

การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมาก
วัตถุประสงค์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE WORKERS ALLOCATION PROBLEM ON MULTIPLE CELLULAR U-SHAPED UNDER
MANY-OBJECTIVES



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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยู
	แบบหลายสายของระบบเซลล์ลูลาร์แบบมากวัตต์อุปสงค์
โดย	น.ส.จุไรรัตน์ นิมระขัง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรัสวัฒน์ เงามะเสถียรวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นระเกณท์ พุ่มชูศรี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช)	

จุไรรัตน์ ฉิมระฆัง : การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์. (THE WORKERS ALLOCATION PROBLEM ON MULTIPLE CELLULAR U-SHAPED UNDER MANY-OBJECTIVES)
 อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ปารเมศ ชูติมา

การแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ เป็นการแก้ปัญหาโดยพิจารณาวัตถุประสงค์ทั้งหมดไปพร้อมๆกัน ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) มีความยุ่งยากและซับซ้อนของปัญหา ดังนั้นจึงต้องอาศัยฮิวริสติก (Heuristic) และเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic) มาช่วยในการแก้ปัญหา

งานวิจัยนี้จึงนำเสนออัลกอริทึม วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (MODE) เปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายแบบของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด จำนวนพนักงานน้อยที่สุด ภาระประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด และความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

ผลการทดลองพบว่า MODE มีสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ในด้านการลู่เข้าของคำตอบ ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ ด้านความหลากหลายของคำตอบ ในปัญหาขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ในขณะเดียวกันด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงจะเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่ปัญหาขนาดกลางขึ้นไป ส่วนด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time) อัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ NSGA-III และ MODE ตามลำดับ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070146121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Multiple cellular u-shaped, Many-objectives

Jurairat Chimrakhang : THE WORKERS ALLOCATION PROBLEM ON MULTIPLE CELLULAR U-SHAPED UNDER MANY-OBJECTIVES. Advisor: Prof. Parames Chutima, Ph.D.

The worker allocation problem on multiple cellular u-shaped under many-objectives is classified as NP-Hard that is difficult and complex with many-problems solving at the same time. Therefore, using heuristic and meta-heuristic are tools to help solve the problem.

The purpose of the research is to compare the performance of MODE, NSGA III and MOEA/D on the worker allocation problem on multiple cellular U-shaped assembly lines attempting to realize five objectives, i.e. minimizing idle worker, minimizing number of workers, maximizing utilization of workers, minimizing walking time and minimizing the deviation of walking time.

The experiments showed that MODE performs better than MOEA/D and NSGA-III in terms of convergence to Pareto optimal set, convergence and diversity metrics for small, medium, and large problem, on the other hand, ratio of non-dominated solution (self-comparison) and ratio of non-dominated solution (pareto-optimum comparison) are obvious upward medium problems. MOEA/D is a best performance in computational time, followed by NSGA-III and MODE respectively.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบความรู้ ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ นายตรีรัตน์ เกิดโภคทรัพย์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ให้คำแนะนำและความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ นางสาวสุชานันท์ ต้นชนะประดิษฐ์ ที่ให้คำปรึกษาที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณพ่อ แม่ และญาติพี่น้องที่ให้คำปรึกษา สนับสนุนในทุกสิ่ง และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

จุไรรัตน์ นิมระขัง



สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	5
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ มีดังนี้.....	9
บทที่ 2.....	10
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 ประเภทระบบการผลิต.....	10
2.1.1 ระบบการผลิตแบบโครงการ (Project Manufacturing).....	10
2.1.2 ระบบการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Jop Shop).....	10
2.1.3 ระบบการผลิตแบบกลุ่ม (Batch Production).....	10

2.1.4 ระบบการผลิตแบบไหลผ่าน (Line Flow).....	11
2.1.5 ระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow Production)	11
2.2 ระบบการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing).....	11
2.3 แผนผังการปฏิบัติงานระหว่างพนักงาน และเครื่องจักร (Man-Machine Chart).....	11
2.4 ลักษณะของสายการผลิต	12
2.4.1 สายการผลิตแบบเส้นตรง.....	12
2.4.2 สายการผลิตสองด้านแบบขนาน	13
2.4.3 สายการผลิตรูปตัวยู	13
2.4.4 สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย.....	14
2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization).....	15
2.5.1 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	18
2.6 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ	24
2.7 วิธีการจำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach).....	25
2.8 วิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง.....	26
2.9 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม.....	27
2.9.1 ตัวชี้วัดการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต	27
2.9.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการเข้าสู่และความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics).....	28
2.9.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics).....	29
2.9.4 ตัวชี้วัดอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหา ได้ (Ratio of non-dominated solutions (self-comparison))	30
2.9.5 ตัวชี้วัดอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่ แท้จริง (Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison))	31
2.9.6 ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)	31

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3.....	41
วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์.....	41
3.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์.....	41
3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE.....	43
3.3 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย.....	44
บทที่ 4.....	59
วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก.....	59
4.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก.....	59
4.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D.....	62
4.3 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย.....	63
บทที่ 5.....	77
วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III.....	77
5.1 วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III.....	77
5.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III.....	80
5.3 ตัวอย่างการนำวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย.....	81
บทที่ 6.....	99
การกำหนดค่าพารามิเตอร์.....	99
6.1 การทดสอบค่าพารามิเตอร์.....	99
6.1.1 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MODE.....	99

6.1.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D.....	100
6.1.3 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม NSGA-III.....	101
6.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์.....	101
6.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง	102
6.3.1 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ MODE.	102
6.3.2 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ MOEA/D	104
6.3.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ NSGA-III	108
6.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์.....	111
6.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	116
บทที่ 7	117
การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม.....	117
7.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม.....	117
7.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม	118
7.2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก	118
7.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหากลาง.....	120
7.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่.....	121
7.3 สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม	123
บทที่ 8	126
บทสรุปและข้อเสนอแนะ	126
8.1 บทสรุป.....	126
8.2 ข้อเสนอแนะ ข้อเสนอแนะ มีดังนี้.....	127
บรรณานุกรม	129

ภาคผนวก ก	133
รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	133
ภาคผนวก ข	147
ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม.....	147
ประวัติผู้เขียน	157



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม	6
ตารางที่ 2 เวลาดำเนินการของเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย	19
ตารางที่ 3 ระยะเวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักรระหว่างเครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 10	19
ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
ตารางที่ 5 ค่าฟังก์ชันของสตริงคำตอบเริ่มต้น	44
ตารางที่ 6 สตริงคำตอบเริ่มต้น.....	45
ตารางที่ 7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น	46
ตารางที่ 8 ค่าจำนวนเต็ม r_1 , r_2 และ r_3 จากสตริงเป้าหมาย.....	47
ตารางที่ 9 เวกเตอร์กลายพันธุ์.....	49
ตารางที่ 10 ค่าสุ่มของการครอสโอเวอร์.....	50
ตารางที่ 11 ค่าฟังก์ชันของสตริงทดลอง (เวกเตอร์ทดลอง).....	51
ตารางที่ 12 สตริงคำตอบทดลอง	52
ตารางที่ 13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง	53
ตารางที่ 14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ	54
ตารางที่ 15 สตริงคำตอบเริ่มต้นของประชากรรุ่นถัดไป.....	55
ตารางที่ 16 ค่าฟังก์ชันของประชากรรุ่นถัดไป.....	56
ตารางที่ 17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรรุ่นถัดไป	57
ตารางที่ 18 สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1	58
ตารางที่ 19 คำนวณน้ำหนักของประชากรจากซิมเพล็กซ์แลตทิซที่ 5 (5 component with 2 degree without axial point and center point).....	63
ตารางที่ 20 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักประชากรตัวที่ i กับประชากรตัวที่ j	65

ตารางที่ 21	สตริงข้างเคียงของของปัญหาย่อย	66
ตารางที่ 22	สตริงคำตอบเริ่มต้น	67
ตารางที่ 23	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น	68
ตารางที่ 24	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงพ่อแม่และลูก	70
ตารางที่ 25	ค่าสูงสุดและต่ำสุดของรอบปัญหาย่อยที่ 1 ในเจเนอเรชัน 1.....	71
ตารางที่ 26	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบปัญหาย่อยที่ 1 และสตริงคำตอบรุ่นลูกหลังจาก การทำงานอมอลไลซ์	72
ตารางที่ 27	ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก.....	72
ตารางที่ 28	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 1 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์	74
ตารางที่ 29	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 9 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์	74
ตารางที่ 30	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 8 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์	74
ตารางที่ 31	เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 7 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์	74
ตารางที่ 32	สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลังจากประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ สตริงข้างเคียงด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ของเจเนอเรชันที่ 1.....	75
ตารางที่ 33	สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1.....	76
ตารางที่ 34	ค่าเวกเตอร์จุดอ้างอิงจากซิมเพล็กซ์แลตทิซติไซน์ (5 component with 1 degree without center point).....	81
ตารางที่ 35	สตริงคำตอบเริ่มต้น	82
ตารางที่ 36	สตริงคำตอบที่ถูกเลือกนำไปโครอสโอเวอร์.....	83
ตารางที่ 37	สตริงคำตอบที่ถูกเลือกนำไปมิวเตชัน	85
ตารางที่ 38	สตริงคำตอบรุ่นลูก.....	86
ตารางที่ 39	สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก.....	87

ตารางที่ 40 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตรงค่าตอบรุ่นพ่อแม่และลูก	88
ตารางที่ 41 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตรงค่าตอบรุ่นพ่อแม่และลูก.....	89
ตารางที่ 42 ค่านอมอลไลซ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตรงค่าตอบรุ่นพ่อแม่และลูก	89
ตารางที่ 43 ขนาดเวกเตอร์จุดอ้างอิง	92
ตารางที่ 44 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์ของตรงค่าตอบที่ 1-20	92
ตารางที่ 45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมอลไลซ์ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากหลักเป็นแถว (Transpose)	94
ตารางที่ 46 ระยะ $dj, 1x$ ของทุกตรงค่าตอบกับเวกเตอร์จุดอ้างอิง	95
ตารางที่ 47 ระยะ $dj, 2(x)$ และการเลือกกลุ่มค่าตอบที่ดีจากกลุ่มค่าตอบที่มีระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเทียบกับจุดอ้างอิง	96
ตารางที่ 48 ตรงค่าตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละจุดอ้างอิงในเจเนอเรชัน 1	97
ตารางที่ 49 ตรงค่าตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1	97
ตารางที่ 50 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	102
ตารางที่ 51 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา S1	102
ตารางที่ 52 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา L6	104
ตารางที่ 53 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ NSGA-III ปัญหา S1	108
ตารางที่ 54 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6	111
ตารางที่ 55 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา S1-L6	116
ตารางที่ 56 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ปัญหาขนาดเล็ก	119
ตารางที่ 57 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ปัญหาขนาดกลาง	120
ตารางที่ 58 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ปัญหาขนาดใหญ่	122
ตารางที่ 59 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบของปัญหา S1-L6	124

ตารางที่ 61	รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย (หน่วยเวลา).....	133
ตารางที่ 62	เวลาดำเนินงานของเครื่องจักรจำนวน 50 เครื่องจักร	135
ตารางที่ 63	ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50.....	137
ตารางที่ 64	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S1	147
ตารางที่ 65	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S1	147
ตารางที่ 66	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S2	147
ตารางที่ 67	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S2	148
ตารางที่ 68	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S3	148
ตารางที่ 69	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S3	148
ตารางที่ 70	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S4	148
ตารางที่ 71	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S4	149
ตารางที่ 72	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S5	149
ตารางที่ 73	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S5	149
ตารางที่ 74	ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S6.....	149
ตารางที่ 75	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S6	150
ตารางที่ 76	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M1	150
ตารางที่ 77	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M1	150
ตารางที่ 78	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M2	150
ตารางที่ 79	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M2	151
ตารางที่ 80	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M3	151
ตารางที่ 81	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M3	151
ตารางที่ 82	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M4	151
ตารางที่ 83	คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M4	152
ตารางที่ 84	ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M5	152

ตารางที่ 85 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M5	152
ตารางที่ 86 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M6	152
ตารางที่ 87 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M6	153
ตารางที่ 88 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L1	153
ตารางที่ 89 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L1	153
ตารางที่ 90 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L2	153
ตารางที่ 91 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L2	154
ตารางที่ 92 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L3	154
ตารางที่ 93 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L3	154
ตารางที่ 94 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L4	154
ตารางที่ 95 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L4	155
ตารางที่ 96 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L5	155
ตารางที่ 97 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L5	155
ตารางที่ 98 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L6	155
ตารางที่ 99 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L6	156

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปภาพที่ 1 ตัวอย่างการจัดวางสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย.....	8
รูปภาพที่ 2 แผนผังการปฏิบัติงานระหว่างพนักงาน และเครื่องจักร.....	12
รูปภาพที่ 3 สายการผลิตแบบเส้นตรง.....	13
รูปภาพที่ 4 สายการผลิตสองด้านแบบขนาน.....	13
รูปภาพที่ 5 สายการผลิตรูปตัวยู.....	14
รูปภาพที่ 6 สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย.....	14
รูปภาพที่ 7 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต.....	16
รูปภาพที่ 8 ข้อมูลตัวอย่างสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย.....	19
รูปภาพที่ 9 ตัวอย่างการจัดสรรคนลงเครื่องจักรโดยใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและ เครื่องจักร.....	22
รูปภาพที่ 10 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002).....	29
รูปภาพที่ 11 ขั้นตอนการทำงานของ MODE.....	43
รูปภาพที่ 12 การกลายพันธุ์ด้วยกลยุทธ์ DE/rand/1 (ตริยรัตน์, 2560).....	48
รูปภาพที่ 13 การแลกเปลี่ยนค่าฟังก์ชันของสตริงที่ 1.....	51
รูปภาพที่ 14 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D.....	62
รูปภาพที่ 15 ตำแหน่งการครอสโอเวอร์ที่ได้จากการสุ่ม และสลับเปลี่ยนบางส่วนระหว่างสตริงพ่อแม่	69
รูปภาพที่ 16 สตริงคำตอบรุ่นลูกที่เกิดจากการสลับเปลี่ยนบางส่วนของสตริงพ่อแม่.....	69
รูปภาพที่ 17 ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ของ Offspring 1.....	69
รูปภาพที่ 18 ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ของ Offspring 2.....	70
รูปภาพที่ 19 สตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการปรับปรุง.....	70

รูปภาพที่ 20 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III	80
รูปภาพที่ 21 ตำแหน่งการครอสโอเวอร์ที่ได้จากการสุ่ม และสลับเปลี่ยนระหว่างสตริงพ่อแม่	83
รูปภาพที่ 22 สตริงคำตอบรุ่นลูกที่เกิดจากการสลับเปลี่ยนบางส่วนของสตริงพ่อแม่	84
รูปภาพที่ 23 ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้	84
รูปภาพที่ 24 สตริงคำตอบรุ่นลูก	85
รูปภาพที่ 25 การมีเวตชันของ String 7 ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation โดยสุ่มได้ ตำแหน่ง 2 และ 6	86
รูปภาพที่ 26 แสดงระยะ $dj, 1(x)$ และ $dj, 2(x)$ ของเวกเตอร์จุดอ้างอิงเทียบกับเวกเตอร์ค่า ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ x ที่ถูกนอมอลไลซ์ (Yuan, Xu, & Wang, 2014)	90
รูปภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา S1 (MODE)	103
รูปภาพที่ 28 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา S1 (MODE)	104
รูปภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา L6 (MOEA/D)	105
รูปภาพที่ 30 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา L6 (MOEA/D)	106
รูปภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความ หลากหลายของคำตอบ (IGD) ปัญหา L6 (MOEA/D)	106
รูปภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ปัญหา L6 (MOEA/D)	107
รูปภาพที่ 33 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ปัญหา L6 (MOEA/D)	108
รูปภาพที่ 34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา S1 (NSGA-III)	109

รูปภาพที่ 35 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบ (GD)
 ปัญหา S1 (NSGA-III)..... 110

รูปภาพที่ 36 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก 118

รูปภาพที่ 37 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดกลาง 120

รูปภาพที่ 38 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่ 121

รูปภาพที่ 39 ลำดับสายการผลิตรูปตัวยูและระยะห่างระหว่างเครื่องจักร 134



บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาและการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบมาทวัตุประสงค์สำหรับปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตที่มีมาทวัตุประสงค์ซึ่งเป็นปัญหาที่มีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ขึ้นไป ของสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบการผลิตเซลล์ลูลาร์ รวมถึงรายละเอียดของวัตถุประสงค์ และขอบเขตงานวิจัย

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบการผลิต เป็นกระบวนการสร้างสิ่งหนึ่งขึ้นมาจากการใช้ทรัพยากร และดำเนินการผลิตไปตามขั้นตอนก่อนหลัง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ โดยมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ ปัจจัยการผลิต กระบวนการผลิต และผลผลิต ซึ่งในปัจจุบันระบบการผลิตได้มีจำนวนมากมาย ซึ่งมีระบบการผลิตที่วงการอุตสาหกรรมนิยมใช้ในปัจจุบัน คือ ระบบ Lean หรือ Lean Manufacturing และระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี หรือ Just-in-Time (JIT) ซึ่งทั้งสองระบบมีแนวคิดที่คล้ายกัน คือ ต้องการผลิตสินค้าส่งให้ทันเวลา ตามความต้องการของลูกค้า โดยลดความสูญเสียในระบบให้น้อยที่สุด โดยแนวคิดหลักของ Lean คือ การเปลี่ยนจากความสูญเสีย ไปสู่คุณค่า ซึ่งหมายถึง การบริหารระบบการผลิต การจัดการทรัพยากร ให้มีปริมาณที่เหมาะสมในการผลิต เพื่อให้สินค้าคงคลังมีปริมาณน้อย เพื่อส่งให้ทันตามความต้องการของลูกค้า เป็นการลดความสูญเสียให้น้อยที่สุด ส่วนความหมายของ JIT คือ การผลิตสิ่งของ ส่งมอบของให้ทันเวลา และมีปริมาณตามความต้องการของลูกค้า หรือให้ทันความต้องการของส่วนงานอื่นในระบบที่เกี่ยวข้องคือ ลดสินค้าคงคลังให้น้อยที่สุด หรือเท่ากับศูนย์ ลดของเสียในการผลิต ซึ่งส่งผลให้เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเก็บสินค้าคงคลัง ซึ่งทั้งสองแนวคิดทั้ง Lean และ JIT มีบทบาทสำคัญอย่างมากสำหรับระบบการผลิตในปัจจุบัน มีประโยชน์ในเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ยกกระดับคุณภาพสินค้าให้ดีขึ้น ตอบสนองความต้องการของตลาดได้เร็วขึ้น และช่วยเป็นตัวกำหนดเป้าหมายเพื่อปรับปรุงระบบการผลิต (Monden, 1994)

สำหรับระบบการผลิตสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท โดยอาจจะแบ่งตามลักษณะระบบของการผลิตและปริมาณการผลิต เช่น การผลิตแบบโครงการ (Project Manufacturing) การผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Job Shop) การผลิตแบบกลุ่ม (Batch Production) และการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Production) และมีองค์ประกอบหลักๆในระบบการผลิตจะประกอบด้วยคน เครื่องจักร และวัตถุดิบ โดยที่ระบบการผลิตแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น

ถ้าคน เครื่องจักร และวัตถุดิบทำงานขณะเคลื่อนที่ จะเป็นการผลิตรถยนต์ หรือ คนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับวัตถุดิบเพื่อไปทำงานบนเครื่องจักร จะเป็นการผลิตแบบการกลึง การหล่อ และปั๊มขึ้นรูป เป็นต้น

เนื่องจากในระบบการผลิตส่วนมากจำเป็นต้องมีคน เครื่องจักร วัตถุดิบ ทำงานด้วยกัน เพื่อให้ได้สินค้าที่ถูกต้อง มีความหลากหลาย และทันตามความต้องการของลูกค้า มีระบบการผลิตอยู่หนึ่งแบบที่ได้นำแนวคิดของ Lean และ JIT เข้ามาใช้ นั่น คือ การผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ (Cellular Manufacturing) ซึ่งเป็นการจัดการขั้นตอนการผลิตที่ทำการผลิตชิ้นส่วนกลุ่มเดียวกัน หรือ การผลิตที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แบบเดียวกัน เพื่อให้ผลิตชิ้นส่วนได้จนจบขั้นตอน ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในระบบสายการผลิต และใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของระบบการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ (Cellular Manufacturing) คือ ลดระยะเวลาในการผลิต ลดเวลานำในการผลิต ลดระยะทางที่เป็นเส้นทางการไหลของชิ้นส่วน ทำให้ชิ้นส่วนไหลไปได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการใช้เครื่องจักรอย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มคุณภาพในการผลิต และด้วยการทำงานของระบบการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ จำเป็นต้องมีคนและเครื่องจักรทำงานควบคู่กัน เพราะมนุษย์สามารถเปลี่ยนการทำงานที่หลากหลายได้ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย โดยที่จำนวนคนอาจจะปรับเปลี่ยนไปตามความเหมาะสมและปริมาณของผลิตภัณฑ์ ตามความต้องการของลูกค้า เช่น ในช่วงที่มีปริมาณความต้องการน้อยในหนึ่งเซลล์การผลิตอาจจะมีคนแค่คนเดียว แต่ในทางตรงกันข้ามช่วงที่มีปริมาณความต้องการสูงในหนึ่งเซลล์การผลิตจะมีคนทำงานเพิ่มขึ้นสองถึงสามคนได้

รูปแบบสายการผลิตมีอยู่หลากหลายแบบ ไม่ว่าจะเป็นสายการผลิตแบบเส้นตรง สายการผลิตสองด้านแบบขนาน หรือ สายการผลิตรูปตัวยู ที่มีลักษณะเด่นและจุดประสงค์ในการใช้ในการผลิตที่แตกต่างกันไป สำหรับสายการผลิตแบบรูปตัวยู ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม มีข้อดีในเรื่องความยืดหยุ่น เดินทำงานได้อย่างคล่องตัว รวมถึงการมองเห็นและการสื่อสารระหว่างพนักงานได้ดีขึ้น และได้มีการนำมาใช้กับระบบการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ โดยที่มีการวางเครื่องจักรให้เป็นลักษณะรูปตัวยู ตามลำดับการดำเนินการผลิต และคนทำงานอยู่ภายในตัวยู ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งทางเข้าและออกของสายการผลิต โดยที่เครื่องจักรมีการทำงานที่แยกออกจากคนทำงาน และเครื่องจักรจะมีความเป็นอิสระมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยการดำเนินงานแต่ละเครื่องจักร ประกอบด้วยการทำงานของคนที่ทำหน้าที่ด้วยตัวบุคคลเอง และการทำงานอัตโนมัติโดยเครื่องจักร โดยที่คนจะมีหน้าที่เพียงป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องจักร เริ่มการทำงานของเครื่องจักรและรอดูการทำงานของเครื่องจักรว่าดำเนินการไปได้ด้วยดี ไม่มีปัญหาติดขัดอะไร และรอเวลาที่วัตถุดิบได้ถูกทำเสร็จ คนก็จะเป็นคนนำวัตถุดิบออกจากเครื่องจักร แล้วตรวจดูความเรียบร้อย ก่อนที่จะเริ่มลงมือ

ทำงานตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ส่วนเครื่องจักรก็จะมีหน้าที่ทำงานตามระบบอัตโนมัติที่ถูกสั่งการไว้อยู่แล้ว เช่น การเจาะ การกลึง การขึ้นรูป และการประกอบ เป็น (Miltenburg, 2001) ต้น

เนื่องจากในโรงงานอุตสาหกรรมได้เริ่มมีการใช้สายการผลิตรูปตัวยูมากขึ้น จึงได้มีการเพิ่มจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายขึ้นมาในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี เพื่อให้ทันตามความต้องการความลูกค้า เช่น ถ้ามีสองสายการผลิตรูปตัวยูที่ทำงานร่วมกัน พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการผลิตแบบรูปตัวยูโดยใช้เป็นสถานีงานร่วม (multi-line station) ระหว่างสองสายการผลิต เพื่อต้องการจำนวนพนักงานน้อยที่สุดเพราะถ้าพนักงานทำเพียงแค่นึงสายการผลิตแบบรูปตัวยู จะมีภาระงานที่เหลือ เวลาที่ต้องรอ แต่ถ้ามีการทำร่วมกันตั้งแต่สองสายการผลิตขึ้นไปสามารถแบ่งภาระงานที่เหลือจากสายแรกไปให้กับอีกหนึ่งสายการผลิตรูปตัวยูได้ เป็นการลดจำนวนพนักงาน ค่าใช้จ่ายในการผลิต รวมถึงเป็นการใช้ภาระงานของพนักงานให้เต็มประสิทธิภาพ ไม่มีเวลาที่จะต้องรอในการทำงานขั้นถัดไป แต่ต้องมีการคิดระยะทางในการเดินเพิ่มขึ้น เพราะว่าการจัดวางแต่ละสายการผลิตรูปตัวยูจะเป็นอิสระต่อกัน จำเป็นต้องมีระยะห่างของแต่ละสายที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นเส้นทางการใช้ประโยชน์ในการขนถ่ายสินค้าระหว่างการผลิต รวมถึงพื้นที่ในการเดินของพนักงานด้วย จึงจำเป็นต้องมีการคิดเวลาเดินเพิ่มเข้ามา เนื่องจากต้องมีการเดินทำงานอยู่ตลอดเวลา อาจจะทำให้เกิดความล่าช้าในการเดิน และทำให้เวลาเดินเพิ่มมากขึ้นจากเดิม จากงานวิจัยของ (Ferjani, Ammar, Pierreval, & Trabelsi, 2015) ได้ศึกษาว่าประสิทธิภาพในการทำงานของคนจะลดลงเนื่องจากความเมื่อยล้าในการทำงาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเวลาทำงานของระบบการผลิต Jop Shop โดยมีสัมประสิทธิ์ penibility ที่เกี่ยวกับการทำงานหนักเข้ามาคิดรวมในเวลากการเดินทำงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลู่แบบหลายวัตถุประสงค์โดยที่มีสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย ซึ่งมีตั้งแต่สองสายการผลิตรูปตัวยูจนถึงสิบสายการผลิตรูปตัวยู วางอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อต้องการให้พนักงานได้แบ่งเบาภาระงานไประหว่างสายการผลิตรูปตัวยู โดยไม่ได้ทำแค่เพียงสายการผลิตเดียว แต่สามารถไปทำอีกสายการผลิตได้ และมีการคิดเวลาเดินทำงานของพนักงานเข้าไป เพราะพนักงานมีหน้าที่ถือวัตถุดิบแล้วเดินนำไปป้อนให้กับเครื่องจักร รอเครื่องจักรทำงานจนการเสร็จ จึงนำวัตถุดิบที่เสร็จแล้วออกมา และกลับไปทำตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าคนจะมีเวลาว่างในการรอ จนกว่าเครื่องจักรที่ทำงานจะผลิตจนเสร็จจึงจะกลับไปทำงานได้อีกครั้ง ซึ่งจะมีการคิดความล่า

จากการเดินถือวัตถุไปทำการผลิต โดยคิดจากสัมประสิทธิ์ $penibility$ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 เพิ่มเข้าไปในเวลากการเดินของพนักงาน โดยการจัดสรรพนักงาน จะเป็นการช่วยให้การใช้ประสิทธิภาพของพนักงานได้เต็มที่ ไม่ต้องทำอยู่เครื่องจักรเดียว แล้วรอเวลาให้เครื่องจักรทำงานเสร็จ แต่สามารถเดินไปทำงานที่เครื่องจักรอื่นได้ในระหว่างที่เครื่องจักรแรกกำลังทำงาน เพราะฉะนั้นการจัดสรรพนักงานลงสายการผลิตจึงมีความจำเป็นในการแก้ปัญหาการผลิตแบบรูปตัวยูหลายสาย เพื่อให้เวลารว่างของพนักงานน้อยที่สุด เวลารว่างของเครื่องจักรน้อยที่สุด รวมถึงเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการผลิต และทำให้ประสิทธิภาพของระบบการผลิตเพิ่มขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ เป็นกรแก้ปัญหาโดยพิจารณาวัตถุประสงค์ทั้งหมดไปพร้อมๆกัน ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) มีความยุ่งยากและซับซ้อนของปัญหา และเนื่องจากไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ที่สามารถเป็นอ้างอิงและนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับกันได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยฮิวริสติก (Heuristic) และเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic) มาช่วยในการแก้ปัญหา เพื่อหาคำตอบที่ดี และทำการเปรียบเทียบเพื่อเลือกเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสมกับงานวิจัย โดยได้มีการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) ซึ่งมีหลักการในการแก้ปัญหาคือ สร้างเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อให้ได้เวกเตอร์ทดลองแล้วเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย และเลือกคำตอบจากวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) (Storn & Price, 1996) เปรียบเทียบกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการแบ่งเป็นปัญหาย่อยที่มีหลายปัญหาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน โดยใช้วิธีเทบปีเซฟในการเลือกคำตอบที่ดี (Zhang & Li, 2007) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) ที่มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ เพื่อหากลุ่มคำตอบที่ดีจากระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุด (Deb & Jain, 2014)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ทำการศึกษาปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย ซึ่งการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปัญหามาตรฐานการจัดสมดุลสายประกอบของ Sawyer และ Mitchell (Scholl, Boysen, & Flidner, 2013) มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย ซึ่งเป็นปัญหาที่มีจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสายจนถึงสายการผลิตรูปตัวยูแบบสิบสาย โดยแต่ละสายการผลิตรูปตัวยูจะมี 5 เครื่องจักร เวลาดำเนินการที่แตกต่างกัน มีรอบเวลาการผลิตเท่ากับ 25 และ 33 หน่วยเวลา ซึ่งเครื่องจักรจะวางอยู่รูปแบบที่แตกต่างกัน มีระยะห่างระหว่างเครื่องจักรที่ชัดเจนเพื่อทำการคำนวณระยะเวลาเดินของพนักงาน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดปัญหาการทดลองในภาคผนวก ก.

2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา

วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) โดยตัวชี้วัดที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม มี 6 ตัวชี้วัด การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) ความหลากหลายของคำตอบ (Spread) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison)) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time)

3. การหาคำตอบในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบหลายวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

(1) เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize Idle Worker)

(2) จำนวนพนักงานน้อยที่สุด (Minimize Number of Worker)

(3) Utilization การทำงานของพนักงานมากที่สุด (Maximize Utilization Worker)

(4) เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize Walking Time: WT)

(5) ความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize the deviation of walking time of workers: DWW)

4. ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนด้วย MATLAB สำหรับอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาตัวอย่าง

5. ปัญหาตัวอย่างสำหรับแก้ปัญหาของงานวิจัย ได้แบ่งงานวิจัยเป็นปัญหาเล็ก กลางและใหญ่อย่างละ 6 ปัญหา แสดงปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม ดังตารางที่ 1

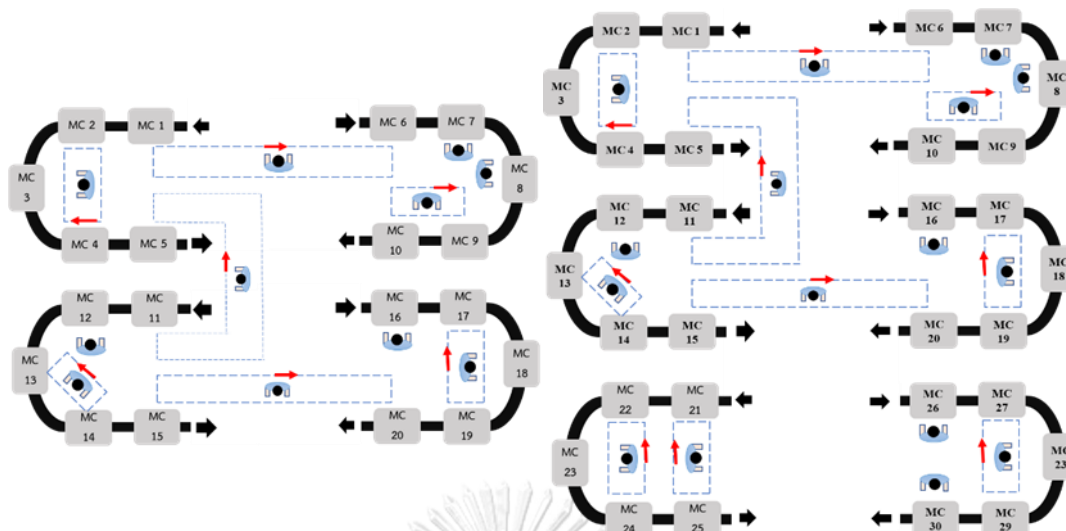
ตารางที่ 1 ปัญหาตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองอัลกอริทึม

ปัญหา	จำนวนสายการผลิตรูปตัวยู	จำนวนเครื่องจักรแต่ละสายการผลิต	รอบเวลาการผลิต	เวลาป้อนและเวลานำวัตถุดิบออก
เล็ก	2	5	25, 33	2
	3	5	25, 33	2
	4	5	25, 33	2
กลาง	5	5	25, 33	2
	6	5	25, 33	2
	7	5	25, 33	2
ใหญ่	8	5	25, 33	2
	9	5	25, 33	2
	10	5	25, 33	2

6. ลักษณะของปัญหางานวิจัย มีดังนี้

- (1) แต่ละสายการผลิตมีจำนวน 1 ผลิตภัณ์ท์
- (2) ทราบจำนวนเครื่องจักร เวลาที่ใช้ในการผลิตแต่ละเครื่องจักร เวลาในการป้อน และนำวัตถุดิบออก และรอบเวลาการผลิต
- (3) เวลานำวัตถุดิบเข้าหรือเวลานำวัตถุดิบออกน้อยกว่าเวลาดำเนินการของเครื่องจักร
- (4) เวลานำวัตถุดิบเข้าและเวลานำวัตถุดิบออกมีค่าเท่ากัน
- (5) ที่เวลาเริ่มต้นของทุกเครื่องจักร มีชิ้นงานพร้อมรอทำ
- (6) น้ำหนักของวัตถุดิบเท่ากันและไม่มีผลต่อการทำงานของพนักงาน
- (7) พนักงานมีหลากหลายทักษะ
- (8) มีการระบุจำนวนสายการผลิตรูปตัวยู และตำแหน่งเครื่องจักรลงบนแต่ละสายการผลิต ในแผนผังพื้นที่การผลิต
- (9) พิจารณาเวลาการเดินทางของพนักงาน (คำนวณโดยใช้ Euclidean distance)
- (10) กำหนดความเร็วในการเดิน เท่ากับ 0.5 m/s
- (11) พนักงานสามารถทำงานระหว่างสายการผลิตได้
- (12) พนักงานสามารถมีอิสระในการเลือกทำงานเครื่องจักร เริ่มจากตำแหน่งใดบนเครื่องจักรก็ได้

แสดงตัวอย่างสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย ดังรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 ตัวอย่างการจัดวางสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบและอัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหา
3. ศึกษาวิธีเขียนโปรแกรมด้วย MATLAB
4. เขียนโปรแกรมด้วย MATLAB เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลู่แบบหลายวัตถุประสงค์
5. ทดลอง Run ปัญหาตัวอย่างด้วยโปรแกรม MATLAB
6. วิเคราะห์อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา
7. วิเคราะห์ผลและสรุปผลงานวิจัย
8. ทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ มีดังนี้

1. สามารถลดความยุ่งยาก ความซับซ้อน และระยะเวลาในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลูลาร์แบบหลายวัตถุประสงค์

2. สามารถนำวิธีการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายรวมถึงอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมจริงเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาระบบการผลิตแบบอื่นๆได้

3. สามารถนำงานวิจัยไปประยุกต์ หรือนำแนวทางวิธีแก้ปัญหาไปใช้กับงานวิจัยอื่นในอนาคตได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลูลาร์แบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อเป็นแนวทางในการหาค่าที่เหมาะสม โดยมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 ประเภทระบบการผลิต

ระบบการผลิต เป็นกระบวนการสร้างสิ่งหนึ่งขึ้นมาจากการใช้ทรัพยากร และดำเนินการผลิตไปตามขั้นตอนก่อนหลัง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ โดยมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก คือ ปัจจัยการผลิต กระบวนการผลิต และผลผลิต ซึ่งสามารถแบ่งการผลิตตามลักษณะของระบบการผลิตและปริมาณการผลิตได้ดังนี้

2.1.1 ระบบการผลิตแบบโครงการ (Project Manufacturing)

ระบบการผลิตแบบโครงการ เป็นการผลิตสินค้าขนาดใหญ่ ส่วนมากสินค้ามักจะมีราคาแพง และทำการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า เช่น การสร้างเขื่อน การสร้างทางด่วน หรือการสร้างเครื่องบิน เป็นการผลิตที่ใช้ระยะเวลา และจะมีการจัดตั้งสถานที่ผลิตไว้เฉพาะที่ที่ต้องการ เมื่อจบโครงการจึงจะย้ายไปสถานที่ทำการผลิตใหม่ ส่วนมากเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตจะเป็นเครื่องมือที่เคลื่อนย้ายง่าย

2.1.2 ระบบการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Job Shop)

ระบบการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง เป็นการผลิตที่เป็นชุดๆ หรือเป็นล็อต สินค้าจะมีความหลากหลายตามความต้องการสั่งซื้อของลูกค้า มีการผลิตการผลิตค่อนข้างบ่อย เครื่องจักรจะถูกวางไว้แบ่งตามหมวดการผลิตชิ้นส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการผลิต โดยจะดำเนินการผลิตจนเสร็จสินค้าชนิดนั้นแล้วจึงเปลี่ยนเป็นสินค้าชนิดอื่นตามเครื่องจักรชุดเดิม

2.1.3 ระบบการผลิตแบบกลุ่ม (Batch Production)

ระบบการผลิตแบบกลุ่ม เป็นการผลิตที่คล้ายกับระบบการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องจะแตกต่างกันตรงที่ลักษณะของสินค้าที่ผลิตเป็นกลุ่มจะมีมาตรฐานเดียวกันทั้งล็อต แต่ระบบไม่ต่อเนื่องจะมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์มากกว่า โดยจะมีการวางเครื่องจักรตามหน้าที่การใช้งาน และผลิตไปตามขั้นตอนจนเสร็จ และจะใช้สำหรับการผลิตที่มีการสั่งซื้อแบบประจำหน่วย

2.1.4 ระบบการผลิตแบบไหลผ่าน (Line Flow)

