein_297task_cycle1394_99:99:99

WT_DOW =

1.0e+003 *

0.1455	7.0599	0.0600
0.1597	6.3550	0.0600
0.1684	6.0673	0.0600
0.1716	5.9414	0.0600
0.1752	5.6992	0.0600
0.1771	5.6359	0.0600
0.1968	5.5335	0.0600
0.1995	5.5191	0.0610
0.2199	5.5017	0.0610
0.2206	5.4945	0.0610
0.2331	5.4880	0.0620
0.2498	5.4751	0.0620
0.2685	5.4501	0.0630

TS_task_minWS =

Columns 1 through 16

1	2	3	4	86	22	24	111	5	56	40	134	136	27	247	83

1 138 191 2 3 4 105 56 27 83 40 221 5 31 94 179

1 138 2 3 4 83 109 247 40 259 134 48 26 86 105 111

138 1 2 3 4 247 56 109 111 83 191 5 40 26 22 259

1 2 3 4 105 86 259 27 109 40 221 111 223 56 134 60

138 191 1 2 3 4 86 221 223 247 26 111 48 27 134 94

138 191 1 2 3 4 105 26 48 247 5 111 94 109 86 93

Columns 17 through 32

90 95 116 122 94 221 60 68 25 29 33 38 26 31 172 93

172 175 61 48 60 86 93 109 134 136 110 26 82 89 88 30

191 116 122 110 94 5 266 136 27 90 139 221 30 223 95 22

25 30 6 9 24 221 105 29 266 116 110 44 33 38 41 60

68 73 225 93 22 61 83 94 31 266 116 24 138 191 247 136

5 56 259 266 22 25 116 122 40 31 172 93 109 30 82 225

40 83 259 266 110 6 134 116 122 221 27 22 24 10 8 9

Columns 33 through 48

6 10 9 8 7 44 121 139 129 14 19 223 73 15 12 142

6 297 22 24 25 10 8 90 223 95 259 266 65 29 9 44

25 297 31 93 129 162 82 172 142 88 24 34 29 89 44 179

48 90 49 53 7 8 122 61 65 95 10 68 20 94 134 136

82 48 172 175 179 88 65 90 180 5 95 139 6 253 110 7

179 175 89 6 83 8 180 129 10 141 9 297 61 65 252 34

30 31 82 89 223 136 139 172 25 7 162 15 21 225 175 88

Columns 49 through 64

48 61 65 13 11 16 141 151 49 82 88 128 30 175 18 297

139 49 68 73 253 260 225 121 128 53 58 162 180 34 35 42
49 152 164 53 35 6 58 10 175 8 33 42 167 9 7 180
11 45 50 27 139 54 296 253 297 129 14 16 162 141 31 172
252 25 26 9 29 33 38 121 8 10 13 12 128 162 15 30
151 105 136 258 163 7 14 88 13 15 265 21 24 11 18 35
90 13 56 60 68 61 12 18 29 179 20 297 73 65 121 33

Columns 65 through 80

109 34 35 42 152 164 89 179 180 252 20 138 46 51 259 266
46 51 81 87 111 55 59 100 104 116 122 129 141 99 103 247
225 56 20 121 38 46 128 51 253 252 13 41 55 11 15 12
13 82 142 73 12 151 34 179 88 89 86 93 223 121 17 15
44 297 41 258 11 18 142 265 272 260 267 14 34 89 16 20
29 272 20 19 60 68 90 44 33 12 95 17 38 41 49 53
38 41 45 34 35 17 14 50 95 11 129 141 151 163 44 49

Columns 81 through 96

105 110 162 167 171 21 17 23 28 53 32 36 37 163 253 260
151 163 108 292 115 114 119 120 150 161 127 157 142 152 164
252
21 45 258 17 18 265 141 59 81 61 171 151 14 87 19 60
21 225 152 260 267 273 276 128 19 163 35 18 281 291 42 46
273 21 19 17 45 50 54 296 275 23 280 35 42 28 276 32
275 280 73 16 110 162 42 46 139 290 51 23 81 87 55 59
180 252 258 265 272 275 280 253 54 296 53 290 16 42 19 128

Columns 97 through 112

191 225 267 258 81 58 265 272 275 280 290 41 45 50 54 39
258 265 272 64 72 33 38 41 45 167 50 54 296 171 275 280
68 64 260 272 267 275 163 50 72 65 100 280 73 54 104 99
51 55 59 81 175 180 252 258 265 164 167 58 23 28 37 272
36 46 122 49 53 152 164 167 58 51 81 55 59 37 64 129
28 32 45 121 36 142 99 152 58 64 103 253 72 78 80 192
46 51 81 87 55 59 99 103 100 104 108 142 152 164 167 171

Columns 113 through 128

43 47 52 57 62 66 69 74 71 63 67 77 76 70 75 84
290 78 125 80 79 85 92 98 102 107 7 20 14 19 12 15
296 78 16 192 79 273 23 125 276 28 290 80 85 201 37 103
32 36 39 43 47 52 57 63 67 76 71 77 62 66 275 280
141 87 171 99 103 151 39 43 72 78 290 47 52 57 163 125
201 37 100 39 79 85 92 98 102 107 50 54 296 113 43 104
114 115 120 150 161 292 119 58 260 267 273 276 281 291 23 28

Columns 129 through 144

91 96 97 273 276 281 291 87 55 296 59 100 99 64 72 78
113 192 201 267 273 13 17 18 21 11 16 118 126 276 281 291
92 98 32 108 281 115 36 39 102 292 120 114 107 291 150 43
290 70 171 87 100 104 99 103 108 292 69 74 64 115 120 150
80 79 192 201 62 66 69 63 67 70 100 75 281 104 108 292
108 118 126 47 125 114 115 120 164 150 167 171 292 260 267
273
32 36 37 39 43 47 52 57 71 77 63 67 70 75 64 72

