

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Multi-objective Sequencing Problem on Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines.



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน
โดย	นายการ์นต์ กันภัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธิวัชรนิช)

การ์นต์ กัณภัย : การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน (Multi-objective Sequencing Problem on Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร.ปารเมศ ชูติมา, 217 หน้า.

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน จัดเป็นปัญหาแบบเอ็นพียาก (non-deterministic polynomial time hard; NP-Hard) ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องใช้วิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic)

บทความนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจุแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Extended: COIN-E) เพื่อใช้สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมี 3 วัตถุประสงค์ที่จะถูกทำให้เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน ได้แก่ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่สำเร็จในการผลิตน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

ผลจากการทดลองแก้ปัญหาที่มีลักษณะต่างๆที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า COIN-E มีสมรรถนะในการแก้ปัญหาที่สูงกว่าการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) ซึ่งเป็นอีกอัลกอริทึมที่ได้รับความนิยม ทั้งในดัชนีการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบพาราเรโต ดัชนีด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาราเรโต (NNDS) และดัชนีเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670491921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: MIXED-MODEL MULTI-MANNED ASSEMBLY LINES / COMBINATORIAL OPTIMIZATION WITH COINCIDENCE EXPAND ALGORITHM

KARAN KANPAI: Multi-objective Sequencing Problem on Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines.. ADVISOR: PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 217 pp.

Multi-objective sequencing problem on mixed-model multi-manned assembly lines is known to be NP-hard resulting in being nearly impossible to obtain an optimal solution for practical problems.

This research presents a method called Combinatorial Optimization with Coincidence Expand Algorithm (COIN-E) for the sequencing problem. Three objectives are simultaneously considered; minimum production rates variance, minimum utility work, and minimum setup times.

The results from the experiments clearly show that COIN-E has better performances than other three well-known algorithms, namely Non-dominated Sorting Genetic Algorithms (NSGA-II), Biogeography Based Optimization (BBO) and Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) in terms of convergence to the Pareto-optimal set, ratio of non-dominated solution I (RNDS-I), ratio of non-dominated solution II (RNDS-II), Number of Non-dominated Solution (NNDS) and computation time to solution

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้มอบความรู้และคำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณปวีศ เอกพิทักษ์ธรรม สำหรับความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ดังที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งอยู่เบื้องหลังความสำเร็จของผู้วิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ผ
หน้า.....	ผ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีดังต่อไปนี้	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ลักษณะทั่วไปของสายการประกอบ.....	8
2.1.1 รูปแบบของสายการประกอบ.....	8
2.1.2 ประเภทของสายการประกอบ.....	12
2.3 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม แบบหลายคน	14
2.4 วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับการผลิต (Objective Functions).....	20
2.3.2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด	24
2.3.3 เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด.....	31
2.4 ลำดับการผลิตที่เป็นไปได้.....	33

2.5	กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด	34
2.6	การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด.....	35
2.6.1	การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง	36
2.6.2	การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้	36
2.6.3	การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ	37
2.6.3.1	Ratio of non-dominated solutions (self-comparison)	37
2.6.3.2	Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison).....	37
2.6.4	ตัวชี้วัดสมรรถนะของจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ	38
2.6.5	ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time).....	38
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3	การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต.....	41
3.1	วิธีการของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย.....	41
3.2	ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย.....	41
3.3	ตัวอย่างการนำการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน.....	44
3.3.1	การสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้น.....	44
3.3.2	การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น	45
3.3.3	การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่น.....	45
3.3.4	การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดี	46
3.3.5	การปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น	48
3.3.6	เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการทำงาน.....	52

3.4 การทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล	53
3.4.1 ผังขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล.....	53
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์	54
3.4.3 ตัวอย่างการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล	55
บทที่ 4 การประยุกต์ใช้เงินเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต .62	
4.1 วิธีการของเงินเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II).....	62
4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของเงินเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)	62
4.3 ตัวอย่างการนำเงินเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน.....	65
4.3.1 การนำเข้าข้อมูล	65
4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น.....	65
4.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	67
4.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบของประชากรเริ่มต้น..	67
4.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบ (Selection).....	68
4.3.5.1 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)	68
4.3.5.2 การสร้างวงล้อรูเล็ต.....	69
4.3.5.3 ขั้นตอนการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection	70
4.3.6 การครอสโอเวอร์ (Crossover).....	71
4.3.6.1 การจับคู่สตริงคำตอบ	71
4.3.6.2 ขั้นตอนการครอสโอเวอร์.....	72
4.3.7 การมิวเตชัน.....	74
4.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด.....	75

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของ สิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์ ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต.....	78
5.1 วิธีการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์.....	78
5.2 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตาม ภูมิศาสตร์.....	79
5.3 ตัวอย่างการนำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการ ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน.....	82
5.3.1 การนำเข้าข้อมูล	82
5.3.2 การสร้างเซตตรงคำตอบเริ่มต้น	82
5.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	84
5.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท.....	85
5.3.5 การคำนวณค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพคำตอบ	86
5.3.6 การอพยพคำตอบ	87
5.3.7 การมีเวชัน.....	92
5.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด.....	94
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง ในการแก้ปัญหาการ จัดลำดับการผลิต.....	96
6.1 วิธีการของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง	96
6.2 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง	96
6.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้ ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ ผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน.....	99
6.3.1 การนำเข้าข้อมูล	99

6.3.2 การสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้น	99
6.3.3 การประเมินค่าหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์	100
6.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่น	100
6.3.5 การปรับปรุงตาราง	102
6.3.5 กระบวนการทำงานในรอบต่อไป.....	106
บทที่ 7 การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต.....	112
7.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง	112
7.2 วิธีการทดลอง.....	114
7.3 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม	114
7.4 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 1	116
7.4.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1	116
7.4.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2	117
7.4.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1... ..	118
7.4.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2... ..	119
7.5 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 1	120
7.5.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1	120
7.5.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2	121
7.5.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1... ..	122
7.5.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2... ..	123
7.6 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 1	124
7.6.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1	124
7.6.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2	125
7.6.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1... ..	126

7.16 สรุปท้ายบท	156
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	159
8.1 บทสรุปงานวิจัย	159
8.2 ข้อเสนอแนะ	161
รายการอ้างอิง	164
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	217



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทำวิจัย (Tiacci 2015).....	6
ตารางที่ 2.1 ชั้นงาน เวลาดำเนินงาน และเวลาปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D.....	15
ตารางที่ 2.2 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่ผ่านการจัดสมดุล.....	16
ตารางที่ 2.3 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 1 (Model A).....	16
ตารางที่ 2.4 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 2 (Model B).....	17
ตารางที่ 2.5 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 3 (Model C).....	17
ตารางที่ 2.6 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 4 (Model D).....	18
ตารางที่ 2.7 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 5 (Model B).....	18
ตารางที่ 2.8 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 6 (Model C).....	19
ตารางที่ 2.9 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 7 (Model C).....	19
ตารางที่ 2.10 ชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D.....	20
ตารางที่ 2.11 ลำดับของผลิตภัณฑ์ในแต่ละชั้นงาน.....	21
ตารางที่ 2.12 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9 และ 11.....	21
ตารางที่ 2.13 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 10.....	22
ตารางที่ 2.14 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 2.....	22
ตารางที่ 2.15 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 6.....	22
ตารางที่ 2.16 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 12.....	23
ตารางที่ 2.17 ผลการคำนวณความผันแปรของการผลิตของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C.....	23
ตารางที่ 2.18 เวลาดำเนินงานรวมในแต่ละสถานีงานของแต่ละผลิตภัณฑ์.....	25
ตารางที่ 2.19 การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคู่สถานีงานที่ 1.....	26

ตารางที่ 2.20 การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคูสตาเนียงานที่ 1	27
ตารางที่ 2.21 การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคูสตาเนียงานที่ 2	27
ตารางที่ 2.22 การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคูสตาเนียงานที่ 2	28
ตารางที่ 2.23 การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคูสตาเนียงานที่ 3	29
ตารางที่ 2.24 การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคูสตาเนียงานที่ 3	30
ตารางที่ 2.25 ขั้นตอนการสุ่มเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร.....	31
ตารางที่ 2.26 ผลรวมเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C	32
ตารางที่ 3.1 ตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น	45
ตารางที่ 3.2 สตริงคำตอบเริ่มต้น.....	45
ตารางที่ 3.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น	46
ตารางที่ 3.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบเริ่มต้น	46
ตารางที่ 3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางวิธีการบรรจวบ	47
ตารางที่ 3.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1	47
ตารางที่ 3.7 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2.....	47
ตารางที่ 3.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3.....	48
ตารางที่ 3.9 ตารางวิธีการบรรจวบหลังการปรับปรุง.....	49
ตารางที่ 3.10 ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 หลังการปรับปรุง.....	50
ตารางที่ 3.11 ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 หลังการปรับปรุง.....	51
ตารางที่ 3.12 ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 หลังการปรับปรุง.....	52
ตารางที่ 3.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน.....	52
ตารางที่ 3.14 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในรอบการทำงาน	53
ตารางที่ 4.1 ลำดับการผลิตของกลุ่มประชากรเริ่มต้น	67
ตารางที่ 4.2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น	67

ตารางที่ 4.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นของประชากร เริ่มต้น.....	68
ตารางที่ 4.4 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง.....	68
ตารางที่ 4.5 การสร้างวงล้อสุ่ม.....	69
ตารางที่ 4.6 การคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection.....	71
ตารางที่ 4.7 การจับคู่สตริงคำตอบ.....	72
ตารางที่ 4.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการมิวเตชัน.....	74
ตารางที่ 4.9 สตริงคำตอบหลังการมิวเตชัน.....	75
ตารางที่ 4.10 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่น.....	76
ตารางที่ 4.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก.....	76
ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบ รุ่นลูก.....	77
ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป.....	77
ตารางที่ 5.1 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	84
ตารางที่ 5.2 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบชั่วคราว.....	84
ตารางที่ 5.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว.....	84
ตารางที่ 5.4 ค่าความแข็งแรงและค่าฟิตเนสของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบ ชั่วคราว.....	85
ตารางที่ 5.5 ค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพคำตอบ.....	86
ตารางที่ 5.6 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ.....	88
ตารางที่ 5.7 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ.....	88
ตารางที่ 5.8 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ.....	89
ตารางที่ 5.9 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 3.....	90
ตารางที่ 5.10 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2.....	90

ตารางที่ 5.11 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 1.....	91
ตารางที่ 5.12 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ.....	91
ตารางที่ 5.13 ค่าที่ใช้ประกอบการมีเวชันของเซตสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ	92
ตารางที่ 5.14 การเลือกปิดไปทำการมีเวชัน.....	93
ตารางที่ 5.15 การมีเวชันสตริงคำตอบ Z_2'	93
ตารางที่ 5.16 การมีเวชันสตริงคำตอบ Z_3'	93
ตารางที่ 5.17 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการ ...	94
ตารางที่ 5.18 การประเมินค่าค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด ในกระบวนการ.....	95
ตารางที่ 5.19 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรุ่นถัดไป	95
ตารางที่ 6.1 ประชากรคำตอบเริ่มต้น.....	100
ตารางที่ 6.2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น	100
ตารางที่ 6.3 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 1	101
ตารางที่ 6.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 2	101
ตารางที่ 6.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละ ฝูง.....	101
ตารางที่ 6.6 การเก็บค่าที่ดีที่สุด	101
ตารางที่ 6.7 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 1	102
ตารางที่ 6.8 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 2	102
ตารางที่ 6.9 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1	103
ตารางที่ 6.10 การปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2.....	104
ตารางที่ 6.11 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1	104
ตารางที่ 6.12 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2.....	104
ตารางที่ 6.13 การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 1.....	105

ตารางที่ 6.14 การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 2.....	105
ตารางที่ 6.15 ประชากรคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานที่ 2.....	106
ตารางที่ 6.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบการทำงานที่ 2.....	106
ตารางที่ 6.17 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2.....	107
ตารางที่ 6.18 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2.....	107
ตารางที่ 6.19 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง.....	107
ตารางที่ 6.20 การเก็บค่าที่ดีที่สุดของการทำงาน 2 รอบ.....	108
ตารางที่ 6.21 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2.....	108
ตารางที่ 6.22 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2.....	108
ตารางที่ 6.23 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2.....	109
ตารางที่ 6.24 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2.....	109
ตารางที่ 6.25 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2.....	110
ตารางที่ 6.26 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2.....	110
ตารางที่ 6.27 การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2....	110
ตารางที่ 6.28 การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2....	111
ตารางที่ 7.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	112
ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม.....	115
ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1.....	116
ตารางที่ 7.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1.....	118

ตารางที่ 7.44 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2.....	153
ตารางที่ 7.45 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1.....	153
ตารางที่ 7.46 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2.....	154
ตารางที่ 7.47 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1.....	154
ตารางที่ 7.48 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2.....	155
ตารางที่ 7.49 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1.....	155
ตารางที่ 7.50 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2.....	156
ตารางที่ 7.51 ผลการทดลองโดยเฉลี่ยของทุกขนาดปัญหา.....	158
ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัย.....	169
ตารางที่ ก. 2 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4	170
ตารางที่ ก. 3 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15.....	171
ตารางที่ ก. 4 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4	172
ตารางที่ ก. 5 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15.....	173
ตารางที่ ก. 6 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4	175
ตารางที่ ก. 7 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15.....	178

ตารางที่ ก. 8 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4.....	181
ตารางที่ ก. 9 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15.....	186
ตารางที่ ก. 10 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน	192
ตารางที่ ก. 11 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน	194
ตารางที่ ก. 12 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน	195
ตารางที่ ก. 13 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน	198
ตารางที่ ก. 14 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน	204
ตารางที่ ก. 15 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน	205
ตารางที่ ก. 16 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน	207
ตารางที่ ก. 17 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน	210

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ทิศทางการไหลของชิ้นงาน	8
รูปที่ 2.2 ลักษณะของสายการประกอบแบบสองด้าน (Kim, Kim et al. 2000).....	8
รูปที่ 2.3 ชิ้นงานของสายการประกอบแบบสองด้าน (Özcan and Toklu 2009).....	9
รูปที่ 2.4 สายการประกอบแบบสองด้านในอุตสาหกรรมยานยนต์จริง	9
รูปที่ 2.5 สายการประกอบแบบขนาน	10
รูปที่ 2.6 สายการประกอบแบบตัวยู.....	10
รูปที่ 2.7 สายการประกอบแบบวงกลม/ปิด.....	11
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสายการประกอบแบบหลายคน.....	11
รูปที่ 2.9 สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว.....	12
รูปที่ 2.10 สายการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์.....	12
รูปที่ 2.11 สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ผสม.....	12
รูปที่ 2.12 Pareto Optimal Solution (Chutima and Chimklai 2012)	14
รูปที่ 2.13 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่จัดสมดุลที่ความยาวสถานีงาน 8.5 .15	
รูปที่ 2.14 แผนภาพความสัมพันธ์รวมของผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D.....	16
รูปที่ 2.15 การค้นหาพื้นที่คำตอบในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์.....	35
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย .43	
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II).....	64
รูปที่ 4.2 การสร้างวงล้อสุ่ม.....	70
รูปที่ 4.3 การให้น้ำหนักกับค่าของสตริงที่อยู่ในขอบเขตของการครอสโอเวอร์.....	73
รูปที่ 4.4 การแลกเปลี่ยนค่าน้ำหนักระหว่างสตริงคำตอบ.....	73
รูปที่ 4.5 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด	75

รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัว ของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์	81
รูปที่ 5.2 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตรีงคำตอบอพยพออก.....	87
รูปที่ 5.3 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตรีงไปทำการมิวเตชัน	92
รูปที่ 6.1 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง	98
รูปที่ 7.1 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1.....	116
รูปที่ 7.2 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1.....	117
รูปที่ 7.3 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1.....	118
รูปที่ 7.4 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1.....	119
รูปที่ 7.5 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1.....	120
รูปที่ 7.6 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1.....	121
รูปที่ 7.7 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1.....	122
รูปที่ 7.8 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1.....	123
รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1.....	124
รูปที่ 7.10 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1.....	125

รูปที่ 7.24 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2.....	139
รูปที่ 7.25 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2.....	140
รูปที่ 7.26 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2.....	141
รูปที่ 7.27 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2.....	142
รูปที่ 7.28 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2.....	143
รูปที่ 7.29 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2.....	144
รูปที่ 7.30 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2.....	145
รูปที่ 7.31 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วน ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2.....	146
รูปที่ 7. 32 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2.....	147

บทที่ 1

บทนำ

สายการประกอบ (Assembly Line) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow-Shop Production System) ซึ่งในอดีตระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมาก (Mass Production) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยการเพิ่มสัดส่วน (Ratio) ระหว่างปริมาณงานที่ทำในช่วงเวลาหนึ่ง (Throughput) กับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น (Required Costs) (Cevikcan, Durmusoglu et al. 2009) โดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ หน่วยการผลิตหรือสถานีงาน (Work Station) และชิ้นงาน (Task) ที่นำมาจัดลงสถานีงานข้างต้น ซึ่งในแต่ละสายการประกอบ สถานีงานต่างๆจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยระบบขนย้ายชิ้นงาน เช่น ระบบสายพาน เพื่อทำหน้าที่เคลื่อนย้ายชิ้นงานจากสถานีงานแรก จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่จุดสิ้นสุดของสายการประกอบ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตนั้นสายการประกอบจะมีลักษณะการวางในรูปแบบเส้นตรงเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการไหลของชิ้นงาน แต่สายการประกอบแบบดั้งเดิมนี้อาจมีข้อด้อยที่เกิดขึ้นหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่นต่ำ (Low Flexibility) ความสูญเสียที่เกิดจากการจัดสมดุล (High Balance Loss) คุณภาพต่ำ (Poor Quality) สภาพแวดล้อมการทำงานที่ไม่เหมาะสม (Poor Working Environment) งานในกระบวนการผลิตมีปริมาณสูง (High Work-In-Process) และต้นทุนด้านวัตถุดิบสูง (High Cost of Material Handling) (Burbidge 1991), (Gustavsson 1995) ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาการจัดวางสายการประกอบรูปแบบอื่นๆ ซึ่งมีจุดประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป อาทิเช่น สายการประกอบรูปตัวยู หรือ U-Shaped Line (Miltenburg and Wijngaard 1994) สายการประกอบแบบสองด้าน หรือ Two-Sided Line (Bartholdi 1993) สถานีงานแบบขนาน หรือ Parallel Workstations (McMullen and Frazier 1998) สายการประกอบแบบขนาน หรือ Parallel Lines (Süer and Dagli 1994) และสายการประกอบแบบหลายคน หรือ Multi-Manned Assembly Lines ซึ่งเป็นประเภทของสายการประกอบที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยครั้งนี้

สายการประกอบแบบหลายคน (Multi-Manned Assembly Lines) ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อบรรลุนโยบายของสายการผลิตแบบดั้งเดิมที่กล่าวมาข้างต้น (Bukchin, Darel et al. 1997) และมี

จุดมุ่งหมายหลักเพื่อลดความยาวของสายการประกอบดั้งเดิม ในขณะที่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (Bartholdi 1993) สายการประกอบแบบหลายคนมีลักษณะการทำงานในรูปแบบที่แต่ละสถานีงาน จะประกอบไปด้วยพนักงานมากกว่า 1 คน ปฏิบัติงานในช่วงเวลาเดียวกัน บนผลิตภัณฑ์เดียวกัน แต่พนักงานแต่ละคนปฏิบัติชิ้นงานที่แตกต่างกันออกไป และพนักงานแต่ละคนจะไม่มีภารกิจการทำงานร่วมกันและกันบนสายการประกอบนั้นๆ ซึ่งมีข้อแตกต่างจากสายการประกอบแบบขนานคือ พนักงานปฏิบัติงานงานเดียวกัน แต่คนละผลิตภัณฑ์ ซึ่งสายการประกอบประเภทนี้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ (Large size) และต้องการผลิตในปริมาณสูง (High Volume) เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น (Dimitriadis 2006)

การกำหนดจำนวนพนักงานในแต่ละสถานีงาน ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าโดยผู้ออกแบบระบบซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของพนักงานแต่ละตำแหน่ง ขนาดของผลิตภัณฑ์ เครื่องมือที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ การออกแบบสถานีงาน และอื่นๆ (Fattahi, Roshani et al. 2011) ซึ่งในแต่ละสถานีงานอาจประกอบไปด้วยพนักงานมากกว่า 1 คน ซึ่งมีภาระงานแตกต่างกัน แต่ปฏิบัติงานบนผลิตภัณฑ์เดียวกัน

(Fattahi, Roshani et al. 2011) ได้นำเสนอตัวอย่างของปัญหาการจัดสายประกอบที่มีรอบเวลาการผลิต (Cycle time) เท่ากับ 6 กำหนดให้จำนวนพนักงานสูงสุดของแต่ละสถานีงานสูงสุดเท่ากับ 3 คน และมีการกำหนดแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ก่อนหลังของตัวอย่างปัญหาที่ชัดเจน เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาทำการจัดสายการประกอบแบบดั้งเดิมจะประกอบไปด้วยสถานีงาน 7 สถานี แต่ถ้าจัดสายการประกอบแบบหลายคน จำนวนสถานีงานจะลดลงเหลือเพียง 3 สถานี และมีปริมาณงานที่ทำในช่วงผลิตภัณฑ์หนึ่ง (Throughput) ลดลงจาก 36 เหลือเพียง 18 และปริมาณงานในระบบ (Work In Process: WIP) ลดลงครึ่งหนึ่งจากเดิม จึงเห็นได้ว่าผลของการจัดสายการประกอบแบบหลายคนนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

หากมองในมุมมองของผู้บริโภคพบว่า ปัจจุบันมีการแข่งขันด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ที่สูงเนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคมีความหลากหลายและมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วต่อตัวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยว (Single-Model Assembly Lines) ไม่สามารถตอบสนองได้อย่างเหมาะสม จึงทำให้มีการพัฒนาจนเกิดสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Lines) ซึ่งเป็นสายการประกอบที่มีการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ในแต่ละรุ่น (Model) ที่แตกต่างกันบนสายการประกอบเดียวกัน ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่นจะมีพื้นฐานการประกอบ วัตถุประสงค์ และชิ้นส่วนที่เหมือนกัน (Common Base Product) แต่จะแตกต่างกันที่รายละเอียดปลีกย่อยในแต่ละรุ่นตามความต้องการของผู้บริโภค (Customizing by the (de-

)selection of optional feature) (Boysen, Fliedner et al. 2007) ทั้งนี้ นับว่ามีความน่าสนใจ เป็นอย่างยิ่งหากจะทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมมีข้อดีมากขึ้นไปอีก ด้วยการนำเอาแนวคิด ของสายการประกอบแบบหลายคนตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นมาใช้ร่วมกัน หรือเรียกว่าเป็น “สายการ ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน” (Mixed-Model Muti-Manned Assembly Lines)

จากการนำสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมมาประยุกต์ใช้ จะพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้น คือ การจัดลำดับการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพตามที่โรงงานต้องการ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้กันทั่วไปนั้นมีหลาย วัตถุประสงค์ เช่น ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด อัตราการผันแปรของ การผลิตน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ต้นทุน/เวลาที่ใช้ในการปรับเครื่องจักร น้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของปริมาณงาน ความเสี่ยงในการหยุดสายการประกอบน้อยที่สุด ฯลฯ (Akgunduz and Tunali 2011) ซึ่งการที่จะพิจารณาวัตถุประสงค์หลายๆวัตถุประสงค์พร้อมกันนั้น มีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ ผสมเป็นปัญหา NP-hard แบบ Combinatorial Optimization โดยการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการ ค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาประเภทนี้เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น และให้คำตอบที่ค่อนข้างดีเป็นที่ ยอมรับได้และบ่อยครั้งที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานมากอีกด้วย (ชุตินา 2008) เช่น

การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II; NSGA-II), ถูกนำเสนอโดย (Deb, Pratap et al. 2002) เป็นวิธีการหาคำตอบที่พัฒนามาจาก กระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural Selection) และกระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Natural Genetics) โดยอาศัยทฤษฎีการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมไปสู่รุ่นลูกหลาน เริ่มจากการคัดเลือก สตริงคำตอบ (String) หรือ โครโมโซม (Chromosome) ออกมาอย่างสุ่มซึ่งประกอบด้วยคุณลักษณะ (Character) หรือ ยีน (Gene) ที่แตกต่างกันในแต่ละสตริง และนำสตริงคำตอบไปผ่านกระบวนการ เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด หรือมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization; DPSO) ถูกนำเสนอโดย (Kennedy and Eberhart 1995) เป็นวิธีการหา คำตอบที่พัฒนามาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการบินหาอาหารของฝูงนก ซึ่งได้ทำการจดจำเส้นทาง จากประสบการณ์ที่เคยผ่านมาของตัวเองและของสมาชิกภายในฝูง โดยนกแต่ละตัวจะแทนด้วย อนุภาค (Particle) โดยใช้หลักการการเคลื่อนที่ (Velocity) ไปในจุดหมายและทิศทางต่าง ๆ และทำ การจดจำคำตอบที่ได้พบ ซึ่งอนุภาคทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อย ๆ เรียกว่า ฝูง (Swarm) โดย

ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูงจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution : Lbest) และตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดจะเรียกว่า ค่าที่เหมาะสมแบบวงกว้าง (Global Best Solution : Gbest)

การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization; BBO) ถูกพัฒนาขึ้นโดย (Simon 2008) ซึ่งมีแนวคิดมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมการอพยพย้ายถิ่นฐานของสายพันธุ์สัตว์หรือสปีชีส์ (Species) ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของเกาะที่อยู่อาศัย ซึ่งหลักการก็คือการพยายามถ่ายทอดคุณลักษณะระหว่างกันของกลุ่มคำตอบ โดยคำตอบที่ดีนั้นมีโอกาสสูงที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น แต่มีโอกาสน้อยที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นเข้าสู่คำตอบตนเอง ในทางตรงกันข้าม คำตอบที่แย่นั้นมีโอกาสน้อยที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นเข้าสู่คำตอบตนเอง แต่มีโอกาสน้อยที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่นๆ โดยหลังจากมีการถ่ายทอดคุณลักษณะระหว่างกันของคำตอบแล้วคาดหวังว่าคำตอบที่แย่นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น และทำให้คำตอบที่ดีอยู่แล้วนั้นดียิ่งขึ้นไปอีกจนในท้ายที่สุดได้คำตอบเป็นที่มีความเหมาะสม

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Expand: COIN-E) มีแนวคิดหลักนั้นเป็นการศึกษาแนวทางของคำตอบที่ดี (Good) และคำตอบที่ไม่ดี (Not Good) ที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน โดยสตริงคำตอบที่ดีจะทำการให้รางวัล (Reward) แต่ถ้าสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ไม่ดีก็จะทำการลงโทษ (Punish) เพื่อเป็นตัวกำหนดทิศทางของคำตอบสุดท้าย โดยมีการสร้างตารางความน่าจะเป็นขึ้นมาจากคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์แล้วสุ่มเลือกมาสร้างประชากรเริ่มต้น โดยมีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นตลอดเวลาในแต่ละรอบ โดยปรับปรุงตามคำตอบที่ดีและคำตอบที่ไม่ดี ถ้าเกิดเป็นคำตอบที่ดีค่าความน่าจะเป็นก็จะมากขึ้นเพื่อใช้ในการสุ่มรอบถัดไป แต่ถ้าคำตอบไม่ดีค่าความน่าจะเป็นก็จะถูกลดลงเพื่อจะได้สุ่มเจอน้อยลงในรอบถัดไป ทำให้คำตอบที่ได้ในอนาคตมีลักษณะลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีที่สุดในที่สุด (นพพล 2008)

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จึงเสนอแนวทางการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพื่อให้ตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกัน ของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน มีวัตถุประสงค์ดังนี้
 - (1) เพื่อหาค่าความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Variance of Production Rates)
 - (2) เพื่อหาปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work)
 - (3) เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด (Minimizing Set up Time)
2. ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน มีการประกอบผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และสามารถสลับลำดับการเข้าสู่สายการประกอบได้อย่างอิสระ
3. ในการจัดลำดับการผลิต จะใช้ 2 configuration จากสายการประกอบที่จัดสมดุล
4. กำหนดให้จำนวนสถานีงานสูงสุดในแต่ละสถานีงานรวม (Mated-Station) ไม่เกิน 4 สถานีงาน
5. นำวิธีการของการประยุกต์ใช้เงินเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (DPSO) การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการบรรจบแบบขยาย (COIN-E) มาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบ
6. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา ประกอบไปด้วยตัวชี้วัด 6 ตัวได้แก่ การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

เชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time)

7. ใช้โปรแกรมภาษา C++ ในการแก้ปัญหา
8. ปัญหาของการจัดลำดับการผลิตที่จะทำการศึกษามีรายละเอียดดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทำวิจัย (Tiacci 2015)

ที่มาของปัญหา	No. of Task	MPS	Configuration	Replicate
Roszing	25	10 (1:2:3:4)	1	1
				2
			2	1
				2
		115 (25:35:40:15)	1	1
				2
			2	1
				2
Gunther	35	10 (1:2:3:4)	1	1
				2
			2	1
				2
		115 (25:35:40:15)	1	1
				2
			2	1
				2
Weemag	75	10 (1:2:3:4)	1	1
				2
			2	1
				2
		115 (25:35:40:15)	1	1
				2
			2	1
				2

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทำวิจัย

ที่มาของปัญหา	No. of Task	MPS	Configuration	Replicate
Barthold	128	10 (1:2:3:4)	1	1
				2
			2	1
				2
		115 (25:35:40:15)	1	1
				2
			2	1
				2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

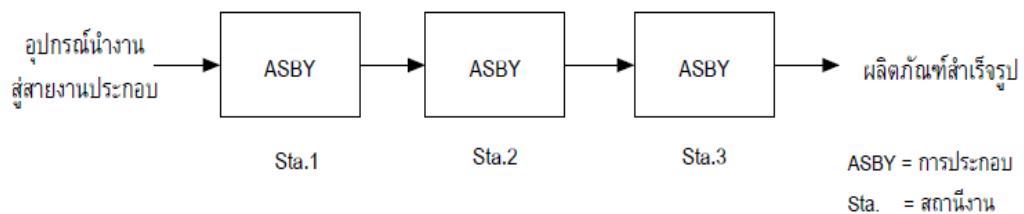
- 1.4.1 ทำให้การแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่มีหลายวัตถุประสงค์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ช่วยลดความยุ่งยากและลดเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหา
- 1.4.2 สามารถนำวิธีการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่ได้จากการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานสายการประกอบในอุตสาหกรรมจริง
- 1.4.3 สามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมและวิธีการจัดลำดับการผลิตวิธีอื่นๆ ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปของสายการประกอบ

สายการประกอบเป็นลักษณะที่มีชิ้นส่วนที่ผลิตไหลไปตามหน่วยการผลิตที่เรียกว่า สถานีงาน (Work Station) โดยที่ชิ้นส่วนที่ไหลไปอยู่ที่สถานีงานใดแล้วจะต้องทำการประกอบในสถานีนั้นให้เสร็จตามระยะเวลาที่ชิ้นส่วนนั้นต้องการเรียกว่า ระยะเวลาดำเนินงาน โดยเมื่อชิ้นส่วนนั้นได้ทำการประกอบที่สถานีใดเสร็จก็จะถูกส่งต่อไปยังสถานีงานต่อไปจนครบสถานีงานที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.1

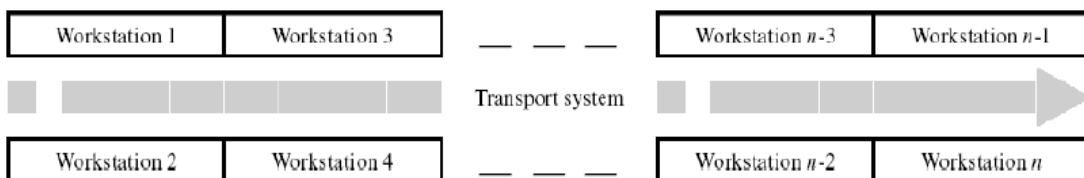


รูปที่ 2.1 ทิศทางการไหลของชิ้นงาน

2.1.1 รูปแบบของสายการประกอบ

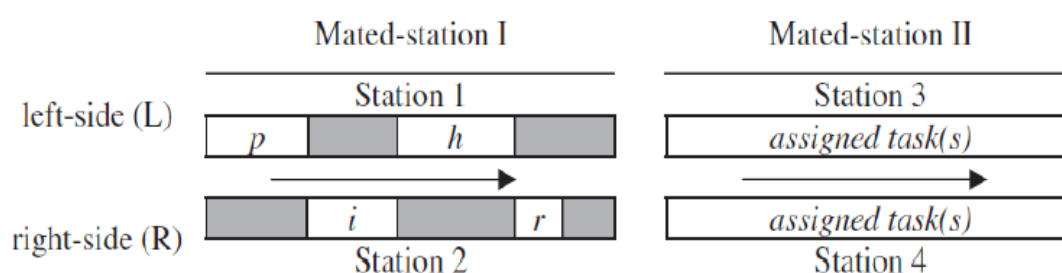
สายการประกอบแบบเส้นตรง (Straight Line) เป็นสายการประกอบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์จะไหลในทิศทางเป็นเส้นตรงตั้งแต่สถานีแรกไปจนครบสถานีงาน โดยที่ จะไม่มีการย้อนกลับไปยังสถานีก่อนหน้า

สายการประกอบแบบสองด้าน (Two – Sided Assembly Line) สายการประกอบแบบสองด้านนั้นจะมีลักษณะสายการประกอบเป็นเส้นตรง โดยมีสถานีงานอยู่ในทางด้านซ้ายและทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.2 โดยเป็นสายการประกอบนี้ออกแบบมาสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์ รถบรรทุกหรือรถบัส



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสายการประกอบแบบสองด้าน (Kim, Kim et al. 2000)

สายการประกอบแบบสองด้านนั้นจะมีข้อจำกัดในเรื่องการจัดสรรงานก็คือ งานบางงานจะสามารถจัดสรรงานได้เพียงด้านใดด้านหนึ่ง เช่น ชิ้นงานของการประกอบพวงมาลัยรถยนต์ในประเทศไทย จะเป็นชิ้นงานที่จะต้องจัดสรรชิ้นงานนี้ลงในสถานีงานทางด้านขวาได้อย่างเดียว โดยห้ามจัดสรรชิ้นงานนี้ลงในสถานีงานทางด้านซ้ายเนื่องจากจะผิดข้อจำกัดในเรื่องของสายการประกอบ หรือชิ้นงานบางชิ้นงานก็จะสามารถจัดสรรชิ้นงานได้เพียงสถานีงานที่อยู่ทางด้านซ้ายเพียงด้านเดียว แต่ในชิ้นงานไหนที่ไม่มีเงื่อนไขในการประกอบก็จะสามารถจัดสรรชิ้นงานนั้นลงในสถานีงานทางด้านใดก็ได้



รูปที่ 2.3 ชิ้นงานของสายการประกอบแบบสองด้าน (Özcan and Toklu 2009)

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสายการประกอบแบบสองด้านนี้มีจำนวนสถานีงานทั้งหมด 4 สถานีงาน โดยสถานีงานที่ 1 จะอยู่ทางด้านซ้าย ส่วนสถานีงานที่ 2 จะอยู่ทางด้านขวา ซึ่งทั้ง 2 สถานีงานนี้จะเรียกว่า สถานีงานคู่ (Mated-Station) โดยมีชิ้นงานที่จะต้องเริ่มทำการประกอบจะเป็นชิ้นงานของ p ที่จะต้องทำการประกอบในสถานีงานที่ 1 โดยที่ชิ้นงานที่ i จะไม่สามารถเริ่มทำการประกอบได้ถ้าชิ้นงานของ p ยังทำการประกอบไม่เสร็จ ในกรณีเดียวกันชิ้นงานของ h ก็จะไม่สามารถเริ่มทำการประกอบได้ ถ้าชิ้นงานของ i ยังไม่เสร็จ ซึ่งจากเงื่อนไขของจำกัดนี้จึงทำให้สายการประกอบแบบสองด้านนี้จะเกิดสิ่งที่เรียกว่า เวลาเดินเปล่า (Idle Time) เกิดขึ้น ซึ่งทำให้สายการประกอบแบบสองด้านนี้เวลาดำเนินการจะรวมเวลาเดินเปล่าเข้าไปด้วย (Capacho Betancourt, Pastor et al. 2007)



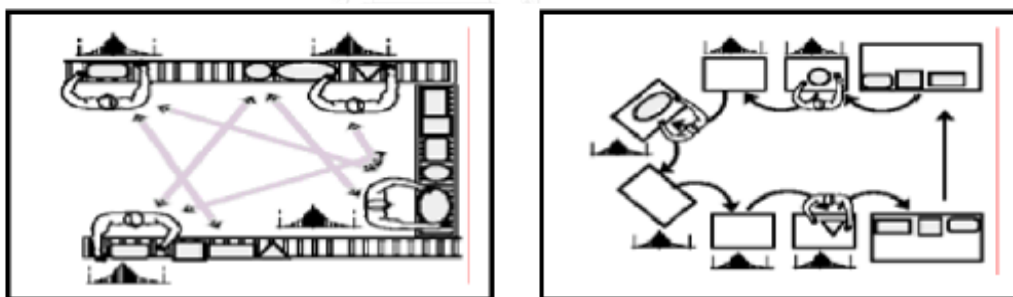
รูปที่ 2.4 สายการประกอบแบบสองด้านในอุตสาหกรรมยานยนต์จริง

สายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines) เป็นสายการประกอบที่เป็นเส้นตรง 2 เส้น ขนานกันไป ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สายการประกอบแบบขนาน

สายการประกอบแบบตัวยู (U-Shaped Lines) เป็นสายการประกอบที่เป็นเส้นตรงแล้วนำมา หักงอเป็นลักษณะเป็นรูปตัวยู โดยจะมีข้อดีตรงที่พนักงานสามารถเดินเข้ามาทำการประกอบใน ระหว่าง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สายการประกอบแบบตัวยู

สายการประกอบแบบวงกลม/ปิด (Circle/Closed Lines) เป็นสายการประกอบที่มี รูปลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.7

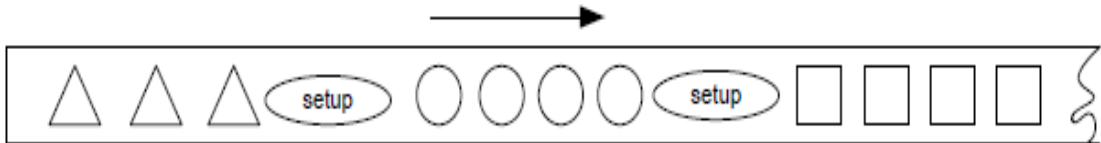
2.1.2 ประเภทของสายการประกอบ

สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว (Single Model Assembly Lines) เป็นสายการประกอบที่ทำการประกอบผลิตภัณฑ์ชนิดเดียวในสายการประกอบ ดังรูปที่ 2.9



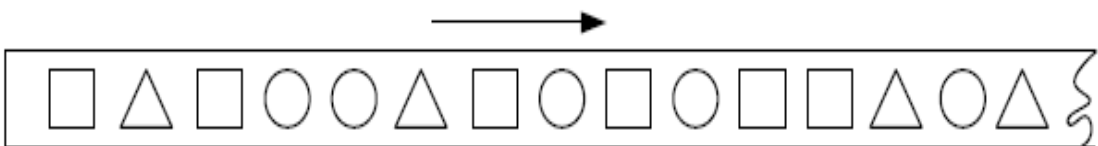
รูปที่ 2.9 สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์เดียว

สายการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ (Multi Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีตั้งแต่ 2 ชนิด โดยจะทำการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ละชนิดแล้วจึงทำการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดถัดไป ทำให้ต้องมีการ Set up เกิดขึ้นระหว่างที่มีการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สายการประกอบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์

สายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบที่มีผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ทำการผลิตโดยที่ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการประกอบชนิดใดก็ได้ปะปนกัน โดยที่ไม่มีการกำหนดว่าจะต้องผลิตผลิตภัณฑ์ใดก่อน ซึ่งจะแตกต่างจากสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ที่จะต้องผลิตผลิตภัณฑ์ที่ละชนิด ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สายการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ผสม

2.2 การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับหลายวัตถุประสงค์จะนำเอาเทคนิคการค้นหากลุ่มคำตอบที่เกิดขึ้นในส่วนของคำตอบที่สามารถเป็นไปได้ (Feasible Region) ทั้งหมด ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่ดีที่สุดนั้นมีหลายวิธีในการค้นหาคำตอบ เช่น วิธีการรวมฟังก์ชันโดยอาศัยการให้

น้ำหนัก (Weighted Sum Approach) วิธีคำนวณค่าแบบเวกเตอร์ (Vector Evaluation Approach) หรือวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) เป็นต้น

วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยค่าที่สำคัญที่จะต้องมีการกำหนดคือ การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับกลุ่มคำตอบที่ได้โดยใช้การจัดลำดับคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) คำตอบที่อยู่ใน Pareto Optimal Set หรือ Pareto Optimal Front จะเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยที่กลุ่มคำตอบที่อยู่ในนี้จะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่ากลุ่มคำตอบใดเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีกว่ากันหรือที่เรียกว่า Non-dominated Solution จากกลุ่มของคำตอบอื่น โดยในการพิจารณาว่ากลุ่มคำตอบที่เหมาะสมนั้นควรมีคุณสมบัติที่ต้องคำนึงดังนี้ (นพพล 2008)

- กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงหรือควรเป็นสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
- กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและมีคำตอบที่หลากหลาย
- กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีคำตอบที่ตรงกับปลายสุดของกลุ่มคำตอบในส่วนพื้นที่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่พิจารณาได้

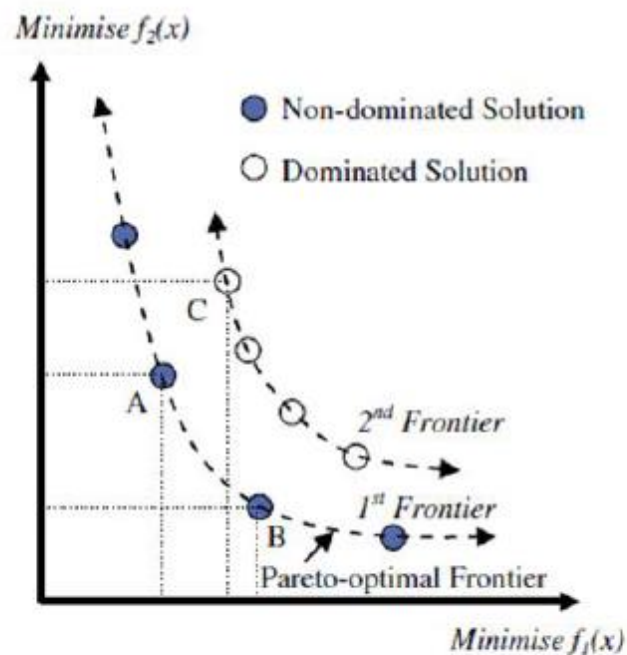
ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการหาค่าที่น้อยที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาไปพร้อมกันทั้งหมด ดังสมการต่อไปนี้

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

โดย \vec{x} คือ เวกเตอร์ของตัวแปรในการตัดสินใจ

$f_i(\vec{x})$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละเรื่อง

ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ y แล้ว จะได้ว่า $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่า $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ และ $f_j(x) < f_j(y)$ มีอย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$



รูปที่ 2.12 Pareto Optimal Solution (Chutima and Chimklai 2012)

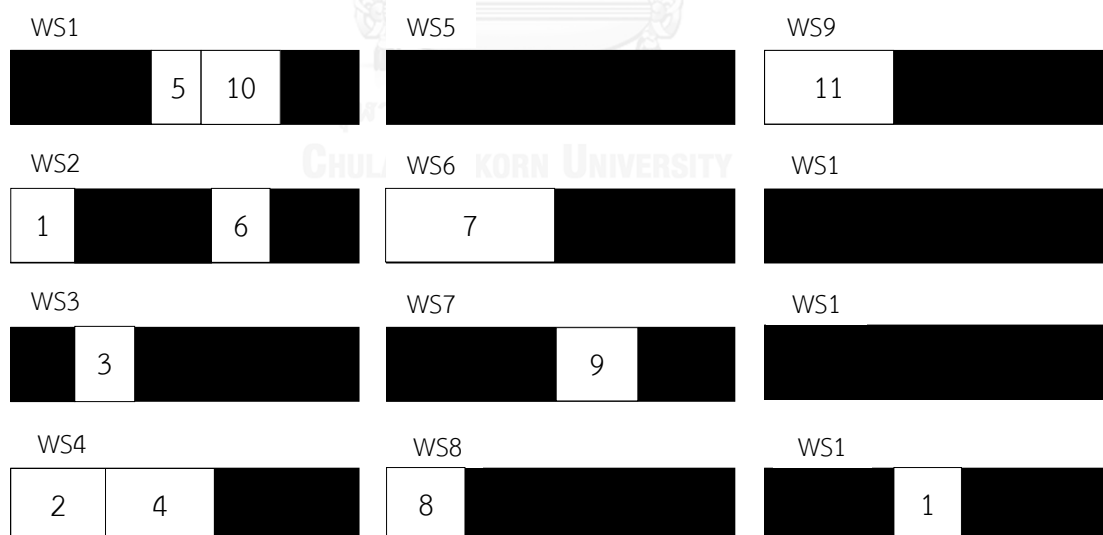
จากรูปที่ 2.12 เป็นการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ฟังก์ชันโดยจุดแต่ละจุดจะแทนกลุ่มคำตอบที่หาได้ โดยจะเห็นว่าจุดของ A และ B จะเป็นจุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto Optimal Frontier) โดยที่ A กับ B จะไม่สามารถบ่งบอกได้ว่า จุดใดเป็นจุดที่ให้คำตอบได้ดีกว่ากันหรือเรียกว่า Non-dominated set แต่สามารถบ่งบอกได้ว่าจุด A และ B เป็นจุดของคำตอบที่ดีกว่าจุด C

2.3 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

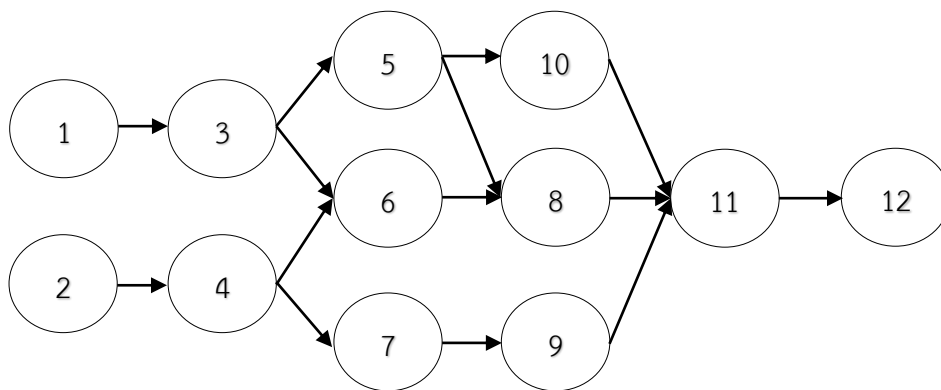
การจัดลำดับการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายบนสายการประกอบเดียวกันนั้น จะมีความแตกต่างกันในด้านของชิ้นงานที่แต่ละผลิตภัณฑ์ดำเนินงาน เวลาที่ดำเนินงานในแต่ละชิ้นงาน เวลาการปรับตั้งเครื่องจักร จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความต้องการที่จะผลิตในแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต และสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว ตัวอย่างเช่น มีจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ 4 ชนิด คือผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D มีปริมาณความต้องการที่จะผลิตในแต่ละผลิตภัณฑ์ 1:2:3:1 มีลำดับการผลิตคือ A B C D B C C และมีข้อมูลประกอบการคำนวณวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ชั้นงาน เวลาดำเนินงาน และเวลาปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D

ชั้นงาน	ตำแหน่ง	เวลาดำเนินงาน				เวลาปรับตั้งเครื่องจักร			
		A	B	C	D	A	B	C	D
1	F	3	2	2	3	0.2411	0.1814	0.1804	0.1962
2	E	4	0	5	4	0.2058	0	0.2246	0.1903
3	L	2	2	2	2	0.1038	0.1180	0.1552	0.1066
4	E	2	3	3	2	0.1676	0.1406	0.2423	0.1538
5	B	1	1	2	1	0.0812	0.0798	0.0962	0.0989
6	F	3	4	0	3	0.1749	0.1330	0	0.2405
7	E	5	5	4	5	0.2948	0.3443	0.4282	0.3022
8	R	4	3	2	1	0.1911	0.2327	0.1884	0.1898
9	L	1	2	3	4	0.2344	0.1786	0.2266	0.1654
10	B	3	3	3	0	0.2207	0.2055	0.1620	0
11	E	4	3	4	3	0.2992	0.3484	0.3411	0.2710
12	R	0	2	1	1	0	0.0695	0.0762	0.0691