ระบบการผลิตแบบไหลผ่าน เป็นการผลิตที่เหมือนกันในปริมาณมาก โดยเครื่องจักรจะเป็นแบบเฉพาะงานสำหรับแต่ละสายการผลิต เพื่อผลิตได้รวดเร็วและมีปริมาณมาก ซึ่งเหมาะกับกับการผลิตเพื่อรอจำหน่ายหรือใช้ในการประกอบโมดูลในการผลิตเพื่อรอคำสั่งซื้อจากลูกค้า

2.1.5 ระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow Production)

ระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง เป็นระบบที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง เป็นการผลิตสินค้าชนิดเดียวในปริมาณมากมาย โดยใช้เครื่องจักรเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องการผลิต โดยวัตถุดิบจะถูกลำเลียงต่อเนื่องผ่านสายพานหรือระบบขนถ่ายวัสดุอื่นๆ เพื่อผลิตในขั้นถัดไปจนเสร็จ

2.2 ระบบการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing)

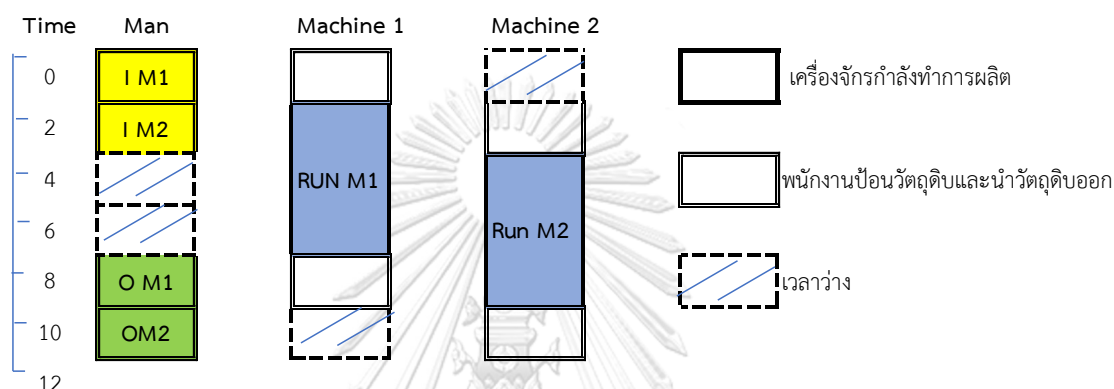
จากระบบผลิตต่างๆมากมาย อาจจะข้อเสียในบางครั้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบการผลิต ไม่ว่าจะเป็นต้นทุนในการผลิต ส่งสินค้าไม่ทันตามความต้องการของลูกค้า และส่งผลเสียต่อชื่อเสียงได้ จึงได้มีการนำแนวคิดของ Lean มาใช้เพื่อแก้ปัญหาระบบการผลิตแบบเก่าที่เกิดปัญหา ซึ่งมีแนวคิดหลักของ Lean นั่นคือ การเปลี่ยนจากความสูญเสีย ไปสู่คุณค่า ซึ่งหมายถึง การบริหารระบบการผลิต การจัดสรรทรัพยากร ให้มีปริมาณที่เหมาะสมในการผลิต เพื่อให้สินค้าคงคลังมีปริมาณน้อย เพื่อส่งให้ทันตามความต้องการของลูกค้า เป็นการลดความสูญเสียให้น้อยที่สุด ถือเป็น การปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างคุณค่าให้แก่ระบบอยู่ตลอดเวลา ระบบลีนได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายทั้งภาคบริการและอุตสาหกรรม ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมมีการนำระบบการผลิตอีกแบบหนึ่งที่มาประยุกต์ใช้กับระบบลีนเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นั่นคือ ระบบการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์

ระบบการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ เป็นการจัดการขั้นตอนการผลิตที่ทำการผลิตชิ้นส่วนกลุ่มเดียวกัน หรือ การผลิตที่มีการติดตั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์แบบเดียวกัน เพื่อให้ผลิตชิ้นส่วนได้จบขั้นตอน ทำให้เกิดความยืดหยุ่นในระบบสายการผลิต และใช้พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ ที่ใช้ในการผลิตสินค้าแต่ละกลุ่มจะถูกจัดวางไว้ด้วยกัน ในหน่วยผลิตย่อยที่เรียกว่าเซลล์ ดังนั้นเมื่อเราจัดกลุ่มสินค้าโดยนำสินค้าที่มีกระบวนการผลิตคล้ายคลึงกันไว้ด้วยกันภายในเซลล์เดียวกัน จะทำให้สามารถลดการเคลื่อนย้ายระหว่างกระบวนการผลิตลงได้ และการควบคุมกระบวนการและขั้นตอนการผลิตก็ง่ายและสะดวกขึ้น รวมถึงการสื่อสารข้อมูลระหว่างคนที่ทำงานในเซลล์เดียวกัน เป็นไปได้สะดวกขึ้น

2.3 แผนผังการปฏิบัติงานระหว่างพนักงาน และเครื่องจักร (Man-Machine Chart)

กระบวนการผลิตในปัจจุบัน มักมีเครื่องจักรอัตโนมัติ หรือกึ่งอัตโนมัติ ช่วยในการปฏิบัติงาน เช่น พนักงาน 1 คน ควบคุมเครื่องจักร 1 เครื่อง หรือพนักงาน 1 คน ควบคุมเครื่องจักร 2 เครื่อง หรือมากกว่า ในกรณีที่พนักงาน 1 คนควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหลายเครื่อง เรียกว่า Machine Coupling ซึ่งการจัดลำดับงานของพนักงานย่อมจะซับซ้อนมากขึ้นพนักงานจึงควรจะได้รับ

การฝึกอบรมอย่างเพียงพอ เพื่อป้องกันการดำเนินงานผิดพลาด และการเกิดอันตราย ดังนั้น ในการบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่พนักงานทำงานร่วมกับเครื่องจักร ผู้วิเคราะห์จึงต้องเอาใจใส่ต่อความสัมพันธ์ระหว่างคน และเครื่องจักรในขณะปฏิบัติงานเพื่อศึกษาลำดับการปฏิบัติงาน เวลา จังหวะ และความสอดคล้องของการทำงานร่วมกันระหว่างพนักงานกับเครื่องจักร สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับแผนผังนี้ เน้นที่การแสดงสถานะ การปฏิบัติงานและการหยุดของผูปฏิบัติงาน เครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละสถานะบนแกนที่สังเกตได้ชัดเจน (จักรกฤษณ์ วันดี 2557) ดังรูปภาพที่ 2



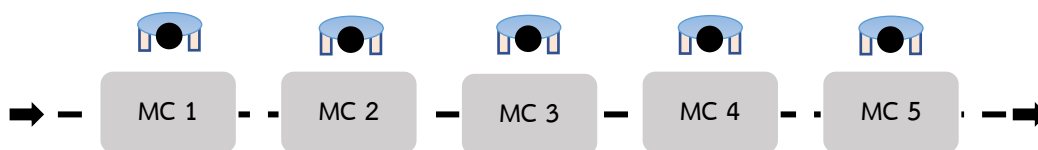
รูปภาพที่ 2 แผนผังการปฏิบัติงานระหว่างพนักงาน และเครื่องจักร

2.4 ลักษณะของสายการผลิต

ลักษณะของสายการผลิต เป็นระบบการผลิตที่ชิ้นส่วนถูกนำมาประกอบต่อเนื่องกันบนสถานีงาน (workstation) หรือเครื่องจักร ที่จัดเรียงต่อกันมีโดยมีสายพานลำเลียงหรือระบบขนถ่ายวัสดุอื่นๆทำหน้าที่ส่งชิ้นงานระหว่างเครื่องจักร ทิศทางการไหลของงานเป็นทิศทางเดียวกันเพื่อทำการประกอบตามชิ้นงานจนกระทั่งประกอบเป็นผลิตภัณฑ์และออกจากสายการผลิต และในขณะเดียวกันเครื่องจักรเดิมจะมีชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ถัดไปเข้ามาแทน โดยในแต่ละเครื่องจักรจะมีเวลาดำเนินงานจำกัด เรียกว่า รอบเวลาการผลิต (Cycle time) เมื่อครบรอบเวลาการผลิตชิ้นงานจะถูกส่งไปที่เครื่องจักรถัดไป แบ่งตามลักษณะรูปร่างได้ดังนี้

2.4.1 สายการผลิตแบบเส้นตรง

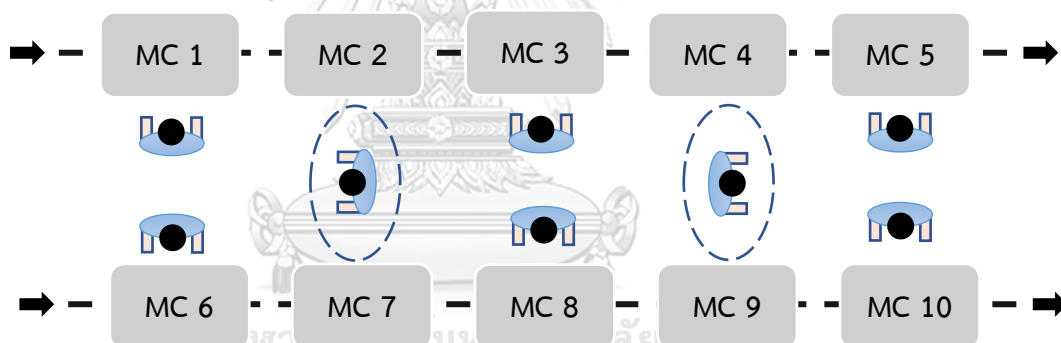
สายการผลิตแบบเส้นตรง ชิ้นส่วนทั้งหมดจะอยู่ในแนวเดียวกัน อาจจะลำเลียงผ่านสายพานหรือระบบขนถ่ายวัสดุอื่นๆ ผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ไปตามสายพานจากเครื่องจักรหนึ่งไปยังสถานีถัดไปตามลำดับก่อนหลังของงานตามแนวเส้นตรง จนกว่าจะประกอบผลิตภัณฑ์เสร็จ ดังรูปภาพที่ 3



รูปภาพที่ 3 สายการผลิตแบบเส้นตรง

2.4.2 สายการผลิตสองด้านแบบขนาน

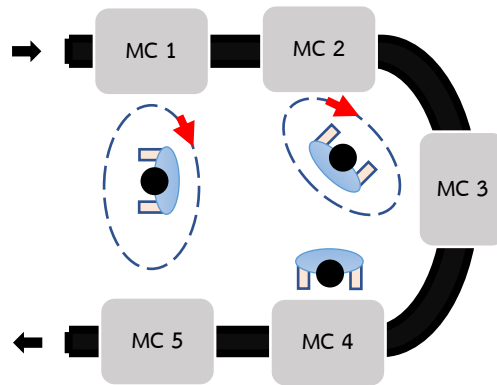
สายการผลิตสองด้านแบบขนาน มีลักษณะเป็นเส้นตรงมีสายการผลิตตั้งแต่ 2 สายการผลิตขึ้นไป เป็นสายการผลิตที่มีสองด้าน ที่วางอยู่ตรงข้ามกันในแนวขนาน เครื่องจักรและงานวางต่อเนื่องกันทั้งสองคู่สายการผลิต พนักงานสามารถทำงานร่วมกันได้ ทำให้สายการผลิตมีประสิทธิภาพลดเวลาว่างงานของพนักงานและลดจำนวนพนักงานได้ นิยมนำไปใช้กับอุตสาหกรรมที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่ เช่น รถบรรทุก รสบัส รถยนต์ เป็นต้น ดังรูปภาพที่ 4



รูปภาพที่ 4 สายการผลิตสองด้านแบบขนาน

2.4.3 สายการผลิตรูปตัวยู

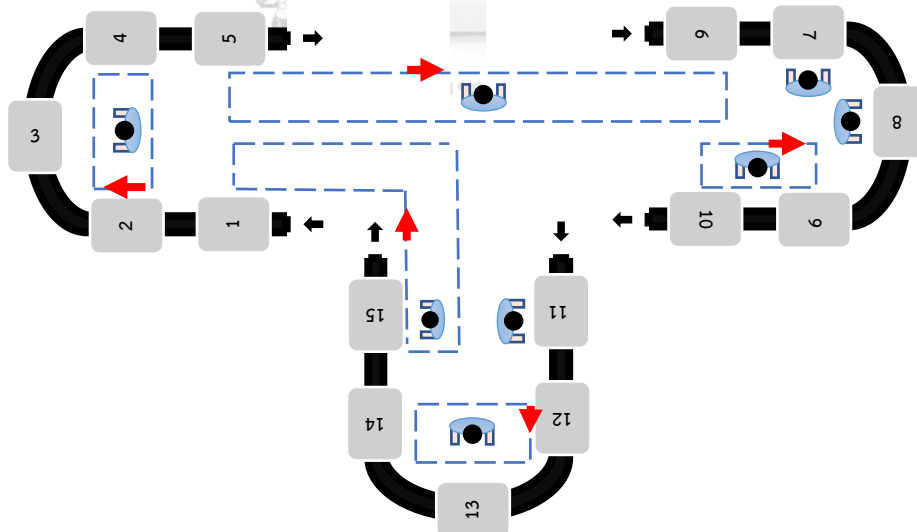
ระบบผลิตแบบทันเวลาพอดีเริ่มเข้ามาในระบบอุตสาหกรรม สายการผลิตรูปตัวยูเริ่มถูกนำมาใช้ ทั้งมีความยืดหยุ่น เดินทางทำงานคล่องตัว รวมถึงการมองเห็นและการสื่อสารระหว่างพนักงานได้ดีขึ้น ส่งผลให้ของเสียในระบบการผลิตและสินค้าคงคลังน้อยลง ลดแรงงาน ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยสายประกอบรูปตัวยูมีลักษณะเป็นตัวยู แบ่งออกเป็นด้านหน้า (Front) และด้านหลัง (Back) ของสายการผลิต ซึ่งจะมีงานอยู่บนทั้งสองด้านของสายการผลิตตามลำดับความสัมพันธ์ก่อนและหลังของงาน โดยลักษณะเด่นของสายประกอบรูปตัวยู คือ พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังพร้อม ดังรูปภาพที่ 5



รูปภาพที่ 5 สายการผลิตรูปตัวยู

2.4.4 สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย

สายการผลิตรูปตัวยูเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นในระบบอุตสาหกรรม จึงได้มีการเพิ่มจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายขึ้นมาในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี เพื่อให้ทันตามความต้องการ ความลูกค้า เช่น ถ้ามีสามสายการผลิตรูปตัวยูที่ทำงานร่วมกัน พนักงานสามารถทำงานได้ทั้งสองสายการผลิตแบบรูปตัวยูระหว่างสองสายการผลิตได้ เป็นการลดเวลาว่างของพนักงาน และทำให้ระบบการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรูปภาพที่ 6



รูปภาพที่ 6 สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย

2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)

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

ในกรณีที่ต้องการหาค่าที่น้อยที่สุดของทุกวัตถุประสงค์ (Minimization) ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

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

k คือ จำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด

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

ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ทำได้ด้วยการหาคำตอบ x^* ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อมๆกัน ดังสมการที่ 2.2

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

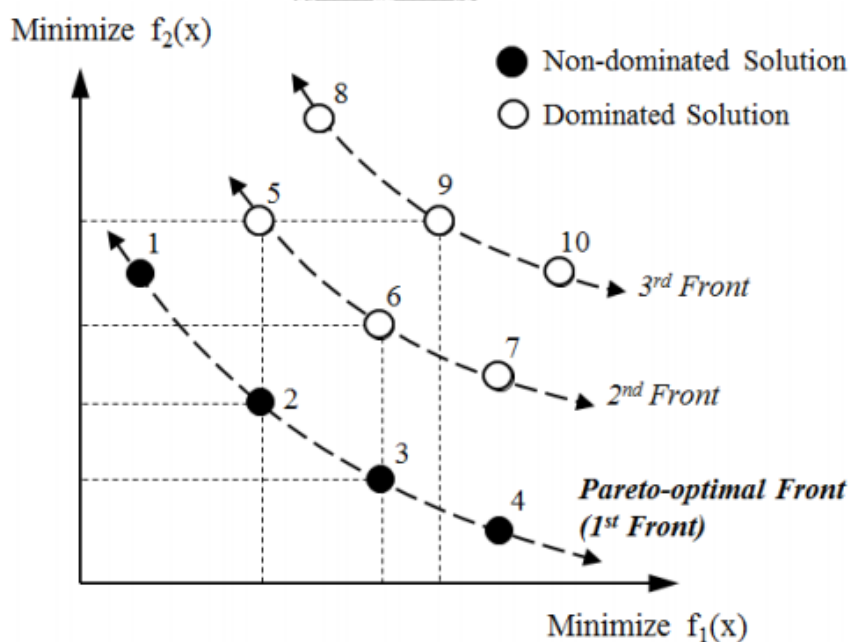
ในกรณีปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบทำให้มีค่าน้อยที่สุด k วัตถุประสงค์ คำตอบ x จะถือว่าครอบงำหรือดีกว่าคำตอบ y ($x < y$) ก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

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

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

ถ้าคำตอบ x^* ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่น และเป็นคำตอบที่ดีเท่าๆกัน จะถูกเรียกว่า กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเรียกสมาชิกคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal set) เซตคำตอบที่ได้นี้จะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ขอบเขตของคำตอบที่เรียกว่า ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด หรือ ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier)

คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตทั้งหมดเมื่อนำมารวมกันเป็นเซตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Set) จะเป็นแนวเส้นโค้งที่ลากผ่านทุกจุดของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตบนสเปซวัตถุประสงค์ ทุกตำแหน่งบนเส้นนี้ข่มจุดของคำตอบที่เหลือทั้งหมด เรียกว่า ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal Frontier) (Chutima & Chimklai, 2012) ดังรูปภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างจุดของคำตอบต่างๆ บนสเปซวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ 2 วัตถุประสงค์ คำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่มีการแข่งขันและกัน และต่างก็ ไม่ถูกข่มจากคำตอบใดเลย ดังนั้นคำตอบที่ 1-4 จึงเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต



รูปภาพที่ 7 คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

(Goldberg, 1989)

วัตถุประสงค์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้แก่กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของสายการผลิต จะถูกนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้จำนวนทั้งสิ้น 5 วัตถุประสงค์ โดยวัตถุประสงค์ทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1 เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize idle of workers : I_w)

พนักงานมีหน้าที่เดินนำวัตถุดิบไปป้อนหรือนำวัตถุดิบออกจากเครื่องจักร จึงทำให้เกิดเวลาว่างในขณะที่รอเครื่องจักรทำงานจนเสร็จ ดังนั้นจึงต้องการให้พนักงานใช้เวลาที่รอเครื่องจักรทำงานสามารถไปทำงานที่เครื่องจักรอื่นได้ ซึ่งเป็นการลดเวลาว่างในการของพนักงาน สามารถทำงานได้หลายเครื่องจักร ดังสมการที่ 2.3

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

วัตถุประสงค์ที่ 2 จำนวนพนักงานน้อยที่สุด (Minimize number of workers : N_w)

การทำงานของพนักงานจากเดิมหนึ่งคนจะรับผิดชอบต่อหนึ่งเครื่องจักร แต่เมื่อมีการลดเวลาว่างของพนักงานลง ดังพนักงานหนึ่งคนจึงสามารถทำได้สองถึงสามเครื่องจักรหรือมากกว่านั้น ซึ่งเป็นการช่วยลดจำนวนพนักงานลงได้ และทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง ดังสมการที่ 2.4

$$\text{Minimize : } N_w \quad (2.4)$$

วัตถุประสงค์ที่ 3 อรรถประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด (Maximize utilization of workers: U_w)

การทำงานของพนักงานมีหน้าที่ในการป้อนวัตถุดิบเข้าและนำวัตถุดิบออก ดังนั้นภาระการทำงานของพนักงานจึงคิดจากเวลาที่ป้อนวัตถุดิบเข้าและนำวัตถุดิบออก และพนักงานหนึ่งคนจะแบ่งเบาภาระงานจากเวลาทำงานที่เหลืออยู่โดยสามารถทำงานได้หลายเครื่องจักร ทำให้มีอรรถประโยชน์สูงสุดในการทำงานของพนักงาน ดังสมการที่ 2.5

$$\text{Maximize } U_w = \frac{\sum_{k=1}^{N_w} (ST_k)}{N_w \times CT} \quad (2.5)$$

เมื่อ ST_k คือ เวลาป้อนและนำวัตถุดิบออกของพนักงานคนที่ k

CT คือ รอบเวลาการผลิต

N_w คือ จำนวนพนักงาน

วัตถุประสงค์ที่ 4 เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize walking time : WT)

พนักงานมีหน้าที่เดินนำวัสดุไปป้อนหรือนำวัสดุออกจากเครื่องจักร รอเครื่องจักรทำงานจนการเสร็จ จึงนำวัสดุที่เสร็จแล้วออกมา และกลับไปทำตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ในขั้นตอนการเดินไปทำงานแต่ละเครื่องจักร ถ้าพนักงานต้องเดินไปทำงานที่ไกลจะส่งผลให้พนักงานทำงานได้จำนวนน้อยเครื่องจักร มีความล่าช้าเกิดขึ้นในการเดินทำงาน และส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน of พนักงานด้วย ดังสมการที่ 2.6

$$\text{Minimize } WT = \sum_{k=1}^{N_w} (W_k) \quad (2.6)$$

เมื่อ W_k คือ เวลาเดินของพนักงานคนที่ k

วัตถุประสงค์ที่ 5 ความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize the deviation of walking time of workers : DWW)

พนักงานมีหน้าที่เดินนำวัสดุไปป้อนหรือนำวัสดุออกจากเครื่องจักร รอเครื่องจักรทำงานจนการเสร็จ จึงนำวัสดุที่เสร็จแล้วออกมา และกลับไปทำตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ในขั้นตอนการเดิน ถ้าพนักงานต้องเดินไปแต่ละเครื่องจักร บางคนได้ทำงานกับหลายเครื่องจักรที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน หรือบางคนได้ทำงานกับหลายเครื่องจักรที่มีตำแหน่งไกลกัน ซึ่งมีความไม่เท่าเทียมเกิดขึ้น และส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน จึงต้องการให้มีความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยลง ดังสมการที่ 2.7

$$\text{Minimize } DWW : \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_w} (W_k - \bar{W})^2}{N_w}} \quad (2.7)$$

เมื่อ N_w คือ จำนวนพนักงาน

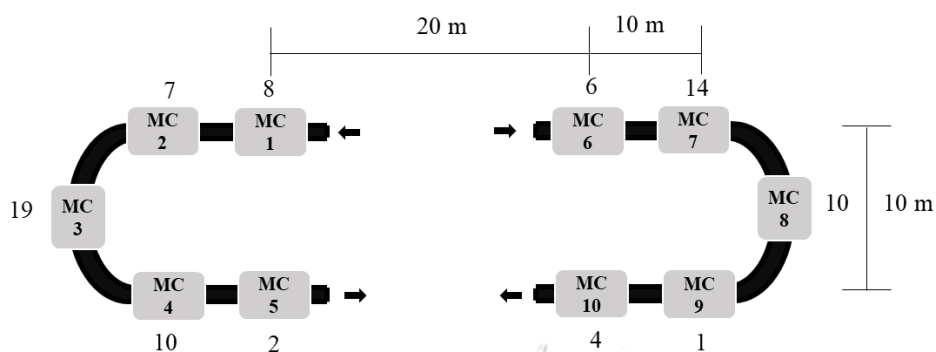
W_k คือ เวลาเดินของพนักงานคนที่ k

\bar{W} คือ ค่าเฉลี่ยเวลาเดินของพนักงานทั้งหมด

2.5.1 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งมีสายการผลิตรูปตัว Y 2 สาย ที่มีเวลาดำเนินการของเครื่องจักรที่แตกต่างกัน รอบเวลาการผลิตเท่ากับ 25 หน่วยเวลา เวลาเดิน 0.5

เมื่อดูหน่วยเวลา เวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักร เวลาดำเนินการของเครื่องจักร โดยมีระยะห่างระหว่างเครื่องจักรและสายการผลิต ดังรูปภาพที่ 8 และ ตารางที่ 2 และ 3



รูปภาพที่ 8 ข้อมูลตัวอย่างสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย

ตารางที่ 2 เวลาดำเนินการของเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยูแบบสองสาย

No. U	1					2					
	Machine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Processing Time	8	7	19	10	2	6	14	10	1	4	

ตารางที่ 3 ระยะเวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักรระหว่างเครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 10

Machine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.00	0.38	0.89	0.57	0.38	0.86	1.39	2.00	1.49	0.98
2	0.38	0.00	0.44	0.38	0.57	1.39	1.98	2.63	2.06	1.49
3	0.89	0.44	0.00	0.44	0.89	2.00	2.63	3.26	2.63	0.89
4	0.57	0.38	0.44	0.00	0.38	1.49	2.06	2.63	1.98	1.39
5	0.38	0.57	0.89	0.38	0.00	0.98	1.49	2.00	1.39	0.86
6	0.86	1.39	2.00	1.49	1.49	0.00	0.38	0.89	0.57	0.38

ตารางที่ 3 ระยะเวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักรระหว่างเครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 10 (ต่อ)

Machine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	1.39	1.98	2.63	2.06	1.49	0.38	0.00	0.44	0.38	0.57
8	2.00	2.63	3.26	2.63	2.00	0.89	0.44	0.00	0.44	0.89
9	1.49	2.06	2.63	1.98	1.39	0.57	0.38	0.44	0.00	0.38
10	0.98	1.49	0.89	1.39	0.86	0.38	0.57	0.89	0.38	0.00

ตารางที่ 3 แสดงเวลาเดินไปกลับแต่ละเครื่องจักร โดยกำหนดเวลาเดินเท่ากับ 0.5 เมตรต่อหน่วยเวลา โดย A. Ferjani, A. Ammar, H. Pierreval and A. Trabelsi (2015) ได้นำเสนอไว้ว่าความเหนื่อยล้าของพนักงานทำให้ระยะเวลาทำงานเพิ่มขึ้น จึงเสนอให้คำนวณระยะเวลาที่เป็นไปได้มากขึ้นจากการพิจารณาถึงความเหนื่อยล้าของพนักงาน และสมมติว่าความเหนื่อยล้าของพนักงานขึ้นอยู่กับความสามารถในการใช้งานของเครื่องจักร จึงมีความล่าช้าสะสมในช่วงเวลาการทำงานดังกล่าว ซึ่งมีตัวชี้วัดความล่าช้า ที่เกิดจากสัมประสิทธิ์การทำงานหนักซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (Ferjani et al., 2015) เนื่องจากพนักงานมีหน้าที่ปฏิบัติงาน คือเดินถือวัตถุไปป้อนแต่ละเครื่องจักร ดังนั้นจึงสมมติให้มีความล่าช้าที่เกิดขึ้นเฉพาะเวลาเดินปฏิบัติงานเท่านั้น และเวลาดำเนินการที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักร จึงคิดเป็นเวลาเดินระหว่างเครื่องจักรเช่นกัน ซึ่งจะไม่รวมเวลาป้อนและนำวัตถุบอกรวมถึงเวลาดำเนินการของเครื่องจักร แสดงตัวชี้วัดความล่าช้า ดังสมการที่ 2.8

$$I(d_j, w_{it}) = 1 - e^{-d_j * w_{it}} \quad (2.8)$$

เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดความล่าช้าซึ่งเกิดจากการเดินของพนักงาน จะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาเวลาดำเนินการที่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากความล่าช้าในการทำงาน ดังสมการที่ 2.9

$$T'_{kj} = (1 + I(d_j, w_{it}))T_{kj} \quad (2.9)$$

เมื่อ $I(d_j, w_{it})$ ตัวชี้วัดความล่าช้าของพนักงานที่ i บนเครื่องจักร j

$-d_j$ สัมประสิทธิ์การทำงานหนัก กำหนดไว้ที่ 0.5

w_{it} ระยะเวลาดำเนินการของพนักงาน i (เวลาเดินไปหรือกลับของแต่ละเครื่องจักร)

T_{kj} ระยะเวลาดำเนินการที่เกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักร k ถึง j

T'_{kj} ระยะเวลาดำเนินการที่เพิ่มขึ้นจากความล่าช้าระหว่างเครื่องจักร k ถึง j

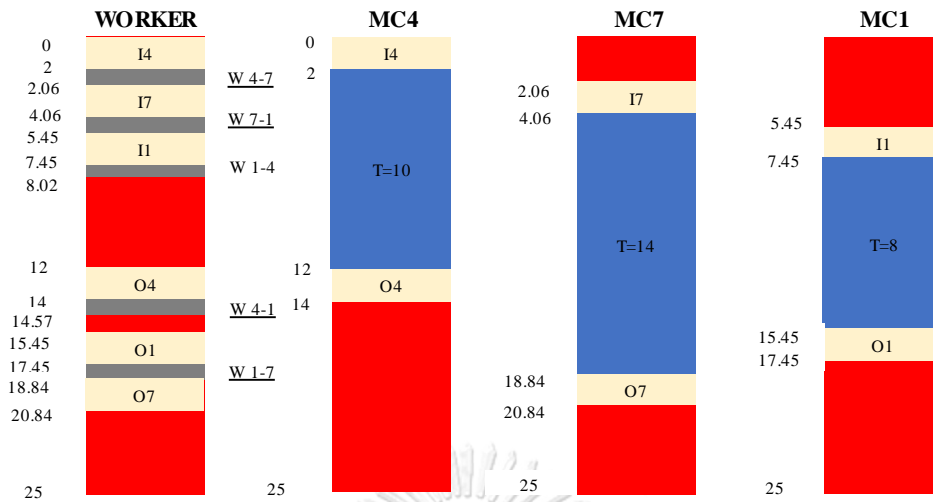
ตัวอย่างการคำนวณเวลาดำเนินการที่เพิ่มขึ้นจากความหนื่อยล้า (ระยะเวลาเดิน) เช่น เดินเครื่องจักร 1 ไปเครื่องจักร 2 มีระยะห่าง 10 m คิดเป็นเวลาเดิน 0.33 เมตรต่อหน่วยเวลา มีสัมประสิทธิ์การทำงานหนักเท่ากับ 0.5 ซึ่งคำนวณเป็นเวลาเดินที่รวมความล่าช้าจากสมการ 2.9 มีค่าเท่ากับ 0.38 เมตรต่อหน่วยเวลา

ตัวอย่างการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ทำการจัดสรรคนลงเครื่องจักรโดยใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักร โดยสามารถเริ่มทำงานที่เครื่องจักรใดก็ได้ โดยไม่เกินรอบเวลาการผลิต แสดงตัวอย่างดังนี้

1. พนักงานเริ่มทำงานจากเครื่องจักร 4 มีเวลาป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 2 หน่วยเวลา
2. เลือกทำงานเครื่องจักร 4 มีเวลาดำเนินการเท่ากับ 10 หน่วยเวลา พนักงานต้องรอเวลาให้เครื่องจักร 4 ดำเนินการเสร็จ ดังนั้นจึงเลือกเครื่องจักรที่จะทำงานถัดไปได้
3. เลือกทำงานเครื่องจักร 7 ใช้เวลาเดินจากเครื่องจักร 4 ไป 7 เท่ากับ 2.06 หน่วยเวลา ซึ่งเครื่องจักร 7 สามารถดำเนินการได้ที่เวลา 4.06 หน่วยเวลา หลังทำการป้อนวัตถุดิบ
4. เลือกทำงานเครื่องจักร 1 ใช้เวลาเดินจากเครื่องจักร 7 ไป 1 เท่ากับ 1.39 หน่วยเวลา ซึ่งเครื่องจักร 1 สามารถดำเนินการได้ที่เวลา 7.45 หน่วยเวลา หลังทำการป้อนวัตถุดิบ
5. พนักงานเดินกลับมาเครื่องจักร 4 ใช้เวลาเดินกลับจากเครื่องจักร 1 ไป 4 เท่ากับ 0.57 หน่วยเวลา เพื่อนำวัตถุดิบออก และเสร็จการทำงานของเครื่องจักร 4 ที่ 12 หน่วยเวลา
6. พนักงานดำเนินการจนครบทุกเครื่องจักร ซึ่งต้องทำงานให้ครบในขั้นตอนป้อนและนำวัตถุดิบออกของแต่ละเครื่องจักรถือจะเป็นการทำงานที่เสร็จสมบูรณ์ โดยมีรอบเวลาการทำงานไม่เกินรอบเวลาการผลิต

แสดงตัวอย่างการจัดสรรคนลงเครื่องจักรโดยใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักร ดังรูปภาพที่ 9



- หมายเหตุ**
- ป้อนหรือนำวัตถุดิบออก
 - เครื่องจักรดำเนินการ
 - เดิน
 - เวลาว่าง
 - I** ป้อนวัตถุดิบ
 - O** นำวัตถุดิบออก
 - W_{i-j}** เดินจากเครื่องจักร i ไป j

รูปภาพที่ 9 ตัวอย่างการจัดสรรคนลงเครื่องจักรโดยใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักร

จากวิธีการจัดสรรคนลงเครื่องจักรโดยใช้แผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยู 2 สาย ทำให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

พนักงานคนที่ 1 ทำเครื่องจักร 4 7 1 ลำดับการทำงาน 4 7 1 4 1 7

พนักงานคนที่ 2 ทำเครื่องจักร 8 9 2 10 ลำดับการทำงาน 8 9 2 10 9 8 2 10

พนักงานคนที่ 3 ทำเครื่องจักร 3 5 6 ลำดับการทำงาน 3 5 6 5 6 3

วัตถุประสงค์ที่ 1 เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize idle of workers : I_w)

จากแผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยู 2 สาย จะสามารถคำนวณเวลาว่างของพนักงานได้จากแผนผังของพนักงาน จากสมการที่ 2.3 ได้ผลลัพธ์ดังนี้

พนักงานคนที่ 1 มีเวลาว่าง 7.02 หน่วยเวลา

พนักงานคนที่ 2 มีเวลาว่าง 0.09 หน่วยเวลา

พนักงานคนที่ 3 มีเวลาว่าง 6.67 หน่วยเวลา

ดังนั้น พนักงานมีเวลาว่างทั้งหมด 13.78 หน่วยเวลา

วัตถุประสงค์ที่ 2 จำนวนพนักงานน้อยที่สุด (Minimize number of workers : N_w)

จากแผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยู 2 สายจากสมการที่ 2.4 ดังนั้นจัดสรรพนักงานได้ 3 คน

วัตถุประสงค์ที่ 3 อรรถประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด (Maximize utilization of workers: U_w)

จากสายการผลิตรูปตัวยู 2 สาย จัดสรรพนักงานได้ 3 คน นำไปคิด Utilization การทำงานของพนักงานได้จากสมการที่ 2.5

$$\text{Maximize } U_w = \frac{(2 + 2) + (2 + 2) + (2 + 2)}{3 * 25}$$

$$\text{Maximize } U_w = 0.16$$

ดังนั้น จะได้ Utilization การทำงานของพนักงานเท่ากับ 0.16 หรือคิดเป็น 16 เปอร์เซ็นต์

วัตถุประสงค์ที่ 4 เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize walking time : WT)

จากแผนผังปฏิบัติงานระหว่างพนักงานและเครื่องจักรของสายการผลิตรูปตัวยู 2 สาย จะสามารถคำนวณเวลาเดินของพนักงานได้จากแผนผังของพนักงาน จากสมการที่ 2.6 ได้ผลลัพธ์ดังนี้

พนักงานคนที่ 1 มีเวลาเวลาเดิน 5.98 หน่วยเวลา

พนักงานคนที่ 2 มีเวลาเวลาเดิน 8.91 หน่วยเวลา

พนักงานคนที่ 3 มีเวลาเวลาเดิน 6.33 หน่วยเวลา

ดังนั้น พนักงานมีเวลาเวลาเดินทั้งหมด 21.22 หน่วยเวลา

วัตถุประสงค์ที่ 5 ความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด (Minimize the deviation of walking time of workers : DWW)

จากสายการผลิตรูปตัวยู 2 สาย จัดสรรพนักงานได้ 3 คน พนักงานแต่ละคนมีเวลาเดินที่แตกต่างกัน นำไปคิดความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานจากสมการที่ 2.7

$$\text{Minimize DWW} : \sqrt{\frac{(5.98 - 7.07)^2 + (8.91 - 7.07)^2 + (6.33 - 7.07)^2}{3}}$$

$$\text{Minimize DWW} = 1.31$$

ดังนั้น จะได้ความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานเท่ากับ 1.31

2.6 การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ

การกำหนดความแข็งแรง (Fitness Assignment) ให้กับคำตอบนั้นกล่าวอีกมุมหนึ่งก็คือการชี้วัดคุณภาพของคำตอบ มีเป้าหมายเพื่อให้ทราบว่าแต่ละคำตอบที่พิจารณาเป็นคำตอบที่ดีหรือแย่มากเพียงใดเมื่อเทียบกับคำตอบอื่นๆ ความแข็งแรงมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในหลายๆ ขั้นตอน เช่น ใช้พิจารณาจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบ ใช้การคัดเลือกประชากรคำตอบพ่อแม่ในแต่ละรอบการดำเนินการค้นหาคำตอบ ใช้เพื่อแปลงเป็นความน่าจะเป็นของแต่ละคำตอบที่จะถูกเลือกไปดำเนินการต่างๆ ระหว่างกระบวนการค้นหาคำตอบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การกำหนดความแข็งแรงให้กับคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์อาจมีความยุ่งยากและใช้เวลานานกว่ากรณีปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากในระหว่างกาหนดความแข็งแรงจะต้องพิจารณาค่าวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์พร้อมกัน งานวิจัยนี้อาศัยวิธีการจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ในการกำหนด ความแข็งแรงของคำตอบ โดยคำตอบทั้งหมดที่พิจารณาจะถูกจัดอันดับภายใต้หลักการการครอบงำเชิงพาเรโต และความแข็งแรงของแต่ละคำตอบจะถูกกำหนดขึ้นโดยมีความสัมพันธ์กับอันดับที่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงไม่ได้ถูกประเมินจากค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบโดยตรง แต่ ประเมินจากอันดับ จึงอาจเรียกความแข็งแรงที่ประเมินได้ว่าเป็น “ความแข็งแรงไม่แท้จริง” (Dummy Fitness) วิธีการกำหนดความแข็งแรงที่ใช้มีชื่อว่าวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg’s Ranking) หรือการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated Sorting) มีขั้นตอนเริ่มต้นด้วย