Columns 145 through 160

192 201 125 80 79 85 92 98 102 107 113 118 126 101 106 112
23 28 32 36 37 39 43 47 52 57 71 77 62 66 69 74
47 119 52 161 57 71 127 77 113 157 76 63 118 62 126 66
75 97 84 91 96 101 106 112 117 124 123 147 149 160 158 146
114 119 115 74 71 77 76 97 84 91 96 101 106 112 117 257
161 52 57 62 76 71 119 127 157 66 77 63 276 67 128 70
78 125 80 79 85 62 127 157 76 92 98 102 107 113 118 126

Columns 161 through 176

117 123 146 156 145 155 257 264 124 149 160 147 158 148 159
104
76 63 67 70 75 97 84 91 96 101 106 112 117 123 148 159
69 74 67 70 75 97 84 91 96 101 106 112 117 257 123 124
156 145 155 257 72 78 79 192 80 125 201 85 92 98 114 119
264 85 92 124 120 150 161 127 157 98 102 107 113 118 126 291
75 281 291 69 74 97 84 91 96 101 106 112 117 123 124 257
66 69 74 192 201 84 97 91 96 101 106 112 117 123 145 155

Columns 177 through 192

103 108 292 114 119 115 120 150 127 157 130 131 133 161 144
154
147 149 146 156 158 160 257 264 145 155 124 130 131 132 133
135
149 145 146 160 264 130 148 155 156 159 147 144 131 158 133
132
127 157 148 159 161 102 107 113 118 126 130 144 154 264 131
133

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

123 148 159 130 131 133 147 146 145 158 149 155 160 156 132
135
147 158 264 130 131 132 133 149 160 146 145 155 148 144 156
135
148 146 156 147 149 160 159 124 257 264 158 130 144 154 166
131

Columns 193 through 208

166 170 132 135 137 140 200 143 169 174 287 178 288 153 165
176
137 144 154 166 170 140 200 143 169 174 288 287 178 153 165
176
135 137 140 154 200 143 169 166 153 165 176 170 174 178 288
287
132 135 166 170 137 140 200 143 153 165 176 168 173 177 169
174
137 140 200 143 144 154 153 165 168 173 177 176 169 166 170
174
137 159 154 166 140 200 143 153 165 168 173 176 170 177 169
174
133 132 135 137 140 200 143 169 153 165 176 168 173 177 170
174

Columns 209 through 224

168 173 177 181 185 197 295 184 186 182 190 189 194 187 188
196
168 173 177 181 183 187 188 184 193 198 194 295 189 185 197
196

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

168 173 177 181 196 183 197 189 295 182 186 187 185 193 190
188
288 178 181 187 295 196 186 287 188 183 184 182 190 189 185
193
178 288 287 181 295 182 190 189 185 186 187 183 193 198 184
196
288 178 181 184 188 287 183 193 182 185 295 198 194 187 196
186
287 288 178 181 187 188 186 185 197 189 184 194 183 193 182
190

Columns 225 through 240

195 227 203 208 206 205 229 235 199 209 183 193 198 202 251
204
182 190 186 195 229 227 199 205 203 208 206 209 211 202 251
204
195 229 184 198 194 199 227 230 289 232 271 205 236 202 239
251
198 194 195 229 203 206 199 227 197 230 232 271 235 236 239
279
197 188 195 229 235 227 230 203 206 232 236 239 279 286 205
271
190 189 195 205 197 227 199 203 208 229 235 230 271 202 251
206
198 295 196 195 199 202 204 250 251 227 203 208 229 205 206
209

Columns 241 through 256

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

207 210 211 213 212 214 215 216 217 218 219 220 222 224 226
228
250 207 230 232 271 235 236 239 279 286 210 212 213 214 215
216
279 286 204 207 235 212 203 250 208 206 209 210 211 213 214
234
286 202 208 205 209 211 289 204 250 207 212 251 210 213 214
234
209 211 289 208 194 199 202 251 204 250 207 210 212 213 214
234
209 211 204 250 207 210 212 232 236 239 279 286 213 214 234
215
235 211 207 212 230 289 232 236 239 210 213 279 286 271 214
234

Columns 257 through 272

231 233 237 234 238 285 230 271 289 232 236 239 279 286 250
256
217 218 219 220 222 224 289 234 238 285 256 263 270 226 228
231
256 263 238 270 285 215 216 217 218 219 220 222 224 226 228
231
238 256 263 270 285 215 216 217 218 219 220 222 224 226 228
231
238 256 263 270 285 215 216 217 218 219 220 222 224 226 228
231
216 217 218 219 220 222 224 226 228 231 233 237 289 238 256
263

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

256 263 270 238 285 215 216 217 218 219 220 222 224 226 228
231

Columns 273 through 288

263 270 240 241 242 244 255 262 243 246 245 248 249 284 294
254
233 237 240 241 242 244 243 245 246 248 249 284 294 254 255
262
233 237 240 241 243 242 244 246 255 262 245 248 249 284 254
294
233 237 240 243 241 242 244 245 255 262 246 248 249 284 294
254
233 237 240 243 241 242 244 245 246 248 249 254 255 262 284
294
270 285 240 243 241 242 244 255 246 245 248 249 284 294 254
261
233 237 240 243 241 242 244 246 245 248 249 284 294 254 255
262