รูปที่ 2.13 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่จัดสมดุลที่ความยาวสถานีงาน 8.5



รูปที่ 2.14 แผนภาพความสัมพันธ์ร่วมของผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D

ตารางที่ 2.2 ลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่ผ่านการจัดสมดุล

Task	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WS	2	4	3	4	1	2	6	8	7	1	9	12
Seq	1	2	3	4	5	7	8	9	10	6	11	12

ตารางที่ 2.3 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 1 (Model A)

Model A										
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line				
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time	
1	1	2	-	0	0	0.2411	3	3.2411	3.2411	
2	2	4	-	0	0	0.2058	4	4.2058	4.2058	
3	3	3	1	3.2411	3.2411	0.1038	2	2.1038	5.3449	
4	4	4	2	4.2058	4.2058	0.1676	2	2.1676	6.3734	
5	5	1	3	5.3449	5.3449	0.0812	1	1.0812	6.4261	
6	10	1	5	6.4261	6.4261	0.2207	3	3.2207	9.6468	
7	6	2	3, 4	5.3449, 6.3734	6.3734	0.1749	3	3.1749	9.5483	
8	7	6	4	6.3734	0	0.2948	5	5.2948	5.2948	
9	8	8	5, 6	6.4261, 9.5483	0	0.1911	4	4.1911	4.1911	
10	9	7	7	5.2948	5.2948	0.2344	1	1.2344	6.5292	
11	11	9	8, 9, 10	4.1911, 6.5292, 9.6468	0	0.2992	4	4.2992	4.2992	
12	12	12	11	4.2992	4.2992	0	0	0	4.2992	

ตารางที่ 2.4 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 2 (Model B)

Model B									
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line			
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time
1	1	2	-	0	0	0.1814	2	2.1814	2.1814
2	2	4	-	0	0	0	0	0	0
3	3	3	1	2.1814	2.1814	0.118	2	2.118	4.2994
4	4	4	2	0	0	0.1406	3	3.1406	3.1406
5	5	1	3	4.2994	4.2994	0.0798	1	1.0798	5.3792
6	10	1	5	5.3792	5.3792	0.2055	3	3.2055	8.5847
7	6	2	3, 4	4.2994, 3.1406	4.2994	0.133	4	4.133	8.4324
8	7	6	4	3.1406	0	0.3443	5	5.3443	5.3443
9	8	8	5, 6	5.3792, 8.4324	0	0.2327	3	3.2327	3.2327
10	9	7	7	5.3443	5.3443	0.1786	2	2.1786	7.5229
11	11	9	8, 9, 10	3.2327, 7.5229, 8.5847	0	0.3484	3	3.3484	3.3484
12	12	12	11	3.3484	3.3484	0.0695	2	2.0695	5.4179

ตารางที่ 2.5 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 3 (Model C)

Model C									
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line			
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time
1	1	2	-	0	0	0.1804	2	2.1804	2.1804
2	2	4	-	0	0	0.2246	5	5.2246	5.2246
3	3	3	1	2.1804	2.1804	0.1552	2	2.1552	4.3356
4	4	4	2	5.2246	5.2246	0.2423	3	3.2423	8.4669
5	5	1	3	4.3356	4.3356	0.0962	2	2.0962	6.4318
6	10	1	5	6.4318	6.4318	0.162	3	3.162	9.5938
7	6	2	3, 4	4.3356, 8.4469	8.4468	0	0	0	8.4468
8	7	6	4	8.4669	0	0.4282	4	4.4282	4.4282
9	8	8	5, 6	6.4318, 8.4468	0	0.1884	2	2.1884	2.1884
10	9	7	7	8.4468	0	0.2266	3	3.2266	3.2266
11	11	9	8, 9, 10	2.1884, 3.2266, 9.6938	0	0.3411	4	4.3411	4.3411
12	12	12	11	4.3411	4.3411	0.0762	1	1.0762	5.4173

ตารางที่ 2.6 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 4 (Model D)

Model D									
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line			
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time
1	1	2	-	0	0	0.1962	3	3.1962	3.1962
2	2	4	-	0	0	0.1903	4	4.1903	4.1903
3	3	3	1	3.1962	3.1962	0.1066	2	2.1066	5.3028
4	4	4	2	4.1903	4.1903	0.1538	2	2.1538	6.3441
5	5	1	3	5.3028	5.3028	0.0989	1	1.0989	6.4017
6	10	1	5	6.4017	6.4017	0	0	0	6.4017
7	6	2	3, 4	5.3028, 6.3441	6.3441	0.2405	3	3.2405	9.5846
8	7	6	4	6.3441	0	0.3022	5	5.3022	5.3022
9	8	8	5, 6	6.4017, 9.5846	0	0.1898	1	1.1898	1.1898
10	9	7	7	9.5846	0	0.1654	4	4.1654	4.1654
11	11	9	8, 9, 10	1.1898, 4.1654, 6.4017	0	0.271	3	3.271	3.271
12	12	12	11	3.271	3.271	0.0691	1	1.0691	4.3401

ตารางที่ 2.7 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 5 (Model B)

Model B									
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line			
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time
1	1	2	-	0	0	0.1814	2	2.1814	2.1814
2	2	4	-	0	0	0	0	0	0
3	3	3	1	2.1814	2.1814	0.118	2	2.118	4.2994
4	4	4	2	0	0	0.1406	3	3.1406	3.1406
5	5	1	3	4.2994	4.2994	0.0798	1	1.0798	5.3792
6	10	1	5	5.3792	5.3792	0.2055	3	3.2055	8.5847
7	6	2	3, 4	4.2994, 3.1406	4.2994	0.133	4	4.133	8.4324
8	7	6	4	3.1406	0	0.3443	5	5.3443	5.3443
9	8	8	5, 6	5.3792, 8.4324	0	0.2327	3	3.2327	3.2327
10	9	7	7	5.3443	5.3443	0.1786	2	2.1786	7.5229
11	11	9	8, 9, 10	3.2327, 7.5229, 8.5847	0	0.3484	3	3.3484	3.3484
12	12	12	11	3.3484	3.3484	0.0695	2	2.0695	5.4179

ตารางที่ 2.8 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 6 (Model C)

Model C									
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line			
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time
1	1	2	-	0	0	0.1804	2	2.1804	2.1804
2	2	4	-	0	0	0.2246	5	5.2246	5.2246
3	3	3	1	2.1804	2.1804	0.1552	2	2.1552	4.3356
4	4	4	2	5.2246	5.2246	0.2423	3	3.2423	8.4669
5	5	1	3	4.3356	4.3356	0.0962	2	2.0962	6.4318
6	10	1	5	6.4318	6.4318	0.162	3	3.162	9.5938
7	6	2	3, 4	4.3356, 8.4469	8.4468	0	0	0	8.4468
8	7	6	4	8.4669	0	0.4282	4	4.4282	4.4282
9	8	8	5, 6	6.4318, 8.4468	0	0.1884	2	2.1884	2.1884
10	9	7	7	8.4468	0	0.2266	3	3.2266	3.2266
11	11	9	8, 9, 10	2.1884, 3.2266, 9.6938	0	0.3411	4	4.3411	4.3411
12	12	12	11	4.3411	4.3411	0.0762	1	1.0762	5.4173

ตารางที่ 2.9 เวลาการดำเนินงานของลำดับการผลิตที่ 7 (Model C)

Model C									
Seq	Task	WS	Precedence Task	เวลาเสร็จของงานลำดับก่อนหน้า	เวลาเริ่มของชิ้นงาน	Assembly Line			
						Set up time	Opreation time	Total time	Finished time
1	1	2	-	0	0	0	2	2	2
2	2	4	-	0	0	0	5	5	5
3	3	3	1	2	2	0	2	2	4
4	4	4	2	5	5	0	3	3	8
5	5	1	3	4	4	0	2	2	6
6	10	1	5	6	6	0	3	3	9
7	6	2	3, 4	4,8	8	0	0	0	8
8	7	6	4	8	0	0	4	4	4
9	8	8	5, 6	6, 8	0	0	2	2	2
10	9	7	7	8	0	0	3	3	3
11	11	9	8, 9, 10	2, 3, 9	0	0	4	4	4
12	12	12	11	4	4	0	1	1	5

2.4 วัตถุประสงค์ของการจัดลำดับการผลิต (Objective Functions)

2.4.1 ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Variance of Production Rates)

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \left[x_{i,m} - i \frac{d_m}{I} \right]^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ $x_{i,m}$ คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่ถูกผลิตในลำดับการผลิต i เมื่อ $i=1,2,\dots,I$
 I คือ จำนวนหน่วยทั้งหมดของทุกผลิตภัณฑ์หรือความต้องการในการผลิตทั้งหมดในทุก
 ผลิตภัณฑ์

d_m คือ ความต้องการของผลิตภัณฑ์ m เมื่อ $m=1,2,\dots,M$

ตัวอย่างการคำนวณความผันแปรของการผลิต โดยกำหนดให้ลำดับการผลิตคือ A B C D B
 C C มีจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (M) 4 ชนิด

$$\therefore I = \sum_{i=1}^4 d_m = 1 + 2 + 3 + 1 = 7$$

ตารางที่ 2.10 ชั้นงานและเวลาดำเนินงานของผลิตภัณฑ์ A, B, C และ D

ชั้นงาน	ตำแหน่ง	เวลาดำเนินงาน			
		A	B	C	D
1	F	3	2	2	3
2	E	4	0	5	4
3	L	2	2	2	2
4	E	2	3	3	2
5	B	1	1	2	1
6	F	3	4	0	3
7	E	5	5	4	5
8	R	4	3	2	1
9	L	1	2	3	4
10	B	3	3	3	0
11	E	4	3	4	3
12	R	0	2	1	1

ตารางที่ 2.11 ลำดับของผลิตภัณฑ์ในแต่ละชั้นงาน

ชั้นงาน	ลำดับของผลิตภัณฑ์							
1	A	B	C	D	B	C	C	
2	A	C	D	C	C	-	-	
3	A	B	C	D	B	C	C	
4	A	B	C	D	B	C	C	
5	A	B	C	D	B	C	C	
6	A	B	D	B	-	-	-	
7	A	B	C	D	B	C	C	
8	A	B	C	D	B	C	C	
9	A	B	C	D	B	C	C	
10	A	B	C	B	C	C	-	
11	A	B	C	D	B	C	C	
12	B	C	D	B	C	C	-	

จากตารางที่ 2.11 ข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ในลำดับการผลิตเดียวกัน (A B C D B C C) ในแต่ละชั้นงานที่แตกต่างกัน จะมีลำดับผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ชั้นงานที่ 1 จะมีลำดับผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเท่ากับ 6 คือ A B C D B C C ส่วนชั้นงานที่ 2 จะมีลำดับผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเท่ากับ 4 คือ A C D C C เนื่องจากในชั้นงานนี้ไม่มีการดำเนินงานในผลิตภัณฑ์ B ซึ่งในการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ความผันแปรของการผลิต จะเริ่มคำนวณในชั้นงานที่ 1 จนครบทุกชั้นงาน ดังตารางที่ 2.12 - 2.17

ตารางที่ 2.12 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9 และ 11

ลำดับ ที่ (i)	X_{im}				$i \times (\frac{d_m}{I})$				Product Schedule	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	D	A	B	C	D		
1	1	0	0	0	0.1429	0.2857	0.4286	0.1429	A	1.0204
2	1	1	0	0	0.2857	0.5714	0.8571	0.2857	B	1.5102
3	1	1	1	0	0.4286	0.8571	1.2857	0.4286	C	0.6122
4	1	1	1	1	0.5714	1.1429	1.7143	0.5714	D	0.8980
5	1	2	1	1	0.7143	1.4286	2.1429	0.7143	B	1.7959
6	1	2	2	1	0.8571	1.7143	2.5714	0.8571	C	0.4490
7	1	2	3	1	1.0000	2.0000	3.0000	1.0000	C	0.0000
ความผันแปรการผลิตของชั้นงาน $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$										6.2857

ตารางที่ 2.13 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 10

ลำดับ ที่ (i)	X_{im}				$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$				Product Schedule	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	D	A	B	C	D		
1	1	0	0	0	0.1667	0.3333	0.5000	0.0000	A	1.0556
2	1	1	0	0	0.3333	0.6667	1.0000	0.0000	B	1.5556
3	1	1	1	0	0.5000	1.0000	1.5000	0.0000	C	0.5000
4	1	2	1	0	0.6667	1.3333	2.0000	0.0000	B	1.5556
5	1	2	2	0	0.8333	1.6667	2.5000	0.0000	C	0.3889
6	1	2	3	0	1.0000	2.0000	3.0000	0.0000	C	0.0000
ความผันแปรการผลิตของชั้นงาน $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$										5.0556

ตารางที่ 2.14 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 2

ลำดับ ที่ (i)	X_{im}				$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$				Product Schedule	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	D	A	B	C	D		
1	1	0	0	0	0.2000	0.0000	0.6000	0.2000	A	1.0400
2	1	0	1	0	0.4000	0.0000	1.2000	0.4000	C	0.5600
3	1	0	1	1	0.6000	0.0000	1.8000	0.6000	D	0.9600
4	1	0	2	1	0.8000	0.0000	2.4000	0.8000	C	0.2400
5	1	0	3	1	1.0000	0.0000	3.0000	1.0000	C	0.0000
ความผันแปรการผลิตของชั้นงาน $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$										2.8000

ตารางที่ 2.15 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 6

ลำดับ ที่ (i)	X_{im}				$i \times \left(\frac{d_m}{I}\right)$				Product Schedule	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	D	A	B	C	D		
1	1	0	0	0	0.2500	0.5000	0.0000	0.2500	A	0.8750
2	1	1	0	0	0.5000	1.0000	0.0000	0.5000	B	0.5000
3	1	1	0	1	0.7500	1.5000	0.0000	0.7500	D	0.3750
4	1	2	0	1	1.0000	2.0000	0.0000	1.0000	B	0.0000
ความผันแปรการผลิตของชั้นงาน $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$										1.7500

ตารางที่ 2.16 ความผันแปรของการผลิตในชั้นงานที่ 12

ลำดับ ที่ (i)	X_{im}				$i \times (\frac{d_m}{I})$				Product Schedule	$\sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$
	A	B	C	D	A	B	C	D		
1	0	1	0	0	0.0000	0.3333	0.5000	0.1667	B	0.7222
2	0	1	1	0	0.0000	0.6667	1.0000	0.3333	C	0.2222
3	0	1	1	1	0.0000	1.0000	1.5000	0.5000	D	0.5000
4	0	2	1	1	0.0000	1.3333	2.0000	0.6667	B	1.5556
5	0	2	2	1	0.0000	1.6667	2.5000	0.8333	C	0.3889
6	0	2	3	1	0.0000	2.0000	3.0000	1.0000	C	0.0000
ความผันแปรการผลิตของชั้นงาน $\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M [x_{im} - i \frac{d_m}{I}]^2$										3.3889

ตารางที่ 2.17 ผลการคำนวณความผันแปรของการผลิตของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C

ชั้นงาน	ลำดับของผลิตภัณฑ์							ความผันแปรของการผลิต
1	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
2	A	C	D	C	C	-	-	2.8000
3	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
4	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
5	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
6	A	B	D	B	-	-	-	1.7500
7	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
8	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
9	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
10	A	B	C	B	C	C	-	5.0556
11	A	B	C	D	B	C	C	6.2857
12	B	C	D	B	C	C	-	3.3889
ความผันแปรของการผลิตของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C								63.2801

จากการแสดงตัวอย่างการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 ความผันแปรของการผลิตข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่าลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C มีค่าความผันแปรการผลิตเท่ากับ 63.2801

2.3.2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work)

$$f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} \left(\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{i,n_m} / v_c \right) \quad (2.3)$$

$$U_{i,n_m} = \left\{ \begin{array}{l} \left[\max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m-3,m} + Y_{4n_m-3,m}) - L_{n_m})}{v_c} \right], \max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m-2,m} + Y_{4n_m-2,m}) - L_{n_m})}{v_c} \right] \right] \\ \left[\max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m-1,m} + Y_{4n_m-1,m}) - L_{n_m})}{v_c} \right], \max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m,m} + Y_{4n_m,m}) - L_{n_m})}{v_c} \right] \right] \end{array} \right\} \quad (2.4)$$

$$Z_{(i+1),n_m} = \max \left\{ \begin{array}{l} \left[\max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m-3,m} + Y_{4n_m-3,m}) - \mathcal{W}_c, L_{n_m} - \mathcal{W}_c \right) \right] \right], \\ \left[\max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m-2,m} + Y_{4n_m-2,m}) - \mathcal{W}_c, L_{n_m} - \mathcal{W}_c \right) \right] \right], \\ \left[\max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m-1,m} + Y_{4n_m-1,m}) - \mathcal{W}_c, L_{n_m} - \mathcal{W}_c \right) \right] \right], \\ \left[\max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M x_{i,m} (t_{4n_m,m} + Y_{4n_m,m}) - \mathcal{W}_c, L_{n_m} - \mathcal{W}_c \right) \right] \right] \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

เมื่อ U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในลำดับการผลิตที่ i ในคู่สถานีนงาน n_m

$Z_{(i+1),n_m}$ คือ เวลาเริ่มงานในลำดับการผลิตที่ i ในคู่สถานีนงาน n_m

v_c คือ ความเร็วของสายการผลิต

$t_{4n_m-3,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีนงานด้านหลังในคู่สถานีนงาน n_m

$t_{4n_m-2,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีนงานด้านหน้าในคู่สถานีนงาน n_m

$t_{4n_m-1,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีนงานด้านซ้ายในคู่สถานีนงาน n_m

$t_{4n_m,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีนงานด้านขวาในคู่สถานีนงาน n_m

$Y_{4n_m-3,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีนงานด้านหลังในคู่สถานีนงาน n_m

- $Y_{4n_m-2,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านหน้าในคู่สถานีงาน n_m
 $Y_{4n_m-1,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านซ้ายในคู่สถานีงาน n_m
 $Y_{4n_m,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านขวาในคู่สถานีงาน n_m
 γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการผลิต (Launch Interval)
 L_{n_m} คือ ความยาวของคู่สถานีงาน n_m

ตารางที่ 2.18 เวลาดำเนินงานรวมในแต่ละสถานีงานของแต่ละผลิตภัณฑ์

สถานีงาน	เวลาดำเนินงานรวม							ความยาวสถานีงาน
	A	B	C	D	B	C	C	
1	9.6468	8.5847	9.5938	6.4017	8.5847	9.5938	9.0000	8.5
2	9.5483	8.4324	8.4468	9.5846	8.4324	8.4468	8.0000	8.5
3	5.3449	4.2994	4.3356	5.3028	4.2994	4.3356	4.0000	8.5
4	6.3734	3.1406	8.4469	6.3441	3.1406	8.4469	8.0000	8.5
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.5
6	5.2948	5.3443	4.4282	5.3022	5.3443	4.4282	4.0000	8.5
7	6.5292	7.5229	3.2266	4.1654	7.5229	3.2266	3.0000	8.5
8	4.1911	3.2327	2.1884	1.1898	3.2327	2.1884	2.0000	8.5
9	4.2992	3.3484	4.3411	3.271	3.3484	4.3411	4.0000	8.5
10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.5
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.5
12	4.2992	5.4179	5.4173	4.3401	5.4179	5.4173	5.0000	8.5

เมื่อได้เวลาดำเนินงานในแต่ละสถานีงานในลำดับผลิตภัณฑ์แบบ A B C D B C C ดังตารางที่ 2.18 ในตัวอย่างการจัดสมดุลการผลิตนี้จะกำหนดให้รอบเวลาการผลิตทั้งหมดของแต่ละผลิตภัณฑ์ (Cycle time) เท่ากับ 8.5 ซึ่งจะเท่ากับความยาวสถานีงาน จากนั้นจะทำการคำนวณค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการผลิต (Launch Interval; γ)

$$\gamma = \frac{T}{I \times N_m} = \frac{131.9088}{7 \times 3} = 6.2814$$

ระยะทางการเคลื่อนที่ย้อนกลับของพนักงานเพื่อเริ่มต้นผลิตผลิตภัณฑ์ต่อไป (w)

$$w = \gamma \times v_c = 6.2814 \times 1 = 6.2814$$

ตารางที่ 2.19 การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคู่สถานีงานที่ 1

i	การคำนวณ	$Z_{(i+1),n_m}$
1	$z_{21} = \max[\max(0, \min(0+9.6468-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+9.5483-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+5.3449-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+6.3734-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186
2	$z_{31} = \max[\max(0, \min(2.2186+8.5847-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8.4324-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+4.2994-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+3.1406-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186
3	$z_{41} = \max[\max(0, \min(2.2186+9.5938-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8.4468-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+4.3356-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8.4469-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186
4	$z_{51} = \max[\max(0, \min(2.2186+6.4017-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+9.5846-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+5.3028-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+6.3441-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186
5	$z_{61} = \max[\max(0, \min(2.2186+8.5847-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8.4324-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+4.2994-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+3.1406-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186
6	$z_{71} = \max[\max(0, \min(2.2186+9.5938-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8.4468-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+4.3356-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8.4469-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186
7	$z_{81} = \max[\max(0, \min(2.2186+9-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+4-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(2.2186+8-6.2814, 8.5-6.2814))]$	2.2186

ตารางที่ 2.20 การคำนวณปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในคู่สถานีงานที่ 1

i	การคำนวณ	U_{i,n_m}
1	$U_{11} = \max(0, (0+9.6468-8.5)) + \max(0, (0+9.5483-8.5)) + \max(0, (0+5.3449-8.5)) + \max(0, (0+6.3734-8.5))$	2.1951
2	$U_{21} = \max(0, (2.2186+8.5847-8.5)) + \max(0, (2.2186+8.4324-8.5)) + \max(0, (2.2186+4.2994-8.5)) + \max(0, (2.2186+3.1406-8.5))$	4.4543
3	$U_{31} = \max(0, (2.2186+9.5938-8.5)) + \max(0, (2.2186+8.4468-8.5)) + \max(0, (2.2186+4.3356-8.5)) + \max(0, (2.2186+8.4469-8.5))$	7.6433
4	$U_{41} = \max(0, (2.2186+6.4017-8.5)) + \max(0, (2.2186+9.5846-8.5)) + \max(0, (2.2186+5.3028-8.5)) + \max(0, (2.2186+6.3441-8.5))$	3.4862
5	$U_{51} = \max(0, (2.2186+8.5847-8.5)) + \max(0, (2.2186+8.4324-8.5)) + \max(0, (2.2186+4.2994-8.5)) + \max(0, (2.2186+3.1406-8.5))$	4.4543
6	$U_{61} = \max(0, (2.2186+9.5938-8.5)) + \max(0, (2.2186+8.4468-8.5)) + \max(0, (2.2186+4.3356-8.5)) + \max(0, (2.2186+8.4469-8.5))$	7.6433
7	$U_{71} = \max(0, (2.2186+9-8.5)) + \max(0, (2.2186+8-8.5)) + \max(0, (2.2186+4-8.5)) + \max(0, (2.2186+8-8.5))$	6.1558
$\sum_{i=1}^7 U_{i,1} + Z_{8,1}/v_c =$ 2.1951+4.4543+7.6433+3.4862+4.4543+7.6433+6.1558+2.2186		38.2509

ตารางที่ 2.21 การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคู่สถานีงานที่ 2

i	การคำนวณ	$Z_{(i+1),n_m}$
1	$z_{22} = \max[\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+5.2948-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+6.5292-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+4.1911-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0.2478
2	$z_{32} = \max[\max(0, \min(0.2478+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0.2478+5.3443-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0.2478+7.5229-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0.2478+3.2327-6.2814, 8.5-6.2814))]$	1.4893

ตารางที่ 2.21 (ต่อ) การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคู่สถานีงานที่ 2

i	การคำนวณ	$Z_{(i+1),n_m}$
3	$z_{42} = \max[\max(0, \min(1.4893+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(1.4893+4.4282-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(1.4893+3.2266-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(1.4893+2.1884-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
4	$z_{52} = \max[\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+5.3022-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+4.1654-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+1.1898-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
5	$z_{62} = \max[\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+5.3443-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+7.5229-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+3.2327-6.2814, 8.5-6.2814))]$	1.2415
6	$z_{72} = \max[\max(0, \min(1.2415+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(1.2415+4.4282-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(1.2415+3.2266-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(1.2415+2.1884-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
7	$z_{82} = \max[\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+4-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+3-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+2-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0

ตารางที่ 2.22 การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคู่สถานีงานที่ 2

i	การคำนวณ	U_{i,n_m}
1	$U_{12} = \max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.2948-8.5)) +$ $\max(0, (0+6.5292-8.5)) + \max(0, (0+4.1911-8.5))$	0
2	$U_{22} = \max(0, (0.2478+0-8.5)) + \max(0, (0.2478+5.3443-8.5)) +$ $\max(0, (0.2478+7.5229-8.5)) + \max(0, (0.2478+3.2327-8.5))$	0
3	$U_{32} = \max(0, (1.4893+0-8.5)) + \max(0, (1.4893+4.4282-8.5)) +$ $\max(0, (1.4893+3.2266-8.5)) + \max(0, (1.4893+2.1884-8.5))$	0

ตารางที่ 2.22 (ต่อ) การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคู่สถานีงานที่ 2

i	การคำนวณ	U_{i,n_m}
4	$U_{42} = \max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.3022-8.5)) + \max(0, (0+4.1654-8.5)) + \max(0, (0+1.1898-8.5))$	0
5	$U_{52} = \max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.3443-8.5)) + \max(0, (0+7.5229-8.5)) + \max(0, (0+3.2327-8.5))$	0
6	$U_{62} = \max(0, (1.2415+0-8.5)) + \max(0, (1.2415+4.4282-8.5)) + \max(0, (1.2415+3.2266-8.5)) + \max(0, (1.2415+2.1884-8.5))$	0
7	$U_{72} = \max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+4-8.5)) + \max(0, (0+3-8.5)) + \max(0, (0+2-8.5))$	0
$\sum_{i=1}^7 U_{i,2} + Z_{8,2}/v_c = 0+0+0+0+0+0+0$		0

ตารางที่ 2.23 การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคู่สถานีงานที่ 3

i	การคำนวณ	$Z_{(i+1),n_m}$
1	$z_{23} = \max[\max(0, \min(0+4.2992-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+4.2992-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
2	$z_{33} = \max[\max(0, \min(0+3.3484-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+5.4179-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
3	$z_{43} = \max[\max(0, \min(0+4.3411-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+5.4173-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
4	$z_{53} = \max[\max(0, \min(0+3.271-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)), \max(0, \min(0+4.3401-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0

ตารางที่ 2.23 (ต่อ) การคำนวณเวลาเริ่มงานของผลิตภัณฑ์ในคู่สถานีงานที่ 3

i	การคำนวณ	$Z_{(i+1),n_m}$
5	$z_{63} = \max[\max(0, \min(0+3.3484-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+5.4179-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
6	$z_{73} = \max[\max(0, \min(0+4.3411-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+5.4173-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0
7	$z_{83} = \max[\max(0, \min(0+4-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+0-6.2814, 8.5-6.2814)),$ $\max(0, \min(0+5-6.2814, 8.5-6.2814))]$	0

ตารางที่ 2.24 การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคู่สถานีงานที่ 3

i	การคำนวณ	U_{i,n_m}
1	$U_{13} = \max(0, (0+4.2992-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) +$ $\max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+4.2992-8.5))$	0
2	$U_{23} = \max(0, (0+3.3484-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) +$ $\max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.4179-8.5))$	0
3	$U_{33} = \max(0, (0+4.3411-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) +$ $\max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.4173-8.5))$	0
4	$U_{43} = \max(0, (0+3.271-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) +$ $\max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+4.3401-8.5))$	0
5	$U_{53} = \max(0, (0+3.3484-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) +$ $\max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.4179-8.5))$	0
6	$U_{63} = \max(0, (0+4.3411-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) +$ $\max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5.4173-8.5))$	0

ตารางที่ 2.24 (ต่อ) การคำนวณปริมาณงานที่ไม่เสร็จในคู่สถานีงานที่ 3

i	การคำนวณ	U_{i,n_m}
7	$U_{73} = \max(0, (0+4-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+0-8.5)) + \max(0, (0+5-8.5))$	0
$\sum_{i=1}^7 U_{i,3} + Z_{8,3}/v_c = 0+0+0+0+0+0+0$		0

จากการคำนวณข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C มีค่าเท่ากับ

$$f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} (\sum_{i=1}^I U_{i,n_m} + Z_{(i+1),n_m}/v_c) = 38.2509 + 0 + 0 = 38.2509$$

2.3.3 เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด (Minimizing Set up Time)

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M s_i t_{k,m} \quad (2.6)$$

เมื่อ s_i คือ สถานะการปรับตั้งเครื่องจักร เมื่อ $s_i = 1$ หมายถึงมีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น และ $s_i = 0$ หมายถึงไม่มีการปรับตั้งเครื่องจักรเกิดขึ้น

$t_{k,m}$ คือ เวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรของผลิตภัณฑ์ m ที่ขึ้นงาน k

เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของแต่ละผลิตภัณฑ์จะคำนวณมาจากวิธีการสุ่ม โดยการกำหนดช่วงของเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.05 – 0.1 ของเวลาเฉลี่ยของขึ้นงาน A, B, C และ D ตามลำดับ (Duclos, Sih et al. 1995) ดังตารางที่ 2.25 – 2.26

ตารางที่ 2.25 ขั้นตอนการสุ่มเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร

ขึ้นงาน	เวลาดำเนินงานเฉลี่ย	การกำหนดช่วงการสุ่ม		เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่เกิดจากการสุ่ม			
		0.05	0.1	A	B	C	D
1	2.5	0.125	0.25	0.2411	0.1814	0.1804	0.1962
2	3.25	0.1625	0.325	0.2058	0.1786	0.2246	0.1903
3	2	0.1	0.2	0.1038	0.1180	0.1552	0.1066
4	2.5	0.125	0.25	0.1676	0.1406	0.2423	0.1538

ตารางที่ 2.25 (ต่อ) ขั้นตอนการสุ่มเวลาการปรับตั้งเครื่องจักร

ขั้นงาน	เวลาดำเนินงานเฉลี่ย	การกำหนดช่วงการสุ่ม		เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่เกิดจากการสุ่ม			
		0.05	0.1	A	B	C	D
5	1.25	0.0625	0.125	0.0812	0.0798	0.0962	0.0989
6	2.5	0.125	0.25	0.1749	0.1330	0.1813	0.2405
7	4.75	0.2375	0.475	0.2948	0.3443	0.4282	0.3022
8	2.5	0.125	0.25	0.1911	0.2327	0.1884	0.1898
9	2.5	0.125	0.25	0.2344	0.1786	0.2266	0.1654
10	2.25	0.1125	0.225	0.2207	0.2055	0.1620	0.1626
11	3.5	0.175	0.35	0.2992	0.3484	0.3411	0.2710
12	1	0.05	0.1	0.0504	0.0695	0.0762	0.0691

ตารางที่ 2.26 ผลรวมเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C

ขั้นงาน	เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C							$\sum_{m=1}^7 t_m$
1	A	B	C	D	B	C	C	1.1609
	0.2411	0.1814	0.1804	0.1962	0.1814	0.1804	0	
2	A	C	D	C	C			0.8453
	0.2058	0.2246	0.1903	0.2246	0			
3	A	B	C	D	B	C	C	0.7168
	0.1038	0.1180	0.1552	0.1066	0.1180	0.1152	0	
4	A	B	C	D	B	C	C	1.0872
	0.1676	0.1406	0.2423	0.1538	0.1406	0.2423	0	
5	A	B	C	D	B	C	C	0.5321
	0.0812	0.0798	0.0962	0.0989	0.0798	0.0962	0	
6	A	B	D	B				0.6814
	0.1749	0.1330	0.2405	0.1330				
7	A	B	C	D	B	C	C	2.1420
	0.2948	0.3443	0.4282	0.3022	0.3443	0.4282	0	

ตารางที่ 2.26 (ต่อ) ผลรวมเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C

ชั้นงาน	เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C							$\sum_{m=1}^7 t_m$
8	A	B	C	D	B	C	C	1.2231
	0.1911	0.2327	0.1884	0.1898	0.2327	0.1884	0	
9	A	B	C	D	B	C	C	1.2102
	0.2344	0.1786	0.2266	0.1654	0.1786	0.2266	0	
10	A	B	C	B	C	C		0.9557
	0.2207	0.2055	0.1620	0.2055	0.1620	0		
11	A	B	C	D	B	C	C	1.8792
	0.2292	0.3484	0.3411	0.2710	0.3484	0.3411	0	
12	B	C	D	B	C	C		0.3605
	0.0695	0.0762	0.0691	0.0695	0.0762	0		
$f_3(x) = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M s_i t_m$								12.7944

จากการคำนวณข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของลำดับผลิตภัณฑ์ A B C D B C C มีค่าเท่ากับ 12.7944

2.4 ลำดับการผลิตที่เป็นไปได้

ในปัญหาการจัดลำดับผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์แบบผสม จะมีความแตกต่างของลำดับการผลิตในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการดำเนินการและสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ จึงทำให้เกิดลำดับการผลิตที่มีความหลากหลาย ดังนั้นจำนวนลำดับการผลิตทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Mansouri 2005) (Akgunduz and Tunali 2011)

$$\text{จำนวนลำดับการผลิตทั้งหมด (Total Sequence)} = \frac{(\sum_{m=1}^M d_m)!}{\prod_{m=1}^M (d_m!)} \quad (2.7)$$

โดยกำหนดให้ M เป็นจำนวนรวมของผลิตภัณฑ์ m ทั้งหมด และ d_m เป็นจำนวนความต้องการของ ผลิตภัณฑ์ m แต่ละผลิตภัณฑ์ เมื่อขนาดของปัญหาใหญ่ขึ้นจะทำให้จำนวนของคำตอบที่เป็นไปได้จะเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดหรือเรียกว่าแบบ Exponential ปัญหาการจัดลำดับการผลิตจึงจัดเป็นปัญหาชนิดแบบ NP-hard

2.5 กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

โดยปกติแล้วการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย k วัตถุประสงค์ และ n ตัวแปรตัดสินใจ โดยรูปแบบปัญหาการหาค่ามากที่สุดหรือการหาค่าน้อยที่สุดสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize/Maximize } \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\}$$

สำหรับรูปแบบการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ในที่นี้จะเป็นการหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งการค้นหาคำตอบจะถูกกำหนดจากเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจภายใต้ข้อจำกัดที่จะเป็นสิ่งที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตคำตอบที่น้อยที่สุดดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Minimize } \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\}$$

$$\text{ข้อจำกัด } g_i(\bar{x}) \leq 0$$

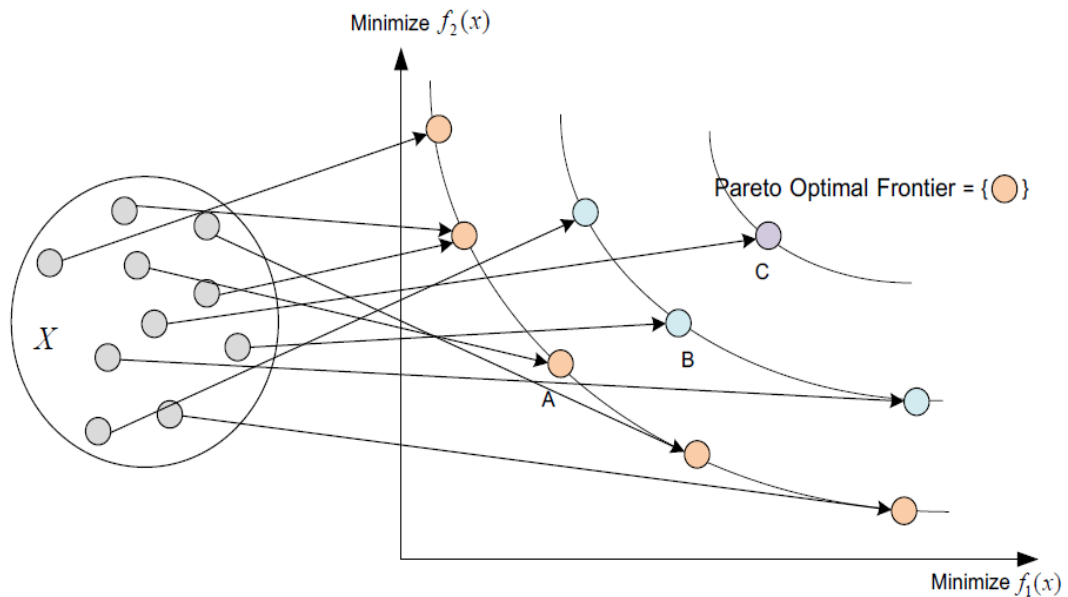
โดยที่ \bar{x} คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ

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

$g_i(\bar{x})$ คือ เวกเตอร์ข้อจำกัดที่ i

ถ้าเวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x ให้คำตอบที่ดีกว่า เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ y แล้วจะได้ว่า $f_i(x) \leq f_i(y)$ สำหรับทุกค่า $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ และ $f_i(x) < f_i(y)$ มีอย่างน้อย 1 ค่าของ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$

ถ้าคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ไม่มีคำตอบใดที่ดีกว่า หรือเด่นกว่าคำตอบอื่น จะถือว่าคำตอบที่ได้เป็น กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกสมาชิกคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) หรือเซตคำตอบที่เด่นกว่า (Non-dominated Set) หรือเซตคำตอบที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Set) ซึ่งเซตคำตอบนี้จะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ขอบเขตของคำตอบที่เรียกว่า ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) หรือขอบเขตของคำตอบที่เด่นกว่าคำตอบอื่น (Non-dominated Frontier) หรือขอบเขตของคำตอบที่มีประสิทธิภาพ (Efficient Frontier) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การค้นหาพื้นที่คำตอบในปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์

จากรูปที่ 2.15 เป็นรูปแบบการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมกัน โดยกำหนดให้ X เป็นพื้นที่คำตอบ โดยที่เวกเตอร์วัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด (จุดสีส้ม) คือ เวกเตอร์วัตถุประสงค์ที่ไม่มีคำตอบใดที่ดีกว่า หรือเรียกว่าเซตคำตอบที่เด่น (Non-dominated Set) และสมาชิกคำตอบที่เด่นกว่าอื่นนี้จะได้เป็นขอบเขตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเวกเตอร์คำตอบที่อยู่ด้านในหรือคำตอบที่เป็นจุดสีส้ม เป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Non-dominated Optimal) ซึ่งจาก 3 เวกเตอร์คำตอบ A B และ C สามารถเขียนได้เป็น A เด่นกว่า B และ B เด่นกว่า C

2.6 การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด

การวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบเป็นการวัดคุณภาพของคำตอบที่ได้ เพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดในกรณีที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งมีเป้าหมายที่สำคัญคือ กลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal) ต้องมีค่าใกล้เคียงกับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือกลุ่มคำตอบที่ได้ควรมีลักษณะการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นการวัดสมรรถนะของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจึงเป็นการวัดคุณภาพของคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม โดยตัวชี้วัดสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ตัว ดังนี้

2.6.1 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) เป็นการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้ (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดหรือกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) (Lin and Gen 2009) โดยมีการสูตรคำนวณดังนี้

$$Convergence = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y \in S^*} \min\{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (2.8)$$

$$\text{เมื่อ } d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.9)$$

โดยที่	S_j	คือ เซตคำตอบที่เปรียบเทียบ
	S^*	คือ เซตคำตอบที่แท้จริง
	$ S^* $	คือ จำนวนคำตอบที่แท้จริง
	d_{xy}	คือ ระยะทางระหว่างคำตอบที่หาได้ x กับคำตอบที่แท้จริง y
	f_i^{max}	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุด
	f_i^{min}	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่าน้อยที่สุด
	$f_i(x)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่หาได้
	$f_i(y)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของคำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง นั่นคือ อัลกอริทึมนั้นเป็นอัลกอริทึมที่ดีกว่า

2.6.2 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้

การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) เป็นการวัดระยะห่างระหว่างสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน โดยมีการสูตรคำนวณดังนี้

$$Spread = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (2.10)$$

โดยที่	d_f, d_l	คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบปลายสุดทั้งสองด้าน (Extream Solution)
	\bar{d}	คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_i

d_i คือ ระยะห่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องในเซตคำตอบที่ดีที่สุด เมื่อ $i = 1, 2, \dots, N - 1$

N คือ จำนวนคำตอบที่หาได้

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้นั้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

2.6.3 การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ

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

2.6.3.1 Ratio of non-dominated solutions (self-comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (First Pareto frontier solution) ที่อยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Approximated True Pareto optimum) ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่ดีในตัวเอง (Own first Pareto frontier solutions) โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$R_{NDS1} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A_j|} \quad (2.11)$$

2.6.3.2 Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison)

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดในจำนวนคำตอบที่แท้จริง ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง โดยมีสมการการคำนวณดังนี้

$$R_{NDS2} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A|} \quad (2.12)$$

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

A คือ เซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหาได้ของทุกอัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน

$$\text{ซึ่ง } A = A_1 \cup A_2 \dots \cup A_j$$

x คือ คำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y < x$ คือ คำตอบ x ดีกว่าคำตอบ y

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

2.6.4 ตัวชี้วัดสมรรถนะของจำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ

จำนวนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (The number of non-dominated solution) คือจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดของตัวมันเอง (First Pareto frontier obtained)

2.6.5 ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

เวลาในการค้นหาคำตอบ คือ การพิจารณาเวลาในการค้นหากลุ่มคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยอัลกอริทึมที่ดีควรใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Tsai 1995) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดวัตถุประสงค์การวิจัยคือเพื่อให้ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ และความเสี่ยงในการหยุดของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด โดยหลังจากการวิจัยได้พบว่าปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายผลิตภัณฑ์เป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากและมีความสลับซับซ้อนในการแก้ปัญหาหรือที่เรียกว่าเป็นปัญหาแบบ NP-hard

(McMullen and Frazier 2000) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์สำหรับระบบผลิตที่เป็นแบบทันเวลาพอดี โดยได้นำอัลกอริทึม Simulated Annealing มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับที่มีวัตถุประสงค์คือการปรับตั้งเครื่องมีค่าน้อยที่สุด และอัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบที่สม่ำเสมอ ได้ข้อสรุปว่าอัลกอริทึม Simulated Annealing มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสำหรับปัญหาที่มีขนาดเล็ก

(McMullen 2001) ได้ศึกษาลักษณะการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสำหรับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) โดยนำอัลกอริทึมหลายๆตัวได้แก่ วิธีเจเนติกอัลกอริทึม วิธี Simulated Annealing และวิธี Tabu Search มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต โดยสนใจในเรื่องของการทำให้ระบบการผลิตมีความยืดหยุ่นมากที่สุด และการปรับตั้งเครื่องให้เกิดขึ้นน้อยครั้งที่ที่สุด โดยผลสรุปของงานวิจัยพบว่าวิธีทั้ง 3 วิธีมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบสำหรับการแก้ปัญหาประเภทนี้ได้มีความใกล้เคียงกันในกรณีปัญหาที่มีขนาดเล็ก ส่วนอัลกอริทึมของวิธีเจเนติกอัลกอริทึมนั้นพบว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสำหรับกรณีปัญหาที่มีขนาดใหญ่ได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้น

(Mansouri 2005) ได้ศึกษาลักษณะของปัญหาการจัดลำดับการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ผสมบนสายการประกอบของระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) โดยมีการนำเอาอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า เจนเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithms: MOGAs) มาใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อทำให้เกิดอัตราความผันแปรในการผลิตน้อยที่สุดและจำนวนครั้งการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด แต่พบว่าเรื่องทั้งสองเป็นเรื่องที่มีความขัดแย้งกันโดยตรงหรือกล่าวได้ว่าเป็นเรื่องที่แปรผกผันซึ่งกันและกัน จึงทำให้จะได้คำตอบที่ไม่ใช่เป็นคำตอบที่น้อยที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์ แต่จะเป็นคำตอบที่มีความเหมาะสมที่ใช้ในการแก้ปัญหามากที่สุด ซึ่งพบว่าวิธี MOGAs มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตมากกว่าวิธีการอื่นๆ

(Konak, Coit et al. 2006) ได้ศึกษาการหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยได้มีการนำเอาอัลกอริทึมที่มีชื่อว่า เจนเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องนี้ โดยได้นำเจเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้กับอัลกอริทึมต่างๆมากมาย เช่น Vector Evaluated GA (VEGA), Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), Niche Pareto Genetic Algorithm (NPGA), Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) และ Fast Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) เป็นต้น โดยจากผลการวิจัยพบว่าเจเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์

(Simon 2008) ได้มีการนำเสนออัลกอริทึมใหม่ที่มีชื่อว่า วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography Based Optimization: BBO) โดยใช้แนวคิดการย้ายถิ่นฐานของสิ่งมีชีวิตที่มีความต้องการที่จะอยู่อาศัยในที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ แต่ถ้าพื้นที่ที่อยู่นั้นมีความหนาแน่น สิ่งมีชีวิตจะเริ่มทำการย้ายที่อยู่อาศัยไปสู่ที่อื่นที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อยกว่า และพัฒนาที่อยู่ใหม่ให้มีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์นี้ได้มีการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากปัญหาในภาคปฏิบัติ ซึ่งพบว่าคำตอบที่ได้มีประสิทธิภาพดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆหลายตัว

(นพพล 2008) ได้นำเสนออัลกอริทึมการบรรจบ (Combinatorial Optimization with Coincidence: COIN) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบแบบตัวยู โดยวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ค่าใช้จ่ายการปรับตั้งเครื่องจักรและความผันแปรของภาระงานในระบบการผลิตน้อยที่สุด ผลจากงานวิจัยพบว่า COIN จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อได้มีการรวมกับเมมเมติกอัลกอริทึมแบบ NSGA-II สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์บนสายการประกอบลักษณะตัวยูได้มีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ จากงานวิจัยที่กล่าวมา

พบว่า COIN มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่รวดเร็ว เนื่องจากมีการจดจำลักษณะตำแหน่งของคู่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ติดกันและมีการจดจำลักษณะตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่ดีและไม่ดี

(วันวิสา 2012) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านโดยมีเรื่องของผลกระทบจากการเรียนรู้เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมีการกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัยทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์โดยพิจารณาไปพร้อมกันได้แก่ ความแปรผันของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด โดยนำอัลกอริทึมที่มีการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาประเภทนี้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพได้แก่ BBO, NSGA-II, DPSSO, PSONK และ BBO Adaptive โดยผลการวิจัยพบว่าวิธี BBO Adaptive มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาดีกว่าวิธีการอื่นๆ

(Liao, Chao-Tang et al. 2007) ได้พัฒนาอัลกอริทึม Particle Swarm Optimization (PSO) ในการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน โดยอาศัยอนุภาค (particle) และทิศทางในการเคลื่อนที่ (Velocity) เพื่อไปหาคำตอบ และทำการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม Continuous PSO และ GA พบว่าวิธี PSO ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับตัวอื่นๆ นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้การค้นหาเฉพาะที่ร่วมกับ PSO (PSO-LS) และนำผลลัพธ์ที่ได้เปรียบเทียบกับ ACO พบว่า PSO-LS ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าสำหรับในบางปัญหา

(Bard, Shtub et al. 1994) ได้นำเสนอหลักการในการวิเคราะห์การจัดลำดับผลิตภัณฑ์เข้าสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสม ซึ่งต้องมีการพิจารณาถึงสิ่งที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ตารางการทำงานของพนักงาน ผลิตภัณฑ์มีหลายชนิดปะปนกัน ขอบเขตสถานงานเป็นแบบเปิดหรือปิด และหลักในการเริ่มทำการผลิตมีการกำหนดเวลาการทำงานหรือการทำงานอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การจัดลำดับที่ต้องการ คือ ต้องการให้สายการประกอบสั้นที่สุดและเวลาที่ใช้ในการประกอบสั้นที่สุด โดยในการจัดลำดับผลิตภัณฑ์จะเข้าตามสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่กำหนด (Minimum Part Set: MPS) ซึ่งเป็นการจัดที่เหมาะสมกับการผลิตโดยเฉพาะในการผลิตแบบยืดหยุ่น ทำให้ได้รับคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ที่เป็นจริงได้