การพิจารณาที่กราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบ ทั้งหมด คำตอบที่ไม่ได้ถูกรอบงำโดยคำตอบใดๆ เลยหรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตซึ่งตั้งอยู่บน Pareto-optimal Front (Front ที่ 1) จะถูกจัดอันดับให้เป็นคำตอบอันดับที่ 1 จากนั้นให้ตัด คำตอบอันดับที่ 1 ออกจากการพิจารณา คำตอบในบรรดาคำตอบที่เหลือที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบใดเลยจะถูกจัดให้เป็นคำตอบอันดับที่ 2 (อยู่บน Front ที่ 2) ลำดับถัดไปก็ให้ตัดคำตอบอันดับที่ 2 ออกจากการพิจารณา และจัดอันดับ คำตอบในอันดับถัดๆ ไปด้วยหลักการเดียวกันนี้จนครบ สุดท้ายแล้วให้ทำการกำหนดความแข็งแรง ของแต่ละคำตอบ โดยให้มีค่าเท่ากับเลขอันดับของคำตอบนั้นหรือ เท่ากับเลขลำดับของ Front ที่ คำตอบนั้นตั้งอยู่

จากกราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกลุ่มตัวอย่างคำตอบ 10 คำตอบดังรูปภาพที่ 7 เนื่องจาก คำตอบที่ 1-4 เป็นคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบอื่นเลย มีการตั้งอยู่บน Front ที่ 1 จึงกำหนดให้ เป็นคำตอบที่ดีเป็นอันดับ 1 และมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 จากนั้นเมื่อตัดคำตอบที่ 1-4 ออกจาก กราฟ จะพบว่าคำตอบที่ 5-7 เป็นคำตอบกลุ่มถัดไปที่ไม่ถูกรอบงำโดยบรรดาคำตอบที่เหลือ นั่นคือตั้งอยู่ บน Front ที่ 2 จึงถูกกำหนดให้เป็นคำตอบอันดับ 2 และมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 2 และในทำนอง เดียวกันนี้ จะพบว่าคำตอบที่ 8-10 เป็นคำตอบอันดับ 3 มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 3 (สุชานันท์, 2560)

2.7 วิธีการจำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ (Decomposition Approach)

ในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ส่วนใหญ่ของอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย วัตถุประสงค์ (Evolutionary multi-objective optimization: EMO) จะอาศัยหลักการจัดอันดับ คำตอบเชิงพาเรโตเป็นตัวชี้วัดด้านคุณภาพของคำตอบ ซึ่งสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในรูป กลุ่มคำตอบที่ดี เพื่อใช้ในการประมาณของเขตของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แต่วิธีนี้จะหาคำตอบได้มี ประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อนำมาใช้กับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ซึ่งมีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ จึงมี การนำหลักการจำแนกวัตถุประสงค์มาประยุกต์ใช้ (Zhang & Li, 2007) โดยวิธีที่นิยมใช้มี 3 วิธี ได้แก่ 1) วิธีการผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weight sum) 2) วิธีการเทบีเชฟฟ์ (Tchebycheff) 3) วิธีแยก ขอบเขตและลงโทษ (Penalty-based boundary intersection) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เทบีเชฟฟ์ เนื่องจากมีข้อดีคือสามารถแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตพบนอยู่ในรูปแบบ non-convex ได้ (ในกรณีปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุด) (สุชานันท์, 2560) มีหลักการคำนวณ ดังนี้

$$\text{minimize } g^{te}(x|\lambda, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_i |f_i(X) - z_i^*|\} \quad (2.10)$$

- เมื่อ m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์
 z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ โดยที่ $z_i^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)^T$
 และ $i = 1, 2, \dots, m$ กรณีกาค่าของค่าตอบที่น้อยที่สุด $z_i^* = \min\{f_i(X)\}$
 กรณีกาค่าของค่าตอบที่มากที่สุด $z_i^* = \max\{f_i(X)\}$
 λ คือ เวกเตอร์ค่าน้ำหนัก โดยที่ $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$
 λ_i คือ ค่าน้ำหนักในวัตถุประสงค์ที่ i
 $\lambda_i \geq 0$ และ $\sum_i^m \lambda_i = 1$

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

$$N = C_{m-1}^{H+m-1} \quad (2.11)$$

2.8 วิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

วิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) ถูกพัฒนาโดย Storn and Price (1997) มีทิศทางการค้นหาค่าตอบที่แตกต่างและอิสระต่อกันในแต่ละเวกเตอร์คำตอบประชากร ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มต้นจากการสร้างเวกเตอร์เป้าหมาย (Target vector) ในหลายจุดพิกัด จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการพัฒนาคำตอบ ได้แก่ การกลายพันธุ์ (Mutation) การครอสโอเวอร์ (Crossover) และการคัดเลือกคำตอบ (Selection)

DE Operator เป็นการค้นหาค่าตอบแบบเวกเตอร์ โดยใช้ผลต่างระหว่างจุดบนแกน (Coordinate) เดียวกันและพารามิเตอร์ควบคุม 2 ตัว เป็นตัวกำหนดทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ x ใดๆ ให้เปลี่ยนแปลงไป (Price, Storn, & Lampinen, 2006) จึงทำให้ DE Operator เหมาะในการแก้ปัญหาที่มีรูปแบบที่เป็นไปได้ของคำตอบหลากหลายได้ดี โดยใช้กลยุทธ์ DE/rand/1 ซึ่งเป็นกลยุทธ์กลายพันธุ์ทั่วไปของ DE ซึ่งจะใช้จุดพิกัดพื้นฐาน (Base coordinate) จากการสุ่มเลือกเวกเตอร์ในการค้นหาค่าตอบ เพื่อคำนวณหาจุดพิกัดกลายพันธุ์ (Mutant coordinate) จากวิธีนี้ เป็นการสุ่มเลือกเวกเตอร์ทั้งหมดในการพัฒนาคำตอบ ทำให้คำตอบมีความหลากหลายและมีการกระจายตัวกว้าง (ตรัยรัตน์, 2560)

2.9 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

คำตอบที่ได้จากปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์จะเป็นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นขอบเขตของกลุ่มคำตอบจะยอมรับได้ว่าเป็นขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีก็ต่อเมื่อสามารถวัดสมรรถนะของคำตอบว่าใกล้เคียงกับขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือขอบเขตกลุ่มคำตอบอ้างอิง (Reference Pareto Optimal) โดยจะสามารถเปรียบเทียบคุณภาพคำตอบที่หาได้จากหลายอัลกอริทึมด้วยตัววัดสมรรถนะในด้านต่างๆ เช่น การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measure) การกระจายของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Spread Measure) เป็นต้น (เพ็ญพักตร์ ปิ่นกุ่มภีร์, 2551)

งานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพื่อประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด ได้แก่ การลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ การกระจายตัว อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับ และเวลาในการหาคำตอบ (ตรัยรัตน์, 2560) โดยแต่ละตัวชี้วัดมีรายละเอียดดังนี้

2.9.1 ตัวชี้วัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบใช้ในการประมาณระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Pareto Front) กับคำตอบที่แท้จริง (True Pareto Front) ซึ่งถ้าหากค่า GD มีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าทุกจุดของคำตอบที่อัลกอริทึมค้นพบนั้นอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (True Pareto Front) (Coello & Cortés, 2005) ดังนั้นค่า GD จึงเป็นค่าที่บอกว่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้อยู่ไกลจากกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากแค่ไหน ดังสมการที่ 2.12

$$GD(S_j, S^*) = \frac{1}{|S_j|} \sum_{x=1}^{|S_j|} \min\{d_{xy} | y \in S^*\} \quad (2.12)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (2.13)$$

โดยที่ GD คือ ระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Pareto Front) กับคำตอบที่แท้จริง

S_j คือ กลุ่มคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้

S^* คือ กลุ่มคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Front)

$|S_j|$ คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้

$|S^*|$ คือ จำนวนคำตอบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง

d_{xy} คือ ระยะห่างยูคลิดิเดียนระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้กับคำตอบที่แท้จริง

x คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Fitness 1) ที่อัลกอริทึมหาได้
โดยที่ $x = 1, 2, \dots, |S_j|$

y คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True Pareto)
โดยที่ $y = 1, 2, \dots, |S^*|$

$f_k(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดตัวที่ x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้

$f_k(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่แท้จริงตัวที่ y

f_k^{max} และ f_k^{min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงและกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

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

2.9.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics)

การหาค่าระยะห่างจากคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงไปยังกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำที่อัลกอริทึมหาได้ แสดงได้ด้วยค่า IGD (Inverted Generational Distance) กำหนดให้ S^* เป็นกลุ่มคำตอบที่แท้จริง S_j เป็นกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (fitness 1) ที่ได้จากอัลกอริทึม ค่า IGD จาก P^* ไปยัง P เป็นไป ดังสมการที่ 2.14

$$IGD(S^*, S_j) = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y=1}^{|S^*|} \min\{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (2.14)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{K=1}^K \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (2.15)$$

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

2.9.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics)

ตัวชี้วัดนี้มีไว้เพื่อประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึม หามาได้ (กลุ่มคำตอบ A) โดยพิจารณาจากระยะทางเฉลี่ยระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังสมการที่ 2.16 (ดูรูปภาพที่ 10 ประกอบ)

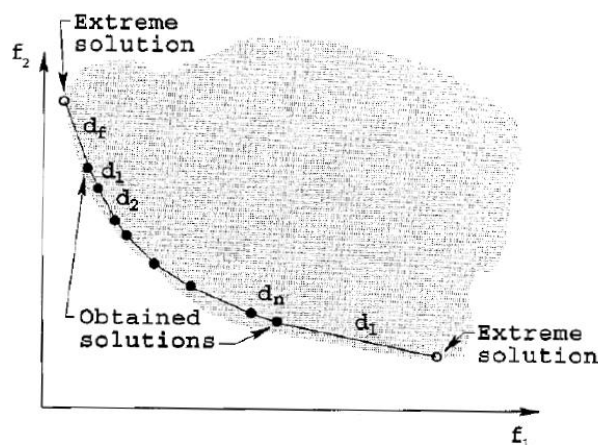
$$\text{Spread} (A) = \frac{d_f + d_l + \sum_{i=1}^{N-1} |d_i - \bar{d}|}{d_f + d_l + (N-1)\bar{d}} \quad (2.16)$$

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

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

\bar{d} คือระยะทาง d_i เฉลี่ย

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



รูปภาพที่ 10 ตำแหน่งระยะทางที่ใช้ในการคำนวณค่าการกระจายตัว

(Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002)

แต่สมการที่ 2.16 เป็นการคำนวณหาการกระจายตัวสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์เท่านั้น เมื่อทำการพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 5 วัตถุประสงค์พร้อมกันจึงต้องทำการปรับปรุงสมการการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้โดยสามารถคำนวณ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ ตำแหน่งกลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่วัตถุประสงค์ กับคำตอบที่ตำแหน่งกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของ อัลกอริทึม $d(e_m, S_j)$ ได้ดังสมการที่ 2.17 และ คำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบ ตำแหน่งที่ x กับคำตอบตำแหน่งที่ x_2 ได้ดังสมการที่ 2.18

$$Spread_j = \frac{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + \sum_{x=1}^{|S_j|} |d_x - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + |S_j| \bar{d}} \quad (2.15)$$

$$d(e_m, S_j) = \min_{s \in S_j} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(e_m) - f_i(s)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.17)$$

$$d_x = \min_{x_2 \in S_j, x_2 \neq x} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(x_2)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ S_j คือ กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม j

S^* คือ กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

$|S_j|$ คือ จำนวนของกลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม

d_x คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่ x กับคำตอบตำแหน่งที่ x_2

\bar{d} คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_x

$d(e_m, S_j)$ คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่ตำแหน่ง e_m กับคำตอบที่ตำแหน่ง S_j

e_m คือ กลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่วัตถุประสงค์ m ของคำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึมที่ได้นั้นมี

การกระจายตัวดี

2.9.4 ตัวชี้วัดอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหา
ได้ (Ratio of non-dominated solutions (self-comparison))

ตัวชี้วัดนี้มีไว้ใช้แสดงว่าในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้น มีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ คิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของ คำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุด (First Pareto frontier solution) ของอัลกอริทึมที่อยู่ในจำนวน คำตอบที่แท้จริง (Approximated True Pareto optimum) ว่ามีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับ

จำนวนคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ (Own first Pareto frontier solutions) โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.19

$$R_{NDS1} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A_j|} \quad (2.19)$$

2.9.5 ตัวชี้วัดอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio of non-dominated solutions (Pareto-optimum comparison))
ตัวชี้วัดนี้มีไว้ใช้แสดงว่าในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้โดยอัลกอริทึมที่พิจารณานั้น มีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ คิดเป็นอัตราส่วนเท่าใด เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่ได้ในเส้นขอบเขตที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ว่าอยู่ในจำนวนคำตอบที่แท้จริงมีอัตราส่วนเป็นเท่าไรเมื่อเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 2.20

$$R_{NDS2} = \frac{|A_j - \{x \in A_j \mid \exists y \in A: y < x\}|}{|A|} \quad (2.20)$$

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

A คือ เซตที่รวมเอาเซตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดหามาได้ของทุกอัลกอริทึมเข้าไว้ด้วยกัน

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

x คือ คำตอบที่หาได้

y คือ เซตคำตอบที่แท้จริง

$y < x$ คือ คำตอบ x ถูกรอบงำโดยคำตอบ y

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะนี้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบที่ได้นั้นมีคำตอบเทียบเท่ากับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง

2.9.6 ตัวชี้วัดด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

เวลาในการค้นหาคำตอบ คือ การพิจารณาเวลาในการค้นหากลุ่มคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยอัลกอริทึมที่ดีควรใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Askin and Zhou (1997) ได้ศึกษาการจัดการจัดสายการประกอบแบบดั้งเดิมที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งมีข้อดีในเรื่องการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต แต่มีข้อเสียในเรื่องอุปกรณ์ที่จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ทันความต้องการผลิตของลูกค้า จึงได้นำสายประกอบแบบเส้นตรงที่มี

สถานีงานขนานเข้ามาใช้ มีรูปแบบการผลิตจะเป็นผลิตภัณฑ์ผสม และมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนเวลาในสถานีงาน โดยใช้ฮิวริสติกช่วยในการสร้างสถานีงานแบบขนานเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในแต่ละสถานีงาน

Miltenburg (1998) ได้ศึกษาสายการผลิตรูปตัวยู ที่เป็นส่วนหนึ่งในระบบการผลิตทั่วไป จากสายการประกอบแบบเดิมที่เป็นเส้นตรง เป็นการจับปัญหาแบบ NP-Hard มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีทั่วไป สถานีตรงข้าม และสถานีระหว่างสายการผลิต น้อยที่สุด โดยมีการกำหนดรอบการผลิต ลำดับก่อนหลัง และตำแหน่งที่วาง และวัตถุประสงค์ที่สอง คือ เวลาว่างของสถานีงาน เพื่อต้องการปรับปรุงระบบการผลิตนี้ให้เป็นไปตามระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยใช้วิธีการ Dynamic Programming ในการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด และนำไปใช้แก้ปัญหาสายการผลิตรูปตัวยูที่มีงานในแต่ละสายการผลิตไม่เกิน 22 งาน

David Sparling (1998) ได้นำเสนอการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายสำหรับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยสายการประกอบรูปตัวยูจำนวน N สายที่อยู่ใกล้กัน ทำให้มีโอกาสในการจัดสมดุลของสายการประกอบรูปตัวยูสองสายหรือมากกว่าไปพร้อมกัน ทำให้เกิดสถานีงานร่วมระหว่างสายการประกอบ เป็นการลดจำนวนสถานีงาน งานวิจัยนี้สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์และอัลกอริทึมในการแก้ปัญหการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายร่วมกันโดยพิจารณาระยะเวลาการเดินทาง ข้อจำกัดแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบทั่วไปซึ่งไม่มีข้อจำกัดด้านตำแหน่งของสายการประกอบ และ อีกแบบหนึ่งคือสายการประกอบจะถูกกำหนดตำแหน่งไว้ ทำให้การจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายร่วมกันมีประสิทธิภาพและลดจำนวนสถานีงานได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายที่เป็นอิสระต่อกัน

Miltenburg (2001) ได้ศึกษาสายการผลิตรูปตัวยูซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตของระบบเซลล์ลูลาร์ ที่ได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมตามระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี เพื่อเป็นการลดของเสียในระบบการผลิต ปรับปรุงคุณภาพของสินค้าให้ดีขึ้น โดยในสายการผลิตรูปตัวยู จะประกอบด้วยเครื่องจักรจัดวางอยู่ในลักษณะรูปตัวยู พนักงานจะทำงานเฉพาะภายในรูปตัว โดยสามารถทำได้ทั้งทางเข้าและทางออกของสายการผลิต โดยพนักงานและเครื่องจักร จะมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยที่พนักงานจะทำงานด้วยการเดิน ไปทำงานที่เครื่องจักร พนักงานจึงจำเป็นต้องมีหลายทักษะในการทำงาน เพราะเครื่องจักรหรือกระบวนการอาจจะถูกปรับเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ทำพบว่าในการผลิตแบบนี้

ได้ผลผลิตดีขึ้น 76% ลดสินค้าคงคลังได้ 86 % ลดเวลาการทำงานได้ 75% และยังลดของเสียลงไป 83%

R.Aase, R.Olson, and J.Schniederjans (2004) ได้ศึกษาแผนผังสายการประกอบรูปตัวยู ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับสายการผลิตแบบเส้นตรงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผลิตต่างกันอย่างใด โดยที่สายการประกอบรูปตัวยูได้ถูกนำมาใช้ในระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี และระบบลีน จึงทำให้เป็นเหตุผลที่บริษัทต่าง ๆ หันมาใช้ระบบนี้ในการผลิต ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการยืนยันว่าสายการประกอบรูปตัวยู ช่วยปรับผลิตภาพของพนักงาน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของแรงงานจะดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายใต้เงื่อนไขบางประการเมื่อเปลี่ยนจากรูปแบบเส้นตรงเป็นรูปตัว U แต่ไม่ได้อยู่ในทุกกรณีการวิจัย แต่ยังพบข้อ จำกัดบางประการ เช่น จำนวนงานและรอบเวลาการผลิตที่หลากหลาย

Price et al. (2006) ได้นำเสนอ Differential Evolution โดยการสุ่มเวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector) จากนั้นสุ่มเลือกเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจุดพิกัดเวกเตอร์ด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่มสองเวกเตอร์ จะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ เมื่อทำการกลายพันธุ์จนครบจำนวนประชากรแล้ว จะทำการแลกเปลี่ยนค่าพิกัด (Recombination) ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมายและเวกเตอร์กลายพันธุ์ เวกเตอร์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนค่าพิกัดแล้ว จะถูกเรียกว่าเวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) หลังจบกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) แล้ว ให้นำเวกเตอร์ทดลองเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย ถ้าให้ค่าที่ต่ำกว่าจะถูกแทนที่เป็นเวกเตอร์เป้าหมายรุ่นต่อไป

Chiang, Kouvelis, and Urban (2007) ได้ศึกษาการจัดสมดุลการผลิตแบบทันเวลาของการผลิตแบบตัวยูหลายสาย จากการผลิตที่เป็นตัวยูอิสระหลายสาย ช่วยให้บริษัทต่างๆ สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการผลิต ลดความซ้ำซ้อน ลดอุปสรรค ลดเวลาว่างและค่าแรงและบรรลุผลประโยชน์อื่นๆ งานวิจัยนี้จะแนะนำและปรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย มีวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับ Type I (ลดจำนวนของสถานีสำหรับรอบเวลาที่กำหนด), Type II (ลดรอบเวลาสำหรับจำนวนสถานีที่กำหนด) และลดค่าใช้จ่ายในการจัดสมดุลการผลิต โดยใช้อัลกอริทึม branch-and-bound ในการแก้ปัญหา ผลการคำนวณบ่งชี้ว่าสำหรับปัญหารอบเวลาที่มีขนาดเล็กจะให้ผลที่ดีเยี่ยม

Zhang and Li (2007) ได้นำเสนอ Genetic Evolutionary Multi-objective Optimization Algorithm Based on Decomposition (MOEA/D) ที่จำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นปัญหาย่อยๆ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MOEA/D กับ MOGLs และ NSGA-II ในปัญหาหลายวัตถุประสงค์ในรูปแบบปัญหา 0/1 Knapsack Problem (Multi-objective 0-1 Knapsack Problem : MOKP) และ ปัญหาหลายวัตถุประสงค์แบบต่อเนื่อง (Continuous multi-objective problem) พบว่า MOEA/D มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่า NSGA-II และ MOGLs และได้คำตอบที่ดีกว่าในปัญหาส่วนใหญ่

Shewchuk (2008) ได้ศึกษาการจัดสรรพนักงานในสายการผลิตรูปตัวยูแบบการผลิตสินค้า โดยสายการผลิตรูปตัวยู ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบแบบลีน ในสายการผลิตที่มีรูปตัวยู พนักงานแต่ละคนจะจัดการกับเครื่องจักรอย่างน้อยหนึ่งเครื่องจักร หรือมากกว่าหนึ่งเครื่องจักร ปัญหาการจัดสรรในระบบการผลิตรูปตัวยูแบบลีนของพนักงานคือการกำหนดว่าเครื่องใดถูกจัดการโดยคนงานคนใด ซึ่งแตกต่างจากปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูที่มีการกำหนดงานลงบนตำแหน่งที่จัดไว้ ดังนั้นงานวิจัยจะกล่าวถึงปัญหาการจัดสรรพนักงานสำหรับสายการผลิตรูปตัวยู ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนพนักงานและเพิ่มการทำงานเต็มรูปแบบให้มากที่สุด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพัฒนาขึ้น ให้มีการจัดสรรเครื่องจักรให้กับคนทำงานตราบเท่าที่คนงานไม่ข้ามเส้นทาง และมีการพิจารณาเวลาเดินของพนักงาน

Sirovetnukul and Chutima (2010) Sirovetnukul and Chutima (2010) Sirovetnukul and Chutima (2010) Sirovetnukul and Chutima (2010) ได้นำเสนอ อัลกอริทึม Coincidence ในการค้นหาคำตอบ ในสายการผลิตแบบไหลเดี่ยวของสายการผลิตรูปตัวยู โดยใช้การจัดงานลงสายการผลิตรูปตัวยูและจัดสรรพนักงานลงไปตามลำดับ มีจำนวนตั้งแต่ 7 ถึง 297 งาน และมีรอบเวลาการผลิตที่ต่างกัน จุดประสงค์หลักเพื่อหาผลกระทบที่เกิดจากการเดินบนสายการผลิตรูปตัวยูทั้งแบบสมมาตรและสี่เหลี่ยม และวัตถุประสงค์รองเพื่อเปรียบเทียบจำนวนคนงานระหว่างสายประกอบตัวยูทั้งสองรูปแบบ

Deb and Jain (2014) ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการหลายวัตถุประสงค์ (สี่วัตถุประสงค์ขึ้นไป) โดยการเพิ่มจุดอ้างอิงในอัลกอริทึมโดยใช้พื้นฐานจากวิธีการ

จัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (NSGA-II) โดยที่มีการพัฒนาคำตอบจาวิธีการเชิงพันธุกรรม และใช้วิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำเพื่อคัดเลือกประชากร แล้วนำไปเทียบกับจุดอ้างอิงเพื่อหาระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเพื่อเป็นคำตอบที่ดีของแต่ละจุดอ้างอิง ซึ่งได้ทำการทดลองกับปัญหาที่มีตั้งแต่ 3 ปัญหาจนถึง 15 ปัญหา พบว่าให้ผลที่น่าพอใจสำหรับทุกปัญหาของบทความนี้

Ferjani et al. (2015) ได้ศึกษาว่าประสิทธิภาพในการทำงานของคนจะลดลงเนื่องจากความเมื่อยล้าในการทำงาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเวลาทำงาน จึงได้แก้ปัญหาโดยการจัดการให้กับคนโดยผ่านวิธีอิวิริสติก ซึ่งจะนำความเหนื่อยล้ามาพิจารณาเพื่อลดเวลาเฉลี่ยในการทำงาน โดยจะใช้เทคนิค TOPSIS เพื่อเลือกตำแหน่งที่จะมอบหมายผู้ปฏิบัติงาน โดยนำไปใช้แก้ปัญหาในระบบการผลิตแบบ Jop Shop

Ibrahim, Rahnamayan, Martin, and Deb (2016) ได้มีการนำเสนอการปรับปรุงอัลกอริทึม NSGA-III เรียกว่า EliteNSGA-III จากเดิมอัลกอริทึม NSGA-III ยังมีความยุ่งยากในการเก็บคำตอบของประชากรที่ดีที่สุดเพื่อไปเป็นประชากรรุ่นถัดไป ซึ่ง EliteNSGA-III จะช่วยเพิ่มให้มีความหลากหลายและความแม่นยำของคำตอบให้กับ NSGA-III โดยที่อัลกอริทึม EliteNSGA-III จะช่วยเก็บคำตอบรุ่นก่อนหน้าที่จะถูกตัดไปในขั้นตอนของ NSGA-III เมื่อนำอัลกอริทึม EliteNSGA-III ไปทดลองกับปัญหาที่มีตั้งแต่ 3 วัตถุประสงค์จนถึง 15 วัตถุประสงค์ พบว่าให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่า NSGA-III ในด้านความหลากหลายและความแม่นยำของคำตอบ โดยเฉพาะปัญหาที่มีวัตถุประสงค์มากๆ

Cheng et al. (2017) ได้อธิบายถึงปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก (Many-Objective Optimization Problems) คือปัญหาที่มีวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งการแก้ปัญหาทำให้เกิดการคิดค้นพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมากหลายอัลกอริทึม แต่ยังได้รับความสนใจน้อยในการตรวจสอบประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงทำการส่งเสริมการวิจัยของวิวัฒนาการการเพิ่มประสิทธิภาพวัตถุประสงค์จำนวนมาก โดยนำปัญหา 15 ปัญหาการทดสอบที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายเพื่อสร้างชุดทดสอบมาตรฐาน สำหรับการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์จำนวนมาก

ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	รูปแบบสายการประกอบหรือสายการผลิต	วัตถุประสงค์	สรุปงานวิจัย
Askin and Zhou (1997)	สายประกอบเส้นตรงแบบขนาน	เพื่อลดจำนวนเวลาในสถานีงาน	ใช้ฮิวริสติกช่วยในการสร้างสถานีงานแบบขนานเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในแต่ละสถานีงาน
Miltenburg (1998)	สายการผลิตรูปตัวยู	เพื่อหาจำนวนสถานีทั่วไป สถานีตรงข้าม และสถานีระหว่างสายการผลิต น้อยที่สุด และวัตถุประสงค์ที่สอง คือ เวลาว่างของสถานีงาน	ใช้วิธีการ Dynamic Programming ในการแก้ปัญหา
David Sparling (1998)	สายการประกอบรูปตัวยูหลายสาย	เพื่อลดจำนวนสถานีงาน	ทำให้เกิดสถานีงานร่วมระหว่างสายการประกอบงานวิจัยนี้สร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์และอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบรูปตัวยูหลายสายร่วมกันโดยพิจารณาระยะเวลาการเดิน

ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	รูปแบบสายการประกอบหรือสายการผลิต	วัตถุประสงค์	สรุปงานวิจัย
Miltenburg (2001)	สายการผลิตรูปตัวยู	-	สายการผลิตรูปตัวยูซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตของระบบเซลล์ลาร์ โดยในสายการผลิตรูปตัวยู จะประกอบด้วยเครื่องจักรจัดวางอยู่ในลักษณะรูปตัวยู พนักงานจะทำงานเฉพาะภายในรูปตัว โดยพนักงานและเครื่องจักร จะมีความเป็นอิสระต่อกัน
R.Aase et al. (2004)	สายการประกอบรูปตัวยู	-	นำสายการประกอบรูปตัวยูเปรียบเทียบกับสายการประกอบแบบเส้นตรง งานวิจัยนี้เป็นการยืนยันว่าสายการประกอบรูปตัวยูช่วยปรับผลิตภาพของพนักงาน
Price et al. (2006)	-	-	ได้นำเสนอ Differential Evolution โดย การสุ่มเวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector) มาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) และแลกเปลี่ยนค่าพิกัด (Recombination) เพื่อให้ได้ประชากรรุ่นถัดไป ซึ่งเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	รูปแบบสายการประกอบหรือสายการผลิต	วัตถุประสงค์	สรุปงานวิจัย
Chiang et al. (2007)	สายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย	ลดเวลาว่างและลดค่าใช้จ่ายในการจัดสมดุลการผลิต	ช่วยให้บริษัทต่างๆ สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการผลิต ลดความซ้ำซ้อน ลดอุปกรณ์ โดยใช้อัลกอริทึม branch-and-bound ในการแก้ปัญหา
Zhang and Li (2007)	-	-	ได้นำเสนอ MOEA/D ที่จำแนกปัญหาหลายวัตถุประสงค์ให้เป็นปัญหาย่อยๆ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MOEA/D กับ MOGLs และ NSGA-II พบว่า MOEA/D มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่า NSGA-II และ MOGLs
Shewchuk (2008)	สายการผลิตรูปตัวยู	เพื่อลดจำนวนพนักงานและเพิ่มการทำงานเต็มรูปแบบให้มากที่สุด	การจัดสรรพนักงานในสายการผลิตที่มีรูปตัวยู พนักงานแต่ละคนจะจัดการกับเครื่องจักรอย่างน้อยหนึ่งเครื่องจักร หรือมากกว่าหนึ่งเครื่องจักร

ตารางที่ 4 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	รูปแบบสายการประกอบหรือสายการผลิต	วัตถุประสงค์	สรุปรงานวิจัย
Sirovetnukul and Chutima (2010)	สายการผลิตแบบไหลเตี๋ยวของสายการผลิตรูปตัวยู	จุดประสงค์หลักเพื่อหาผลกระทบที่เกิดจากการเดินบนสายการผลิตรูปตัวยูทั้งแบบสมมาตรและสั้เหลี่ยม และวัตถุประสงค์รองเพื่อเปรียบเทียบจำนวนคนงานระหว่างสายประกอบตัวยูทั้งสองรูปแบบ	ได้นำเสนออัลกอริทึม Coincidence ในการค้นหาคำตอบในโดยใช้การจัดงานลงสายการผลิตรูปตัวยูและจัดสรรพนักงานลงไปตามลำดับ มีจำนวนตั้งแต่ 7 ถึง 297 งาน และมีรอบเวลาการผลิตที่ต่างกัน
Deb and Jain (2014)	-	-	ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมสำหรับปัญหามากวัตถุประสงค์ (สั้วัตถุประสงค์ขึ้นไป) โดยการเพิ่มจุดอ้างอิงในอัลกอริทึมโดยใช้พื้นฐานจากวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (NSGA-II) หรือ NSGA-III ซึ่งได้ทำการทดลองกับปัญหาที่มีตั้งแต่ 3 ปัญหาจนถึง 15 ปัญหา พบว่าให้ผลที่น่าพอใจสำหรับทุกปัญหาของบทความนี้

ตารางที่ 4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	รูปแบบสายการประกอบหรือสายการผลิต	วัตถุประสงค์	สรุปงานวิจัย
Ferjani et al. (2015)	-	-	ศึกษาว่าประสิทธิภาพในการทำงานของคนจะลดลงเนื่องจากความเมื่อยล้าในการทำงาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเวลาทำงาน จึงได้แก้ปัญหาโดยการจัดงานให้กับคนโดยผ่านวิธีฮิวริสติกซึ่งจะนำความเหนื่อยล้ามาพิจารณาเพื่อลดเวลาเฉลี่ยในการทำงาน
Ibrahim et al. (2016)	-	-	ได้มีการนำเสนอการปรับปรุงอัลกอริทึม NSGA-III เรียกว่า EliteNSGA-III จากเดิมอัลกอริทึม NSGA-III ยังมีความยุ่งยากในการเก็บคำตอบของประชากรที่ดีที่สุดเพื่อไปเป็นประชากรรุ่นถัดไปพบว่าให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่า NSGA-III
Cheng et al. (2017)	-	-	ได้อธิบายถึงปัญหาที่มีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งการแก้ปัญหานี้ทำให้เกิดการคิดค้นพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหามีวัตถุประสงค์จำนวนมากหลายอัลกอริทึม

บทที่ 3

วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์

3.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์

วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการใช้ผลต่างด้วยการใช้ประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบันในการพัฒนาคำตอบ โดยกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) จะใช้เลขจำนวนจริงในการพัฒนาคำตอบหรือกำหนดทิศทางของเวกเตอร์ ซึ่งเรียกส่วนประกอบของเวกเตอร์ว่า จุดพิกัด และจำนวนพิกัดในแต่ละเวกเตอร์ว่า ขนาดของเวกเตอร์ (Alatas, Akin, & Karci, 2008) การทำงานของ MODE เริ่มต้นด้วยการสุ่มเวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector) เท่ากับจำนวนประชากร จากนั้นสุ่มเลือกเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจุดพิกัดเวกเตอร์ด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่มสองเวกเตอร์ จะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ เมื่อทำการกลายพันธุ์จนครบจำนวนประชากรแล้ว จะทำการแลกเปลี่ยนค่าพิกัด (Recombination) ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมายและเวกเตอร์กลายพันธุ์ด้วยอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR) เวกเตอร์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนค่าพิกัดแล้ว จะถูกเรียกว่าเวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) หลังจบกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) แล้วให้นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเวกเตอร์ทดลองเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย โดยใช้วิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) ในการคัดเลือกจำนวนประชากร เพื่อเป็นเวกเตอร์เป้าหมายของเจเนอเรชันถัดไป (ตรัยรัตน์, 2560) ขั้นตอนการดำเนินการของ MODE มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น (สตริงเป้าหมาย) โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ให้มีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด (nm)
2. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงเป้าหมาย
3. เข้ารหัส (Encode) ของสตริงเป้าหมาย โดยกำหนดให้ค่า x_i^j ของลำดับการผลิตที่ 1 สตริง i มีค่าน้อยที่สุดและลำดับท้ายสุดมีค่ามากที่สุด

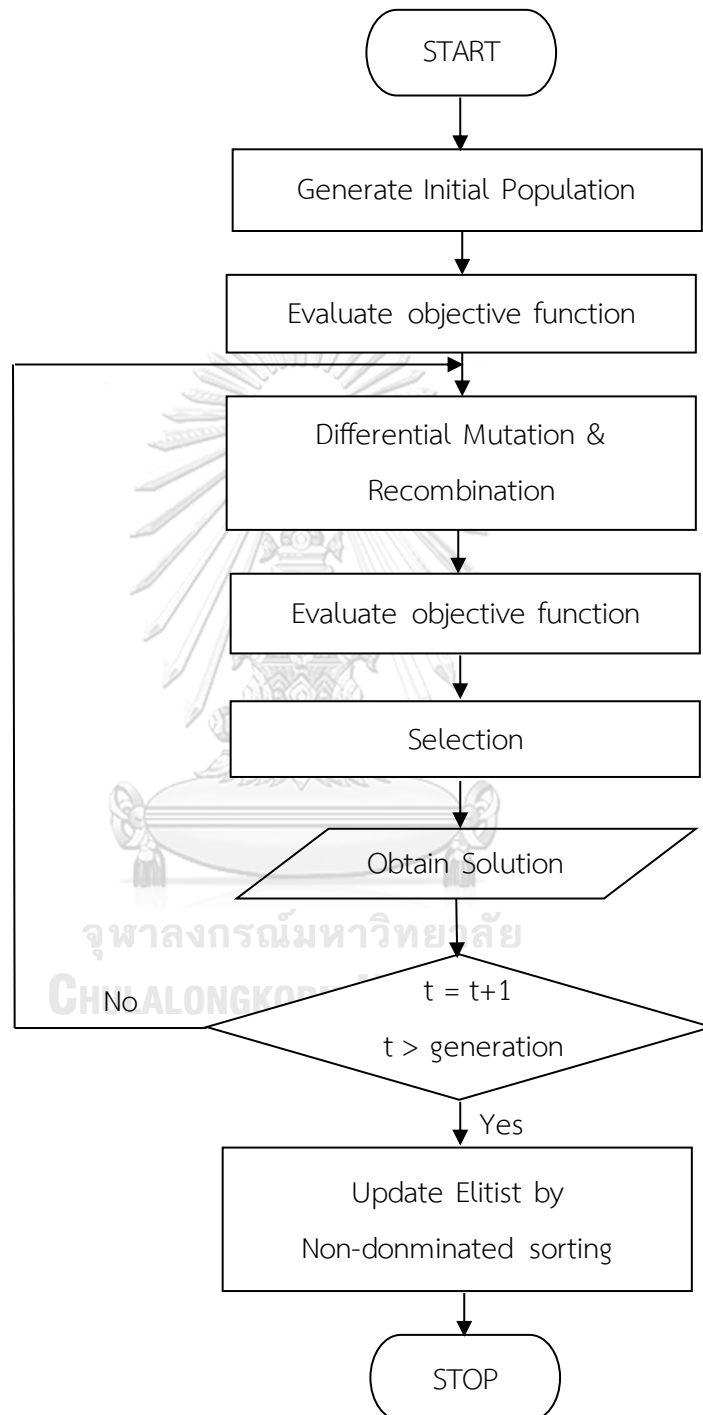
ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาคำตอบ

1. สุ่มค่าจำนวนเต็ม r_1 , r_2 และ r_3 โดยมีค่าระหว่าง 1 ถึง N และ $r_1 \neq r_2 \neq r_3$
2. พัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย) ด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution: DE/rand/1)
3. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย x_i และเวกเตอร์กลายพันธุ์ v_i ด้วยวิธีการยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ โดยมีโอกาสการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่ j บนสตริง i เท่ากับอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง nm ทั้งหมด N ตัว นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่เวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u^i)
4. ถอดรหัส (Decode) เวกเตอร์ทดลอง โดยเรียงค่า u_j^i บนสตริง i จากน้อยไปมาก จะได้สตริงทดลองออกมาทั้งหมด N สตริง
5. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงทดลอง
6. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) โดยการคัดเลือกสตริงคำตอบ N สตริงคำตอบที่ดีที่สุดจาก $P_t \cup Q_t$ เพื่อนำไปเป็นสตริงคำตอบปัจจุบันของสตริงคำตอบรุ่น P_{t+1} (P_t คือ กลุ่มสตริงคำตอบปัจจุบันมีค่าเท่ากับ N ที่เจเนอเรชัน t และ Q_t คือ กลุ่มสตริงคำตอบรุ่นใหม่ซึ่งได้จากการกลายพันธุ์ของสตริงคำตอบในเซต P_t)
7. นำสตริงคำตอบทั้งหมดที่ได้จากการพัฒนาคำตอบของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นที่ 1 ของขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาคำตอบ
8. เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting)