Columns 289 through 297

261 269 268 274 278 282 277 283 293
261 269 268 274 277 278 282 283 293
261 268 269 274 277 282 278 283 293
261 268 269 274 278 282 277 283 293
261 268 269 274 278 282 277 283 293
268 262 269 274 277 278 283 282 293
261 268 269 274 277 282 278 283 293

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Station =

Columns 1 through 16

2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	8	8	8	8	8
1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	5	5	5
4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10
1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	6	6	6	6
2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4
2	2	2	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	6	6	6
2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4

Columns 17 through 32

8	9	9	9	13	13	13	13	13	13	13	15	15	15	15	15
5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	9
10	11	11	14	14	14	14	14	14	16	16	16	16	16	16	16
6	6	8	8	8	8	8	9	9	9	9	13	13	13	13	14
5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	8	8	8
6	6	6	6	6	8	8	12	12	12	12	12	12	13	13	13
4	4	4	4	7	7	7	8	8	8	13	13	13	13	13	14

Columns 33 through 48

16	16	16	16	17	17	17	21	21	21	21	21	22	22	22	22
9	9	9	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	11	14
20	20	20	20	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22	23	23
14	14	14	14	15	15	15	15	15	15	20	20	20	20	20	20
8	8	8	8	13	13	13	13	13	15	15	15	15	15	15	16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

13	13	14	14	14	14	14	15	15	15	15	16	16	16	16	16
14	14	14	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16	16	17

Columns 49 through 64

22	22	22	23	23	23	23	23	24	24	24	25	25	25	26	26
14	14	14	16	16	16	16	16	17	17	17	18	18	18	18	18
23	24	24	24	24	24	26	26	26	26	26	26	26	28	28	28
20	21	21	21	21	25	25	26	26	26	26	28	28	28	28	28
16	16	16	18	18	18	18	19	19	19	19	19	21	21	21	22
21	21	21	21	21	21	23	23	23	23	23	26	26	26	26	29
17	17	17	17	17	17	19	19	19	19	19	21	21	21	21	23

Columns 65 through 80

26	26	27	27	27	27	27	31	31	31	31	31	35	35	35	35
18	23	23	23	23	23	24	24	24	24	30	30	30	30	30	30
28	30	30	30	30	33	33	33	35	35	35	35	35	35	38	38
28	30	30	30	30	30	32	32	32	32	32	34	34	34	34	34
22	22	23	23	23	23	23	23	25	25	25	25	25	26	26	26
29	29	29	29	30	30	30	30	30	31	31	31	31	31	32	32
23	23	23	26	26	26	26	26	27	27	27	27	27	27	29	29

Columns 81 through 96

35	35	35	35	36	36	36	36	36	37	37	37	37	37	37	45
34	34	34	34	34	34	34	34	35	35	35	35	36	36	36	36
38	38	38	39	39	39	39	39	39	39	42	42	42	42	42	42
38	38	38	38	38	38	40	40	41	41	41	41	41	42	42	42
26	26	28	28	28	28	28	29	29	30	30	30	30	30	32	32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

32	32	32	32	33	33	33	33	33	33	33	35	35	35	35	35
29	35	35	35	35	35	35	35	36	36	39	39	39	39	39	40

Columns 97 through 112

45	45	45	45	45	45	46	46	46	46	46	46	46	46	48	48
36	36	37	37	37	37	38	38	38	38	38	39	39	40	40	40
43	43	43	43	43	43	43	45	45	45	45	45	45	45	45	47
42	42	42	44	44	44	44	44	44	46	46	46	46	46	47	47
32	32	33	33	33	33	33	34	34	34	34	34	34	34	37	37
35	35	36	36	36	36	36	37	37	37	37	37	39	39	39	39
40	40	41	41	41	41	41	41	41	41	42	42	42	42	42	42

Columns 113 through 128

48	48	48	53	54	54	54	54	54	55	55	55	55	55	56	56
40	40	40	40	40	40	41	41	41	41	41	41	42	42	42	42
47	47	48	48	48	48	48	48	53	53	53	53	53	53	53	56
47	47	47	48	48	48	48	48	51	51	51	51	52	52	52	52
37	37	37	37	38	38	38	38	38	40	40	40	40	40	40	40
39	39	39	44	44	44	44	44	44	44	44	47	47	51	51	51
43	43	43	43	43	43	43	43	45	45	45	45	45	46	46	46

Columns 129 through 144

57	57	58	58	59	59	59	59	60	60	59	58	58	58	57	56
42	43	43	43	43	43	43	45	45	45	45	45	47	47	47	47
56	56	57	57	57	57	57	58	58	58	58	58	58	59	59	60
52	52	52	52	52	53	53	53	53	53	53	54	54	54	54	54
44	44	44	44	44	44	44	47	47	47	47	47	47	47	48	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

51 51 51 55 55 55 55 55 55 55 55 56 56 56 56 56
46 47 47 47 47 47 52 52 52 59 59 59 59 59 60 60

Columns 145 through 160

56 56 53 52 52 52 52 52 52 52 52 51 51 51 51 50
48 48 48 48 48 49 49 49 49 54 54 54 55 55 55 55
60 60 60 59 59 56 55 55 54 54 54 54 54 54 52 52
54 57 57 57 57 58 59 59 60 60 60 60 60 60 59 59
48 48 48 48 49 49 49 50 50 50 50 52 52 52 52 52
56 59 60 60 60 60 59 59 58 58 58 58 57 57 57 54
60 60 60 58 58 58 58 57 57 57 57 57 57 57 57 56