(Fattahi, Roshani et al. 2011) ได้นำเสนอการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบหลายคน (Multi-manned Assembly Line) โดยมีวัตถุประสงค์อันดับแรกคือใช้จำนวนพนักงานในสายการประกอบน้อยที่สุด และอันดับถัดไปคือมีจำนวนสถานงานน้อยที่สุด โดยใช้ Ant Colony Algorithm ในการแก้ปัญหาข้างต้น ได้ผลลัพธ์คือผลที่ได้จาก Ant Colony Algorithm มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าฮิวริสติกสำหรับ MALBP ประเภทอื่นๆ

บทที่ 3

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงาน ตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน และการทดสอบวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่นำมาใช้

3.1 วิธีการของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Extended: COIN-E) ถูกคิดค้นโดย (Chutima and Olanviwatchai 2010) ซึ่งอาศัยแนวคิดวิธีการบรรจบแบบเดิม (Combinatorial Optimization with Coincidence: COIN) คือการให้รางวัลแก่สตริงคำตอบที่ให้ผลลัพธ์ที่ดี และทำการลงโทษแก่สตริงคำตอบที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดี เพื่อเป็นตัวกำหนดทิศทางของคำตอบสุดท้าย โดยมีการสร้างตารางความน่าจะเป็นขึ้นมาแล้วสุ่มเลือกมาสร้างประชากรเริ่มต้น โดยมีการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นตลอดเวลาในแต่ละรอบ โดยปรับปรุงตามคำตอบที่ดีและคำตอบที่ไม่ดี ถ้าเกิดเป็นคำตอบที่ดีค่าความน่าจะเป็นก็จะมากขึ้นเพื่อใช้ในการสุ่มรอบถัดไป แต่ถ้าคำตอบไม่ดีค่าความน่าจะเป็นก็จะถูกลดลงเพื่อจะได้สุ่มเจอน้อยลงในรอบถัดไป แต่ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายจะมีตารางความน่าจะเป็นร่วมเพิ่มมาอีก 3 ตารางที่ได้มาจากการหาคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์มาสร้างตารางความน่าจะเป็นร่วม โดยนำคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์ที่ดีและไม่ดีมาทำการปรับปรุงตารางความน่าจะเป็น เพื่อจะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมและคำตอบที่ได้ก็จะมีกระจายตัวของคำตอบมากกว่าวิธีการบรรจบแบบเดิม

3.2 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย

1. Initialize the generator สร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้น ขนาด $n \times n$ โดยที่ n จะเท่ากับจำนวนความยาวของสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ (MPS)
2. Generate the population using the generator สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นตามขนาดประชากร (Population Size) ที่กำหนด โดยเลือกลำดับการผลิตจากการสุ่มค่าในตารางเมตริกซ์

ความน่าจะเป็นร่วม โดยในรอบแรกนั้นจะมีค่าความน่าจะเป็นร่วมที่เท่ากันหมด ส่วนในรอบถัดไปค่าความน่าจะเป็นร่วมก็จะมีค่าแตกต่างกันไปตามการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็นร่วม

3. Evaluate the population นำสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นมาประเมินค่าหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด และกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting รวมทั้งกำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance (Deb et al., 2002)

4. Select the candidates คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดี โดยในตารางที่ 1 จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรง (Fitness) ถ้าเป็นคำตอบที่ดี ค่า Fitness จะมีค่าน้อยที่สุด แต่ถ้าเป็นคำตอบที่ไม่ดี ค่า Fitness จะมีค่ามากที่สุด ในส่วนของตารางที่ 2, 3 และ 4 จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

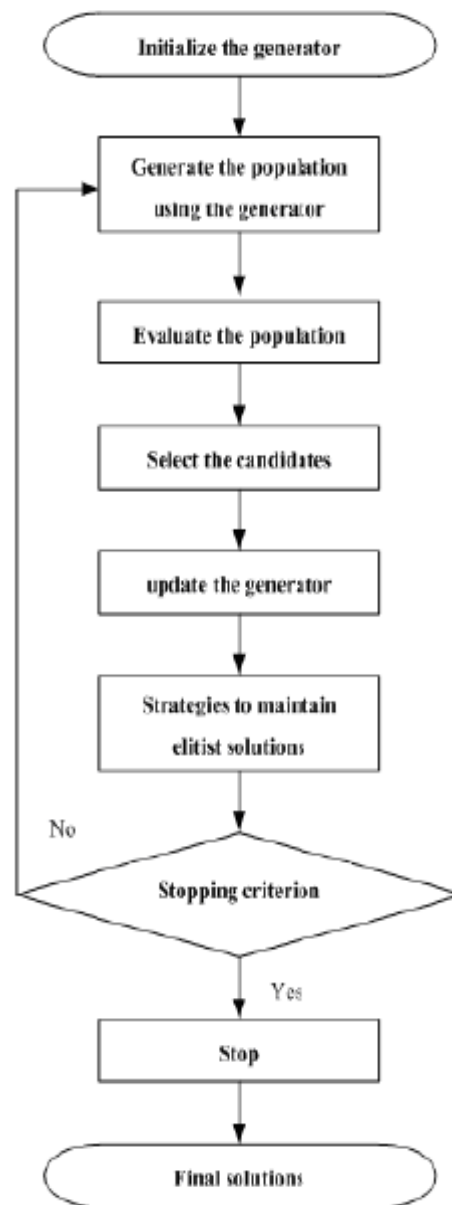
5. Update the generator ปรับปรุงตารางค่าตารางความน่าจะเป็นร่วมโดยการให้รางวัล (Reward) ในกรณีคำตอบที่ดี และการลงโทษ (Punish) ในกรณีคำตอบที่ไม่ดี ในตารางทั้ง 4 ตารางดังต่อไปนี้

- (1) ตารางวิธีการบรรจบ
- (2) ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด
- (3) ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด
- (4) ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 คือ เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

โดยแบ่งการสุ่มในแต่ละรอบคือจากตารางวิธีการบรรจบมาร้อยละ 70 ของประชากรทั้งหมด และสุ่มจากตารางคำตอบของแต่ละวัตถุประสงค์มาร้อยละ 30 ของประชากรทั้งหมด

6. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population นำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันแล้วทำการคัดเลือกด้วยวิธีการ Non-dominated Sorting แล้วเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไว้จนครบจำนวนซ้ำของคำตอบที่ต้องการ

7. Repeat Step 2 กลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 จนกระทั่งครบตามจำนวนรอบที่กำหนด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย

3.3 ตัวอย่างการนำการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยายมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนจะมีการนำเข้าข้อมูลที่เป็นต้องใช้ในการแก้ปัญหา ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนชิ้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละชิ้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละชิ้นงาน รอบเวลาดำเนินการผลิตลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย (COIN-E)

จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว

ค่าการให้รางวัล (Reward) และค่าการลงโทษ (Punish) มีค่าเท่ากับ 0.1

ร้อยละที่ใช้ในการสุ่มจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับร้อยละ 33.33

3.3.1 การสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นเริ่มต้น

การสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น โดยใช้ตัวดำเนินการคือตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) โดยทำการนำจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด นำมาสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม ดังนี้ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 รุ่น ได้แก่ A, B, C และ D มีจำนวน Minimum Part Set (MPS) คือ 1:2:3:1 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A จำนวนเท่ากับ 1 ผลิตภัณฑ์ B จำนวนเท่ากับ 2 ผลิตภัณฑ์ C จำนวนเท่ากับ 3 และผลิตภัณฑ์ D จำนวนเท่ากับ 1 เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต ดังนี้

Model Sequence	A	B	B	C	C	C	D
String Priority	1	2	3	4	5	6	7

หลังจากนั้นจึงทำการสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น โดยมีขนาดเท่ากับ $n \times n$ เนื่องจากสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์รวม (MPS) มีขนาด 7 ตารางเมตริกซ์นี้จึงมีขนาดเท่ากับ 7×7 โดยค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มเลือกจะมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{n-1} = \frac{1}{7-1} = 0.1667$ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้น

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667	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	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
4	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667
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

3.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

เมื่อได้ตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วมเริ่มต้นแล้ว จะทำการสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจากการสุ่มค่าความน่าจะเป็นจากตารางที่ 3.1 โดยจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น ซึ่งในตัวอย่างนี้มีค่าเท่ากับ 5 ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority	Model Sequence
1	1 2 5 6 4 7 3	A B C C C D B
2	1 2 7 5 4 6 3	A B D C C C B
3	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
4	1 2 3 4 5 6 7	A B C C C C D
5	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B

3.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่น

เมื่อได้ลำดับการผลิตของกลุ่มประชากรเริ่มต้นแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 8.5 เพื่อทำการประเมินค่าความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1	60.7278	28.7285	10.5832
2	68.7849	28.7469	10.5832
3	116.9754	29.0298	8.5514
4	98.2754	28.7140	8.5514
5	57.6087	28.3334	10.5832

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และกำหนดค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	Infinity
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	Infinity
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	Infinity
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	Infinity
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	Infinity

3.3.4 การคัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีและสตริงคำตอบที่ไม่ดี

การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อที่จะนำไปปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของตารางที่ 1 ตารางวิธีการบรรจบ จะพิจารณาจากค่าความแข็งแรง (Fitness) ถ้าเป็นคำตอบที่ดี ค่า Fitness จะมีค่าน้อยที่สุด แต่ถ้าเป็นคำตอบที่ไม่ดี ค่า Fitness จะมีค่ามากที่สุด ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางวิธีการบรรจบ

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	-
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	Bad Solution
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	-
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	Good Solution
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	Good Solution

การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อที่จะนำไปปรับปรุงตารางความน่าจะเป็นของตารางที่ 2 ถึง 4 คือตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จะพิจารณาจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าเป็นคำตอบที่ดีจะมีค่าน้อยที่สุด แต่ถ้าเป็นคำตอบที่ไม่ดี จะมีค่ามากที่สุด ดังตารางที่ 3.6 – 3.8

ตารางที่ 3.6 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	Good Solution
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	-
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	Bad Solution
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	-
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	-

ตารางที่ 3.7 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	-
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	-
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	Bad Solution
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	-
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	Good Solution

ตารางที่ 3.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบสำหรับตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Selected
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	Bad Solution
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	Bad Solution
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	Good Solution
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	Good Solution
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	Bad Solution

3.3.5 การปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็น

ทำการปรับปรุงตารางค่าความน่าจะเป็นรวมทั้งหมด 4 ตาราง ได้แก่ ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมของตารางวิธีการบรรจบ ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เพื่อนำมาสร้างผลสตริงคำตอบในรอบการทำงานต่อไป โดยกำหนดให้ k คือค่าพารามิเตอร์ในการให้รางวัล/ลงโทษ ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ (กำหนดให้ $k = 0.1$)

$$x = \frac{k}{n-1} \quad (3.1)$$

$$x = \frac{k}{(n-1)^2} \quad (3.2)$$

เริ่มทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางวิธีการบรรจบ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.5 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 2 คำคือ สตริงคำตอบที่ 4 [1 2 3 4 5 6 7] และสตริงคำตอบที่ 5 [2 1 4 6 5 7 3] โดยจะทำการพิจารณาปรับปรุงไปที่ละสตริงคำตอบ เริ่มต้นที่สตริงคำตอบที่ 4 ทำการปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,3), (1,4), ..., (1,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.5 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีคือ สตริงคำตอบที่ 2 [1 2 7 5 4 6 3] การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นโดยการลงโทษ โดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,2) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด

(รวมทั้งคู่ลำดับ (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,3), (1,4), ..., (1,7) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,7) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตรึงคำตอบที่ 2 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตรึงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.9 ตารางวิธีการบรรจบหลังการปรับปรุง

From/to	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1639	0.1639	0.1806	0.1639	0.1639	0.1639
2	0.1806	0.0000	0.1806	0.1639	0.1639	0.1639	0.1472
3	0.1639	0.1639	0.0000	0.1806	0.1639	0.1639	0.1639
4	0.1639	0.1639	0.1639	0.0000	0.1806	0.1639	0.1639
5	0.1639	0.1639	0.1639	0.1472	0.0000	0.1806	0.1806
6	0.1639	0.1639	0.1472	0.1639	0.1806	0.0000	0.1806
7	0.1667	0.1667	0.1833	0.1667	0.1500	0.1667	0.0000

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.6 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 1 ค่าคือ สตรึงคำตอบที่ 1 [1 2 5 6 4 7 3] ทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,2) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,3), (1,4), ..., (1,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตรึงคำตอบ

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.6 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีคือ สตรึงคำตอบที่ 3 [1 7 3 2 4 5 6] การปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษ โดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,7)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,1), (1,2), ..., (1,6) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วม

ที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (7,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตรึงคำตอบที่ 2 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตรึงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.10 ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 หลังการปรับปรุง

From/to	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1833	0.1667	0.1667	0.1667	0.1694	0.1500
2	0.1667	0.0000	0.1667	0.1500	0.1833	0.1667	0.1667
3	0.1694	0.1528	0.0000	0.1694	0.1694	0.1694	0.1694
4	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1500	0.1667	0.1833
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1667	0.1667
6	0.1639	0.1639	0.1639	0.1806	0.1639	0.0000	0.1639
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.7 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 1 คำคือ สตรึงคำตอบที่ 5 [2 1 4 6 5 7 3] ทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (2,1) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (2,1)) ภายในแถวเดียวกันคือ (2,2), (2,3), ..., (2,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (1,4) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตรึงคำตอบ

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.7 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดีคือ สตรึงคำตอบที่ 3 [1 7 3 2 4 5 6] การปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษ โดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,7) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,7)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,1), (1,2), ..., (1,6) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (7,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตรึงคำตอบที่ 2 จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตรึงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.11 ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 หลังการปรับปรุง

From/to	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1667	0.1667	0.1833	0.1667	0.1667	0.1500
2	0.1833	0.0000	0.1667	0.1500	0.1667	0.1667	0.1667
3	0.1694	0.1528	0.0000	0.1694	0.1694	0.1694	0.1694
4	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1500	0.1833	0.1667
5	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000	0.1500	0.1833
6	0.1639	0.1639	0.1639	0.1639	0.1806	0.0000	0.1639
7	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667	0.0000

การปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.8 จะพบว่ามีคำตอบที่ดีอยู่ 2 คำคือ สตริงคำตอบที่ 3 [1 7 3 2 4 5 6] และสตริงคำตอบที่ 4 [1 2 3 4 5 6 7] โดยจะทำการพิจารณาปรับปรุงไปที่ละสตริงคำตอบ เริ่มต้นที่สตริงคำตอบที่ 3 ทำการปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการให้รางวัลโดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,7) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และลดค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,7)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,2), (1,3), ..., (1,6) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการให้รางวัลหรือเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (7,3) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

กรณีคำตอบที่ไม่ดี เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.8 จะพบว่ามีคำตอบที่ไม่ดี 3 คำคือ สตริงคำตอบที่ 1 [1 2 5 6 4 7 3] สตริงคำตอบที่ 2 [1 2 7 5 4 6 3] และสตริงคำตอบที่ 5 [2 1 4 6 5 7 3] โดยจะทำการพิจารณาปรับปรุงไปที่ละสตริงคำตอบ เริ่มต้นที่สตริงคำตอบที่ 1 ปรับปรุงความน่าจะเป็นโดยการลงโทษโดยเริ่มที่คู่อันดับ (1,2) โดยลดค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)} = 0.0167$ และเพิ่มค่าความน่าจะเป็นของคู่ลำดับทั้งหมด (รวมทั้งคู่ลำดับ (1,2)) ภายในแถวเดียวกันคือ (1,3), (1,4), ..., (1,7) โดยเพิ่มค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ $x = \frac{0.1}{(7-1)^2} = 0.0028$ ต่อมาจึงทำการลงโทษหรือลดค่าความน่าจะเป็นในตารางความน่าจะเป็นร่วมที่ตำแหน่งคู่ลำดับที่ (2,5) ต่อไป และพิจารณาแบบนี้ไปจนครบทุกคู่ลำดับในสตริงคำตอบที่ 1, 2 และ 5 ตามลำดับ จะได้ตารางค่าความน่าจะเป็นร่วมที่ได้ผ่านการให้รางวัลและลงโทษสตริงคำตอบที่ดีและไม่ดีดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.12 ตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 3 หลังการปรับปรุง

From/to	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.1528	0.1694	0.1528	0.1694	0.1694	0.1861
2	0.1528	0.0000	0.1861	0.1861	0.1528	0.1694	0.1528
3	0.1611	0.1778	0.0000	0.1778	0.1611	0.1611	0.1611
4	0.1694	0.1694	0.1694	0.0000	0.2028	0.1361	0.1528
5	0.1694	0.1694	0.1694	0.1528	0.0000	0.1861	0.1528
6	0.1722	0.1722	0.1556	0.1556	0.1556	0.0000	0.1889
7	0.1722	0.1722	0.1694	0.1722	0.1556	0.1722	0.0000

เมื่อได้ตารางที่ผ่านการปรับปรุงความน่าจะเป็นดังตารางที่ 3.9 – 3.12 ตามลำดับ ในรอบการทำงานถัดไป จะทำการสร้างประชากรเริ่มต้นโดยสุ่มสร้างจากตารางวิธีการบรรจบที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว คิดเป็นร้อยละ 70 ของประชากรทั้งหมด และสร้างประชากรเริ่มต้นโดยสุ่มสร้างจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 – 3 คิดเป็นร้อยละ 30 ของประชากรทั้งหมด (ร้อยละที่ใช้ในการสุ่มจากตารางฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละตารางเท่ากับร้อยละ 33.33)

3.3.6 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุดในแต่ละรอบการทำงาน

การเก็บค่าที่ดีที่สุดของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย จะทำการเก็บค่าเฉพาะค่าที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด ($Fitness=1$) ในแต่ละรอบของการทำงาน โดยจะนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับรอบปัจจุบัน แล้วมาทำการเรียงลำดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อทำการเก็บค่าสตริงคำตอบที่ให้ค่าที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุด จะกลายเป็นกลุ่มของคำตอบที่ดีที่สุดในรอบนั้น แล้วทำการพิจารณาเช่นนี้ทุก ๆ รอบจนครบตามจำนวนที่ทำการทดลองไว้ ดังตารางที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

รอบการทำงาน	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
รอบก่อนหน้า	1	99.2214	28.7140	8.5514
	2	65.2561	27.4910	10.4830
รอบปัจจุบัน	1	98.2754	28.7140	8.5514
	2	57.6087	28.3334	10.5832

ตารางที่ 3.14 การเก็บค่าที่ดีที่สุดในรอบการทำงาน

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1	65.2561	27.4910	10.4830
2	98.2754	28.7140	8.5514
3	57.6087	28.3334	10.5832

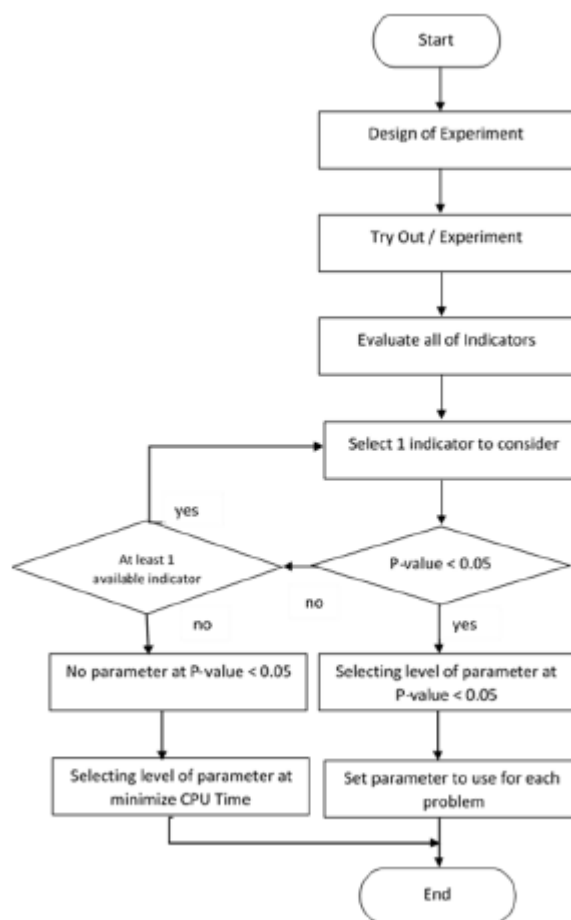
3.4 การทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย จำต้องพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 พารามิเตอร์ ประกอบด้วยขนาดประชากร (N) รอบการทำงานของอัลกอริทึม (R) ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ (k) และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากงานวิจัยได้ผ่านการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของ COIN-E ในส่วนของขนาดประชากร และรอบการทำงานของอัลกอริทึมมาแล้วในงานวิจัยก่อนหน้า (นายสถาพร โอบารวิวัฒน์ชัย, 2556)

งานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าพารามิเตอร์เฉพาะค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่านั้น จึงได้ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design โดยทำจำนวน 2 ซ้ำ โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะทั้ง 6 ตัวชี้วัด ประกอบด้วย การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time) เป็นตัวแปรตอบสนองกับระดับปัจจัยที่กำหนดข้างต้น

3.4.1 ผังขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

ขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถสรุปเป็นผังขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผังขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design
2. ทำการทดลองจำนวน 2 รอบการทดลองซ้ำ
3. คำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะทั้งหมดในทุกระดับปัจจัย เพื่อใช้เป็นค่าตัวแปรตอบสนอง
4. พิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะ ครั้งละ 1 ตัวชี้วัด ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม Minitab 17
5. สรุปผลจากขั้นตอนข้างต้น โดยมีขั้นตอนการพิจารณาคือ

- ในกรณีที่ค่า p-value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ จะตัดสินใจยอมรับว่าที่ระดับปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แล้วจึงทำการเลือกอันดับของค่าพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- ในกรณีที่ค่า p-value ของปัจจัยร่วม มีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ จะตัดสินใจปฏิเสธว่าที่ระดับปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แล้วจึงทำการพิจารณาตัวชี้วัดสมรรถนะถัดไปเป็นตัวแปรตอบสนอง จนครบทุกตัวชี้วัดสมรรถนะ
- ในกรณีที่ค่า P-value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ มากกว่า 1 ตัวชี้วัดสมรรถนะ จะทำการพิจารณาจากระดับความสำคัญของตัวชี้วัดสมรรถนะดังต่อไปนี้
 - ระดับที่ 1 การลู่เข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेट
 - ระดับที่ 2 อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง
 - ระดับที่ 3 อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้
 - ระดับที่ 4 จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेट
 - ระดับที่ 5 การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ
- หากค่าตัวชี้วัดทุกตัวมีค่า P-value ของปัจจัยร่วม มีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ ทั้งหมด จะทำการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

6. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

3.4.3 ตัวอย่างการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผล

ในตัวอย่างนี้จะทำการทดสอบพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลในปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลแบบที่ 1 ที่มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 15 หน่วยเวลา กำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ค่าพารามิเตอร์และระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ	0.1
		0.2
		0.3
	สัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบ และฟังก์ชันวัตถุประสงค์	60:40
		70:30
		80:20

จากตารางที่ 3.15 จะเห็นได้ว่ามีกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.1 ระดับที่ 2 ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.2 และระดับที่ 3 ความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.3 และกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ด้านสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่ 1 สัดส่วน 60:40 ระดับที่ 2 สัดส่วน 70:30 และระดับที่ 3 สัดส่วน 80:20 ดังตารางที่ 3.15 เมื่อนำไปทำการทดลอง จะได้ผลตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะตามระดับปัจจัยค่าพารามิเตอร์

ค่าความ น่าจะเป็น	สัดส่วน การสุ่ม	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Times
0.1	60:40	0.000130889	0.923336963	0.783333333	0.903846154	60	47.8271
0.1	60:40	0.000379516	0.945463023	0.766666667	0.884615385	60	45.4821
0.1	70:30	0.0000000	0.929103956	0.695652174	1.00000	59	45.9010
0.1	70:30	0.0000000	0.929103956	0.695652174	1.00000	59	46.1200
0.1	80:20	0.004224353	0.866089743	0.714285714	0.769230769	56	54.3912
0.1	80:20	0.005865552	0.906311084	0.75862069	0.846153846	58	48.3719
0.2	60:40	0.010926527	0.858903134	0.654545455	0.692307692	55	52.1836
0.2	60:40	0.005074287	0.912825117	0.661016949	0.75	59	46.4921
0.2	70:30	0.0000011	0.921440	0.813559322	0.92308	59	52.1937
0.2	70:30	0.0000013	0.914693257	0.810344831	0.90384615	58	51.2910
0.2	80:20	0.002801914	0.905464942	0.706896552	0.788461538	60	60.2013
0.2	80:20	0.00198421	0.910392417	0.711864407	0.807692308	59	64.2810
0.3	60:40	0.000579441	0.893593053	0.807017544	0.884615385	57	53.9582
0.3	60:40	0.002018481	0.896123306	0.724137931	0.807692308	58	66.9201
0.3	70:30	0.0000014	0.902309382	0.810344831	0.88679245	58	74.0000

ตารางที่ 3.16 (ต่อ) ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะตามระดับปัจจัยค่าพารามิเตอร์

ค่าความน่าจะเป็น	สัดส่วนการสุ่ม	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Times
0.3	70:30	0.0000012	0.921440	0.813559322	0.90566	59	70.9290
0.3	80:20	0.001593405	0.877416294	0.785714286	0.846153846	56	62.1956
0.3	80:20	0.001299068	0.901899799	0.800000	0.846153846	55	59.3920

หลังจากได้ผลตัวชี้วัดสมรรถนะดังตารางที่ 3.16 จึงทำการกำหนดสมมติฐานดังต่อไปนี้

สมมติฐานการวิจัย : ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวชี้วัดสมรรถนะ

สมมติฐานสถิติ : $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_k$

ระดับนัยสำคัญ (α) : 0.05

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลด้วย Two-way ANOVA ดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.3

Two-way ANOVA : Convergence versus Factor1, Factor2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor1	2	0.000020	0.000010	4.57	0.043
Factor2	2	0.000038	0.000019	8.57	0.008
Factor1*Factor2	4	0.000064	0.000016	7.27	0.007
Error	9	0.000020	0.000002		
Total	17	0.000142			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0014875	86.01%	73.58%	44.06%

รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้การรู้เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง

- วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.4

Two-way ANOVA : Spread versus Factor1, Factor2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor1	2	0.001003	0.000502	1.49	0.276
Factor2	2	0.001906	0.000953	2.83	0.111
Factor1*Factor2	4	0.002514	0.000628	1.87	0.200
Error	9	0.003028	0.000336		
Total	17	0.008451			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0183432	64.16%	32.31%	0.00%

รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วมมีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ

- วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้เป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.5

Two-way ANOVA : RNDS-I versus Factor1, Factor2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor1	2	0.014229	0.007114	13.62	0.002
Factor2	2	0.005079	0.002539	4.86	0.037
Factor1*Factor2	4	0.028027	0.007007	13.41	0.001
Error	9	0.004702	0.000522		
Total	17	0.052036			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0228567	90.96%	82.93%	63.86%

รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้เป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจุและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้

- วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.6

Two-way ANOVA : RNDS-II versus Factor1, Factor2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor1	2	0.024362	0.012181	13.19	0.002
Factor2	2	0.055400	0.027700	29.98	0.000
Factor1*Factor2	4	0.022525	0.005631	6.10	0.012
Error	9	0.008314	0.000924		
Total	17	0.110600			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0303940	92.48%	85.80%	69.93%

รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วม มีค่าน้อยกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกต้องกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง

- วิเคราะห์ ANOVA โดยใช้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 3.7

Two-way ANOVA : NNDS versus Factor1, Factor2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor1	2	7.444	3.722	2.68	0.122
Factor2	2	5.444	2.722	1.96	0.197
Factor1*Factor2	4	19.556	4.889	3.52	0.054
Error	9	12.500	1.389		
Total	17	44.944			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.17851	72.19%	47.47%	0.00%

รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA โดยใช้จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเป็นตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า ค่า P-Value ของปัจจัยร่วมมีค่ามากกว่าที่ระดับ $\alpha=0.05$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

- จากขั้นตอนที่ 1-5 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ และสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองมากกว่า 1 ตัวแปร จึงทำการพิจารณาจากระดับความสำคัญของตัวชี้วัดสมรรถนะ ซึ่งตัวแปรที่มีระดับความสำคัญมากที่สุดคือ ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง พบว่าปัจจัยด้านค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ ระดับที่ 1 คือ 0.1 และปัจจัยด้านสัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่ม

ตารางวิธีการบรรจุบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ระดับที่ 2 คือ 70:30 มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุด
ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม
ค่าความน่าจะเป็นในการให้รางวัลและลงโทษ	0.1
สัดส่วนค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการบรรจุบ และฟังก์ชันวัตถุประสงค์	70:30



บทที่ 4

การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ คือ เจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

4.1 วิธีการของเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)

เจเนติกอัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมที่เกิดจากแนวความคิดเรื่องพันธุกรรมของมนุษย์ ในเรื่อง ที่พ่อแม่จะถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมไปสู่รุ่นลูก โดยการคัดเลือกโครโมโซม (Chromosome) หรือสตริงคำตอบ (String) ออกมาด้วยวิธีการสุ่มอย่างอิสระ ซึ่งในแต่ละสตริงคำตอบจะประกอบไปด้วยยีน (Gene) หรือคุณลักษณะ (Character) ที่มีความแตกต่างกัน หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ (Crossover) เพื่อทำการแลกเปลี่ยนคุณลักษณะระหว่างสตริงคำตอบ เพื่อให้สตริงคำตอบรุ่นลูกเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะ หลังจากนั้นจะทำการสุ่มสตริงคำตอบรุ่นลูก บางส่วนเข้าสู่กระบวนการมิวเตชัน (Mutation) เพื่อทำการแลกเปลี่ยนคุณสมบัติภายในสตริงคำตอบ นั้นๆ เพื่อให้เกิดความหลากหลายของสตริงคำตอบ โดยวิธีการทางฮิวริสติกนี้ถือเป็นวิธีการที่นำมาใช้ ได้การค้นหาคำตอบ เนื่องจากจะได้คำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุด หรือมีความใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด มีขั้นตอนในการทำงานดังรูปที่ 4.1

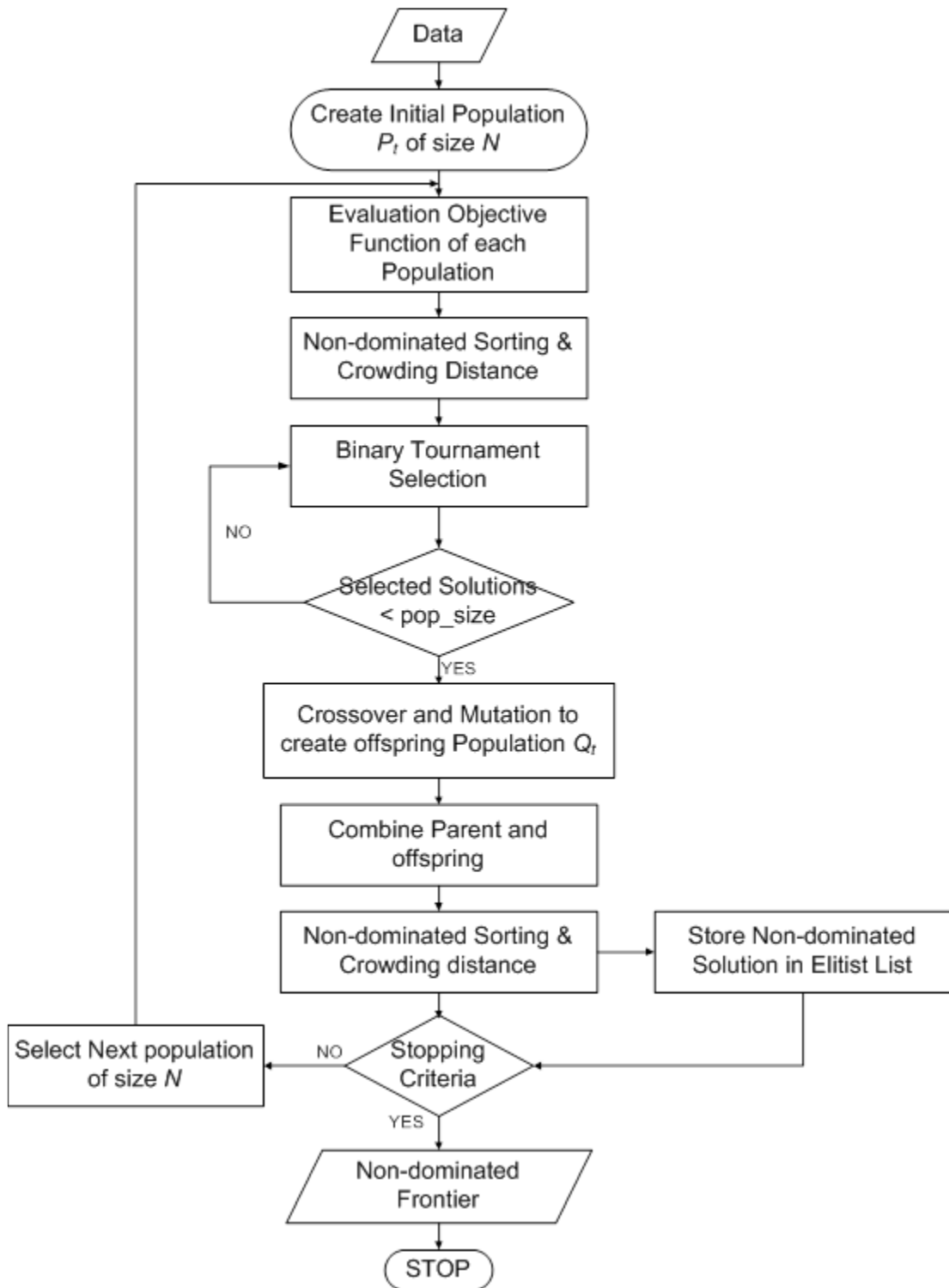
4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)

1. Data Input การนำเข้าสู่ข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิต ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของชิ้นงาน สถานีงานที่ได้จากการจัดสมดุลแล้ว

2. Representation & Initialization นำข้อมูลที่ได้นำเข้าจากขั้นตอนที่ 1 มาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเลือกอย่างอิสระมาจำนวน N ตัว

3. Evaluation นำสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นมาประเมินค่าหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

4. Pareto Based Approach กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting
5. Density Information กำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance (Deb, Pratap et al. 2002)
6. Selection นำสตริงคำตอบที่ดีเข้าสู่ Mating Pool ด้วยวิธี Binary Tournament Selection
7. Crossover นำสตริงคำตอบที่จัดไว้ใน Mating Pool มาทำการแลกเปลี่ยนลักษณะของตำแหน่งการผลิตของแต่ละตำแหน่งด้วยวิธี Weight Mapping Crossover (WMX)
8. Mutation นำสตริงคำตอบมาสลับกันภายในสตริงคำตอบของตัวเองด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation
9. Combination Population ทำการนำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการออกมาเป็นรุ่นลูก มารวมกับสตริงคำตอบเริ่มแรกที่เป็นของพ่อแม่
10. Selection Next Population คัดเลือกสตริงคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากกระบวนการขั้นตอนที่ 9 เพื่อนำไปใช้เป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในแต่ละรอบต่อไป
11. Strategies to Maintain Elitist Solution in the Population นำคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้ามารวมกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบันแล้วทำการคัดเลือกด้วยวิธีการ Non-dominated Sorting แล้วเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้และนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปสร้างเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรอบต่อไป
12. Stopping Criteria ทำการวนซ้ำกระบวนการจนคำตอบที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือครบจำนวนเงินเนอเรนชันสูงสุดที่กำหนดไว้
13. Stop หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ แล้วเก็บคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 12 มาเป็นกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II)

4.3 ตัวอย่างการนำเจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

4.3.1 การนำเข้าข้อมูลการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนชิ้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละชิ้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละชิ้นงาน รอบเวลาดำเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในวิธีการของเจเนติกอัลกอริทึม

จำนวนประชากรเบื้องต้น ตัว 5

วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX)

วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation

ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7

ความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.1

4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเบื้องต้น

การสร้างประชากรเบื้องต้นโดยใช้ตัวดำเนินการคือตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) โดยทำการนำจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด นำมาสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม ดังนี้ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 รุ่น ได้แก่ A, B, C และ D มีจำนวน Minimum Part Set (MPS) คือ 1:2:3:1 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A จำนวนเท่ากับ 1 ผลิตภัณฑ์ B จำนวนเท่ากับ 2 ผลิตภัณฑ์ C จำนวนเท่ากับ 3 และผลิตภัณฑ์ D จำนวนเท่ากับ 1 เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต ดังนี้

Model Sequence	A	B	B	C	C	C	D
String	1	2	3	4	5	6	7

เมื่อกำหนดรหัสของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้แล้ว จะทำการสุ่มเพื่อสร้างประชากรเริ่มต้นจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด โดยมีขั้นตอนการสุ่มดังต่อไปนี้

สุ่มเลือกค่าตำแหน่ง 2 จุด เพื่อทำการสลับค่า โดยจำนวนครั้งในการสลับจะมีค่าเท่ากับ
 ครั้งหนึ่งของจำนวนสัดส่วนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด หรือ $\frac{l}{2}$ เมื่อ $l = \sum_{i=1}^l d_m$

ในกรณีที่ว่า $\frac{l}{2}$ มีค่าเป็นจำนวนคี่ให้ทำการปัดค่าขึ้นเสมอ

ในกรณีนี้คือ $l = \sum_{i=1}^4 d_m = 1+2+3+1=7$ เพราะฉะนั้น $\frac{l}{2} = \frac{7}{2} = 3.5$ จึงทำให้การสุ่ม

สร้างประชากรเบื้องต้นมีจำนวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับ 4 ดังต่อไปนี้

Model Sequence

A	B	B	C	C	C	D
1	2	3	4	5	6	7

Priority

Model Sequence

A	B	B	C	C	C	D
1	2	3	4	5	6	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 1

Model Sequence

A	B	C	C	B	C	D
1	2	5	4	3	6	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 2

Model Sequence

A	B	C	C	B	C	D
1	2	5	6	3	4	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 3

Model Sequence

A	B	C	C	C	B	D
1	2	5	6	4	3	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 4

เมื่อทำการสลับตำแหน่งจนครบ 4 ครั้ง จะได้ลำดับผลิตภัณฑ์ใหม่ดังนี้

Model Sequence

A	B	C	C	C	D	B
1	2	5	6	4	7	3

แล้วทำการสร้างประชากรเริ่มต้นให้มีจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลำดับการผลิตของกลุ่มประชากรเริ่มต้น

String	Priority	Model Sequence
1	1 2 5 6 4 7 3	A B C C C D B
2	1 2 7 5 4 6 3	A B D C C C B
3	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
4	1 2 3 4 5 6 7	A B C C C C D
5	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B

4.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับการผลิตของกลุ่มประชากรเริ่มต้นแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 8.5 เพื่อทำการประเมินค่าความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1	60.7278	28.7285	10.5832
2	68.7849	28.7469	10.5832
3	116.9754	29.0298	8.5514
4	98.2754	28.7140	8.5514
5	57.6087	28.3334	10.5832

4.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ให้กับสตริงคำตอบของประชากรเริ่มต้น

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และกำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่นของประชากรเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	Infinity
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	Infinity
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	Infinity
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	Infinity
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	Infinity

4.3.5 การคัดเลือกสตริงคำตอบ (Selection)

การคัดเลือกสตริงคำตอบนั้น จะทำการพิจารณาจากค่าความแข็งแรง (Fitness) โดยวิธีการที่ใช้ในการคัดเลือกคือวิธีการแบบ Binary Tournament Selection ซึ่งเป็นวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธี Roulette Wheel Selection โดยจำนวนสตริงคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกจำนวนเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น จะผ่านเข้าสู่ Mating Pool เพื่อรอการจับคู่และดำเนินการขั้นต่อไป

4.3.5.1 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness)

ขั้นตอนแรกของการคัดเลือกสตริงคำตอบคือการแปลงค่าความแข็งแรง (Fitness) ของสตริงคำตอบให้เปลี่ยนเป็นค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง (Dummy Fitness) เพื่อให้สตริงคำตอบที่มีความแข็งแรงที่ดีกว่านั้นมีโอกาสถูกคัดเลือกในกระบวนการขั้นถัดไปมากขึ้น ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การแปลงค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Dummy Fitness	Crowding Distance
1	60.7278	28.7285	10.5832	2	2	Infinity
2	68.7849	28.7469	10.5832	3	1	Infinity
3	116.9754	29.0298	8.5514	2	2	Infinity
4	98.2754	28.7140	8.5514	1	3	Infinity
5	57.6087	28.3334	10.5832	1	3	Infinity

4.3.5.2 การสร้างวงล้อสุ่ม

วงล้อสุ่ม คือ วงกลมสมมติที่มีขนาด 1 หน่วย และแบ่งพื้นที่ภายในวงกลมออกเป็น ส่วน ๆ ตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ โดยพื้นที่ในแต่ละส่วนจะมีขนาดเท่ากับความน่าจะเป็นในการคัดเลือกสตริงคำตอบ โดยมีวิธีการสร้างวงล้อสุ่มดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. หาค่าความแข็งแรงรวมของสตริงคำตอบทั้งหมดเท่ากับจำนวนประชากร ดังสมการต่อไปนี้

$$F = \sum_{i=1}^{popsize} f_1(x_i) \quad (4.1)$$

เมื่อ $f_1(x_i)$ คือ ค่าความแข็งแรงของของสตริงคำตอบที่ i

2. หาค่าความน่าจะเป็นในการคัดเลือกสตริงคำตอบ (Probability of Selection) ของสตริงคำตอบทุกตัวในกลุ่มประชากร ดังสมการต่อไปนี้

$$p_i = \frac{f_1(x_i)}{F} ; i = 1, 2, \dots, popsize \quad (4.2)$$

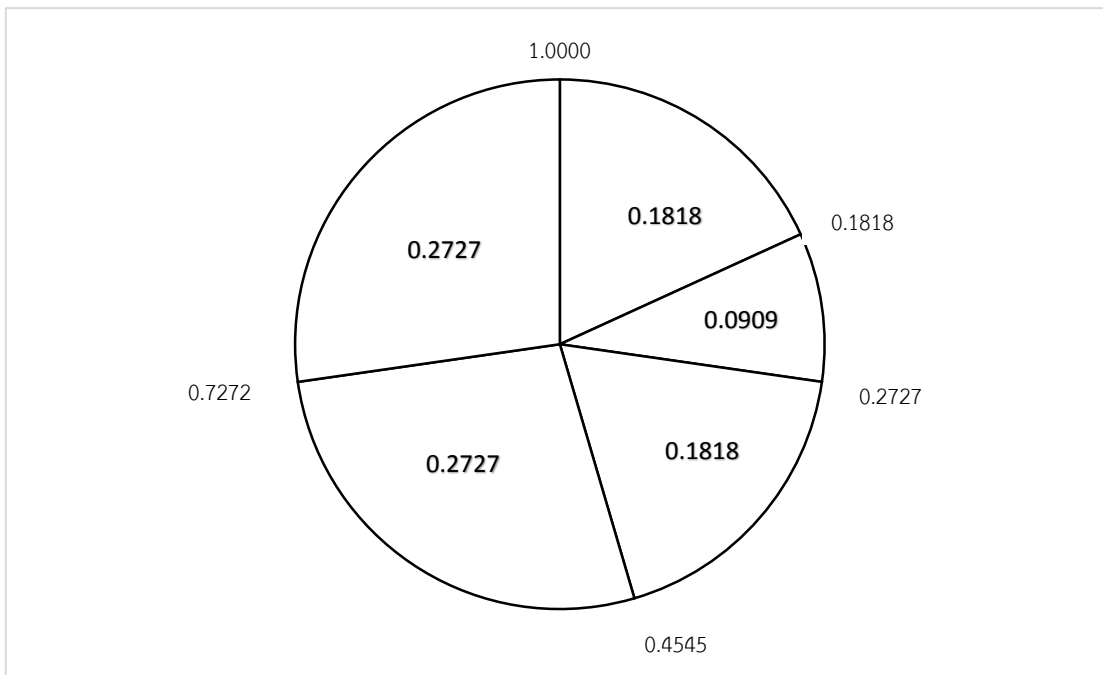
3. หาค่าความน่าจะเป็นในการคัดเลือกสตริงคำตอบสะสม (Cumulative Probability of Selection) ของสตริงคำตอบทุกตัวในกลุ่มประชากร ดังสมการต่อไปนี้

$$q_i = \sum_{j=1}^i p_j \quad (4.3)$$

เมื่อทำการสร้างวงล้อสุ่มครบตามขั้นตอนข้างต้น จะได้ตัวอย่างผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.5 การสร้างวงล้อสุ่ม

String	Dummy Fitness	p_i	q_i
1	2	0.1818	0.1818
2	1	0.0909	0.2727
3	2	0.1818	0.4545
4	3	0.2727	0.7272
5	3	0.2727	1
Total	11	1	



รูปที่ 4.2 การสร้างวงล้อรูเล็ต

4.3.5.3 ขั้นตอนการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection

การคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection เป็นการสุ่มเลือกสตริงคำตอบจากการหมุนวงล้อรูเล็ตมา 2 สตริงคำตอบ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงไม่แท้จริง โดยจะทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงสูงกว่าเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป โดยมีขั้นตอนการคัดเลือกสตริงคำตอบด้วยวิธี Binary Tournament Selection ดังต่อไปนี้

1. สุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 กำหนดให้เป็นค่า r_1
2. กรณีที่ค่า $r_1 < q_1$ จะทำการเลือกสตริงคำตอบตัวแรก แต่กรณีที่ค่า $q_{i-1} < r_1 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนประชากร) ให้ทำการเลือกสตริงตัวที่ i เป็นคำตอบตัวแรก)
3. สุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 กำหนดให้เป็นค่า r_2
4. กรณีที่ค่า $r_2 < q_1$ จะทำการเลือกสตริงคำตอบตัวแรก แต่กรณีที่ค่า $q_{i-1} < r_2 < q_i$ (เมื่อ i มีค่าจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนประชากร) ให้ทำการเลือกสตริงตัวที่ i เป็นคำตอบตัวแรก)
5. ทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงระหว่างสตริงที่ถูกคัดเลือกในขั้นตอนที่ 2 และ 4 โดยสตริงไหนที่มีค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงมากกว่า จะถูกคัดเลือกเข้า Mating

Pool ต่อไป (ในกรณีที่ค่าความแข็งแรงไม่แท้จริงเท่ากัน จะเลือกค่าที่มีความหนาแน่นมากกว่า)

6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-5 จนกว่าจะได้จำนวนสตริงใน Mating Pool เท่ากับจำนวนประชากร

ตารางที่ 4.6 การคัดเลือกด้วยวิธี Binary Tournament Selection

No.	Population 1				Population 2				String Selected
	r_1	$r_1 < q_i$	String	Dummy Fitness	r_2	$r_2 < q_i$	String	Dummy Fitness	
1	0.7979	1.0000	5	3	0.1696	0.1818	1	2	5
2	0.6006	0.7272	4	3	0.6667	0.7272	4	3	4
3	0.0352	0.1818	1	2	0.4054	0.4545	3	2	3
4	0.3880	0.4545	3	2	0.1614	0.1818	1	2	1
5	0.8883	1.0000	5	3	0.4528	0.4545	3	2	5

4.3.6 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

4.3.6.1 การจับคู่สตริงคำตอบ

หลังการคัดเลือกสตริงคำตอบครบตามจำนวนประชากร จะทำการจับคู่สตริงคำตอบบางตัวเพื่อทำการครอสโอเวอร์ โดยที่จำนวนสตริงคำตอบที่ถูกมาจับคู่จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_c) ส่วนสตริงคำตอบที่ไม่ได้ถูกเลือกจะยังคงอยู่ใน Mating Pool ดั้งเดิม เพื่อเป็นประชากรในเจนเนอเรชันต่อไป ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 กำหนดให้เป็นค่า r ให้กับสตริงคำตอบทุกตัวใน Mating Pool
2. ทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า $r < P_c$ เพื่อไปทำการจับคู่ในขั้นตอนต่อไป
3. ถ้าไม่มีสตริงคำตอบใดเลยที่มีค่า $r < P_c$ ให้ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 และ 2
4. ถ้าสตริงคำตอบที่ถูกคัดเลือกในขั้นตอนที่ 2 มีจำนวน N_c ตัว และเป็นจำนวนคี่ จะทำการปรับให้เป็นจำนวนคู่ก่อนโดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้
 - ถ้า N_c เป็นจำนวนคี่ และมีค่าระหว่าง 1 ถึงขนาดประชากร ให้ทำการสุ่มตัวเลข 0 หรือ 1 มา 1 ค่า ซึ่งถ้าสุ่มได้เลข 1 จะทำการสุ่มเลือกสตริงที่เหลือใน Mating pool มาเพิ่มอีก 1 สตริงคำตอบ แต่ถ้าสุ่มได้เลข 0 จะทำการตัดสตริงคำตอบที่เลือกไว้ทิ้งไป 1 ตัว
 - เมื่อ N_c มีค่าเท่ากับ 1 จะทำการเพิ่มสตริงคำตอบอีก 1 ตัวเท่านั้น