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชัน แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีที่สุดของอัลกอริทึม MOEA/D

3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE



รูปภาพที่ 11 ขั้นตอนการทำงานของ MODE

3.3 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสาย

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก มีดังนี้

1. จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) 15 สตริงคำตอบ
2. ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (F) 1
3. อัตราการครอสโอเวอร์ (CR) 0.7

1. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น (สตริงเป้าหมาย)

การสร้างสตริงเป้าหมาย จะใช้วิธีการสุ่มค่าฟังก์ชันในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากร (N) ที่มีความยาวเท่ากับจำนวนเครื่องจักร (nm) แสดงตัวอย่างค่าฟังก์ชัน ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าฟังก์ชันของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.599	0.600	0.599	0.599	0.600	0.601	0.600	0.600	0.600	0.601
2	0.559	0.545	0.479	0.567	0.595	0.678	0.601	0.600	0.597	0.783
3	0.625	0.615	0.596	0.612	0.614	0.574	0.600	0.603	0.602	0.671
4	0.523	0.376	0.317	0.536	0.567	0.598	0.601	0.600	0.611	0.729
5	0.740	0.463	0.394	0.530	0.580	0.604	0.603	0.603	0.635	0.632
6	0.619	0.590	0.589	0.593	0.596	0.604	0.601	0.601	0.609	0.579
7	0.497	0.376	0.000	0.520	0.548	0.730	0.602	0.597	0.670	0.681
8	0.547	0.200	0.297	0.527	0.559	0.611	0.602	0.600	0.606	0.896
9	0.49	0.278	0.187	0.331	0.381	0.447	0.39	0.389	0.391	0.135
10	0.595	0.612	0.608	0.603	0.604	0.591	0.600	0.601	0.600	0.561
11	0.770	0.376	0.317	0.537	0.561	0.567	0.603	0.605	0.638	1.000
12	0.523	0.376	0.317	0.536	0.567	0.598	0.601	0.600	0.611	0.729

ตารางที่ 5 ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	0.770	0.376	0.317	0.537	0.561	0.567	0.603	0.605	0.638	1.000
14	0.855	0.590	0.589	0.448	0.556	0.641	0.601	0.600	0.668	0.744
15	0.760	0.424	0.279	0.567	0.595	0.692	0.601	0.600	0.597	0.783

เมื่อได้ค่าพิกัดของสตริงเป้าหมาย ทำการถอดรหัส (Decoding) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ (Priority) โดยจะมีค่าเท่ากับลำดับเครื่องจักร (Machine sequence) โดยเรียงค่าพิกัดจากน้อยไปมาก แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สตริงคำตอบเริ่มต้น

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

2. คำนวณค่าวัตถุประสงคของสตริงเป้าหมาย

การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงคของแต่ละสตริง สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงคในบทที่ 2 ดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.7 แสดงตัวอย่างการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงคของสตริงคำตอบเริ่มต้น ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงคของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	f_1	f_2	$* f_3$	f_4	f_5
1	0.487	2	-0.800	9.513	0.184
2	1.390	2	-0.800	8.610	0.002
3	80.046	5	-0.320	4.954	1.240
4	79.860	5	-0.320	5.140	1.297
5	28.417	3	-0.533	6.583	1.652
6	54.306	4	-0.400	5.694	1.435
7	1.441	2	-0.800	8.559	0.027
8	27.329	3	-0.533	7.671	1.874
9	1.813	2	-0.800	8.187	0.158
10	52.824	4	-0.400	7.176	1.089
11	27.464	3	-0.533	7.536	2.018
12	0.753	2	-0.800	9.247	0.317
13	27.181	3	-0.533	7.819	0.537
14	53.921	4	-0.400	6.079	1.718
15	26.915	3	-0.533	8.085	0.649

หมายเหตุ * f_3 แปลงค่าฟังก์ชันจากค่ามาก (Max) ให้อยู่ในรูปค่าน้อย (Min) เพื่อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันตัวอื่น

3. ปรับเปลี่ยนค่าพิกัดของสตริงเป้าหมาย

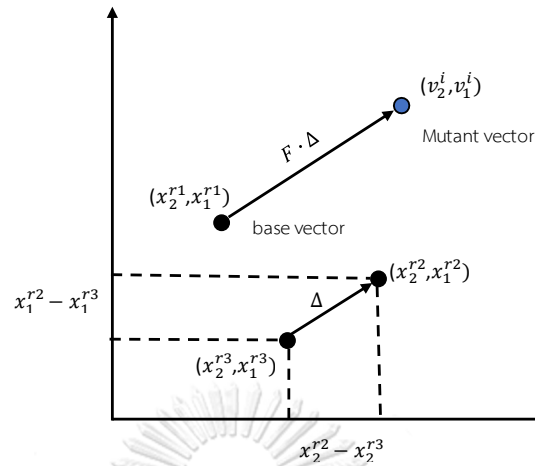
สุ่มค่าจำนวนเต็ม r_1 , r_2 และ r_3 จากสตริงเป้าหมาย ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึงจำนวนประชากร (N) โดย $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ แสดงตัวอย่างค่าสุ่มดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าจำนวนเต็ม r_1 , r_2 และ r_3 จากสตริงเป้าหมาย

Target string	r_1	r_2	r_3
1	10	2	1
2	9	1	3
3	15	13	12
4	10	9	4
5	1	9	10
6	15	12	6
7	14	1	7
8	10	2	14
9	8	4	9
10	11	1	9
11	8	10	4
12	9	4	11
13	12	13	5
14	2	7	9
15	3	2	7

5. พัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย)

พัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย) ด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution) เป็นการค้นหาคำตอบแบบเวกเตอร์ โดยใช้ผลต่างระหว่างจุดบนแกนเดียวกันและพารามิเตอร์ควบคุม 2 ตัว เป็นตัวกำหนดทิศทางและขนาดเวกเตอร์ x ใดๆ ให้เปลี่ยนแปลงไป (Storn & Price, 1996) จะได้ค่าฟังก์ชันการกลายพันธุ์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กลยุทธ์ DE/rand/1 ซึ่งจะใช้จุดฟังก์ชันพื้นฐาน จากการสุ่มเลือกเวกเตอร์ในการค้นหาคำตอบ เพื่อคำนวณหาจุดฟังก์ชันการกลายพันธุ์ จากวิธีนี้ เป็นการสุ่มเลือกเวกเตอร์ทั้งหมดในการพัฒนาคำตอบ ทำให้คำตอบมีความหลากหลายและมีการกระจายตัวกว้าง แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ในรูปแบบของจุดฟังก์ชัน และสูตรคำนวณในรูปแบบของเวกเตอร์ ดังรูปภาพที่ 12 และสมการที่ 3.1



รูปภาพที่ 12 การกลายพันธุ์ด้วยกลยุทธ์ DE/rand/1 (ตรัยรัตน์, 2560)

$$v_i^G = x_{r1}^G + F(x_{r2}^G - x_{r3}^G) \quad (3.1)$$

- เมื่อ i คือ เลขลำดับของเวกเตอร์ปัจจุบันหรือเวกเตอร์เป้าหมาย
- $r1$ คือ เลขลำดับของเวกเตอร์พื้นฐาน ซึ่งได้จากการสุ่มเลือก
- $r2, r3$ คือ เลขลำดับของเวกเตอร์ผลต่าง ซึ่งได้จากการสุ่มเลือก
- G คือ เจเนอเรชัน
- v_i^G คือ เวกเตอร์กลายพันธุ์ที่ i

ตัวอย่างการคิดเวกเตอร์กลายพันธุ์ 1 ที่เจเนอเรชัน 1 ดังนี้

$$v_1^1 = x_{r1}^1 + F(x_{r2}^1 - x_{r3}^1)$$

$$v_{12}^1 = (0.490, 0.278, 0.187, 0.331, 0.381, 0.447, 0.390, 0.389, 0.391, 0.135) +$$

$$1((0.523, 0.376, 0.317, 0.536, 0.567, 0.598, 0.601, 0.600, 0.611, 0.729)$$

$$- (0.770, 0.376, 0.317, 0.537, 0.561, 0.567, 0.603, 0.605, 0.638, 1.000))$$

$$v_{12}^1 = (0.513, 0.326, 0.100, 0.531, 0.570, 0.744, 0.616, 0.609, 0.627, 0.779)$$

แสดงตัวอย่างเวกเตอร์กลายพันธุ์ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เวกเตอร์กลายพันธุ์

Mutant vector	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.595	0.763	0.584	0.615	0.672	0.730	0.678	0.673	0.704	0.729
2	0.305	0.257	0.034	0.334	0.431	0.714	0.452	0.452	0.437	1.076
3	0.449	0.427	0.376	0.422	0.426	0.339	0.391	0.402	0.420	0.550
4	0.267	0.472	0.398	0.381	0.374	0.351	0.375	0.377	0.378	0.516
5	0.610	0.142	0.025	0.253	0.339	0.379	0.381	0.379	0.438	0.427
6	1.044	0.358	0.349	0.403	0.478	0.511	0.482	0.484	0.569	0.245
7	0.534	0.109	0.073	0.555	0.581	0.749	0.631	0.626	0.635	0.704
8	0.580	0.401	0.349	0.561	0.592	0.640	0.631	0.629	0.647	0.766
9	0.353	0.354	0.329	0.345	0.353	0.443	0.357	0.356	0.363	0.378
10	0.411	0.600	0.586	0.503	0.508	0.375	0.473	0.465	0.474	0.055
11	0.669	0.163	-0.001	0.531	0.549	0.611	0.617	0.616	0.660	0.779
12	0.513	0.326	0.100	0.531	0.570	0.744	0.616	0.609	0.627	0.779
13	0.868	0.494	0.204	0.633	0.657	0.664	0.700	0.702	0.735	1.099
14	0.954	0.215	0.648	0.545	0.653	0.738	0.701	0.697	0.766	0.842
15	0.490	0.278	0.187	0.331	0.381	0.447	0.390	0.389	0.391	0.135

6. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย x_i^G และเวกเตอร์กลายพันธุ์ v_i^G

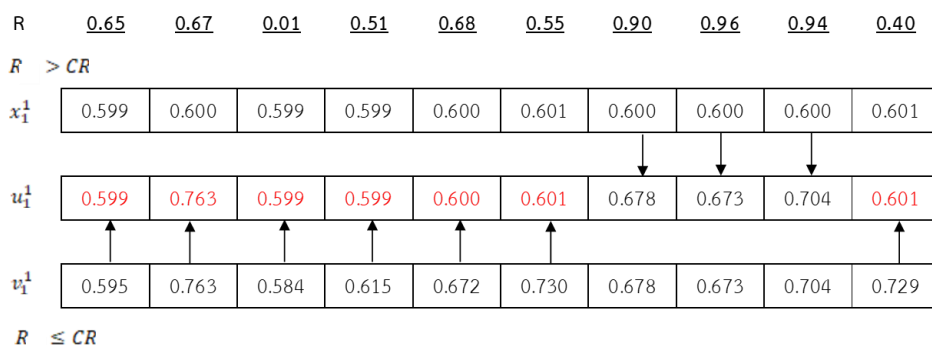
ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย x_i^G และเวกเตอร์กลายพันธุ์ v_i^G ด้วยวิธีการยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ โดยมีโอกาสการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่ j บนสตริง i เท่ากับอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง nm ทั้งหมด N ตัว นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่เวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u_i^G) แสดงเป็นรูปแบบสูตรดังสมการที่ 3.2

$$u_{ij}^G = \begin{cases} v_{ij}^G, & \text{if } rand_{i,j} \leq CR \text{ or } j = rand_i \\ x_{ij}^G, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

ซึ่งมีขั้นตอนคือ สุ่มค่า R_{ij} ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$ และ $j = 1, 2, \dots, nm$
ถ้า $R_{ij} \leq CR$ แสดงการค่าสุ่มของการครอสโอเวอร์ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าสุ่มของการครอสโอเวอร์

String	R									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.65	0.67	0.01	0.51	0.68	0.55	0.90	0.96	0.94	0.40
2	0.72	0.85	0.64	0.83	0.05	0.62	0.67	0.59	0.64	0.67
3	0.79	0.93	0.87	0.48	0.47	0.32	0.46	0.24	0.33	0.57
4	0.05	0.77	0.75	0.12	0.54	0.91	0.49	0.12	0.64	0.15
5	0.45	0.33	0.93	0.09	0.79	0.36	0.70	0.42	0.35	0.33
6	0.49	0.18	0.41	0.31	0.98	0.51	0.73	0.14	0.82	0.54
7	0.36	0.81	0.97	0.57	0.12	0.60	0.12	0.17	1.00	0.90
8	0.67	0.75	0.10	0.14	0.75	0.74	0.92	0.41	0.22	0.69
9	0.59	0.48	0.50	0.03	0.53	0.10	0.05	0.31	0.02	0.51
10	0.61	0.63	0.43	0.91	0.48	0.67	0.93	0.17	0.40	0.18
11	0.90	0.07	0.77	0.27	0.77	0.28	0.18	0.01	0.52	0.72
12	0.95	0.17	0.89	0.92	0.29	0.24	0.37	0.33	0.70	0.13
13	0.60	0.12	0.88	0.97	0.37	0.57	0.55	0.06	0.54	0.07
14	0.06	0.35	0.53	0.87	0.62	0.63	0.95	0.22	0.83	0.56
15	0.56	0.45	0.09	0.62	0.99	0.23	0.90	0.97	0.63	0.29



รูปภาพที่ 13 การแลกเปลี่ยนค่าพิคัดของสตริงที่ 1

เมื่อทำการครอสโอเวอร์เสร็จแล้วจะได้สตริงคำตอบทดลอง (เวกเตอร์ทดลอง) แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าพิคัดของสตริงทดลอง (เวกเตอร์ทดลอง)

Trial String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.599	0.763	0.599	0.599	0.600	0.601	0.678	0.673	0.704	0.601
2	0.535	0.568	0.429	0.546	0.053	0.479	0.545	0.656	0.726	0.733
3	0.145	0.310	0.276	0.348	-0.061	0.669	0.562	0.687	0.656	1.074
4	0.397	0.840	0.502	0.575	1.126	0.330	0.466	0.421	0.687	0.488
5	0.349	0.630	0.098	0.342	0.744	0.284	0.618	0.739	0.620	0.777
6	0.359	0.508	-0.028	0.503	0.352	0.605	0.686	0.493	0.485	0.484
7	0.432	0.505	-0.123	0.451	0.517	0.466	0.779	0.628	0.721	0.490
8	0.506	0.470	0.380	0.515	0.525	0.576	0.557	0.635	0.606	0.596
9	0.591	0.811	0.458	0.565	0.731	0.852	0.727	0.784	0.771	1.199
10	-0.047	0.231	-0.051	-0.038	0.191	0.492	0.605	0.726	0.482	0.546
11	0.572	0.583	0.531	0.598	0.519	0.521	0.587	0.527	0.585	0.548
12	0.513	0.151	0.292	0.495	0.552	0.474	0.578	0.498	0.504	0.533
13	0.489	0.350	0.212	0.534	0.328	0.471	0.696	0.534	0.677	0.372
14	0.620	0.535	0.629	0.555	0.636	0.350	0.526	0.587	0.608	0.532
15	0.432	0.407	-0.051	0.503	0.352	0.521	0.741	0.542	0.680	0.386

7. ถอดรหัส (Decode) เวกเตอร์ทดลอง

ถอดรหัส (Decode) เวกเตอร์ทดลอง โดยเรียงค่า u_{ij}^G บนสตริง i จากน้อยไปมาก จะได้
สตริงคำตอบทดลองออกมาทั้งหมด N สตริง แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 สตริงคำตอบทดลอง

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

8. คำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเวกเตอร์ทดลอง

ทำการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเวกเตอร์ทดลอง แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง

Trial String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	21.590	3	-0.533	13.410	2.649
2	18.789	3	-0.533	16.211	3.433
3	53.152	4	-0.400	6.848	1.339
4	10.399	3	-0.533	24.601	2.019
5	15.488	3	-0.533	19.512	0.149
6	51.320	4	-0.400	8.680	1.728
7	19.411	3	-0.533	15.589	3.124
8	27.816	3	-0.533	7.184	1.791
9	24.597	3	-0.533	10.403	1.201
10	14.198	3	-0.533	20.802	0.713
11	16.297	3	-0.533	18.703	0.497
12	11.734	3	-0.533	23.266	0.982
13	17.739	3	-0.533	17.261	3.277
14	12.852	3	-0.533	22.148	1.025
15	20.567	3	-0.533	14.433	2.830

9. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบ

ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) เป็นการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ของแต่ละสตริงคำตอบ โดยยิ่งมีค่าความแข็งแรงที่น้อย หมายถึงสตริงคำตอบนั้นเป็นสตริงคำตอบที่ดี โดยจะมีการคัดเลือกสตริงคำตอบที่เหลือ N สตริงคำตอบที่ดีที่สุดจาก $P_t \cup Q_t$ เพื่อนำไปเป็นสตริงคำตอบปัจจุบันของสตริงคำตอบรุ่น P_{t+1} แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness	Crowding distance
1	0.487	2	-0.800	9.513	0.184	1	Inf
2	1.390	2	-0.800	8.610	0.002	1	Inf
3	80.046	5	-0.320	4.954	1.240	1	Inf
4	79.860	5	-0.320	5.140	1.297	1	Inf
5	28.417	3	-0.533	6.583	1.652	1	1.203
6	54.306	4	-0.400	5.694	1.435	1	1.068
7	1.441	2	-0.800	8.559	0.027	1	0.943
8	27.329	3	-0.533	7.671	1.874	1	0.660
9	1.813	2	-0.800	8.187	0.158	1	0.241
10	52.824	4	-0.400	7.176	1.089	1	0.215
11	27.464	3	-0.533	7.536	2.018	1	0.149
12	0.753	2	-0.800	9.247	0.317	1	0.147
13	27.181	3	-0.533	7.819	0.537	1	0.142
14	53.921	4	-0.400	6.079	1.718	1	0.104
15	26.915	3	-0.533	8.085	0.649	1	0.096
16	21.590	3	-0.533	13.410	2.649	1	Inf
17	18.789	3	-0.533	16.211	3.433	1	Inf
18	53.152	4	-0.400	6.848	1.339	1	Inf
19	10.399	3	-0.533	24.601	2.019	1	Inf
20	15.488	3	-0.533	19.512	0.149	1	Inf
21	51.320	4	-0.400	8.680	1.728	1	Inf
22	19.411	3	-0.533	15.589	3.124	1	2.177
23	27.816	3	-0.533	7.184	1.791	1	0.644
24	24.597	3	-0.533	10.403	1.201	1	0.372

ตารางที่ 14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ (ต่อ)

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness	Crowding distance
25	14.198	3	-0.533	20.802	0.713	1	0.358
26	16.297	3	-0.533	18.703	0.497	1	0.351
27	11.734	3	-0.533	23.266	0.982	1	0.291
28	17.739	3	-0.533	17.261	3.277	1	0.275
29	12.852	3	-0.533	22.148	1.025	1	0.263
30	20.567	3	-0.533	14.433	2.830	1	0.234

เมื่อได้ค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบทั้งหมดแล้ว ให้คัดเลือกค่าความแข็งแรงที่มีค่าเท่ากับ 1 ให้มีจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น (N) ถ้าสตริงที่มีความแข็งแรงมากกว่าเท่ากับ 1 มีมากกว่าจำนวนประชากรเริ่มต้นให้คัดเลือกจากสตริงที่มีค่าความแออัด (Crowding distance) มากเป็นอันดับถัดไปมาเท่ากับจำนวนประชากร แต่ถ้าค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีน้อยกว่าจำนวนประชากรให้เลือกค่าความแข็งแรงลำดับถัดไปจนครบจำนวน แสดงสตริงคำตอบเริ่มต้น ค่าฟิต และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรรุ่นถัดไป ดังตารางที่ 16 17 และ 18

ตารางที่ 15 สตริงคำตอบเริ่มต้นของประชากรรุ่นถัดไป

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	1	4	2	5	9	8	7	10	6
2	3	2	1	4	5	9	8	7	6	10
3	6	3	7	9	8	4	5	2	1	10
4	6	3	7	9	8	4	5	1	2	10
16	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4
17	3	6	1	10	5	4	2	8	7	9
18	5	1	3	2	4	7	9	6	8	10
19	6	1	7	10	3	8	5	4	9	2

ตารางที่ 16 สตริงคำตอบเริ่มต้นของประชากรรุ่นถัดไป (ต่อ)

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	3	6	2	4	1	7	9	8	5	10
21	3	10	7	9	8	4	2	1	6	5
15	3	2	4	5	9	8	7	6	1	10
14	4	5	3	2	8	7	6	9	10	1
13	3	2	4	5	6	7	8	9	1	10
12	3	2	1	4	5	6	8	7	9	10
11	3	2	4	5	6	8	7	9	10	1

ตารางที่ 16 ค่าพิกัดของประชากรรุ่นถัดไป

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.599	0.600	0.599	0.599	0.600	0.601	0.600	0.600	0.600	0.601
2	0.559	0.545	0.479	0.567	0.595	0.678	0.601	0.600	0.597	0.783
3	0.625	0.615	0.596	0.612	0.614	0.574	0.600	0.603	0.602	0.671
4	0.625	0.761	0.596	0.609	0.614	0.560	0.600	0.603	0.602	0.832
16	0.595	0.763	0.584	0.615	0.672	0.730	0.678	0.673	0.704	0.729
17	0.305	0.257	0.034	0.334	0.431	0.714	0.452	0.452	0.437	1.076
18	0.449	0.427	0.376	0.422	0.426	0.339	0.391	0.402	0.420	0.550
19	0.267	0.472	0.398	0.381	0.374	0.351	0.375	0.377	0.378	0.516
20	0.610	0.142	0.025	0.253	0.339	0.379	0.381	0.379	0.438	0.427
21	1.044	0.358	0.349	0.403	0.478	0.511	0.482	0.484	0.569	0.245
15	0.760	0.424	0.279	0.567	0.595	0.692	0.601	0.600	0.597	0.783
14	0.855	0.590	0.589	0.448	0.556	0.641	0.601	0.600	0.668	0.744

ตารางที่ 17 ค่าฟังก์ชันของประชากรรุ่นถัดไป (ต่อ)

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	0.770	0.376	0.317	0.537	0.561	0.567	0.603	0.605	0.638	1.000
12	0.523	0.376	0.317	0.536	0.567	0.598	0.601	0.600	0.611	0.729
11	0.740	0.250	0.122	0.530	0.550	0.598	0.603	0.602	0.636	0.729

ตารางที่ 17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรรุ่นถัดไป

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	0.487	2	-0.800	9.513	0.184
2	1.390	2	-0.800	8.610	0.002
3	80.046	5	-0.320	4.954	1.240
4	79.860	5	-0.320	5.140	1.297
16	21.590	3	-0.533	13.410	2.649
17	18.789	3	-0.533	16.211	3.433
18	53.152	4	-0.400	6.848	1.339
19	10.399	3	-0.533	24.601	2.019
20	15.488	3	-0.533	19.512	0.149
21	51.320	4	-0.400	8.680	1.728
15	26.915	3	-0.533	8.085	0.649
14	53.921	4	-0.400	6.079	1.718
13	27.181	3	-0.533	7.819	0.537
12	0.753	2	-0.800	9.247	0.317
11	27.464	3	-0.533	7.536	2.018

10. เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) แสดงสตริงคำตอบที่ดีที่สุดในเจเนอเรชัน 1 ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1

Subproblem	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness
1	1(1)	0.487	2	-0.800	9.513	0.184	1
2	2(2)	1.390	2	-0.800	8.610	0.002	1
3	3(3)	80.046	5	-0.320	4.954	1.240	1
4	4(4)	79.860	5	-0.320	5.140	1.297	1
5	5(16)	21.590	3	-0.533	13.410	2.649	1
6	6(17)	18.789	3	-0.533	16.211	3.433	1
7	7(18)	53.152	4	-0.400	6.848	1.339	1
8	8(19)	10.399	3	-0.533	24.601	2.019	1
9	9(20)	15.488	3	-0.533	19.512	0.149	1
10	10(21)	51.320	4	-0.400	8.680	1.728	1
11	11(15)	26.915	3	-0.533	8.085	0.649	1
12	12(14)	53.921	4	-0.400	6.079	1.718	1
13	13(13)	27.181	3	-0.533	7.819	0.537	1
14	14(12)	0.753	2	-0.800	9.247	0.317	1
15	15(11)	27.464	3	-0.533	7.536	2.018	1

11. การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชัน และแสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีของอัลกอริทึม MODE

บทที่ 4

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสาย

4.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการแบ่งเป็นปัญหาย่อยที่มีหลายปัญหาและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปพร้อมกัน แต่แต่ละปัญหาย่อยจะมีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ข้อมูลจากสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ที่ถูกกำหนดโดยระยะทางของสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก (λ_i) ซึ่งระยะทางสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ที่อยู่ใกล้กันจะถูกสุ่มเลือกเพื่อนำมาพัฒนาคำตอบโดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยใช้วิธีสุ่มสตริงข้างเคียงมาสองสตริงคำตอบ แล้วทำการครอสโอเวอร์ (Crossover) เพื่อให้ได้คำตอบรุ่นลูก (Offspring) หลังจากนั้นใช้วิธีเทบปีเซฟฟ์ เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงข้างเคียง ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกมีค่าเทบปีเซฟฟ์น้อยกว่าหรือเท่ากับสตริงคำตอบข้างเคียงนั้น ให้ทำการแทนที่สตริงคำตอบข้างเคียงนั้นด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก ซึ่งจะมีการดำเนินการที่เหมือนกันจนครบทุกปัญหาย่อยจนครบเงื่อนไขที่กำหนด (Zhang & Li, 2007) ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักโดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) x จำนวนวัตถุประสงค์ (m)
2. การคำนวณระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distance) ของเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก (λ_i) ระหว่างค่าน้ำหนักของทุกประชากร เพื่อกำหนดสตริงข้างเคียงสำหรับปัญหาย่อย โดยระยะทางของสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ที่ใกล้ปัญหาย่อยจะถูกกำหนดเป็นสตริงข้างเคียง และมีสตริงข้างเคียงได้ N_b สตริงคำตอบ ซึ่งมีการคำนวณระยะห่างระหว่างจุด ดังสมการที่ 4.1

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

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

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระให้มีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด
4. คำนวณค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น
5. กำหนดเซตของการเก็บคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) โดย $E = \emptyset$

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาคำตอบ

1. พัฒนาสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ด้วยวิธีการครอสโอเวอร์ จากการสุ่มเลือกสตริงคำตอบจากสตริงข้างเคียง (Neighborhood) มาจำนวน 2 สตริงคำตอบเพื่อนำมาสร้างเป็นสตริงคำตอบรุ่นลูก
2. ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution)
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด และจัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นกำหนดค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ (z_i^*) ในกรณีการหาค่าที่เหมาะสมน้อยที่สุด คือ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ หรือการหาค่าที่เหมาะสมที่มากที่สุด คือ $z_i^* = \max\{f_i(x)\}$
4. นอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณาและสตริงรุ่นลูก มาทำการการนอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ 4.2 (ตรัยรัตน์, 2560)

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(f_{i(\max)} + 0.0005) - z_i^*} \quad (4.2)$$

เมื่อ f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรปัจจุบันของวัตถุประสงค์ที่ i
 $f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุดในรอบปัจจุบันของวัตถุประสงค์ที่ i
 z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, m$

5. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ เป็นการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ โดยการนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก กับค่า λ_j ของสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อย

มาคำนวณเพื่อหาค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่ ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกมีค่าเทบปีเซฟฟ์น้อยกว่าหรือเท่ากับสตริงคำตอบ j ให้ทำการแทนที่สตริงข้างเคียงด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก ซึ่งกำหนดให้การแทนที่สตริงคำตอบได้ไม่เกิน Nr ครั้งในกลุ่มสตริงข้างเคียง โดยวิธีเทบปีเซฟฟ์ มีการคำนวณดังสมการที่ 4.3

$$g(x|\lambda_j, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} | \bar{f}_i | \} \quad (4.3)$$

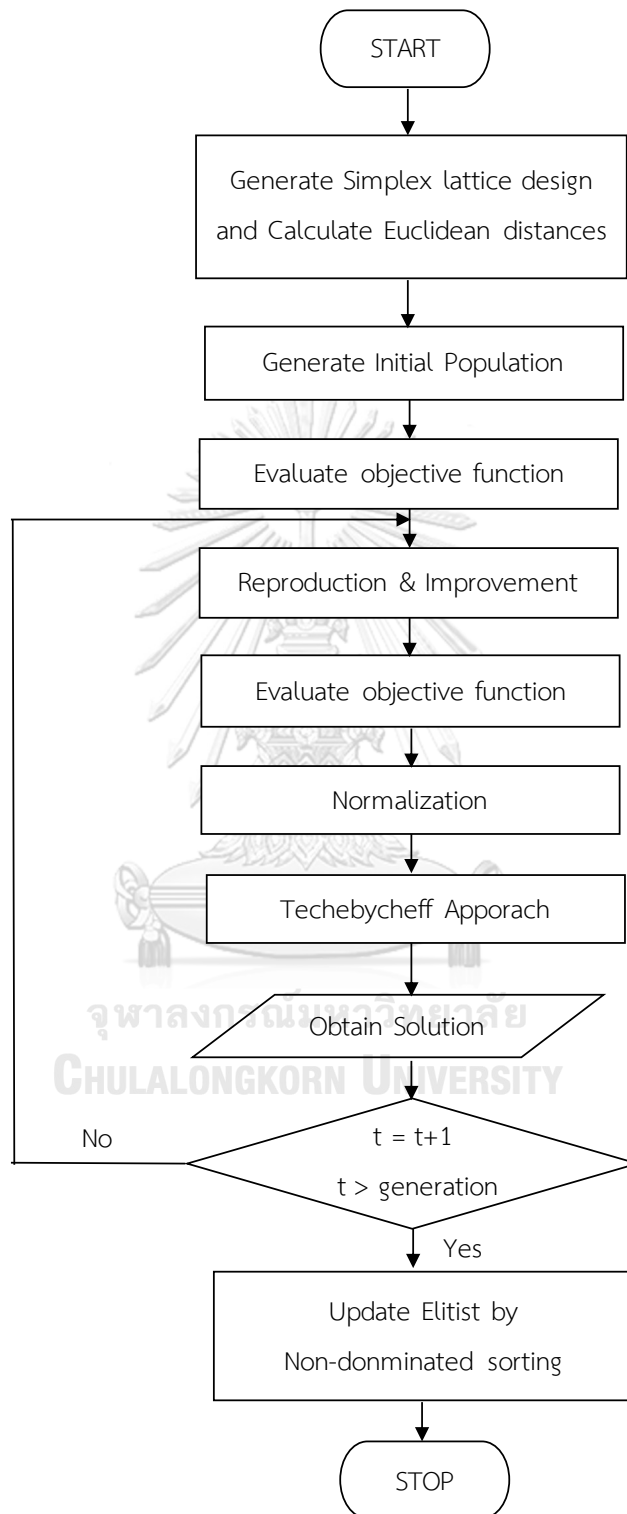
6. นำสตริงคำตอบทั้งหมดที่ได้จากการพัฒนาคำตอบของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นที่ 1 ของขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาคำตอบ

7. เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกรองงำ (Non-dominated Sorting)

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชัน แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีของอัลกอริทึม MOEA/D

4.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D



รูปภาพที่ 14 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

4.3 ตัวอย่างการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสาย

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก มีดังนี้

1. จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) 15 สตริงคำตอบ
2. จำนวนสตริงข้างเคียง (Nb) 4 สตริงคำตอบ
3. จำนวนการแทนที่สูงสุด (Nr) 1 สตริงคำตอบ

1. กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก λ_i

กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก λ_i ใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซ ดีไซน์ (Simplex lattice design) ซึ่งอยู่ในรูปของเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) x จำนวนวัตถุประสงค์ (m) โดยค่าในแถวที่ 1 จะเป็นค่าในพิกัดของเวกเตอร์น้ำหนัก λ_1 ซึ่งจำนวนพิกัดจะเท่ากับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่าน้ำหนักของประชากรจากซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (5 component with 2 degree without axial point and center point)

λ_j	ค่าน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์				
	Obj 1	Obj 2	Obj 3	Obj 4	Obj 5
1	0	0	0	0.5	0.5
2	0	1	0	0	0
3	0.5	0.5	0	0	0
4	1	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0
6	0	0.5	0.5	0	0
7	0	0	0	0	1
8	0	0.5	0	0	0.5
9	0.5	0	0	0	0.5

ตารางที่ 19 ค่าน้ำหนักของประชากรจากซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (5 component with 2 degree without axial point and center point) (ต่อ)

λ_j	ค่าน้ำหนักในแต่ละวัตถุประสงค์				
	Obj 1	Obj 2	Obj 3	Obj 4	Obj 5
10	0	0.5	0	0.5	0
11	0	0	0.5	0.5	0
12	0	0	0.5	0	0.5
13	0.5	0	0	0.5	0
14	0	0	0	1	0
15	0.5	0	0.5	0	0

จากตารางที่ 19 $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})^T$ คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อย j และ λ_{ij} คือค่าน้ำหนักของวัตถุประสงค์ที่ i ของปัญหาย่อยที่ j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, \dots, m, \lambda_{ij} \geq 0$ และ $\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 วัตถุประสงค์ ($m = 5$) ดังนั้น $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{51})^T = (0.1, 0.1, 0.6, 0.1, 0.1)^T$

2. การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของเวกเตอร์ค่าน้ำหนักและกำหนดสตริงข้างเคียงสำหรับปัญหาย่อย

คำนวณระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distance) ระหว่างค่าน้ำหนักของทุกประชากร โดยที่ $d_{jk} = \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} - \lambda_{ik})^2}$ เมื่อ d_{jk} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าน้ำหนักของสตริงที่ j กับสตริงที่ k โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N$ และ $i = 1, 2, \dots, m$

การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดจะพิจารณาทีละประชากร เพื่อหาระยะของประชากรที่กำลังพิจารณา กับประชากรทั้งหมด เริ่มต้นให้ประชากรที่กำลังพิจารณาเป็นประชากรตัวที่ 1 ค่าระยะห่าง Euclidean distance ของประชากรตัวที่ 1 กับประชากรตัวอื่นๆ จะสามารถหาได้ดังนี้ ตัวอย่างเช่น ค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับ ประชากรตัวที่ 2 = d_{12}

จาก $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \lambda_{31}, \lambda_{41}, \lambda_{51}) = (0, 0, 0, 0.5, 0.5)$

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= (\lambda_{12}, \lambda_{22}, \lambda_{32}, \lambda_{42}, \lambda_{52}) = (0, 1, 0, 0, 0) \\ d_{12} &= \sqrt{(\sum_{i=1}^m \lambda_{i1} - \lambda_{i2})^2} \\ &= \sqrt{(\lambda_{11} - \lambda_{12})^2 + (\lambda_{21} - \lambda_{22})^2 + (\lambda_{31} - \lambda_{32})^2 + (\lambda_{41} - \lambda_{42})^2 + (\lambda_{51} - \lambda_{52})^2} \\ &= \sqrt{(0 - 0)^2 + (0 - 1)^2 + (0 - 0)^2 + (0.5 - 0)^2 + (0.5 - 0)^2} \\ &= 1.225\end{aligned}$$

ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่างจุดของประชากรตัวที่ 1 กับ ประชากรตัวที่ 2 เท่ากับ 1.225 จากนั้นจึงคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักของประชากรตัวอื่นๆ จนกระทั่งครบทุกจำนวนประชากร แสดงดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักประชากรตัวที่ i กับประชากรตัวที่ j

j/ k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.00	1.22	1.00	1.22	1.22	1.00	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.00
2	1.22	0.00	0.71	1.41	1.41	0.71	1.41	3.39	1.22	0.71	1.22	1.22	1.22	1.41	1.22
3	1.00	0.71	0.00	0.71	1.22	0.71	1.22	0.71	0.71	0.71	1.00	1.00	0.71	1.22	0.71
4	1.22	1.41	0.71	0.00	1.41	1.22	1.41	1.22	0.71	1.22	1.22	1.22	0.71	1.41	0.71
5	1.22	1.41	1.22	1.41	0.00	0.71	1.41	1.22	1.22	1.22	0.71	0.71	1.22	1.41	0.71
6	1.00	0.71	0.71	1.22	0.71	0.00	1.22	0.71	1.00	0.71	0.71	0.71	1.00	1.22	0.71
7	0.71	1.41	1.22	1.41	1.41	1.22	0.00	0.71	0.71	1.22	1.22	0.71	1.22	1.41	1.22
8	0.71	3.39	0.71	1.22	1.22	0.71	0.71	0.00	0.71	0.71	1.00	0.71	1.00	1.22	1.00
9	0.71	1.22	0.71	0.71	1.22	1.00	0.71	0.71	0.00	1.00	1.00	0.71	0.71	1.22	0.71
10	0.71	0.71	0.71	1.22	1.22	0.71	1.22	0.71	1.00	0.00	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
11	0.71	1.22	1.00	1.22	0.71	0.71	1.22	1.00	1.00	0.71	0.00	0.71	0.71	0.71	0.71
12	0.71	1.22	1.00	1.22	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.00	0.71	0.00	1.00	1.22	0.71
13	0.71	1.22	0.71	0.71	1.22	1.00	1.22	1.00	0.71	0.71	0.71	1.00	0.00	0.71	0.71
14	0.71	1.41	1.22	1.41	1.41	1.22	1.41	1.22	1.22	0.71	0.71	1.22	0.71	0.00	1.22
15	1.00	1.22	0.71	0.71	0.71	0.71	1.22	1.00	0.71	1.00	0.71	0.71	0.71	1.22	0.00

เมื่อได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักประชากรแล้ว ให้กำหนดสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ให้แต่ละปัญหาย่อย โดยสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยจะถูกเลือกจากค่าระยะห่างของค่าน้ำหนักจากน้อยไปมากตามลำดับ โดยในตัวอย่างนี้ได้กำหนดให้มีสตริงข้างเคียงเท่ากับ 4 สตริงคำตอบ ตัวอย่างเช่น ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักประชากรจากน้อยไปมากของประชากรตัวที่ 1 กับทุกประชากร ได้แก่ d_{11} , d_{17} , d_{18} , d_{19} , $d_{1.10}$, $d_{1.11}$, $d_{1.12}$, $d_{1.13}$, $d_{1.14}$, d_{13} , d_{16} , $d_{1.15}$, d_{12} , d_{14} , d_{15} ดังนั้นสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 มี 4 สตริงคำตอบ คือ 1, 7, 8, 9 จากนั้นจึงพิจารณาค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักประชากรตัวอื่นๆ เพื่อหาสตริงข้างเคียงปัญหาย่อย แสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 สตริงข้างเคียงของของปัญหาย่อย