Columns 161 through 176

50 50 50 50 50 50 49 49 49 49 49 49 49 49 49 47
55 57 57 57 57 58 58 59 59 59 60 60 60 60 60 60
52 52 52 52 51 51 51 51 50 50 50 50 49 49 49 49
59 58 58 58 58 56 56 56 56 56 56 56 56 55 55 55
53 53 53 53 53 53 53 59 60 60 60 60 60 60 60 59
54 54 54 54 53 53 53 53 52 52 52 50 50 50 50 50
56 56 56 56 55 55 55 55 55 54 54 54 54 53 53 53

Columns 177 through 192

47 47 47 47 47 47 44 44 44 44 44 43 43 43 43 42
60 60 59 58 57 57 56 56 56 56 56 56 56 53 53 53
49 49 49 49 49 46 46 46 46 46 46 46 44 44 44 44
55 50 50 50 50 50 50 50 49 49 49 49 49 45 45 45
58 58 58 58 58 58 57 57 57 57 57 57 57 57 56 56

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

50	50	49	49	49	49	49	48	48	48	48	48	48	48	46	46
53	53	53	53	53	53	53	51	51	51	51	51	51	50	50	49

Columns 193 through 208

42	41	41	41	41	41	41	41	41	40	40	40	40	40	40	39
53	53	52	52	51	51	51	51	51	51	50	50	50	50	50	50
44	41	41	41	41	41	41	40	40	40	37	37	37	37	37	37
43	43	43	43	39	39	39	39	39	39	37	37	37	37	37	37
56	56	56	56	55	55	55	55	55	54	54	54	54	54	51	51
46	46	46	45	45	43	43	43	43	43	43	43	42	42	42	42
49	49	49	49	48	48	48	48	48	48	44	44	44	44	44	44

Columns 209 through 224

39	39	39	39	39	38	38	38	34	34	34	34	34	34	34	33
46	46	46	46	46	46	46	46	46	44	44	44	33	33	33	32
37	36	36	36	36	36	36	36	34	32	32	32	32	32	31	31
37	37	36	36	36	35	35	35	35	35	35	35	35	33	33	33
51	51	51	46	46	45	45	45	45	43	43	43	43	43	43	43
42	42	42	42	42	41	41	41	41	41	40	38	38	38	38	38
44	44	38	38	38	38	38	38	38	37	37	37	37	37	34	34

Columns 225 through 240

33	33	33	33	33	33	32	32	32	32	30	30	30	30	30	30
32	32	32	32	32	31	31	31	31	31	29	29	29	29	28	28
31	31	29	29	29	29	29	29	27	27	27	27	27	25	25	25
31	31	31	31	29	29	29	29	29	29	27	27	27	27	24	24
42	42	42	42	42	41	41	41	41	41	39	39	39	39	36	36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

38 34 34 34 34 34 28 28 28 28 27 27 27 27 27 25
34 34 33 33 33 33 32 32 32 32 32 32 31 31 31 30

Columns 241 through 256

30 29 29 29 29 29 29 28 28 28 28 20 20 20 20 20
28 28 28 28 27 27 27 27 27 27 26 26 26 26 26 26
25 25 25 25 19 19 19 19 19 19 19 18 18 18 18 18
24 24 23 23 23 23 23 23 23 22 22 22 22 22 22 22
36 36 36 36 35 35 35 35 35 35 31 31 31 31 31 31
25 25 25 25 25 25 24 24 24 24 24 22 22 22 22 22
30 30 30 30 30 30 28 28 28 28 28 25 25 25 25 25

Columns 257 through 272

20 19 19 19 19 19 19 18 18 18 18 14 14 14 14 14
25 25 25 25 25 25 22 22 22 22 22 22 21 21 21 20
17 17 17 17 17 17 15 15 15 13 13 13 13 13 13 12
19 19 19 19 19 19 18 18 18 17 17 17 17 17 17 16
27 27 27 27 27 27 24 24 24 20 20 20 20 20 20 17
20 20 20 19 19 19 19 19 19 18 18 18 18 18 18 18
24 24 24 24 24 24 22 22 22 20 20 20 20 20 20 18

Columns 273 through 288

14 12 12 11 11 11 10 10 10 10 10 7 6 6 6 6
20 20 20 19 19 19 15 15 15 13 12 12 12 12 7 7
12 12 12 9 9 9 9 8 8 8 8 7 6 6 6 6
16 16 16 12 12 12 12 11 11 11 11 10 7 7 7 7
17 17 17 14 14 14 14 12 12 11 10 10 10 10 10 10

18	17	17	11	11	11	11	10	10	10	9	7	7	7	7	4
18	18	18	12	12	12	12	11	11	10	9	9	9	9	6	6

Columns 289 through 297

5	5	5	5	3	3	3	3	1
7	7	7	7	4	4	4	4	3
3	3	3	3	2	2	2	2	1
5	5	5	5	3	3	3	3	2
9	9	9	9	7	7	7	7	1
4	4	4	4	3	3	3	3	1
6	6	6	6	5	5	5	5	1