- เมื่อ N_c มีค่าเท่ากับขนาดประชากรซึ่งเป็นจำนวนคี่ จะทำการตัดสตริงคำตอบที่เลือกไว้ไป 1 ตัว

5. เมื่อได้สตริงคำตอบทั้งหมด N_c ตัว ให้นำมาจับคู่ตามลำดับ จะได้จำนวนคู่เท่ากับ $\frac{N_c}{2}$

ในตัวอย่างนี้มีค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์เท่ากับ 0.7 ดังนั้นจำนวนสตริงคำตอบที่จะทำการถูกครอสโอเวอร์มีประมาณ 70% ของสตริงคำตอบทั้งหมด มีค่าเท่ากับ $0.7 \times 5 = 3.5$ หรือประมาณ 4 ตัว

ตารางที่ 4.7 การจับคู่สตริงคำตอบ

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.7$
1	2 1 4 6 5 7 3	0.2456	selected
2	1 2 3 4 5 6 7	0.6732	selected
3	1 7 3 2 4 5 6	0.4478	selected
4	1 2 5 6 4 7 3	0.1534	selected
5	2 1 4 6 5 7 3	0.8324	

4.3.6.2 ขั้นตอนการครอสโอเวอร์

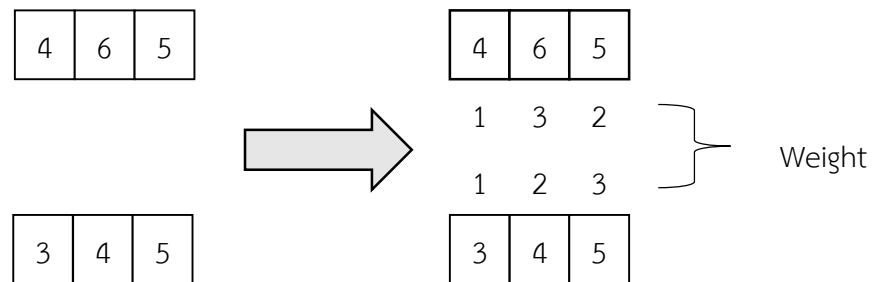
การครอสโอเวอร์จะเป็นการนำสตริงคำตอบที่ทำการจับคู่กันในขั้นตอนที่แล้ว มาทำการแลกเปลี่ยนส่วนของสตริงคำตอบซึ่งกันและกัน เพื่อให้ได้สตริงคำตอบใหม่ โดยสตริงคำตอบที่ทำการจับคู่กันเรียกว่า “สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่” และสตริงคำตอบที่ได้จากการแลกเปลี่ยนกันเรียกว่า “สตริงคำตอบรุ่นลูก” ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Weight Mapping Crossover (WMX) ซึ่งจะวิธีการดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนความของสตริงคำตอบ (จำนวน bit) เพื่อทำการระบุขอบเขตของการทำครอสโอเวอร์ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อนำสตริงคำตอบคู่แรกมาทำการสุ่มได้ค่า 3 และ 5 ตามลำดับ จะใช้เครื่องหมาย “|” ในการกำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ 1 = [2 | 1 | 4 6 | 5 | 7 3]

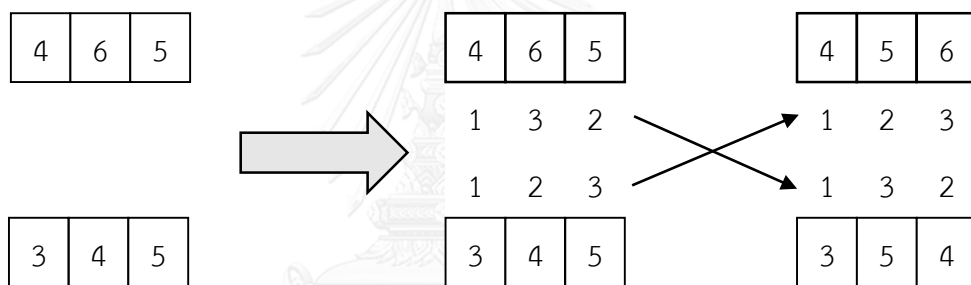
สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ 2 = [1 | 2 | 3 4 | 5 | 6 7]

2. ทำการให้น้ำหนักกับค่าของสตริงที่อยู่ในขอบเขตของการครอสโอเวอร์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การให้น้ำหนักกับค่าของสตริงที่อยู่ในขอบเขตของการครอสโอเวอร์

3. ทำการแลกเปลี่ยนค่าน้ำหนักระหว่างสตริงคำตอบที่จับคู่กัน แล้วเปลี่ยนค่าภายในสตริงคำตอบตามค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแลกเปลี่ยนค่าน้ำหนักระหว่างสตริงคำตอบ

เมื่อทำการครอสโอเวอร์ด้วยวิธีการแบบ Weight Mapping Crossover (WMX) ดังตัวอย่างข้างต้น ทำให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูกดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบรุ่นลูก 1 = [2 1 | 4 5 6 | 7 3]

สตริงคำตอบรุ่นลูก 2 = [1 2 | 3 5 4 | 6 7]

หลังจากนั้นจึงนำสตริงที่ 3 และ 4 มาทำการครอสโอเวอร์ด้วยวิธีการแบบ Weight Mapping Crossover (WMX) โดยสุ่มขอบเขตของการทำครอสโอเวอร์ได้ตำแหน่ง 4 และ 7 ตามลำดับ ได้สตริงคำตอบรุ่นลูกดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบรุ่นลูก 3 = [1 7 3 | 5 4 6 | 2]

สตริงคำตอบรุ่นลูก 4 = [1 2 5 | 3 4 6 | 7]

4.3.7 การมิวเตชัน

การมิวเตชัน (Mutation) เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนตำแหน่ง (แลกเปลี่ยนค่า bit) ภายในสตริงคำตอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ไม่อาจเรียกคืนได้ เนื่องจากในบางกรณี คำตอบที่ผ่านการดำเนินงานต่าง ๆ อาจเข้าไปติดอยู่ในกลุ่มคำตอบเฉพาะที่ การมิวเตชันช่วยให้คำตอบสามารถหลุดออกมาให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด วิธีการมิวเตชันนั้นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะขอเสนอวิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m)

ซึ่งในตัวอย่างนี้ทำการกำหนดความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) เท่ากับ 0.3 ทำให้มีสตริงคำตอบที่จะทำการมิวเตชันเท่ากับ $0.3 \times 5 = 1.5$ หรือประมาณ 2 สตริงคำตอบ

2. สุ่มตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 กำหนดให้เป็นค่า r ให้กับสตริงคำตอบทุกตัวใน Mating Pool เลือกสตริงคำตอบที่มีค่า $r < P_m$ มาทำการมิวเตชัน ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อทำการมิวเตชัน

String No.	String Priority	r_i	$r_i < 0.3$
1	2 1 4 5 6 7 3	0.4832	-
2	1 2 3 5 4 6 7	0.2471	selected
3	1 7 3 5 4 6 2	0.7462	-
4	1 2 5 3 4 6 7	0.0368	selected
5	2 1 4 6 5 7 3	0.5919	-

3. ทำการสุ่มตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึงจำนวนความของสตริงคำตอบ (จำนวน bit) เพื่อทำการระบุตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันของการทำมิวเตชัน ดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบที่ 2 = [1 |2| 3 5 |4| 6 7] สุ่มได้ตำแหน่งที่ 2 และ 5 ตามลำดับ

สตริงคำตอบที่ 4 = [1|1| 2 |5| 3 4 6 7] สุ่มได้ตำแหน่งที่ 1 และ 3 ตามลำดับ

4. ทำการสลับค่า bit ของตำแหน่งที่ถูกเลือกในการทำมิวเตชัน จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

สตริงคำตอบที่ 2 = [1 |4| 3 5 |2| 6 7]

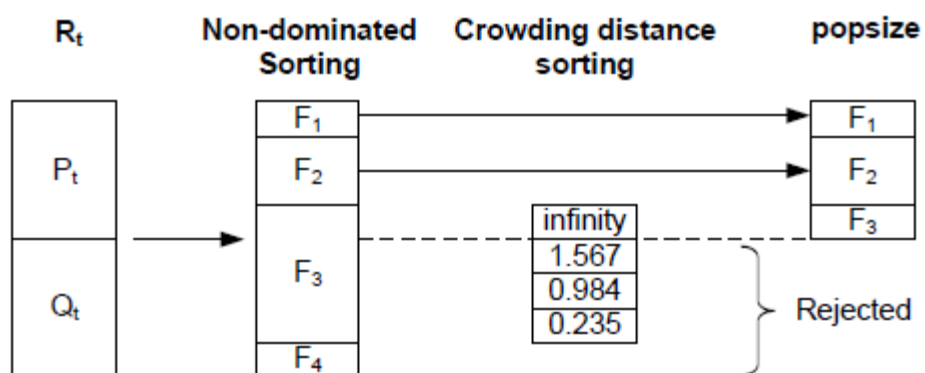
สตริงคำตอบที่ 4 = [1|5| 2 |1| 3 4 6 7]

ตารางที่ 4.9 สตริงคำตอบหลังการมิวเตชัน

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

4.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดและป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีที่สุดหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ เนื่องจากสตริงคำตอบที่ได้จากการครอสโอเวอร์และมิวเตชันนั้น อาจทำให้เกิดคำตอบที่ดีกว่าหรือแย่กว่าคำตอบที่เคยปรากฏในเจนเนอเรชันที่ผ่านมา จึงได้มีการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของกลุ่มสตริงคำตอบชุดใหม่ที่ได้ และทำการเก็บสตริงคำตอบที่เป็น Non-dominated Solution ซึ่งได้จากการรวมกันของประชากรคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P_t) และประชากรคำตอบรุ่นลูก (Q_t) ในสถานที่รวมคำตอบ ($R_t = P_t + Q_t$) และทำการเก็บคำตอบที่ได้จาก Non-dominated Sorting และทำการปรับปรุง (Update) สตริงคำตอบใหม่ในสถานที่เก็บคำตอบด้วยการย้ายสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวเดิมออก และเพิ่มสตริงคำตอบที่ดีที่สุดตัวใหม่เข้ามา โดยสตริงคำตอบที่ได้ในขั้นตอนนี้จะกลายเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในเจนเนอเรชันต่อไปดังรูปที่ 4.5 และมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

1. นำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกมารวมกัน ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority
สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่	1	1 2 5 6 4 7 3
	2	1 2 7 5 4 6 3
	3	1 7 3 2 4 5 6
	4	1 2 3 4 5 6 7
	5	2 1 4 6 5 7 3
สตริงคำตอบรุ่นลูก	6	2 1 4 5 6 7 3
	7	1 4 3 5 2 6 7
	8	1 7 3 5 4 6 2
	9	5 2 1 3 4 6 7
	10	2 1 4 6 5 7 3

2. ทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับทุกสตริงคำตอบดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก

ลักษณะสตริงคำตอบ	String No.	String Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่	1	1 2 5 6 4 7 3	60.7278	28.7285	10.5832
	2	1 2 7 5 4 6 3	68.7849	28.7469	10.5832
	3	1 7 3 2 4 5 6	116.9754	29.0298	8.5514
	4	1 2 3 4 5 6 7	98.2754	28.7140	8.5514
	5	2 1 4 6 5 7 3	57.6087	28.3334	10.5832
สตริงคำตอบรุ่นลูก	6	2 1 4 5 6 7 3	57.6087	28.3334	10.5832
	7	1 4 3 5 2 6 7	52.7040	29.0530	15.2256
	8	1 7 3 5 4 6 2	74.6897	28.9113	10.5832
	9	5 2 1 3 4 6 7	52.4040	27.7097	12.9044
	10	2 1 4 6 5 7 3	57.6087	28.3334	10.5832

3. ทำการประเมินค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก

ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งแรง และความหนาแน่นของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูก

String No.	String Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding distance
1	1 2 5 6 4 7 3	60.7278	28.7285	10.5832	2	2.0715
2	1 2 7 5 4 6 3	68.7849	28.7469	10.5832	3	Infinity
3	1 7 3 2 4 5 6	116.9754	29.0298	8.5514	2	Infinity
4	1 2 3 4 5 6 7	98.2754	28.7140	8.5514	1	Infinity
5	2 1 4 6 5 7 3	57.6087	28.3334	10.5832	1	1.7323
6	2 1 4 5 6 7 3	57.6087	28.3334	10.5832	1	0.0000
7	1 4 3 5 2 6 7	52.7040	29.0530	15.2256	2	Infinity
8	1 7 3 5 4 6 2	74.6897	28.9113	10.5832	4	Infinity
9	5 2 1 3 4 6 7	52.4040	27.7097	12.9044	1	Infinity
10	2 1 4 6 5 7 3	57.6087	28.3334	10.5832	1	1.2677

4. ทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น เพื่อเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป จากตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่ามีสตริงคำตอบที่ 4, 5, 6, 9 และ 10 มีค่า Fitness เท่ากับ 1 และมีจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้นคือ 5 สตริงคำตอบ เพราะฉะนั้นสตริงคำตอบทั้ง 5 ตัวที่กล่าวมานั้นจึงเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไปดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป

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

เมื่อได้สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป จึงเริ่มกระบวนการทำซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 4.3.3 เป็นต้นมาจนครบกระบวนการทั้งหมด และทำซ้ำเป็นจำนวนรอบเท่ากับที่กำหนดไว้

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของ สิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

5.1 วิธีการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-based Optimization: BBO) เป็นอัลกอริทึมที่คิดค้นโดย Simon (2008) โดยเป็นแนวคิดที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมการอพยพย้ายที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตระหว่างเกาะต่างๆ โดยแต่ละเกาะนั้นก็มีความเหมาะสมต่อการใช้เป็นที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกันออกไป โดยมีดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัย (Habitat Suitability; HSI) เป็นตัวชี้วัด โดยตัวชี้วัดดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรดัชนีความเหมาะสม (Suitability Index Variables; SIVs) นั่นก็คือปัจจัยต่างๆ เช่น ความหลากหลายของระบบนิเวศ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความอุดมสมบูรณ์ของพืชพันธุ์ เป็นต้น จำนวนชนิดของสิ่งมีชีวิต (สปีชีส์) ที่อาศัยอยู่ในเกาะนั้นๆ จะแปรผันตามดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัย กล่าวคือ ในเกาะที่มีค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัยสูง จะมีจำนวนสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตมากจนใกล้จุดอิ่มตัว ส่งผลให้มีอัตราการอพยพออก (Emigration Rate) ของสปีชีส์ไปยังเกาะอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกันมีค่าสูง (การอพยพออกในที่นี้คือการที่ตัวแทนของสปีชีส์อพยพแพร่พันธุ์ออกไปยังเกาะอื่น โดยสปีชีส์บนเกาะเดิมยังคงอยู่ ไม่หายไป) ขณะที่อัตราการอพยพเข้า (Immigration Rate) ของสปีชีส์จากเกาะอื่นจะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม เกาะที่มีค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัยต่ำ จะมีจำนวนสปีชีส์ของสิ่งมีชีวิตน้อยมาก ส่งผลให้มีอัตราการอพยพออกของสปีชีส์ไปยังเกาะอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกันมีค่าต่ำ ขณะที่อัตราการอพยพเข้าของสปีชีส์จากเกาะอื่นจะมีค่าสูง จึงส่งผลให้เกาะที่มีค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัยต่ำ จะมีค่าดัชนีดังกล่าวสูงขึ้นเมื่อมีการอพยพของสปีชีส์ใหม่ๆ เข้ามา เนื่องจากค่าดัชนีนั้นจะแปรผันไปตามจำนวนสปีชีส์

ในการนำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานนั้น เกาะจะเปรียบเสมือนสตริงคำตอบ ดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัยจะ

เปรียบเสมือนค่าความแข็งแรง และตัวแปรดัชนีความเหมาะสมจะเปรียบเสมือนบิตต่างๆของสตริงคำตอบ (ค่าของบิตต่างๆ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าดัชนีความเหมาะสมของที่อยู่อาศัยมีความแตกต่างออกไป) ส่งผลให้มีแนวโน้มสูงที่คำตอบที่ดีจะถ่ายทอดคุณลักษณะให้กับคำตอบอื่น โดยเฉพาะกับคำตอบที่แย่ แต่จะแนวโน้มต่ำที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่น แม้คำตอบที่ดีอาจมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็มีแนวโน้มว่าจะพัฒนาไปเป็นคำตอบที่ดียิ่งขึ้น ในทางตรงกันข้ามคำตอบที่แย่จะมีแนวโน้มสูงที่จะรับการถ่ายทอดคุณลักษณะจากคำตอบอื่นๆ โดยเฉพาะจากคำตอบที่ดี ส่งผลให้มีการพัฒนาคำตอบให้ดียิ่งขึ้น แต่จะแนวโน้มต่ำที่จะถ่ายทอดคุณลักษณะของตัวเองให้กับคำตอบอื่นๆ

5.2 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

1. การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิต ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของชิ้นงาน สถานีงานที่ได้จากการจัดสมดุลแล้ว

2. นำข้อมูลที่ได้นำเข้าจากขั้นตอนที่ 1 มาสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นโดยวิธีการสุ่มเลือกอย่างอิสระมาจำนวน N ตัว โดยกำหนดให้เป็นเซตของสตริงคำตอบเริ่มต้น $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ และทำการคัดลอกเพื่อสร้างเซตของสตริงคำตอบชั่วคราว $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$

3. นำเซตของสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตของสตริงคำตอบชั่วคราวที่สร้างขึ้น มาประเมินค่าหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด

4. กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับเซตของสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตของสตริงคำตอบชั่วคราวที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting โดยค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบที่ดีเรียงลำดับไปหาสตริงคำตอบที่แย่จะเท่ากับ $1, 2, \dots, F$ และทำการกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ (k) ซึ่งจะมีค่าของสตริงคำตอบที่ดีเรียงลำดับไปหาสตริงคำตอบที่แย่จะเท่ากับ $F, F-1, \dots, 1$ ซึ่งจะเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับค่าความแข็งแรง

5. คำนวณอัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) ของแต่ละสตริงคำตอบ โดยที่ y_i และ z_j จะสัมพันธ์กับค่า k

6. ดำเนินการอพยพคำตอบ

7. ทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบชั่วคราว z พร้อมทั้งกำหนดค่าความแข็งแรง ค่าสปีชีส์เคาท (k) ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท (p_k) และค่าความน่าจะเป็นในการเลือกสตริงคำตอบในสปีชีส์เคาทไปทำการมิวเตชัน (m_k)

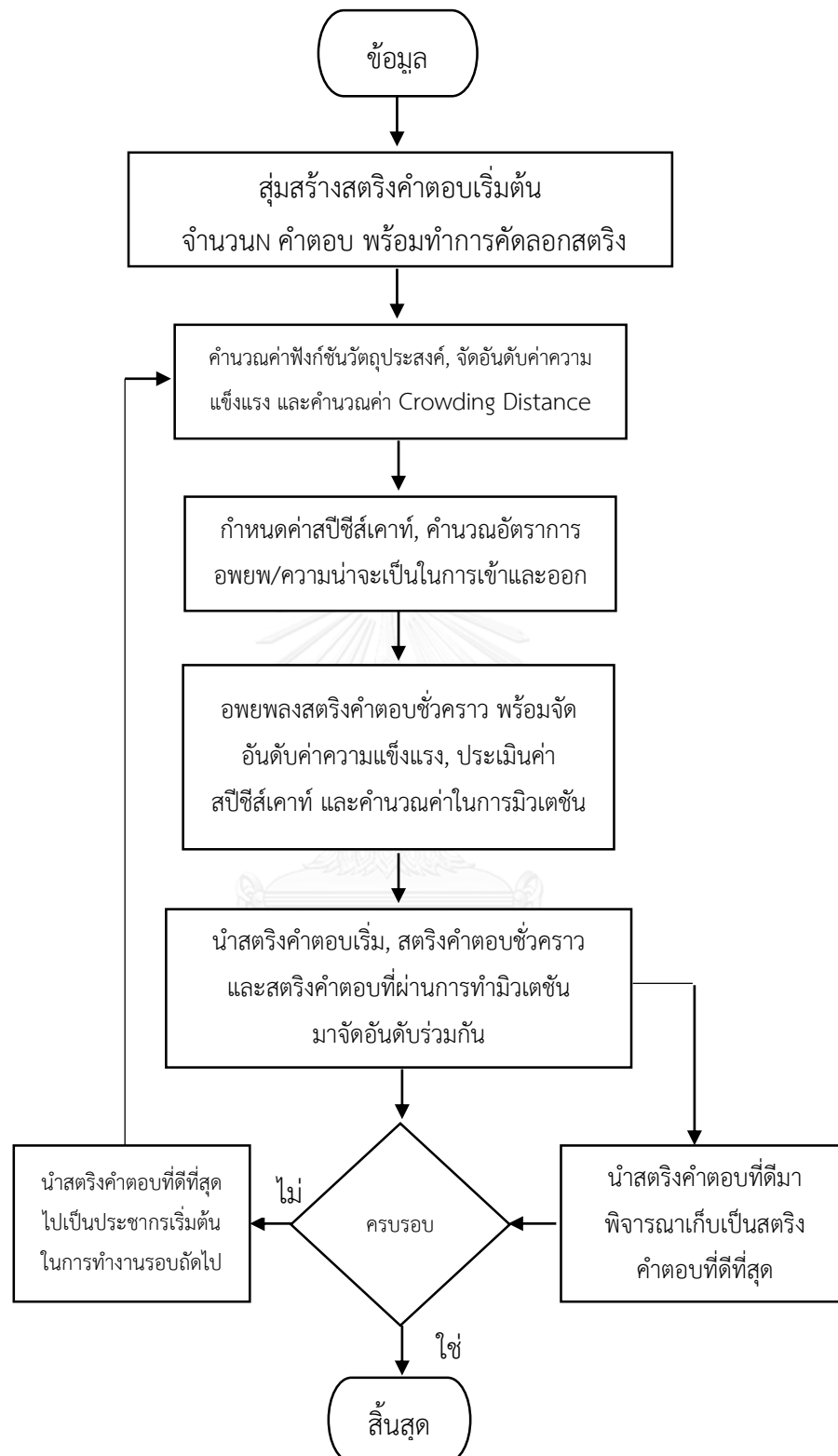
8. นำสตริงคำตอบมาสลับกันภายในสตริงคำตอบของตัวเองด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation

9. ทำการนำสตริงคำตอบที่ผ่านกระบวนการออกมาเป็นสตริงคำตอบรุ่นลูก มารวมกับสตริงคำตอบเริ่มแรกที่เป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ แล้วทำการจัดอันดับโดยการประเมินค่าความแข็งแรง และค่าความหนาแน่น

10. จัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุดไปรวมกับสตริงคำตอบในรอบก่อนหน้าแล้วจัดการจัดอันดับด้วยวิธี Non-dominated Sorting เพื่อทำการเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อใช้งานในรอบถัดไป

11. ทำการวนซ้ำกระบวนการจนคำตอบที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือครบจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้





รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์

5.3 ตัวอย่างการนำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

5.3.1 การนำเข้าข้อมูลการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน ประกอบไปด้วยจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ จำนวนชิ้นงาน ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน เวลาดำเนินงานในแต่ละชิ้นงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาดำเนินงานเฉลี่ยในแต่ละชิ้นงาน รอบเวลาดำเนินการผลิต ลักษณะสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนที่ได้รับการจัดสมดุลแล้ว

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ในวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO)

จำนวนประชากรเบื้องต้น 5 ตัว

รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal

วิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation

ความน่าจะเป็นในการมิวเตชันเท่ากับ 0.1

5.3.2 การสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น (γ) โดยใช้ตัวดำเนินการคือตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) โดยทำการนำจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด นำมาสร้างตารางเมทริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม ดังนี้ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 รุ่น ได้แก่ A, B, C และ D มีจำนวน Minimum Part Set (MPS) คือ 1:2:3:1 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตครั้งนี้จะต้องมีผลิตภัณฑ์ A จำนวนเท่ากับ 1 ผลิตภัณฑ์ B จำนวนเท่ากับ 2 ผลิตภัณฑ์ C จำนวนเท่ากับ 3 และผลิตภัณฑ์ D จำนวนเท่ากับ 1 เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต ดังนี้

Model Sequence	A	B	B	C	C	C	D
String	1	2	3	4	5	6	7

เมื่อกำหนดรหัสของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้แล้ว จะทำการสุ่มเพื่อสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น จำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด โดยมีขั้นตอนการสุ่มดังต่อไปนี้

สุ่มเลือกค่าตำแหน่ง 2 จุด เพื่อทำการสลับค่า โดยจำนวนครั้งในการสลับจะมีค่าเท่ากับ
 ครั้งหนึ่งของจำนวนสัดส่วนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด หรือ $\frac{l}{2}$ เมื่อ $l = \sum_{i=1}^l d_m$

ในกรณีที่ว่า $\frac{l}{2}$ มีค่าเป็นจำนวนคี่ให้ทำการปัดค่าขึ้นเสมอ

ในกรณีนี้คือ $l = \sum_{i=1}^4 d_m = 1+2+3+1=7$ เพราะฉะนั้น $\frac{l}{2} = \frac{7}{2} = 3.5$ จึงทำให้การสุ่ม

สร้างประชากรเบื้องต้นมีจำนวนครั้งในการสลับตำแหน่งเท่ากับ 4 ดังต่อไปนี้

Model Sequence

A	B	B	C	C	C	D
1	2	3	4	5	6	7

Priority

Model Sequence

A	B	B	C	C	C	D
1	2	3	4	5	6	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 1

Model Sequence

A	B	C	C	B	C	D
1	2	5	4	3	6	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 2

Model Sequence

A	B	C	C	B	C	D
1	2	5	6	3	4	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 3

Model Sequence

A	B	C	C	C	B	D
1	2	5	6	4	3	7

การสลับตำแหน่งครั้งที่ 4

เมื่อทำการสลับตำแหน่งจนครบ 4 ครั้ง จะได้ลำดับผลิตภัณฑ์ใหม่ดังนี้

Model Sequence

A	B	C	C	C	D	B
1	2	5	6	4	7	3

แล้วทำการสร้างประชากรเริ่มต้นให้มีจำนวนเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority	Model Sequence
Y_1	1 2 5 6 4 7 3	A B C C C D B
Y_2	1 2 7 5 4 6 3	A B D C C C B
Y_3	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
Y_4	1 2 3 4 5 6 7	A B C C C C D
Y_5	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B

เมื่อได้เซตสตริงคำตอบเริ่มต้น (Y) แล้วจึงทำการคัดลอกเพื่อสร้างเซตสตริงคำตอบชั่วคราว (Z)

ตารางที่ 5.2 ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	Priority	Model Sequence
Z_1	1 2 5 6 4 7 3	A B C C C D B
Z_2	1 2 7 5 4 6 3	A B D C C C B
Z_3	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
Z_4	1 2 3 4 5 6 7	A B C C C C D
Z_5	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B

5.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับการผลิตของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราวแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 8.5 เพื่อทำการประเมินค่าความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
Y_1	60.7278	28.7285	10.5832
Y_2	68.7849	28.7469	10.5832
Y_3	116.9754	29.0298	8.5514
Y_4	98.2754	28.7140	8.5514
Y_5	57.6087	28.3334	10.5832

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
Z_1	60.7278	28.7285	10.5832
Z_2	68.7849	28.7469	10.5832
Z_3	116.9754	29.0298	8.5514
Z_4	98.2754	28.7140	8.5514
Z_5	57.6087	28.3334	10.5832

5.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และทำการกำหนดค่าสปีชีส์เคาท์ (k) ซึ่งจะมีค่าของสตริงคำตอบที่ดีเรียงลำดับไปหาสตริงคำตอบที่แย่จะเท่ากับ $F, F-1, \dots, 1$ ซึ่งจะเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกับค่าความแข็งแรง ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของเซตสตริงคำตอบเริ่มต้นและเซตสตริงคำตอบชั่วคราว

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Species Count
Y_1	60.7278	28.7285	10.5832	2	2
Y_2	68.7849	28.7469	10.5832	3	1
Y_3	116.9754	29.0298	8.5514	2	2
Y_4	98.2754	28.7140	8.5514	1	3
Y_5	57.6087	28.3334	10.5832	1	3
Z_1	60.7278	28.7285	10.5832	2	2
Z_2	68.7849	28.7469	10.5832	3	1
Z_3	116.9754	29.0298	8.5514	2	2
Z_4	98.2754	28.7140	8.5514	1	3
Z_5	57.6087	28.3334	10.5832	1	3

5.3.5 การคำนวณค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพคำตอบ

รูปแบบการอพยพแบบ Sinusoidal นั้นจะมีค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพ เช่น อัตราการอพยพเข้า (λ_k) อัตราการอพยพออก (μ_k) ความน่าจะเป็นในการอพยพเข้า ($P_{\lambda,k}$) และความน่าจะเป็นในการอพยพออก ($P_{\mu,k}$) โดยมีรูปแบบสมการดังต่อไปนี้

$$\lambda_k = \frac{l}{2} \left(\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1 \right) \quad (5.1)$$

$$\mu_k = \frac{E}{2} \left(-\cos\left(\frac{k\pi}{n}\right) + 1 \right) \quad (5.2)$$

$$P_{\lambda,k} = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^K \lambda_k} \quad (5.3)$$

$$P_{\mu,k} = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^K \mu_k} \quad (5.4)$$

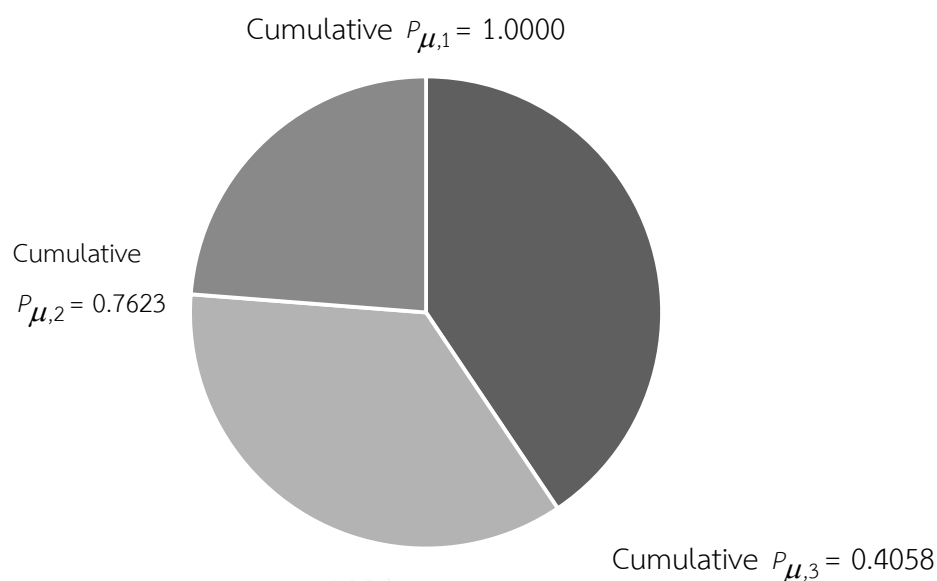
เมื่อ K คือค่าสปีชีส์เคาท์สูงสุดและ $n = K + 1$

l คืออัตราการอพยพเข้าที่มากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

E คืออัตราการอพยพออกที่มากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 5.5 ค่าต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการอพยพคำตอบ

Fitness	Species Count	No.	String	λ_k	μ_k	$P_{\lambda,k}$	$P_{\mu,k}$	Cumulative $P_{\mu,k}$
1	3	1	Y_4, Z_4	0.1464	0.8536	0.1634	0.4058	0.4058
		2	Y_5, Z_5					
2	2	1	Y_1, Z_1	0.2500	0.7500	0.2789	0.3565	0.7623
		2	Y_3, Z_3					
3	1	1	Y_2, Z_2	0.5000	0.5000	0.5578	0.2377	1.0000



รูปที่ 5.2 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงคำตอบอพยพออก

5.3.6 การอพยพคำตอบ

เมื่อได้ค่าที่จำเป็นในการอพยพครบถ้วนแล้ว จะดำเนินการอพยพคำตอบชั่วคราว (z_i) ที่ละสตริงคำตอบ โดยเรียงจากสตริงคำตอบที่มีค่าสปีชีส์เคาท์มากที่สุดไปหาน้อยที่สุด โดยมีขั้นตอนในการอพยพคำตอบของแต่ละสตริงคำตอบดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มค่า r_1 ซึ่งมีค่าระหว่าง $[0,1]$ ให้กับทุกบิต (Bit) ในสตริงคำตอบชั่วคราวที่ทำการพิจารณา
2. ถ้าค่า $r_1 \leq P_{\lambda,k}$ ในบิตใด แสดงว่าบิตนั้นจะเกิดการอพยพเข้าหรือรับการถ่ายทอดค่าบิตจากสตริงในเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น และจะถูกเลือกไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไป
3. ทำการสุ่มค่า r_2 ซึ่งมีค่าระหว่าง $[0,1]$ ให้กับบิตที่ถูกเลือกในขั้นตอนที่ 2 แล้วพิจารณาว่าอยู่ในพื้นที่วงล้อรูเล็ตค่าสปีชีส์เคาท์ใด แล้วทำการเลือกสตริงคำตอบเริ่มต้น (y_i) ในสปีชีส์เคาท์นั้นๆ (กรณีที่มีค่าสตริงคำตอบเริ่มต้นมากกว่า 1 สตริงคำตอบ ให้ทำการสุ่มเลือก)
4. ทำการถ่ายทอดค่าบิตในตำแหน่งนั้นๆ ของสตริงคำตอบชั่วคราว (z_i) ให้มีค่าเหมือนกับค่าบิตในตำแหน่งนั้นๆ ของสตริงคำตอบเริ่มต้น (y_i) ที่ถูกเลือกในขั้นตอนที่ 3
5. ทำการซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบตอบชั่วคราว
6. ทำซ้ำจนครบทุกบิตในสตริงคำตอบ
7. ทำการประเมินค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ให้กับเซตของสตริงคำตอบชั่วคราว

ตารางที่ 5.6 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 3 เพื่อทำการอพยพ

Immigration				Emigration				
String	Bit	r_1	$r_1 \leq 0.1634$	r_2	Species Count	Sting in Species Count	Selected	Bit Value
Z_4	1	0.4540						
	2	0.0686	Selected	0.3682	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_5	1
	3	0.9979						
	4	0.6701						
	5	0.4102						
	6	0.9631						
	7	0.8593						
Z_5	1	0.0234						
	2	0.7148						
	3	0.8569						
	4	0.5917						
	5	0.9211						
	6	0.1121	Selected	0.5367	2	$\{Y_1, Y_3\}$	Y_3	5
	7	0.4769						

ตารางที่ 5.7 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ

Immigration				Emigration				
String	Bit	r_1	$r_1 \leq 0.2789$	r_2	Species Count	Sting in Species Count	Selected	Bit Value
Z_1	1	0.7751						
	2	0.7067						
	3	0.0448	Selected	0.3621	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_5	4
	4	0.3286						
	5	0.1751	Selected	0.2419	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_4	5
	6	0.7280						
	7	0.5235						

ตารางที่ 5.7 (ต่อ) การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 2 เพื่อทำการอพยพ

Immigration				Emigration				
String	Bit	r_1	$r_1 \leq 0.4058$	r_2	Species Count	Sting in Species Count	Selected	Bit Value
Z_3	1	0.6694						
	2	0.0773	Selected	0.5719	2	$\{Y_1, Y_3\}$	Y_1	2
	3	0.3911	Selected	0.8321	1	$\{Y_2\}$	Y_2	7
	4	0.6087						
	5	0.1380	Selected	0.2247	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_4	5
	6	0.8239						
	7	0.7162						

ตารางที่ 5.8 การสุ่มเลือกบิตของสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ 1 เพื่อทำการอพยพ

Immigration				Emigration				
String	Bit	r_1	$r_1 \leq 0.5000$	r_2	Species Count	Sting in Species Count	Selected	Bit Value
Z_2	1	0.3017	Selected	0.2530	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_5	2
	2	0.4854	Selected	0.7491	2	$\{Y_1, Y_3\}$	Y_3	7
	3	0.0939	Selected	0.1782	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_4	3
	4	0.9303						
	5	0.3128	Selected	0.4011	3	$\{Y_4, Y_5\}$	Y_4	5
	6	0.5176						
	7	0.0043	Selected	0.6720	2	$\{Y_1, Y_3\}$	Y_3	6

ตารางที่ 5.9 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 3

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7
Z_4	2	2	1	เริ่มต้น	1	2	3	4	5	6	7
				ปรับปรุง	1	1	3	4	5	6	7
				ซ่อมแซม	2	1	3	4	5	6	7
Z_5	6	7	5	เริ่มต้น	2	1	4	6	5	7	3
				ปรับปรุง	2	1	4	6	5	5	3
				ซ่อมแซม	2	1	4	6	7	5	3

ตารางที่ 5.10 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 2

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7
Z_1	3	5	4	เริ่มต้น	1	2	5	6	4	7	3
				ปรับปรุง	1	2	4	6	4	7	3
				ซ่อมแซม	1	2	4	6	5	7	3
	5	5	5	เริ่มต้น	1	2	4	6	5	7	3
				ปรับปรุง	1	2	4	6	5	7	3
				ซ่อมแซม	1	2	4	6	5	7	3
Z_3	2	7	2	เริ่มต้น	1	7	3	2	4	5	6
				ปรับปรุง	1	2	3	2	4	5	6
				ซ่อมแซม	1	2	3	7	4	5	6
	3	3	7	เริ่มต้น	1	2	3	7	4	5	6
				ปรับปรุง	1	2	7	7	4	5	6
				ซ่อมแซม	1	2	7	3	4	5	6
	5	4	5	เริ่มต้น	1	2	7	3	4	5	6
				ปรับปรุง	1	2	7	3	5	5	6
				ซ่อมแซม	1	2	7	3	5	4	6

ตารางที่ 5.11 การซ่อมแซมคำตอบให้กับสตริงคำตอบชั่วคราวในสปีชีส์เคาท์ที่ 1

สตริง	บิต	ค่าเดิม	ค่าใหม่	ขั้นตอน	1	2	3	4	5	6	7
z_2	1	1	2	เริ่มต้น	1	2	7	5	4	6	3
				ปรับปรุง	2	2	7	5	4	6	3
				ซ่อมแซม	2	1	7	5	4	6	3
	2	1	7	เริ่มต้น	2	1	7	5	4	6	3
				ปรับปรุง	2	7	7	5	4	6	3
				ซ่อมแซม	2	7	1	5	4	6	3
	3	1	3	เริ่มต้น	2	7	1	5	4	6	3
				ปรับปรุง	2	7	3	5	4	6	3
				ซ่อมแซม	2	7	3	5	4	6	1
	5	4	5	เริ่มต้น	2	7	3	5	4	6	1
				ปรับปรุง	2	7	3	5	5	6	1
				ซ่อมแซม	2	7	3	4	5	6	1
	7	1	6	เริ่มต้น	2	7	3	4	5	6	1
				ปรับปรุง	2	7	3	4	5	6	6
				ซ่อมแซม	2	7	3	4	5	1	6

ตารางที่ 5.12 ค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ

String	Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Species Count
z_1	1 2 4 6 5 7 3	60.7278	28.7285	10.5832	1	2
z_2	2 7 3 4 5 1 6	89.1183	28.5336	12.9044	2	1
z_3	1 2 7 3 5 4 6	111.0706	28.6139	10.5832	2	1
z_4	2 1 3 4 5 6 7	95.1563	28.3270	10.5832	1	2
z_5	2 1 4 6 7 5 3	46.3325	28.4723	12.9044	1	2

5.3.7 การมิวเตชัน

เมื่อกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าสปีชีส์เคาท์ของเซตสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพได้ แล้ว จะทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดสปีชีส์เคาท์ (P_k) และความน่าจะเป็นในการเลือกสปีชีส์เคาท์ k ไปทำการมิวเตชัน (m_k) ดังสมการที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

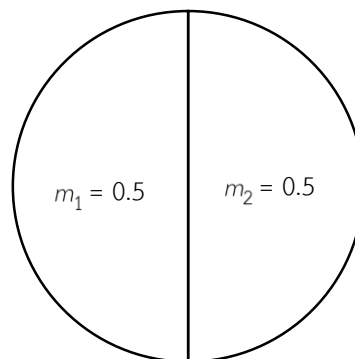
$$P_k = \frac{\prod_{j=1}^k \left(\frac{l}{E}\right)^k \left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)}{1 + \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^i \left(\frac{l}{E}\right)^i \left(\frac{\sin^2\left(\frac{n+j-1}{2n}\pi\right)}{\sin^2\left(\frac{j}{2n}\pi\right)}\right)} \quad (5.5)$$

$$m_k = \frac{1 - P_k}{\sum_{k=1}^K (1 - P_k)} \quad (5.6)$$

ตารางที่ 5.13 ค่าที่ใช้ประกอบการมิวเตชันของเซตสตริงคำตอบชั่วคราวหลังการอพยพ

Fitness	Species Count	No.	String	P_k	$1 - P_k$	m_k	Cumulative m_k
1	2	3	Z_1, Z_4, Z_5	0.4000	0.6000	0.5000	0.5000
2	1	2	Z_2, Z_3	0.4000	0.6000	0.5000	1.0000

Cumulative $m_1 = 1.0000$



Cumulative $m_2 = 0.5000$

รูปที่ 5.3 วงล้อรูเล็ตที่ใช้ในการสุ่มเลือกสตริงไปทำการมิวเตชัน

ขั้นตอนในการทำมิวเตชันด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สุ่มค่า r_3 ที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ แล้วพิจารณาว่าตกอยู่ในสปีชีส์เคาท์ใดของวงล้อรูเล็ต m_k (ในตัวอย่างนี้สุ่มค่าได้ 0.4276 จึงเลือกสปีชีส์เคาท์ 2)
2. ทำการคัดลอกสตริงคำตอบชั่วคราวทั้งหมดที่อยู่ในสปีชีส์เคาท์ที่ถูกเลือกในขั้นตอนที่ 1 ให้อยู่ในรูปของเซตสตริงคำตอบ z' เพื่อนำไปทำมิวเตชัน
3. สุ่มค่า r_4 ที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ ให้กับทุกบิตในสตริงคำตอบ z' ดังตารางที่ 5.15
4. ถ้า $r_4 < P_m$ (ค่าความน่าจะเป็นในการทำมิวเตชัน) ในบิตใดๆ จะทำการสุ่มเลือกค่าบิตในตำแหน่งอื่นๆ ขึ้นมาอีก 1 ตำแหน่ง แล้วทำการสลับค่าบิต ดังตารางที่ 5.16 และ 5.17
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนครบทุกสตริงคำตอบ

ตารางที่ 5.14 การเลือกบิตไปทำการมิวเตชัน

String	1	2	3	4	5	6	7
Z'_2	0.6632	0.0258	0.4940	0.5503	0.3256	0.2949	0.7753
	-	Selected	-	-	-	-	-
Z'_3	0.6309	0.5084	0.5236	0.0927	0.9712	0.1288	0.0005
	-	-	-	Selected	-	-	Selected

ตารางที่ 5.15 การมิวเตชันสตริงคำตอบ Z'_2

ลำดับ	คู่มิวเตชัน	1	2	3	4	5	6	7
	(Z'_2 ก่อนมิวเตชัน)	2	7	3	4	5	1	6
1	บิต 2 กับ บิต 5	2	5	3	4	7	1	6
	(Z'_2 หลังมิวเตชัน)	2	5	3	4	7	1	6

ตารางที่ 5.16 การมิวเตชันสตริงคำตอบ Z'_3

ลำดับ	คู่มิวเตชัน	1	2	3	4	5	6	7
	(Z'_3 ก่อนมิวเตชัน)	1	2	7	3	5	4	6
1	บิต 4 กับ บิต 1	3	2	7	1	5	4	6
2	บิต 7 กับ บิต 2	3	6	7	1	5	4	2
	(Z'_3 หลังมิวเตชัน)	3	6	7	1	5	4	2

5.3.8 เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด

เทคนิคการเก็บค่าที่ดีที่สุด เป็นเทคนิคที่นำมาใช้เพื่อเก็บค่าที่ดีที่สุดและป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ดีที่สุดหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ เนื่องจากอาจทำให้เกิดคำตอบที่ดีกว่าหรือแย่กว่าคำตอบที่เคยปรากฏในเจนเนอเรชันที่ผ่านมา จึงได้มีการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ดีที่สุดของกลุ่มสตริงคำตอบชุดใหม่ที่ได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการรวมสตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราว และสตริงคำตอบหลังการทำมิวเตชันเพื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการ

String		Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
y	y_1	1 2 5 6 4 7 3	60.7278	28.7285	10.5832
	y_2	1 2 7 5 4 6 3	68.7849	28.7469	10.5832
	y_3	1 7 3 2 4 5 6	116.9754	29.0298	8.5514
	y_4	1 2 3 4 5 6 7	98.2754	28.7140	8.5514
	y_5	2 1 4 6 5 7 3	57.6087	28.3334	10.5832
z	z_1	1 2 4 6 5 7 3	60.7278	28.7285	10.5832
	z_2	2 7 3 4 5 1 6	89.1183	28.5336	12.9044
	z_3	1 2 7 3 5 4 6	111.0706	28.6139	10.5832
	z_4	2 1 3 4 5 6 7	95.1563	28.3270	10.5832
	z_5	2 1 4 6 7 5 3	46.3325	28.4723	12.9044
z'	z'_2	2 5 3 4 7 1 6	57.9087	28.4388	15.2256
	z'_3	3 6 7 1 5 4 2	37.7421	28.1355	12.9044

2. ทำการประเมินค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบเริ่มต้น สตริงคำตอบชั่วคราว และสตริงคำตอบหลังการทำมิวเตชัน ดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 การประเมินค่าค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบทั้งหมดในกระบวนการ

String	Priority	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	Crowding Distance	
Y	Y_1	1 2 5 6 4 7 3	60.7278	28.7285	10.5832	3	Infinity
	Y_2	1 2 7 5 4 6 3	68.7849	28.7469	10.5832	4	Infinity
	Y_3	1 7 3 2 4 5 6	116.9754	29.0298	8.5514	3	Infinity
	Y_4	1 2 3 4 5 6 7	98.2754	28.7140	8.5514	1	Infinity
	Y_5	2 1 4 6 5 7 3	57.6087	28.3334	10.5832	1	1.8127
Z	Z_1	1 2 4 6 5 7 3	60.7278	28.7285	10.5832	3	1.4308
	Z_2	2 7 3 4 5 1 6	89.1183	28.5336	12.9044	3	2.0740
	Z_3	1 2 7 3 5 4 6	111.0706	28.6139	10.5832	2	Infinity
	Z_4	2 1 3 4 5 6 7	95.1563	28.3270	10.5832	1	1.7965
	Z_5	2 1 4 6 7 5 3	46.3325	28.4723	12.9044	2	Infinity
Z'	Z'_2	2 5 3 4 7 1 6	57.9087	28.4388	15.2256	2	2.3087
	Z'_3	3 6 7 1 5 4 2	37.7421	28.1355	12.9044	1	Infinity

3. ทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น เพื่อเป็นสตริงคำตอบเริ่มต้นในรุ่นถัดไป จากตารางที่ 5.19 จะเห็นได้ว่ามีสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness เท่ากับ 1 จำนวน 4 สตริงคำตอบ ซึ่งยังไม่เพียงพอเนื่องจากจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้นคือ 5 สตริงคำตอบ เพราะฉะนั้นจึงทำการคัดเลือกสตริงคำตอบที่มีค่า Fitness เท่ากับ 2 มาอีก 1 สตริงคำตอบ โดยพิจารณาเลือกจากสตริงคำตอบที่มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด ดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 สตริงคำตอบเริ่มต้นในรุ่นถัดไป

String	Priority
Y_1	1 2 3 4 5 6 7
Y_2	2 1 4 6 5 7 3
Y_3	2 1 3 4 5 6 7
Y_4	3 6 7 1 5 4 2
Y_5	2 1 4 6 7 5 3