Subproblem	Neighborhood			
	1	2	3	4
1	1	7	8	9
2	2	3	6	8
3	3	2	4	6
4	4	3	9	13
5	5	6	11	12
6	6	5	8	3
7	7	8	9	12
8	8	7	9	6
9	9	8	7	12
10	10	11	8	13
11	11	10	12	13
12	12	11	9	15
13	13	14	11	15
14	14	13	11	10
15	15	13	12	11

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มแบบอิสระ โดยมีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด ซึ่งเลขลำดับ (Priority) มีค่าเท่ากับลำดับเครื่องจักร (Machine Sequence) แสดงตัวอย่างสตริงเริ่มต้นดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 สตริงคำตอบเริ่มต้น

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

4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริง สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทที่ 2 ดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.7 แสดงตัวอย่างการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	1	8.5477	2	-0.606	17.4523	0.0062
2	2	7.5858	2	-0.606	18.4141	0.3607
3	3	1.2252	2	-0.606	24.774	0.0818
4	4	1.2252	2	-0.606	24.7747	0.0818
5	5	6.151	2	-0.606	19.8489	0.4724
6	6	1.3650	2	-0.606	24.6349	0.0119
7	7	8.5476	2	-0.606	17.4523	0.0062
8	8	8.5476	2	-0.606	17.4523	0.0062
9	9	1.365	2	-0.606	24.6349	0.0119
10	10	14.7955	2	-0.606	11.2044	2.1191
11	11	14.7955	2	-0.606	11.2044	2.1191
12	12	8.5476	2	-0.606	17.4523	0.0062
13	13	9.0974	2	-0.606	16.9025	1.08
14	14	14.7955	2	-0.606	11.2044	2.1191
15	15	1.365	2	-0.606	24.6349	0.0119

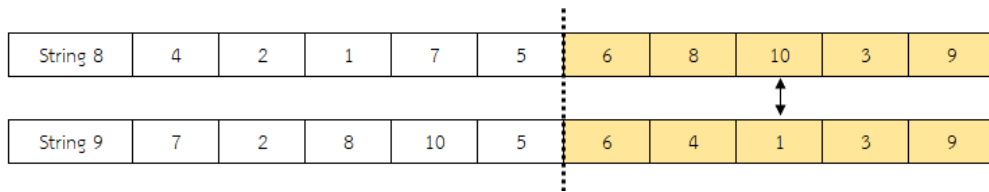
หมายเหตุ * f_3 แปลงค่าฟังก์ชันจากค่ามาก (Max) ให้อยู่ในรูปค่าน้อย (Min) เพื่อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันตัวอื่น

5. พัฒนาสตริงคำตอบและปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก

พัฒนาสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยใช้วิธีการครอสโอเวอร์ (Crossover) เป็นวิธีการนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงคำตอบเพื่อให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Partial-Mapped Crossover (PMX) โดยได้ยกตัวอย่างปัญหาย่อยที่ 1 มาทำการครอสโอเวอร์ มีขั้นตอนดังนี้

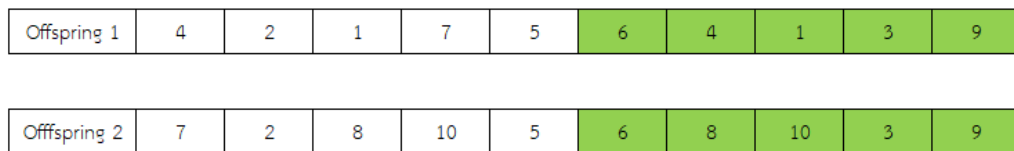
1. ปัญหาย่อยที่ 1 มีสตริงข้างเคียง คือ 1 7 8 และ 9 จากนั้นทำการสุ่มสตริงข้างเคียงมา 2 สตริง ซึ่งสุ่มได้สตริงที่ 8 และ 9

2. ทำการสุ่ม 1 ตำแหน่งในสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) เพื่อกำหนดจุดที่ครอสโอเวอร์ ซึ่งสุ่มได้ตำแหน่งที่ 5 โดยส่วนย่อยของสตริงที่อยู่หลังจากตำแหน่งที่ 5 หรือส่วนหางหลังจากตำแหน่งที่ 5 จะถูกสลับกับส่วนหางของอีกสตริงคำตอบ (Mapping section) ดังรูปภาพที่ 15



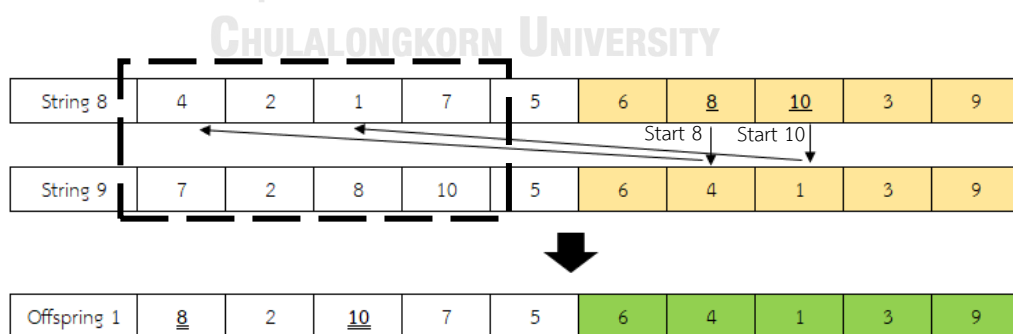
รูปภาพที่ 15 ตำแหน่งการครอสโอเวอร์ที่ได้จากการสุ่ม และสลับเปลี่ยนบางส่วนระหว่างสตริงพ่อแม่

3. ทำการแลกเปลี่ยนส่วนย่อยของสตริงพ่อแม่ที่อยู่หลังตำแหน่งที่ 5 จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกมา 2 สตริงคำตอบ ดังรูปภาพที่ 16

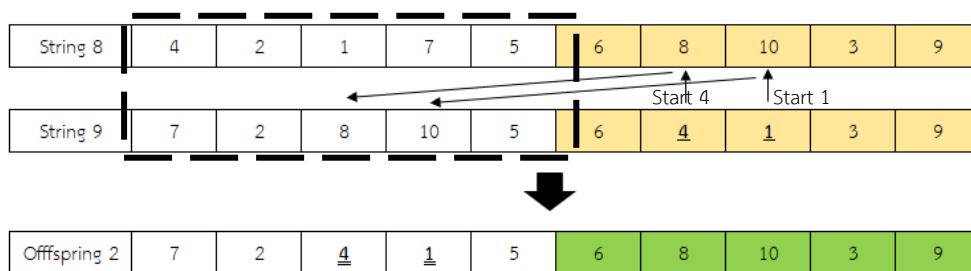


รูปภาพที่ 16 สตริงคำตอบรุ่นลูกที่เกิดจากการสลับเปลี่ยนบางส่วนของสตริงพ่อแม่

4. ทำการปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาว่าขาดตัวเลขใดในแต่ละสตริงคำตอบรุ่นลูก เนื่องจากได้ส่วนหาง (Mapping section) ของสตริงคำตอบรุ่นลูกมาแล้ว จึงทำการพิจารณาในส่วนหัวของสตริงรุ่นพ่อแม่เพื่อทำการสลับตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกันในของสตริงคำตอบรุ่นลูก และทำการสลับเปลี่ยนตำแหน่งจนมีครบทุกหมายเลข และนำส่วนหัวของพ่อแม่ที่ทำการสลับเปลี่ยนแล้วมารวมกับส่วนหางของรุ่นลูก เช่น Offspring 1 ไม่มีตัวเลขคือ 8 และ 10 ส่วน Offspring 2 ไม่มีตัวเลข คือ 1 และ 4 แสดงตัวอย่างดังรูปภาพที่ 17 และ 18



รูปภาพที่ 17 ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ของ Offspring 1



รูปภาพที่ 18 ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ของ Offspring 2

ดังนั้นจึงได้สตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการปรับปรุงของปัญหาย่อยตัวที่ 1 โดยเขียนเป็น Offspring 1.1 และ Offspring 1.2 ดังรูปภาพที่ 19

Offspring 1.1	8	2	10	7	5	6	4	1	3	9
Offspring 1.2	7	2	4	1	5	6	8	10	3	9

รูปภาพที่ 19 สตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการปรับปรุง

6. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด

คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด และจัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงพ่อแม่และลูก

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	8.5477	2	-0.606	17.4523	0.0062
2	7.5858	2	-0.606	18.4141	0.3607
3	1.2252	2	-0.606	24.774	0.0818
4	1.2252	2	-0.606	24.7747	0.0818
5	6.151	2	-0.606	19.8489	0.4724
6	1.3650	2	-0.606	24.6349	0.0119
7	8.5476	2	-0.606	17.4523	0.0062
8	8.5476	2	-0.606	17.4523	0.0062

ตารางที่ 24 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงพ่อแม่และลูก (ต่อ)

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
9	1.365	2	-0.606	24.6349	0.0119
10	14.7955	2	-0.606	11.2044	2.1191
11	14.7955	2	-0.606	11.2044	2.1191
12	8.5476	2	-0.606	17.4523	0.0062
13	9.0974	2	-0.606	16.9025	1.08
14	14.7955	3	-0.606	11.2044	2.1191
15	1.365	2	-0.606	24.6349	0.0119
Offspring 1.1	4.6929	2	-0.606	21.307	1.0958
Offspring 1.2	14.171	2	-0.606	21.307	1.0958

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูกแล้ว ให้จัดเก็บค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละวัตถุประสงค์ในรอบปัจจุบัน ซึ่งต้องหาค่าใหม่ในรอบที่เริ่มปัญหาย่อยถัดไปทั้งค่าสูงสุดและต่ำสุดของรอบนั้นๆ แสดงการเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของรอบปัญหาย่อยที่ 1 ในเจเนอเรชัน 1 ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของรอบปัญหาย่อยที่ 1 ในเจเนอเรชัน 1

ff	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
ff_{min}	1.2252	2	-0.606	11.2044	0.0062
ff_{max}	14.7955	2	-0.606	24.7747	2.1191

จากตารางที่ 25 สามารถค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์จากการเก็บค่าต่ำสุด คือ (z_i^*) เมื่อ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ ดังนั้น $z_1^* = 1.2252$, $z_2^* = 2$, $z_3^* = -0.606$, $z_4^* = 11.2044$ และ $z_5^* = 0.0062$

7. นอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่กำลังพิจารณาและสตริงรุ่นลูกมาทำการการนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการ 4.2 ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันค่าวัตถุประสงค์ที่นอมอลไลซ์ ดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบปัญหาย่อยที่ 1 และสตริงคำตอบรุ่นลูกหลังจากการทำงานมอลไลซ์

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	0.5395	0.0000	0.0000	0.4604	0.0000
7	0.5395	0.0000	0.0000	0.4604	0.0000
8	0.5395	0.0000	0.0000	0.4604	0.0000
9	0.0103	0.0000	0.0000	0.9896	0.0027
Offspring 1.1	0.2553	0.0000	0.0000	0.7444	0.5156
Offspring 1.2	0.9539	0.9539	0.0000	0.0460	0.9999

8. ประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์

เป็นการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ โดยการนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก กับค่าน้ำหนักเวกเตอร์ λ_j ของสตริงข้างเคียงปัญหาย่อย มาคำนวณเพื่อหาค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่ ถ้าสตริงคำตอบรุ่นลูกมีค่าเทบปีเซฟฟ์น้อยกว่าหรือเท่ากับสตริงข้างเคียง ให้ทำการแทนที่สตริงข้างเคียงด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก ในตัวอย่างนี้เลือก String 1 สำหรับปัญหาย่อยที่ 1 มาประเมินฟังก์ชันด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ของสตริงข้างเคียง มีตัวอย่างขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกตามสมการ 4.3 แสดงดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 ค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

Neighborhood String 1	$g(x \lambda_j, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} f_i - z_i^* \}$					ค่าเทบปีเซฟฟ์ $g(x \lambda_j, z^*)$
	obj 1	obj 2	obj 3	obj 4	obj 5	
Offspring 1.1	0	0	0	0	0	0
Offspring 1.2	0.5000	0	0	0	0	0.5000

2. เลือกสตริงคำตอบรุ่นลูกจากค่าฟังก์ชันเทบปีเซฟฟ์ที่ให้คำตอบที่มีค่าต่ำสุด ได้แก่ Offspring 1.1

3. คำนวณค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่เพื่อเกิดการแทนที่คำตอบด้วยสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยสุ่มสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อย มีความน่าจะเป็นในการสุ่มสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยเท่ากัน จากนั้นนำ

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก กับค่าน้ำหนักเวกเตอร์ λ_j ของสตริงข้างเคียงปัญหาย่อยที่สุ่มได้ มาคำนวณเพื่อหาค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่ จนครบการแทนที่คำตอบ Nr ครั้ง ในที่นี้กำหนดการแทนที่คำตอบคือ 1 สตริงคำตอบ โดยการแทนที่สตริงคำตอบ แบ่งเป็นกรณีได้ดังนี้

- ค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่มากกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์เดิม [New $g(x) > g(x)$] จะไม่เกิดการแทนที่คำตอบ
- ค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเทบปีเซฟฟ์เดิม [New $g(x) \leq g(x)$] จะเกิดการแทนที่คำตอบ

มีตัวอย่างดังนี้ สุ่มสตริงข้างเคียงได้ String 1 นำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับค่าน้ำหนักเวกเตอร์ λ_j มาคำนวณค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่ ดังนี้

String 1 มีเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคือ (0,0,0,0.5,0.5)

Offspring 1.1 มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลดโมโลซ์ตามลำดับวัตถุประสงค์ทั้ง 5 วัตถุประสงค์ คือ (0.2553, 0.0000,0.0000,0.7444,0.5156)

แทนค่าตามสมการ 4.3 ได้ดังนี้

$$\lambda_{11}|\bar{f}_1| = 0|0.2553| = 0$$

$$\lambda_{21}|\bar{f}_2| = 0|0.0000| = 0$$

$$\lambda_{31}|\bar{f}_3| = 0|0.0000| = 0$$

$$\lambda_{41}|\bar{f}_4| = 0.5|0.7444| = 0.3722$$

$$\lambda_{51}|\bar{f}_5| = 0.5|0.5156| = 0.2578$$

จากนั้นเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ ดังตารางที่ 28

ตารางที่ 28 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 1 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์

String	$g(x \lambda_j, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_{ij} f_i - z_i^* \}$					$g(x \lambda_j, z^*)$
1	0.3013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3013
Offspring 1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.3722	0.2578	0.3722

จากตารางที่ 29 ค่าเทบปีเซฟฟ์ของ Offspring 1.1 เท่ากับ 0.3722 และ String 1 เท่ากับ 0.3013 แสดงให้เห็นว่าค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่มากกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์เดิม (String 1) ดังนั้น จึงไม่เกิดการ แทนที่คำตอบ

หลังจากนั้น จึงทำการสุ่มสตริงข้างเคียงตัวถัดไป และทำขั้นตอนซ้ำตามขั้นตอนที่ 3 จนกว่า ครบจำนวนการแทนที่คำตอบ หรือไม่เกิดการแทนที่คำตอบได้เลย แสดงดังตารางที่ 29 30 และ 31 ตารางที่ 29 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 9 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์

String	$\lambda_{ij} f_i $					$g(x \lambda_j, z^*)$
9	0.0052	0.0014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0052
Offspring 1.1	0.1126	0.0000	0.0000	0.0000	0.2578	0.2578

ตารางที่ 30 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 8 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์

String	$\lambda_{ij} f_i $					$g(x \lambda_j, z^*)$
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Offspring 1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2578	0.2578

ตารางที่ 31 เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกกับสตริงคำตอบ 7 ด้วยวิธีการ เทบปีเซฟฟ์

String	$\lambda_{ij} f_i $					$g(x \lambda_j, z^*)$
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Offspring 1.1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.5156	0.5156

จากตารางที่ 29 30 และ 31 ให้ค่าเทบปีเซฟฟ์ใหม่ที่มีมากกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์เดิม ดังนั้นจะไม่เกิดการแทนที่คำตอบของสตริงรุ่นลูกกับสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ 1 ดังนั้นปัญหาย่อยที่ 1 จึงเป็นสตริงคำตอบเดิมคือ String 1

แสดงคำตอบหลังจากขั้นตอนประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ของเจเนอเรชันที่ 1 ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลังจากประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ของเจเนอเรชันที่ 1

Subproblem	Priority										f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
1	4	2	1	7	5	6	8	10	3	9	8.5477	2	-0.606	17.4523	0.0062
2	10	1	8	9	3	4	2	5	6	7	43.0346	3	-0.404	15.9654	3.7717
3	1	7	6	9	5	10	2	8	4	3	34.981	3	-0.404	24.019	6.1227
4	7	5	6	10	9	8	2	1	3	4	7.4822	2	-0.6061	18.5178	1.7149
5	4	10	5	8	3	9	1	6	2	7	34.1719	3	-0.404	24.8281	1.6857
6	2	10	8	5	6	3	9	1	7	4	36.1388	3	-0.404	22.8612	5.4066
7	7	5	10	1	6	9	2	3	4	8	41.8755	3	-0.404	17.1245	4.0853
8	4	3	5	6	1	7	8	9	2	10	9.7066	2	-0.6061	16.2933	0.9929
9	3	6	1	7	10	8	5	4	2	9	4.3500	2	-0.6061	21.6499	0.2748
10	2	10	5	1	6	8	3	7	9	4	40.288	3	-0.404	18.712	4.4585
11	7	8	10	9	5	6	4	1	3	2	9.0974	2	-0.6061	16.9025	0.8019
12	4	8	1	3	10	2	7	5	6	9	35.7721	3	-0.404	23.2279	4.7736
13	5	4	9	3	1	6	7	8	10	2	36.2857	3	-0.404	22.7143	2.7380
14	4	5	9	6	2	3	7	10	1	8	38.2876	3	-0.404	20.7124	4.8849
15	3	4	8	10	7	6	2	5	1	9	39.0932	3	-0.404	19.9068	4.7535

9. เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) แสดงตัวอย่างการเก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุดในเจเนอเรชัน 1 ดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 สตรีงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1

Subproblem	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness
1	1	8.5477	2	-0.606	17.4523	0.0062	1
2	2	43.0346	3	-0.404	15.9654	3.7717	1
3	3	34.981	3	-0.404	24.019	6.1227	1
4	4	7.4822	2	-0.6061	18.5178	1.7149	1
5	5	34.1719	3	-0.404	24.8281	1.6857	1
6	6	36.1388	3	-0.404	22.8612	5.4066	1
7	7	41.8755	3	-0.404	17.1245	4.0853	1
8	8	9.7066	2	-0.6061	16.2933	0.9929	1
9	9	4.3500	2	-0.6061	21.6499	0.2748	1
10	10	40.288	3	-0.404	18.712	4.4585	1
11	11	9.0974	2	-0.6061	16.9025	0.8019	1
12	12	35.7721	3	-0.404	23.2279	4.7736	1
13	13	36.2857	3	-0.404	22.7143	2.7380	1
14	14	38.2876	3	-0.404	20.7124	4.8849	1
15	15	39.0932	3	-0.404	19.9068	4.7535	1

10. การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชัน แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีของอัลกอริทึม MOEA/D

บทที่ 5

วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม และตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสาย

5.1 วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III

วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) มีหลักการในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ เพื่อหากลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุด โดยมีวิธีการสร้างจุดอ้างอิงจาก Simplex lattice design แล้วนำกลุ่มคำตอบมาเทียบระยะตั้งฉากกับจุดอ้างอิงทุกจุดบนระนาบวัตถุประสงค์ (Hyperplane) ถ้ากลุ่มคำตอบใดมีระยะตั้งฉากน้อยที่สุดกับจุดอ้างอิงนั้น จะถูกเลือกให้เป็นคำตอบที่ดี ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับ NSGA-II ในขั้นตอนการสร้างประชากรเริ่มต้น การสร้างรุ่นลูกของประชากร แต่จะมีความแตกต่างกันระหว่าง NSGA-II และ NSGA-III ในขั้นตอนดำเนินการหาคำตอบและเก็บคำตอบที่ดี ซึ่ง NSGA-III จะไม่มีวิธีการ Crowding distance แต่จะใช้จุดอ้างอิงเพื่อกำหนดทิศทางบนระนาบและหากลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากใกล้กับจุดอ้างอิง (Deb & Jain, 2014) ขั้นตอนการดำเนินการของ NSGA-III มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ค่าศูนย์ในทุกะนาบวัตถุประสงค์ โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) สร้างจุดอ้างอิงขึ้นมา ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) x จำนวนวัตถุประสงค์ (m)
2. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระให้มีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด
3. กำหนดเซตของการเก็บคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) โดย $E = \emptyset$

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาคำตอบ

1. พัฒนาสตริงคำตอบและปรับปรุงสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ด้วยวิธีการครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเตชัน (Mutation) ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent: P_t) เพื่อหาสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring: Q_t)
2. รวบรวมตริงคำตอบทั้งหมดจากรุ่นพ่อแม่และลูก ($R_t = P_t \cup Q_t$)
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด (R_t)
4. จัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นกำหนดค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ (z_i^*) ในกรณีการหาค่าที่เหมาะสมน้อยที่สุด คือ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ หรือการหาค่าที่เหมาะสมที่มากที่สุด คือ $z_i^* = \max\{f_i(x)\}$
5. นอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด สำหรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถใช้วิธีการนอร์มอลไลซ์ตามสมการ 4.2 ในบทที่ 4

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(f_{i(\max)} + 0.0005) - z_i^*}$$

เมื่อ f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของประชากรปัจจุบันสำหรับวัตถุประสงค์ที่ i

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

z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ที่ i

CHULALONGKORN UNIVERSITY

6. ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิง โดยนำกลุ่มคำตอบของสตริงทั้งหมด ที่ทำการนอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปดำเนินการหาความสัมพันธ์เทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุดบนระนาบวัตถุประสงค์ (Hyperplane) ด้วยวิธีการคำนวณหาระยะตั้งฉากของกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุด โดยกลุ่มคำตอบที่ดีจะถูกเลือกจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากกับเส้นอ้างอิงสั้นที่สุด ซึ่งหนึ่งจุดอ้างอิงจะมีคำตอบได้เพียงหนึ่งกลุ่มคำตอบในแต่ละเจเนอเรชัน ถ้าในกรณีที่จุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดซ้ำกับเส้นอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเป็นลำดับถัดไป
7. นำสตริงคำตอบทั้งหมดที่ได้จากการพัฒนาคำตอบของประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบัน ไปเป็นประชากรเริ่มต้นในเจเนอเรชันถัดไป แล้วให้กลับไปทำซ้ำในขั้นที่ 1 ของขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาคำตอบ

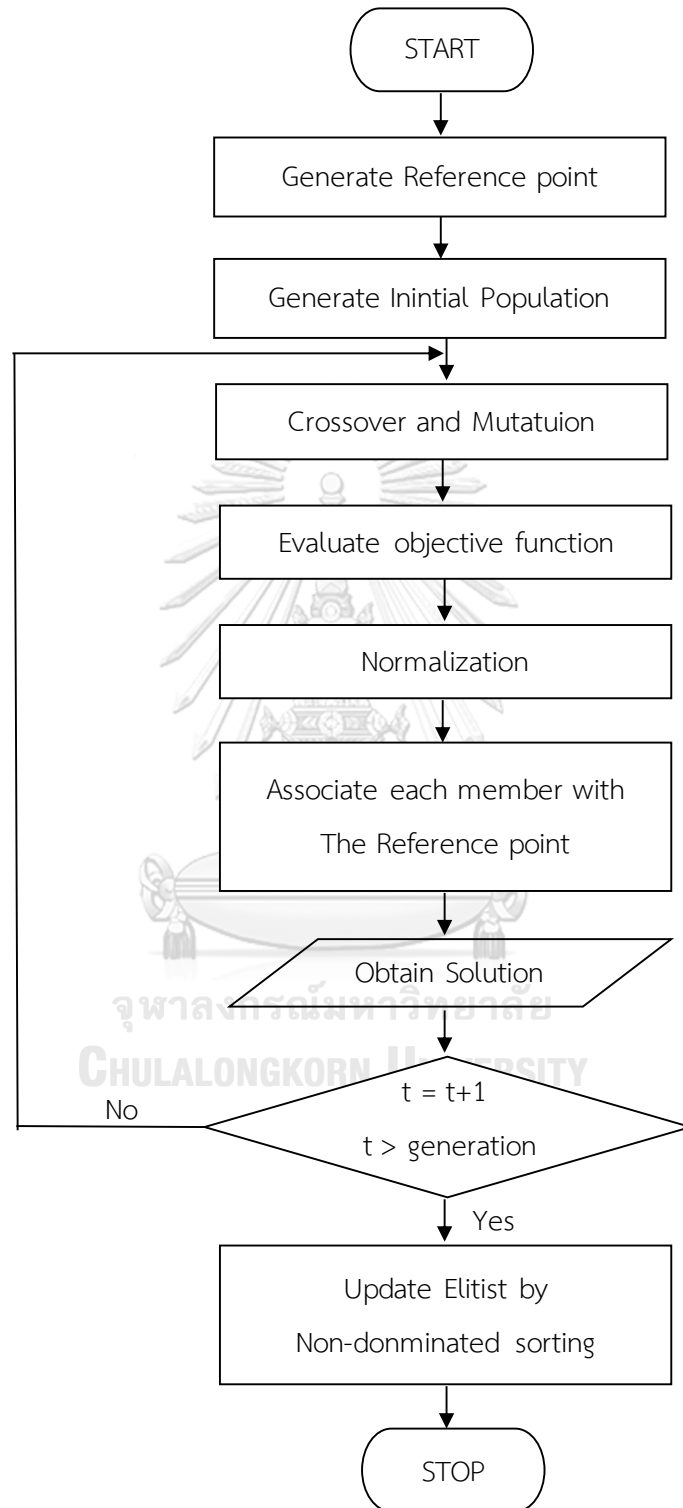
8. เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกรบกวน (Non-dominated Sorting)

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชัน แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีของอัลกอริทึม NSGA-III



5.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III



รูปภาพที่ 20 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III

5.3 ตัวอย่างการนำวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสาย

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III มีดังนี้

- | | | |
|--|-----|------------|
| 1. จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) | 10 | สตริงคำตอบ |
| 2. ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (P_c) | 0.9 | |
| 3. ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) | 0.1 | |

1. กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างจุดอ้างอิง (Reference point)

กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) และสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ค่าศูนย์ในทุกะนาบวัตถุประสงค์ โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซ ดีไซน์ (Simplex lattice design) สร้างจุดอ้างอิงขึ้นมา ซึ่งเป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m) โดยค่าในแถวที่ 1 จะเป็นค่าในพิกัดของเวกเตอร์จุดอ้างอิง λ_1 ซึ่งจำนวนพิกัดจะเท่ากับจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ค่าเวกเตอร์จุดอ้างอิงจากซิมเพล็กซ์แลตทิซ ดีไซน์ (5 component with 1 degree without center point)

λ_j	เวกเตอร์จุดอ้างอิง				
	Obj 1	Obj 2	Obj 3	Obj 4	Obj 5
1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.1
2	0	0	1	0	0
3	0	0	0	1	0
4	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1
5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6
6	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
7	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	1
9	1	0	0	0	0
10	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1

จากตารางที่ 35 $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})^T$ คือเวกเตอร์จุดอ้างอิงของปัญหาย่อยที่ j และ λ_{ij} คือเวกเตอร์จุดอ้างอิงของประสงค์ที่ i ของปัญหาย่อยที่ j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N, i = 1, 2, \dots, m, \lambda_{ij} \geq 0$ และ $\sum_{i=1}^m \lambda_{ij} = 1$ ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์จุดอ้างอิงของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 วัตถุประสงค์ ($m = 5$) ดังนั้น $\lambda_1 = (\lambda_{11}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{51})^T = (0.1, 0.1, 0.1, 0.6, 0.1)^T$

2. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มแบบอิสระ โดยมีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด ซึ่งเลขลำดับ (Priority) มีค่าเท่ากับลำดับเครื่องจักร (Machine Sequence) แสดงตัวอย่างสตริงเริ่มต้น ดังตารางที่ 35

ตารางที่ 35 สตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority									
1	6	3	7	8	5	1	2	4	9	10
2	6	1	7	4	9	5	8	3	10	2
3	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4
4	2	10	4	5	3	8	7	1	6	9
5	5	2	1	7	6	8	9	10	3	4
6	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7
7	8	9	2	10	3	7	4	1	5	6
8	7	4	8	2	6	10	9	3	1	5
9	6	1	9	4	10	3	8	7	2	5
10	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5

3. พัฒนาสตริงคำตอบและปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก

พัฒนาสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยใช้วิธีการครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเตชัน (Mutation)

- วิธีการครอสโอเวอร์ (Crossover)

เป็นวิธีการนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงคำตอบเพื่อให้ได้สตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring) ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Partial-Mapped Crossover (PMX) โดยได้ยกตัวอย่างปัญหาย่อยที่ 1 มาทำการครอสโอเวอร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าความน่าจะเป็น $P_c = 0.9$ จะทำให้ได้สตริงคำตอบ 90 เปอร์เซ็นต์ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือเท่ากับ $0.9 \times 10 = 9$ ตัว ที่จะถูกนำไปโครอสโอเวอร์

2. สุ่มค่า r ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด โดยสตริงคำตอบที่มีค่า r น้อยกว่า P_c จะถูกไปทำการโครอสโอเวอร์ ดังตารางที่ 36

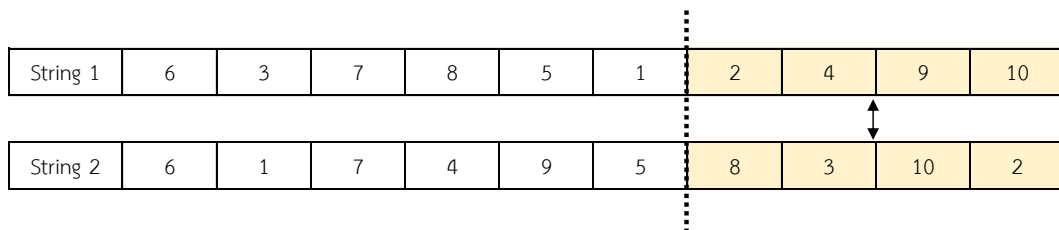
ตารางที่ 36 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกนำไปโครอสโอเวอร์

String	Priority										r_i	$r_i < 0.9$
1	6	4	7	9	5	1	8	3	10	2	0.5506	Selected
2	6	1	7	8	3	5	2	4	9	10	0.1984	Selected
3	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4	0.9298	-
4	2	10	4	5	3	8	7	1	6	9	0.4791	Selected
5	5	2	1	7	6	8	9	10	3	4	0.5828	Selected
6	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7	0.0647	Selected
7	8	9	2	10	3	7	4	1	5	6	0.5139	Selected
8	7	4	8	2	6	10	9	3	1	5	0.1769	Selected
9	6	1	9	4	10	3	8	7	2	5	0.2640	Selected
10	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5	0.8404	Selected

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. จับคู่โครอสโอเวอร์สตริงคำตอบที่มีค่า r น้อยกว่า P_c ตามลำดับ เช่น สตริง 1 กับ สตริง 2

4. ทำการสุ่ม 1 ตำแหน่งในสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) เพื่อกำหนดจุดที่โครอสโอเวอร์ซึ่งสุ่มได้ตำแหน่งที่ 6 โดยส่วนย่อยของสตริงที่อยู่หลังจากตำแหน่งที่ 6 หรือส่วนหางหลังจากตำแหน่งที่ 6 จะถูกสลับกับส่วนหางของอีกสตริงคำตอบ (Mapping section) ดังรูปภาพที่ 21



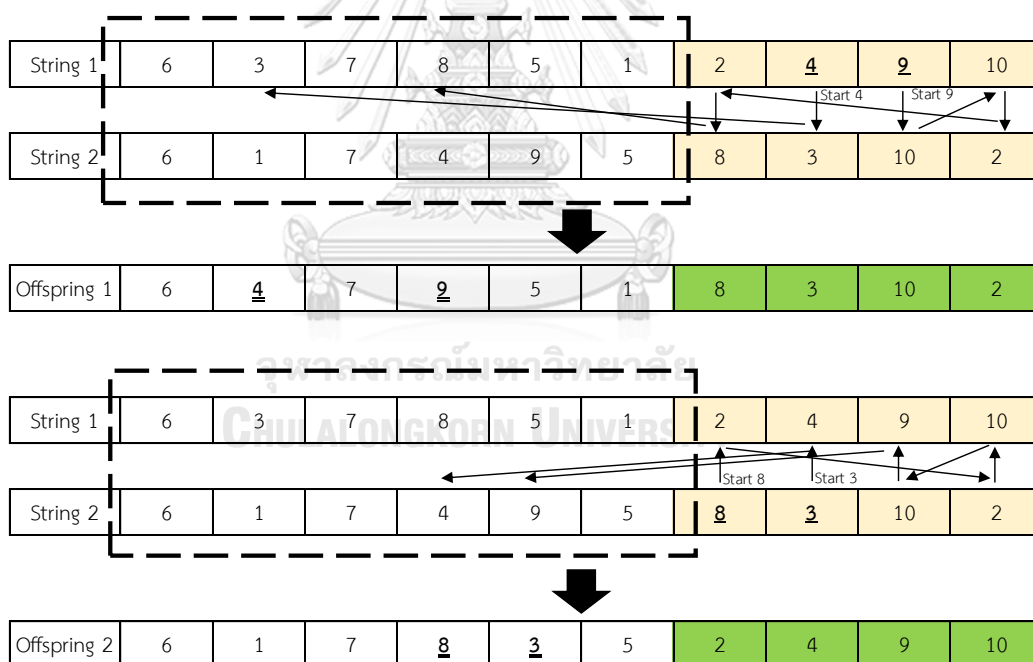
รูปภาพที่ 21 ตำแหน่งการโครอสโอเวอร์ที่ได้จากการสุ่ม และสลับเปลี่ยนระหว่างสตริงพ่อแม่

5. ทำการแลกเปลี่ยนส่วนย่อยของสตริงพ่อแม่ที่อยู่หลังตำแหน่งที่ 5 จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูก
มา 2 สตริงคำตอบ ดังรูปภาพที่ 22

Offspring 1	6	3	7	8	5	1	8	3	10	2
Offspring 2	6	1	7	4	9	5	2	4	9	10

รูปภาพที่ 22 สตริงคำตอบรุ่นลูกที่เกิดจากการสลับเปลี่ยนบางส่วนของสตริงพ่อแม่

6. ทำการปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ โดยพิจารณาว่าขาดตัวเลข
ใดในแต่ละสตริงคำตอบรุ่นลูก เนื่องจากได้ส่วนหางของสตริงคำตอบรุ่นลูกมาแล้ว จึงทำการพิจารณา
ในส่วนหัวสตริงรุ่นพ่อแม่เพื่อทำการสลับตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกับในส่วนหางของสตริงคำตอบรุ่นลูก และทำ
การสลับเปลี่ยนตำแหน่งจนมีครบทุกหมายเลข เช่น Offspring 1 ไม่มีตัวเลขคือ 4 และ 9 ส่วน
Offspring 2 ไม่มีตัวเลข คือ 8 และ 3 แสดงตัวอย่างดังรูปภาพที่ 23



รูปภาพที่ 23 ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกเพื่อให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้

ดังนั้นจึงได้สตริงคำตอบรุ่นลูกหลังการปรับปรุงของ String 1 และ 2 ดังรูปภาพที่ 24

Offspring 1	6	4	7	9	5	1	8	3	10	2
Offspring 2	6	1	7	8	3	5	2	4	9	10

รูปภาพที่ 24 สตริงคำตอบรุ่นลูก

7. ทำการปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูกที่เหลือทั้งหมดเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้

- วิธีการมิวเตชัน (Mutation)

การมิวเตชัน เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ไม่อาจเรียกคืน ในบางครั้งคำตอบที่ผ่านการดำเนินงานต่างๆ อาจเข้าไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ ทำให้การเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมด้วยการมิวเตชันช่วยให้คำตอบสามารถหลุดออกมาได้ คำตอบที่ดี โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งเป็นการสลับตำแหน่งตัวเลข 2 ตัวภายในสตริงคำตอบ โดยการพิจารณาว่าสตริงคำตอบใดจะถูกนำมามิวเตชันขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (P_m) (ปาไลดา, 2553) มีขั้นตอนการมิวเตชัน ดังนี้

1. กำหนดค่าความน่าจะเป็น $P_m = 0.1$ จะทำให้ได้สตริงคำตอบ 10 เปอร์เซนต์ของสตริงคำตอบทั้งหมด หรือเท่ากับ $0.1 \times 10 = 1$ ตัว ที่จะถูกนำไปมิวเตชัน

2. สุ่มค่า r ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด โดยสตริงคำตอบที่มีค่า r น้อยกว่า P_m จะถูกไปทำการมิวเตชัน แสดงดังตารางที่ 37

ตารางที่ 37 สตริงคำตอบที่ถูกเลือกนำไปมิวเตชัน

Subproblem	String	Priority										r_i	$r_i < 0.1$
1	1	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5	0.5450	-
2	2	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2	0.4625	-
3	3	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4	0.8664	-
4	4	3	7	1	9	8	4	10	5	6	2	0.2885	-
5	5	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5	0.9241	-
6	6	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2	0.4015	-
7	7	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8	0.0906	Selected
8	8	3	7	1	10	8	4	9	5	6	2	0.6828	-
9	9	6	10	4	3	5	1	9	8	7	2	0.7931	-
10	10	6	8	9	7	10	3	5	4	2	1	0.8441	-

3. ทำการมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation โดยสุ่มตำแหน่งตัวเลข 2 ตัว ภายในสตริงคำตอบเพื่อทำการสลับตำแหน่งของตัวเลข โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งทุกสตริงคำตอบที่ถูกทำมิวเตชัน แสดงการมิวเตชันดังรูปภาพที่ 25

String 7	9	1	5	3	10	2	7	6	4	8
↓										
Offspring 7	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8

รูปภาพที่ 25 การมิวเตชันของ String 7 ด้วยวิธี Reciprocal Exchange Mutation โดยสุ่มได้ ตำแหน่ง 2 และ 6

จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกคือ Offspring 7 ตามรูปภาพที่ 25 และนำไปรวมกับสตริงคำตอบ เริ่มต้น แสดงดังตารางที่ 38

ตารางที่ 38 สตริงคำตอบรุ่นลูก

Offspring	Priority									
1	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5
2	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2
3	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4
4	3	7	1	9	8	4	10	5	6	2
5	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5
6	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2
7	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8
8	3	7	1	10	8	4	9	5	6	2
9	6	10	4	3	5	1	9	8	7	2
10	6	8	9	7	10	3	5	4	2	1

4. รวบรวมสตริงคำตอบทั้งหมดจากรุ่นพ่อแม่และลูก ($R_t = P_t \cup Q_t$)

รวบรวมสตริงคำตอบทั้งหมดจากรุ่นพ่อแม่และลูก ดังตารางที่ 39

ตารางที่ 39 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก

String		Priority									
สตริง คำตอบ รุ่นพ่อ แม่ (P_t)	1	6	4	7	9	5	1	8	3	10	2
	2	6	1	7	8	3	5	2	4	9	10
	3	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4
	4	2	10	4	5	3	8	7	1	6	9
	5	5	2	1	7	6	8	9	10	3	4
	6	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7
	7	8	9	2	10	3	7	4	1	5	6
	8	7	4	8	2	6	10	9	3	1	5
	9	6	1	9	4	10	3	8	7	2	5
	10	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5
สตริง คำตอบ รุ่นลูก (Q_t)	11	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5
	12	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2
	13	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4
	14	3	7	1	9	8	4	10	5	6	2
	15	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5
	16	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2
	17	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8
	18	3	7	1	10	8	4	9	5	6	2
	19	6	10	4	3	5	1	9	8	7	2
	20	6	8	9	7	10	3	5	4	2	1

5. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด

คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด สามารถคำนวณค่าฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ แสดงได้ดังตารางที่ 40

ตารางที่ 40 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตรงค่าตอบรุ่นพ่อแม่และลูก

String	f_1	f_2	$*f_3$	f_4	f_5
1	69.500	5	-0.320	15.500	3.823
2	42.790	4	-0.400	17.210	2.553
3	21.590	3	-0.533	13.410	2.649
4	16.366	3	-0.533	18.634	0.471
5	26.945	3	0.533	8.055	1.663
6	50.254	4	-0.400	9.746	2.293
7	41.001	4	-0.400	19.000	3.361
8	41.591	4	-0.400	18.409	3.165
9	39.931	4	-0.400	20.069	3.129
10	44.188	4	0.400	15.812	2.817
11	52.342	4	-0.400	7.658	1.426
12	16.459	3	-0.533	18.541	0.450
13	21.590	3	-0.533	13.410	2.649
14	16.366	3	-0.533	18.634	0.471
15	26.945	3	-0.533	8.055	1.663
16	17.762	3	-0.533	17.238	1.854
17	41.001	4	-0.400	19.000	3.361
18	18.556	3	-0.533	16.444	1.195
19	18.952	3	-0.533	16.048	0.973
20	44.188	4	-0.400	15.812	2.817

หมายเหตุ * f_3 แปลงค่าฟังก์ชันจากค่ามาก (Max) ให้อยู่ในรูปค่าน้อย (Min) เพื่อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันตัวอื่น

6. จัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์

จัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงค่าตอบรุ่นพ่อแม่และลูก (R_i) จากนั้นกำหนดค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ (z_i^*) ในกรณีการหาค่าที่เหมาะสมน้อยที่สุด คือ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ หรือการหาค่าที่เหมาะสมที่มากที่สุด คือ $z_i^* = \max\{f_i(x)\}$ โดยให้จัดเก็บค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละวัตถุประสงค์ในรอบปัจจุบัน แสดงการเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุด ในเงื่อนไข 1 ดังตารางที่ 41

ตารางที่ 41 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก

ff	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
ff_{\max}	69.500	5	0.320	20.060	3.823
ff_{\min}	16.366	3	0.533	7.657	0.450

จากตารางที่ 42 สามารถหาค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์จากการหาค่าที่เหมาะสมน้อยที่สุดคือ (z_i^*) เมื่อ $z_i^* = \min\{f_i(x)\}$ ดังนั้น $z_1^* = 16.366$, $z_2^* = 3$, $z_3^* = 0.5333$, $z_4^* = 7.657$ และ $z_5^* = 0.450$

7. นอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด

นอร์มอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก สำหรับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถใช้วิธีการนอร์มอลไลซ์ตามสมการ 4.2 บทที่ 4 แสดงค่านอร์มอลไลซ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก ดังตารางที่ 42

ตารางที่ 42 ค่านอร์มอลไลซ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก

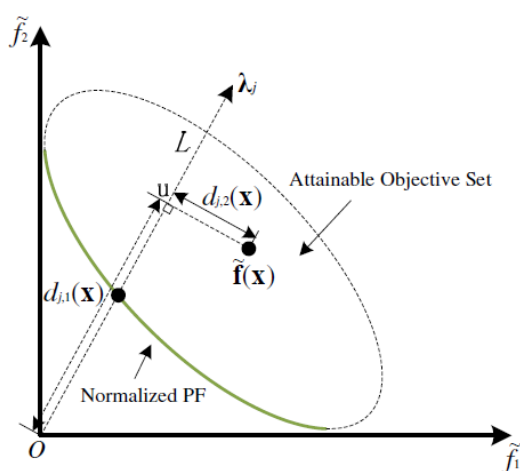
String	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
1	1.000	1.000	0.998	0.632	1.000
2	0.497	0.500	0.623	0.770	0.623
3	0.098	0.000	0.000	0.463	0.652
4	0.000	0.000	0.000	0.884	0.006
5	0.199	0.000	0.000	0.032	0.360
6	0.638	0.500	0.623	0.168	0.546
7	0.464	0.500	0.623	0.914	0.863
8	0.475	0.500	0.623	0.866	0.805
9	0.443	0.500	0.623	1.000	0.794
10	0.524	0.500	0.623	0.657	0.702
11	0.677	0.500	0.623	0.000	0.289
12	0.002	0.000	0.000	0.877	0.000
13	0.098	0.000	0.000	0.463	0.652
14	0.000	0.000	0.000	0.884	0.006
15	0.199	0.000	0.000	0.032	0.360

ตารางที่ 42 ค่านอมอลไลซ์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และลูก (ต่อ)

String	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
16	0.026	0.000	0.000	0.772	0.416
17	0.464	0.500	0.623	0.914	0.863
18	0.041	0.000	0.000	0.708	0.221
19	0.049	0.000	0.000	0.676	0.155
20	0.524	0.500	0.623	0.657	0.702

7. ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิง

ดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิง โดยนำกลุ่มคำตอบของสตริงทั้งหมด ที่ทำการนอมอลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไปดำเนินการหาความสัมพันธ์เทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุดบนระนาบวัตถุประสงค์ (Hyperplane) ด้วยวิธีการคำนวณหาระยะตั้งฉากของกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุด โดยกลุ่มคำตอบที่ดีจะถูกเลือกจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากกับเส้นอ้างอิงสั้นที่สุด ซึ่งหนึ่งจุดอ้างอิงจะมีคำตอบได้เพียงหนึ่งกลุ่มคำตอบในแต่ละเงื่อนไข ถ้าในกรณีจุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดซ้ำกับเส้นอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเป็นลำดับถัดไป แสดงวิธีการหาระยะตั้งฉาก ดังรูปภาพที่ 26



รูปภาพที่ 26 แสดงระยะ $d_{j,1}(x)$ และ $d_{j,2}(x)$ ของเวกเตอร์จุดอ้างอิงเทียบกับเวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ x ที่ถูกนอมอลไลซ์ (Yuan, Xu, & Wang, 2014)

จากรูปภาพที่ 26 สามารถคำนวณค่า $d_{j,1}(x)$ และ $d_{j,2}(x)$ ดังสมการที่ 5.1 และ 5.2

$$d_{j,1}(x) = \|\bar{f}_i(x)^T \lambda_j\| / \|\lambda_j\| \quad (5.1)$$

$$d_{j,2}(x) = \|\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j / \|\lambda_j\|)\| \quad (5.2)$$

เมื่อ	λ_j	คือ ค่าเวกเตอร์ของจุดน้ำหนักรที่ j
	$\bar{f}_i(x)$	คือ เวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลนอมอลไลซ์
	$\bar{f}_i(x)^T$	คือ เวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลนอมอลไลซ์โดยมีการเปลี่ยนแถวเป็นหลัก (Transpose)
	$ \quad $	คือ ขนาดของเวกเตอร์
	$d_{j,1}(x)$	คือ ระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นกับ u ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลนอมอลไลซ์ x ที่จุดอ้างอิง j , u คือ จุดฉายของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลนอมอลไลซ์บน L เมื่อ L คือ เวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นที่ลากผ่านจุดอ้างอิง j
	$d_{j,2}(x)$	คือ ระยะตั้งฉากของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลนอมอลไลซ์ x ที่จุดอ้างอิง j

ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดคำตอบกับเส้นอ้างอิง ดังนี้

1. สร้างขนาดของเวกเตอร์จุดอ้างอิง λ_j โดย $\lambda_j = (\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{mj})$

ตัวอย่างเช่น ขนาดของเวกเตอร์จุดอ้างอิง 1 คำนวณได้ดังนี้

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

$$|\lambda_1| = (0, 0, 0, 0.5, 0.5)$$

$$|\lambda_1| = \sqrt{(0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (0.5)^2 + (0.5)^2}$$

$$|\lambda_1| = 0.71$$

แสดงตารางขนาดเวกเตอร์จุดอ้างอิงทุกจุด ดังตารางที่ 43

ตารางที่ 43 ขนาดเวกเตอร์จุดอ้างอิง

λ_j	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
Obj 1	0.1	0	0	0.1	0.1	0.6	0	0	1	0.1
Obj 2	0.1	0	0	0.6	0.1	0.1	1	0	0	0.1
Obj 3	0.1	1	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.6
Obj 4	0.6	0	1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1
Obj 5	0.1	0	0	0.1	0.6	0.1	0	1	0	0.1
$ \lambda_j $	0.63	1.00	1.00	0.63	0.63	0.63	1.00	1.00	1.00	0.63

2. สร้างเวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ของกลุ่มคำตอบ

ตัวอย่างเช่น กลุ่มคำตอบที่ 1 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ ดังนี้

$$\bar{F}(x) = \{\bar{f}_1(x), \bar{f}_2(x), \bar{f}_3(x), \bar{f}_4(x), \bar{f}_5(x)\}$$

$$\bar{F}(1) = \{\bar{f}_1(1), \bar{f}_2(1), \bar{f}_3(1), \bar{f}_4(1), \bar{f}_5(1)\}$$

$$\bar{F}(1) = \{0.0093, 0, 0, 0.7937, 0\}$$

แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ ดังตารางที่ 44

ตารางที่ 44 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ของสตริงคำตอบที่ 1-20

String	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{f}_1	1.000	0.497	0.098	0.000	0.199	0.638	0.464	0.475	0.443	0.524
\bar{f}_2	1.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
\bar{f}_3	0.998	0.623	0.000	0.000	0.000	0.623	0.623	0.623	0.623	0.623
\bar{f}_4	0.632	0.770	0.463	0.884	0.032	0.168	0.914	0.866	1.000	0.657
\bar{f}_5	1.000	0.623	0.652	0.006	0.360	0.546	0.863	0.805	0.794	0.702

ตารางที่ 44 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ของสตริงคำตอบที่ 1-20 (ต่อ)

String	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
\bar{f}_1	0.677	0.002	0.098	0.000	0.199	0.026	0.464	0.041	0.049	0.524
\bar{f}_2	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.000	0.000	0.500
\bar{f}_3	0.623	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.623	0.000	0.000	0.623
\bar{f}_4	0.000	0.877	0.463	0.884	0.032	0.772	0.914	0.708	0.676	0.657
\bar{f}_5	0.289	0.000	0.652	0.006	0.360	0.416	0.863	0.221	0.155	0.702

3. สร้างเวกเตอร์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากหลักเป็นแถว (Transpose) ตามหลักการคูณเมทริกซ์

ตัวอย่างเช่น กลุ่มคำตอบที่ 1 มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากหลักเป็นแถว (Transpose) ดังนี้

$$\bar{F}(x)^T = (\bar{f}_1(x), \bar{f}_2(x), \bar{f}_3(x), \bar{f}_4(x), \bar{f}_5(x))^T$$

$$\bar{F}(1)^T = (\bar{f}_1(1), \bar{f}_2(1), \bar{f}_3(1), \bar{f}_4(1), \bar{f}_5(1))^T$$

$$\bar{F}(1)^T = (0.0093, 0, 0, 0.7937, 0)^T$$

แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลบโมลไลซ์ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากหลักเป็นแถว (Transpose) ดังตารางที่ 45

ตารางที่ 45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอมนอลไลซ์ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากหลักเป็นแถว (Transpose)

String	\bar{f}_1	\bar{f}_2	\bar{f}_3	\bar{f}_4	\bar{f}_5
1	1.000	1.000	0.998	0.632	1.000
2	0.497	0.500	0.623	0.770	0.623
3	0.098	0.000	0.000	0.463	0.652
4	0.000	0.000	0.000	0.884	0.006
5	0.199	0.000	0.000	0.032	0.360
6	0.638	0.500	0.623	0.168	0.546
7	0.464	0.500	0.623	0.914	0.863
8	0.475	0.500	0.623	0.866	0.805
9	0.443	0.500	0.623	1.000	0.794
10	0.524	0.500	0.623	0.657	0.702
11	0.677	0.500	0.623	0.000	0.289
12	0.002	0.000	0.000	0.877	0.000
13	0.098	0.000	0.000	0.463	0.652
14	0.000	0.000	0.000	0.884	0.006
15	0.199	0.000	0.000	0.032	0.360
16	0.026	0.000	0.000	0.772	0.416
17	0.464	0.500	0.623	0.914	0.863
18	0.041	0.000	0.000	0.708	0.221
19	0.049	0.000	0.000	0.676	0.155
20	0.524	0.500	0.623	0.657	0.702

3. คำนวณค่า $d_{j,1}(x)$ ของทุกสตรึงคำตอบ

คำนวณค่า $d_{j,1}(x)$ ของทุกสตรึงคำตอบจากสมการ 5.1 แสดงดังตารางที่ 46

ตารางที่ 46 ระบุ $d_{j,1}(x)$ ของทุกสตรึงคำตอบกับเวกเตอร์จุดอ้างอิง

$d_{j,1}(x)/\lambda_j$	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
1	1.231	0.998	0.632	1.522	1.522	1.522	1.000	1.000	1.000	1.521
2	1.085	0.623	0.770	0.872	0.969	0.870	0.500	0.623	0.497	0.969
3	0.558	0.000	0.463	0.192	0.707	0.270	0.000	0.652	0.098	0.192
4	0.840	0.000	0.884	0.141	0.146	0.141	0.000	0.006	0.000	0.141
5	0.119	0.000	0.032	0.093	0.378	0.251	0.000	0.360	0.199	0.093
6	0.524	0.623	0.168	0.787	0.823	0.896	0.500	0.546	0.638	0.884
7	1.254	0.623	0.914	0.927	1.214	0.898	0.500	0.863	0.464	1.025
8	1.202	0.623	0.866	0.912	1.153	0.892	0.500	0.805	0.475	1.010
9	1.322	0.623	1.000	0.927	1.159	0.882	0.500	0.794	0.443	1.024
10	0.995	0.623	0.657	0.870	1.030	0.889	0.500	0.702	0.524	0.968
11	0.330	0.623	0.000	0.726	0.559	0.866	0.500	0.289	0.677	0.823
12	0.832	0.000	0.877	0.139	0.139	0.140	0.000	0.000	0.002	0.139
13	0.558	0.000	0.463	0.192	0.707	0.270	0.000	0.652	0.098	0.192
14	0.840	0.000	0.884	0.141	0.146	0.141	0.000	0.006	0.000	0.141
15	0.119	0.000	0.032	0.093	0.378	0.251	0.000	0.360	0.199	0.093
16	0.802	0.000	0.772	0.192	0.521	0.213	0.000	0.416	0.026	0.192
17	1.254	0.623	0.914	0.927	1.214	0.898	0.500	0.863	0.464	1.025
18	0.713	0.000	0.708	0.153	0.328	0.186	0.000	0.221	0.041	0.153
19	0.674	0.000	0.676	0.139	0.262	0.178	0.000	0.155	0.049	0.139
20	0.995	0.623	0.657	0.870	1.030	0.889	0.500	0.702	0.524	0.968

2. คำนวณระยะ $d_{j,2}(x)$ จากสมการ 5.2 และเลือกกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดเทียบกับจุดอ้างอิง ซึ่งหนึ่งจุดอ้างอิงจะมีคำตอบได้เพียงหนึ่งกลุ่มคำตอบ ถ้าในกรณีจุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากสั้นที่สุดซ้ำกับจุดอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเป็นลำดับถัดไป แสดงระยะ $d_{j,2}(x)$ และการเลือกกลุ่มคำตอบ ดังตารางที่ 47

ตารางที่ 47 ระบุ $d_{j,2}(x)$ และการเลือกกลุ่มคำตอบที่ดีจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเทียบกับจุดอ้างอิง

$d_{j,2}(x) / \lambda_j$	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}
1	1.750	1.842	1.547	1.842	1.843	1.549	1.842	1.547	1.547	1.750
2	0.947	1.272	1.170	1.273	1.216	1.112	1.216	1.112	1.113	1.030
3	0.166	0.806	0.803	0.800	0.806	0.806	0.474	0.661	0.607	0.736
4	0.621	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.625
5	0.305	0.412*	0.387	0.361	0.412	0.412*	0.202	0.325*	0.118*	0.412
6	1.057	1.059	0.851	0.982	0.992	0.861	1.036	0.908	0.819	1.072
7	0.925	1.478	1.403	1.489	1.430	1.342	1.299	1.227	1.246	1.197
8	0.931	1.419	1.337	1.427	1.369	1.277	1.271	1.188	1.201	1.153
9	0.925	1.488	1.421	1.506	1.441	1.354	1.355	1.276	1.304	1.158
10	0.956	1.260	1.146	1.250	1.203	1.098	1.159	1.056	1.042	1.080
11	1.067	0.965	0.699	0.850	0.890	0.741	1.047	0.932	0.845	1.028
12	0.620	0.877	0.877	0.877	0.877*	0.877	0.877	0.877	0.877	0.620
13	0.166*	0.806	0.803	0.800	0.806	0.806	0.474	0.661	0.607	0.736
14	0.621	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.884	0.625
15	0.305	0.412*	0.387*	0.361	0.412	0.412	0.202	0.325	0.118	0.412*
16	0.253	0.877	0.877	0.877	0.877	0.877	0.772*	0.827	0.820	0.687
17	0.925	1.478	1.403	1.489	1.430	1.342	1.299	1.227	1.246	1.197
18	1.102	1.560	1.547	1.548	1.560	1.560	1.449	1.468	1.456	1.297
19	0.372	0.695	0.694	0.694*	0.695	0.695	0.678	0.687	0.680	0.505
20	1.026	1.355	1.337	1.337	1.355	1.355	1.282	1.289	1.268	1.133

หมายเหตุแสดงสัญลักษณ์ * ระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุด

_____ ระยะตั้งฉากที่ถูกเลือก (ระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดหรือสั้นลำดับถัดไป)

จากตารางที่ 47 จะเห็นได้ว่าในบางกลุ่มคำตอบสามารถเป็นคำตอบที่ดีให้กับจุดอ้างอิงได้หลายจุด เช่น สตริงคำตอบที่ 5 มีระยะตั้งฉากน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงที่ 2,6,8 และ 9 แต่สตริงคำตอบที่ 5 ถูกเลือกให้กับจุดอ้างอิง 2 แล้ว ดังนั้นต้องทำการเลือกสตริงคำตอบอื่นที่มีระยะตั้งฉากน้อยลงมาให้กับจุดอ้างอิงที่เหลือ

ดังนั้นจะได้สตริงคำตอบแต่ละจุดอ้างอิงในเงื่อนไขที่ 1 แสดงดังตารางที่ 48

ตารางที่ 48 สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละจุดอ้างอิงในเจเนอเรชัน 1

λ_j	String	Priority										f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
		2	10	8	9	1	5	7	6	3	4					
1	3	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4	21.590	3	-0.533	13.409	2.649
2	4	2	10	4	5	3	8	7	1	6	9	16.366	3	-0.533	18.633	0.471
3	5	5	2	1	7	6	8	9	10	3	4	26.944	3	-0.533	8.055	1.663
4	6	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7	50.253	4	-0.400	9.746	2.292
5	12	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2	16.458	3	-0.533	18.541	0.449
6	13	2	10	8	9	1	5	7	6	3	4	21.591	3	-0.533	13.409	2.649
7	14	3	7	1	9	8	4	10	5	6	2	16.366	3	-0.533	18.633	0.471
8	15	9	2	1	6	10	8	3	7	4	5	26.944	3	-0.533	8.055	1.661
9	16	1	5	7	3	4	6	8	9	10	2	17.762	3	-0.533	17.238	1.8544
10	19	6	10	4	3	5	1	9	8	7	2	18.951	3	-0.5333	16.048	0.9732

8. เก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) แสดงตัวอย่างการเก็บเซตของคำตอบที่ดีที่สุดในเจเนอเรชัน 1 ดังตารางที่ 49

ตารางที่ 49 สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness
1(3)	21.590	3	-0.533	13.409	2.649	1
2(4)	16.366	3	-0.533	18.633	0.471	1
3(5)	26.944	3	-0.533	8.055	1.663	1
4(6)	50.253	4	-0.400	9.746	2.292	1
5(12)	16.458	3	-0.533	18.541	0.449	1
6(13)	21.591	3	-0.533	13.409	2.649	1

ตารางที่ 49 สตริงคำตอบและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากการเก็บ Elitist ในเจเนอเรชัน 1 (ต่อ)

Subproblem	String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	Fitness
7	7(14)	16.366	3	-0.533	18.633	0.471	1
8	8(15)	26.944	3	-0.533	8.055	1.661	1
9	9(16)	17.762	3	-0.533	17.238	1.8544	1
10	10(19)	18.951	3	-0.533	16.048	0.9732	1

9. การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเจเนอเรชัน แสดงค่าคำตอบที่ดีที่สุดตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบ (Elitist) ซึ่งเป็นคำตอบของที่ดีของอัลกอริทึม NSGA-III



บทที่ 6

การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ในบทนี้จะนำเสนอตัวอย่างและวิธีการทดสอบพารามิเตอร์ ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (MODE) วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และ วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (NSGA-III) โดยใช้ตัวชี้วัดการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมได้แก่ ได้แก่ ด้านการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) ด้านการกระจายตัว (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison)) และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time)

6.1 การทดสอบค่าพารามิเตอร์

เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยนี้มีความหลากหลายและซับซ้อนแตกต่างกันไป จึงจำเป็นต้องทดสอบค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับแต่ละปัญหาของอัลกอริทึม ซึ่งจะใช้การออกแบบการทดลองในการกำหนดระดับพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ทดสอบ โดย Almeida (2010) ได้กล่าวไว้ว่าการวิเคราะห์การทดลองที่เหมาะสมจะช่วยให้แยกผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอัลกอริทึมได้ ซึ่งการพิจารณาระดับปัจจัยหลายระดับจะเป็นการทดลองที่มีขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากร และใช้เวลานานในการทดลอง ดังนั้นการลดระดับปัจจัยและพิจารณาเฉพาะระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาจึงเป็นสิ่งสำคัญ จึงเลือกใช้การทดลองแบบ 2^k โดยที่ k คือระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา ดังนั้นพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้จะถูกกำหนดอย่างมีหลักการโดยค่าพารามิเตอร์บางตัวจะอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา และนำปรับใช้ให้เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เพื่อให้อัลกอริทึมหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพและหาคำตอบได้ดีที่สุด โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

6.1.1 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MODE

1. จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population: N)

การกำหนดจำนวนประชากรของอัลกอริทึม จะขึ้นอยู่กับจำนวนวัตถุประสงค์ของปัญหา และวิธีการสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก โดยใช้วิธีซิมเพลกแลกทิตในการสร้างค่าน้ำหนัก ซึ่งจำนวนประชากรที่

เหมาะสมกับ 5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ 131 ดังนั้นจึงกำหนดให้จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 131

2. ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (Scaling Factor: F)

ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง เป็นพารามิเตอร์ควบคุมกำหนดระยะเคลื่อนของจุดพิกัด ยิ่งค่า F มากจะทำให้การเคลื่อนของจุดพิกัดห่างจากจุดเริ่มต้นมากส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าที่ดีกว่าในบริเวณใกล้เคียงจุดเริ่มต้นได้ แต่ถ้ากำหนดค่า F น้อยจะทำให้คำตอบอาจเข้าไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าปัจจัยการขยายผลต่างไว้ 2 ระดับ คือ 0.5 และ 1.0 (Storn & Price, 1996)

3. อัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR)

อัตราการครอสโอเวอร์ จะทำให้เกิดโอกาสการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่บนแต่ละสตริง ซึ่งค่า CR จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของคำตอบมาก ถ้าค่า CR มีค่าเท่ากับ 1 เวกเตอร์ทดลองจะมาจากเวกเตอร์กลายพันธุ์ทั้งหมด แต่ถ้า CR มีค่าเท่ากับ 0 เวกเตอร์ทดลองจะมาจากเวกเตอร์เป้าหมายทั้งหมด ซึ่งทั้งสองกรณีจะทำให้ทิศทางของคำตอบไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงต้องกำหนดอัตราการครอสโอเวอร์ ซึ่งแบ่งได้เป็นสองระดับคือ 0.7 และ 0.9 (ตรัยรัตน์, 2560)

6.1.2 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม MOEA/D

1. จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population: N)

การกำหนดจำนวนประชากรของอัลกอริทึม จะขึ้นอยู่กับจำนวนวัตถุประสงค์ของปัญหา และวิธีการสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก โดยใช้วิธีซิมเพลกแลกทิตในการสร้างค่าน้ำหนัก ซึ่งจะมีจำนวนเท่ากับ MODE ดังนั้นจึงกำหนดให้จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 131

2. จำนวนปัญหาข้างเคียง (Neighborhood size: Nb)

การกำหนดจำนวนปัญหาข้างเคียงจะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาคำตอบแต่ละรอบซึ่งกลุ่มปัญหาจะเปลี่ยนแปลงตามปัญหาที่ทำการพิจารณา การกำหนดปัญหาข้างเคียงจึงเป็นปัจจัยที่กำหนดทิศทางของการพัฒนาคำตอบอ้างอิงจาก (Zhang & Li, 2007) แบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ จำนวน 10 และ 20

3. จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Maximum number of solution replacement: Nr)

การกำหนดจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบสูงสุดเป็น เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อให้เกิดการแทนที่ที่เหมาะสม หากมีจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบที่มากเกินไปอาจจะทำให้เกิดคำตอบซ้ำซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการพัฒนาคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนครั้งในการแทนที่คำตอบแบ่งเป็นสองระดับ ได้แก่ 2 และ 5

6.1.3 พารามิเตอร์สำหรับอัลกอริทึม NSGA-III

1. จำนวนประชากรเบื้องต้น (Number of Population: N)

การกำหนดจำนวนประชากรของอัลกอริทึม จะขึ้นอยู่กับจำนวนวัตถุประสงค์ของปัญหา และวิธีการสร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก โดยใช้วิธีซิมเพลกแลกทิตในการสร้างค่าน้ำหนักซึ่งจะมีจำนวนเท่ากับ MODE และ MOEA/D ดังนั้นจึงกำหนดให้จำนวนประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 131

2. ความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (Crossover rate: Pc)

การครอสโอเวอร์ เป็นการแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงคำตอบ เพื่อให้ได้สตริงคำตอบรุ่นใหม่ ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและผลลัพธ์ที่ได้ของอัลกอริทึม ดังนั้นการกำหนดความน่าจะเป็นจะช่วยให้ได้ความหลากหลายทางคำตอบและมีโอกาสเจอคำตอบที่ดีมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ไว้ 2 ระดับ คือ 0.6 และ 0.9 (ปาไลตา, 2553)

3. ความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Mutation rate: Pm)

การมิวเตชัน เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ ในบางครั้งคำตอบที่ผ่านการดำเนินงานต่างๆ อาจเข้าไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ ทำให้การเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมด้วยการมิวเตชันช่วยให้คำตอบสามารถหลุดออกมาได้คำตอบที่ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระดับความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ไว้ 2 ระดับ คือ 0.1 และ 0.4 (ปาไลตา, 2553)

6.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

การทดสอบพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแต่ละอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม Minitab 17 มีดังนี้

1. ออกแบบการทดลองแบบ General Full Factorial Design โดยมีจำนวนพารามิเตอร์ที่จะทดสอบปัจจัยละ 2 ระดับ และจำนวนการทำซ้ำ 3 รอบ

2. ดำเนินงานอัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่จะทดสอบ และนำค่าตัวชี้วัดทั้ง 6 ตัวชี้วัด ซึ่งได้ผลลัพธ์จากการดำเนินงานอัลกอริทึมมาเป็นค่าตัวแปรตอบสนอง

3. ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนครั้งละ 1 ตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ด้วยวิธีตัดปัจจัยแบบย้อนกลับ (Analysis of Variance with Backward Elimination) และทำการทดสอบความแตกต่างด้วยวิธีฟิชเชอร์แพร์ไวส์ (Fisher pairwise comparison test) และพิจารณาตามหลักการต่อไปนี้

1) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction factor) ของค่าตัวแปรตอบสนองใด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จะตัดสินใจยอมรับว่าปัจจัยในแต่ละระดับที่ทำการทดสอบมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง และทำการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

2) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction factor) ของค่าตัวแปรตอบสนองใด ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือค่า p-value มากกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ จะตัดสินใจไม่ยอมรับว่า

ปัจจัยในแต่ละระดับที่ทำการทดสอบมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง และจะทำการพิจารณาต่อกับปัจจัยหลัก (Main Factor) เช่นเดียวกับการพิจารณาปัจจัยร่วม

3) ถ้าปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักของค่าตัวแปรตอบสนองไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ ให้ทำการพิจารณาค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ถัดไปจนกว่าจะยอมรับ หากไม่มีค่าใดที่สามารถยอมรับได้ ให้เลือกปัจจัยร่วมที่ใช้เวลาในการดำเนินงานอัลกอริทึมน้อยที่สุด

4. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

6.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึม MODE MOEA/D และ NSGA-III สามารถแบ่งระดับปัจจัยในการทดสอบอัลกอริทึม ดังตารางที่ 50

ตารางที่ 50 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

Algorithm	Number of Population	Parameter	Level factor		Generation	Replicate
MODE	131	F	0.5	1.0	2000	3
		CR	0.7	0.9		
MOEA/D	131	Nb	10	20	2000	3
		Nr	2	5		
NSGA-III	131	Pc	0.6	0.9	2000	3
		Pm	0.1	0.4		

6.3.1 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ MODE

ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ MODE ปัญหา S1 ดังตารางที่ 51 ตารางที่ 51 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา S1

Replicate	Level Factor		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Time
	F	CR						
1	0.5	0.9	0.0019	0.0240	0.4921	0.7405	0.2272	531.1250
1	0.5	0.7	0.0014	0.0292	0.7684	0.7252	0.2225	563.2813
1	1	0.7	0.0013	0.0184	0.4988	0.7863	0.2412	552.2500
1	1	0.9	0.0022	0.0227	0.6055	0.7634	0.2342	551.2188

ตารางที่ 51 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา S1 (ต่อ)

Replicate	Level Factor		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Time
	F	CR						
2	0.5	0.9	0.0023	0.0256	0.7740	0.7481	0.2295	563.6250
2	0.5	0.7	0.0023	0.0277	0.7641	0.6947	0.2131	573.2031
2	1	0.7	0.0013	0.0217	0.4867	0.7634	0.2342	559.4219
2	1	0.9	0.0029	0.0250	0.6301	0.7557	0.2319	544.2344
3	0.5	0.9	0.0016	0.0305	0.7455	0.7405	0.2272	555.5313
3	0.5	0.7	0.0016	0.0264	0.7652	0.7405	0.2272	560.3281
3	1	0.7	0.0017	0.0221	0.5731	0.7252	0.2225	565.7969
3	1	0.9	0.0028	0.0221	0.5285	0.7176	0.2201	556.2500

นำผลลัพธ์ตัวแปรตอบสนองทั้งหมดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบ (GD) ดังรูปภาพที่ 27

MODE: GD versus F, CR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: F, CR, F*CR

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
F	Fixed	2	0.5, 1.0
CR	Fixed	2	0.7, 0.9

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
F	1	0.000000	0.000000	0.62	0.453
CR	1	0.000001	0.000001	9.19	0.016
F*CR	1	0.000001	0.000001	5.54	0.046
Error	8	0.000001	0.000000		
Total	11	0.000003			

รูปภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบ (GD)
ปัญหา S1 (MODE)

จากรูปภาพที่ 27 ผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ MODE พบว่ามีปัจจัยร่วมให้ค่าแตกต่างกันมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง

หมายความว่า ปัจจัยค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (F) กับปัจจัยอัตราการครอสโอเวอร์ (CR) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ดังนั้นจึงทำ Comparison test ของ ปัจจัยค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (F) และปัจจัยอัตราการครอสโอเวอร์ (CR) เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

MODE: Fisher Pairwise Comparisons: Response = GD, Term = F*CR

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

F*CR	N	Mean	Grouping
1.0 0.9	3	0.0026224	A
0.5 0.9	3	0.0019334	A B
0.5 0.7	3	0.0017849	B
1.0 0.7	3	0.0014415	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 28 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา S1 (MODE)

จากรูปภาพที่ 28 การทำ Comparison test ของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (F) กับปัจจัยอัตราการครอสโอเวอร์ (CR) พบว่าที่ระดับปัจจัยร่วมที่ระดับ 1.0×0.7 ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ MODE สำหรับปัญหา S1 คือ $F=1.0$ และ $CR=0.7$

6.3.2 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ MOEA/D ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ MOEA/D ปัญหา L6 ดังตารางที่ 52

ตารางที่ 52 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา L6

Replicate	Level Factor		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Time
	Nb	Nr						
1	10	2	0.0067	0.0474	0.8459	0.9237	0.4187	991.1406
1	10	5	0.4670	1.2169	0.9889	0	0	1197.6406
1	20	2	0.3227	1.1829	0.9627	0	0	1014.4063
1	20	5	1.3991	2.4882	0.9897	0	0	1014.0938

ตารางที่ 52 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา L6 (ต่อ)

Replicate	Level Factor		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Time
	Nb	Nr						
2	10	2	0.3519	1.1743	0.9166	0.0534	0.0242	1240.1719
2	10	5	0.8471	1.2245	0.9680	0.0000	0.0000	891.0469
2	20	2	0.0000	0.3451	0.9970	1.0000	0.4533	1017.7656
2	20	5	2.0368	2.5282	0.9965	0	0	993.4844
3	10	2	0.1717	1.1585	0.9008	0.1908	0.0865	1577.5781
3	10	5	1.3835	2.4922	0.9954	0	0	986.3750
3	20	2	0.2074	1.1728	0.9640	0.0153	0.0069	1021.5156
3	20	5	0.2689	1.1965	0.9868	0.0229	0.0104	1039.5938

นำผลลัพธ์ตัวแปรตอบสนองทั้งหมดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ ดังรูปภาพที่ 29

MOEA/D: GD versus Nb, Nr

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: Nb, Nr, Nb*Nr

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	10, 20
Nr	Fixed	2	2, 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.08452	0.08452	0.32	0.589
Nr	1	2.37807	2.37807	8.89	0.018
Nb*Nr	1	0.08458	0.08458	0.32	0.589
Error	8	2.14034	0.26754		
Total	11	4.68750			

รูปภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD)

ปัญหา L6 (MOEA/D)

จากรูปภาพที่ 29 ผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ MOEA/D พบว่ามีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัยให้ค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) มีอิทธิพลต่อตัวแปร

ตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ดังนั้นจึงทำ Comparison test ของ ปัจจัยจำนวน การแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

MOEA/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = GD, Term = Nr

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nr	N	Mean	Grouping
5	6	1.06706	A
2	6	0.17673	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 30 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา L6 (MOEA/D)

จากรูปภาพที่ 30 การทำ Comparison test ของปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) พบว่าที่ระดับปัจจัย 2 ให้คำตอบสนองดีที่สุด และทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไปเพื่อหาปัจจัยจำนวน ปัญหาข้างเคียง (Nb) ที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

MOEA/D: IGD versus Nb, Nr

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: Nb, Nr, Nb*Nr

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	10, 20
Nr	Fixed	2	2, 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.21331	0.21331	0.48	0.506
Nr	1	3.06586	3.06586	6.96	0.030
Nb*Nr	1	0.07659	0.07659	0.17	0.688
Error	8	3.52295	0.44037		
Total	11	6.87872			

รูปภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความ หลากหลายของคำตอบ (IGD) ปัญหา L6 (MOEA/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance ของ MOEA/D พบว่ามีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัยให้ค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) มีอิทธิพลต่อตัวแปร ตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง แต่เนื่องจากปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr)

ถูกสรุปค่าระดับปัจจัยที่ดีที่สุดกับตัวชี้วัด Generational Distance แล้ว จึงต้องทำการหาตัวชี้วัดถัดไป เพื่อหาปัจจัยจำนวนปัญหาข้างเคียง (Nb) ที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

MOEA/D: Spread versus Nb, Nr

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: Nb, Nr, Nb*Nr

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	10, 20
Nr	Fixed	2	2, 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.006590	0.006590	13.27	0.007
Nr	1	0.009537	0.009537	19.20	0.002
Nb*Nr	1	0.004784	0.004784	9.63	0.015
Error	8	0.003973	0.000497		
Total	11	0.024884			

รูปภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ปัญหา L6 (MOEA/D)

จากรูปภาพที่ 32 ผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Distribution and Spread พบว่า ปัจจัยร่วมระหว่างจำนวนปัญหาข้างเคียง (Nb) กับ จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) ให้ค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยจำนวนปัญหาข้างเคียง (Nb) กับปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านความหลากหลายของคำตอบ ถึงแม้ปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) ถูกสรุปค่าระดับปัจจัยที่ดีที่สุดกับตัวชี้วัด Generational Distance แต่ปัจจัยร่วมมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง ดังนั้นจึงต้องทำ Comparison test ของปัจจัยร่วมระหว่างจำนวนปัญหาข้างเคียง (Nb) กับปัจจัยจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