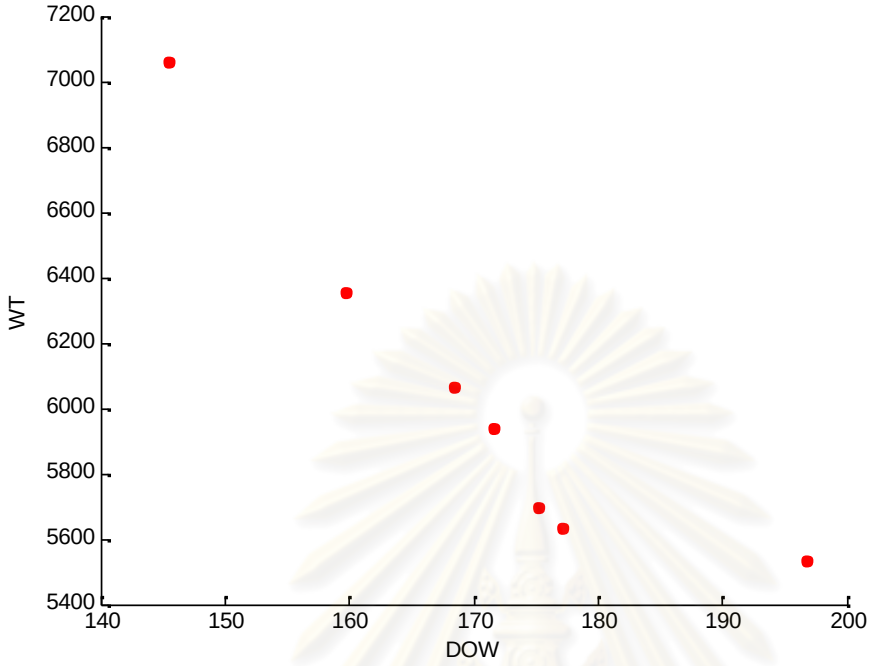
WT_DOW_J =

1.0e+003 *

0.1455	7.0599	0.0600
0.1597	6.3550	0.0600
0.1684	6.0673	0.0600
0.1716	5.9414	0.0600
0.1752	5.6992	0.0600
0.1771	5.6359	0.0600
0.1968	5.5335	0.0600

Elapsed time is 5521.861844 seconds.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



36 tasks

CaseStudy_36task_cycle1371_12:12:12

WT_DOW =

1.0e+003 *

0.0268 1.4305 0.0060
0.0272 1.4137 0.0060
0.0289 1.4011 0.0060
0.0307 1.4010 0.0060
0.0308 1.3967 0.0060
0.0329 1.3957 0.0060
0.0329 1.3754 0.0060
0.0336 1.3745 0.0060
0.0353 1.3705 0.0060
0.0376 1.3566 0.0060

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.0377	1.3454	0.0060
0.0385	1.3355	0.0060
0.0413	1.3347	0.0060
0.0413	1.3262	0.0060
0.0419	1.3233	0.0060
0.0436	1.3224	0.0060
0.0446	1.3223	0.0060
0.0463	1.3211	0.0060
0.0466	1.3196	0.0060
0.0467	1.3014	0.0060
0.0482	1.3014	0.0060
0.0486	1.2993	0.0060
0.0487	1.2992	0.0060
0.0497	1.2934	0.0060
0.0498	1.2829	0.0060
0.0509	1.2762	0.0060
0.0512	1.2756	0.0060
0.0513	1.2755	0.0060
0.0545	1.2725	0.0060
0.0575	1.2309	0.0060
0.0586	1.2288	0.0060
0.0604	1.2229	0.0060
0.0627	1.2164	0.0060
0.0638	1.1939	0.0060
0.0652	1.1909	0.0060
0.0663	1.1843	0.0060
0.0681	1.1815	0.0060
0.0689	1.1784	0.0060
0.0691	1.1783	0.0060
0.0691	1.1722	0.0060

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.0701	1.1600	0.0060
0.0725	1.1577	0.0060
0.0739	1.1442	0.0060
0.0741	1.1424	0.0060
0.0762	1.1420	0.0060
0.0777	1.1383	0.0060
0.0793	1.1064	0.0060
0.0798	1.0875	0.0060
0.0845	1.0700	0.0060
0.0891	1.0591	0.0060
0.0934	1.0578	0.0060
0.0946	1.0393	0.0060
0.0946	1.0317	0.0060
0.1001	1.0301	0.0060
0.1009	1.0185	0.0060
0.1010	1.0176	0.0060
0.1017	1.0063	0.0060
0.1070	1.0026	0.0060
0.1072	0.9816	0.0060
0.1075	0.9761	0.0060
0.1091	0.9690	0.0060
0.1109	0.9360	0.0060
0.1120	0.9350	0.0060
0.1127	0.9330	0.0060
0.1146	0.9220	0.0060
0.1224	0.9140	0.0060
0.1250	0.8638	0.0060
0.1295	0.8522	0.0060
0.1315	0.8249	0.0060
0.1316	0.8228	0.0060