บทที่ 6

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่นำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงาน และตัวอย่างการนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

6.1 วิธีการของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง

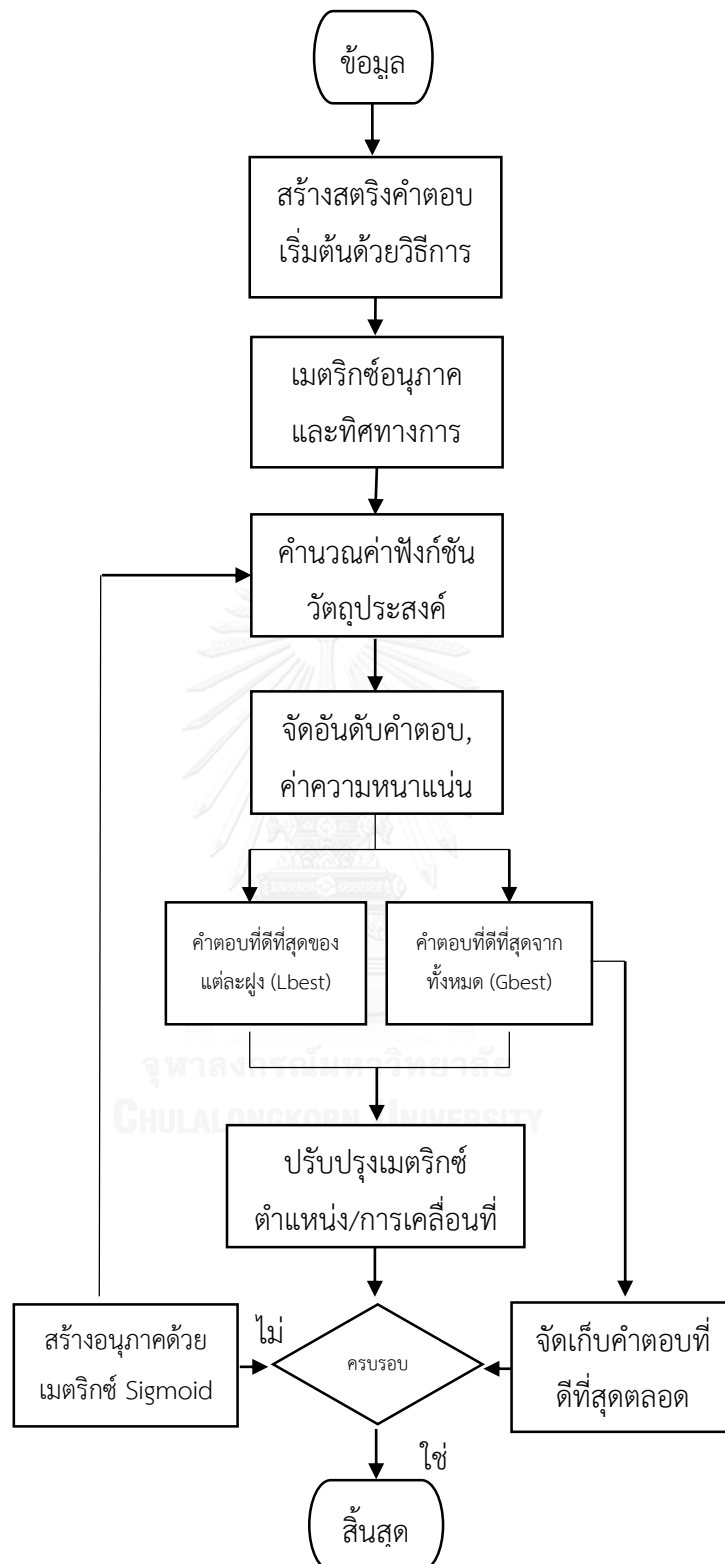
วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง เป็นอัลกอริทึมที่ได้รับการพัฒนามาจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ถูกคิดค้นโดย (Kennedy and Eberhart 1995) ซึ่งมีแนวคิดมาจากการศึกษาการลอกเลียนแบบพฤติกรรมกรหาอาหารของฝูงนก ซึ่งมักจะจดจำเส้นทางการหาอาหารที่ดีที่สุดไว้เพื่อเป็นแนวทางในการบินหาอาหารใหม่ในครั้งต่อไป เปรียบเทียบได้กับการแก้ปัญหาเอ็นพีฮาร์ด (NP-Hard) ซึ่งจะจดจำลักษณะของคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ค้นพบเอาไว้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการในการค้นหาให้ได้มาซึ่งคำตอบใหม่ๆ ที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม หลังจากทีวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคได้ถูกนำเสนอไปนั้น (Liao, Chao-Tang et al. 2007) ได้คิดค้นการพัฒนาวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค เป็น การหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

6.2 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง ประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิต ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของชิ้นงาน สถานีงานที่ได้จากการจัดสมดุลแล้ว และเมตริกซ์ทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

2. สร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นด้วยวิธีการสุ่มเท่ากับจำนวน S ฟุง (Swarm) จำนวนฟองละ P อนุภาค (Particle) ตัวเท่าๆกัน
3. นำประชากรคำตอบมาประเมินค่าหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย คือ ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จน้อยที่สุด และเวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด
4. กำหนดค่าความแข็งแรงให้กับประชากรคำตอบด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting โดยให้กำหนดค่าความแข็งแรงใน 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่พิจารณาเฉพาะคำตอบภายในแต่ละฟองเท่านั้น และกรณีที่พิจารณาคำตอบของทุกฟองรวมกัน
5. กำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance
6. ทำการคัดเลือกและเก็บคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฟองหรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบเฉพาะที่ (Local Best Solution: Lbest) และคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมดหรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (Global Best Solution: Gbest)
7. ปรับปรุงเมตริกซ์ตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) และเมตริกซ์ทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix) จากค่า Lbest และ Gbest และใช้ฟังก์ชัน Sigmoid ในการปรับค่าเมตริกซ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคให้อยู่ในรูปความน่าจะเป็นในการสร้างสตริงคำตอบในรอบถัดไป
8. ทำการจัดเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Gbest) ในรอบปัจจุบัน มารวมกับกับคำตอบที่ดีที่สุดในรอบก่อนหน้า แล้วนำมาทำการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting เพื่ออัปเดตค่าที่ดีที่สุดใหม่ในรอบปัจจุบัน
9. ทำการวนซ้ำกระบวนการจนครบจำนวนเจนเนอเรชันสูงสุดที่กำหนดไว้



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนของการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง

6.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่องมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน

6.3.1 การนำเข้าข้อมูลที่ใช้ในการจัดลำดับการผลิต ได้แก่ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนความต้องการของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เวลาการทำงานของแต่ละผลิตภัณฑ์ เวลาปรับตั้งเครื่องของแต่ละผลิตภัณฑ์ รอบเวลาการผลิต ลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของชิ้นงาน สถานีงานที่ได้จากการจัดสมดุลแล้ว และเมตริกซ์ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Velocity Matrix)

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง
 จำนวนอนุภาคที่กำหนดให้แต่ละฝูง (Number of Particles in each Swarms: P) P=3
 จำนวนฝูงที่กำหนดให้แต่ละรอบการทำงาน (Number of Swarms: S) S=2
 น้ำหนักการหวนที่ใช้ (Weight: W) W=1

6.3.2 การสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้น

การสร้างเซตสตริงคำตอบเริ่มต้น โดยใช้ตัวดำเนินการคือตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม (Matrix Join Probability) โดยทำการนำจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด นำมาสร้างตารางเมตริกซ์ความน่าจะเป็นร่วม ดังนี้ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 รุ่น ได้แก่ A, B, C และ D มีจำนวน Minimum Part Set (MPS) คือ 1:2:3:1 แสดงว่าในการจัดลำดับการผลิตครั้งนี้ต้องมีผลิตภัณฑ์ A จำนวนเท่ากับ 1 ผลิตภัณฑ์ B จำนวนเท่ากับ 2 ผลิตภัณฑ์ C จำนวนเท่ากับ 3 และผลิตภัณฑ์ D จำนวนเท่ากับ 1 เข้าไปในสายการประกอบ จากนั้นทำการใส่รหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิต ดังนี้

Model Sequence	A	B	B	C	C	C	D
String Priority	1	2	3	4	5	6	7

เมื่อทำการกำหนดรหัสงานให้กับผลิตภัณฑ์ที่ทำการจัดลำดับการผลิตแล้ว จะทำการสร้างประชากรคำตอบเริ่มต้นจำนวน 2 ฝูง ฝูงละ 3 อนุภาค ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ประชากรคำตอบเริ่มต้น

String (S,P)	Priority	Model Sequence
1,1	1 2 5 6 4 7 3	A B C C C D B
1,2	1 2 7 5 4 6 3	A B D C C C B
1,3	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
2,1	1 2 3 4 5 6 7	A B C C C C D
2,2	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B
2,3	3 6 2 1 5 7 4	B C B A C D C

6.3.3 การประเมินค่าหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์

เมื่อได้ลำดับการผลิตของกลุ่มประชากรเริ่มต้นแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 8.5 เพื่อทำการประเมินค่าความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1,1	60.7278	28.7285	10.5832
1,2	68.7849	28.7469	10.5832
1,3	116.9754	29.0298	8.5514
2,1	98.2754	28.7140	8.5514
2,2	57.6087	28.3334	10.5832
2,3	60.4611	28.4388	15.2256

6.3.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่น

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และกำหนดค่าความหนาแน่นให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance โดยจะทำการประเมินค่าที่ละฝูง เพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง หรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบเฉพาะที่ (Lbest) และทำการประเมินค่ารวมเพื่อทำการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมดหรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (Gbest) ดังตารางที่ 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 1

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	cd.	Selected
1,1	60.7278	28.7285	10.5832	1	Infinity	-
1,2	68.7849	28.7469	10.5832	2	Infinity	-
1,3	116.9754	29.0298	8.5514	1	Infinity	Lbest

ตารางที่ 6.4 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	cd.	Selected
2,1	98.2754	28.7140	8.5514	1	Infinity	-
2,2	57.6087	28.3334	10.5832	1	Infinity	Lbest
2,3	60.4611	28.4388	15.2256	2	Infinity	-

จากนั้นนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงมากำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นอีกครั้ง โดยถ้าค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จะกำหนดให้ค่าสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของจำนวนประชากรทั้งหมด (Global Best Solution : GBest) แต่ในกรณีที่ค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากัน ให้ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบขึ้นมา ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	cd.	Selected
1,3	116.9754	29.0298	8.5514	1	Infinity	-
2,2	57.6087	28.3334	10.5832	1	Infinity	Gbest

หลังจากนั้นจะทำการเก็บค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Fitness=1) เพื่อนำไปพิจารณาในรอบถัดไป ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 การเก็บค่าที่ดีที่สุด

String (S,P)	Priority	Model Sequence
1,3	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
2,2	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B

6.3.5 การปรับปรุงตาราง

การปรับปรุงตารางนั้นจำเป็นต้องพิจารณาอยู่ 2 ตารางคือ ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Position Matrix) และตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Velocity Matrix) โดยมีมิติของตารางเท่ากับสัดส่วนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (MPS) $n=7$ ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นได้จากการแปลงค่าสตรึงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) และตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 ทั้งหมด ดังตารางที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.7 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 1

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

ตารางที่ 6.8 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 2

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

หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงตารางทิศทางเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) และ ตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{(i,j)} = wV_{(i-1,j)} + c_1r_1(P_{(i,j)} - X_{(i-1,j)}) + c_2r_2(G_{(i,j)} - X_{(i-1,j)})$$

สมการที่ 6.1

$$X_{(i,j)} = X_{(i-1,j)} + V_{(i,j)} \quad \text{สมการที่ 6.2}$$

$$S(V_{(i,j)}) = \frac{1}{1 + \exp(-V_{(i,j)})} \quad \text{สมการที่ 6.3}$$

โดยกำหนดให้	i	คือ รอบการทำงานที่ i
	j	คือ ผู้งของอนุภาคที่ j
	w	คือ น้ำหนักในการหมุน ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 1
	c_1 และ c_2	คือ ตัวประกอบอัตราการเร่ง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เท่ากับ 0.1
	r_1 และ r_2	คือ ตัวเลขจากการสุ่มในช่วง $[0,1]$
	$P_{(i,j)}$	คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดของผู้ j ในรอบการทำงานที่ i
	$G_{(i,j)}$	คือ ค่าตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมด ในรอบการทำงานที่ i

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) จะใช้สมการที่ 6.1 ในการปรับปรุงค่า โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้น และกำหนดให้ค่า r_1 และ r_2 ของผู้งที่ 1 มีค่า 0.2463 และ 0.8372 ตามลำดับ และค่า r_1 และ r_2 ของผู้งที่ 2 มีค่า 0.5683 และ 0.7162 ตามลำดับ โดยจะได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ดังตารางที่ 6.9 และ 6.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.9 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของผู้งที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	-0.0837	0.0837	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0837	0.0000	0.0000	-0.0837	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	-0.0837	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837
4	0.0000	0.0000	0.0837	0.0000	-0.0837	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837	-0.0837	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837	0.0000	0.0000	-0.0837
7	0.0000	-0.0837	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837	0.0000

ตารางที่ 6.10 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2

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

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) จะใช้สมการที่ 6.2 ในการปรับปรุงค่า โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาค ดังตารางที่ 6.11 และ 6.12 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.11 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.9163	0.0837	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0837	0.0000	0.0000	0.9163	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.9163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837
4	0.0000	0.0000	0.0837	0.0000	0.9163	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837	0.9163	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837	0.0000	0.0000	0.9163
7	0.0000	0.9163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0837	0.0000

ตารางที่ 6.12 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2

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

6.3.5 กระบวนการทำงานในรอบต่อไป

การแก้ปัญหาในรอบถัดไป จะมีกระบวนการเหมือนกันจากกระบวนการในรอบแรก แต่การกำหนดประชากรจะใช้ตารางความน่าจะเป็นแบบ Sigmoid Function ในการสุ่มเลือกประชากรขึ้นมาทำงาน ดังตารางที่ 6.15

ตารางที่ 6.15 ประชากรคำตอบเริ่มต้นในรอบการทำงานที่ 2

String (S,P)	Priority	Model Sequence
1,1	1 2 4 6 5 7 3	A B C C C D B
1,2	2 7 3 4 5 1 6	B D B C C A C
1,3	1 2 7 3 5 4 6	A B D B C C C
2,1	2 1 3 4 5 6 7	B A B C C C D
2,2	2 5 3 4 7 1 6	B C B C D A C
2,3	3 6 7 1 5 4 2	B C D A C C B

เมื่อได้ลำดับการผลิตของกลุ่มประชากรแล้ว จะนำเข้าสู่สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลที่รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 8.5 เพื่อทำการประเมินค่าความผันแปรของการผลิต ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในสายการผลิต และเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 6.16

ตารางที่ 6.16 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในรอบการทำงานที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$
1,1	60.7278	28.7285	10.5832
1,2	89.1183	28.5336	12.9044
1,3	111.0706	28.6139	10.5832
2,1	95.1563	28.3270	10.5832
2,2	57.9087	28.4388	15.2256
2,3	37.7421	28.1355	12.9044

เมื่อทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว จะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเทคนิควิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting และกำหนดค่าความหนาแน่นให้ให้กับสตริงคำตอบที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Crowding Distance โดยจะทำการประเมินค่าที่ละฝูง เพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง

หรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบเฉพาะที่ (Lbest) และทำการประเมินค่ารวมเพื่อทำการหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดของประชากรทั้งหมดหรือคำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง (Gbest) ดังตารางที่ 6.17 และ 6.18 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.17 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	cd.	Selected
1,1	60.7278	28.7285	10.5832	1	Infinity	Lbest
1,2	89.1183	28.5336	12.9044	1	1.5880	-
1,3	111.0706	28.6139	10.5832	1	Infinity	-

ตารางที่ 6.18 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของฝูงคำตอบที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	cd.	Selected
2,1	95.1563	28.3270	10.5832	1	Infinity	Lbest
2,2	57.9087	28.4388	15.2256	2	Infinity	-
2,3	37.7421	28.1355	12.9044	1	Infinity	-

จากนั้นนำสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูงมากำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นอีกครั้ง โดยถ้าค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จะกำหนดให้ค่าสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของจำนวนประชากรทั้งหมด (Global Best Solution : GBest) แต่ในกรณีที่ค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นมีค่าเท่ากัน ให้ทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบขึ้นมา ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.19 การกำหนดค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่นของสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละฝูง

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	Fitness	cd.	Selected
1,1	60.7278	28.7285	10.5832	1	Infinity	Gbest
2,1	95.1563	28.3270	10.5832	1	Infinity	-

จากนั้นทำการเก็บค่าที่ดีที่สุดจากการทำงานทั้ง 2 รอบ โดยการจัดอันดับแบบ Goldberg (1989) หรือที่เรียกว่า Non-dominated Sorting จะได้ผลดังตารางที่ 6.20

ตารางที่ 6.20 การเก็บค่าที่ดีที่สุดของการทำงาน 2 รอบ

String (S,P)	Priority	Model Sequence
1,3 (รอบที่ 1)	1 7 3 2 4 5 6	A D B B C C C
2,2 (รอบที่ 1)	2 1 4 6 5 7 3	B A C C C D B
2,1 (รอบที่ 2)	2 1 3 4 5 6 7	B A B C C C D

การปรับปรุงตารางนั้นจำเป็นต้องพิจารณาอยู่ 2 ตารางคือ ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Position Matrix) และตารางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเบื้องต้น (Initial Velocity Matrix) โดยมีติของตารางเท่ากับสัดส่วนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (MPS) $n=7$ ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นได้จากการแปลงค่าสตริงคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฝูง (Lbest) และตารางทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 ทั้งหมด ดังตารางที่ 6.21 และ 6.22 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.21 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

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

ตารางที่ 6.22 ตารางตำแหน่งของอนุภาคเบื้องต้นฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

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

การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ (Velocity Matrix) ในรอบการทำงานที่ 2 นี้ จะใช้สมการที่ 6.1 ในการปรับปรุงค่า โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้น และกำหนดให้ค่า r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 1 มีค่า 0.1175 และ 0.4563 ตามลำดับ และค่า r_1 และ r_2 ของฝูงที่ 2 มีค่า 0.9928 และ 0.0131 ตามลำดับ โดยจะได้ตารางทิศทางการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.23 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	-0.0789	0.0789	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0789	0.0574	0.0000	-0.1363	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	-0.1363	0.0000	0.0000	0.0000	0.1363
4	0.0000	0.0000	0.1363	0.0000	-0.1363	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1363	-0.1363	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.1363	0.0000	0.0000	-0.1363
7	0.0000	-0.1363	0.0000	0.0000	0.0000	0.1363	0.0000

ตารางที่ 6.24 การปรับปรุงตารางทิศทางการเคลื่อนที่ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0013	-0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	-0.0013	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0993	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0993
4	0.0000	0.0000	-0.0993	0.0993	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0993	0.0000	0.0993	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0993	0.0993

การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาค (Position Matrix) จะใช้สมการที่ 6.2 ในการปรับปรุงค่า โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยจะได้ตารางตำแหน่งของอนุภาคดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.25 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.8374	0.1626	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.1626	0.0574	0.0000	0.7800	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.7800	0.0000	0.0000	0.0000	0.2200
4	0.0000	0.0000	0.2200	0.0000	0.7800	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2200	0.7800	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.2200	0.0000	0.0000	0.7800
7	0.0000	0.7800	0.0000	0.0000	0.0000	0.2200	0.0000

ตารางที่ 6.26 การปรับปรุงตารางตำแหน่งของอนุภาคของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0013	0.9987	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.9987	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0993	0.0000	0.0000	0.0000	0.9007
4	0.0000	0.0000	0.9007	0.0993	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.9007	0.0000	0.0993	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9007	0.0993

สำหรับการสร้างประชากรในรอบถัดไปนั้น จะทำการสุ่มเลือกโดยใช้เมตริกซ์ Sigmoid Function ในการแปลงค่าการเคลื่อนที่อนุภาคในแต่ละฝูง โดยใช้สมการที่ 6.3 ในการปรับปรุงค่า ดังตารางที่ 6.27 และ 6.28 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.27 การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.4803	0.5197	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
2	0.5197	0.5143	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340
4	0.5000	0.5000	0.5340	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000
5	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340	0.4660	0.5000

ตารางที่ 6.27 (ต่อ) การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 1 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
6	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340	0.5000	0.5000	0.4660
7	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340	0.5000

ตารางที่ 6.28 การปรับปรุงตาราง Sigmoid Function ของฝูงที่ 2 ในรอบการทำงานที่ 2

From/To	1	2	3	4	5	6	7
1	0.4803	0.5197	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
2	0.5197	0.5143	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000	0.5000
3	0.5000	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340
4	0.5000	0.5000	0.5340	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000
5	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340	0.4660	0.5000
6	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340	0.5000	0.5000	0.4660
7	0.5000	0.4660	0.5000	0.5000	0.5000	0.5340	0.5000

บทที่ 7

การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต

การแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน โดยใช้อัลกอริทึมต่างๆ ได้แก่ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย (COIN-E) เงินเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DPSO) ในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมข้างต้น โดยใช้ตัวชี้วัดทั้งสิ้น 6 ตัว ประกอบด้วย การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time)

7.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการแก้ปัญหาตัวอย่างทั้งสิ้น 4 ปัญหา ได้แก่ ปัญหาขนาด 25, 35, 75 และ 128 ชิ้นงาน (Tiacci 2015) โดยที่แต่ละปัญหาประกอบไปด้วยสัดส่วนความต้องการผลิตภัณฑ์ 2 ขนาด ได้แก่ 10 (1:2:3:4) และ 115 (25:35:40:15) ตามลำดับ ซึ่งทำการทดลองบนสายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลแล้วที่แตกต่างกัน 2 สายการประกอบ โดยแต่ละปัญหาจะทำการทดลองซ้ำปัญหาละ 2 รอบการทดลอง ทำให้การทดลองย่อยในงานวิจัยนี้มีขนาด 32 การทดลองต่อ 1 อัลกอริทึม ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.1 ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ที่มาของปัญหา	No. of Task	MPS	Configuration	Replicate	Problem
Roszing	25	10 (1:2:3:4)	1	1	1
				2	2
			2	1	3
				2	4

ตารางที่ 7.1 (ต่อ) ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ที่มาของปัญหา	No. of Task	MPS	Configuration	Replicate	Problem
Roszing	25	115 (25:35:40:15)	1	1	5
				2	6
			2	1	7
				2	8
Gunther	35	10 (1:2:3:4)	1	1	9
				2	10
			2	1	11
				2	12
		115 (25:35:40:15)	1	1	13
				2	14
			2	1	15
				2	16
Weemag	75	10 (1:2:3:4)	1	1	17
				2	18
			2	1	19
				2	20
		115 (25:35:40:15)	1	1	21
				2	22
			2	1	23
				2	24
Barthold	128	10 (1:2:3:4)	1	1	25
				2	26
			2	1	27
				2	28
		115 (25:35:40:15)	1	1	29
				2	30
			2	1	31
				2	32

7.2 วิธีการทดลอง

วิธีการในการใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงาน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการทดลองการแก้ปัญหาตัวอย่างด้วยวิธีการของอัลกอริทึมต่างๆ โดยเมื่อทำการทดลองหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตลอดทั้งกระบวนการทำงานซ้ำเดิมทั้งสิ้น 2000 เจนเนอเรชันติดต่อกันให้ทำการหยุดการค้นหาคำตอบ
2. นำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมมาหาได้ (Obtained Pareto-optimal Solution) มารวมเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-optimal Solution)
3. ทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดทั้งสิ้น 6 ตัว ประกอบด้วย การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะ

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองแก้ตัวอย่างปัญหาผ่านโปรแกรม Visual Studio 2013 ภาษา C++ ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel® Core™ i7-3612QM CPU @ 2.10GHz RAM 8.00 GB 64 bit-Operation system

7.3 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตดังตารางที่ 7.2 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ถูกทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในงานวิจัยอื่นๆ แล้วว่าสามารถแก้ไขปัญหามีลักษณะใกล้เคียงกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

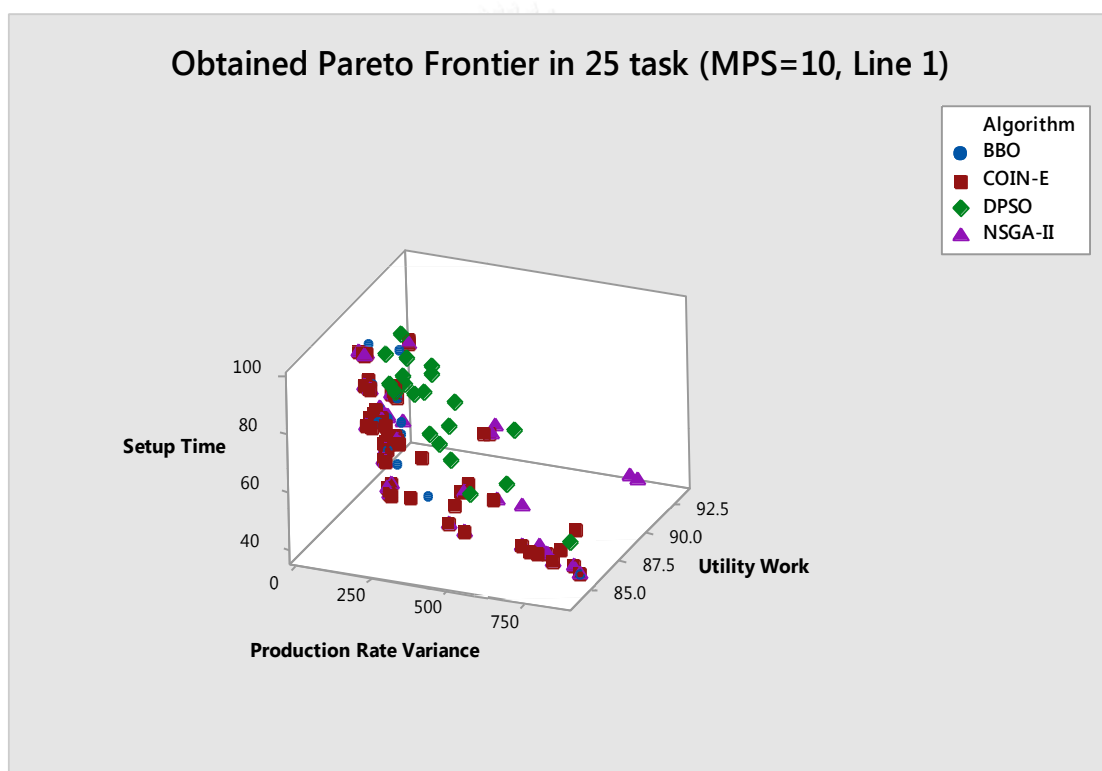
ตารางที่ 7.2 ค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม

อัลกอริทึม	ค่าพารามิเตอร์	
COIN-E (นายสถาพร โอบารวิวัฒน์ ชัย, 2556)	ขนาดประชากร	100
	ค่าการให้รางวัล	0.1
	ค่าการลงโทษ	0.1
	ค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มตารางวิธีการ บรรจบ	70%
	ค่าความน่าจะเป็นในการสุ่มฟังก์ชัน วัตถุประสงค์	30%
BBO (ณัฐชัย โยธาภิบาล, 2556)	ขนาดประชากร	100
	ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.1
	รูปแบบการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation
	รูปแบบการอพยพ	Sinusoidal
NSGA-II (ปาไลดา ฉิมคล้าย, 2553)	ขนาดประชากร	100
	ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์	0.7
	รูปแบบการครอสโอเวอร์	Weight Mapping Crossover
	ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน	0.3
	รูปแบบการมิวเตชัน	Reciprocal Mutation
DPSO (ปาไลดา ฉิมคล้าย, 2553)	ขนาดประชากร	100
	จำนวนฝูง	10
	จำนวนอนุภาคในแต่ละฝูง	10
	ค่าสัมประสิทธิ์ในการเรียนรู้	0.1
	ค่าน้ำหนักการหมุนง	1

7.4 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน ชั้นที่ 1

7.4.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.1 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.3



รูปที่ 7.1 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ชั้นที่ 1

ตารางที่ 7.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ชั้นที่ 1

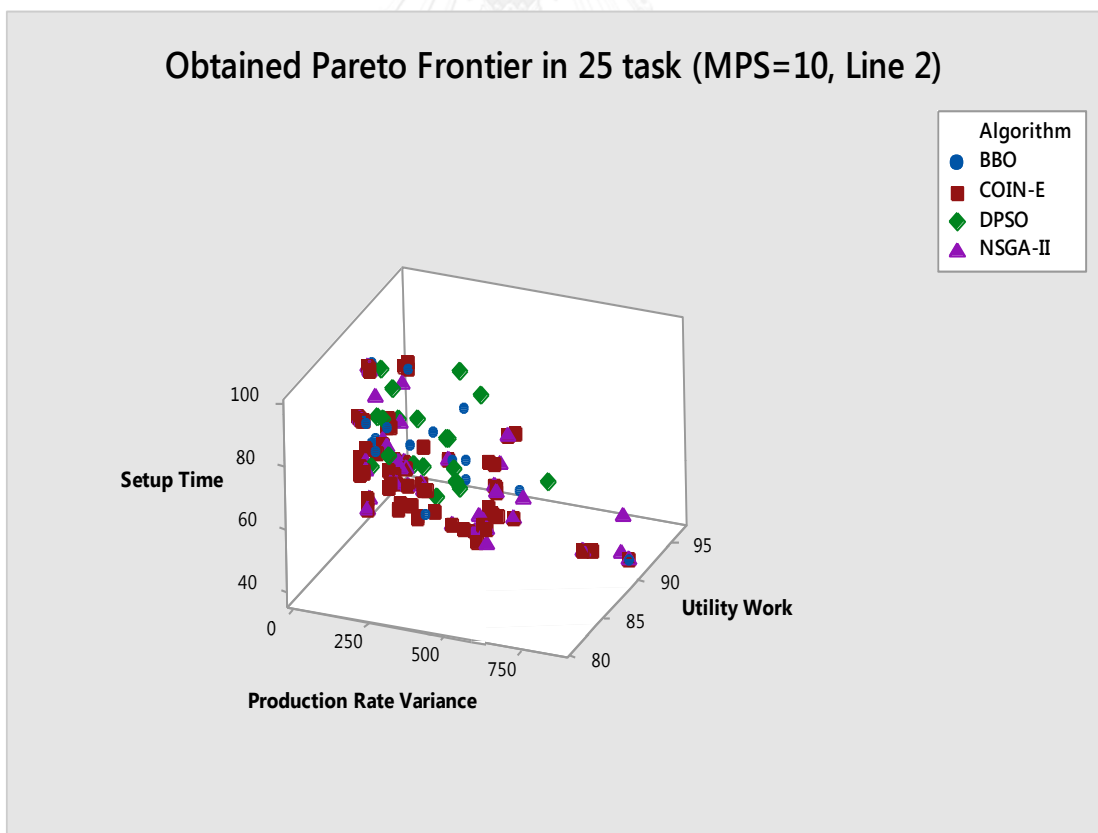
Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9291	0.6957	1.0000	69	22.6870
NSGA-II	0.0152	0.7519	0.6410	0.5208	39	34.4440

ตารางที่ 7.3 (ต่อ) การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ชั้นที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
BBO	0.1205	0.5802	0.2778	0.1042	18	57.7980
DPSO	0.1777	0.6733	0.0000	0.0000	20	214339.6720

7.4.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.2 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.4



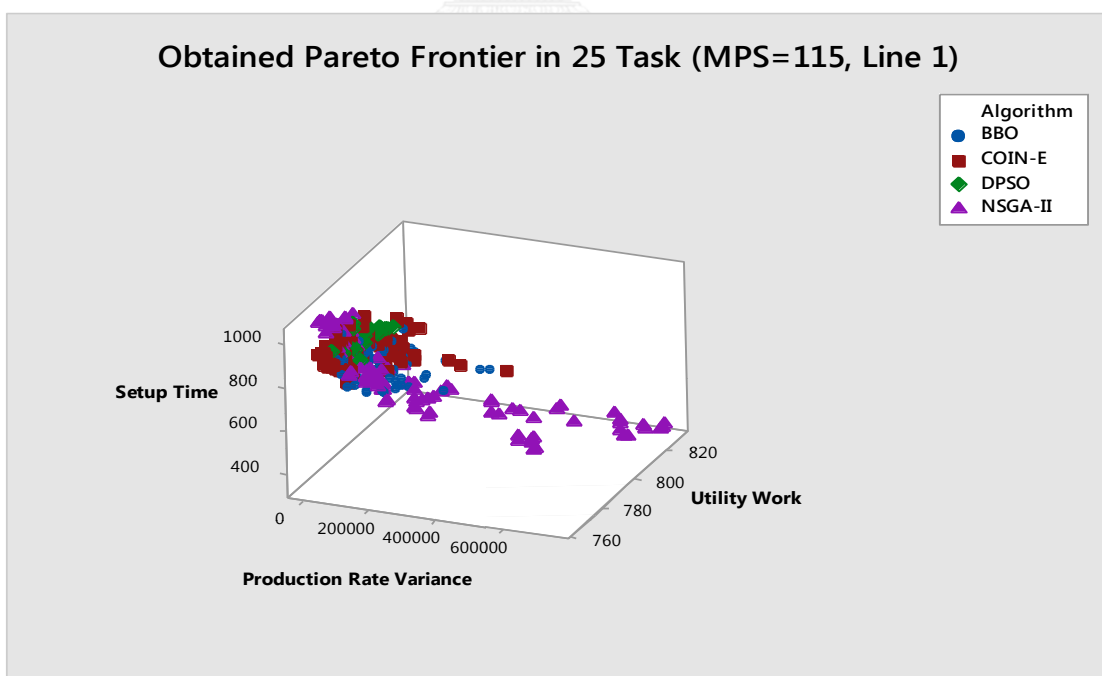
รูปที่ 7.2 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ชั้นที่ 1

ตารางที่ 7.4 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9291	0.6957	1.0000	67	23.2120
NSGA-II	0.0152	0.7519	0.6410	0.5208	41	31.8240
BBO	0.1205	0.5802	0.2778	0.1042	22	64.1660
DPSO	0.1777	0.6733	0.0000	0.0000	19	192716.5750

7.4.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.3 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.5



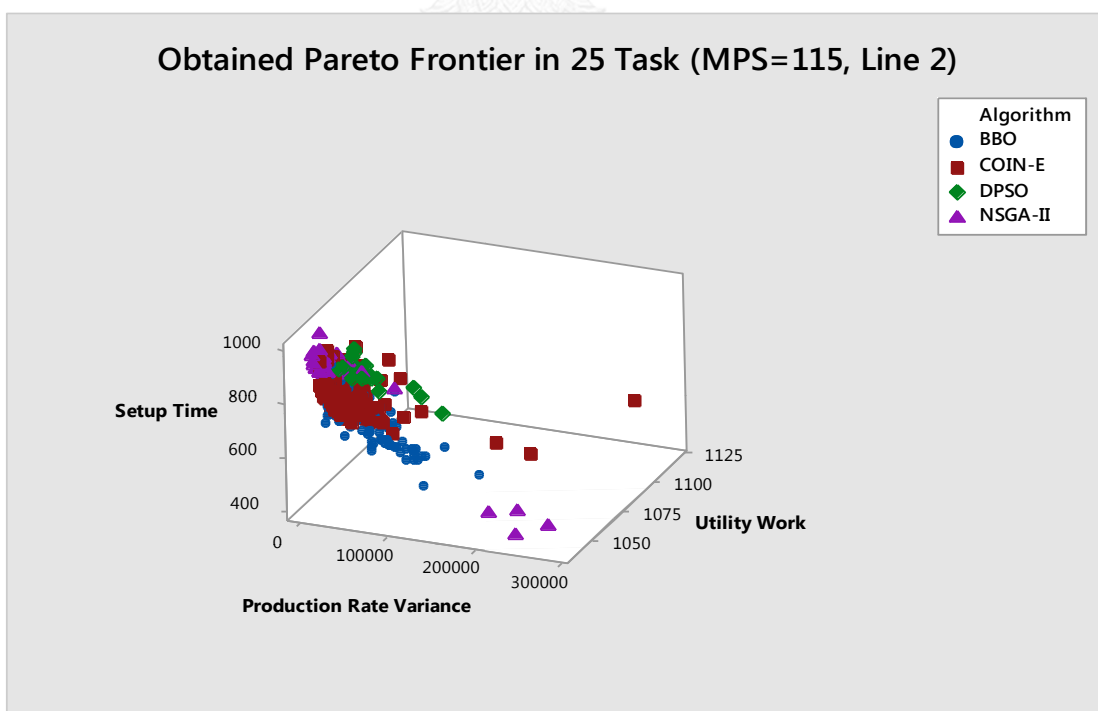
รูปที่ 7.3 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0870	0.6733	0.8919	0.5366	151	193.835
NSGA-II	0.0587	0.6806	0.7100	0.2886	100	197.624
BBO	0.0942	0.6258	0.4400	0.1789	100	212.990
DPSO	0.2359	0.6562	0.0000	0.0000	22	409013.498

7.4.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.4 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.6



รูปที่ 7.4 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

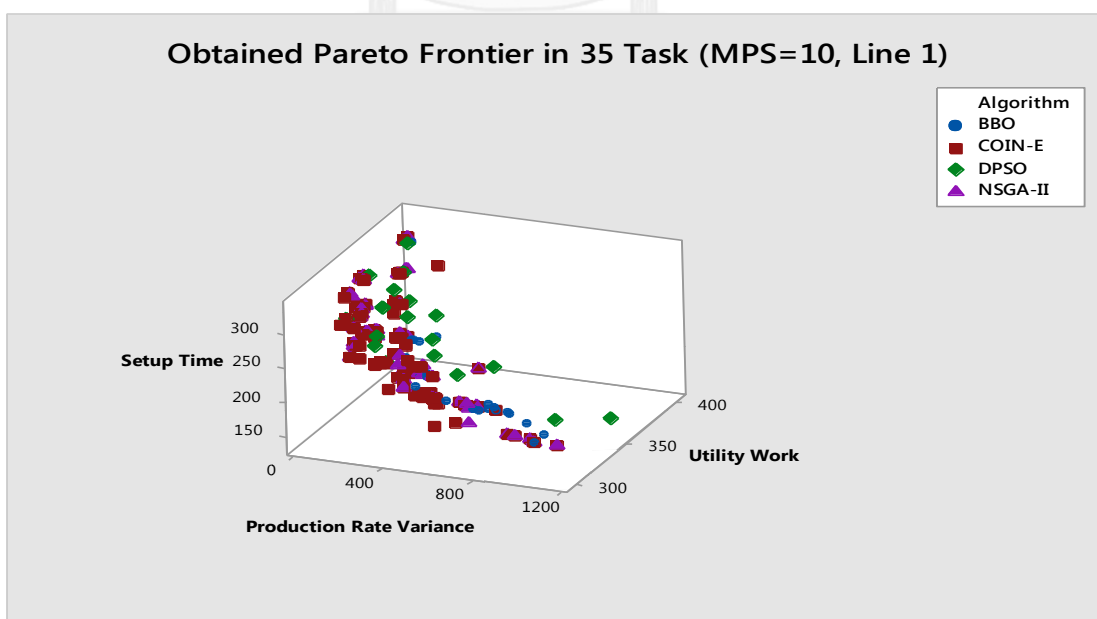
ตารางที่ 7.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ชั้นที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0453	0.6622	0.6187	0.4300	139	117.140
NSGA-II	0.1759	0.6610	0.8462	0.2200	52	238.641
BBO	0.0492	0.6035	0.7778	0.3500	90	187.843
DPSO	0.1955	0.5158	0.0000	0.0000	21	80372.847

7.5 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน ชั้นที่ 1

7.5.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.5 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.7



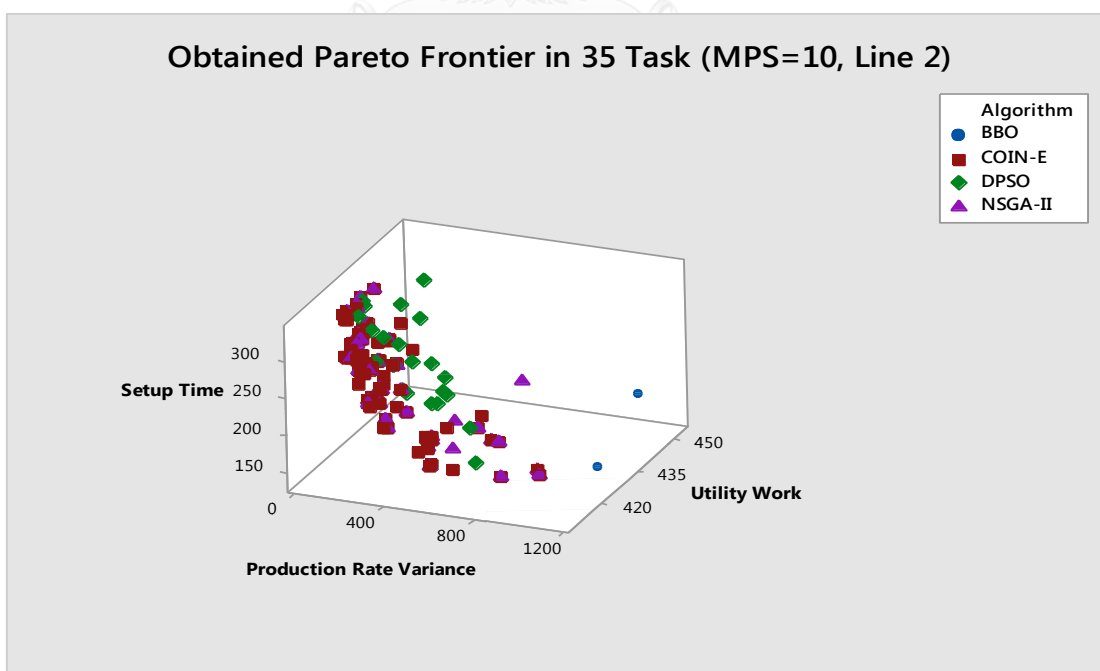
รูปที่ 7.5 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ชั้นที่ 1

ตารางที่ 7.7 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	1.0133	0.8190	1.0000	105	54.555
NSGA-II	0.0407	0.8745	0.4655	0.3140	58	58.422
BBO	0.2101	0.7033	0.1200	0.0349	25	68.722
DPSO	0.1201	0.4915	0.1000	0.0233	20	106609.861

7.5.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.6 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.8



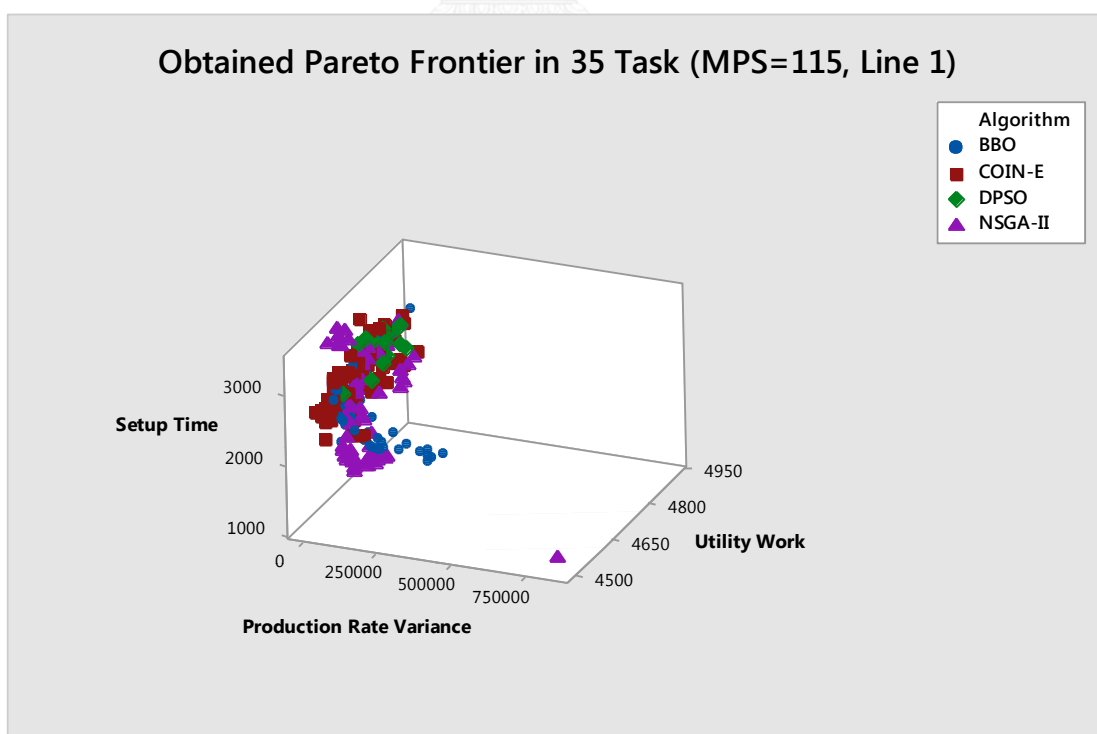
รูปที่ 7.6 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8497	0.7241	1.0000	87	29.484
NSGA-II	0.0304	0.7775	0.7174	0.5238	46	45.130
BBO	0.4221	0.5260	0.3333	0.0159	3	62.840
DPSO	0.1623	0.5974	0.0000	0.0000	23	143932.188

7.5.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.7 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.9



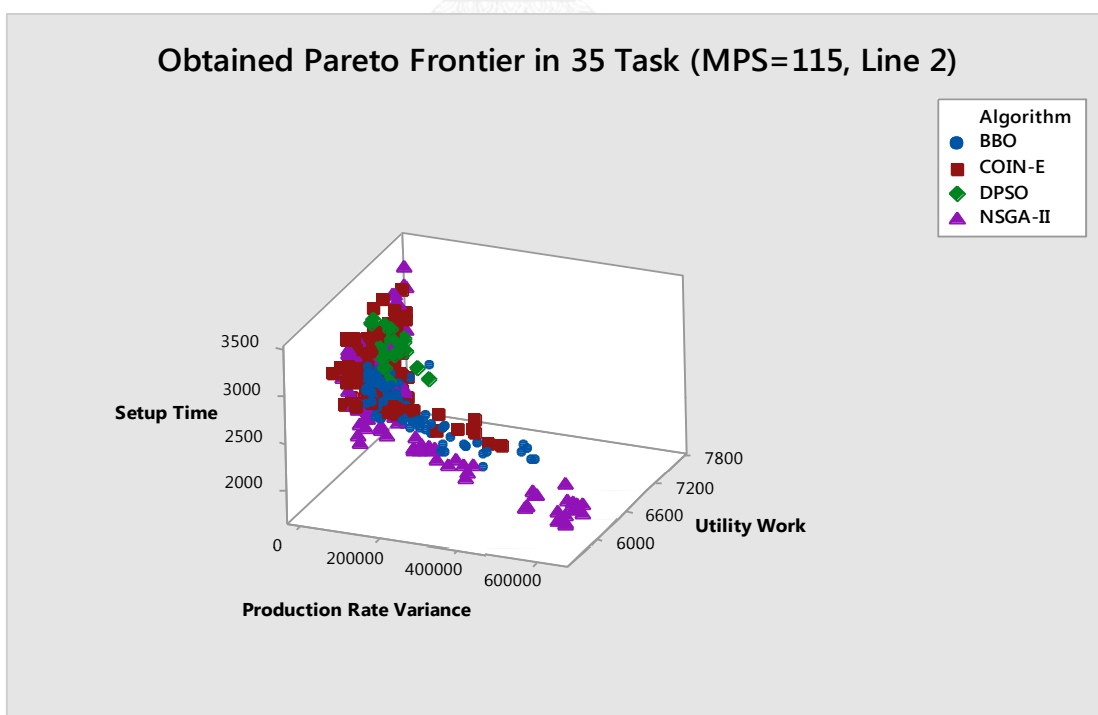
รูปที่ 7.7 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0565	0.6414	0.8289	0.6117	76	312.196
NSGA-II	0.0624	0.8620	0.4348	0.2913	69	306.930
BBO	0.0775	0.5941	0.2340	0.1068	47	422.482
DPSO	0.1872	0.5737	0.0000	0.0000	14	250957.242

7.5.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.8 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.10