MOEA/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = Spread, Term = Nb*Nr

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb*Nr	N	Mean	Grouping
20 5	3	0.991003	A
10 5	3	0.984070	A
20 2	3	0.974557	A
10 2	3	0.887753	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 33 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ปัญหา L6 (MOEA/D)

จากรูปภาพที่ 33 การทำ Comparison test ของปัจจัยร่วมระหว่างจำนวนปัญหาข้างเคียง (Nb) กับ จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (Nr) พบว่าที่ระดับปัจจัยร่วมที่ระดับ $10*2$ ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ MOEA/D สำหรับปัญหา L6 คือ Nb=10 และ Nr=2

6.3.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ NSGA-III

ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลองของ NSGA-III ปัญหา S1 ดังตารางที่ 53

ตารางที่ 53 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ NSGA-III ปัญหา S1

Replicate	Level Factor		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Time
	Pc	Pm						
1	0.6	0.4	2.8795	0.7173	0.8129	0.0076	0.0152	496.4060
1	0.6	0.1	2.9682	0.9239	0.9252	0.0000	0.0000	537.7340
1	0.9	0.1	0.0368	0.0417	0.7526	0.6444	0.3671	366.0000
1	0.9	0.4	2.7689	0.8674	0.9031	0.0000	0.0000	483.1560
2	0.6	0.4	0.0006	0.0444	0.9101	0.7879	0.3939	443.8590
2	0.6	0.1	0.0317	0.0315	0.9376	0.8485	0.4242	446.7970
2	0.9	0.1	0.1781	0.0747	0.8926	0.4000	0.1772	398.1090
2	0.9	0.4	3.0224	0.7739	0.8380	0.0076	0.0127	491.6410
3	0.6	0.4	0.0096	0.0818	0.9425	0.6667	0.1818	437.9690
3	0.6	0.1	2.6022	0.7196	0.7978	0.0229	0.0455	541.7970

ตารางที่ 53 ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ NSGA-III ปัญหา S1 (ต่อ)

Replicate	Level Factor		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Time
	Pc	Pm						
3	0.9	0.1	0.0020	0.0192	0.7988	0.8776	0.5443	358.2810
3	0.9	0.4	2.9283	0.8034	0.8552	0.0000	0.0000	493.3130

นำผลลัพธ์ตัวแปรตอบสนองทั้งหมดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากค่าตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ ดังรูปภาพที่ 34

NSGA III: GD versus Pc, Pm

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: Pc, Pm, Pc*Pm

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Pc	Fixed	2	0.6, 0.9
Pm	Fixed	2	0.1, 0.4

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pc	1	0.0165	0.0165	0.01	0.914
Pm	1	2.7941	2.7941	2.09	0.186
Pc*Pm	1	10.4814	10.4814	7.85	0.023
Error	8	10.6800	1.3350		
Total	11	23.9720			

รูปภาพที่ 34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าสู่คำตอบ (GD)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปัญหา S1 (NSGA-III)

จากรูปภาพที่ 34 ผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ NSGA-III พบว่ามีปัจจัยร่วมให้ค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหมายความว่า ความน่าจะเป็นในครอสโอเวอร์ (Pc) กับความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Pm) มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง ดังนั้นจึงทำ Comparison test ของ ความน่าจะเป็นในครอสโอเวอร์ (Pc) และความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Pm) เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

NSGA III: Fisher Pairwise Comparisons: Response = GD, Term = Pc*Pm

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Pc*Pm	N	Mean	Grouping
0.9 0.4	3	2.90653	A
0.6 0.1	3	1.86735	A B
0.6 0.4	3	0.96324	A B
0.9 0.1	3	0.07230	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 35 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าสู่คำตอบ (GD) ปัญหา S1 (NSGA-III)

จากรูปภาพที่ 35 การทำ Comparison test ของปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัยความน่าจะเป็นในครอสโอเวอร์ (Pc) กับปัจจัยความน่าจะเป็นในการมิวเทชัน (Pm) พบว่าที่ระดับปัจจัยร่วมที่ระดับ $0.9*0.1$ ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ NSGA-III สำหรับปัญหา S1 คือ $Pc=0.9$ และ $Pm=0.1$

6.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ แสดงสัญลักษณ์และความหมายสัญลักษณ์ ดังนี้

- เมื่อ x คือ แต่ละระดับปัจจัย ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
- คือ ไม่มีการวิเคราะห์ปัจจัย เนื่องจากได้ผลการวิเคราะห์แล้ว

ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย (ระดับปัจจัยหลักมีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง)

ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย (ระดับปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง)

ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัย ที่ถูกนำมาประเมินใหม่ เนื่องจากเกิดปัจจัยร่วมของตัวแปรตอบสนองอื่น

แสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6 โดยที่ S1-S6 คือ ปัญหาขนาดเล็ก M1-M6 คือ ปัญหาขนาดกลาง และ L1-L6 คือ ปัญหาขนาดใหญ่ ดังตารางที่ 54

ตารางที่ 54 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
S1	MODE	F	<u>1</u>	-	-	-	-
		CR	<u>0.7</u>	-	-	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	<u>0.9</u>	-	-	-	-
		Pm	<u>0.1</u>	-	-	-	-
S2	MODE	F	0.5	-	-	-	-
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	<u>0.9</u>	-	-	-	-
		Pm	<u>0.4</u>	-	-	-	-

ตารางที่ 54 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6 (ต่อ)

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
S3	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	10	-	-	-
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	<u>0.9</u>	-	-	-	-
		Pm	<u>0.4</u>	-	-	-	-
S4	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	0.4	-	-	-
S5	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	<u>20</u>	-	-
		Nr	x	x	<u>5</u>	-	-
	NSGA III	Pc	x	0.9	-	-	-
		Pm	x	x	x	x	x
S6	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x

ตารางที่ 54 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6 (ต่อ)

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
M1	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	10	-	-
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
M2	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	2	-	-	-	-
	NSGA III	Pc	0.6	-	-	-	-
		Pm	x	x	x	x	x
M3	MODE	F	x	0.5	<u>0.5</u>	-	-
		CR	0.7	-	<u>0.7</u>	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	-	-	-	-	-
		Pm	-	-	-	-	-
M4	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	<u>10</u>	-	-
		Nr	x	x	<u>2</u>	-	-
	NSGA III	Pc	0.6	-	-	-	-
		Pm	x	x	x	x	x

ตารางที่ 54 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6 (ต่อ)

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
M5	MODE	F	x	x	<u>0.5</u>	-	-
		CR	x	x	<u>0.9</u>	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	2	-	-	-	-
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
M6	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.9	-	-	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	5	-
	NSGA III	Pc	<u>0.6</u>	-	-	-	-
		Pm	<u>0.4</u>	-	-	-	-
L1	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.7	-	-	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	2	-	-
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
L2	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.7	-	-	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x

ตารางที่ 54 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ปัญหา S1-L6 (ต่อ)

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
L3	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.7	-	-	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
L4	MODE	F	x	x	-	-	-
		CR	x	x	0.7	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	0.9	-	-	-
		Pm	x	x	x	x	x
L5	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.7	-	-	-	-
	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		Nr	x	x	x	x	x
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	0.4	-
L6	MODE	F	<u>1</u>	x	x	x	x
		CR	<u>0.7</u>	x	x	x	x
	MOEA/D	Nb	x	x	10	-	-
		Nr	<u>2</u>	-	2	-	-
	NSGA III	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x

6.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ผลของค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดกับแต่ละปัญหาแต่ละอัลกอริทึม แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 55

ตารางที่ 55 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของปัญหา S1-L6

Size	Problem	MODE		MOEA/D		NSAGA-III	
		F	CR	Nb	Nr	Pc	Pm
Small	S1	1	0.7	10	2	0.9	0.1
	S2	0.5	0.9	10	5	0.9	0.4
	S3	1	0.7	10	5	0.9	0.4
	S4	1	0.9	10	2	0.6	0.4
	S5	1	0.9	20	5	0.9	0.1
	S6	1	0.7	20	2	0.9	0.1
Medium	M1	0.5	0.9	10	2	0.9	0.1
	M2	1	0.7	10	2	0.6	0.4
	M3	0.5	0.7	10	2	0.9	0.1
	M4	0.5	0.7	10	2	0.6	0.1
	M5	0.5	0.9	10	2	0.9	0.1
	M6	1	0.9	10	5	0.6	0.4
Large	L1	1	0.7	20	2	0.6	0.4
	L2	0.5	0.7	20	2	0.9	0.1
	L3	0.5	0.7	10	2	0.6	0.4
	L4	1	0.7	10	5	0.9	0.1
	L5	0.5	0.7	10	2	0.9	0.4
	L6	1	0.7	10	2	0.9	0.1

บทที่ 7

การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

ในบทนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม โดยมีอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกัน 3 อัลกอริทึม ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (MODE) วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) ซึ่งนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ แบ่งเป็นปัญหาเล็ก กลาง และใหญ่ ทั้งหมด 18 ปัญหา โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะ 6 ตัวชี้วัด ได้แก่ การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison)) และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time)

7.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม

การดำเนินงานทดสอบสมรรถนะของการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ดำเนินการแก้ปัญหา 18 ปัญหาด้วยอัลกอริทึม MODE MOEA/D และ NSGA-III โดยมีจำนวนเจเนอเรชันในการพัฒนาคำตอบ จำนวน 2000 รอบ มีการทำซ้ำจำนวน 3 รอบ
2. รวบรวมคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากแต่ละอัลกอริทึม (Obtained Pareto-optimal Solution) จากนั้นทำการจัดอันดับคำตอบทั้งหมดด้วยวิธี Non-dominated Sorting โดยคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 (fitness 1) จะถูกกำหนดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto-Optimal Solution)
3. ประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกันด้วยตัวชี้วัดซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด ได้แก่ การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Convergence to Pareto-Optimal Set) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลาย (Convergence and diversity) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio Of Non-Dominated Solution (Self-Comparison)) อัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับ

กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Ratio Of Non-Dominated Solution (Pareto-optimum Comparison) และเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time)

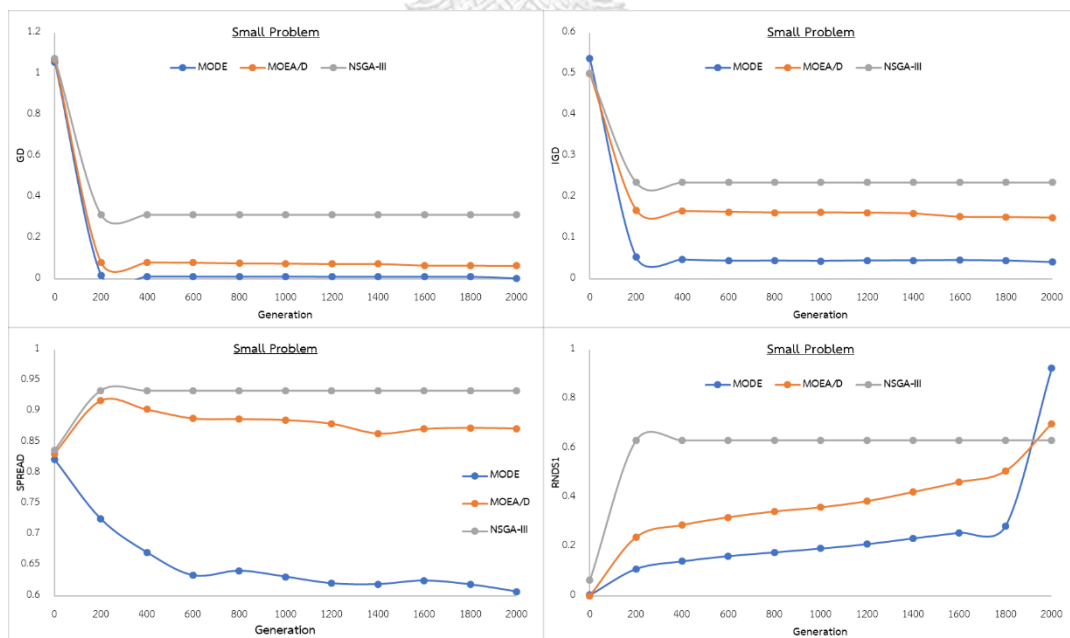
ในงานวิจัยนี้ใช้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB 2019a ประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ Intel® Core™ i5-7200U CPU@2.50GHz RAM 8 GB Windows 10 64 bit Operation System ในการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์

7.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

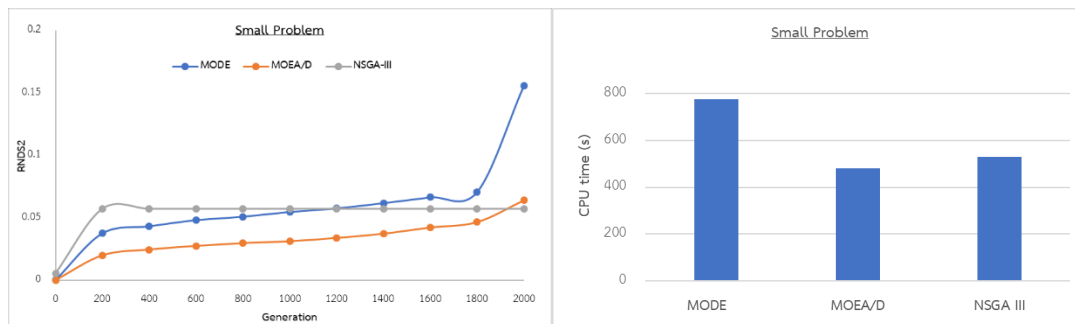
เมื่อทำการประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึม MODE MOEA/D และ NSGA-III แล้วจากนั้นนำมาเปรียบเทียบกันด้วยตัวชี้วัดซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมและผลการทดลองของแต่ละปัญหาจะแสดงในภาคผนวก ข. ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก กลางและใหญ่

7.2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบของปัญหาขนาดเล็กตั้งแต่ S1-S6 ดังรูปภาพที่ 36 และตารางที่ 56



รูปภาพที่ 36 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก



รูปภาพที่ 36 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก (ต่อ)

ตารางที่ 56 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ปัญหาขนาดเล็ก

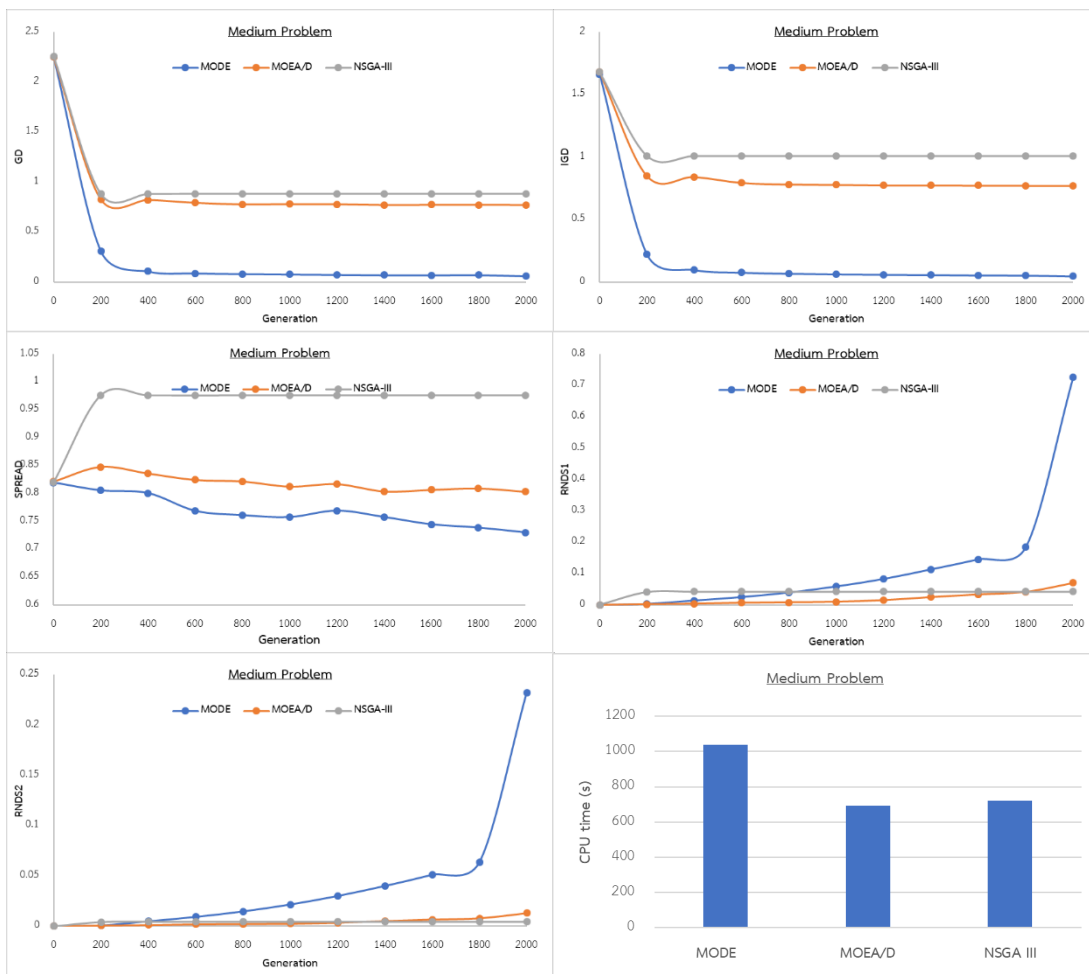
อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU time (s)
MODE	<u>0.1059</u>	<u>0.0900</u>	<u>0.6557</u>	0.2451	<u>0.0590</u>	778.03
MOEA/D	0.1635	0.1900	0.8793	0.3655	0.0326	<u>481.05</u>
NSGA-III	0.3825	0.2594	0.9245	<u>0.5810</u>	0.0526	530.18

จากรูปภาพที่ 36 พบว่ากราฟ GD IGD และ Spread อัลกอริทึม MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ได้อย่างชัดเจน โดยแนวโน้มของกราฟมีค่าเข้าใกล้ 0 มากที่สุด ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะที่ดีสำหรับตัวชี้วัดดังกล่าว ในส่วนของกราฟ RNDS1 พบว่าอัลกอริทึม NSGA-III ให้สมรรถนะที่ดีกว่า MODE และ MOEA/D ในเกือบทุกเงื่อนไข ซึ่งดูได้จากแนวโน้มของกราฟที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ยกเว้นในเงื่อนไขสุดท้าย MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด และกราฟ RNDS2 พบว่าอัลกอริทึม MODE มีค่าแนวโน้มที่มากขึ้นเรื่อยๆ และมีค่ามากที่สุดในเงื่อนไขสุดท้าย

จากตารางที่ 56 พบว่าค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ในด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) อัลกอริทึม MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ส่วนด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) พบว่าอัลกอริทึม NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time) อัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด

7.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบของปัญหาขนาดกลางตั้งแต่ M1-M6 ดังรูปภาพที่ 38 และตารางที่ 57



รูปภาพที่ 37 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดกลาง

ตารางที่ 57 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ปัญหาขนาดกลาง

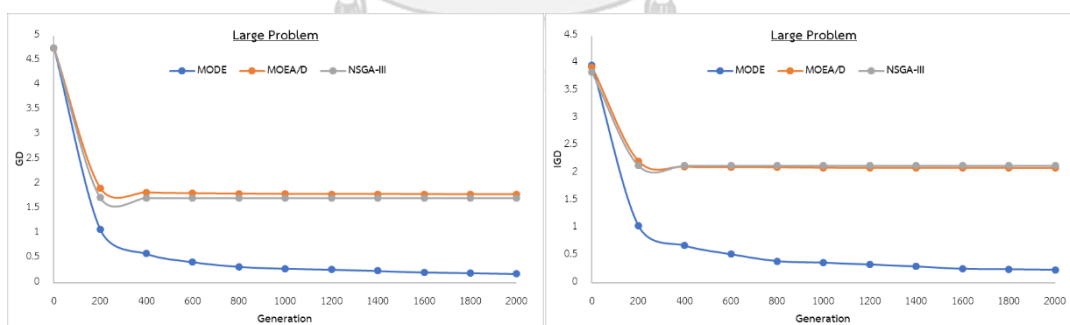
อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RND1	RND2	CPU time (s)
MODE	<u>0.2966</u>	<u>0.2242</u>	<u>0.7685</u>	<u>0.1266</u>	<u>0.0426</u>	1038.19
MOEA/D	0.9197	0.8718	0.8185	0.0199	0.0041	694.01
NSGA-III	1.0078	1.0710	0.9615	0.0387	0.0041	721.69

จากรูปภาพที่ 37 พบว่ากราฟ GD IGD และ Spread อัลกอริทึม MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ได้อย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มของกราฟที่มีค่าเข้าใกล้ 0 มากที่สุด ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับตัวชี้วัดดังกล่าว ในส่วนของกราฟ RNDS1 และ RNDS 2 พบว่าอัลกอริทึม MODE ให้สมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ในเกือบทุกเจเนอเรชัน และมีค่าสมรรถนะที่มากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่เจเนอเรชันที่ 600 เป็นต้นไป และมีค่ามากที่สุดเจเนอเรชันสุดท้าย ซึ่งดูได้จากแนวโน้มของกราฟที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะที่ดีที่สุดสำหรับตัวชี้วัดดังกล่าว

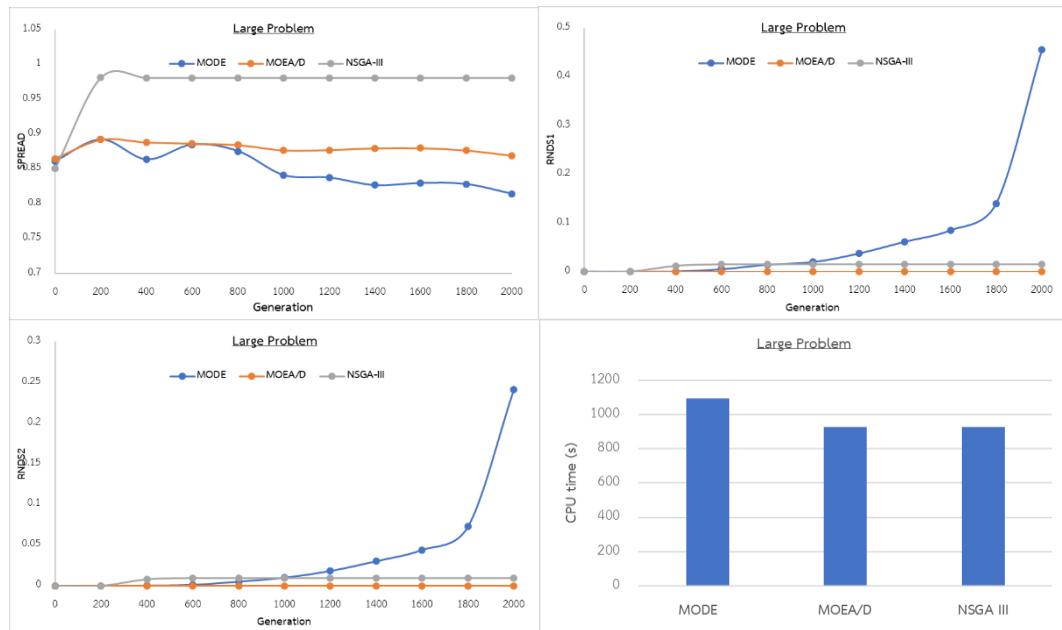
จากตารางที่ 57 พบว่าค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ในด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) พบว่าอัลกอริทึม MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด ส่วนด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time) อัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด

7.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบของปัญหาขนาดใหญ่ตั้งแต่ L1-L6 ดังรูปภาพที่ 38 และตารางที่ 58



รูปภาพที่ 38 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่



รูปภาพที่ 38 วิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่ (ต่อ)

ตารางที่ 58 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ปัญหาขนาดใหญ่

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU time (s)
MODE	<u>0.7780</u>	<u>0.7575</u>	<u>0.8503</u>	<u>0.0744</u>	<u>0.0383</u>	1092.91
MOEA/D	2.0765	2.2751	0.8793	0.0000	0.0000	<u>928.07</u>
NSGA-III	1.9898	2.2869	0.9685	0.0119	0.0074	928.33

จากรูปภาพที่ 38 พบว่ากราฟ GD IGD และ Spread อัลกอริทึม MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ได้อย่างชัดเจน โดยมีแนวโน้มของกราฟที่มีค่าเข้าใกล้ 0 มากที่สุด ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะที่ดีสำหรับตัวชี้วัดดังกล่าว ในส่วนของกราฟ RNDS1 และ RNDS 2 พบว่าอัลกอริทึม MODE ให้สมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ในเกือบทุกเจเนอเรชัน และมีค่าสมรรถนะที่มากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่เจเนอเรชันที่ 1200 เป็นต้นไป และมีค่ามากที่สุดในเจเนอเรชันสุดท้าย ซึ่งดูได้จากแนวโน้มของกราฟที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะที่ดีสำหรับตัวชี้วัดดังกล่าว

จากตารางที่ 58 พบว่าค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ในด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่

อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) พบว่าอัลกอริทึม MODE ให้ค่าสมรรถนะที่ดีที่สุด ส่วนด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time) อัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยที่สุด

7.3 สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

จากการนำอัลกอริทึม MODE MOEA/D และ NSGA-III มาแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปด้วยแบบหลายสายของภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก กลางและใหญ่ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) ให้ค่าสมรรถนะดีที่สุดในปัญหาทุกขนาด รองลงมาเป็นอัลกอริทึม MOEA/D และ NSGA-III ตามลำดับ โดยที่ MOEA/D ให้ค่าสมรรถนะที่ดีกว่า NSGA-III ในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนปัญหาขนาดใหญ่ MOEA/D และ NSGA-III ให้ค่าสมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน และด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time) อัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ NSGA-III และ MODE ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบทั้ง 3 อัลกอริทึม พบว่า MODE มีสมรรถนะที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ในด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ในปัญหาขนาดเล็ก กลางและใหญ่ ในขณะที่เดียวกันด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) จะเห็นได้ชัดเจนตั้งแต่ปัญหาขนาดกลางขึ้นไป ส่วนด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบด้วยคอมพิวเตอร์ (CPU Time) อัลกอริทึม MOEA/D ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ NSGA-III และ MODE ตามลำดับถึงแม้ว่า MODE จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากที่สุด แต่ก็ยังให้สมรรถนะที่ดีกว่าอัลกอริทึมตัวอื่นๆ และครอบคลุมปัญหาทุกขนาด MODE จึงเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาทางวิจัยนี้

แสดงค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ของทั้ง 18 ปัญหา และผลสรุปการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมแบบภาพรวมในปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

ตารางที่ 59 ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบของปัญหา S1-L6

Algorithm	SMALL PROBLEM						MEDIUM PROBLEM						LARGE PROBLEM					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Generational Distance																		
MODE	<u>0.1709</u>	<u>0.0471</u>	<u>0.0903</u>	<u>0.1021</u>	<u>0.1080</u>	0.1171	<u>0.1315</u>	<u>0.1851</u>	<u>0.1944</u>	<u>0.5190</u>	<u>0.3450</u>	<u>0.4043</u>	<u>0.5773</u>	<u>0.8679</u>	<u>0.2764</u>	<u>1.1924</u>	<u>0.5505</u>	<u>1.2037</u>
MOEA/D	0.1904	0.0474	0.1079	0.0980	0.3603	0.1772	0.3276	0.6395	0.5186	1.4939	1.0262	1.5126	1.0867	1.9575	0.5900	4.1322	0.8966	3.7964
NSGA III	1.3578	0.0436	0.2177	0.0945	0.4733	<u>0.1084</u>	0.4065	0.6491	0.4759	1.5262	1.0842	1.9048	1.1578	1.7898	0.5239	4.2914	0.9262	3.2496
Inverted Generation Distance																		
MODE	<u>0.0715</u>	<u>0.0401</u>	<u>0.1126</u>	<u>0.0566</u>	<u>0.1303</u>	<u>0.1286</u>	<u>0.1105</u>	<u>0.1544</u>	<u>0.1593</u>	<u>0.2975</u>	<u>0.3037</u>	<u>0.3195</u>	<u>0.4856</u>	<u>0.8114</u>	<u>0.3228</u>	<u>1.0936</u>	<u>0.5717</u>	<u>1.2598</u>
MOEA/D	0.2678	0.0720	0.1434	0.0859	0.4100	0.1612	0.2867	0.7055	0.5017	1.2850	0.9501	1.5015	1.0073	2.4480	0.7042	4.1259	1.0649	4.3005
NSGA III	0.4862	0.0715	0.2307	0.1048	0.4902	0.1730	0.4813	0.9175	0.5345	1.4393	1.0642	1.9890	1.2095	2.4379	0.7074	4.3766	1.1487	3.8414
Spread																		
MODE	<u>0.6063</u>	<u>0.5971</u>	<u>0.6523</u>	<u>0.5936</u>	<u>0.7383</u>	<u>0.7464</u>	<u>0.8177</u>	<u>0.7393</u>	0.7093	<u>0.9139</u>	<u>0.6865</u>	<u>0.7456</u>	<u>0.7257</u>	<u>0.9180</u>	0.8418	<u>0.9274</u>	0.7956	<u>0.8934</u>
MOEA/D	0.8790	0.9332	0.9100	0.9450	0.7772	0.8315	0.8203	0.7471	<u>0.6594</u>	0.9953	0.8068	0.8822	0.7679	0.9861	<u>0.7994</u>	0.9918	<u>0.7465</u>	0.9842
NSGA III	0.7684	0.9547	0.9529	0.9607	0.9522	0.9578	0.9694	0.9157	0.9756	0.9975	0.9717	0.9391	0.9086	0.9971	0.9532	0.9988	0.9623	0.9911
RNDS1																		
MODE	<u>0.5562</u>	0.2549	0.1881	0.1589	<u>0.1838</u>	0.1287	<u>0.1516</u>	0.1273	<u>0.1008</u>	<u>0.0865</u>	<u>0.1437</u>	<u>0.1498</u>	<u>0.0576</u>	<u>0.0960</u>	<u>0.1211</u>	<u>0.0897</u>	<u>0.0421</u>	<u>0.0399</u>
MOEA/D	0.3024	0.4400	0.3810	0.4218	0.0247	0.6231	0.0220	0.0973	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NSGA III	0.0808	<u>0.9327</u>	<u>0.6558</u>	<u>0.9094</u>	0.0000	<u>0.9074</u>	0.0019	<u>0.2273</u>	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0359	0.0000	0.0357	0.0000
RNDS2																		
MODE	<u>0.2373</u>	0.0229	0.0180	0.0134	<u>0.0504</u>	0.0118	<u>0.0584</u>	0.0210	<u>0.0484</u>	<u>0.0435</u>	<u>0.0464</u>	<u>0.0380</u>	<u>0.0431</u>	<u>0.0417</u>	<u>0.0522</u>	<u>0.0320</u>	<u>0.0320</u>	<u>0.0288</u>
MOEA/D	0.0324	0.0396	0.0364	0.0355	0.0065	0.0453	0.0085	0.0161	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NSGA III	0.0118	<u>0.0839</u>	<u>0.0629</u>	<u>0.0766</u>	0.0000	<u>0.0805</u>	0.0006	<u>0.0223</u>	0.0016	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0158	0.0000	0.0285	0.0000
CPU time																		
MODE	549.47	814.32	702.63	850.77	718.28	1032.71	777.95	927.49	1032.36	1186.09	1082.04	1223.22	916.35	952.92	976.06	1074.36	1235.39	1402.40
MOEA/D	<u>359.09</u>	<u>445.52</u>	<u>495.34</u>	<u>518.11</u>	<u>478.71</u>	<u>589.55</u>	<u>609.72</u>	<u>630.54</u>	694.97	<u>697.83</u>	<u>746.24</u>	<u>784.76</u>	<u>830.65</u>	<u>837.21</u>	<u>906.40</u>	<u>912.04</u>	1000.06	1082.07
NSGA III	470.82	495.82	518.16	620.45	531.84	543.98	646.75	669.96	<u>649.75</u>	748.40	788.30	826.98	1001.35	876.84	922.82	870.10	<u>983.28</u>	<u>915.56</u>

ตารางที่ 60 สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมภาพรวมของปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

ปัญหา	อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
		GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	CPU time (s)
เล็ก	MODE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	3	<u>1</u>	3
	MOEA/D	2	2	2	2	2	<u>1</u>
	NSGA-III	3	3	3	<u>1</u>	3	2
กลาง	MODE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	3
	MOEA/D	2	2	2	3	2	<u>1</u>
	NSGA-III	3	3	3	2	2	2
ใหญ่	MODE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	3
	MOEA/D	3	2	2	3	3	<u>1</u>
	NSGA-III	2	3	3	2	2	2

หมายเหตุ: ตัวเลข หมายถึงอันดับ (Rank)

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยเกี่ยวกับลักษณะของปัญหา อัลกอริทึมที่นำมาใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยและการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

8.1 บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ทำการแก้ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์แบบมากวัตถุประสงค์ เป็นการแก้ปัญหาโดยพิจารณาวัตถุประสงค์ทั้งหมดไปพร้อมๆ กัน ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบยาก (NP-Hard) มีความยุ่งยากและซับซ้อนของปัญหา ดังนั้นจึงต้องอาศัยฮิวริสติก (Heuristic) และเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic) มาช่วยในการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่ดี และเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้พิจารณาวัตถุประสงค์พร้อมกันทั้งหมด 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ เวลาว่างของพนักงานน้อยที่สุด จำนวนพนักงานน้อยที่สุด อรรถประโยชน์การทำงานของพนักงานมากที่สุด เวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด และความแตกต่างเวลาเดินของพนักงานน้อยที่สุด

จึงได้นำเสนอวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) เปรียบเทียบกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition: MOEA/D) และวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) โดย MODE จะมีหลักการในการหาคำตอบคือ สร้างเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจุดพิกัดเวกเตอร์ด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่มสองเวกเตอร์ แลกเปลี่ยนค่าพิกัดด้วยอัตราการครอสโอเวอร์ เพื่อให้ได้เวกเตอร์แล้วเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย และเลือกคำตอบจากวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) ส่วน MOEA/D มีหลักการในการหาคำตอบคือ สร้างเวกเตอร์ค่าน้ำหนักคำนวณระยะห่างระหว่างจุดเวกเตอร์เพื่อหาสตรึงข้างเคียง (Neighborhood) ใช้วิธีสุ่มสตรึงข้างเคียงมาสองสตรึงคำตอบ นำมาพัฒนาคำตอบโดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) หลังจากนั้นใช้วิธีเทบปีเซฟฟ์ เพื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตรึงคำตอบรุ่นลูกกับสตรึงข้างเคียง เพื่อหาคำตอบที่ดี และ NSGA-III มีหลักการด้วยการสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็น

เวกเตอร์หลายมิติ พัฒนาคำตอบโดยวิธีเชิงพันธุกรรม และหากกลุ่มคำตอบที่ดีจากระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงแต่ละจุด

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ปัญหาทดลองทั้งหมด 18 ปัญหา มีจำนวนสายการผลิตรูปตัวยูตั้งแต่สองสายจนถึงสิบสาย แต่ละสายการผลิตรูปตัวยูมี 5 เครื่องจักร มีเวลาดำเนินการของเครื่องจักรที่แตกต่างกัน การดำเนินการป้อนและนำวัตถุดิบออกมีเวลาเท่ากัน และมีการคิดระยะเวลาเดินที่รวมความล่า ส่วนการเปรียบเทียบอัลกอริทึมทั้ง 3 อัลกอริทึมจะอาศัยตัวชี้วัดที่อยู่ภายใต้หลักการจัดอันดับเชิงพาเรโตจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวชี้วัด ได้แก่ ด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) และด้านด้านเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (CPU Time)

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม MODE MOEA/D และ NSGA-III พบว่า MODE มีสมรรถนะด้าน ด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Spread) ด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNDS1) และด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (RNDS2) ที่ดีกว่า MOEA/D และ NSGA-III ในเกือบทุกปัญหา โดยเฉพาะปัญหาขนาดกลางและใหญ่ให้สมรรถนะที่ดีกว่าได้อย่างชัดเจน ถึงแม้ MODE จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานที่สุด แต่สามารถหาคำตอบซึ่งให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดดีกว่าอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

8.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะ มีดังนี้

1. การแก้ปัญหาปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลูลาร์สามารถที่จะพิจารณาวัตถุประสงค์อื่นเพิ่มเติมโดยการเพิ่มจำนวนวัตถุประสงค์ เพื่อให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในวัตถุประสงค์ทุกด้านที่ต้องการพิจารณาพร้อมกัน
2. ปัญหาการจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลูลาร์ สามารถนำรูปแบบตัวยูหลายสายไปใช้กับการผลิตอื่นๆ ได้ เช่น การใช้หุ่นยนต์สำหรับสายประกอบรูปตัวยูแบบหลายสาย

3. ศึกษาการคิดระยะเวลาในการเดินของพนักงานเพิ่มเติม โดยให้พนักงานจะเริ่มเดินช้าลงเมื่อถึงจุดเวลานิ่งหรือช่วงเวลาวิกฤตทำให้ระยะเวลาเดินลดลงเรื่อย ๆ
4. พัฒนาอัลกอริทึมตัวอื่นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอาจจะใช้วิธีการ DE operator ไปประยุกต์กับอัลกอริทึม NSGA-III เพื่อให้หาคำตอบได้ดีขึ้น
5. นำแนวความคิดการจัดสรรพนักงานจัดสรรพนักงานบนสายการผลิตรูปตัวยูแบบหลายสายของระบบเซลล์ลาร์ ไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมจริง
6. นำอัลกอริทึม MODE MOEA/D และ NSGA-III ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยอื่น



บรรณานุกรม

- Alatas, B., Akin, E., & Karci, A. (2008). MODENAR: Multi-objective differential evolution algorithm for mining numeric association rules. *Applied Soft Computing*, 8(1), 646-656.
- Almeida, E. B. d. L. G. L. P. J. M. d. (2010). *Tuning Genetic Programming parameters with factorial designs*. Paper presented at the IEEE Congress on Evolutionary Computation, Spain.
- Askin, R. G., & Zhou, M. (1997). A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 35(11), 3095-3106. doi:10.1080/002075497194309
- Cheng, R., Li, M., Tian, Y., Zhang, X., Yang, S., Jin, Y., & Yao, X. (2017). A benchmark test suite for evolutionary many-objective optimization. *Complex & Intelligent Systems*, 3(1), 67-81. doi:10.1007/s40747-017-0039-7
- Chiang, W.-C., Kouvelis, P., & Urban, T. L. (2007). Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines. *IIE Transactions*, 39(4), 347-359.
- Chutima, P., & Chimklai, P. (2012). Multi-objective two-sided mixed-model assembly line balancing using particle swarm optimisation with negative knowledge. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 39-55. doi:10.1016/j.cie.2011.08.015
- Coello, C. A. C., & Cortés, N. C. (2005). Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 6(2), 163-190.
- Deb, K., & Jain, H. (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 18(4), 577-601.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 6(2), 182-197.