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.1407 0.7943 0.0060

0.1515 0.7452 0.0060

0.1623 0.7357 0.0060

0.1895 0.7045 0.0060

0.2864 0.7030 0.0060

0.4883 0.6918 0.0070

0.5174 0.6535 0.0070

TS_task_minWS =

Columns 1 through 18

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

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

1 2 11 8 9 7 3 12 13 14 15 6 10 17 19 20 18 21

1 2 15 7 10 11 8 9 17 20 19 18 21 3 4 5 6 12

1 2 7 10 17 18 19 8 3 4 5 6 9 20 21 11 12 13

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

1 2 11 17 20 18 19 21 3 8 9 7 12 13 14 15 6 10

1 2 6 15 7 10 17 19 20 18 21 3 11 8 9 4 5 12

1 2 6 15 7 10 11 8 3 4 5 17 18 19 20 21 12 13

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

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

1 2 7 10 11 6 15 3 17 18 20 19 21 12 13 14 16 22

1 2 11 15 7 6 10 8 17 3 4 5 19 20 12 13 18 21

1 2 7 6 11 12 13 15 10 14 16 22 8 17 9 20 3 18

1 2 7 11 15 8 10 17 18 19 20 12 13 14 16 9 21 3

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

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

1 2 11 12 13 14 15 8 9 7 6 10 17 20 19 18 21 3

1 2 8 9 6 11 17 15 7 18 10 20 19 21 3 4 12 13

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

1 2 7 11 12 13 14 8 17 9 18 19 20 21 15 10 6 3

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

1 2 10 11 12 13 14 3 6 4 5 15 7 17 20 18 19 21

1 2 7 10 8 11 15 9 6 12 13 14 16 22 17 3 19 20

1 2 15 8 9 7 11 17 20 12 13 14 16 22 19 18 21 6

1 2 17 11 15 6 10 18 19 7 12 13 14 16 22 20 3 4

1 2 15 10 7 11 8 12 9 17 20 3 4 19 18 21 5 6

1 2 7 10 6 15 17 20 18 19 21 3 4 5 8 9 11 12

1 2 17 20 19 10 11 15 6 12 8 7 9 18 21 13 14 16

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

1 2 15 17 19 20 3 8 11 12 6 4 5 9 7 10 18 21

1 2 15 7 10 11 12 13 14 16 22 8 17 18 20 3 4 19

1 2 15 6 3 8 4 10 7 11 12 9 17 19 20 18 21 5

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

1 2 15 3 6 8 7 9 4 11 12 17 18 19 20 21 5 10

1 2 6 15 17 18 20 3 7 19 21 11 8 9 4 5 12 13

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

1 2 15 10 6 8 9 17 11 12 20 3 4 19 18 21 5 7

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

1 2 17 20 19 18 21 3 11 12 8 10 6 15 7 9 4 5

1 2 3 4 5 15 7 6 8 11 17 19 20 10 18 21 12 13

1 2 15 3 11 17 19 20 18 21 7 12 13 14 16 22 23 10

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

1 2 3 17 19 7 6 10 8 20 4 5 15 18 21 11 12 13

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

1 2 6 3 4 17 19 8 10 11 12 13 14 15 20 18 21 7

1 2 10 17 20 19 8 11 6 15 3 4 5 12 13 14 16 22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 2 7 6 15 3 17 11 12 13 14 16 22 20 19 18 21 10

1 2 6 15 10 7 3 11 12 8 9 17 18 19 20 21 13 14

1 2 15 3 6 8 10 7 11 12 13 14 4 5 16 9 22 17

1 2 11 12 17 19 13 14 15 10 8 9 16 22 20 18 21 6

1 2 11 12 13 14 15 16 22 17 7 10 18 19 8 3 4 5

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

1 2 17 3 8 10 18 20 4 19 21 7 6 15 9 11 12 13

1 2 15 3 17 18 8 10 4 5 9 20 6 11 12 7 19 21

1 2 10 3 17 7 19 20 4 5 6 11 15 8 9 18 21 12

1 2 7 10 3 8 11 12 9 6 15 17 18 19 20 21 13 14

1 2 10 11 15 6 3 8 9 7 12 17 19 18 20 4 5 21

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

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

1 2 3 17 20 8 7 18 10 11 15 4 19 21 5 12 13 6

1 2 15 6 11 12 8 9 7 3 4 5 13 14 16 22 17 19

1 2 15 3 11 12 8 9 6 10 17 20 18 19 21 13 14 4

1 2 10 8 3 17 18 19 20 21 4 5 11 12 15 7 9 6

1 2 17 19 20 6 11 8 3 12 9 7 10 18 21 13 14 15

1 2 11 6 15 7 12 8 17 20 18 19 21 3 4 10 9 13

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

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

1 2 3 6 8 11 7 12 13 14 4 10 17 18 19 20 21 5

1 2 10 17 18 20 3 11 8 12 9 6 7 19 21 13 14 4

1 2 15 10 11 17 7 6 3 8 12 9 13 18 19 20 21 4

1 2 15 17 8 3 4 5 19 20 6 11 12 13 14 16 22 18

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

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

1 2 11 8 3 12 17 18 19 20 21 7 9 13 14 4 10 15

Columns 19 through 36

16 22 19 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
21 16 9 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
16 22 23 24 25 26 27 28 4 5 29 30 31 32 33 34 35 36
13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
14 15 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
16 22 19 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
4 5 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
14 16 9 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
21 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
22 19 18 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
23 24 25 26 8 9 4 5 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
14 16 9 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
19 21 23 24 4 5 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
6 4 5 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
16 22 20 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
16 22 18 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4 5 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 22 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35

36

21 16 22 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35

36

4 5 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

5 21 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

8 9 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

4 5 18 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

10 3 4 5 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

5 21 23 24 25 26 8 9 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

3 4 5 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

16 9 22 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

21 23 24 9 25 26 6 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

16 22 20 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

14 16 22 23 10 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

21 5 22 23 24 25 26 7 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 22 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 9 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

8 9 6 4 5 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

22 20 5 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 22 23 24 25 9 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

7 22 19 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

9 16 22 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35 36

18 21 23 24 25 26 9 7 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

8 9 4 5 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

16 22 23 24 25 26 27 28 4 5 29 30 31 32 33 34 35 36

18 20 19 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

3 4 5 23 24 25 26 7 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

6 20 21 23 24 25 26 9 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

22 20 21 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 22 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

16 22 23 24 25 26 27 28 4 5 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

18 21 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

22 21 23 24 25 26 27 28 4 5 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 9 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

18 10 20 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

5 16 22 23 24 25 26 7 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

13 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

16 22 23 24 25 26 27 28 4 5 29 30 31 32 33 34 35 36

14 16 22 23 5 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

16 22 21 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35
36

21 16 22 23 24 25 26 9 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

9 15 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

5 15 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

5 14 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36

21 23 9 7 10 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

21 15 16 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
16 9 22 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35
36
6 16 22 23 24 25 26 27 28 5 29 30 31 32 33 34 35 36