รูปที่ 7.8 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

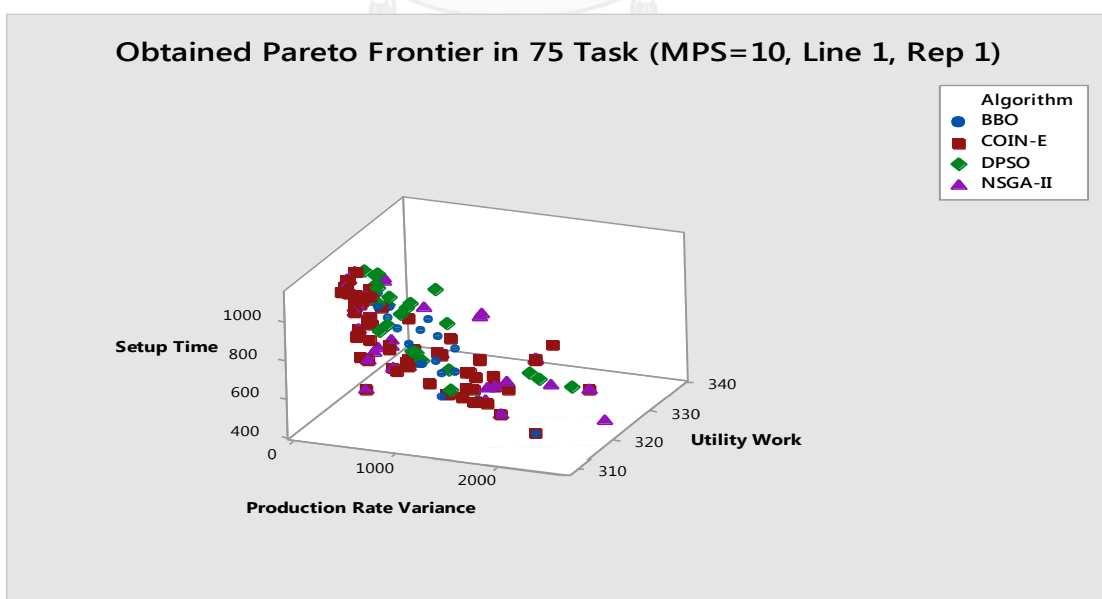
ตารางที่ 7.10 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0969	0.6370	0.6013	0.4822	158	222.795
NSGA-II	0.0530	0.6785	0.8830	0.4213	94	265.601
BBO	0.1251	0.5720	0.1919	0.0964	99	317.983
DPSO	0.2822	0.6576	0.0000	0.0000	21	159898.629

7.6 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 1

7.6.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.9 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.11



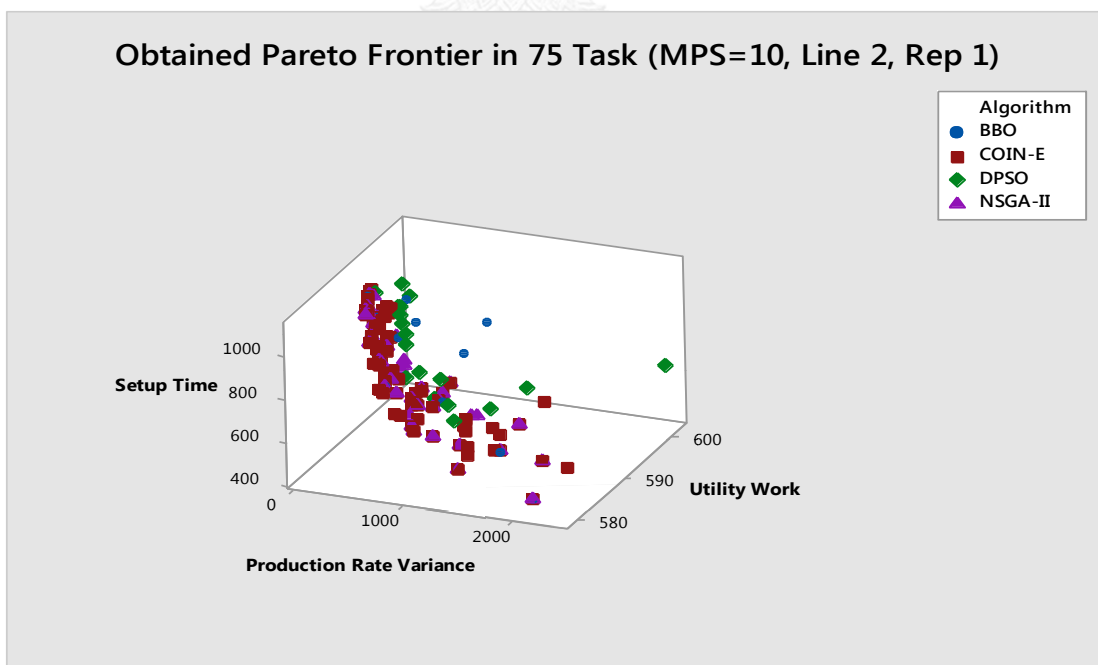
รูปที่ 7.9 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.11 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9192	0.6543	1.0000	81	62.10
NSGA-II	0.0539	0.7653	0.4500	0.3396	40	126.49
BBO	0.1935	0.5620	0.0526	0.0189	19	196.92
DPSO	0.1824	0.5519	0.0000	0.0000	23	66176.994

7.6.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.10 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.12



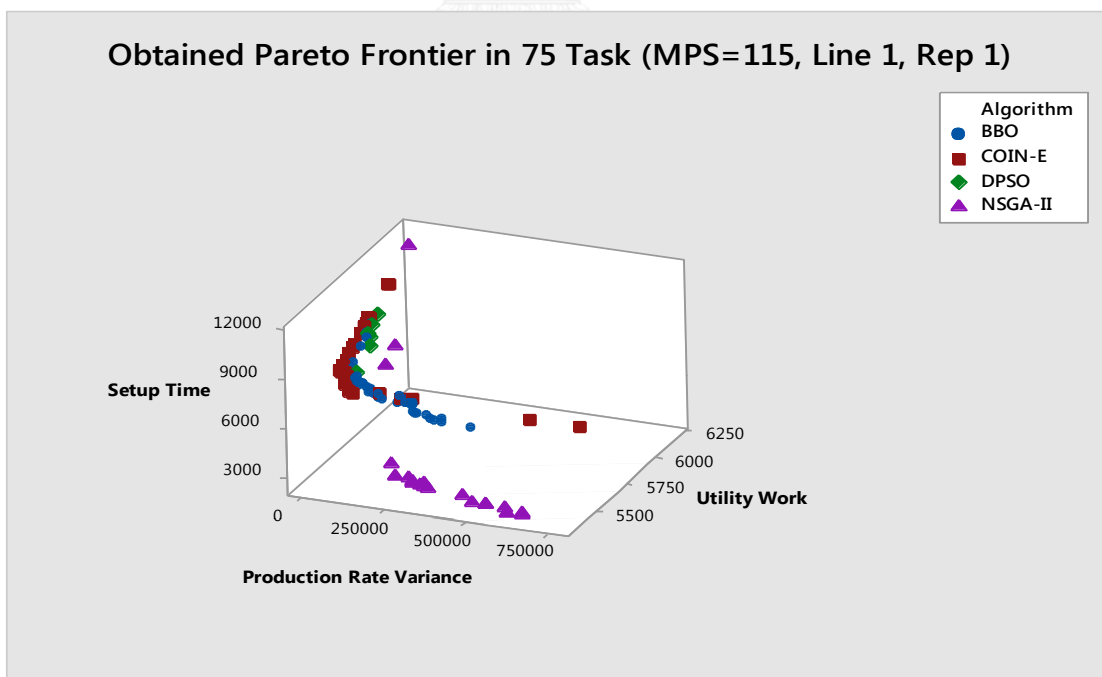
รูปที่ 7.10 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.12 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8813	0.7471	1.0000	87	62.634
NSGA-II	0.0368	0.5056	0.6341	0.4000	41	139.363
BBO	0.1104	0.6220	0.0923	0.3750	16	193.803
DPSO	0.1479	0.6317	0.0000	0.0000	18	107146.912

7.6.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.11 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.13



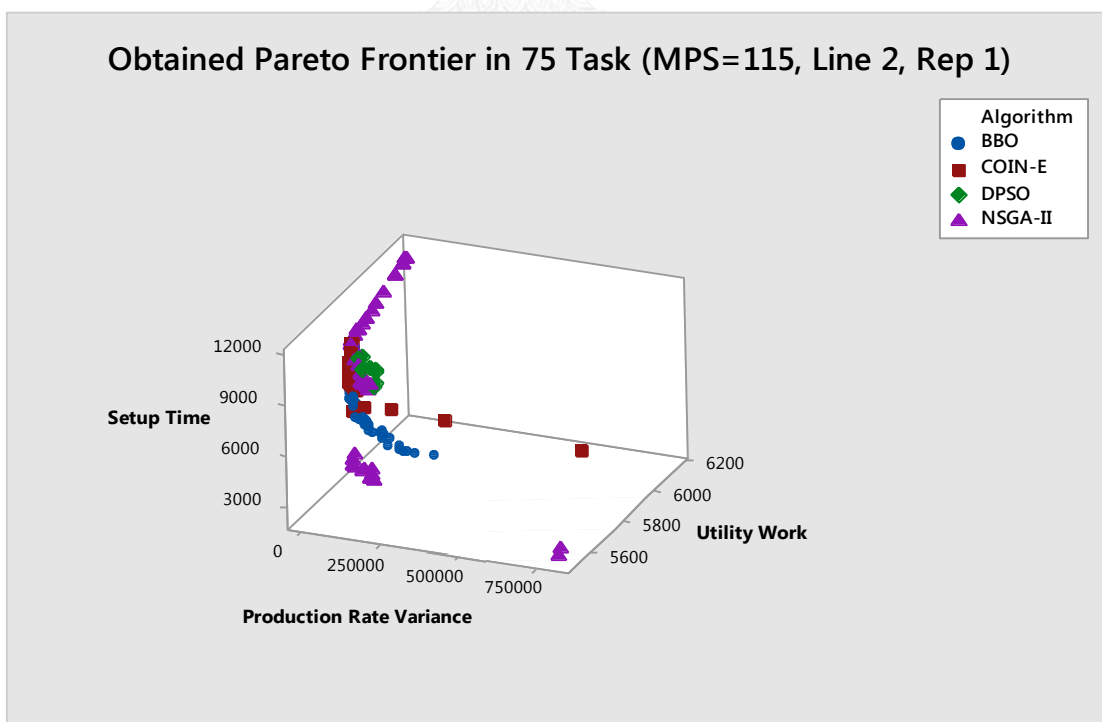
รูปที่ 7.11 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.13 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.1683	1.0119	0.8529	0.5370	34	766.759
NSGA-II	0.1302	0.8830	0.9000	0.3333	20	776.751
BBO	0.1714	0.6499	0.1591	0.1296	44	993.242
DPSO	0.3330	0.6260	0.0000	0.0000	6	237925.725

7.6.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.12 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.14



รูปที่ 7.12 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

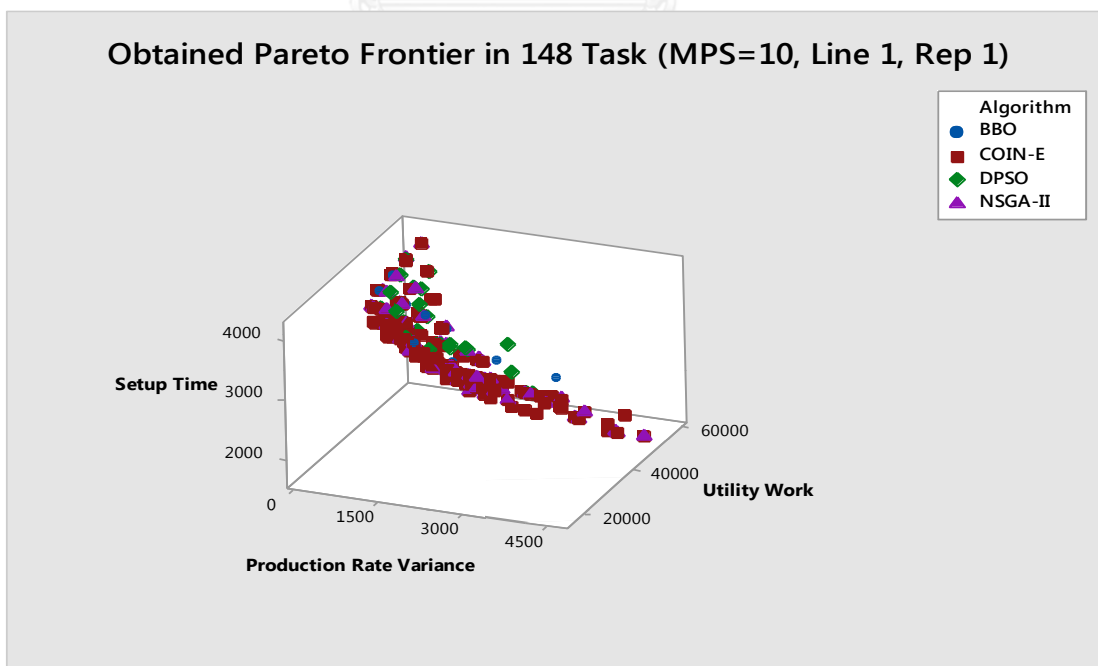
ตารางที่ 7.14 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.1619	0.7392	0.3226	0.1471	31	801.434
NSGA-II	0.0419	0.9725	0.7143	0.5147	49	731.321
BBO	0.1378	0.6695	0.4545	0.3676	55	853.478
DPSO	0.2541	0.4302	0.0000	0.0000	9	237283.800

7.7 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 1

7.7.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.13 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.15



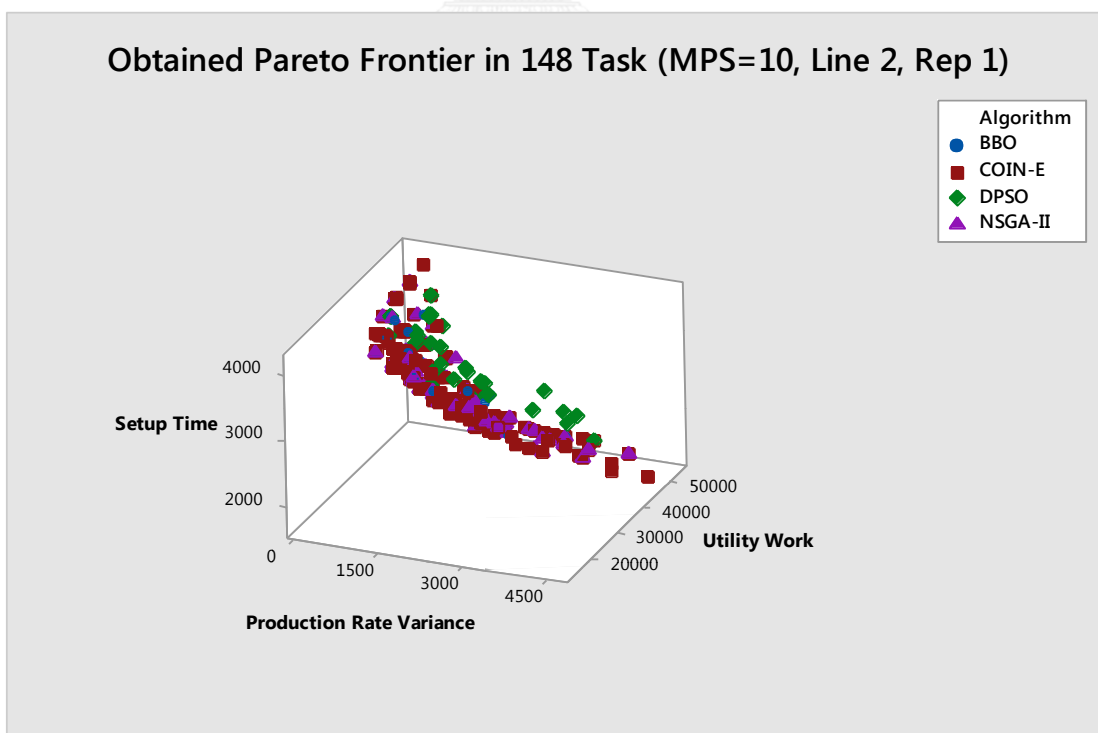
รูปที่ 7.13 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.15 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9423	0.7308	1.0000	156	85.438
NSGA-II	0.0324	0.7454	0.4394	0.2544	66	110.449
BBO	0.2003	0.7764	0.1111	0.0175	18	63.814
DPSO	0.1276	0.6373	0.0370	0.0088	27	103574.367

7.7.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.14 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.16



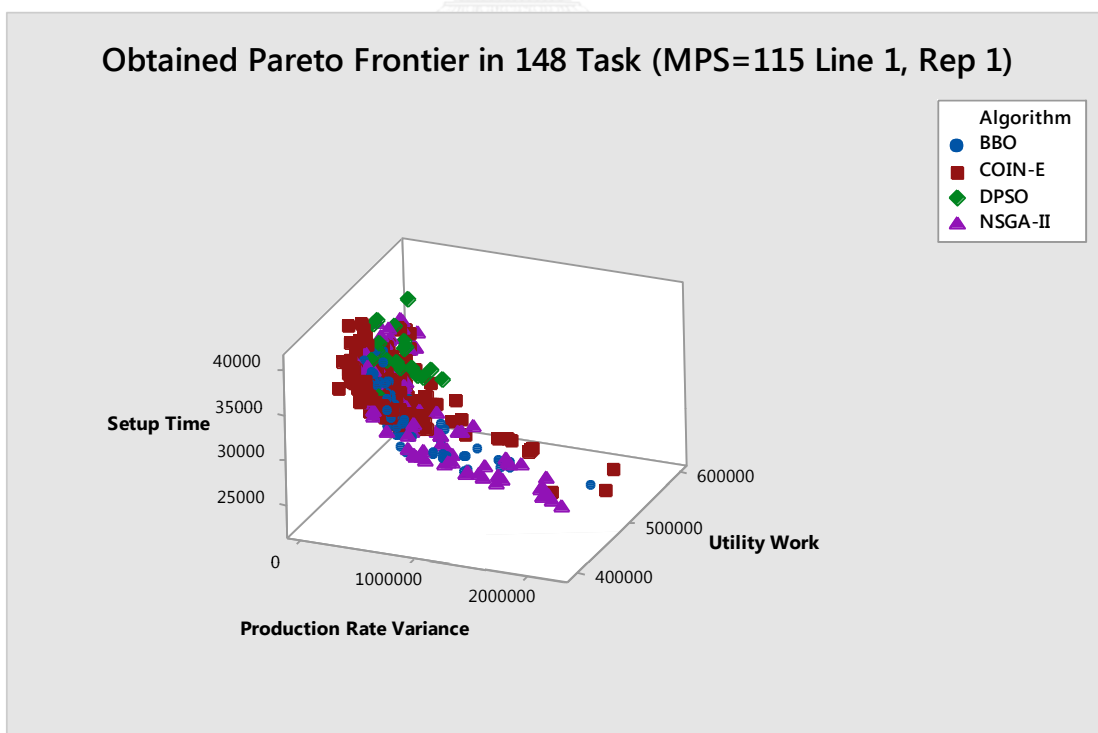
รูปที่ 7.14 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.16 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8424	0.6933	1.0000	150	51.525
NSGA-II	0.0356	0.6177	0.5000	0.3173	66	108.853
BBO	0.1029	0.5760	0.2500	0.0673	28	71.978
DPSO	0.1271	0.5605	0.0000	0.0000	32	147395.527

7.7.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.15 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.17



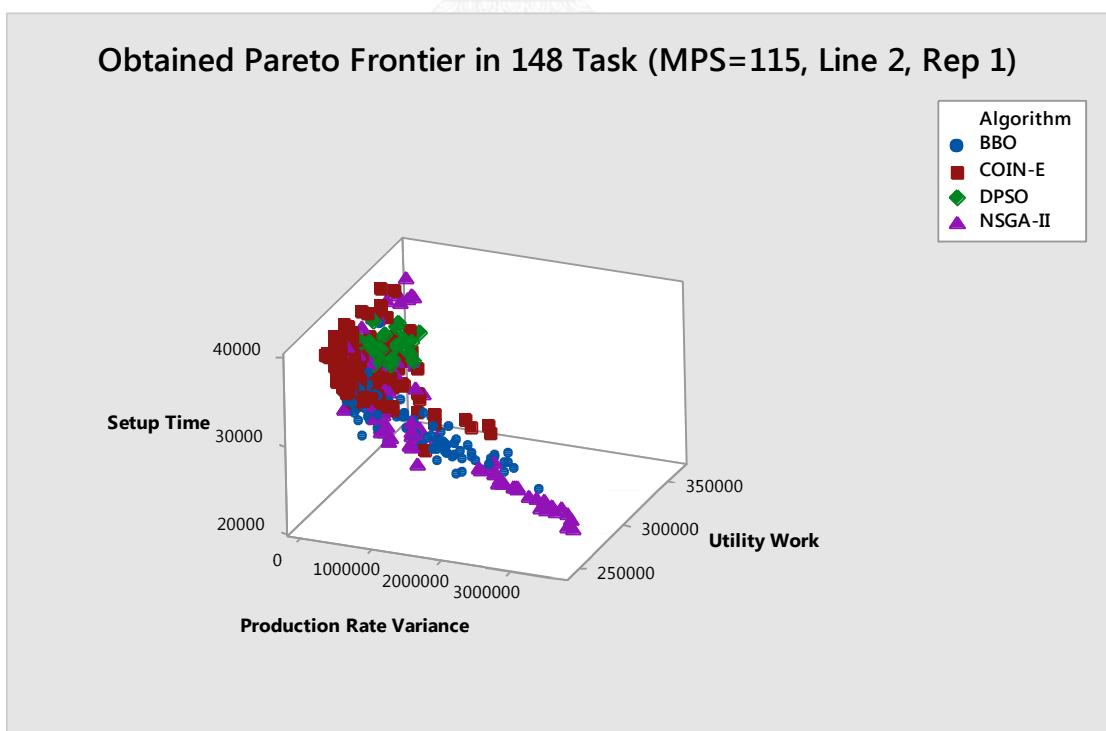
รูปที่ 7.15 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

ตารางที่ 7.17 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0479	0.6871	0.7422	0.6185	225	460.544
NSGA-II	0.0458	0.5887	0.6774	0.2333	93	527.193
BBO	0.0794	0.5923	0.4040	0.1481	99	732.981
DPSO	0.2126	0.4151	0.0000	0.0000	20	253991.489

7.7.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.16 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.18



รูปที่ 7.16 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

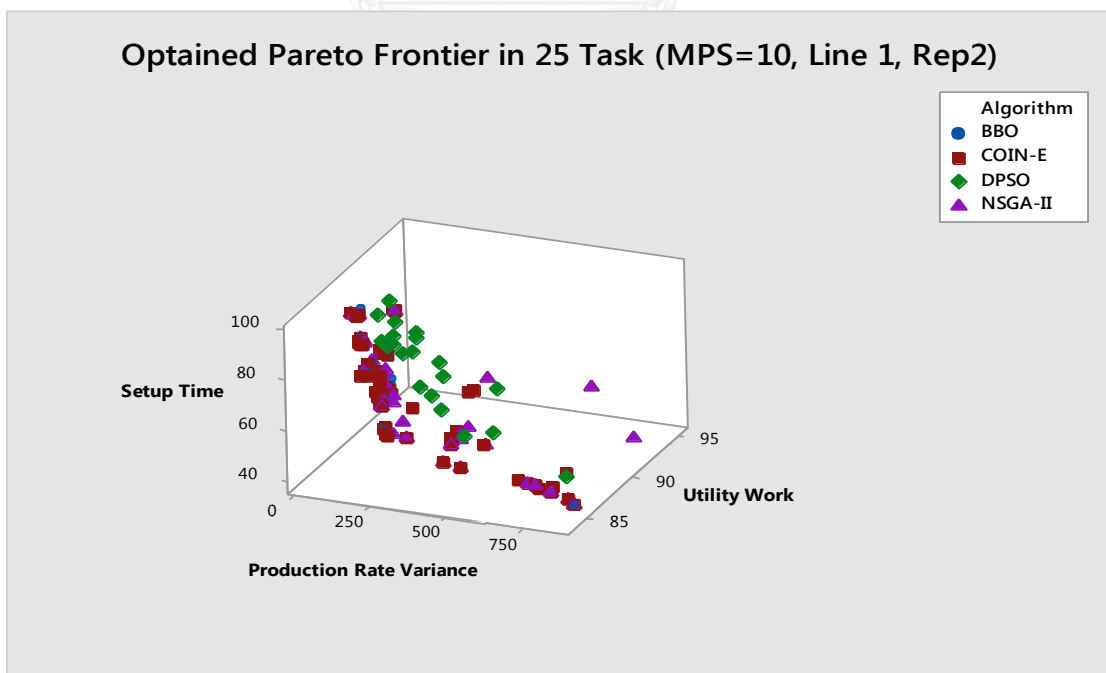
ตารางที่ 7.18 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0659	0.6192	0.8462	0.6091	221	505.924
NSGA-II	0.0542	0.6516	0.6915	0.2117	94	559.537
BBO	0.1037	0.6194	0.5500	0.1792	100	654.936
DPSO	0.2657	0.5642	0.0000	0.0000	22	254475.969

7.8 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 2

7.8.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.17 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.19



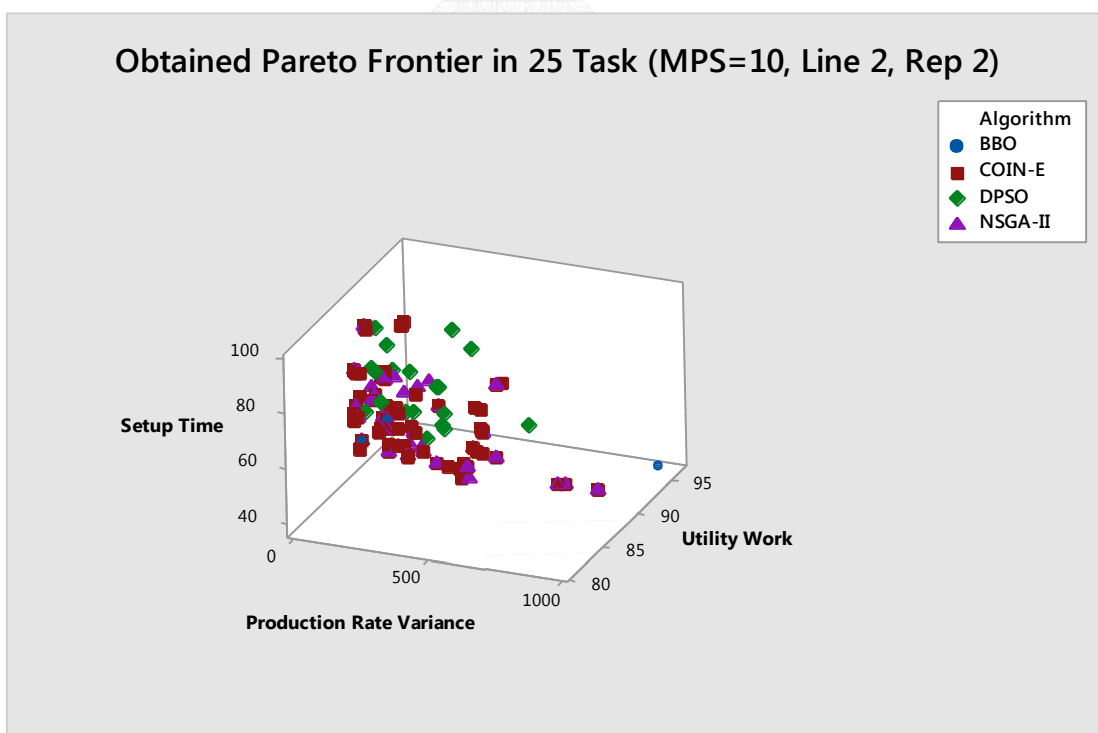
รูปที่ 7.17 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.19 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9291	0.6957	1.0000	69	42.182
NSGA-II	0.0230	0.8080	0.3810	0.3333	42	46.569
BBO	0.1349	0.6296	0.2667	0.0833	15	43.149
DPSO	0.1777	0.6733	0.0000	0.0000	20	214339.672

7.8.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.18 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.20



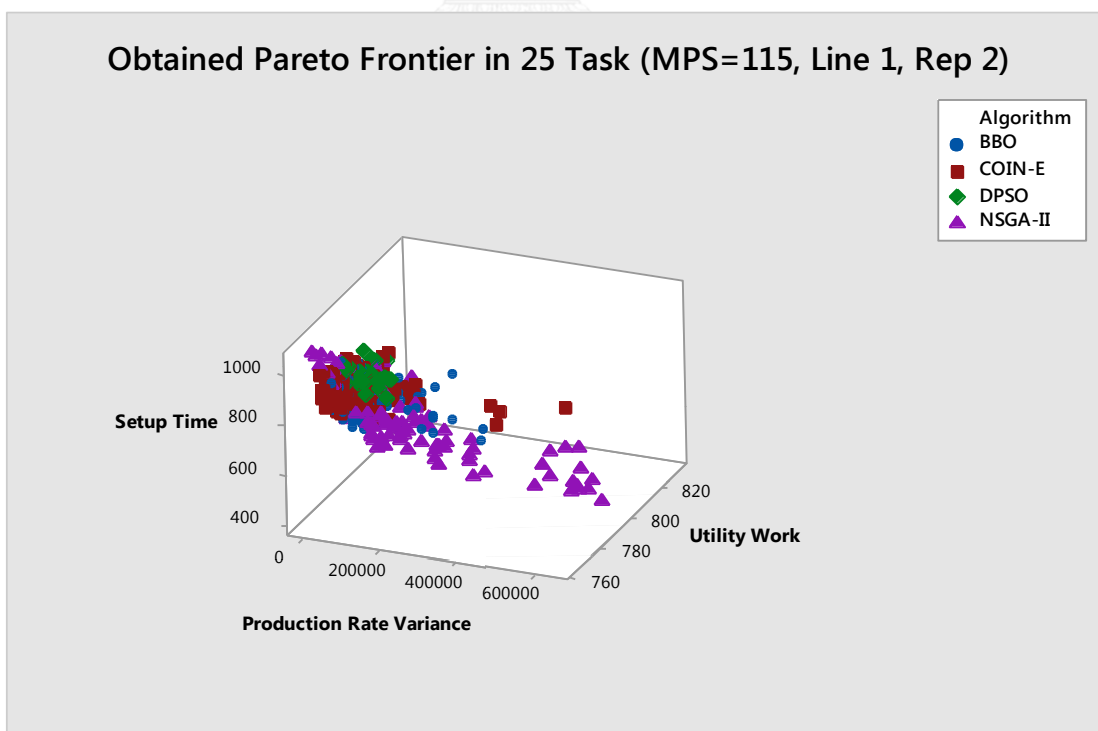
รูปที่ 7.18 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.20 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.7640	0.6418	1.0000	67	25.428
NSGA-II	0.0369	0.6498	0.4419	0.4750	40	29.701
BBO	0.2082	0.8054	0.5714	0.0930	7	41.90
DPSO	0.1527	0.5818	0.0000	0.0000	19	192716.575

7.8.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.19 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.21



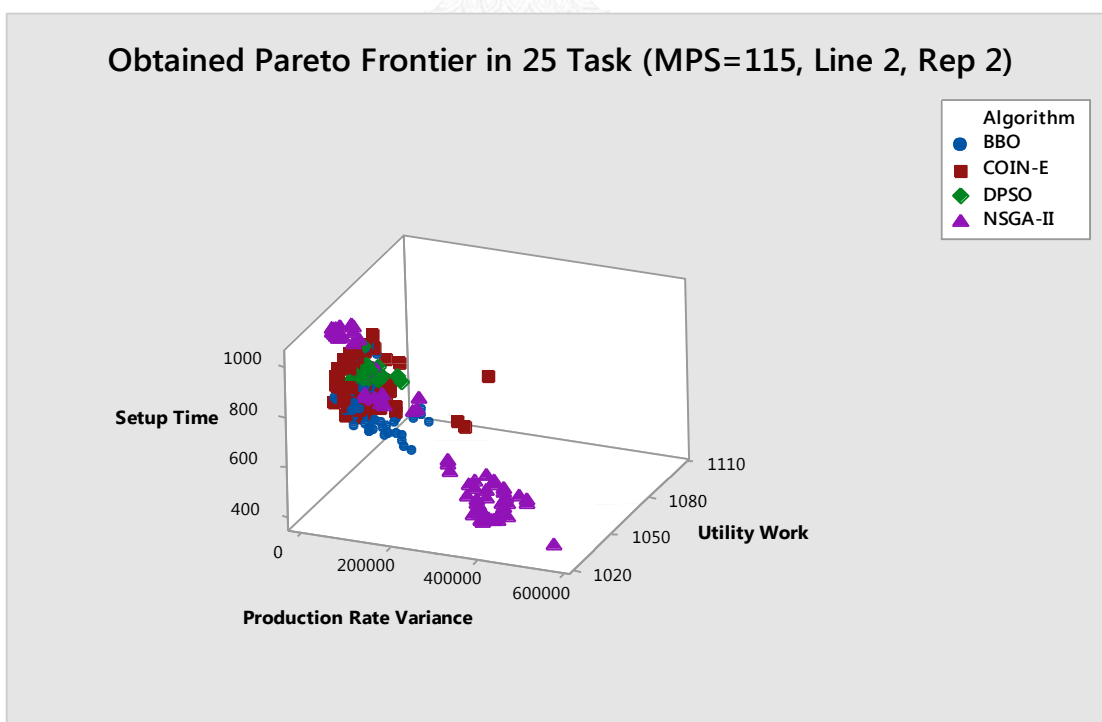
รูปที่ 7.19 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.21 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0665	0.5647	0.6497	0.5494	197	230.147
NSGA-II	0.0444	0.6329	0.7447	0.3004	94	210.285
BBO	0.0727	0.5442	0.4268	0.1502	82	273.160
DPSO	0.1820	0.4683	0.0000	0.0000	27	233562.194

7.8.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.20 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.22



รูปที่ 7.20 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

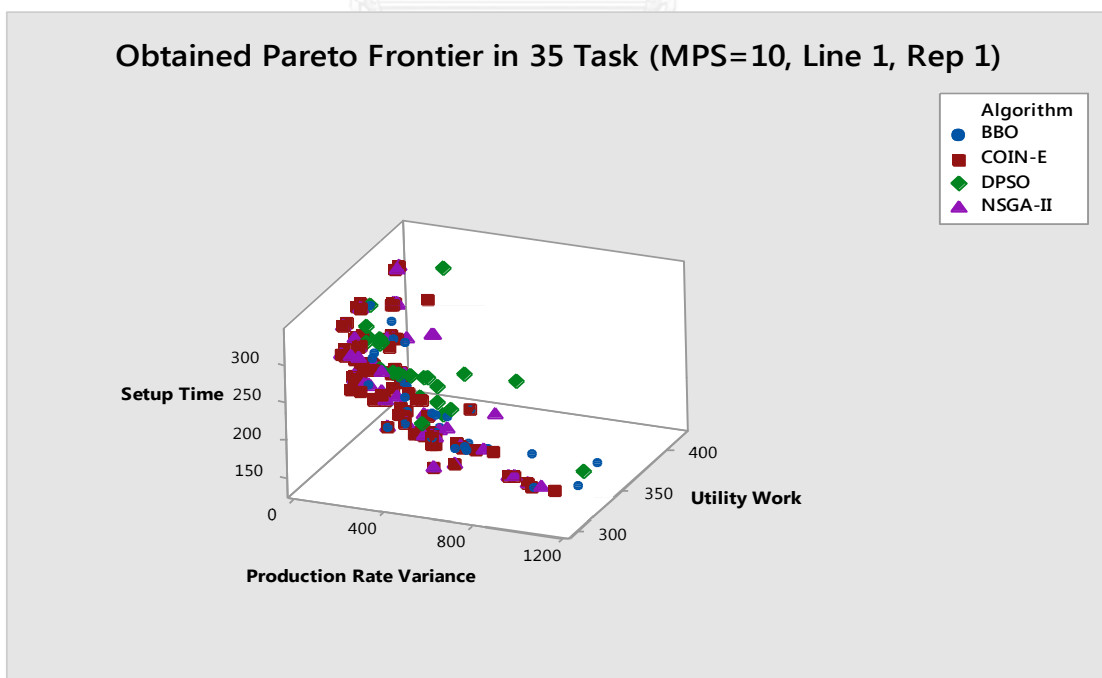
ตารางที่ 7.22 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.1413	0.6104	0.8434	0.4459	83	169.225
NSGA-II	0.0855	0.7622	0.7361	0.3376	72	240.115
BBO	0.1523	0.5675	0.5972	0.2739	72	224.981
DPSO	0.3211	0.6551	0.0000	0.0000	17	243777.774

7.9 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 2

7.9.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.21 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.23



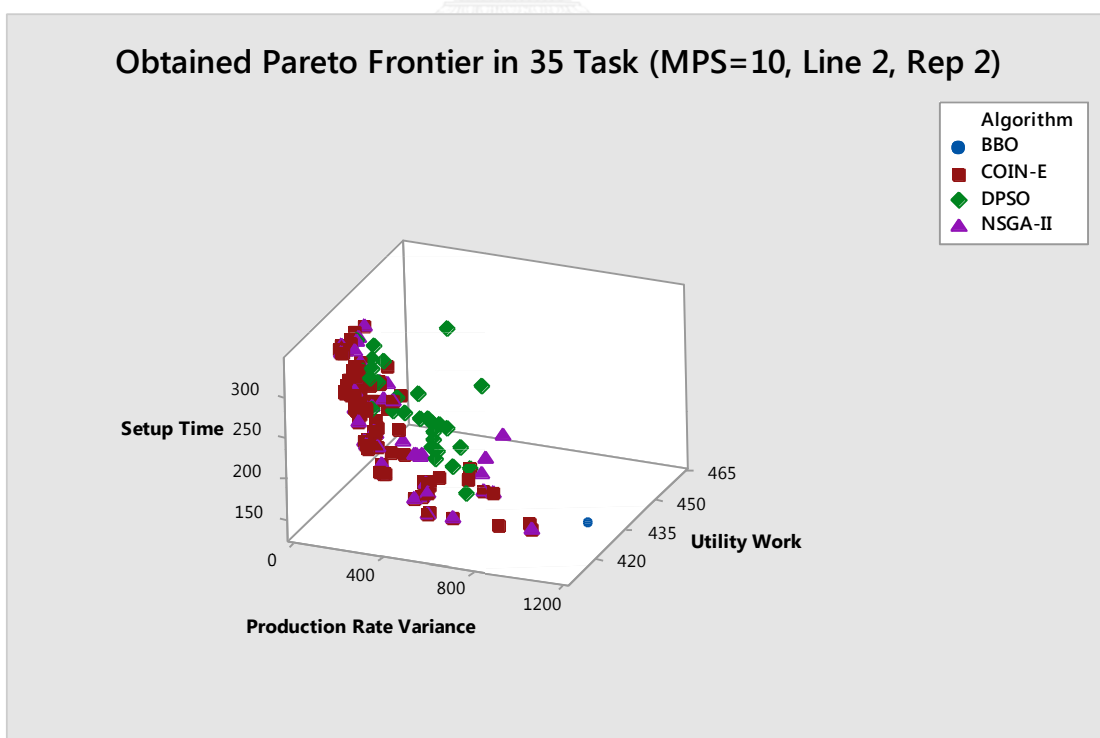
รูปที่ 7.21 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.23 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	1.0133	0.8190	1.0000	105	53.342
NSGA-II	0.0334	0.7335	0.5000	0.3256	56	49.623
BBO	0.0931	0.6560	0.1579	0.0698	38	73.542
DPSO	0.1410	0.6650	0.0000	0.0000	26	164062.828

7.9.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.22 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.24



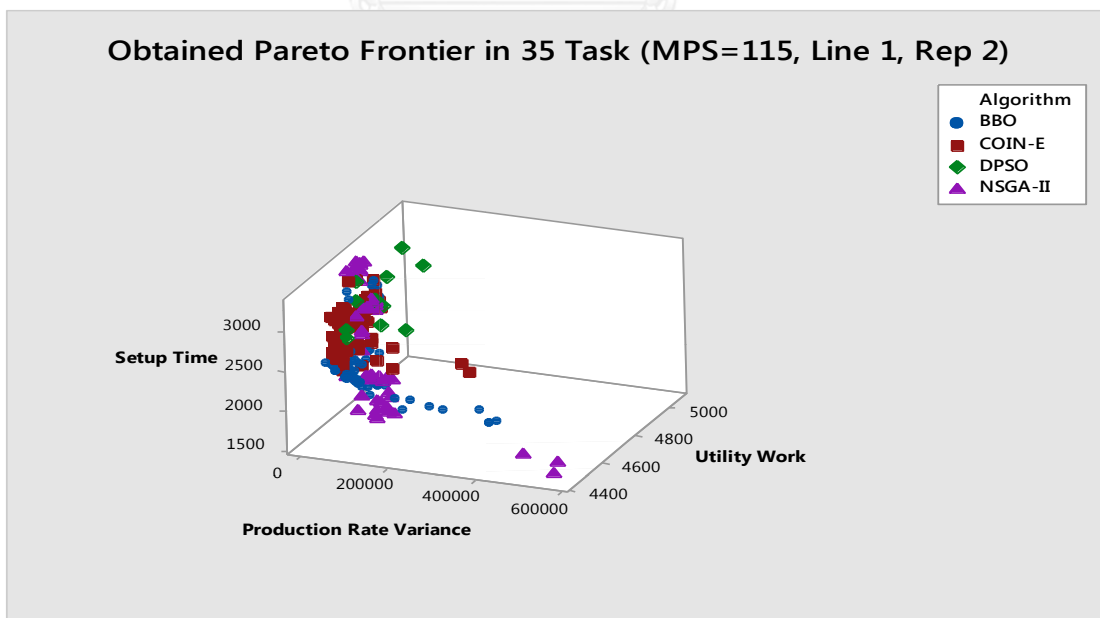
รูปที่ 7.22 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.24 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8497	0.7356	1.0000	90	29.484
NSGA-II	0.0372	0.7065	0.5000	0.3594	2	45.130
BBO	0.4673	0.6667	0.5000	0.0156	46	62.840
DPSO	0.1395	0.5647	0.0345	0.0156	29	143932.188

7.9.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.23 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.25



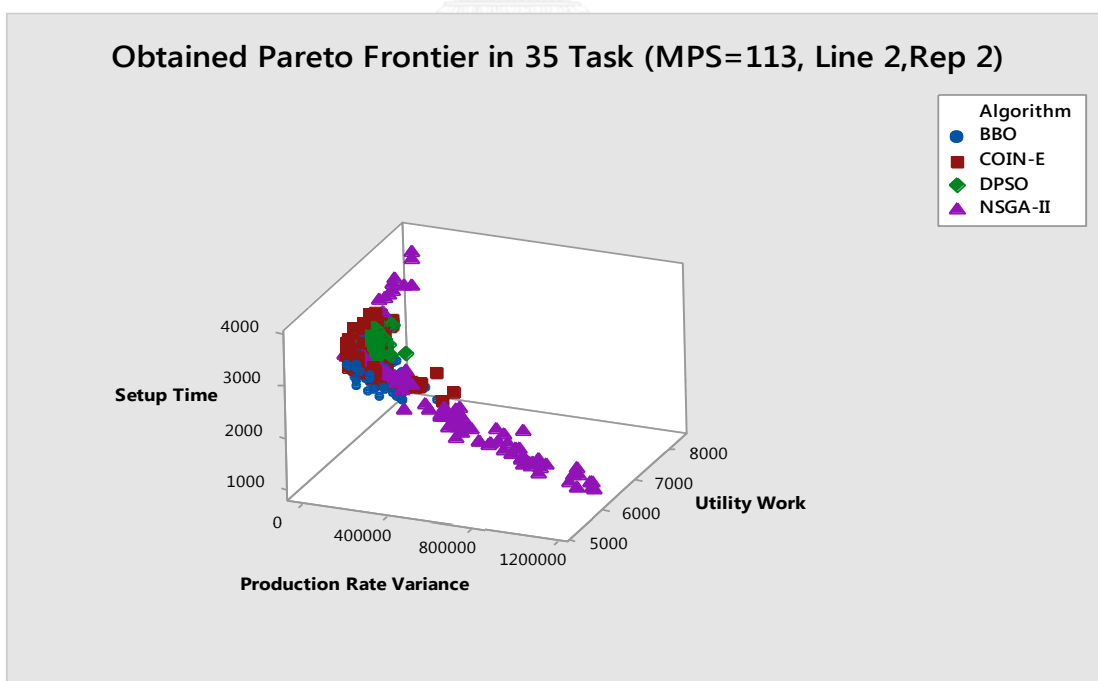
รูปที่ 7.23 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.25 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0924	0.6762	0.7429	0.4643	70	269.307
NSGA-II	0.0776	0.6896	0.5098	0.2321	51	298.225
BBO	0.0714	0.6326	0.5484	0.3036	62	412.572
DPSO	0.2150	0.4746	0.0000	0.0000	12	301716.877

7.9.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.24 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.26



รูปที่ 7.24 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

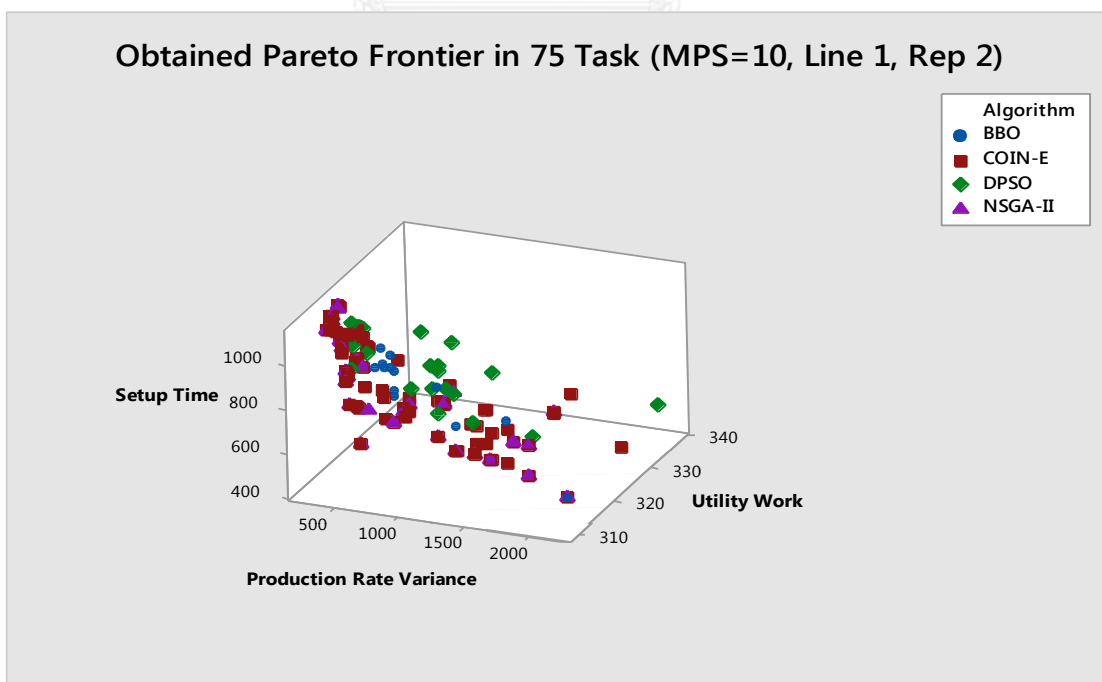
ตารางที่ 7.26 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0986	0.6224	0.7727	0.5368	198	302.905
NSGA-II	0.0588	0.6629	0.7053	0.2351	95	354.159
BBO	0.1169	0.5892	0.6566	0.2281	99	314.863
DPSO	0.2220	0.6078	0.0000	0.0000	32	132257.431

7.10 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 2

7.10.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.25 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.27



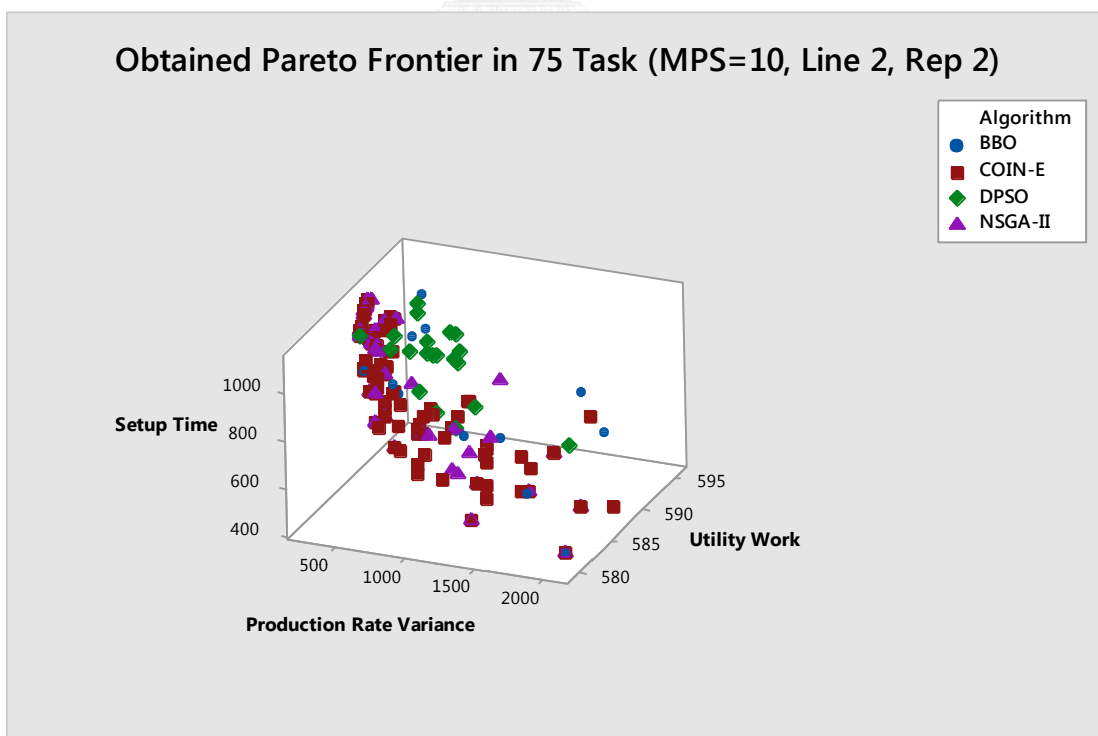
รูปที่ 7.25 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.27 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9192	0.6543	1.0000	81	66.768
NSGA-II	0.0474	0.7217	0.5676	0.3962	37	74.37
BBO	0.2465	0.7004	0.0769	0.0189	13	143.2
DPSO	0.1441	0.4864	0.0000	0.0000	20	72249.792

7.10.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.26 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.28



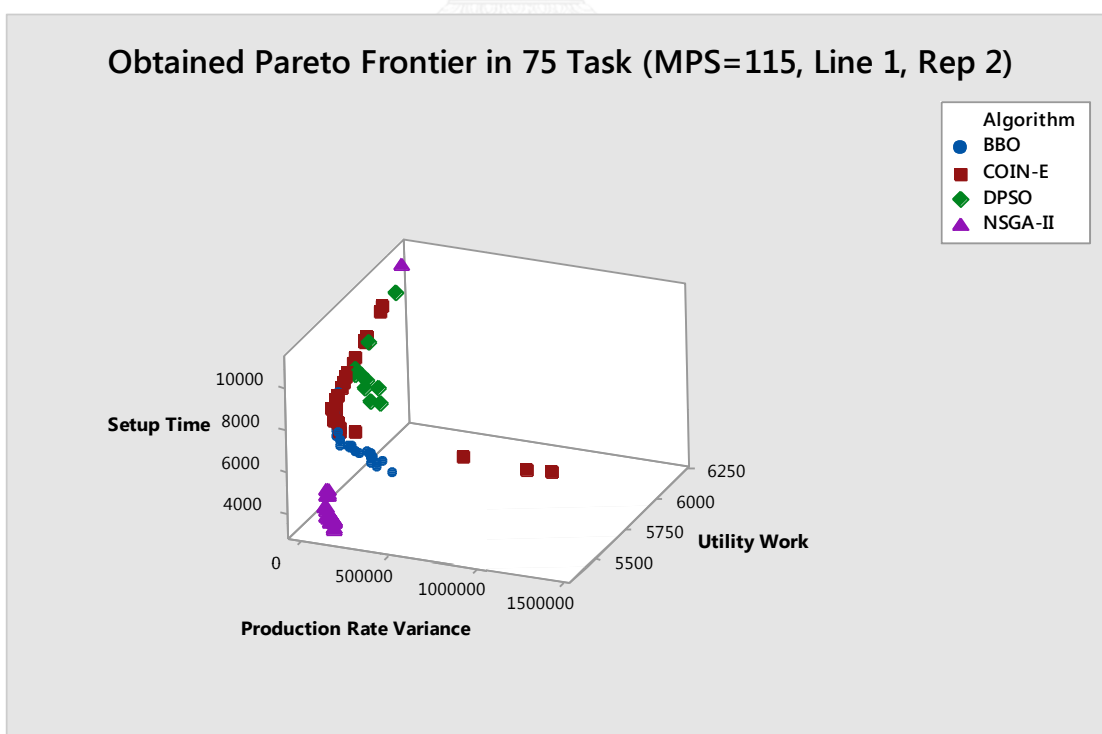
รูปที่ 7.26 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.28 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8813	0.7471	1.0000	87	68.577
NSGA-II	0.0601	0.8293	0.5952	0.3846	42	94.489
BBO	0.1489	0.6486	0.2667	0.0615	15	208.866
DPSO	0.2107	0.5888	0.0500	0.0154	20	111922.566

7.10.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.27 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.29



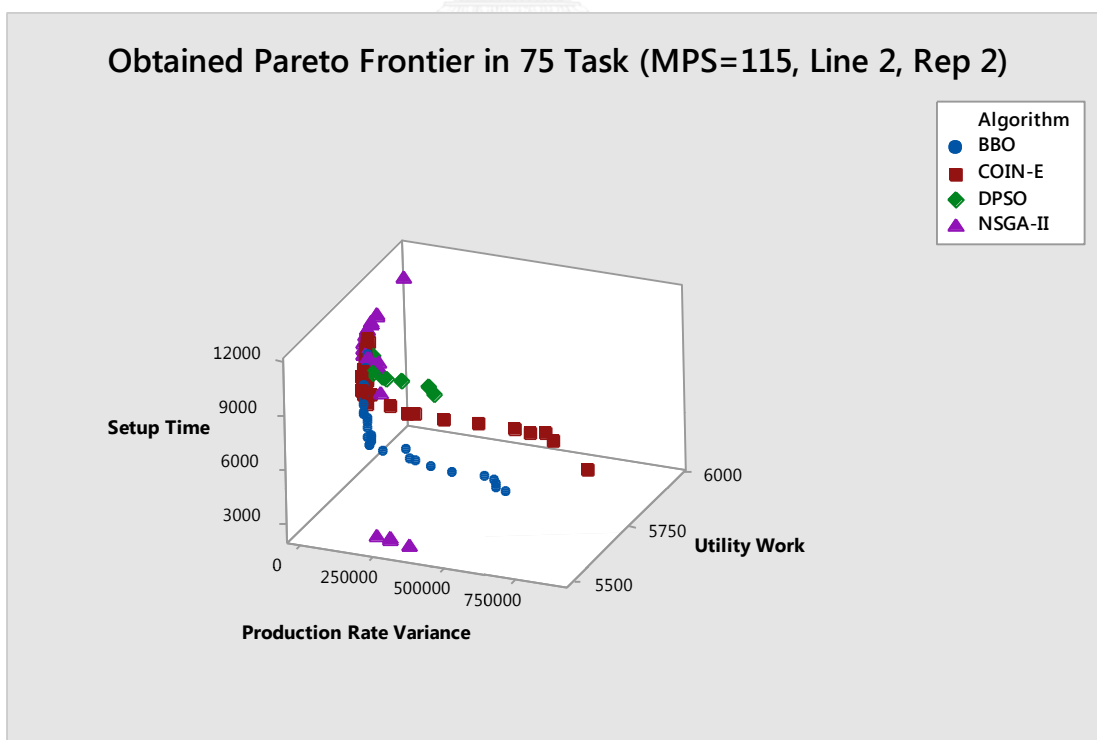
รูปที่ 7.27 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.29 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.1866	0.8400	0.7568	0.4746	37	783.474
NSGA-II	0.2852	1.0814	0.9615	0.4237	26	798.732
BBO	0.1759	0.8370	0.1463	0.1017	41	943.286
DPSO	0.3912	0.5998	0.0000	0.0000	10	221962.600

7.10.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.28 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง(Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.30



รูปที่ 7.28 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

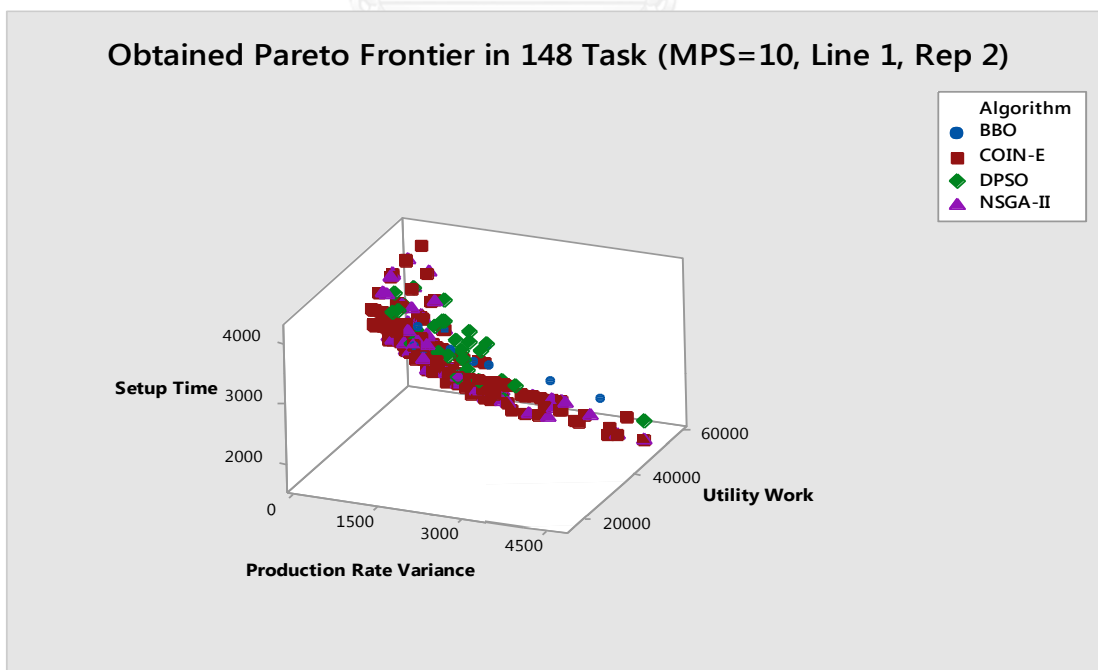
ตารางที่ 7.30 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0921	0.8666	0.4200	0.3231	50	772.423
NSGA-II	0.0806	1.0855	0.7143	0.3846	35	664.252
BBO	0.0735	0.8642	0.5135	0.2923	37	832.611
DPSO	0.1942	0.5339	0.0000	0.0000	8	203026.336

7.11 ผลการทดลองการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน ซ้ำที่ 2

7.11.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่แต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.29 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.31



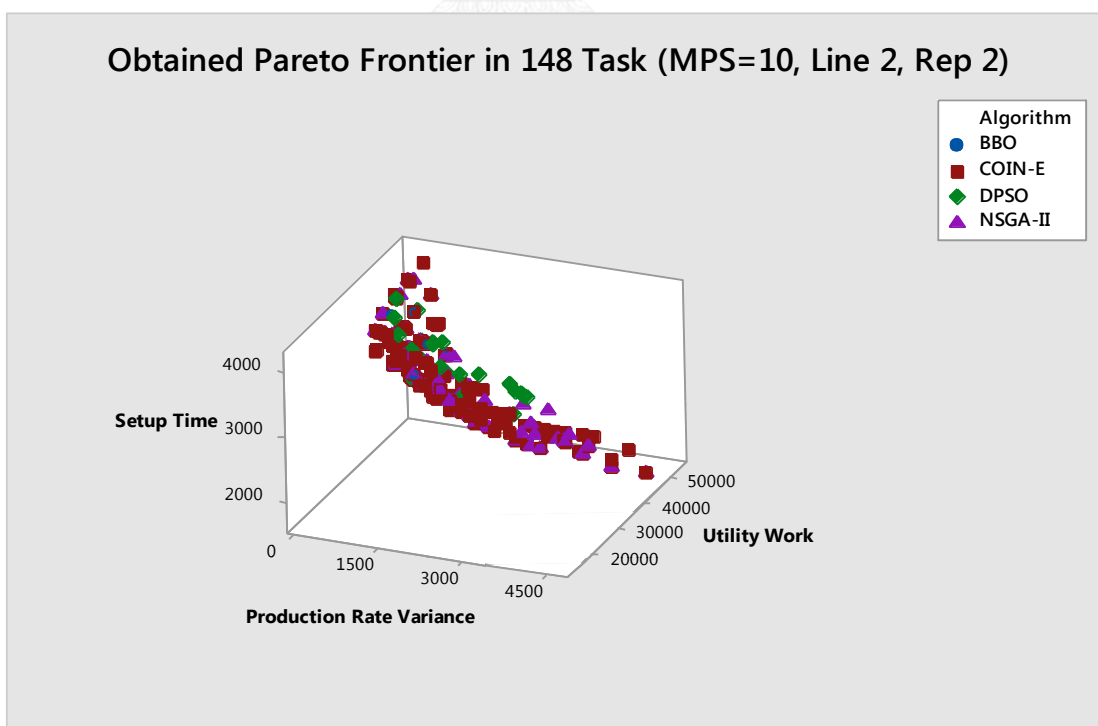
รูปที่ 7.29 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.31 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9423	0.7308	1.0000	156	108.278
NSGA-II	0.03675	0.7440	0.4776	0.2807	67	112.268
BBO	0.1639	0.5946	0.3158	0.0526	19	175.410
DPSO	0.1349	0.6981	0.0690	0.0175	29	124605.475

7.11.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1:2:3:4 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.30 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.32



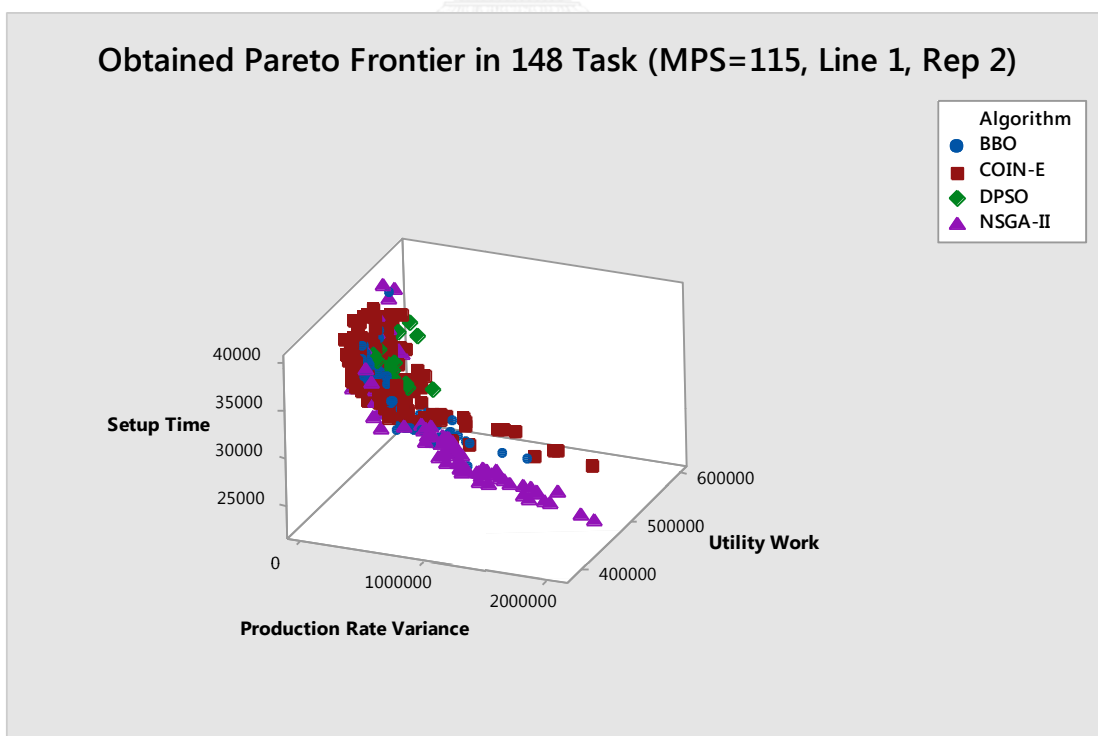
รูปที่ 7.30 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.32 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8424	0.6933	1.0000	150	79.601
NSGA-II	0.0375	0.6511	0.3971	0.2596	68	102.618
BBO	0.1831	0.7734	0.1579	0.0288	19	97.525
DPSO	0.1487	0.5955	0.0417	0.0096	24	135305.135

7.11.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 1 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.31 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.33



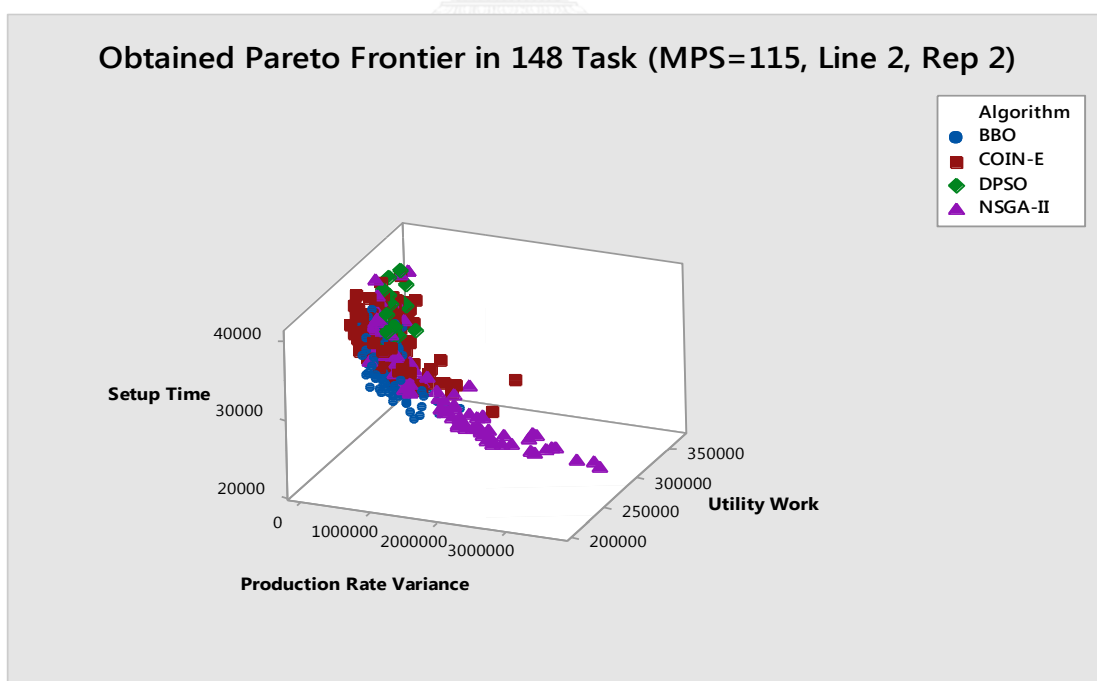
รูปที่ 7.31 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.33 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0588	0.6015	0.8900	0.6054	234	473.577
NSGA-II	0.0551	0.5970	0.8763	0.2891	97	446.20
BBO	0.0887	0.5837	0.3100	0.1054	100	547.89
DPSO	0.2110	0.6853	0.0000	0.0000	15	274009.501

7.11.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตของแต่ละอัลกอริทึมหามาได้จากการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน มีจำนวนชนิดผลิตภัณฑ์เท่ากับ 4 ผลิตภัณฑ์ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์เท่ากับ 25:35:40:15 บนสายการประกอบที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วแบบที่ 2 เมื่อนำมาแสดงผลในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 7.32 จากนั้นจึงทำการรวมคำตอบเข้าไว้ด้วยกันแล้วจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยจะพิจารณาค่าความแข็งแรง (Fitness) ที่มีค่าเท่ากับ 1 และทำการกำหนดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงและทำการประเมินอัลกอริทึมด้วยตัวชี้วัดที่กำหนดไว้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมดังตารางที่ 7.34



รูปที่ 7. 32 กราฟเปรียบเทียบคำตอบของอัลกอริทึมต่างๆ ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

ตารางที่ 7.34 การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วน
ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2 ซ้ำที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0679	0.6391	0.7572	0.6113	243	447.209
NSGA-II	0.0581	0.6441	0.6064	0.1894	94	529.854
BBO	0.0739	0.5348	0.6000	0.1993	100	534.182
DPSO	0.2106	0.4008	0.0000	0.0000	17	223746.739

7.12 ผลการทดลองเฉลี่ยของการแก้ปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน

7.12.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.35 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วน
ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9291	0.6957	1.0000	69.0000	32.4345
NSGA-II	0.0191	0.7800	0.5110	0.4271	40.5000	40.5065
BBO	0.1277	0.6049	0.2723	0.0938	16.5000	50.4735
DPSO	0.1777	0.6733	0.0000	0.0000	20.0000	214339.6720

จากตารางที่ 7.35 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิง
พาเรโต อัตราส่วนของจำนวนค่าตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนค่าตอบที่อัลกอริทึมหาได้
อัตราส่วนของจำนวนค่าตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนค่าตอบที่แท้จริง จำนวนค่าตอบที่
เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วน
ในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มค่าตอบ BBO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.12.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.36 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วน
ผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8466	0.6688	1.0000	67.0000	24.3200
NSGA-II	0.0261	0.7009	0.5415	0.4979	40.5000	30.7625

ตารางที่ 7.36 (ต่อ) การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
BBO	0.1644	0.6928	0.4246	0.0986	14.5000	53.0330
DPSO	0.1652	0.6276	0.0000	0.0000	19.0000	192716.5750

จากตารางที่ 7.36 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.12.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.37 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0768	0.6190	0.7708	0.5430	174.0000	211.9910
NSGA-II	0.0516	0.6568	0.7274	0.2945	97.0000	203.9545
BBO	0.0835	0.5850	0.4334	0.1646	91.0000	243.0750
DPSO	0.2090	0.5623	0.0000	0.0000	24.5000	321287.8460

จากตารางที่ 7.37 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.12.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.38 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0933	0.6363	0.7311	0.4380	111.0000	143.1825
NSGA-II	0.1307	0.7116	0.7912	0.2788	62.0000	239.3780
BBO	0.1008	0.5855	0.6875	0.3120	81.0000	206.4120
DPSO	0.2583	0.5855	0.0000	0.0000	19.0000	162075.3105

จากตารางที่ 7.38 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO และ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.13 ผลการทดลองเฉลี่ยของการแก้ปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน

7.13.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.39 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	1.0133	0.8190	1.0000	105.0000	53.9485
NSGA-II	0.0371	0.8040	0.4828	0.3198	57.0000	54.0225
BBO	0.1516	0.6797	0.1390	0.0524	31.5000	71.1320
DPSO	0.1306	0.5783	0.0500	0.0117	23.0000	135336.3445

จากตารางที่ 7.39 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.13.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.40 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8497	0.7299	1.0000	88.5000	29.4840
NSGA-II	0.0338	0.7420	0.6087	0.4416	24.0000	45.1300
BBO	0.4447	0.5964	0.4167	0.0158	24.5000	62.8400
DPSO	0.1509	0.5811	0.0173	0.0078	26.0000	143932.1880

จากตารางที่ 7.40 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริงจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.13.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.41 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0745	0.6588	0.7859	0.5380	73.0000	290.7515
NSGA-II	0.0700	0.7758	0.4723	0.2617	60.0000	302.5775
BBO	0.0745	0.6134	0.3912	0.2052	54.5000	417.5270
DPSO	0.2011	0.5242	0.0000	0.0000	13.0000	276337.0595

จากตารางที่ 7.41 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.13.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.42 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0978	0.6297	0.6870	0.5095	178.0000	262.8500
NSGA-II	0.0559	0.6707	0.3282	0.7942	94.5000	309.8800
BBO	0.1210	0.5806	0.4243	0.1623	99.0000	316.4230
DPSO	0.2521	0.6327	0.0000	0.0000	26.5000	146078.0300

จากตารางที่ 7.42 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวอย่างด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ BBO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.14 ผลการทดลองเฉลี่ยของการแก้ปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน

7.14.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.43 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9192	0.6543	1.0000	81.0000	64.4340
NSGA-II	0.0507	0.7435	0.5088	0.3679	38.5000	100.4300
BBO	0.2200	0.6312	0.0648	0.0189	16.0000	170.0600
DPSO	0.1633	0.5192	0.0000	0.0000	21.5000	69213.3930

จากตารางที่ 7.43 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวอย่างด้านการรู้เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.14.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.44 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8813	0.7471	1.0000	87.0000	65.6055
NSGA-II	0.0485	0.6675	0.6147	0.3923	41.5000	116.9260
BBO	0.1297	0.6353	0.1795	0.2183	15.5000	201.3345
DPSO	0.1793	0.6103	0.0250	0.0077	19.0000	109534.7390

จากตารางที่ 7.44 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวของตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.14.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.45 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.1708	0.9260	0.8049	0.5058	35.5000	775.1165
NSGA-II	0.2077	0.9822	0.9308	0.3785	23.0000	787.7415
BBO	0.1737	0.7435	0.1527	0.1157	42.5000	968.2640
DPSO	0.3621	0.6129	0.0000	0.0000	8.0000	229944.1625

จากตารางที่ 7.45 จะเห็นได้ว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตและด้าน อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบและจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต BBO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.14.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.46 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.1270	0.8029	0.3713	0.2351	40.5000	786.9285
NSGA-II	0.0613	1.0290	0.7143	0.4497	42.0000	697.7865
BBO	0.1057	0.7669	0.4840	0.3300	46.0000	843.0445
DPSO	0.2242	0.4821	0.0000	0.0000	8.5000	220155.0680

จากตารางที่ 7.46 จะเห็นได้ว่าตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ BBO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.15 ผลการทดลองเฉลี่ยของการแก้ปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน

7.15.1 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.47 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.9423	0.7308	1.0000	156.0000	96.8580
NSGA-II	0.0346	0.7447	0.4585	0.2676	66.5000	111.3585
BBO	0.1821	0.6855	0.2135	0.0351	18.5000	119.6120
DPSO	0.1313	0.6677	0.0530	0.0132	28.0000	114089.9210

จากตารางที่ 7.47 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพารेटอ และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.15.2 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.48 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 10 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0000	0.8424	0.6933	1.0000	150.0000	65.5630
NSGA-II	0.0366	0.6344	0.4486	0.2885	67.0000	105.7355
BBO	0.1430	0.6747	0.2040	0.0481	23.5000	84.7515
DPSO	0.1379	0.5780	0.0209	0.0048	28.0000	141350.3310

จากตารางที่ 7.48 จะเห็นได้ว่าทั้งในตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนในด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.15.3 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

ตารางที่ 7.49 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 1

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0496	0.6443	0.8161	0.6120	229.5000	467.0605
NSGA-II	0.0505	0.5929	0.7769	0.2612	95.0000	486.6965
BBO	0.0841	0.5880	0.3570	0.1268	99.5000	640.4355
DPSO	0.2118	0.5502	0.0000	0.0000	17.5000	264000.4950

จากตารางที่ 7.49 จะเห็นได้ว่าตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง ด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบและ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.15.4 เมื่อสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

ตารางที่ 7.50 การเปรียบเทียบสมรรถนะเฉลี่ยของอัลกอริทึม ของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) มีค่าเท่ากับ 115 บนสายการประกอบแบบที่ 2

Algorithm	Convergence	Spread	RNDS-I	RNDS-II	NNDS	CPU Time
COIN-E	0.0669	0.6292	0.8017	0.6102	232.0000	476.5665
NSGA-II	0.0562	0.6479	0.6490	0.2006	94.0000	544.6955
BBO	0.0888	0.5771	0.5750	0.1893	100.0000	594.5590
DPSO	0.2382	0.4825	0.0000	0.0000	19.5000	239111.3540

จากตารางที่ 7.50 จะเห็นได้ว่าตัวชี้วัดด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต NSGA-II จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านของการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ DPSO จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้านอัตราส่วนของจำนวนกลุ่มคำตอบที่หาได้เทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ ด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตและเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

7.16 สรุปท้ายบท

จากผลการทดลองโดยเฉลี่ยดังตารางที่ 7.51 แสดงให้เห็นว่า ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-optimal Set) ในปัญหาที่มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก (MPS=10) ในทุกขนาดชิ้นงาน COIN-E จะมีค่าการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเท่ากับ 0 เมื่อปัญหาสัดส่วนผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ขึ้น (MPS=115) COIN-E และ NSGA-II จะมีค่าการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณารวมทุกขนาดปัญหา พบว่า COIN-E และ NSGA-II จะมีค่าการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 68.75 และ 31.25 ของปัญหาทั้งหมดตามลำดับ

ในส่วน of ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบ (Spread) เมื่อพิจารณาในทุกขนาดปัญหาจะพบว่า DPSO และ BBO จะมีค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 87.5 และ 18.75 ของปัญหาทั้งหมดตามลำดับ

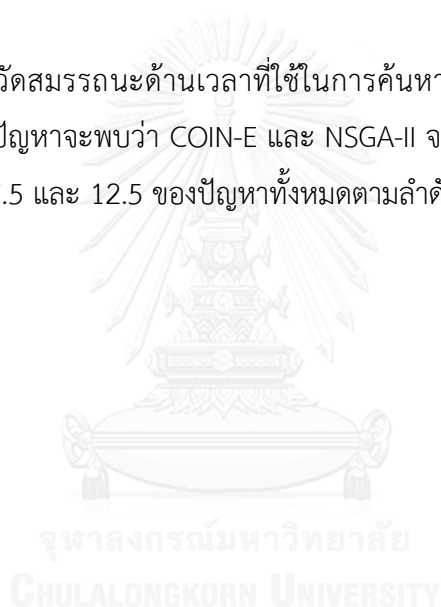
ในส่วน of ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) เมื่อพิจารณาในทุกขนาดปัญหาจะพบว่า COIN-E และ NSGA-II จะมีค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ

เทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 75 และ 25 ของปัญหาทั้งหมดตามลำดับ

ในส่วนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) เมื่อพิจารณาในทุกขนาดปัญหาจะพบว่า COIN-E และ NSGA-II จะมีค่าอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 93.75 และ 6.25 ตามลำดับ

ในส่วนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) เมื่อพิจารณาในทุกขนาดปัญหาจะพบว่า COIN-E และ BBO จะมีค่าจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 87.5 และ 12.5 ของปัญหาทั้งหมดตามลำดับ

ในส่วนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time) เมื่อพิจารณาในทุกขนาดปัญหาจะพบว่า COIN-E และ NSGA-II จะมีค่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 87.5 และ 12.5 ของปัญหาทั้งหมดตามลำดับ



ตารางที่ 7.51 ผลการทดลองโดยเฉลี่ยของทุกขนาดปัญหา

KPI	Algorithm	25 Task				35 Task				75 Task				148 Task			
		MPS = 10	MPS = 115	MPS = 115	MPS = 115	MPS = 10	MPS = 115	MPS = 115	MPS = 115	MPS = 10	MPS = 115	MPS = 115	MPS = 115	MPS = 10	MPS = 115		
Convergence	CONVE	0.000	0.000	0.0768	0.0933	0.0000	0.0000	0.0745	0.0978	0.0000	0.0000	0.1708	0.1270	0.0000	0.0000	0.0486	0.0669
	NSGA-II	0.0191	0.0261	0.0516	0.1307	0.0371	0.0338	0.0700	0.0359	0.0307	0.0485	0.2077	0.0613	0.0346	0.0366	0.0305	0.0662
	BBO	0.1277	0.1644	0.0835	0.1008	0.1516	0.4447	0.0745	0.1210	0.2200	0.1297	0.1737	0.1037	0.1821	0.1430	0.0341	0.0888
	DPBO	0.1777	0.1652	0.2030	0.2583	0.1306	0.1509	0.2011	0.2521	0.1633	0.1793	0.3621	0.2242	0.1313	0.1379	0.2118	0.2382
Spread	CONVE	0.9291	0.8466	0.6190	0.6393	1.0133	0.8497	0.6588	0.6297	0.9192	0.8813	0.9280	0.8029	0.9423	0.8424	0.6443	0.6292
	NSGA-II	0.7800	0.7009	0.5668	0.7116	0.8040	0.7420	0.7758	0.6707	0.7435	0.6675	0.9822	1.0290	0.7447	0.8344	0.9529	0.6479
	BBO	0.6049	0.6928	0.5850	0.5855	0.6797	0.5964	0.6134	0.5806	0.6312	0.6333	0.7435	0.7669	0.6855	0.6717	0.5880	0.5771
	DPBO	0.6733	0.6276	0.5623	0.5855	0.5783	0.5811	0.5542	0.6327	0.5192	0.6103	0.6129	0.4821	0.6877	0.5780	0.5502	0.4825
RNDSh	CONVE	0.6957	0.6688	0.7708	0.7311	0.8190	0.7299	0.7859	0.6870	0.6543	0.7471	0.8249	0.5713	0.7308	0.6933	0.8161	0.8017
	NSGA-II	0.3110	0.3415	0.7274	0.7912	0.4828	0.6087	0.4723	0.7342	0.5088	0.6147	0.9308	0.7143	0.4355	0.4466	0.7749	0.6490
	BBO	0.2723	0.4246	0.4334	0.6873	0.1390	0.4167	0.3812	0.4243	0.0648	0.1795	0.1527	0.4840	0.2135	0.2040	0.3570	0.3750
	DPBO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0500	0.0173	0.0000	0.0000	0.0000	0.0250	0.0000	0.0000	0.0530	0.0209	0.0000	0.0000
RNDSh	CONVE	1.0000	1.0000	0.5430	0.4380	1.0000	1.0000	0.5380	0.5095	1.0000	1.0000	0.5058	0.2351	1.0000	1.0000	0.6120	0.6102
	NSGA-II	0.4271	0.4979	0.2945	0.2788	0.3198	0.4416	0.2617	0.3382	0.3679	0.3923	0.3785	0.4497	0.2676	0.2885	0.2812	0.2006
	BBO	0.0938	0.0956	0.1646	0.3120	0.0524	0.0158	0.2052	0.1623	0.0189	0.2183	0.1157	0.3300	0.0351	0.0461	0.1268	0.1893
	DPBO	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0117	0.0078	0.0000	0.0000	0.0000	0.0077	0.0000	0.0000	0.0132	0.0048	0.0000	0.0000
NDS	CONVE	69.0000	67.0000	174.0000	111.0000	103.0000	88.5000	73.0000	178.0000	81.0000	87.0000	55.5000	40.5000	158.0000	150.0000	229.5000	232.0000
	NSGA-II	40.5000	40.5000	97.0000	62.0000	57.0000	24.0000	60.0000	94.5000	38.5000	41.5000	23.0000	42.0000	66.5000	67.0000	95.0000	94.0000
	BBO	16.5000	14.5000	91.0000	81.0000	31.5000	26.5000	54.5000	99.0000	16.0000	15.5000	42.5000	46.0000	18.5000	23.5000	99.5000	100.0000
	DPBO	20.0000	19.0000	24.5000	19.0000	23.0000	26.0000	13.0000	26.5000	21.5000	19.0000	8.0000	8.5000	28.0000	28.0000	17.5000	19.5000
CPU Time(s)	CONVE	32.4345	24.3200	211.9910	143.1825	53.9485	23.4840	290.2515	262.5900	64.4340	65.6055	775.1165	786.9255	968.8580	65.6530	467.6055	475.5655
	NSGA-II	40.5965	30.7625	203.9545	239.5780	54.0225	43.1300	302.2775	309.8800	100.4300	116.9260	787.7415	697.7865	111.3585	103.7355	468.6965	544.6955
	BBO	50.4735	33.0330	243.0750	208.4120	71.1320	62.8400	417.2270	316.4230	170.0600	201.3345	968.2840	843.0445	119.6120	84.7515	640.4355	594.5390
	DPBO	214339.6720	192716.5730	321287.8460	162075.3105	135336.5445	143934.1880	276337.0295	146078.0300	69212.3830	108534.7390	223944.1635	220135.0680	114089.9210	141330.3310	264000.4930	239111.5540

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุปงานวิจัย

ปัจจุบันมีการแข่งขันด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ที่สูง เนื่องจากความต้องการของผู้บริโภคที่มีความหลากหลายและมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วต่อตัวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดียว ไม่สามารถตอบสนองได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้มีการพัฒนาจนเกิดสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมขึ้นมา ซึ่งสายการประกอบลักษณะนี้เป็นสายการประกอบที่มีการจัดลำดับการผลิตผลิตภัณฑ์ในแต่ละรุ่นที่แตกต่างกัน ทั้งนี้พบว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งหากจะทำให้สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมมีข้อดีมากขึ้นไปอีก ด้วยการนำเอาแนวคิดของสายการประกอบแบบหลายคนมาใช้ร่วมกัน หรือเรียกว่าเป็น “สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน” (Mixed-Model Multi-Manned Assembly Lines) จากการนำสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนมาประยุกต์ใช้ จะพบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นคือ การจัดลำดับการผลิตเพื่อให้มีประสิทธิภาพตามที่โรงงานต้องการ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ใช้กันทั่วไปนั้นมีหลายอย่าง เช่น ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในกระบวนการผลิตน้อยที่สุด อัตราการผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ต้นทุน/เวลาที่ใช้ในการปรับเครื่องจักรน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของปริมาณงาน และความเสี่ยงในการหยุดสายการประกอบน้อยที่สุด ฯลฯ งานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอข้อเสนอแนะทางการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพื่อให้ตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 3 วัตถุประสงค์ และมีระดับความสำคัญเท่ากันในแต่ละวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย

วัตถุประสงค์ที่ 1 ความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Production Rates Variance) ซึ่งเป็นผลรวมของการคำนวณความผันแปรของการผลิตในทุกชิ้นงานในสายการประกอบ ซึ่งมีลำดับผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันในแต่ละชิ้นงาน ยิ่งความผันแปรของการผลิตมีค่าน้อย จะส่งผลให้สายการประกอบนั้นยังมีประสิทธิภาพที่มากขึ้น เนื่องจากสามารถลดอัตราการเปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ ลดความสับสนในการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของคนงาน ซึ่งเกิดจากผลกระทบจากการเรียนรู้

วัตถุประสงค์ที่ 2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work) ซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณงานของทุกผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสร็จในรอบเวลาการทำงานในแต่ละชิ้นงานบน

สายการประกอบ ยิ่งปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตมีค่าน้อย จะทำให้ประหยัดเวลาที่ใช้ลดต้นทุนในด้าน Utility Worker สายการประกอบจะมีความไหลลื่นและมีประสิทธิภาพที่มากขึ้น

วัตถุประสงค์ที่ 3 เวลาของการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด (Minimizing Setup Time) ซึ่งเป็นผลรวมของเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรเมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต ของทุกชิ้นงานในสายการประกอบ โดยเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของแต่ละรุ่นผลิตภัณฑ์จะคำนวณมาจากวิธีการสุ่ม โดยการกำหนดช่วงของเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.05 – 0.1 ของเวลาเฉลี่ยของรุ่นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดในชิ้นงานนั้นๆ

ลักษณะของปัญหาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม 4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการจัดสมดุลการผลิตแล้วและสามารถลำดับการเข้าสู่สายการประกอบได้อย่างอิสระ จำนวนสถานีงานสูงสุดในแต่ละสถานีงานรวม (Mated-Station) ไม่เกิน 4 สถานีงาน ซึ่งมีขนาดชิ้นงานเท่ากับ 25, 35, 75 และ 148 ชิ้นงานตามลำดับ และเป็นสายการประกอบที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบสายการประกอบ มีสัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS) 2 ขนาด ได้แก่ 10 (1:2:3:4) และ 115 (25:35:40:15) และทำซ้ำปัญหาละ 2 รอบการทำงาน

การที่จะพิจารณาวัตถุประสงค์หลายๆ วัตถุประสงค์พร้อมกันนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนงานเป็นปัญหาการหาคำตอบจากการวัดแบบเอ็นพีฮาร์ด (NP-hard) โดยการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) เข้ามาช่วยแก้ปัญหาประเภทนี้เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น และให้คำตอบที่ค่อนข้างดีเป็นที่ยอมรับได้ และบ่อยครั้งที่ให้คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนั้นยังใช้เวลาในการหาคำตอบไม่นานอีกด้วย งานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอถึงเสนอแนวทางการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพื่อให้ตอบสนองวัตถุประสงค์หลายๆ วัตถุประสงค์พร้อมกันของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนโดยใช้อัลกอริทึมต่างๆ ประกอบด้วย การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย (COIN-E) การประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (NSGA-II) การหาค่าเหมาะสมแบบการกระจายของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (BBO) และการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (DPSO)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหาประกอบไปด้วยตัวชี้วัด 6 ตัวได้แก่ การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence to the Pareto-optimal Set) การวัดสมรรถนะของคำตอบด้านการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ (Spread Measurement) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบ

กับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-I) อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-dominated Solution: RNDS-II) จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Number of Non-dominated Solution: NNDS) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Computational Time)

ผลการทดลองการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตเพื่อให้ตอบสนองวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกันของสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคนพบว่า ในปัญหาสัดส่วนผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก COIN-E จะมีค่าการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตเท่ากับ 0 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดในทุกปัญหา แต่เมื่อปัญหาสัดส่วนผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ขึ้น COIN-E และ NSGA-II จะมีค่าการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่ใกล้เคียงกันด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ COIN-E เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ อย่างชัดเจนในทุกขนาดของปัญหา ส่วนในด้านของการวัดการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ DPSO เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ อย่างชัดเจน

จากผลการทดลองข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่า COIN-E เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายคน ในขอบเขตของปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. การกำหนดค่าเวลาการทำงานในแต่ละชิ้นงาน เวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร อาจปรับเปลี่ยนจากการกำหนดแบบค่าคงที่ ให้เป็นการกำหนดแบบอื่นๆ ที่มีความใกล้เคียงกับปัญหาจริงในอุตสาหกรรมการผลิต
2. การปรับปรุงและพัฒนาสมรรถนะด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีการบรรจบแบบขยาย
3. ปัญหาเรื่องการจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์ควรพิจารณาเลือกวัตถุประสงค์ให้มีความเหมาะสมกับปัญหาจริงในอุตสาหกรรมการผลิตที่จะใช้ในการแก้ปัญหา

4. การเพิ่มจำนวนสถานีสานสูงสุดในแต่ละสถานีสานร่วมขเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับปัญหาจริงในอุตสาหกรรมการผลิต
5. ทุกๆ เซตปัญหาและทุกๆอัลกอริทึมควรมีการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละเซตปัญหา เพื่อจะทำให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพ เพราะจะมีผลต่อการหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม





รายการอ้างอิง

Akgunduz, O. S. and S. Tunali (2011). "A review of the current applications of genetic algorithms in mixed-model assembly line sequencing." International Journal of Production Research **49**(15): 4483-4503.

Bard, J. F., A. Shtub and S. B. Joshi (1994). "Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length." International Journal of Production Research **32**(10): 2431-2454.

Bartholdi, J. J. (1993). "Balancing two-sided assembly lines: a case study." International Journal of Production Research **31**(10): 2447-2461.

Boysen, N., M. Fliedner and A. Scholl (2007). "A classification of assembly line balancing problems." European Journal of Operational Research **183**(2): 674-693.

Bukchin, J., E. Darel and J. Rubinovitz (1997). "Team-oriented assembly system design: A new approach." International Journal of Production Economics **51**(1-2): 47-57.

Burbidge, J. L. (1991). "Production flow analysis for planning group technology." Journal of Operations Management **10**(1): 5-27.

Capacho Betancourt, L., R. Pastor, C. Universitat Politècnica de and I. Institut d'Organització i Control de Sistemes (2007). ASALBP : the alternative subgraphs assembly line balancing problem : formalization and resolution procedures.

Cevikcan, E., M. B. Durmusoglu and M. E. Unal (2009). "A team-oriented design methodology for mixed model assembly systems." Computers & Industrial Engineering **56**(2): 576-599.

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

Chutima, P. and P. Olanviwatchai (2010). "Mixed-Model U-Shaped Assembly Line Balancing Problems with Coincidence Memetic Algorithm." JSEA **3**(4): 347-363.

Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on **6**(2): 182-197.

Dimitriadis, S. G. (2006). "Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation." Computers & Operations Research **33**(9): 2757-2774.

Duclos, L. K., S. M. Sih and R. R. Lummus (1995). "JIT in services: a review of current practices and future directions for research." International Journal of Service Industry Management **6**(5): 36-52.

Fattahi, P., A. Roshani and A. Roshani (2011). "A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **53**(1-4): 363-378.

Gustavsson, S.-O. (1995). Flexibility and productivity in complex production processes. Manufacturing Research and Technology. A. Raouf and M. Ben-Daya, Elsevier. **Volume 23**: 85-93.

Kennedy, J. and R. Eberhart (1995). Particle swarm optimization. Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on.

Kim, Y. K., Y. Kim and Y. J. Kim (2000). "Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach." Production Planning & Control **11**(1): 44-53.

Konak, A., D. W. Coit and A. E. Smith (2006). "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial." Reliability Engineering & System Safety **91**(9): 992-1007.

Liao, C.-J., T. Chao-Tang and P. Luarn (2007). "A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems." Computers & Operations Research **34**(10): 3099-3111.

Lin, L. and M. Gen (2009). Multiobjective Genetic Algorithm for Bicriteria Network Design Problems. Intelligent and Evolutionary Systems. M. Gen, D. Green, O. Katai et al., Springer Berlin Heidelberg. **187**: 141-161.

Mansouri, S. A. (2005). "A Multi-Objective Genetic Algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines." European Journal of Operational Research **167**(3): 696-716.

McMullen, P. and G. Frazier (2000). "A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line." IIE Transactions **32**(8): 679-686.

McMullen, P. R. (2001). "An efficient frontier approach to addressing JIT sequencing problems with setups via search heuristics." Computers & Industrial Engineering **41**(3): 335-353.

McMullen, P. R. and G. V. Frazier (1998). "Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations." International Journal of Production Research **36**(10): 2717-2741.

Miltenburg, G. J. and J. Wijngaard (1994). "The U-Line Line Balancing Problem." Management Science **40**(10): 1378-1388.

Özcan, U. and B. Toklu (2009). "Balancing of mixed-model two-sided assembly lines." Computers & Industrial Engineering **57**(1): 217-227.

Simon, D. (2008). "Biogeography-Based Optimization." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on **12**(6): 702-713.

Süer, G. and C. Dagli (1994). A knowledge-based system for selection of resource allocation rules and algorithms. Handbook of Expert Systems Applications in Manufacturing Structures and rules. A. Mital and S. Anand, Springer Netherlands: 108-129.

Tiacci, L. (2015). "Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times." International Journal of Production Economics **159**: 319-333.

Tsai, L.-H. (1995). "Mixed-Model Sequencing to Minimize Utility Work and the Risk of Conveyor Stoppage." Management Science **41**(3): 485-495.

ชุติมา, ป. (2008). การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม.

นพพล, ค. (2008). การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบลักษณะตัวอยู่ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี, วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.)--จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

วันวิสา, น. (2012). การจัดลำดับการผลิตที่มีหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบ
ผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ภายใต้ผลกระทบจากการเรียนรู้, วิทยานิพนธ์ (วศ.ม.)--จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2555.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

1. ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัย

ที่มาของปัญหา	รอบเวลาการผลิต	จำนวนชิ้นงาน	จำนวนชนิดผลิตภัณฑ์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์	ความยาวสตริง	รูปแบบสายการประกอบ
Roszing	15	25	4	1:2:3:4	10	1
						2
				25:35:40:15	115	1
						2
Gunther	50	35	4	1:2:3:4	10	1
						2
				25:35:40:15	115	1
						2
Weemag	30	75	4	1:2:3:4	10	1
						2
				25:35:40:15	115	1
						2
Barthold	500	148	4	1:2:3:4	10	1
						2
				25:35:40:15	115	1
						2

2. เวลาดำเนินงานชิ้นงานของปัญหาในงานวิจัย

2.1 เวลาดำเนินงานชิ้นงานของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน

ตารางที่ ก. 2 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	B	4.0000	4.0000	3.0000	6.0000	4.5000
2	L	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
3	E	9.0000	9.0000	9.0000	9.0000	9.0000
4	B	6.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.2000
5	E	7.0000	11.0000	12.0000	9.0000	10.1000
6	E	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
7	R	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.9000
8	F	7.0000	7.0000	6.0000	9.0000	7.5000
9	F	5.0000	5.0000	4.0000	7.0000	5.5000
10	R	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
11	R	2.0000	4.0000	4.0000	4.0000	3.8000
12	L	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
13	E	7.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.4000
14	E	3.0000	3.0000	2.0000	5.0000	3.5000
15	L	6.0000	4.0000	5.0000	2.0000	3.7000
16	E	3.0000	3.0000	4.0000	1.0000	2.5000
17	E	11.0000	15.0000	16.0000	13.0000	14.1000
18	F	6.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.2000
19	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
20	B	2.0000	4.0000	5.0000	2.0000	3.3000
21	F	5.0000	9.0000	9.0000	9.0000	8.6000
22	E	6.0000	4.0000	3.0000	6.0000	4.7000
23	B	4.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.2000
24	E	12.0000	4.0000	2.0000	8.0000	5.8000
25	L	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000

ตารางที่ ก. 3 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	B	4.0000	4.0000	3.0000	6.0000	3.9130
2	L	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
3	E	9.0000	9.0000	9.0000	9.0000	9.0000
4	B	6.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.4348
5	E	7.0000	11.0000	12.0000	9.0000	10.2174
6	E	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
7	R	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.7826
8	F	7.0000	7.0000	6.0000	9.0000	6.9130
9	F	5.0000	5.0000	4.0000	7.0000	4.9130
10	R	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
11	R	2.0000	4.0000	4.0000	4.0000	3.5652
12	L	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
13	E	7.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.8696
14	E	3.0000	3.0000	2.0000	5.0000	2.9130
15	L	6.0000	4.0000	5.0000	2.0000	4.5217
16	E	3.0000	3.0000	4.0000	1.0000	3.0870
17	E	11.0000	15.0000	16.0000	13.0000	14.2174
18	F	6.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.4348
19	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
20	B	2.0000	4.0000	5.0000	2.0000	3.6522
21	F	5.0000	9.0000	9.0000	9.0000	8.1304
22	E	6.0000	4.0000	3.0000	6.0000	4.3478
23	B	4.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.4348
24	E	12.0000	4.0000	2.0000	8.0000	5.5652
25	L	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000

2.2 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 4 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	L	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000
2	E	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
3	E	5.0000	5.0000	6.0000	3.0000	4.5000
4	B	20.0000	24.0000	22.0000	28.0000	24.6000
5	F	10.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.8000
6	L	10.0000	18.0000	19.0000	16.0000	16.7000
7	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
8	F	9.0000	1.0000	0.0000	2.0000	2.7143
9	E	20.0000	24.0000	26.0000	20.0000	22.6000
10	F	35.0000	25.0000	20.0000	35.0000	28.5000
11	L	23.0000	23.0000	25.0000	19.0000	22.0000
12	F	35.0000	25.0000	20.0000	35.0000	28.5000
13	E	20.0000	26.0000	25.0000	28.0000	25.9000
14	B	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000
15	L	18.0000	20.0000	20.0000	20.0000	19.8000
16	B	28.0000	30.0000	32.0000	26.0000	28.8000
17	R	0.0000	4.0000	5.0000	2.0000	3.4444
18	E	0.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
19	B	17.0000	21.0000	20.0000	23.0000	21.1000
20	E	17.0000	21.0000	20.0000	23.0000	21.1000
21	R	10.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.8000
22	R	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
23	E	20.0000	12.0000	10.0000	14.0000	13.0000
24	E	20.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.4000
25	E	10.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
26	E	4.0000	6.0000	7.0000	4.0000	5.3000
27	R	4.0000	6.0000	7.0000	4.0000	5.3000
28	F	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000
29	R	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000
30	L	3.0000	7.0000	8.0000	5.0000	6.1000
31	E	3.0000	7.0000	8.0000	5.0000	6.1000
32	B	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
33	B	38.0000	42.0000	45.0000	36.0000	40.1000
34	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
35	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000

ตารางที่ ก. 5 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	L	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000
2	E	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
3	E	5.0000	5.0000	6.0000	3.0000	5.0870
4	B	20.0000	24.0000	22.0000	28.0000	22.9565
5	F	10.0000	2.0000	2.0000	2.0000	3.7391
6	L	10.0000	18.0000	19.0000	16.0000	16.3478
7	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
8	F	9.0000	1.0000	0.0000	2.0000	3.8667
9	E	20.0000	24.0000	26.0000	20.0000	23.3043
10	F	35.0000	25.0000	20.0000	35.0000	26.7391
11	L	23.0000	23.0000	25.0000	19.0000	23.1739
12	F	35.0000	25.0000	20.0000	35.0000	26.7391

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
13	E	20.0000	26.0000	25.0000	28.0000	24.6087
14	B	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000
15	L	18.0000	20.0000	20.0000	20.0000	19.5652
16	B	28.0000	30.0000	32.0000	26.0000	29.7391
17	R	0.0000	4.0000	5.0000	2.0000	4.1111
18	E	0.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
19	B	17.0000	21.0000	20.0000	23.0000	20.0435
20	E	17.0000	21.0000	20.0000	23.0000	20.0435
21	R	10.0000	2.0000	2.0000	2.0000	3.7391
22	R	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
23	E	20.0000	12.0000	10.0000	14.0000	13.3043
24	E	20.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.8696
25	E	10.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000
26	E	4.0000	6.0000	7.0000	4.0000	5.6522
27	R	4.0000	6.0000	7.0000	4.0000	5.6522
28	F	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000
29	R	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000
30	L	3.0000	7.0000	8.0000	5.0000	6.2174
31	E	3.0000	7.0000	8.0000	5.0000	6.2174
32	B	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
33	B	38.0000	42.0000	45.0000	36.0000	41.3913
34	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
35	E	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000

2.3 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 6 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	E	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000
2	F	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000
3	R	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000
4	E	25.0000	27.0000	28.0000	25.0000	26.3000
5	E	26.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.6000
6	E	21.0000	23.0000	25.0000	19.0000	21.8000
7	F	2.0000	10.0000	11.0000	8.0000	8.7000
8	E	25.0000	19.0000	17.0000	23.0000	20.6000
9	R	25.0000	21.0000	20.0000	23.0000	21.9000
10	E	20.0000	22.0000	21.0000	24.0000	22.3000
11	E	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.1000
12	B	20.0000	10.0000	8.0000	14.0000	12.0000
13	R	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
14	F	25.0000	21.0000	19.0000	25.0000	22.4000
15	B	0.0000	8.0000	9.0000	6.0000	7.4444
16	R	29.0000	23.0000	20.0000	29.0000	25.1000
17	B	25.0000	17.0000	15.0000	21.0000	18.8000
18	R	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
19	L	26.0000	22.0000	21.0000	24.0000	22.9000
20	F	26.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.2000
21	R	26.0000	26.0000	27.0000	24.0000	25.5000
22	F	27.0000	25.0000	26.0000	23.0000	24.7000
23	L	22.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.6000
24	R	30.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.6000
25	E	15.0000	25.0000	27.0000	21.0000	23.0000

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
26	E	20.0000	26.0000	26.0000	26.0000	25.4000
27	B	22.0000	28.0000	29.0000	26.0000	26.9000
28	L	10.0000	16.0000	17.0000	14.0000	14.9000
29	L	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
30	B	11.0000	11.0000	10.0000	13.0000	11.5000
31	E	22.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.7000
32	R	22.0000	22.0000	20.0000	26.0000	23.0000
33	L	22.0000	20.0000	21.0000	18.0000	19.7000
34	B	18.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.2000
35	E	27.0000	23.0000	21.0000	27.0000	24.4000
36	B	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.9000
37	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
38	E	25.0000	23.0000	21.0000	27.0000	24.2000
39	E	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.1000
40	R	25.0000	16.0000	14.0000	20.0000	17.9000
41	B	0.0000	12.0000	14.0000	8.0000	10.8889
42	B	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000
43	F	26.0000	18.0000	16.0000	22.0000	19.8000
44	E	7.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.2000
45	L	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000
46	F	26.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.7000
47	E	12.0000	10.0000	11.0000	8.0000	9.7000
48	E	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.9000
49	E	20.0000	22.0000	23.0000	20.0000	21.3000
50	F	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000
51	L	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.9000

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
52	F	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.9000
53	L	20.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.4000
54	B	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.1000
55	E	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.1000
56	E	24.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.8000
57	F	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000
58	E	22.0000	20.0000	21.0000	18.0000	19.7000
59	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
60	L	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
61	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
62	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
63	E	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000
64	L	30.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.6000
65	F	21.0000	25.0000	26.0000	23.0000	24.1000
66	E	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000
67	E	25.0000	27.0000	28.0000	25.0000	26.3000
68	F	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000
69	E	20.0000	28.0000	29.0000	26.0000	26.7000
70	R	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.9000
71	E	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000
72	E	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
73	L	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
74	B	12.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.4000
75	R	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000

ตารางที่ ก. 7 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	E	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000
2	F	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000
3	R	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000
4	E	25.0000	27.0000	28.0000	25.0000	26.6522
5	E	26.0000	20.0000	20.0000	20.0000	21.3043
6	E	21.0000	23.0000	25.0000	19.0000	22.7391
7	F	2.0000	10.0000	11.0000	8.0000	8.3478
8	E	25.0000	19.0000	17.0000	23.0000	20.1304
9	R	25.0000	21.0000	20.0000	23.0000	21.7826
10	E	20.0000	22.0000	21.0000	24.0000	21.4783
11	E	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.2174
12	B	20.0000	10.0000	8.0000	14.0000	12.0000
13	R	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
14	F	25.0000	21.0000	19.0000	25.0000	21.6957
15	B	0.0000	8.0000	9.0000	6.0000	6.3478
16	R	29.0000	23.0000	20.0000	29.0000	24.0435
17	B	25.0000	17.0000	15.0000	21.0000	18.5652
18	R	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
19	L	26.0000	22.0000	21.0000	24.0000	22.7826
20	F	26.0000	24.0000	22.0000	28.0000	24.2609
21	R	26.0000	26.0000	27.0000	24.0000	26.0870
22	F	27.0000	25.0000	26.0000	23.0000	25.5217
23	L	22.0000	26.0000	28.0000	22.0000	25.3043
24	R	30.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.1304
25	E	15.0000	25.0000	27.0000	21.0000	23.0000

ตารางที่ ก.7 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
26	E	20.0000	26.0000	26.0000	26.0000	24.6957
27	B	22.0000	28.0000	29.0000	26.0000	26.7826
28	L	10.0000	16.0000	17.0000	14.0000	14.7826
29	L	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
30	B	11.0000	11.0000	10.0000	13.0000	10.9130
31	E	22.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.3478
32	R	22.0000	22.0000	20.0000	26.0000	21.8261
33	L	22.0000	20.0000	21.0000	18.0000	20.5217
34	B	18.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.4348
35	E	27.0000	23.0000	21.0000	27.0000	23.6957
36	B	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.7826
37	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
38	E	25.0000	23.0000	21.0000	27.0000	23.2609
39	E	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.2174
40	R	25.0000	16.0000	14.0000	20.0000	17.7826
41	B	0.0000	12.0000	14.0000	8.0000	9.5652
42	B	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000
43	F	26.0000	18.0000	16.0000	22.0000	19.5652
44	E	7.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.4348
45	L	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000
46	F	26.0000	24.0000	25.0000	22.0000	24.5217
47	E	12.0000	10.0000	11.0000	8.0000	10.5217
48	E	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.7826
49	E	20.0000	22.0000	23.0000	20.0000	21.6522
50	F	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000
51	L	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.7826

ตารางที่ ก.7 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
52	F	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.7826
53	L	20.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.8696
54	B	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.2174
55	E	20.0000	24.0000	25.0000	22.0000	23.2174
56	E	24.0000	26.0000	28.0000	22.0000	25.7391
57	F	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000	23.0000
58	E	22.0000	20.0000	21.0000	18.0000	20.5217
59	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
60	L	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
61	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
62	E	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
63	E	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000	21.0000
64	L	30.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.1304
65	F	21.0000	25.0000	26.0000	23.0000	24.2174
66	E	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000
67	E	25.0000	27.0000	28.0000	25.0000	26.6522
68	F	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000
69	E	20.0000	28.0000	29.0000	26.0000	26.3478
70	R	24.0000	20.0000	19.0000	22.0000	20.7826
71	E	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000
72	E	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000	4.0000
73	L	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.0000
74	B	12.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.8696
75	R	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000	25.0000

2.4 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 8 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	E	16.0000	16.0000	16.0000	16.0000	16.0000
2	B	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
3	R	5.0000	9.0000	10.0000	7.0000	8.1000
4	E	45.0000	49.0000	50.0000	47.0000	48.1000
5	E	25.0000	33.0000	35.0000	29.0000	31.2000
6	R	8.0000	8.0000	7.0000	10.0000	8.5000
7	L	38.0000	40.0000	40.0000	40.0000	39.8000
8	E	35.0000	39.0000	40.0000	37.0000	38.1000
9	F	30.0000	34.0000	33.0000	36.0000	34.1000
10	F	26.0000	32.0000	33.0000	30.0000	30.9000
11	B	15.0000	19.0000	20.0000	17.0000	18.1000
12	R	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000
13	E	34.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.4000
14	E	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000
15	L	50.0000	56.0000	58.0000	52.0000	54.4000
16	R	50.0000	56.0000	58.0000	52.0000	54.4000
17	E	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.9000
18	E	22.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.6000
19	R	22.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.6000
20	E	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
21	B	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
22	B	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.9000
23	E	15.0000	13.0000	11.0000	17.0000	14.2000
24	E	15.0000	11.0000	10.0000	13.0000	11.9000
25	L	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
26	F	30.0000	20.0000	20.0000	20.0000	21.0000
27	E	10.0000	12.0000	13.0000	10.0000	11.3000
28	E	24.0000	26.0000	28.0000	22.0000	24.8000
29	E	0.0000	22.0000	22.0000	22.0000	22.8000
30	F	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000
31	L	30.0000	20.0000	18.0000	24.0000	22.0000
32	B	20.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0000
33	E	14.0000	14.0000	12.0000	18.0000	15.0000
34	R	41.0000	41.0000	39.0000	45.0000	42.0000
35	E	42.0000	42.0000	44.0000	38.0000	41.0000
36	E	47.0000	47.0000	47.0000	47.0000	47.0000
37	L	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
38	E	80.0000	80.0000	80.0000	80.0000	80.0000
39	F	5.0000	9.0000	10.0000	7.0000	8.1000
40	L	40.0000	42.0000	44.0000	38.0000	40.8000
41	R	45.0000	49.0000	50.0000	47.0000	48.1000
42	L	10.0000	22.0000	23.0000	20.0000	20.3000
43	L	32.0000	32.0000	32.0000	32.0000	32.0000
44	L	60.0000	72.0000	70.0000	76.0000	71.8000
45	L	82.0000	78.0000	79.0000	76.0000	77.9000
46	E	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
47	B	40.0000	42.0000	42.0000	42.0000	41.8000
48	L	10.0000	16.0000	18.0000	12.0000	14.4000
49	R	50.0000	44.0000	46.0000	40.0000	43.6000
50	R	30.0000	36.0000	35.0000	38.0000	35.9000
51	R	36.0000	32.0000	30.0000	36.0000	33.4000
52	E	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
53	L	118.0000	118.0000	118.0000	118.0000	118.0000
54	F	20.0000	30.0000	32.0000	26.0000	28.0000
55	F	0.0000	14.0000	14.0000	14.0000	14.0000
56	F	26.0000	30.0000	30.0000	30.0000	29.6000
57	B	0.0000	24.0000	24.0000	24.0000	24.0000
58	E	52.0000	52.0000	50.0000	56.0000	53.0000
59	E	28.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.0000
60	B	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
61	E	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
62	L	16.0000	0.0000	0.0000	0.0000	16.0000
63	F	16.0000	16.0000	18.0000	12.0000	15.0000
64	B	30.0000	36.0000	38.0000	32.0000	34.4000
65	L	6.0000	10.0000	10.0000	10.0000	9.6000
66	F	20.0000	16.0000	20.0000	8.0000	14.4000
67	L	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
68	F	10.0000	18.0000	20.0000	14.0000	16.2000
69	E	30.0000	26.0000	24.0000	30.0000	27.4000
70	E	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000
71	E	116.0000	120.0000	120.0000	120.0000	119.6000
72	E	20.0000	30.0000	31.0000	28.0000	28.5000
73	F	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000
74	L	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000
75	R	96.0000	106.0000	110.0000	92.0000	100.6000
76	F	10.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000
77	F	32.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.8000
78	R	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.9000
79	B	281.0000	281.0000	281.0000	281.0000	281.0000

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
80	B	14.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.0000
81	E	22.0000	30.0000	32.0000	26.0000	28.2000
82	L	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
83	R	16.0000	26.0000	27.0000	24.0000	24.5000
84	E	30.0000	22.0000	20.0000	26.0000	23.8000
85	B	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
86	F	20.0000	22.0000	22.0000	22.0000	21.8000
87	E	42.0000	52.0000	50.0000	56.0000	52.0000
88	E	20.0000	26.0000	27.0000	24.0000	24.9000
89	B	10.0000	16.0000	18.0000	12.0000	14.4000
90	F	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000
91	E	99.0000	131.0000	135.0000	123.0000	125.8000
92	E	40.0000	30.0000	26.0000	38.0000	33.0000
93	E	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000
94	F	45.0000	47.0000	49.0000	43.0000	45.8000
95	F	10.0000	30.0000	31.0000	28.0000	27.5000
96	E	31.0000	31.0000	31.0000	31.0000	31.0000
97	R	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000
98	E	30.0000	38.0000	40.0000	34.0000	36.2000
99	R	45.0000	57.0000	60.0000	51.0000	54.3000
100	E	39.0000	39.0000	39.0000	39.0000	39.0000
101	E	40.0000	20.0000	18.0000	24.0000	23.0000
102	E	21.0000	31.0000	32.0000	29.0000	29.5000
103	B	13.0000	13.0000	13.0000	13.0000	13.0000
104	B	40.0000	50.0000	50.0000	50.0000	49.0000
105	E	60.0000	56.0000	60.0000	48.0000	54.4000
106	E	25.0000	0.0000	32.0000	29.0000	29.6250

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
107	F	8.0000	31.0000	8.0000	8.0000	8.0000
108	E	383.0000	8.0000	383.0000	383.0000	383.0000
109	E	45.0000	383.0000	30.0000	45.0000	38.5000
110	B	35.0000	35.0000	30.0000	39.0000	34.7000
111	B	20.0000	33.0000	30.0000	18.0000	23.4000
112	E	150.0000	26.0000	180.0000	162.0000	168.6000
113	E	11.0000	174.0000	11.0000	11.0000	11.0000
114	E	10.0000	11.0000	30.0000	24.0000	25.2000
115	E	10.0000	28.0000	20.0000	14.0000	16.2000
116	E	31.0000	18.0000	31.0000	31.0000	31.0000
117	L	30.0000	31.0000	34.0000	34.0000	33.6000
118	E	30.0000	34.0000	22.0000	22.0000	22.8000
119	B	65.0000	22.0000	40.0000	55.0000	49.5000
120	L	31.0000	45.0000	31.0000	31.0000	31.0000
121	E	30.0000	31.0000	34.0000	34.0000	33.6000
122	F	30.0000	34.0000	20.0000	26.0000	23.8000
123	E	19.0000	22.0000	19.0000	19.0000	19.0000
124	E	7.0000	19.0000	22.0000	19.0000	19.1000
125	R	19.0000	21.0000	19.0000	19.0000	19.0000
126	B	40.0000	19.0000	60.0000	48.0000	52.4000
127	R	60.0000	56.0000	50.0000	50.0000	51.0000
128	B	16.0000	50.0000	0.0000	0.0000	38.6667
129	L	11.0000	0.0000	11.0000	11.0000	11.0000
130	E	27.0000	11.0000	27.0000	27.0000	27.0000
131	R	16.0000	27.0000	21.0000	18.0000	19.1000
132	L	32.0000	20.0000	39.0000	42.0000	39.7000
133	F	25.0000	40.0000	20.0000	23.0000	21.9000

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 1:2:3:4

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
134	F	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
135	B	50.0000	42.0000	40.0000	46.0000	43.8000
136	R	64.0000	64.0000	64.0000	64.0000	64.0000
137	L	20.0000	24.0000	22.0000	28.0000	24.6000
138	E	10.0000	20.0000	20.0000	20.0000	19.0000
139	B	39.0000	29.0000	30.0000	27.0000	29.5000
140	R	24.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.4000
141	E	121.0000	181.0000	190.0000	163.0000	170.5000
142	E	150.0000	146.0000	150.0000	138.0000	144.4000
143	E	71.0000	57.0000	50.0000	71.0000	61.9000
144	E	170.0000	170.0000	170.0000	170.0000	170.0000
145	R	150.0000	124.0000	120.0000	132.0000	128.6000
146	E	60.0000	68.0000	70.0000	64.0000	66.2000
147	E	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000
148	R	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000

ตารางที่ ก. 9 เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์ 25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
1	E	16.0000	16.0000	16.0000	16.0000	16.0000
2	B	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.0000
3	R	5.0000	9.0000	10.0000	7.0000	8.2174
4	E	45.0000	49.0000	50.0000	47.0000	48.2174
5	E	25.0000	33.0000	35.0000	29.0000	31.4348
6	R	8.0000	8.0000	7.0000	10.0000	7.9130
7	L	38.0000	40.0000	40.0000	40.0000	39.5652
8	E	35.0000	39.0000	40.0000	37.0000	38.2174

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
9	F	30.0000	34.0000	33.0000	36.0000	33.0435
10	F	26.0000	32.0000	33.0000	30.0000	30.7826
11	B	15.0000	19.0000	20.0000	17.0000	18.2174
12	R	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000
13	E	34.0000	30.0000	30.0000	30.0000	30.8696
14	E	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000
15	L	50.0000	56.0000	58.0000	52.0000	54.8696
16	R	50.0000	56.0000	58.0000	52.0000	54.8696
17	E	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.7826
18	E	22.0000	26.0000	28.0000	22.0000	25.3043
19	R	22.0000	26.0000	28.0000	22.0000	25.3043
20	E	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000	8.0000
21	B	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
22	B	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.7826
23	E	15.0000	13.0000	11.0000	17.0000	13.2609
24	E	15.0000	11.0000	10.0000	13.0000	11.7826
25	L	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
26	F	30.0000	20.0000	20.0000	20.0000	22.1739
27	E	10.0000	12.0000	13.0000	10.0000	11.6522
28	E	24.0000	26.0000	28.0000	22.0000	25.7391
29	E	0.0000	22.0000	22.0000	22.0000	17.2174
30	F	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000	29.0000
31	L	30.0000	20.0000	18.0000	24.0000	22.0000
32	B	20.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.0000
33	E	14.0000	14.0000	12.0000	18.0000	13.8261
34	R	41.0000	41.0000	39.0000	45.0000	40.8261

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
35	E	42.0000	42.0000	44.0000	38.0000	42.1739
36	E	47.0000	47.0000	47.0000	47.0000	47.0000
37	L	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
38	E	80.0000	80.0000	80.0000	80.0000	80.0000
39	F	5.0000	9.0000	10.0000	7.0000	8.2174
40	L	40.0000	42.0000	44.0000	38.0000	41.7391
41	R	45.0000	49.0000	50.0000	47.0000	48.2174
42	L	10.0000	22.0000	23.0000	20.0000	19.4783
43	L	32.0000	32.0000	32.0000	32.0000	32.0000
44	L	60.0000	72.0000	70.0000	76.0000	69.2174
45	L	82.0000	78.0000	79.0000	76.0000	78.9565
46	E	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000
47	B	40.0000	42.0000	42.0000	42.0000	41.5652
48	L	10.0000	16.0000	18.0000	12.0000	14.8696
49	R	50.0000	44.0000	46.0000	40.0000	45.4783
50	R	30.0000	36.0000	35.0000	38.0000	34.6087
51	R	36.0000	32.0000	30.0000	36.0000	32.6957
52	E	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000
53	E	42.0000	42.0000	44.0000	38.0000	118.0000
54	E	47.0000	47.0000	47.0000	47.0000	28.0000
55	L	7.0000	7.0000	7.0000	7.0000	10.9565
56	E	80.0000	80.0000	80.0000	80.0000	29.1304
57	F	5.0000	9.0000	10.0000	7.0000	18.7826
58	L	40.0000	42.0000	44.0000	38.0000	51.8261
59	R	45.0000	49.0000	50.0000	47.0000	6.0870
60	L	10.0000	22.0000	23.0000	20.0000	3.0000

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
61	E	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000
62	L	16.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.4783
63	F	16.0000	16.0000	18.0000	12.0000	16.1739
64	B	30.0000	36.0000	38.0000	32.0000	34.8696
65	L	6.0000	10.0000	10.0000	10.0000	9.1304
66	F	20.0000	16.0000	20.0000	8.0000	17.2174
67	L	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
68	F	10.0000	18.0000	20.0000	14.0000	16.4348
69	E	30.0000	26.0000	24.0000	30.0000	26.6957
70	E	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000	11.0000
71	E	116.0000	120.0000	120.0000	120.0000	119.1304
72	E	20.0000	30.0000	31.0000	28.0000	27.9130
73	F	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000
74	L	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000	40.0000
75	R	96.0000	106.0000	110.0000	92.0000	103.3913
76	F	10.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000
77	F	32.0000	24.0000	22.0000	28.0000	25.5652
78	R	10.0000	6.0000	5.0000	8.0000	6.7826
79	B	281.0000	281.0000	281.0000	281.0000	281.0000
80	B	14.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.0000
81	E	22.0000	30.0000	32.0000	26.0000	28.4348
82	L	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
83	R	16.0000	26.0000	27.0000	24.0000	23.9130
84	E	30.0000	22.0000	20.0000	26.0000	23.5652
85	B	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
86	F	20.0000	22.0000	22.0000	22.0000	21.5652

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
87	E	42.0000	52.0000	50.0000	56.0000	49.6522
88	E	20.0000	26.0000	27.0000	24.0000	24.7826
89	B	10.0000	16.0000	18.0000	12.0000	14.8696
90	F	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000
91	E	99.0000	131.0000	135.0000	123.0000	124.3913
92	E	40.0000	30.0000	26.0000	38.0000	31.8261
93	E	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000	26.0000
94	F	45.0000	47.0000	49.0000	43.0000	46.7391
95	F	10.0000	30.0000	31.0000	28.0000	25.7391
96	E	31.0000	31.0000	31.0000	31.0000	31.0000
97	R	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000	19.0000
98	E	30.0000	38.0000	40.0000	34.0000	36.4348
99	R	45.0000	57.0000	60.0000	51.0000	54.6522
100	E	39.0000	39.0000	39.0000	39.0000	39.0000
101	E	40.0000	20.0000	18.0000	24.0000	24.1739
102	E	21.0000	31.0000	32.0000	29.0000	28.9130
103	B	13.0000	13.0000	13.0000	13.0000	13.0000
104	B	40.0000	50.0000	50.0000	50.0000	47.8261
105	E	60.0000	56.0000	60.0000	48.0000	57.2174
106	E	25.0000	0.0000	32.0000	29.0000	29.7826
107	F	8.0000	31.0000	8.0000	8.0000	8.0000
108	E	383.0000	8.0000	383.0000	383.0000	383.0000
109	E	45.0000	383.0000	30.0000	45.0000	36.7391
110	B	35.0000	35.0000	30.0000	39.0000	33.1739
111	B	20.0000	33.0000	30.0000	18.0000	25.0435
112	E	150.0000	26.0000	180.0000	162.0000	169.3043

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
113	E	11.0000	174.0000	11.0000	11.0000	11.0000
114	E	10.0000	11.0000	30.0000	24.0000	24.2609
115	E	10.0000	28.0000	20.0000	14.0000	16.4348
116	E	31.0000	18.0000	31.0000	31.0000	31.0000
117	L	30.0000	31.0000	34.0000	34.0000	33.1304
118	E	30.0000	34.0000	22.0000	22.0000	23.7391
119	B	65.0000	22.0000	40.0000	55.0000	48.9130
120	L	31.0000	45.0000	31.0000	31.0000	31.0000
121	E	30.0000	31.0000	34.0000	34.0000	33.1304
122	F	30.0000	34.0000	20.0000	26.0000	23.5652
123	E	19.0000	22.0000	19.0000	19.0000	19.0000
124	E	7.0000	19.0000	22.0000	19.0000	18.0435
125	R	19.0000	21.0000	19.0000	19.0000	19.0000
126	B	40.0000	19.0000	60.0000	48.0000	52.8696
127	R	60.0000	56.0000	50.0000	50.0000	52.1739
128	B	16.0000	50.0000	0.0000	0.0000	35.8333
129	L	11.0000	0.0000	11.0000	11.0000	11.0000
130	E	27.0000	11.0000	27.0000	27.0000	27.0000
131	R	16.0000	27.0000	21.0000	18.0000	19.2174
132	L	32.0000	20.0000	39.0000	42.0000	38.1739
133	F	25.0000	40.0000	20.0000	23.0000	21.7826
134	F	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
135	B	50.0000	42.0000	40.0000	46.0000	43.5652
136	R	64.0000	64.0000	64.0000	64.0000	64.0000
137	L	20.0000	24.0000	22.0000	28.0000	22.9565
138	E	10.0000	20.0000	20.0000	20.0000	17.8261

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) เวลาดำเนินงานชั้นงานของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน สัดส่วนผลิตภัณฑ์
25:35:40:15

Task	Side	Task Time				Mean
		Model A	Model B	Model C	Model D	
139	B	39.0000	29.0000	30.0000	27.0000	31.2609
140	R	24.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.8696
141	E	121.0000	181.0000	190.0000	163.0000	168.7391
142	E	150.0000	146.0000	150.0000	138.0000	147.2174
143	E	71.0000	57.0000	50.0000	71.0000	59.4348
144	E	170.0000	170.0000	170.0000	170.0000	170.0000
145	R	150.0000	124.0000	120.0000	132.0000	129.3043
146	E	60.0000	68.0000	70.0000	64.0000	66.4348
147	E	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000
148	R	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000	78.0000

3. เวลาการปรับตั้งเครื่องจักร

เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของแต่ละผลิตภัณฑ์จะคำนวณมาจากวิธีการสุ่ม โดยการกำหนดช่วงของเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.05 - 0.1 ของเวลาเฉลี่ยของชั้นงาน A, B, C และ D ตามลำดับ

3.1 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 10 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
1	0.2814	0.2706	0.2187	0.3399
2	0.2690	0.2325	0.2911	0.2637
3	0.6867	0.8174	0.4816	0.6460
4	0.4223	0.3389	0.4037	0.4426
5	0.5675	0.9154	0.9342	0.9638

ตารางที่ ก.10 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 25 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
6	0.3129	0.2577	0.3578	0.2693
7	0.7211	0.6862	0.6428	0.4287
8	0.4655	0.4833	0.6148	0.4112
9	0.3874	0.5155	0.2951	0.4401
10	0.0938	0.0889	0.0987	0.0550
11	0.1972	0.3432	0.2560	0.2045
12	0.0874	0.0909	0.0786	0.0651
13	0.2427	0.3786	0.2100	0.2478
14	0.3145	0.2673	0.2158	0.2862
15	0.3487	0.2702	0.4247	0.3921
16	0.2115	0.2012	0.2708	0.2425
17	1.0042	1.1025	0.9953	1.2141
18	0.3330	0.3246	0.3949	0.2842
19	0.1598	0.1219	0.1653	0.1721
20	0.2508	0.1719	0.2133	0.1801
21	0.4359	0.5626	0.7055	0.6048
22	0.4179	0.2742	0.3035	0.2439
23	0.1533	0.2493	0.2381	0.1846
24	0.6364	0.4646	0.4818	0.6014
25	0.3975	0.3698	0.3135	0.2713

3.2 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน

ตารางที่ ก. 11 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 35 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
1	2.4079	2.7706	2.3339	1.8432
2	0.2884	0.2303	0.2115	0.2521
3	0.4274	0.3081	0.3192	0.2441
4	1.8944	1.6276	1.5286	2.0086
5	0.2916	0.2847	0.2819	0.2372
6	1.0626	1.2220	1.2955	1.1895
7	0.1184	0.1167	0.1376	0.1866
8	0.1645	0.2149	0.2058	0.2341
9	2.1770	2.2485	1.6607	2.1087
10	2.0648	1.6766	1.6652	1.6850
11	1.9358	2.0936	1.1511	1.8991
12	2.3998	1.6297	2.1254	1.7083
13	1.8318	2.1897	1.3759	2.3202
14	0.0929	0.0791	0.0966	0.0667
15	1.3922	1.4898	1.1586	1.0866
16	1.6926	1.7697	1.4910	2.8021
17	0.1869	0.1452	0.1532	0.1813
18	0.2928	0.2852	0.2642	0.2120
19	2.0131	1.0477	1.0375	1.2672
20	1.1738	1.9937	1.1311	1.8549
21	0.3384	0.2345	0.3696	0.2232
22	0.7640	0.8311	0.5706	0.5850
23	1.0402	1.2793	1.0476	1.1121
24	1.9215	2.0953	1.9850	1.2586
25	0.2276	0.1366	0.1719	0.1867

ตารางที่ ก.11 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
26	0.2971	0.4577	0.5219	0.3123
27	0.2661	0.3414	0.5203	0.3462
28	3.5656	3.4899	2.3840	2.0035
29	0.0521	0.0666	0.0594	0.0617
30	0.4836	0.3015	0.3100	0.5507
31	0.3108	0.5425	0.5351	0.4655
32	0.0704	0.0685	0.0837	0.0994
33	2.0264	2.3005	2.5675	3.6815
34	0.1946	0.1233	0.1682	0.1770
35	0.1027	0.1539	0.1204	0.1577

3.3 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 12 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
1	1.8178	1.6955	1.9319	1.1895
2	1.7381	2.2745	1.7809	1.6058
3	2.1381	1.9940	1.4554	1.6428
4	2.4439	2.1218	2.4613	2.3708
5	1.2626	1.2787	1.6339	1.1569
6	2.0325	1.3916	1.9402	1.1587
7	0.4960	0.6314	0.4024	0.6436
8	2.0581	1.1145	1.1851	1.7454
9	2.1217	2.1575	1.4801	1.1580
10	1.0879	1.6864	2.1289	1.2199
11	1.8689	2.0023	2.2462	1.9527
12	0.8960	0.6879	0.7433	0.6812

ตารางที่ ก.12 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
13	0.2921	0.4399	0.4772	0.4648
14	2.2272	1.8031	2.2119	1.3364
15	0.4143	0.4838	0.5101	0.5281
16	1.6756	2.0477	1.3414	2.1414
17	1.8767	1.6727	1.8382	1.7405
18	0.3755	0.3099	0.4913	0.2723
19	1.8560	1.7529	1.4107	1.7368
20	1.7768	1.2502	2.4785	1.5118
21	2.0520	2.3525	1.6727	1.6234
22	2.1774	2.1295	1.7660	2.2005
23	1.9619	1.9015	1.7680	2.2390
24	2.4807	1.4799	2.2494	1.8388
25	1.6014	1.4977	1.3163	1.9546
26	2.2000	1.4484	1.9000	2.1206
27	1.3257	1.3239	2.3971	2.0352
28	0.7538	1.2000	1.1973	1.2223
29	0.1755	0.2211	0.2836	0.2229
30	0.6282	0.9001	1.0984	0.7197
31	1.5675	1.5554	1.7773	2.0641
32	1.5242	2.0075	1.5618	2.1874
33	1.3153	1.6329	1.9637	1.6209
34	1.5825	1.4487	2.0641	1.5204
35	1.3249	2.2019	1.4436	1.2684
36	0.6804	0.5873	0.7186	0.6693
37	1.5445	1.1559	1.6588	1.6240
38	2.1424	1.2400	2.1653	1.9329
39	2.0612	1.2581	1.8194	2.2211

ตารางที่ ก.12 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 75 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
40	1.4570	0.9582	1.7382	1.5884
41	0.5278	0.5579	0.5516	0.6801
42	2.5335	1.4051	1.7405	1.9248
43	1.4536	1.1904	1.9264	1.1178
44	0.5366	0.4572	0.3845	0.4650
45	1.8102	1.3441	1.8171	1.6555
46	2.3381	1.9311	1.4737	2.0623
47	0.9041	0.6965	0.5846	0.7853
48	1.6788	1.7531	1.3228	1.5699
49	1.9244	1.9752	1.6998	1.9008
50	1.3241	1.8291	1.4762	2.0724
51	1.1847	1.8685	1.2297	1.9617
52	2.0668	1.4424	1.5879	1.6062
53	1.9941	2.2745	1.6250	1.8773
54	1.5759	1.4746	1.8892	1.6967
55	1.4499	1.4350	1.1606	1.1639
56	2.0736	1.6639	1.2545	2.1417
57	1.9270	1.6552	1.3835	1.9906
58	1.9223	1.9021	1.3021	1.2622
59	1.9369	1.8706	1.4871	1.4288
60	1.2877	1.3108	1.1237	1.6365
61	1.9746	2.1545	1.9326	1.7010
62	1.2359	2.1459	1.7566	1.4991
63	1.6340	1.9132	1.3716	1.5704
64	1.3536	1.9185	2.2450	1.8401
65	1.3019	2.2733	1.8841	1.3453
66	0.0656	0.0787	0.0681	0.0568

ตารางที่ ก.12 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
67	2.1437	2.0416	1.5901	2.2565
68	1.4413	1.4671	1.7858	1.5161
69	1.8397	1.6605	1.5501	1.6857
70	1.9945	1.7299	1.9656	1.9786
71	2.0312	1.9951	1.2930	1.5406
72	0.2521	0.3739	0.3834	0.3613
73	1.1148	1.8637	1.2921	1.3704
74	0.4637	0.5833	0.6632	0.8413
75	1.2967	1.4372	1.4733	1.6813

3.4 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 13 เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
1	1.3744	1.1056	1.0999	1.2841
2	2.6800	1.8717	2.6318	2.6033
3	0.7606	0.7011	0.6321	0.7170
4	3.7953	4.3026	2.6046	4.1476
5	2.3436	2.0447	1.8641	2.8269
6	0.7157	0.7075	0.7967	0.4783
7	3.4774	3.3706	2.5005	2.0719
8	2.2632	3.7465	3.2439	3.6678
9	3.0473	2.4214	2.4002	3.0938
10	2.2868	2.2665	2.5128	1.6857
11	1.0215	1.0522	0.9531	1.5127
12	0.5816	0.9631	0.7412	0.9682
13	2.9773	2.6062	1.6303	2.5952

ตารางที่ ก.13 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
14	1.3582	0.8482	1.0004	1.4787
15	3.5882	3.5064	4.0099	3.0319
16	3.3088	4.8634	2.7797	3.6712
17	0.3887	0.6646	0.4990	0.5640
18	1.5032	1.5589	2.0612	1.8992
19	2.3534	1.5213	2.1812	2.0210
20	0.4476	0.7490	0.4168	0.7167
21	0.6115	0.6641	0.3805	0.4184
22	0.5785	0.4444	0.4998	0.4879
23	1.0392	0.9477	0.9009	0.9719
24	0.6516	1.1456	0.9842	0.9598
25	0.7095	0.6268	0.6088	0.6122
26	1.7432	1.9113	1.9833	1.4801
27	1.0869	1.0685	0.6900	1.0989
28	1.6025	1.4906	2.1859	1.4933
29	1.4213	1.3532	1.2395	0.8696
30	1.6364	1.5359	2.0821	2.2196
31	1.9195	1.8825	1.5462	1.3296
32	0.2568	0.3124	0.4334	0.2810
33	1.3610	0.7840	1.3674	1.3705
34	2.8808	3.5768	2.6682	3.0828
35	2.5461	4.1441	2.2969	3.5598
36	4.2915	3.9607	3.2226	3.9851
37	0.5290	0.3649	0.5242	0.6995
38	5.4316	7.3503	5.9395	4.7227
39	0.7643	0.6341	0.6323	0.6480
40	3.4788	4.0907	2.2873	2.4682

ตารางที่ ก.13 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
41	2.3887	3.0553	2.6984	3.7550
42	1.4201	1.5555	1.2235	1.5830
43	2.7395	2.0838	1.8355	1.8549
44	4.3604	4.4285	5.9148	4.1461
45	5.8308	6.2492	5.9592	5.3070
46	0.3607	0.3898	0.6229	0.4674
47	2.4567	2.6524	3.5324	2.3811
48	1.3779	1.2288	1.2836	1.3983
49	4.4262	4.2331	3.6524	4.2506
50	3.3610	1.7965	2.1096	2.5561
51	3.1117	2.9175	1.9441	2.2131
52	0.7090	0.6256	1.0898	0.9964
53	9.0173	6.7497	6.8786	9.6735
54	2.4067	1.8384	2.2549	2.1598
55	0.6198	0.5325	0.6573	0.6895
56	2.5867	1.9046	2.1830	1.7078
57	1.2675	1.3782	1.7009	1.5321
58	4.5058	4.5469	4.7325	3.4023
59	0.5371	0.3756	0.5381	0.4296
60	0.2155	0.1506	0.1980	0.2882
61	0.2480	0.1952	0.1971	0.1675
62	0.2828	0.3502	0.3478	0.2602
63	0.8171	1.1754	1.4224	1.1882
64	1.7839	2.7238	3.0722	2.6845
65	0.5010	0.5495	0.5696	0.8592
66	1.5777	1.3094	0.8361	0.9190
67	0.9401	0.8317	0.9965	0.7451

ตารางที่ ก.13 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
68	0.8410	0.8781	1.0128	0.9834
69	2.0214	1.7959	2.4655	2.2405
70	0.8075	0.6130	0.7871	0.6734
71	9.6480	9.4904	11.6134	7.2394
72	2.4940	2.3195	2.3888	1.4515
73	3.4927	2.8305	3.6162	2.6021
74	2.9890	2.9669	3.5203	3.3272
75	7.5588	7.5878	6.2671	9.8976
76	0.2347	0.1729	0.2491	0.2376
77	2.5747	1.9202	1.7292	1.6435
78	0.4392	0.5399	0.3982	0.6510
79	27.9213	18.8533	19.5036	16.7331
80	0.1905	0.2259	0.3315	0.2677
81	2.5466	1.9305	1.4002	1.4133
82	0.6258	0.8827	0.9782	0.5219
83	2.1126	1.4031	1.5443	1.6584
84	2.1035	2.0169	1.2949	2.2597
85	1.0674	1.0099	1.0942	1.5841
86	1.6129	1.8415	1.3192	1.6949
87	4.5182	3.6742	4.7911	4.3576
88	1.7798	1.2650	1.8882	2.3808
89	1.2967	0.9194	0.7837	1.2158
90	1.5609	1.4337	1.4569	1.3146
91	8.5054	9.6180	11.9128	10.1957
92	2.8689	1.8678	2.0062	2.1169
93	1.5746	1.3954	1.7258	2.3762
94	3.1413	4.1303	3.4400	3.7376

ตารางที่ ก.13 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
95	1.9746	2.4721	2.2369	1.8553
96	3.0081	1.7293	2.8188	1.6198
97	1.8506	1.3263	1.3140	1.6038
98	1.8997	3.0465	3.1994	3.4519
99	3.3144	2.8340	3.8727	4.0160
100	2.5348	2.1019	3.5920	3.0082
101	2.1451	1.5354	1.5881	2.4944
102	1.4640	2.0682	1.5353	2.0533
103	0.8811	0.9959	0.9953	0.7641
104	3.8679	2.8698	3.0142	4.1639
105	5.3369	3.3647	3.7463	3.8167
106	1.6147	1.5091	1.9044	2.1739
107	0.6011	0.6252	0.6979	0.6200
108	22.9306	19.9870	22.7960	32.6894
109	2.5308	3.4144	2.1114	2.6796
110	2.4848	2.0153	2.5320	2.7038
111	1.5521	2.0046	1.9414	1.7379
112	8.6619	9.4499	15.7174	13.7162
113	0.9064	0.7959	0.9842	1.0935
114	1.8761	1.6713	2.0532	2.0554
115	1.2273	1.5359	1.4306	1.4045
116	2.6046	2.6804	2.2602	3.0507
117	1.8109	1.8950	3.0763	2.6396
118	1.4161	1.3143	1.5452	1.4065
119	4.3632	4.0342	3.0865	3.8317
120	1.7157	2.4238	1.6046	1.7975
121	2.2691	2.3122	2.8193	1.8807

ตารางที่ ก.13 (ต่อ) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรของปัญหาขนาด 148 ชิ้นงาน

Task	Set up Time			
	Model A	Model B	Model C	Model D
122	1.8901	1.7910	2.2906	2.0617
123	1.2461	1.3233	1.8487	1.6866
124	1.4820	0.9577	1.1765	0.9912
125	1.0442	1.3224	1.4938	1.3329
126	3.8551	4.9931	2.7691	2.8927
127	3.0463	4.7158	3.8376	2.7184
128	0.2507	0.2317	0.2018	0.2501
129	0.6051	0.9015	0.8459	1.0733
130	2.3235	1.8064	2.4962	1.7227
131	1.1455	1.0409	1.3636	1.5716
132	2.2631	2.0368	1.9220	2.0193
133	2.0031	2.1725	1.7776	1.2011
134	1.3221	1.9153	1.5386	1.9272
135	3.0266	3.1514	2.8757	4.0063
136	3.5018	4.6066	4.5727	4.7761
137	2.0953	2.0217	1.6637	1.8469
138	0.9841	1.5424	0.9944	1.2965
139	2.0310	1.9890	2.0742	2.9077
140	1.3436	1.2599	1.3412	1.8145
141	16.2746	10.6970	11.1018	10.1591
142	10.0120	8.5544	14.3646	13.6772
143	5.6070	5.1282	6.1118	3.6363
144	15.8284	10.3173	8.8314	14.1236
145	12.0189	10.7388	8.1162	7.9536
146	5.5397	5.1523	6.3192	3.2996
147	7.1968	6.0244	7.1949	5.0931
148	6.7409	4.7471	4.2061	6.3711

4. ลำดับชั้นงานก่อนหลัง (Precedence Constraints)

4.1 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 14 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน

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

ตารางที่ ก.14 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 25 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
18	25
19	22
20	21
20	25
21	22
21	24
23	25

4.2 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 15 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	2
1	5
1	7
1	10
1	12
2	3
3	4
4	11
5	6
6	7
6	8
7	14
7	18
8	9
9	13
10	14
11	28

ตารางที่ ก.15 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 35 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
11	33
12	18
13	28
13	33
14	15
15	16
16	21
17	20
18	19
19	20
20	21
21	22
21	25
21	30
21	32
22	23
23	24
24	27
25	26
26	27
27	28
27	33
27	34
28	29
30	31
31	32
32	33
33	35

4.3 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 16 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

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

ตารางที่ ก.16 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

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

ตารางที่ ก.16 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
40	46
42	47
43	48
43	50
46	51
46	48
47	49
47	50
47	52
47	53
49	59
49	61
49	62
50	54
50	55
50	60
50	62
52	56
52	57
53	58
55	63
58	65
59	64
59	66
62	67
66	68
68	69
68	70

ตารางที่ ก.16 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 75 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
68	71
68	72
68	73
68	74
68	75

4.4 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ตารางที่ ก. 17 ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
1	5
1	6
1	7
1	8
2	3
3	4
3	5
3	6
3	7
4	8
5	14
6	9
7	14
8	10
9	14
10	14
11	12
12	13
14	15

ตารางที่ ก.17 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
14	16
15	17
16	17
17	18
17	19
18	20
19	20
20	21
20	22
20	23
20	24
21	25
21	26
21	27
21	28
22	25
22	26
22	27
22	28
23	25
23	26
23	27
23	28
24	25
24	26
24	27
24	28
25	29

ตารางที่ ก.17 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
26	29
27	29
28	29
29	31
31	36
32	34
33	35
34	36
35	36
36	37
37	38
37	45
38	39
39	40
40	41
40	48
40	54
42	43
43	44
45	46
46	47
47	48
47	49
47	54
50	51
51	53
51	69
52	53

ตารางที่ ก.17 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
54	55
54	72
54	76
54	89
54	90
55	133
56	73
57	82
58	86
58	88
59	75
59	89
61	62
62	63
63	67
64	65
64	71
64	72
65	66
65	99
66	67
67	68
68	95
68	98
69	79
70	71
72	134
73	86

ตารางที่ ก.17 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
73	88
73	89
73	90
73	96
74	75
75	90
75	97
76	77
77	78
78	82
79	85
79	80
79	143
79	146
80	81
81	82
82	83
83	84
84	106
86	87
90	111
91	105
92	135
95	101
96	104
98	101
99	100
100	101

ตารางที่ ก.17 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
101	102
101	103
102	127
103	127
105	119
106	107
107	108
108	109
109	110
111	112
112	113
113	114
113	116
113	120
113	123
113	128
114	115
115	125
116	117
117	118
118	126
120	121
121	122
122	126
123	124
124	125
128	129
129	130

ตารางที่ ก.17 (ต่อ) ลำดับชั้นงานก่อนหลังของปัญหาขนาด 148 ชั้นงาน

ชั้นงานก่อนหน้า	ชั้นงานตามหลัง
130	131
130	137
132	135
133	135
134	135
135	136
138	139
139	140
141	142
142	143
142	146
142	147
142	148
144	145
145	147
145	148

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายการ์นต์ กันภัย เกิดเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหการ) จากภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ. 2556 และหลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