- Ferjani, A., Ammar, A., Pierreval, H., & Trabelsi, A. (2015). *A HEURISTIC APPROACH TAKING OPERATORS' FATIGUE INTO ACCOUNT FOR THE DYNAMIC ASSIGNMENT OF WORKFORCE TO REDUCE THE MEAN FLOWTIME*. Paper presented at the CIE45Proceedings, France.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Ibrahim, A., Rahnamayan, S., Martin, M. V., & Deb, K. (2016). *EliteNSGA-III: An improved evolutionary many-objective optimization algorithm*. Paper presented at the 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Canada.
- Miltenburg, J. (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, 109, 1-23.
- Miltenburg, J. (2001). U-shaped production lines: A review of theory and practice. *International Journal of Production Economics* 70, 201-214.
- Monden, Y. (1994). *Toyota Production System* (2 ed.).
- Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., & Toklu, B. (2009). Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 48:17, 5089:5113.
- Price, K. V., Storn, R. M., & Lampinen, J. A. (2006). *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Qingfu, Z., & Hui, L. (2007). MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712-731. doi:10.1109/tevc.2007.892759
- R.Aase, G., R.Olson, J., & J.Schniederjans, M. (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156, 698–711.
- Scholl, A., Boysen, N., & Fliedner, M. (2013). The assembly line balancing and scheduling problem with sequence-dependent setup times: problem extension, model formulation and efficient heuristics. *OR Spectrum*, 35(1), 291-320.
- Shewchuk, J. P. (2008). Worker allocation in lean U-shaped production lines.

International Journal of Production Research, 46(13), 3485-3502.,

doi:10.1080/00207540601115997

Sirovetnukul, R., & Chutima, P. (2010). THE IMPACT OF WALKING TIME ON U-SHAPED ASSEMBLY LINE WORKER ALLOCATION PROBLEMS. *ENGINEERING JOURNAL*, 14(2).

doi:10.4186/ej.2010.14.2.53

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

Sparling, D. (1998). Balancing Just-In-Time Production Units: The N ULine Balancing Problem. *Information Systems and Operational Research*, 36(4), 215-237.

doi:10.1080/03155986.1998.11732360

Storn, R., & Price, K. (1996). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341–359.

Yuan, Y., Xu, H., & Wang, B. (2014). *An Improved NSGA-III Procedure for Evolutionary Many-Objective Optimization*. Paper presented at the GECCO '14 Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Canada.

Zhang, Q., & Li, H. (2007). MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 11(6), 712-731.

จักรกฤษณ์ วันดี (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการด้านระบบสารสนเทศ. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสยาม,

ตรัยรัตน์. (2560). การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

ปาลิตา. (2553). การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฟูลองภาคส สำหรับปัญหาการจัดสมดุล สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีหลายวัตถุประสงค์. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพ็ญพัทธ์. (2551). การประยุกต์ใช้เมมเมติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบแบบผลิตภัณฑ์ผสมที่มีหลายวัตถุประสงค์ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี. (ปริญญานิพนธ์), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชานันท์. (2560). การประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์สำหรับการจัดสมดุลคู่สายการประกอบรูป

ตัวยู. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,



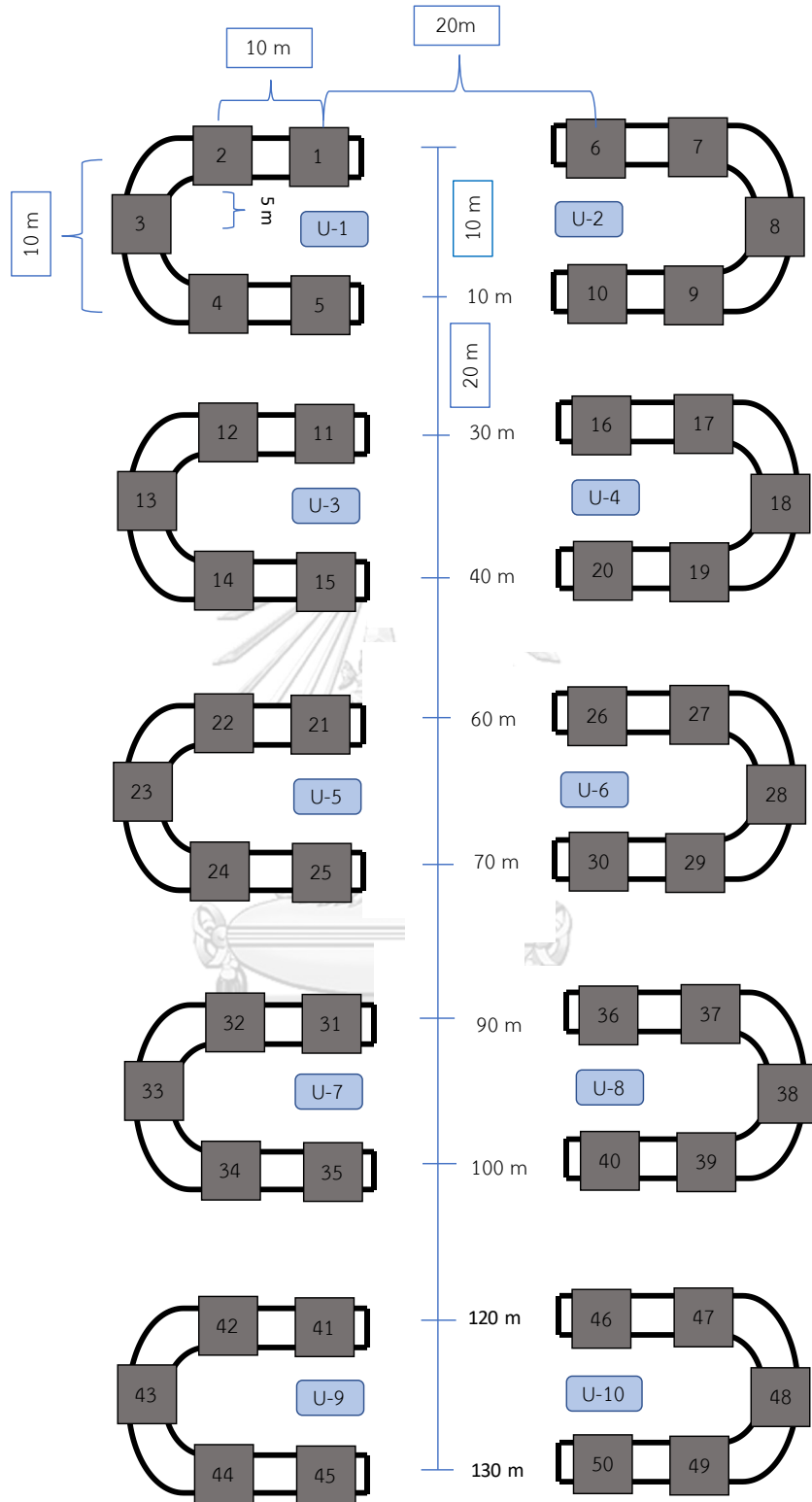
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

ตารางที่ 60 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย (หน่วยเวลา)

ปัญหา		จำนวน U-line	จำนวน เครื่องจักร	รอบเวลาการ ผลิต	เวลาป้อน วัตถุดิบ	เวลานำวัตถุดิบ ออก
เล็ก	S1	2	10	25	2	2
	S2	2	10	33	2	2
	S3	3	15	25	2	2
	S4	3	15	33	2	2
	S5	4	20	25	2	2
	S6	4	20	33	2	2
กลาง	M1	5	25	25	2	2
	M2	5	25	33	2	2
	M3	6	30	25	2	2
	M4	6	30	33	2	2
	M5	7	35	25	2	2
	M6	7	35	33	2	2
ใหญ่	L1	8	40	25	2	2
	L2	8	40	33	2	2
	L3	9	45	25	2	2
	L4	9	45	33	2	2
	L5	10	50	25	2	2
	L6	10	50	33	2	2



รูปภาพที่ 39 ลำดับสายการผลิตรูปตัวยูและระยะห่างระหว่างเครื่องจักร

ตารางที่ 61 เวลาดำเนินงานของเครื่องจักรจำนวน 50 เครื่องจักร

ลำดับสายการผลิตรูปตัวยู	เครื่องจักร	เวลาดำเนินงาน
U-1	1	8
	2	7
	3	19
	4	10
	5	2
U-2	6	6
	7	14
	8	10
	9	1
	10	4
U-3	11	14
	12	15
	13	5
	14	12
	15	9
U-4	16	10
	17	2
	18	10
	19	18
	20	16
U-5	21	21
	22	14
	23	16
	24	7
	25	17

ตารางที่ 62 เวลาดำเนินงานของเครื่องจักรจำนวน 50 เครื่องจักร (ต่อ)

ลำดับสายการผลิตรูปตัวยู	เครื่องจักร	เวลาดำเนินงาน
U-6	26	9
	27	20
	28	7
	29	14
	30	2
U-7	31	4
	32	3
	33	9
	34	5
	35	9
U-8	36	4
	37	8
	38	7
	39	5
	40	1
U-9	41	3
	42	5
	43	3
	44	5
	45	3
U-10	46	13
	47	5
	48	2
	49	3
	50	7

ตารางที่ 62 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50

MC to MC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385	0.856	1.393	2.001	1.486	0.977
2	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486
3	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887	2.001	2.625	3.264	2.625	0.887
4	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393
5	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000	0.977	1.486	2.001	1.393	0.856
6	0.856	1.393	2.001	1.486	1.486	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385
7	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570
8	2.001	2.625	3.264	2.625	2.001	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887
9	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385
10	0.977	1.486	0.887	1.393	0.856	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000
11	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297
12	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744
13	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428
14	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131
15	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744
16	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856
17	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977
18	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508
19	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486
20	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393
21	3.264	3.319	3.166	2.673	2.609	3.482	3.741	3.804	3.151	2.858
22	3.319	3.264	2.993	2.609	2.673	3.741	4.085	4.237	3.534	3.151
23	3.804	3.651	3.264	2.993	3.166	4.375	4.770	4.969	4.237	3.804
24	3.989	3.940	3.651	3.264	3.320	4.364	4.674	4.770	4.085	3.741
25	3.940	3.989	3.804	3.320	3.264	4.132	4.364	4.375	3.741	3.482

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274
2	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609
3	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813
4	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131
5	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744
6	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982
7	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057
8	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865
9	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486
10	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393
11	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385	0.856	1.393	2.001	1.486	0.977
12	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486
13	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887	2.001	2.625	3.264	2.625	0.887
14	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393
15	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000	0.977	1.486	2.001	1.393	0.856
16	0.856	1.393	2.001	1.486	1.486	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385
17	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570
18	2.001	2.625	3.264	2.625	2.001	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887
19	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385
20	0.977	1.486	0.887	1.393	0.856	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000
21	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297
22	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744
23	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428
24	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131
25	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	3.264	3.319	3.804	3.989	3.940	3.482	3.741	4.375	4.364	4.132
2	3.319	3.264	3.651	3.940	3.989	3.741	4.085	4.770	4.674	4.364
3	3.166	2.993	3.264	3.651	3.804	3.804	4.237	4.969	4.770	4.375
4	2.673	2.609	2.993	3.264	3.320	3.151	3.534	4.237	4.085	3.741
5	2.609	2.673	3.166	3.320	3.264	2.858	3.151	3.804	3.741	3.482
6	3.482	3.741	4.375	4.364	4.132	3.264	3.319	3.804	3.989	3.940
7	3.741	4.085	4.770	4.674	4.364	3.319	3.264	3.651	3.940	3.989
8	3.804	4.237	4.969	4.770	4.375	3.166	2.993	3.264	3.651	3.804
9	3.151	3.534	4.237	4.085	3.741	2.673	2.609	2.993	3.264	3.320
10	2.858	3.151	3.804	3.741	3.482	2.609	2.673	3.166	3.320	3.264
11	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274
12	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609
13	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813
14	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131
15	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744
16	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982
17	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057
18	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865
19	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486
20	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393
21	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385	0.856	1.393	2.001	1.486	0.977
22	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486
23	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887	2.001	2.625	3.264	2.625	0.887
24	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393
25	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000	0.977	1.486	2.001	1.393	0.856

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	5.331	5.369	5.830	6.073	6.037	5.486	5.674	6.255	6.349	6.177
2	5.369	5.331	5.720	6.037	6.073	5.674	5.930	6.559	6.584	6.349
3	5.142	5.021	5.331	5.720	5.830	5.608	5.939	6.616	6.559	6.255
4	4.674	4.630	5.021	5.331	5.369	5.010	5.291	5.939	5.930	5.674
5	4.630	4.674	5.142	5.369	5.331	4.802	5.010	5.608	5.674	5.486
6	5.486	5.674	6.255	6.349	6.177	5.331	5.369	5.830	6.073	6.037
7	5.674	5.930	6.559	6.584	6.349	5.369	5.331	5.720	6.037	6.073
8	5.608	5.939	6.616	6.559	6.255	5.142	5.021	5.331	5.720	5.830
9	5.010	5.291	5.939	5.930	5.674	4.674	4.630	5.021	5.331	5.369
10	4.802	5.010	5.608	5.674	5.486	4.630	4.674	5.142	5.369	5.331
11	3.264	3.319	3.804	3.989	3.940	3.482	3.741	4.375	4.364	4.132
12	3.319	3.264	3.651	3.940	3.989	3.741	4.085	4.770	4.674	4.364
13	3.166	2.993	3.264	3.651	3.804	3.804	4.237	4.969	4.770	4.375
14	2.673	2.609	2.993	3.264	3.320	3.151	3.534	4.237	4.085	3.741
15	2.609	2.673	3.166	3.320	3.264	2.858	3.151	3.804	3.741	3.482
16	3.482	3.741	4.375	4.364	4.132	3.264	3.319	3.804	3.989	3.940
17	3.741	4.085	4.770	4.674	4.364	3.319	3.264	3.651	3.940	3.989
18	3.804	4.237	4.969	4.770	4.375	3.166	2.993	3.264	3.651	3.804
19	3.151	3.534	4.237	4.085	3.741	2.673	2.609	2.993	3.264	3.320
20	2.858	3.151	3.804	3.741	3.482	2.609	2.673	3.166	3.320	3.264
21	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274
22	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609
23	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813
24	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131
25	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	7.459	7.489	7.928	8.197	8.170	7.576	7.721	8.258	8.413	8.279
2	7.489	7.459	7.843	8.170	8.197	7.721	7.921	8.499	8.597	8.413
3	7.226	7.133	7.459	7.843	7.928	7.584	7.843	8.497	8.499	8.258
4	6.779	6.747	7.133	7.459	7.489	7.032	7.248	7.843	7.921	7.721
5	6.747	6.779	7.226	7.489	7.459	6.875	7.032	7.584	7.722	7.576
6	7.576	7.721	8.258	8.413	8.279	7.459	7.489	7.928	8.197	8.170
7	7.721	7.921	8.499	8.597	8.413	7.489	7.459	7.843	8.170	8.197
8	7.584	7.843	8.497	8.499	8.258	7.226	7.133	7.459	7.843	7.928
9	7.032	7.248	7.843	7.921	7.721	6.779	6.747	7.133	7.459	7.489
10	6.875	7.032	7.584	7.722	7.576	6.747	6.779	7.226	7.489	7.459
11	5.331	5.369	5.830	6.073	6.037	5.486	5.674	6.255	6.349	6.177
12	5.369	5.331	5.720	6.037	6.073	5.674	5.930	6.559	6.584	6.349
13	5.142	5.021	5.331	5.720	5.830	5.608	5.939	6.616	6.559	6.255
14	4.674	4.630	5.021	5.331	5.369	5.010	5.291	5.939	5.930	5.674
15	4.630	4.674	5.142	5.369	5.331	4.802	5.010	5.608	5.674	5.486
16	5.486	5.674	6.255	6.349	6.177	5.331	5.369	5.830	6.073	6.037
17	5.674	5.930	6.559	6.584	6.349	5.369	5.331	5.720	6.037	6.073
18	5.608	5.939	6.616	6.559	6.255	5.142	5.021	5.331	5.720	5.830
19	5.010	5.291	5.939	5.930	5.674	4.674	4.630	5.021	5.331	5.369
20	4.802	5.010	5.608	5.674	5.486	4.630	4.674	5.142	5.369	5.331
21	3.264	3.319	3.804	3.989	3.940	3.482	3.741	4.375	4.364	4.132
22	3.319	3.264	3.651	3.940	3.989	3.741	4.085	4.770	4.674	4.364
23	3.166	2.993	3.264	3.651	3.804	3.804	4.237	4.969	4.770	4.375
24	2.673	2.609	2.993	3.264	3.320	3.151	3.534	4.237	4.085	3.741
25	2.609	2.673	3.166	3.320	3.264	2.858	3.151	3.804	3.741	3.482

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26	3.482	3.741	3.804	3.151	2.858	3.264	3.319	3.166	2.673	2.609
27	3.741	4.085	4.237	3.534	3.151	3.319	3.264	2.993	2.609	2.673
28	4.375	4.770	4.969	4.237	3.804	3.804	3.651	3.264	2.993	3.166
29	4.364	4.674	4.770	4.085	3.741	3.989	3.940	3.651	3.264	3.320
30	4.132	4.364	4.375	3.741	3.482	3.940	3.989	3.804	3.320	3.264
31	5.331	5.369	5.142	4.674	4.630	5.486	5.674	5.608	5.010	4.802
32	5.369	5.331	5.021	4.630	4.674	5.674	5.930	5.939	5.291	5.010
33	5.830	5.720	5.331	5.021	5.142	6.255	6.559	6.616	5.939	5.608
34	6.073	6.037	5.720	5.331	5.369	6.349	6.584	6.559	5.930	5.674
35	6.037	6.073	5.830	5.369	5.331	6.177	6.349	6.255	5.674	5.486
36	5.486	5.674	5.608	5.010	4.802	5.331	5.369	5.142	4.674	4.630
37	5.674	5.930	5.939	5.291	5.010	5.369	5.331	5.021	4.630	4.674
38	6.255	6.559	6.616	5.939	5.608	5.830	5.720	5.331	5.021	5.142
39	6.349	6.584	6.559	5.930	5.674	6.073	6.037	5.720	5.331	5.369
40	6.177	6.349	6.255	5.674	5.486	6.037	6.073	5.830	5.369	5.331
41	7.459	7.489	7.226	6.779	6.747	7.576	7.721	7.584	7.032	6.875
42	7.489	7.459	7.133	6.747	6.779	7.721	7.921	7.843	7.248	7.032
43	7.928	7.843	7.459	7.133	7.226	8.258	8.499	8.497	7.843	7.584
44	8.197	8.170	7.843	7.459	7.489	8.413	8.597	8.499	7.921	7.722
45	8.170	8.197	7.928	7.489	7.459	8.279	8.413	8.258	7.721	7.576
46	7.576	7.721	7.584	7.032	6.875	7.459	7.489	7.226	6.779	6.747
47	7.721	7.921	7.843	7.248	7.032	7.489	7.459	7.133	6.747	6.779
48	8.258	8.499	8.497	7.843	7.584	7.928	7.843	7.459	7.133	7.226
49	8.413	8.597	8.499	7.921	7.722	8.197	8.170	7.843	7.459	7.489
50	8.279	8.413	8.258	7.721	7.576	8.170	8.197	7.928	7.489	7.459

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
26	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856
27	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977
28	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508
29	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486
30	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393
31	3.264	3.319	3.166	2.673	2.609	3.482	3.741	3.804	3.151	2.858
32	3.319	3.264	2.993	2.609	2.673	3.741	4.085	4.237	3.534	3.151
33	3.804	3.651	3.264	2.993	3.166	4.375	4.770	4.969	4.237	3.804
34	3.989	3.940	3.651	3.264	3.320	4.364	4.674	4.770	4.085	3.741
35	3.940	3.989	3.804	3.320	3.264	4.132	4.364	4.375	3.741	3.482
36	3.482	3.741	3.804	3.151	2.858	3.264	3.319	3.166	2.673	2.609
37	3.741	4.085	4.237	3.534	3.151	3.319	3.264	2.993	2.609	2.673
38	4.375	4.770	4.969	4.237	3.804	3.804	3.651	3.264	2.993	3.166
39	4.364	4.674	4.770	4.085	3.741	3.989	3.940	3.651	3.264	3.320
40	4.132	4.364	4.375	3.741	3.482	3.940	3.989	3.804	3.320	3.264
41	5.331	5.369	5.142	4.674	4.630	5.486	5.674	5.608	5.010	4.802
42	5.369	5.331	5.021	4.630	4.674	5.674	5.930	5.939	5.291	5.010
43	5.830	5.720	5.331	5.021	5.142	6.255	6.559	6.616	5.939	5.608
44	6.073	6.037	5.720	5.331	5.369	6.349	6.584	6.559	5.930	5.674
45	6.037	6.073	5.830	5.369	5.331	6.177	6.349	6.255	5.674	5.486
46	5.486	5.674	5.608	5.010	4.802	5.331	5.369	5.142	4.674	4.630
47	5.674	5.930	5.939	5.291	5.010	5.369	5.331	5.021	4.630	4.674
48	6.255	6.559	6.616	5.939	5.608	5.830	5.720	5.331	5.021	5.142
49	6.349	6.584	6.559	5.930	5.674	6.073	6.037	5.720	5.331	5.369
50	6.177	6.349	6.255	5.674	5.486	6.037	6.073	5.830	5.369	5.331

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
26	0.856	1.393	2.001	1.486	1.486	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385
27	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570
28	2.001	2.625	3.264	2.625	2.001	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887
29	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385
30	0.977	1.486	0.887	1.393	0.856	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000
31	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297
32	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744
33	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428
34	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131
35	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744
36	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856
37	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977
38	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508
39	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486
40	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393
41	3.264	3.319	3.166	2.673	2.609	3.482	3.741	3.804	3.151	2.858
42	3.319	3.264	2.993	2.609	2.673	3.741	4.085	4.237	3.534	3.151
43	3.804	3.651	3.264	2.993	3.166	4.375	4.770	4.969	4.237	3.804
44	3.989	3.940	3.651	3.264	3.320	4.364	4.674	4.770	4.085	3.741
45	3.940	3.989	3.804	3.320	3.264	4.132	4.364	4.375	3.741	3.482
46	3.482	3.741	3.804	3.151	2.858	3.264	3.319	3.166	2.673	2.609
47	3.741	4.085	4.237	3.534	3.151	3.319	3.264	2.993	2.609	2.673
48	4.375	4.770	4.969	4.237	3.804	3.804	3.651	3.264	2.993	3.166
49	4.364	4.674	4.770	4.085	3.741	3.989	3.940	3.651	3.264	3.320
50	4.132	4.364	4.375	3.741	3.482	3.940	3.989	3.804	3.320	3.264

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
26	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982
27	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057
28	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865
29	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486
30	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393
31	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385	0.856	1.393	2.001	1.486	0.977
32	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486
33	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887	2.001	2.625	3.264	2.625	0.887
34	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393
35	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000	0.977	1.486	2.001	1.393	0.856
36	0.856	1.393	2.001	1.486	1.486	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385
37	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570
38	2.001	2.625	3.264	2.625	2.001	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887
39	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385
40	0.977	1.486	0.887	1.393	0.856	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000
41	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297
42	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744
43	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428
44	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131
45	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744
46	1.744	2.131	2.428	1.744	1.297	1.393	1.486	1.508	0.977	0.856
47	2.131	2.609	2.993	2.274	1.744	1.486	1.393	1.222	0.856	0.977
48	2.813	3.333	3.741	2.993	2.428	2.001	1.765	1.393	1.222	1.508
49	2.609	3.037	3.333	2.609	2.131	2.057	1.982	1.765	1.393	1.486
50	2.274	2.609	2.813	2.131	1.744	1.982	2.057	1.865	1.486	1.393

ตารางที่ 63 ระยะเวลาเดินไปกลับระหว่างเครื่องจักร ตั้งแต่เครื่องจักร 1 ถึงเครื่องจักร 50 (ต่อ)

MC to MC	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
26	3.482	3.741	4.375	4.364	4.132	3.264	3.319	3.804	3.989	3.940
27	3.741	4.085	4.770	4.674	4.364	3.319	3.264	3.651	3.940	3.989
28	3.804	4.237	4.969	4.770	4.375	3.166	2.993	3.264	3.651	3.804
29	3.151	3.534	4.237	4.085	3.741	2.673	2.609	2.993	3.264	3.320
30	2.858	3.151	3.804	3.741	3.482	2.609	2.673	3.166	3.320	3.264
31	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274
32	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609
33	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813
34	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131
35	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744
36	1.744	2.131	2.813	2.609	2.274	1.393	1.486	2.001	2.057	1.982
37	2.131	2.609	3.333	3.037	2.609	1.486	1.393	1.765	1.982	2.057
38	2.428	2.993	3.741	3.333	2.813	1.508	1.222	1.393	1.765	1.865
39	1.744	2.274	2.993	2.609	2.131	0.977	0.856	1.222	1.393	1.486
40	1.297	1.744	2.428	2.131	1.744	0.856	0.977	1.508	1.486	1.393
41	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385	0.856	1.393	2.001	1.486	0.977
42	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486
43	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887	2.001	2.625	3.264	2.625	0.887
44	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393
45	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000	0.977	1.486	2.001	1.393	0.856
46	0.856	1.393	2.001	1.486	1.486	0.000	0.385	0.887	0.570	0.385
47	1.393	1.982	2.625	2.057	1.486	0.385	0.000	0.436	0.385	0.570
48	2.001	2.625	3.264	2.625	2.001	0.887	0.436	0.000	0.436	0.887
49	1.486	2.057	2.625	1.982	1.393	0.570	0.385	0.436	0.000	0.385
50	0.977	1.486	0.887	1.393	0.856	0.385	0.570	0.887	0.385	0.000

ภาคผนวก ข

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมและผลการทดลองของแต่ละโจทย์ปัญหาแสดงดังตารางต่อไปนี

ตารางที่ 63 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S1

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.1709</u>	<u>0.0715</u>	<u>0.6063</u>	<u>0.5562</u>	<u>0.2373</u>	549.47
MOEA/D	0.1904	0.2678	0.8790	0.3024	0.0324	<u>359.09</u>
NSGA-III	1.3578	0.4862	0.7684	0.0808	0.0118	470.82

ตารางที่ 64 ค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S1

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_w	N_w	U_w	WT	DWW
MODE	<u>0.3014</u>	<u>2</u>	<u>0.80</u>	<u>4.7557</u>	<u>0.0016</u>
MOEA/D	<u>0.3014</u>	<u>2</u>	<u>0.80</u>	5.3572	<u>0.0016</u>
NSGA-III	<u>0.3014</u>	<u>2</u>	<u>0.80</u>	6.6340	<u>0.0016</u>

ตารางที่ 65 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S2

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.0471</u>	<u>0.0401</u>	<u>0.5971</u>	0.2549	0.0229	814.32
MOEA/D	0.0474	0.0720	0.9332	0.4400	0.0396	<u>445.52</u>
NSGA-III	0.0436	0.0715	0.9547	<u>0.9327</u>	<u>0.0839</u>	495.82

ตารางที่ 66 ค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S2

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>0.0459</u>	<u>2</u>	<u>0.61</u>	<u>6.4150</u>	<u>0.0000</u>
MOEA/D	0.0623	<u>2</u>	<u>0.61</u>	6.6138	<u>0.0000</u>
NSGA-III	0.4239	<u>2</u>	<u>0.61</u>	7.9733	<u>0.0000</u>

ตารางที่ 67 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S3

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.0903</u>	<u>0.1126</u>	<u>0.6523</u>	0.1881	0.0180	702.63
MOEA/D	0.1079	0.1434	0.9100	0.3810	0.0364	<u>495.34</u>
NSGA-III	0.2177	0.2307	0.9529	<u>0.6558</u>	<u>0.0629</u>	518.16

ตารางที่ 68 ค่าตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S3

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>2.6453</u>	<u>4</u>	<u>0.60</u>	<u>7.9660</u>	<u>0.0274</u>
MOEA/D	4.0593	<u>4</u>	<u>0.60</u>	8.4817	0.1255
NSGA-III	3.5003	<u>4</u>	<u>0.60</u>	12.2062	0.0880

ตารางที่ 69 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S4

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.1021</u>	<u>0.0566</u>	<u>0.5936</u>	0.1589	0.0134	850.77
MOEA/D	0.0980	0.0859	0.9450	0.4218	0.0355	<u>518.11</u>
NSGA-III	0.0945	0.1048	0.9607	<u>0.9094</u>	<u>0.0766</u>	620.45

ตารางที่ 70 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S4

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_w	N_w	U_w	WT	DWW
MODE	0.2293	3	0.61	10.7316	0.0000
MOEA/D	0.2123	3	0.61	11.2191	0.0000
NSGA-III	0.3672	3	0.61	14.5330	0.0190

ตารางที่ 71 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S5

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	0.1080	0.1303	0.7383	0.1838	0.0504	718.28
MOEA/D	0.3603	0.4100	0.7772	0.0247	0.0065	478.71
NSGA-III	0.4733	0.4902	0.9522	0.0000	0.0000	531.84

ตารางที่ 72 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S5

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_w	N_w	U_w	WT	DWW
MODE	7.1564	5	0.64	10.8507	0.0842
MOEA/D	9.9815	5	0.64	14.9122	0.1429
NSGA-III	11.9928	5	0.64	20.5098	0.3811

ตารางที่ 73 ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา S6

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	0.1171	0.1286	0.7464	0.1287	0.0118	1032.71
MOEA/D	0.1772	0.1612	0.8315	0.6231	0.0453	589.55
NSGA-III	0.1084	0.1730	0.9578	0.9074	0.0805	543.98

ตารางที่ 74 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา S6

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>0.6130</u>	4	<u>0.61</u>	<u>15.0867</u>	<u>0.0013</u>
MOEA/D	1.0071	4	<u>0.61</u>	21.7072	0.0451
NSGA-III	1.3915	4	<u>0.61</u>	23.9457	0.0277

ตารางที่ 75 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M1

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.1315</u>	<u>0.1105</u>	<u>0.8177</u>	<u>0.1516</u>	<u>0.0584</u>	777.95
MOEA/D	0.3276	0.2867	0.8203	0.0220	0.0085	<u>609.72</u>
NSGA-III	0.4065	0.4813	0.9694	0.0019	0.0006	646.75

ตารางที่ 76 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M1

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>37.8058</u>	7	<u>0.57</u>	<u>11.4210</u>	<u>0.5527</u>
MOEA/D	45.4940	8	0.50	15.6929	0.8256
NSGA-III	40.9284	8	0.50	24.9602	1.3274

ตารางที่ 77 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M2

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.1851</u>	<u>0.1544</u>	<u>0.7383</u>	0.1273	0.0210	927.49
MOEA/D	0.6395	0.7055	0.7471	0.0973	0.0161	<u>630.54</u>
NSGA-III	0.6491	0.9175	0.9157	<u>0.2273</u>	<u>0.0223</u>	669.96

ตารางที่ 78 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M2

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>2.4549</u>	<u>5</u>	<u>0.61</u>	<u>19.5609</u>	<u>0.0206</u>
MOEA/D	3.4325	<u>5</u>	<u>0.61</u>	32.7838	0.1143
NSGA-III	5.1965	<u>5</u>	<u>0.61</u>	48.4193	0.3004

ตารางที่ 79 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M3

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.1944</u>	<u>0.1593</u>	0.7093	<u>0.1008</u>	<u>0.0484</u>	1032.36
MOEA/D	0.5186	0.5017	<u>0.6594</u>	0.0000	0.0000	694.97
NSGA-III	0.4759	0.5345	0.9756	0.0033	0.0016	<u>649.75</u>

ตารางที่ 80 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M3

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>42.5791</u>	<u>8</u>	<u>0.60</u>	<u>15.4639</u>	<u>0.7545</u>
MOEA/D	61.9809	10	0.48	22.9053	1.0068
NSGA-III	42.4060	10	0.48	32.6907	1.6139

ตารางที่ 81 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M4

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.5190</u>	<u>0.2975</u>	<u>0.9139</u>	<u>0.0865</u>	<u>0.0435</u>	1186.09
MOEA/D	1.4939	1.2850	0.9953	0.0000	0.0000	<u>697.83</u>
NSGA-III	1.5262	1.4393	0.9975	0.0000	0.0000	748.40

ตารางที่ 82 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M4

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>1.1478</u>	<u>5</u>	<u>0.73</u>	<u>24.6608</u>	<u>0.0473</u>
MOEA/D	3.9686	6	0.61	40.4638	0.2120
NSGA-III	7.4493	6	0.61	47.5025	0.3825

ตารางที่ 83 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M5

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.3450</u>	<u>0.3037</u>	<u>0.6865</u>	<u>0.1437</u>	<u>0.0464</u>	1082.04
MOEA/D	1.0262	0.9501	0.8068	0.0000	0.0000	<u>746.24</u>
NSGA-III	1.0842	1.0642	0.9717	0.0000	0.0000	788.30

ตารางที่ 84 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M5

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>48.4438</u>	<u>10</u>	<u>0.56</u>	<u>19.5598</u>	<u>0.8992</u>
MOEA/D	77.9761	12	0.47	28.7013	1.4513
NSGA-III	58.5750	12	0.47	42.4448	1.7128

ตารางที่ 85 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา M6

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.4043</u>	<u>0.3195</u>	<u>0.7456</u>	<u>0.1498</u>	<u>0.0380</u>	1223.22
MOEA/D	1.5126	1.5015	0.8822	0.0000	0.0000	<u>784.76</u>
NSGA-III	1.9048	1.9890	0.9391	0.0000	0.0000	826.98

ตารางที่ 86 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา M6

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>4.1595</u>	<u>6</u>	<u>0.71</u>	<u>29.3762</u>	<u>0.0785</u>
MOEA/D	7.6046	7	0.61	56.1247	0.2636
NSGA-III	13.2186	8	0.53	72.5106	0.8531

ตารางที่ 87 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L1

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.5773</u>	<u>0.4856</u>	<u>0.7257</u>	<u>0.0576</u>	<u>0.0431</u>	916.35
MOEA/D	1.0867	1.0073	0.7679	0.0000	0.0000	<u>784.76</u>
NSGA-III	1.1578	1.2095	0.9086	0.0000	0.0000	1001.35

ตารางที่ 88 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L1

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>45.8705</u>	<u>11</u>	<u>0.58</u>	<u>27.0096</u>	<u>1.0072</u>
MOEA/D	62.0213	13	0.49	38.5477	1.3552
NSGA-III	51.1421	13	0.49	63.7910	1.8055

ตารางที่ 89 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L2

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.8679</u>	<u>0.8114</u>	<u>0.9180</u>	<u>0.0960</u>	<u>0.0417</u>	952.92
MOEA/D	1.9575	2.4480	0.9861	0.0000	0.0000	<u>830.65</u>
NSGA-III	1.7898	2.4379	0.9971	0.0000	0.0000	876.84

ตารางที่ 90 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L2

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>4.3905</u>	<u>7</u>	<u>0.69</u>	<u>36.3137</u>	<u>0.1481</u>
MOEA/D	13.8378	9	0.54	77.0069	0.3881
NSGA-III	9.5812	9	0.54	82.3669	0.6806

ตารางที่ 91 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L3

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.2764</u>	<u>0.3228</u>	0.8418	<u>0.1211</u>	<u>0.0522</u>	976.06
MOEA/D	0.5900	0.7042	<u>0.7994</u>	0.0000	0.0000	<u>906.40</u>
NSGA-III	0.5239	0.7074	0.9532	0.0359	0.0158	922.82

ตารางที่ 92 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L3

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	51.8293	<u>12</u>	<u>0.60</u>	<u>30.8596</u>	<u>1.1014</u>
MOEA/D	69.3398	15	0.48	52.7981	1.5036
NSGA-III	<u>46.9055</u>	16	0.45	77.2919	1.8339

ตารางที่ 93 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L4

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>1.1924</u>	<u>1.0936</u>	<u>0.9274</u>	<u>0.0897</u>	<u>0.0320</u>	1074.36
MOEA/D	4.1322	4.1259	0.9918	0.0000	0.0000	<u>912.04</u>
NSGA-III	4.2914	4.3766	0.9988	0.0000	0.0000	870.10

ตารางที่ 94 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L4

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>7.0043</u>	8	<u>0.68</u>	<u>40.8317</u>	<u>0.1189</u>
MOEA/D	10.8994	11	0.50	96.1548	0.6300
NSGA-III	9.3283	11	0.50	115.8041	0.7741

ตารางที่ 95 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L5

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>0.5505</u>	<u>0.5717</u>	0.7956	<u>0.0421</u>	<u>0.0320</u>	1235.39
MOEA/D	0.8966	1.0649	<u>0.7465</u>	0.0000	0.0000	1000.06
NSGA-III	0.9262	1.1487	0.9623	0.0357	0.0285	<u>983.28</u>

ตารางที่ 96 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L5

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	67.2328	13	<u>0.62</u>	<u>38.5781</u>	<u>1.0789</u>
MOEA/D	96.1736	17	0.47	54.6685	1.6775
NSGA-III	<u>49.7202</u>	17	0.47	71.5049	1.6911

ตารางที่ 97 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมของปัญหา L6

อัลกอริทึม	ตัวชี้วัดสมรรถนะ					
	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2	Cpu time (s)
MODE	<u>1.2037</u>	<u>1.2598</u>	<u>0.8934</u>	<u>0.0399</u>	<u>0.0288</u>	1402.40
MOEA/D	3.7964	4.3005	0.9842	0.0000	0.0000	1082.07
NSGA-III	3.2496	3.8414	0.9911	0.0000	0.0000	<u>915.56</u>

ตารางที่ 98 คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา L6

อัลกอริทึม	ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด				
	I_W	N_W	U_W	WT	DWW
MODE	<u>5.5305</u>	<u>9</u>	<u>0.67</u>	<u>43.1003</u>	<u>0.1892</u>
MOEA/D	20.9442	12	0.51	101.8325	0.9451
NSGA-III	24.3665	12	0.51	132.1938	0.7523



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวจุไรรัตน์ ฉิมระฆัง
วัน เดือน ปี เกิด	24 มีนาคม 2535
สถานที่เกิด	ชุมพร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2558 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าร่วมงานกับบริษัท นิโปร (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่ง Production Supervisor เป็นระยะเวลา 1 ปี 10 เดือน และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560