Station =

Columns 1 through 18

1 1 1 1 1 1 2 2 2 3 3 4 5 5 5 5 6 6
1 1 1 2 2 2 2 3 4 4 5 5 5 6 6 6 6 6
1 1 1 2 2 3 4 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 6
1 1 1 2 2 3 4 4 4 4 4 4 5 5 6 6 6 6
1 1 1 1 1 2 2 3 4 4 5 5 5 5 6 6 6 6
1 1 1 1 2 2 2 3 4 4 5 5 5 6 6 6 6 6
1 1 1 1 1 1 1 2 3 3 4 4 5 5 5 5 5 5
1 1 1 1 2 2 3 3 3 3 4 4 5 5 5 6 6 6
1 1 1 1 2 2 3 4 4 5 6 6 6 6 6 6 6 6
1 1 1 1 1 2 2 3 4 4 4 5 5 5 5 6 6 6
1 1 1 1 1 2 3 3 4 4 4 4 4 5 5 5 5 6
1 1 1 1 2 2 2 3 3 3 3 4 4 4 5 5 5 6
1 1 1 2 2 2 3 4 4 5 5 6 6 6 6 6 6 6
1 1 1 1 1 2 2 2 3 4 4 4 5 5 6 6 6 6
1 1 1 1 2 3 4 4 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6
1 1 1 2 2 2 2 2 3 3 4 4 4 4 5 5 6 6
1 1 1 2 2 3 4 4 5 5 6 6 6 6 6 6 5 5
1 1 1 2 2 2 3 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5 6
1 1 1 1 1 2 3 3 3 3 4 4 5 5 6 6 6 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	6	6	6	6
1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5	5
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5
1	1	1	1	2	3	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5	5
1	1	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	5	5
1	1	1	2	2	3	4	5	5	5	6	6	6	6	5	5	5	5
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	5	5	6	6	6	6
1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5
1	1	1	1	2	2	2	3	3	5	5	5	5	5	5	5	6	6
1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	4	5	5	6	6	6	6
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	5	5	5
1	1	1	1	3	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	5	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	5	5	5	5
1	1	1	1	1	2	3	3	3	3	4	5	5	5	5	5	6	6
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	4	4	5	5	5	5	5	6
1	1	1	2	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	5
1	1	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5	6
1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5
1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5	6
1	1	1	1	1	1	2	2	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6
1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5
1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5
1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5
1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1	1	1	2	2	4	4	4	4	4	4	5	5	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5	5
1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	5	5	5	6
1	1	1	2	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6
1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	4	5	5	5	5	5	6	6
1	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6
1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	5	5
1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
1	1	1	1	2	2	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6
1	1	1	1	2	2	4	4	4	4	5	5	6	6	6	6	6	6
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5
1	1	1	1	1	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5	5
1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	6	6	6	6	5
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	5	5	6	6	6	6	6
1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	5
1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	5	5	5	6	6	6	6	6
1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6
1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	6	6	6	6	5	5	4	4
1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	5	5
1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	5	5

Columns 19 through 36

6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3	2	2	2	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3	3	2	1	1	1	1
6	6	5	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	5	4	4	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	5	5	4	4	3	3	3	2	2	2	1	1	1
6	6	6	6	5	5	4	4	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	2	2	2	1	1
6	6	6	6	6	5	5	4	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1
6	5	5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	3	2	2	2	1	1	1
6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	3	2	2	1	1	1
6	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1
5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2	2	1	1	1
6	6	6	6	6	5	4	4	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1
5	5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	5	5	4	4	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	5	5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	2	2	2	1	1	1
6	5	5	5	5	5	5	4	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	2	2	1	1	1
5	6	6	6	6	6	6	6	6	5	4	4	3	3	2	1	1	1
5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	4	4	3	2	2	1	1	1
6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1
5	6	6	6	6	6	6	5	4	4	4	4	3	3	2	1	1	1
5	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	2	2	1	1
6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2	1
6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	2	2	1	1	1	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	4	4	4	3	2	1	1	1
6	6	5	5	5	4	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1
6	6	5	5	5	5	4	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1
5	5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3	1	1	1	1
6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	2	2	2	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	4	3	3	3	2	1	1	1
5	5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3	3	2	2	1	1
6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	2	2	2	1
6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	3	3	1	1	1	1
6	6	6	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1
6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4	2	2	1	1
5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	3	3	2	1	1	1
5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	3	3	1	1
5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	2	2	1	1
4	4	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	3	1	1	1
4	5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	3	3	1	1
6	6	6	6	5	5	5	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	1
6	6	6	6	5	5	5	5	5	4	4	4	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4	4	3	2	2	1	1	1
6	6	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	2	2	2	2	1	1
6	6	6	6	5	5	5	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1
5	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	3	3	3	3	2
4	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	4	3	3	1	1	1
6	6	6	6	5	5	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	2	2	2	2	1	1
6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	3	2	2	2	2	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4	5	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	2	2	1	1	1	1
5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	3	3	1	1	1	1
4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	3	3	1	1
4	5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	5	2	2	1	1	1	1
5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	1	1	1	1
6	6	6	5	5	5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	1	1
6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	4	1	1	1	1
6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	3	3	3	3	2	2
6	6	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	1	1
6	6	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1
5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	3	3	3	3	1	1
4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1
5	5	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	2	2	2	1	1	1
5	5	5	5	6	6	6	5	5	5	5	4	4	4	1	1	1	1

WT_DOW_J =

1.0e+003 *

0.0268	1.4305	0.0060
0.0272	1.4137	0.0060
0.0289	1.4011	0.0060
0.0307	1.4010	0.0060
0.0308	1.3967	0.0060
0.0329	1.3957	0.0060
0.0329	1.3754	0.0060
0.0336	1.3745	0.0060
0.0353	1.3705	0.0060
0.0376	1.3566	0.0060

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.0377	1.3454	0.0060
0.0385	1.3355	0.0060
0.0413	1.3347	0.0060
0.0413	1.3262	0.0060
0.0419	1.3233	0.0060
0.0436	1.3224	0.0060
0.0446	1.3223	0.0060
0.0463	1.3211	0.0060
0.0466	1.3196	0.0060
0.0467	1.3014	0.0060
0.0482	1.3014	0.0060
0.0486	1.2993	0.0060
0.0487	1.2992	0.0060
0.0497	1.2934	0.0060
0.0498	1.2829	0.0060
0.0509	1.2762	0.0060
0.0512	1.2756	0.0060
0.0513	1.2755	0.0060
0.0545	1.2725	0.0060
0.0575	1.2309	0.0060
0.0586	1.2288	0.0060
0.0604	1.2229	0.0060
0.0627	1.2164	0.0060
0.0638	1.1939	0.0060
0.0652	1.1909	0.0060
0.0663	1.1843	0.0060
0.0681	1.1815	0.0060
0.0689	1.1784	0.0060
0.0691	1.1783	0.0060
0.0691	1.1722	0.0060

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.0701	1.1600	0.0060
0.0725	1.1577	0.0060
0.0739	1.1442	0.0060
0.0741	1.1424	0.0060
0.0762	1.1420	0.0060
0.0777	1.1383	0.0060
0.0793	1.1064	0.0060
0.0798	1.0875	0.0060
0.0845	1.0700	0.0060
0.0891	1.0591	0.0060
0.0934	1.0578	0.0060
0.0946	1.0393	0.0060
0.0946	1.0317	0.0060
0.1001	1.0301	0.0060
0.1009	1.0185	0.0060
0.1010	1.0176	0.0060
0.1017	1.0063	0.0060
0.1070	1.0026	0.0060
0.1072	0.9816	0.0060
0.1075	0.9761	0.0060
0.1091	0.9690	0.0060
0.1109	0.9360	0.0060
0.1120	0.9350	0.0060
0.1127	0.9330	0.0060
0.1146	0.9220	0.0060
0.1224	0.9140	0.0060
0.1250	0.8638	0.0060
0.1295	0.8522	0.0060
0.1315	0.8249	0.0060
0.1316	0.8228	0.0060

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

0.1407 0.7943 0.0060

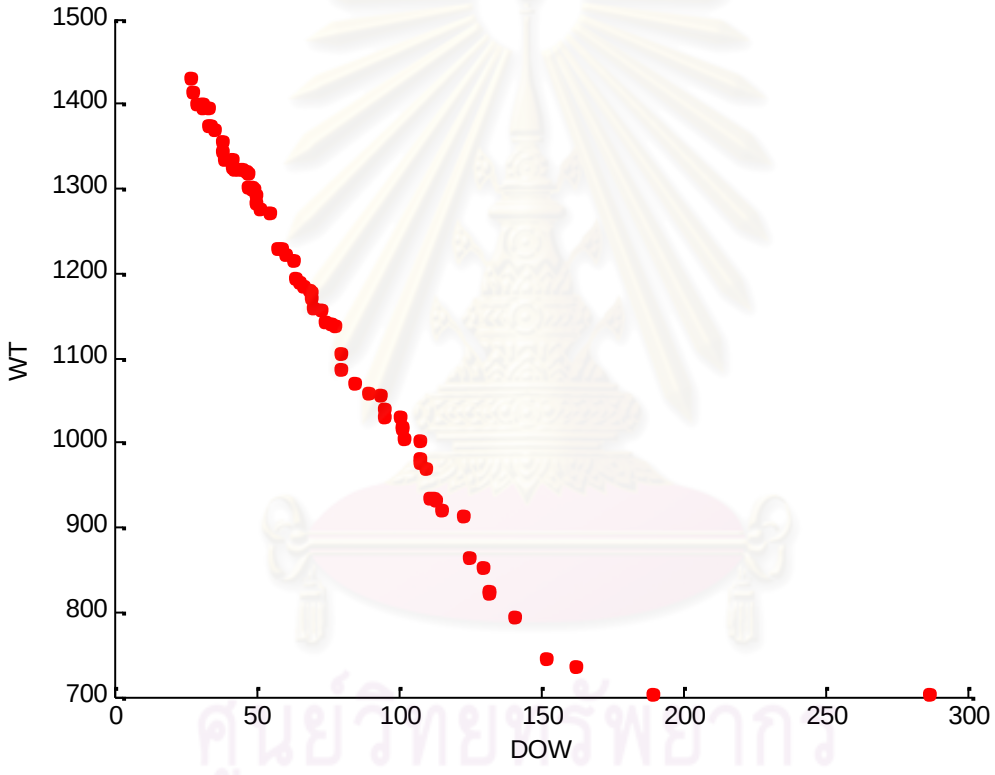
0.1515 0.7452 0.0060

0.1623 0.7357 0.0060

0.1895 0.7045 0.0060

0.2864 0.7030 0.0060

Elapsed time is 374.380887 seconds.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชรัด จิรโกเมศ เกิดเมื่อวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ.2525 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2549 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย