

การจัดลำดับการผลิตรายณ์ต์แบบมากว้ตฤประสงค้บนสายการประกอบผลิตรายณ์ต์ผสมแบบสองด้าน



นายตรีรัตน์ เกิดโภคทรัพย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MANY-OBJECTIVE CAR SEQUENCING PROBLEM ON MIXED-MODEL TWO-
SIDED ASSEMBLY LINES



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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

5970170721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: CAR SEQUENCING / MIXED-MODEL / TWO-SIDED ASSEMBLY LINE / EVOLUTIONARY ALGORITHM / MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION / DECOMPOSITION / ADAPTIVE DIFFERENTIAL EVOLUTION

TRIRAT KIRDPHOKSAP: MANY-OBJECTIVE CAR SEQUENCING PROBLEM ON MIXED-MODEL TWO-SIDED ASSEMBLY LINES. ADVISOR: PROF. PARAMES CHUTIMA, Ph.D., 432 pp.

Many-objective car sequencing problem on mixed-model two-sided assembly lines (MaCSP2SAL) is an important problem to increase efficiency in an automotive industry. This problem is classified as a many-objective optimization problems (MaOPs) and be non-deterministic polynomial hard problem (NP-Hard problem) due to complexity and the large amount of solution.

An adaptive MOEA/D hybridised with differential evolution (AMOEAD-DE) is an evolutionary metaheuristic which researcher has designed and developed to solve MaOPs. The concept of searching answers is to decompose the problem into subproblem for finding the optimal solution of each subproblem. And to learn the direction of answers changing toward the good or bad. In this work, proposes an AMOEAD-DE compared with a MODE, a MOEA/D and a MODE/D in order to solve MaCSP2SAL. The six objective be evaluated simultaneously; i.e. minimizing the number of color change, minimizing utility work, minimizing total idle time, minimizing the number of violations, minimizing the total production rate variation and minimizing the total parts usage variation.

The result from experiments show that AMOEAD-DE is clearly better convergence performance, diversity performance and quantity performance than the other algorithm in medium-large problem. The time consumption of AMOEAD-DE have a level of performance that does not differ much from the other algorithm. AMOEAD-DE is 2nd largest time consumption from 4 algorithm, secondary from MODE.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือด้วยความเอาใจใส่ใจ ตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่คอยให้คำแนะนำและยังคงให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และขอขอบคุณ นายวัชรวิทย์ ถนนทอง รุ่นพี่ที่คอยสอนงานและให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ผู้เกี่ยวข้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และสุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง ผู้เป็นที่รัก ผู้คอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้เสมอมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	6
1.4 ลักษณะปัญหาของงานวิจัย.....	9
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	9
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสายการประกอบ.....	11
2.1.1.1 รูปแบบของสายการประกอบเมื่อพิจารณาตามรูปร่าง	12
2.1.1.2 รูปแบบของสายการประกอบเมื่อพิจารณาตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ ที่ทำการผลิต.....	15
2.1.2 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์.....	16
2.1.2.1 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์.....	16
2.1.2.2 ปัญหาการจัดลำดับผลิตรถยนต์	17
2.1.2.3 การจัดลำดับผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์ (Objective Function).....	19
2.1.2.4 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์	26
2.1.3 การวัดสมรรถนะอัลกอริทึม.....	39

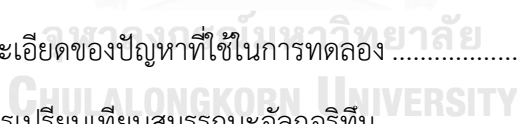
2.1.3.1	ตัวชี้วัดด้านการรู้เข้าสู่ของคำตอบ.....	39
2.1.3.2	ตัวชี้วัดด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ	40
2.1.3.3	ตัวชี้วัดด้านปริมาณคำตอบ	41
2.1.3.4	ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ	41
2.1.3.5	ตัวชี้วัดด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม	42
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
2.2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับการผลิตรถยนต์	43
2.2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม	45
2.2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน	46
2.3	สรุปท้ายบท.....	46
บทที่ 3	ทฤษฎีเกี่ยวกับอัลกอริทึม.....	48
3.1	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์.....	48
3.1.1	วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach)	48
3.1.2	วิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)	51
3.2	การแบ่งปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว	53
3.3	กระบวนการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์เฉพาะส่วน	55
3.4	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง	56
3.4.1	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก	57
3.4.1.1	การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง	57
3.4.1.2	การรีคอมบิเนชัน.....	62
3.4.1.3	การคัดเลือกคำตอบ	63
3.4.2	วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว	63
3.4.2.1	การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม	64

3.4.2.2 การปรับตัวด้วยกลยุทธ์	65
3.4.2.3 ตัวอย่างวิธีการพัฒนาการแบบปรับตัว	66
บทที่ 4 อัลกอริทึมที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย	68
4.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก	68
4.1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D ในการแก้ปัญหา	69
4.1.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D.....	72
4.1.3 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ MOEA/D	73
4.1.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MOEA/D ในการแก้ปัญหา	74
4.1.4.1 การสร้างค่าถ่วงน้ำหนักและคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วง น้ำหนัก 74	
4.1.4.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น	76
4.1.4.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น	77
4.1.4.4 การพัฒนาคำตอบ	77
4.1.4.5 การหาค่าที่ดีที่สุด.....	82
4.1.4.6 การประเมินจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา	85
4.1.4.7 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม	85
4.2 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์	86
4.2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE ในการแก้ปัญหา	86
4.2.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE.....	89
4.2.3 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ MODE	90
4.2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MODE ในการแก้ปัญหา	91
4.2.4.1 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น	91
4.2.4.2 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น	92

4.2.4.3 การพัฒนาคำตอบ.....	93
4.2.4.4 การหาค่าที่ดีที่สุด.....	97
4.2.4.5 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม.....	100
4.3 วิธีการพัฒนาการใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก.....	101
4.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE/D ในการแก้ปัญหา.....	101
4.3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE/D.....	104
4.3.3 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ MODE/D.....	105
4.3.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MODE/D ในการแก้ปัญหา.....	106
4.3.4.1 การสร้างค่าถ่วงน้ำหนักและคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วง น้ำหนัก 106	
4.3.4.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	108
4.3.4.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	110
4.3.4.4 การพัฒนาคำตอบ.....	110
4.3.4.5 การหาค่าที่ดีที่สุด.....	113
4.3.4.6 การประเมินจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา.....	116
4.3.4.7 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม.....	116
4.4 วิธีการพัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึด หลักการจำแนก.....	117
บทที่ 5 วิธีการพัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ โดยยึด หลักการจำแนก.....	118
5.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ AMOEA/D-DE.....	118
5.1.1 การปรับตัวด้วยกลยุทธ์ของ AMOEA/D-DE.....	119
5.1.2 การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุมของ AMOEA/D-DE.....	122
5.1.2.1 การปรับตัวของค่าปัจจัยขยายผลต่าง.....	123

5.1.2.2 การปรับตัวของอัตราการครอสโอเวอร์.....	124
5.1.2.3 การปรับตัวของค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน.....	125
5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ AMOEA/D-DE ในการแก้ปัญหา.....	125
5.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ AMOEA/D-DE	130
5.4 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ AMOEA/D-DE.....	131
5.5 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ AMOEA/D-DE ในการแก้ปัญหา	133
5.5.1 การสร้างค่าถ่วงน้ำหนักและคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก	133
5.5.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	136
5.5.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	137
5.5.4 การพัฒนาคำตอบ	138
5.5.5 การหาค่าที่ดีที่สุด	143
5.5.6 การประเมินจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา	146
5.5.7 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม	147
5.6 สรุปอัลกอริทึม AMOEA/D-DE.....	147
บทที่ 6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์.....	150
6.1 การทดสอบค่าพารามิเตอร์	150
6.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์	152
6.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง	152
6.3.1 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ MOEA/D.....	153
6.3.2 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ MODE.....	155
6.3.3 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ MODE/D.....	161
6.3.4 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ AMOEA/D-DE ...	171
6.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์.....	177

6.5	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม	187
บทที่ 7	การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม	188
7.1	การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม	188
7.2	ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอัลกอริทึม	189
7.3	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม	196
7.3.1	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก	197
7.3.2	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง	200
7.3.3	ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่	203
7.4	สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม	206
บทที่ 8	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	210
8.1	บทสรุป	210
8.2	ข้อเสนอแนะ	212
	รายการอ้างอิง	213
	ภาคผนวก	220
	ภาคผนวก ก รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง	221
	ภาคผนวก ข ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม	337
	ภาคผนวก ค การสร้างกราฟสามมิติสำหรับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์	427
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	432



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมรถยนต์เกิดการเติบโตและการแข่งขันกันอย่างมาก การพัฒนา รูปแบบของรถยนต์ให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ซึ่งมีความหลากหลายและเปลี่ยนแปลง กระแสนิยมของยุคปัจจุบัน ส่งผลให้ผู้ผลิตไม่สามารถเลือกผลิตเฉพาะรุ่นได้ ภาคอุตสาหกรรมรถยนต์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของสายการผลิต รวมถึงนโยบายส่งเสริม การตลาดอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเพื่อรองรับความต้องการของลูกค้า สายการประกอบจึงต้องมีความ ยืดหยุ่นและสามารถปรับเปลี่ยนประเภทของผลิตภัณฑ์บนสายการผลิตเดียวกันได้ สายการประกอบ จึงถูกออกแบบสำหรับหลายผลิตภัณฑ์ที่เข้ามาพร้อม ๆ กันและมีความต่อเนื่องตลอดเวลา (Akgündüz & Tunali, 2010) เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมรถยนต์ เนื่องจากในแต่ละวันมีคำสั่งซื้อ รถยนต์ทั้งรุ่นและสีที่แตกต่างกัน โดยที่สายการประกอบรถยนต์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของ โครงรถยนต์ (Body), ส่วนของการพ่นสี (Paint) และส่วนของการประกอบ (Assembly) อีกทั้ง รถยนต์แต่ละรุ่นมีลักษณะเฉพาะของตัวเอง (Option) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการติดตั้งชุดของตัวเอง จะต้องออกแบบมาเพื่อจัดการจำนวนรถยนต์ไม่ให้เกินกว่าจำนวนตัวของแต่ละตัวเลือกในลำดับการ ผลิตย่อยของแต่ละรอบการผลิต (Zinfiou, Gagné, & Gravel, 2008)

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิด ประสิทธิภาพของการผลิตสูงสุดตามวัตถุประสงค์ที่โรงงานอุตสาหกรรมต้องการ โดยที่วัตถุประสงค์จะ แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของอุตสาหกรรมนั้น ๆ อาทิ เช่น เวลาในการปรับตั้งน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด ความสม่ำเสมอของการใช้ชิ้นส่วนประกอบ ต้นทุนต่อ เวลาในการปรับตั้งเครื่องน้อยที่สุด อัตราความผันแปรของการผลิตน้อยที่สุด ความเสี่ยงในการหยุด ของสายการประกอบมีค่าน้อยที่สุด ฯลฯ (Akgündüz & Tunali, 2011) ซึ่งความเป็นจริงนั้น การ จัดลำดับการผลิตแบบวัตถุประสงค์เดียวมีความเป็นไปได้น้อย เนื่องจากในอุตสาหกรรมจริงมีหลาย วัตถุประสงค์ที่ต้องการจะปรับปรุงประสิทธิภาพไปพร้อม ๆ กัน ในข้อจำกัดความขัดแย้งกันของแต่ละ วัตถุประสงค์ จึงจำเป็นต้องแก้ไขปัญหานี้ในรูปแบบของการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์ (Hyun, Kim, & Kim, 1998)

ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์ถูกจัดเป็นปัญหาประเภทเอ็นพีฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard: NP-Hard) เนื่องจากมีความยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน และจำนวนคำตอบมีจำนวนมาก จึงมีการนำวิธีทางฮิวริสติกและเมตาฮิวริสติกเข้ามาแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problems: MOPs) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมและยอมรับได้ ด้วยเวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อยลง ยกตัวอย่างเช่น เจนเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithms: GA) ซึ่งเป็นเมตาฮิวริสติกที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต เพราะเจนเนติกอัลกอริทึมให้คำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อย Mansouri (2005) ได้เสนอวิธีแก้ปัญหาการจัดลำดับแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithm: MOGA) ด้วยวิธี COMSOAL ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อย มีขั้นตอนในการดำเนินงานที่ไม่ซับซ้อนมาก และสามารถนำไปใช้ในงานจริงได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ Chutima and Olarnviwatchai (2016) ได้นำวิธีการบรรจบแบบขยาย (Combinatorial Optimization with Coincidence Expand: COIN-E) มาใช้ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์ พบว่า COIN-E สามารถค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพดีกว่า COIN และยังใช้เวลาในการหาคำตอบที่เร็วกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ

ปัญหาจำนวนมากในอุตสาหกรรมจริงรวมถึงการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์จะมีจำนวนวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งอาจขัดแย้งกันและต้องพิจารณาพร้อมกัน เรียกปัญหานี้ว่าปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) เนื่องจากเป็นปัญหาที่มีมิติของแกนเวกเตอร์หรือจำนวนวัตถุประสงค์ที่มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) ลดลง และแก้ปัญหา MaOPs ได้ไม่ดีเท่าที่ควร (He & Yen, 2016)

MOEAs ส่วนใหญ่ จะใช้การพิจารณาคำตอบโดยรวม ด้วยการจัดอันดับของคำตอบที่ไม่ถูกรอรับหรือเรียกว่าวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) วิธีการนี้มีความซับซ้อน ใช้เวลามาก และยากที่จะเกิดสมดุลของความหลากหลายรวมถึงการลู่เข้าของคำตอบ (Li & Zhang, 2006) เนื่องจากจำนวนวัตถุประสงค์ที่มาก ทำให้การคัดเลือกคำตอบเกิดคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (1st frontier) จำนวนมากและอยู่รวมเป็นกระจุก ส่งผลให้ทิศทางของการพัฒนาคำตอบติดอยู่ในคำตอบที่เฉพาะกลุ่ม (Local Optima)

การแก้ปัญหา MaOPs อย่างง่ายที่สุด ทำได้ด้วยการลดจำนวนวัตถุประสงค์ลง โดยการรวมวัตถุประสงค์ที่ไม่ขัดแย้งกันไว้เป็นเป้าหมายเดียว (Brockhoff & Zitzler, 2009) อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่สามารถใช้กับหลายปัญหาในทางปฏิบัติได้ ด้วยเหตุนี้วิธีการแบบใหม่จึงถูกพัฒนาขึ้น เรียกว่าวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MaOEAs) โดยหนึ่งในอัลกอริทึมที่โดดเด่นของ MaOEAs คือวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย

วัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) ซึ่งถูกพัฒนาโดย Q. Zhang and Li (2007) วิธีการดำเนินงานของ MOEA/D จะทำการจำแนกปัญหา MaOP ออกเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว (ปัญหาย่อย) หลายปัญหา และทำการแก้ปัญหาย่อยไปพร้อมกัน แต่ละปัญหาย่อยจะได้คำตอบที่ดีที่สุด

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหามากวัตถุประสงค์เป็นการประมาณค่าคำตอบซึ่งจำเป็นต้องเลือกคำตอบสุดท้ายที่จะไปดำเนินการกับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (MaOPs) ส่วนใหญ่มีจำนวนคำตอบมากและไม่รู้ขอบเขตที่แน่ชัด อีกทั้งยังใช้เวลามากในการค้นหาคำตอบ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่โดดเด่นของ MaOEAs จึงเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจาก MOEA/D สามารถค้นหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto optimal solutions) ได้ในเงื่อนไขเดียว ไม่เกิดการค้นหาแบบกระจุกตัว เพราะแบ่งการค้นหาเป็นปัญหาย่อย ทำให้มีการกำหนดทิศทางและขอบเขตของคำตอบในแต่ละปัญหาย่อยที่ชัดเจน รวมถึงความซับซ้อนและเวลาในการค้นหาคำตอบน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ เช่น วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA II) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) อีกทั้งยังคงคำตอบที่หลากหลาย โดย MOEA/D จะเห็นผลลัพธ์ที่ดีและแตกต่างกับอัลกอริทึมอื่น ๆ อย่างชัดเจน เมื่อมีวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 4 ถึง 15 วัตถุประสงค์ (Q. Zhang & Li, 2007)

ถึงแม้ว่า MOEA/D จะสามารถแก้ปัญหามากวัตถุประสงค์ได้หลากหลายรูปแบบ แต่วิธีการพัฒนาคำตอบเชิงพันธุกรรมแบบทั่วไป (Crossover และ Mutation ของ GA) มีความละเอียดที่น้อยในการค้นหาคำตอบเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ส่งผลให้ได้คำตอบที่ไม่หลากหลาย เมื่อใช้กับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ที่มีค่าต่อเนื่อง (Continuous MaOPs) Li and Zhang (2006) จึงออกแบบวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm based on Decomposition: MODE/D) เพื่อใช้สำหรับปัญหา Continuous MaOPs ซึ่งยังคงใช้การคัดเลือกคำตอบที่ดีของแต่ละปัญหาย่อยตามแบบ MOEA/D แต่เปลี่ยนวิธีการพัฒนาคำตอบโดยใช้กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution Operator: DE Operator) แทน โดยกำหนดให้ใช้ผลต่างของสตริงข้างเคียง (ปัญหาย่อยข้างเคียง) ของแต่ละปัญหาย่อยในการพัฒนาคำตอบ เนื่องจากสตริงข้างเคียงจะมีความสัมพันธ์ของค่าวัตถุประสงค์ที่ใกล้เคียงกัน โดยหลักการของ DE Operator จะใช้การกลายพันธุ์ด้วยผลต่างของคำตอบในการหาคำตอบจุดใหม่บนแกนพิกัด (Coordinate) หรือเรียกว่าระยะห่างระหว่างจุดของแต่ละแกนพิกัด (Distances) ด้วยวิธีการนี้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่ละเอียดมากขึ้นได้

DE Operator ที่ใช้กันในปัจจุบัน มีหลากหลายกลยุทธ์ในการพัฒนาคำตอบ โดยมีพารามิเตอร์ควบคุมหลัก ๆ ได้แก่ จำนวนประชากร ค่าปัจจัยขยายผลต่าง และอัตราการครอสโอเวอร์ สำหรับ MODE/D จัดอยู่ในกลุ่มของวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution) ซึ่งจะถูกกำหนดกลยุทธ์และพารามิเตอร์ควบคุมไว้ตั้งแต่ต้นและไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งจบกระบวนการ ส่งผลให้เกิดรูปแบบการค้นหาคำตอบที่ซ้ำ เสียงต่อการติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่มและไม่สามารถหาคำตอบที่ดีกว่าได้ S. M. Venske, Gonçalves, and Delgado (2014) ได้นำวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (Self-Adaptive Differential Evolution: SaDE) มาประยุกต์ใช้กับ MODE/D ให้เกิดการเรียนรู้ในการค้นหาคำตอบ ทำให้อัลกอริทึมสามารถปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ในระหว่างการทำงานได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงออกแบบวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Adaptive Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition hybridised with Differential Evolution: AMOEA/D-DE) โดยนำวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (SaDE), วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับพารามิเตอร์ (jDE) และวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับพารามิเตอร์แบบใหม่ (New Adaptive Differential Evolution: JADE) มาปรับปรุงและพัฒนา MOEA/D เพื่อให้อัลกอริทึมมีความเหมาะสมกับปัญหาของงานวิจัย และสามารถเรียนรู้ทิศทางของคำตอบที่กำลังเปลี่ยนแปลงไปทางที่ดีและไม่ดีได้ โดยกลยุทธ์ในการพัฒนาคำตอบของ DE Operator จะถูกเลือกใช้ตามสถานการณ์ที่เหมาะสมในการค้นหาคำตอบ และมีการปรับพารามิเตอร์ควบคุม เพื่อให้การค้นหาคำตอบมีความหลากหลายและความละเอียดของคำตอบมากขึ้น อีกทั้งยังคงการค้นหาที่มีทิศทางของคำตอบที่ชัดเจน วิธีในการพัฒนาคำตอบที่ดี และเวลาในการค้นหาคำตอบและความซับซ้อนน้อย โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการจัดลำดับการผลิตรถยนต์จำนวนทั้งสิ้น 6 วัตถุประสงค์ ดังนี้ 1) จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด (Minimizing the Number of Color Changing), 2) ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work), 3) เวลารอคอยงานรวมในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Total Idle Time), 4) จำนวนรถยนต์ที่ละเมิดตัวเลือกรวมน้อยที่สุด (Minimizing the Number of Violations), 5) ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing the Total Production Rate Variation) และ 6) ความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบน้อยที่สุด (Minimizing the Total Parts Usage Variation) โดยใช้วิธีคัดเลือกคำตอบที่ดีด้วยวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละปัญหาย่อย และนำคำตอบที่ได้จาก AMOEA/D-DE มาคัดเลือกด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) เพื่อจัดอันดับความแข็งแกร่งกับสตริงคำตอบและสามารถเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ ได้ ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม จะพิจารณาจากคำตอบที่แต่ละอัลกอริทึมหาได้เทียบกับกลุ่มคำตอบที่ดี

ที่สุดหรือเรียกว่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate Pareto Optimal Frontier) เพื่อหาว่าอัลกอริทึมใดที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาได้ดีกว่า

โดยปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน จะถูกปรับปรุงและพัฒนาจากงานวิจัยของ Tanontong (2015) ซึ่งได้นำวิธีการบรรจบร่วมกับพีชชีลอจิก (Combinatorial Optimization with Coincidence with Fuzzy Logic: COIN-F), วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ II (NSGA II), วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และวิธีการบรรจบแบบขยาย (COIN-E) มาเปรียบเทียบสมรรถนะในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการประเมินจำนวน 3 วัตถุประสงค์ ได้แก่ 1) จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสัญญาณที่น้อยที่สุด 2) ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด และ 3) จำนวนรถยนต์ที่ละเมิดร่น้อยที่สุด ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงเพิ่มวัตถุประสงค์ของปัญหาอีก 3 วัตถุประสงค์ แบ่งเป็น 2 ด้าน ดังนี้ 1) วัตถุประสงค์ที่เป็นส่วนกลับของปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิต คือ เวลารอคอยรวมในการผลิตหรือเวลาว่างงานรวมของพนักงาน เพื่อเพิ่มอรรถประโยชน์เฉลี่ยของพนักงานในสายการประกอบให้ดียิ่งขึ้น 2) วัตถุประสงค์ที่สอดคล้องกับระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just In Time System: JIT) ได้แก่ ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิตและความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบ เพื่อให้ใช้ชิ้นส่วนสำหรับการประกอบในจำนวนคงที่ ลดจำนวนบัฟเฟอร์การผลิต (ชิ้นส่วนที่รอการผลิต) ลดความเสี่ยงการขาดชิ้นส่วนเนื่องจากความไม่แน่นอนของจำนวนที่ใช้ และทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่ทราบจำนวนที่ชัดเจนได้ อีกทั้งในงานวิจัยนี้ ยังได้ปรับปรุงและเพิ่มปัญหาตัวอย่างจากเดิม 10 ปัญหา เป็น 18 ปัญหา เพื่อให้ปัญหาในการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมมีความหลากหลายของเงื่อนไขความต้องการ และรูปแบบคำตอบมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (AMOE/D-DE), วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MODE/D), วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) และวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (MODE) ในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์มากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัย มีดังนี้

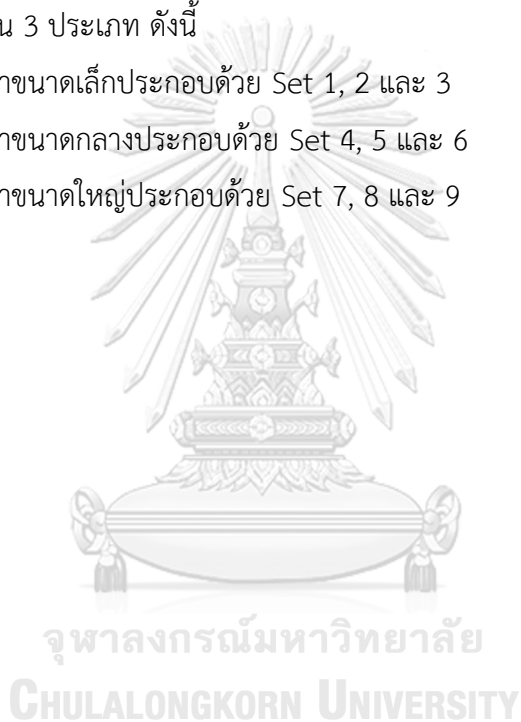
1. ทำการศึกษาเฉพาะปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่มีความสมดุล โดยรถยนต์ที่เข้าสู่สายประกอบในแต่ละรอบการผลิต มีมากกว่า 2 รุ่นขึ้นไป แต่ละรุ่นสามารถเข้าสู่สายการประกอบได้อย่างอิสระ
2. อัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา
 - ก. วิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Adaptive Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition hybridised with Differential Evolution: AMOEAD-DE)
 - ข. วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D)
 - ค. วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)
 - ง. วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm based on Decomposition: MODE/D)
3. การหาคำตอบของปัญหาการจัดลำดับการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมมีวัตถุประสงค์ดังนี้
 - ก. เพื่อหาจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด (Minimizing the Number of Color Changing)
 - ข. เพื่อหาปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Utility Work)
 - ค. เพื่อหาเวลารอคอยงานรวมในการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing Total Idle Time)
 - ง. เพื่อหาจำนวนรถยนต์ที่ละเมิดตัวเลือกรวมน้อยที่สุด (Minimizing the Number of Violations)
 - จ. เพื่อหาความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิตน้อยที่สุด (Minimizing the Total Production Rate Variation)
 - ฉ. เพื่อหาความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบน้อยที่สุด (Minimizing the Total Parts Usage Variation)

4. การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง AMOEA/D-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE โดยใช้ตัวชี้วัด 5 ประเภท ดังนี้

- ก. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics)
- ข. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence-Diversity Metrics)
- ค. ด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics)
- ง. ด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics)
- จ. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม (Computational Time)

5. งานวิจัยนี้ใช้ปัญหาการทดลองมาตรฐานดัดแปลงจาก Mansouri (2005) ในการทดสอบ โดยแบ่งปัญหาออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- ก. ปัญหาขนาดเล็กประกอบด้วย Set 1, 2 และ 3
- ข. ปัญหาขนาดกลางประกอบด้วย Set 4, 5 และ 6
- ค. ปัญหาขนาดใหญ่ประกอบด้วย Set 7, 8 และ 9



ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

ปัญหาการทดลอง		จำนวนรุ่น รถยนต์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS)	ความยาว สตริง	จำนวนสี รถยนต์	จำนวน ตัวเลือก	จำนวน ชิ้นส่วน	
Small	Set 1	S1	5	7:3:2:2:1	15	5:3	4	10
		S2	5	4:3:3:3:2	15	5:3	4	10
	Set 2	S3	5	8:7:2:2:1	20	5:3	4	10
		S4	5	5:4:4:4:3	20	5:3	4	10
	Set 3	S5	10	7:5:1:1:1:1:1:1:1:1	20	9:4	7	20
		S6	10	4:4:4:2:1:1:1:1:1:1	20	9:4	7	20
Medium	Set 4	M1	10	6:5:5:5:4:4:3:3:2	40	10:4	7	30
		M2	10	11:7:5:5:4:2:2:1:1	40	10:4	7	30
	Set 5	M3	12	8:7:5:5:5:4:4:4:3:3:1:1	50	10:4	8	30
		M4	12	12:9:8:6:5:3:2:1:1:1:1:1	50	10:4	8	30
	Set 6	M5	14	8:7:7:7:6:6:5:4:4:2:1:1:1:1	60	12:5	10	45
		M6	14	15:15:5:4:4:4: 3:2:2:2:1:1:1:1	60	12:5	10	45
Large	Set 7	L1	15	20:20:20:15:15: 1:1:1:1:1:1:1:1:1:1	100	15:7	10	60
		L2	15	15:15:10:10:10:10: 10:10:4:1:1:1:1:1:1	100	15:7	10	60
	Set 8	L3	15	20:20:20:15:15:10:20: 10:5:20:5:10:10:10:10	200	15:7	12	60
		L4	15	25:20:15:20:10:10:15: 5:15:15:10:15:10:10:5	200	15:7	12	60
	Set 9	L5	18	45:30:30:15:10:10:10: 8:7:7:7:5:3:3:1:1:1	200	18:9	12	75
		L6	18	25:25:20:20:20:20:15: 10:10:5:5:5:5:5:2:2:1	200	18:9	12	75

หมายเหตุ: Set ปัญหาการทดลองดัดแปลงจาก Mansouri (2005)

1.4 ลักษณะปัญหาของงานวิจัย

ผู้วิจัยได้นำสมมติฐานบางส่วนจาก Hyun et al. (1998) ดังนี้

1. เป็นสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
2. สายการประกอบที่นำมาจัดลำดับการผลิตมีความสมดุล
3. ผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตมีหลากหลายรุ่น แต่คุณสมบัติคล้ายกันจึงสามารถผลิตบนสายการประกอบเดียวกันได้ บางผลิตภัณฑ์จะไม่มีการทำงานบางชิ้นงาน

4. พิจารณาความต้องการผลิตภัณฑ์จาก Minimum Part Set (MPS)
5. สถานีงานเป็นแบบปิด
6. ทราบจำนวนสถานีงานในสายการผลิตและเวลาดำเนินงานของชิ้นงานที่อยู่ในสถานีงาน
7. เวลาการเดินทางของพนักงานไม่ถูกนำมาพิจารณา
8. รอบเวลาการปล่อยสินค้าเข้าสู่สายพานการผลิตคงที่
9. การปรับเปลี่ยนสีขึ้นอยู่กับลำดับงานที่อยู่ก่อนหน้า
10. แต่ละรุ่นของผลิตภัณฑ์ถูกกำหนดตัวเลือก (Option) ไว้
11. การนับจำนวนการละเมิดจะขึ้นอยู่กับวันก่อนหน้า
12. ณ เวลาเริ่มต้นทุกงานมีความพร้อมในการปฏิบัติงาน
13. งานต้องถูกทำจนเสร็จตามที่กำหนด จึงส่งไปยังเครื่องจักรถัดไปได้
14. ณ เวลาใด ๆ หนึ่งเครื่องจักรสามารถทำได้หนึ่งงานเท่านั้น
15. ไม่มีการยกเลิกคำสั่งผลิตและไม่มีการแทรกงาน
16. พื้นที่แถวคอยในกระบวนการผลิตไม่จำกัด

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม MABLAB
3. สร้างอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม MATLAB
4. ทดสอบและแก้ไขโปรแกรมให้มีความถูกต้อง
5. ประเมินผลแต่ละอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา
6. วิเคราะห์และสรุปผล
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีดังนี้

1. สามารถลดความยุ่งยากและระยะเวลาในการแก้ปัญหาของการจัดลำดับการผลิตรถยนต์สำหรับหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน
2. เป็นแนวทางในการช่วยตัดสินใจในการจัดลำดับการผลิตรถยนต์ในอุตสาหกรรมจริง



บทที่ 2

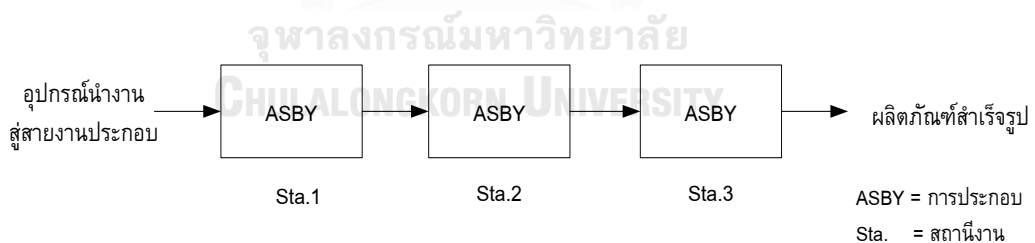
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยส่วนของทฤษฎีได้แก่ รูปร่างและลักษณะของสายการประกอบประเภทต่าง ๆ การแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน และตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม และ ส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสายการประกอบ

สายการประกอบ (Assembly Line) เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow-Oriented Production System) โดยประกอบด้วยสถานีงาน (Workstation) ต่าง ๆ ถูกเชื่อมกันไว้ด้วยระบบสายพานหรือระบบเคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ ซึ่งทำหน้าที่เคลื่อนย้ายชิ้นงานในกระบวนการจากสถานีหนึ่งไปยังสถานีถัดไปด้วยความเร็วหรือรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) คงที่ โดยแต่ละสถานีงานจะทำการประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกันตามชิ้นงานของแต่ละสถานีงานนั้น ๆ จนสิ้นสุดกระบวนการผลิตทั้งหมดได้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finished Goods) ณ จุดปลายของสายการประกอบ (Scholl & Boysen, 2009) ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 ไดอะแกรมทิศทางการไหลของชิ้นงานบนสายการประกอบ (Olanviwatchai, 2013)

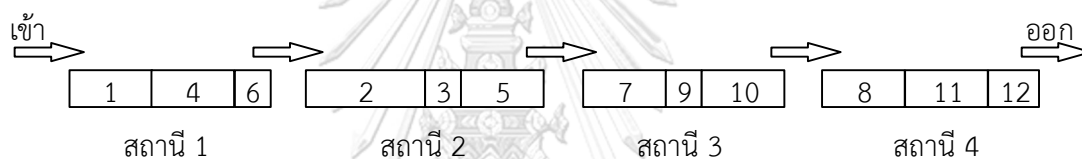
สายการประกอบถูกนำมาใช้แพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน เพื่อผลิตสินค้าในหลากหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งประเภทต่าง ๆ โดยสามารถพิจารณาจากจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการประกอบชิ้นงานของแต่ละสถานี หรือรูปร่างของสายการประกอบ (Boysen, Fliedner, & Scholl, 2007) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1.1 รูปแบบของสายการประกอบเมื่อพิจารณาตามรูปร่าง

สายการประกอบสามารถแบ่งประเภทตามรูปร่างได้ทั้งหมด 5 ประเภท (Betancourt, 2007) ดังนี้

(1) สายการประกอบแบบเส้นตรง (Straight Line)

สายการประกอบแบบเส้นตรง เป็นสายการประกอบที่มีทิศทางการไหลของชิ้นงานไปในทางเดียวกัน จากสถานีแรกถึงสถานีสุดท้าย ไม่มีการย้อนกลับของชิ้นงานเพื่อมาทำงานก่อนหน้า ดังภาพที่ 2-2

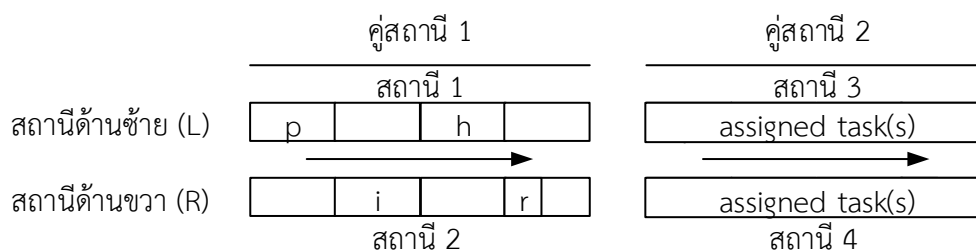


ภาพที่ 2-2 สายการประกอบแบบเส้นตรง (Olanviwatchai, 2013)

(2) สายการประกอบแบบสองด้าน (Two-Sided Assembly Line)

สายการประกอบแบบสองด้าน เป็นสายการประกอบซึ่งถูกออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่และจำนวนการผลิตมาก อาทิ เช่น รถยนต์ และรถบรรทุก โดยสถานีงานจะอยู่ทั้งสองด้านของสายการประกอบได้แก่ สถานีงานด้านซ้าย (L) และสถานีงานด้านขวา (R) เรียกสถานีงานที่อยู่คู่กันว่า คู่สถานีงาน (Mated Station) ดังภาพที่ 2-3 และภาพที่ 2-4 (Özcan & Toklu, 2009) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสายการประกอบดังนี้

1. สายการประกอบแบบสองด้านมีความยาวน้อยกว่าสายการประกอบแบบด้านเดียว
2. ลดความสูญเสียของระยะเวลาการเดินของพนักงานและเวลาการผลิตน้อยลง



ภาพที่ 2-3 สายการประกอบแบบสองด้าน (Ozcan & Toklu, 2009)



ภาพที่ 2-4 สายการประกอบแบบสองด้านในอุตสาหกรรมยานยนต์

สายการประกอบแบบสองด้านจะแบ่งประเภทชิ้นงานที่จัดสรรลงในสถานีงานเป็น 2 แบบ ดังนี้

1. ชิ้นงานที่จัดสรรลงในสถานีงานได้เพียงด้านเดียว ได้แก่ ชิ้นงานที่จัดสรรลงในสถานีงานด้านซ้าย (L-Type) และชิ้นงานที่จัดสรรลงในสถานีงานด้านขวา (R-Type)
2. ชิ้นงานที่จัดสรรลงในสถานีงานได้ทั้งสองด้าน (E-Type)

(3) สายการประกอบแบบขนาน (Parallel Lines)

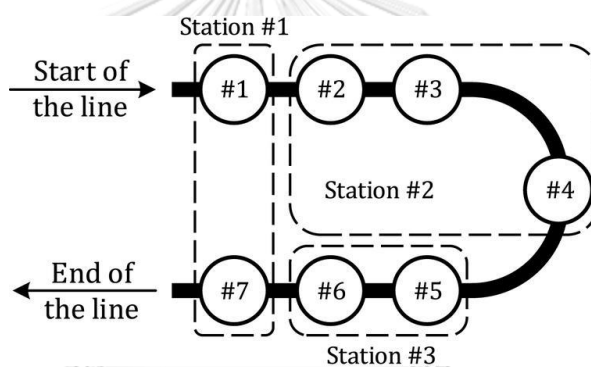
สายการประกอบแบบขนาน เป็นสายการประกอบซึ่งถูกออกแบบเป็นเส้นตรงขนานสองเส้น โดยบางคู่สถานีสามารถใช้เครื่องมือหรือทำงานร่วมกันได้ ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 สายการประกอบแบบขนาน

(4) สายการประกอบแบบตัวยู (U-Shaped Line)

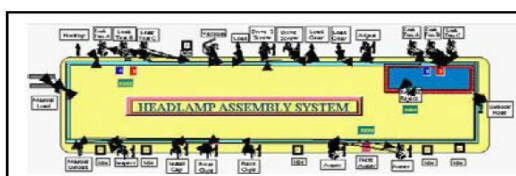
สายการประกอบแบบตัวยู เป็นสายการประกอบเส้นตรงที่ถูกจัดเรียงเป็นตัวยู มีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของสายการผลิตใกล้กัน ช่วยลดการใช้พื้นที่แนวยาวลง ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 สายการประกอบแบบตัวยู

(5) สายการประกอบแบบวงกลมหรือแบบปิด (Circle Lines or Closed Lines)

สายการประกอบแบบวงกลมหรือแบบปิด เป็นสายการประกอบซึ่งสถานีงานถูกจัดวางรอบระบบสายพานลำเลียงแบบหัวชนท้าย ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 สายการประกอบแบบวงกลมหรือแบบปิด (Betancourt, 2007)

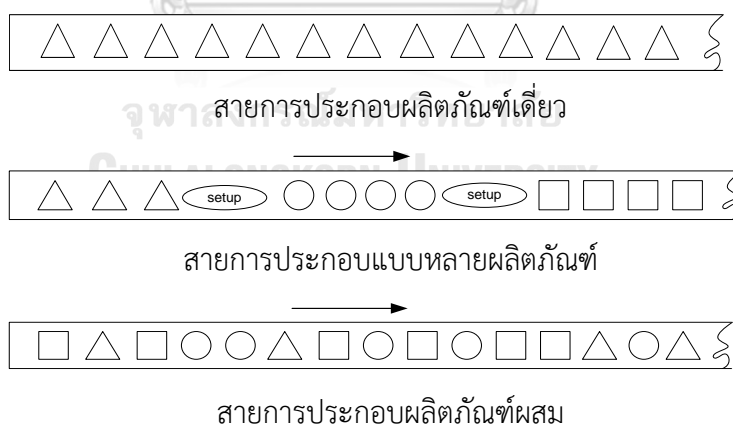
2.1.1.2 รูปแบบของสายการประกอบเมื่อพิจารณาตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต

สายการประกอบสามารถแบ่งประเภทตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังนี้

1. สายการประกอบผลิตภัณฑ์เดี่ยว (Single Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบซึ่งผลิตผลิตภัณฑ์เพียงชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น แสดงดังภาพที่ 2-8

2. สายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ (Multi-Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบซึ่งผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป วิธีการผลิตของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะต้องมีกระบวนการใกล้เคียงกัน โดยจะผลิตเป็นชุดของผลิตภัณฑ์ (Batch) เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์จะต้องปรับตั้ง (Set up) สายการผลิตใหม่ แสดงดังภาพที่ 2-8

3. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Assembly Line) เป็นสายการประกอบซึ่งผลิตผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่นเดียวกับสายการประกอบแบบหลายผลิตภัณฑ์ สายการประกอบประเภทนี้จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบพื้นฐานเหมือนกัน แต่แตกต่างกันในส่วนส่วนตัวเลือก (Option) ของแต่ละผลิตภัณฑ์ งานแต่ละชนิดสามารถเข้าสู่สายการผลิตได้อย่างอิสระ ไม่มีข้อกำหนดว่าต้องทำผลิตภัณฑ์ใดก่อนหรือหลัง และระหว่างการผลิตไม่มีการปรับตั้งสายการผลิต แสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 สายการประกอบเมื่อพิจารณาตามจำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิต

2.1.2 ปัญหาการจัดลำดับการผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีพร้อมกันในทุก ๆ ด้านนั้น เป็นไปได้ยาก เนื่องจากแต่ละวัตถุประสงค์อาจมีความขัดแย้งอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้ปัญหามีหลายวัตถุประสงค์ไม่สามารถบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Konak, Coit, & Smith, 2006)

2.1.2.1 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์

เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์หรือเทคนิคการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) เป็นการค้นหาเซตของคำตอบที่อยู่ในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Feasible Region) ของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยมีหลายวิธี อาทิ เช่น วิธีคำนวณค่าแบบเวกเตอร์ (Vector Evaluation Approach), วิธีการรวมฟังก์ชันโดยอาศัยการให้น้ำหนัก (Weighted Sum Approach), วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach) และวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแกร่งด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) และวิธีเทบปีเชฟฟ์ ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบด้วยวิธีการให้ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นทางเลือก โดยคำตอบที่ได้จากทั้งสองวิธีจะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำจากคำตอบอื่น (Non-Dominated Solution) หรือไม่สามรถระบุได้ว่าคำตอบใดดีกว่าคำตอบใด (Kamprorn, 2008) กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. กลุ่มคำตอบที่ดีควรอยู่ภายในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงหรือเป็นสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
2. กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีคำตอบที่หลากหลาย และมีการกระจายของกลุ่มคำตอบแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)
3. กลุ่มคำตอบที่ดีต้องสามารถค้นหาคำตอบที่อยู่ปลายสุดของกลุ่มคำตอบในขอบเขตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดได้

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยหาค่าวัตถุประสงค์ทุกตัวที่น้อยที่สุด และพิจารณาไปพร้อมกันทั้งหมดด้วยวิธีดังต่อไปนี้

1. วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach)
2. วิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

แสดงรายละเอียดและขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ในบทที่ 3

2.1.2.2 ปัญหาการจัดลำดับผลิตรถยนต์

เนื่องจากรถยนต์เป็นการผลิตตามคำสั่งซื้อ (Make to Order) จากลูกค้าในแต่ละวัน ดังนั้นคำสั่งซื้อจึงต้องนำมาวางแผนจัดลำดับการผลิตลงแต่ละวัน

กระบวนการผลิตรถยนต์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักตามลำดับ ดังนี้

1. ส่วนของโครงรถยนต์ (Body) ดังภาพที่ 2-11
2. ส่วนของการพ่นสี (Paint) ดังภาพที่ 2-12
3. ส่วนของการประกอบ (Assembly) ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-9 ส่วนงานผลิตโครงรถยนต์ (Body)



ภาพที่ 2-10 ส่วนงานพ่นสีรถยนต์ (Paint)



ภาพที่ 2-11 ส่วนงานประกอบรถยนต์ (Assembly)

Bolat and Yano (1992b) ได้พิสูจน์กฎการจัดลำดับของปัญหาในการสายประกอบรถยนต์ โดยสมมติให้ $o \in O$ เป็นตัวเลือกของรถ ถูกทำในสถานี $k \in K$ แต่ตัวเลือกจะมีเวลาการทำงานหลักสามค่าคือ c_o^+ แสดงเวลาการทำงานที่มากที่สุด c_o^- แสดงเวลาการทำงานที่น้อยที่สุด และ c_o แสดงรอบเวลาการทำงานของตัวเลือก ดังนั้น $(c_o^- \leq c_o \leq c_o^+) \leq l_o$ ที่ l_o เป็นความยาวสถานี (หน่วยเวลา) Bolat and Yano Sequencing Rule (BYSR) approach คำนวณด้วยกฎการจัดลำดับ $p_o:q_o$ สำหรับตัวเลือก o ดังสมการที่ 2-1 และ 2-2

$$p_o = \left[\frac{l_o - c_o}{c_o^+ - c_o} \right]$$

(2-1)

$$q_o = p_o + \left[\frac{p_o \cdot (c_o^+ - c_o)}{c_o - c_o^-} \right]$$

$\forall o \in O$ (2-2)

p_o แทนจำนวนสูงสุดที่เป็นไปได้ในการเรียงโมเดลที่มีตัวเลือก o ติดกัน q_o โดยไม่ทำให้เกิดภาระงานเกินกว่ากำหนด และ q_o แทนจำนวนกลุ่มของโมเดลที่เรียงติดกัน ตัวอย่างเช่น ขั้นตอนการประกอบหลังคาเปิดประทุนที่มีอัตราส่วน $p_o:q_o$ เท่ากับ 1 ต่อ 3 หมายความว่า ในการผลิตรถยนต์ทุก ๆ 3 คัน จะมีรถยนต์ที่ประกอบตัวเลือกนี้ได้ไม่เกิน 1 คัน หากเกินจะนับเป็นการละเมิดเกิดขึ้น พิจารณาไปจนครบลำดับการผลิต

ลำดับสีของรถยนต์ที่ผลิต มีผลอย่างมากต่อจำนวนการล้างหัวปืนพ่นสี เพราะหากมีการเปลี่ยนแปลงสีทุกครั้ง หรือพ่นสีเดียวติดต่อกันเกินจำนวนที่กำหนด ก็จะต้องล้างหัวปืนพ่นสีเช่นเดียวกัน

2.1.2.3 การจัดลำดับผลิตแบบหลายวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 6 วัตถุประสงค์ โดยให้ค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญเท่ากันทั้งหมด ดังนี้

1. จำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด
2. ปริมาณงานที่ไม่สำเร็จในการผลิตน้อยที่สุด
3. เวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่อานีงานน้อยที่สุด
4. จำนวนการละเมิดตัวเลือกรวมน้อยที่สุด
5. ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิตน้อยที่สุด
6. ความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบน้อยที่สุด

(1) จำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด

ลำดับสีของรถยนต์ที่ผลิต มีผลอย่างมากต่อเวลาและต้นทุนในการพ่นสีรถแต่ละคัน เพราะถ้าลำดับการผลิตรถยนต์มีสีเดียวติดต่อกัน ก็ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดหัวปืนพ่นสีและเปลี่ยนน้ำยาในการพ่น แต่หากพ่นสีเดียวติดต่อกันมากเกินค่าที่กำหนด ก็มีความจำเป็นต้องล้างหัวปืนพ่นสีเนื่องจากหัวปืนจะมีการอุดตันและสีที่พ่นจะไม่มีคุณภาพ (Chutima & Olarnviwatchai, 2016) แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-3

$$f_1(x) = \sum_{k=0}^{nc-1} \delta_{COL_{k,k+1}}$$

(2-3)

เมื่อ	$f_1(x)$	คือ จำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงสี
	$\delta_{COL_{k,k+1}}$	คือ การเปลี่ยนสีพ่นรถยนต์ ณ ตำแหน่ง k และ $k + 1$ โดย $\delta_{COL_{k,k+1}}$ เท่ากับ 1 เมื่อเกิดการเปลี่ยนสีพ่นรถยนต์ และ $\delta_{COL_{k,k+1}}$ เท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเปลี่ยนสีพ่นรถยนต์
	k	คือ ตำแหน่งใด ๆ ในลำดับการผลิต โดยที่ $k \in [1, nc]$ เมื่อพิจารณาลำดับการผลิตในรอบการผลิตปัจจุบัน $k \in [-\infty, 0]$ เมื่อพิจารณา

ลำดับการผลิตในรอบการผลิตก่อนหน้า และ $k \in [nc + 1, \infty]$ เมื่อพิจารณาลำดับการผลิตในรอบการผลิตถัดไป

d_m คือ สัดส่วนการผลิตของรถยนต์รุ่นที่ m โดยที่ $m = 1, 2, \dots, M$
 nc คือ ผลรวมสัดส่วนการผลิต หรือจำนวนรถที่ผลิตทั้งหมด

(2) ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด

ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จในการผลิต คือผลรวมของปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จทุกผลิตภัณฑ์ ณ คู่สถานีงาน n_m โดยเวลาที่ต้องทำงานที่ยังไม่เสร็จ จะส่งผลให้สายการประกอบต้องหยุดดำเนินงานเพื่อทำงานปัจจุบันให้เสร็จสิ้นก่อน จึงจะสามารถดำเนินงานประกอบรถยนต์ลำดับการผลิตถัดไปได้ (Olanvithchai, 2013) โดยในส่วนของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นเวลาที่เกินจากรอบเวลาการผลิต และส่วนที่สองเป็นเวลาในการปรับสายพานลำเลียงกลับสำหรับการผลิตในรอบถัดไป แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-4 ถึง สมการที่ 2-12

$$f_2(x) = \sum_{n_m=1}^{N_M} \left(\sum_{i=1}^{nc} U_{i,n_m} + \frac{Z_{(nc+1),n_m}}{v_c} \right) \quad (2-4)$$

$$U_{i,n_m} = \left\{ \begin{array}{l} \max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\} - L_{n_m})}{v_c} \right] \\ + \max \left[0, \frac{(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\} - L_{n_m})}{v_c} \right] \end{array} \right\} \quad (2-5)$$

$$Z_{(i+1),n_m} = \max \left\{ \begin{array}{l} \max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m}\} - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right] \\ , \max \left[0, \min \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m}\} - \gamma v_c, L_{n_m} - \gamma v_c \right) \right] \end{array} \right\} \quad (2-6)$$

$$\sum_{m \in M} X_{i,m} = 1 \quad \forall i \in nc \quad (2-7)$$

$$\sum_{i \in nc} X_{i,m} = d_m \quad \forall m \in M \quad (2-8)$$

$$T = \sum_{n_m=1}^{N_M} \max \left[\sum_{m=1}^M (t_{2n_m-1,m} d_m + Y_{2n_m-1,m}), \sum_{m=1}^M (t_{2n_m,m} d_m + Y_{2n_m,m}) \right] \quad (2-9)$$

$$L_{n_m} = v_c \times CT \quad (2-10)$$

$$\gamma = \frac{T}{nc \times N_M} \quad (2-11)$$

$$w = \gamma \times v_c \quad (2-12)$$

- เมื่อ
- $f_2(x)$ คือ ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิต (หน่วยเวลา)
 - N_M คือ จำนวนคู่สถานีงาน (Mate Station) โดย $n_m = 1, 2, \dots, N_M$
 - U_{i,n_m} คือ ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในลำดับการผลิตที่ i ในคู่สถานี n_m (หน่วยเวลา)
 - Z_{i,n_m} คือ ระยะทางจากจุด L_{n_m} เท่ากับ 0 ถึงจุด L_{n_m} ใด ๆ ที่เริ่มงานในลำดับการผลิตที่ i ในคู่สถานีงาน n_m
 - v_c คือ อัตราเร็วของสายการผลิต
 - $t_{2n_m-1,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านซ้ายของคู่สถานีงาน n_m
 - $t_{2n_m,m}$ คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านขวาของคู่สถานีงาน n_m
 - $Y_{2n_m-1,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านซ้ายของคู่สถานีงาน n_m
 - $Y_{2n_m,m}$ คือ เวลาเดินเปล่าทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ m ที่สถานีงานด้านขวาของคู่สถานีงาน n_m
 - γ คือ ช่วงเวลาการปล่อยผลิตภัณฑ์เข้าสู่สายการผลิต (Launch Interval)
 - L_{n_m} คือ ความยาวของคู่สถานีงาน n_m
 - $X_{i,m}$ คือ ตัวแปรเลขฐานสอง $X_{i,m}$ เท่ากับ 1 เมื่อมีรถยนต์รุ่น m ในลำดับการผลิต i และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มี

T	คือ เวลาดำเนินการทั้งหมดของการผลิต (Lead Time) ซึ่งเป็นผลรวมของค่าที่มากที่สุดของเวลาดำเนินการทั้งหมดของแต่ละคู่สถานีนงาน
CT	คือ ช่วงเวลาการผลิต (Cycle Time) ของทุกคู่สถานีนงาน
w	คือ ระยะห่างระหว่างงานลำดับที่ i กับ $i + 1$ ซึ่งพนักงานต้องเดินกลับไปเพื่อเริ่มต้นผลิตงานถัดไป

(3) เวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่สถานีนงานน้อยที่สุด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้สนใจเวลาที่พนักงานต้องรอคอยงานถัดไปที่กำลังเข้าสู่สถานีน หากเกิดเวลารอคอยมากจะส่งผลให้พนักงานมีอัตราประโยชน์ (Utilization) ที่ต่ำ โดยเวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่สถานีนงานจะเป็นผลรวมเวลารอคอยของพนักงานในคู่สถานีน n_m (Manavizadeh, Tavakoli, Rabbani, & Jolai, 2013) แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-13 และ 2-14

$$f_3(x) = \frac{1}{v_c} \sum_{n_m=1}^{N_M} \sum_{i=1}^{nc} Q_{i,n_m} \quad (2-13)$$

$$Q_{(i+1),n_m} = \left\{ \begin{array}{l} \max \left[0, \gamma v_c - \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{ t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \} \right) \right] \\ + \max \left[0, \gamma v_c - \left(Z_{i,n_m} + v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{ t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \} \right) \right] \end{array} \right\} \quad (2-14)$$

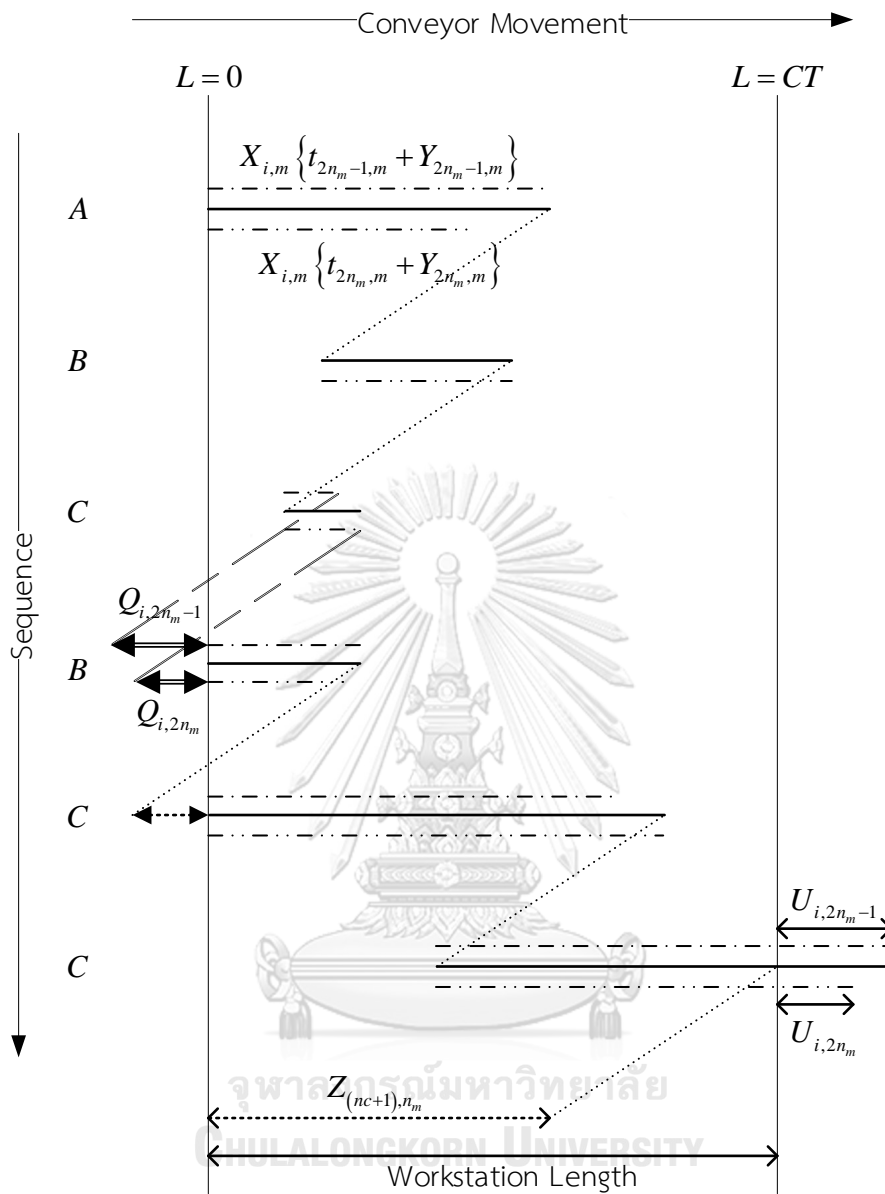
สมการเงื่อนไข ดังสมการที่ 2-15 และ 2-16

$$v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{ t_{2n_m-1,m} + Y_{2n_m-1,m} \} > 0 \quad \forall i \forall n_m \quad (2-15)$$

$$v_c \sum_{m=1}^M X_{i,m} \{ t_{2n_m,m} + Y_{2n_m,m} \} > 0 \quad \forall i \forall n_m \quad (2-16)$$

และสมการที่ 2-6 ถึง สมการที่ 2-12

เมื่อ $f_3(x)$ คือ เวลาทั้งหมดที่รอคอยรถยนต์เข้าสู่คู่สถานีนงาน (หน่วยเวลา)
 Q_{i,n_m} คือ ระยะก่อนรถยนต์ลำดับการผลิตที่ i จะเข้าสู่คู่สถานีนงาน n_m



- - - - Workstation 1	· · · · · Workstation 2	——— 2SAL Workload
——— WS 1 Worker Moves	——— WS 2 Worker Moves	← ····· ····· → Reset Length
↔ Utility Work	↔ Idle Time	······ Worker Moves

ภาพที่ 2-12 กราฟแสดงการคำนวณปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จและเวลารอคอยงานเข้าสู่คู่อุปกรณ์งาน

(4) จำนวนการละเมิดตัวเลือกที่น้อยที่สุด

รถยนต์แต่ละรุ่นมีตัวเลือกที่แตกต่างกัน ดังนั้นการจัดลำดับการผลิตจำเป็นต้องพิจารณาจำนวนรถยนต์ที่มีตัวเลือกไม่ให้เกิดติดกันเกินกว่าสัดส่วนที่กำหนด เพราะจะส่งผลถึงภาระงานที่หนักเกินไปของพนักงาน ทำให้ค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการผลิตมากเกินกว่ารอบเวลาผลิต (Cycle Time) โดยพิจารณาจากอัตราส่วน $p_o:q_o$ (เมื่อ p_o คือจำนวนสูงสุดในการเรียงรุ่นรถที่มีตัวเลือก o และ q_o คือจำนวนรถที่เรียงติดกัน) ตัวอย่างเช่น ชั้นงานการประกอบไฟเลี้ยวกระจกมองข้างมีอัตราส่วน $p_o:q_o$ เท่ากับ 3 ต่อ 4 หมายความว่า ในการผลิตรถยนต์ทุก ๆ 4 คัน จะมีรถยนต์ที่ประกอบตัวเลือกนี้ได้ไม่เกิน 3 คัน หากเกิดจะนับเป็นการละเมิดเกิดขึ้น แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-17 และ 2-18 (Chutima & Olarnviwatchai, 2016)

$$f_4(x) = \sum_{o \in O} \{NPV_o \parallel \cup_{i=1}^{nc} PV_{o,i}(i - q_o + 1, \dots, i)\} \quad (2-17)$$

หรือ

$$f_4(x) = \sum_{o=1}^o \sum_{i=1}^{nc} \max \left\{ 0, V_{o,i} - 1 + \max \left[0, \min \left(1, \left\{ \sum_{j=i-q_o+1}^i V_{o,j} \right\} - p_o \right) \right] \right\} \quad (2-18)$$

และสมการที่ 2-1 2-2 และ 2-10

เมื่อ	$f_4(x)$	คือ จำนวนการละเมิดรวม
	o	คือ ตัวเลือก (Options) โดย $o = 1, 2, \dots, O$
	$NPV_o \parallel \parallel$	คือ เซตของการละเมิดที่เกิดขึ้นบนตัวเลือก o
	$PV_{o,i}(i - q_o + 1, \dots, i)$	คือ การละเมิดตัวเลือก o ที่ตำแหน่ง i โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อตำแหน่งที่ i มีการใช้ตัวเลือก o และตำแหน่งที่ $i - q_o + 1$ ถึง i เกิดการละเมิดตัวเลือกที่อัตราส่วน $p_o:q_o$ และเท่ากับ 0 เมื่อไม่เกิดการละเมิด
	\cup	คือ Union Operator
	$V_{o,i}$	คือ ตัวแปรเลขฐานสอง $V_{o,i}$ เท่ากับ 1 เมื่อรถยนต์ในลำดับที่ i มีตัวเลือกที่ o และเท่ากับ 0 เมื่อไม่มี

(5) ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิตน้อยที่สุด

ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิต เกิดจากการจัดลำดับของผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่นลงในสายการผลิต หากรุ่นใดมีการกระจายตัวเท่า ๆ กัน ก็จะทำให้ความแปรผันของสัดส่วนการผลิตต่ำ แต่หากรุ่นใดมีลำดับที่เรียงติดกันหรือห่างกัน ก็จะส่งผลให้ความแปรผันของสัดส่วนการผลิตสูง วัตถุประสงค์นี้มีความสำคัญกับระบบการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just In Time System) เพื่อรองรับความต้องการรถยนต์แต่ละรุ่น ซึ่งทราบจำนวนที่ชัดเจนในแต่ละวัน (Rahimi-Vahed, Rabbani, Tavakkoli-Moghaddam, Torabi, & Jolai, 2007)

ส่วนแรกของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นสัดส่วนของการผลิตของรถยนต์รุ่นที่ m ตั้งแต่ลำดับแรกจนถึงลำดับที่ถูกผลิต (ลำดับที่ i) และส่วนที่สองเป็นสัดส่วนความต้องการรถยนต์รุ่นที่ m แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-19

$$f_5(x) = \sum_{i=1}^{nc} \sum_{m=1}^M \left| \left(\sum_{l=1}^i \frac{X_{l,m}}{i} \right) - \frac{d_m}{nc} \right| \quad (2-19)$$

และสมการที่ 2-7 และ 2-8

เมื่อ $f_5(x)$ คือ ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิต

(6) ความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบน้อยที่สุด

ความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบ มีผลต่อการจัดเตรียมชิ้นส่วนแต่ละชนิดในการประกอบผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่น ดังนั้นหากความแปรผันสูงหรือการใช้งานของแต่ละชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ จะทำให้วางแผนการผลิตได้ยากและมีโอกาสที่ชิ้นส่วนขาดมากขึ้น (Alaghebandha, Hajipour, & Hemmati, 2017) โดยส่วนแรกของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นจำนวนเฉลี่ยสะสมของชิ้นส่วน j ที่ควรถูกใช้ประกอบทั้งหมดในลำดับที่ i แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-20 ถึง 2-22

$$f_6(x) = \sum_{i=1}^{nc} \sum_{j=1}^{\beta} \left(\frac{i \times N_j}{nc} - UT_{j,i} \right)^2 \quad (2-20)$$

$$UT_{j,i} = \sum_{m=1}^M \left(\left(\sum_{l=1}^i X_{l,m} \right) \times b_{m,j} \right) \quad \forall j \forall i \quad (2-21)$$

$$N_j = \sum_{m=1}^M (d_m \times b_{m,j}) \quad \forall j \quad (2-22)$$

- เมื่อ $f_6(x)$ คือ ความแปรผันรวมของการใช้งานชิ้นส่วนในการประกอบ
- $UT_{j,i}$ คือ ผลรวมจำนวนของชิ้นส่วน j ที่ถูกนำไปประกอบในลำดับการผลิตแรกจนถึงลำดับการผลิตที่ i โดยที่ $j = 1, 2, \dots, \beta$ และ $i = 1, 2, \dots, nc$
- N_j คือ จำนวนชิ้นส่วน j ที่ต้องการทั้งหมด
- $b_{m,j}$ คือ ตัวแปรเลขฐานสอง $b_{m,j}$ เท่ากับ 1 เมื่อมีรถยนต์รุ่น m ใช้ชิ้นส่วน j ในการประกอบ และเท่ากับ 0 เมื่อไม่ใช้ชิ้นส่วน

2.1.2.4 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ที่สัดส่วนการผลิต (MPS) เท่ากับ 2:3:4 จำนวนสี 5 สี รุ่นรถยนต์ในลำดับการผลิตก่อนหน้า คือ 3 3 (C C) และสีรถยนต์ในลำดับการผลิตก่อนหน้า คือ 2 แสดงข้อมูลนำเข้า (ลำดับการผลิตตัวอย่าง) ดังตารางที่ 2-1 และรุ่นรถยนต์ในแต่ละลำดับ ($X_{i,m}$) แสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลนำเข้า

String	Priority	Sequence
1	1 5 6 3 4 7 8 9 2	A B C B B C C C A

ตารางที่ 2-2 รุ่นรถยนต์ในแต่ละลำดับ

Model	Sequence								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	0	0	0	0	0	0	0	1
B	0	1	0	1	1	0	0	0	0
C	0	0	1	0	0	1	1	1	0

หมายเหตุ: 1 หมายถึงรถยนต์รุ่นที่ m อยู่ในลำดับที่ i และ 0 หมายถึงรุ่นนั้นไม่อยู่ในลำดับ

(1) พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 1 จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสี

การพิจารณาจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสี จะต้องมีตารางรายละเอียดว่ารุ่นใดผลิตรถสีใดบ้าง แสดงดังตารางที่ 2-3 และตารางหลังจากระบุสีรถยนต์ลงแต่ละรุ่น แสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-3 สีของรถยนต์ที่ต้องการในแต่ละรุ่น

สี	จำนวนรถยนต์สีเดียวกัน ติดต่อกันได้ไม่เกิน (คัน)	จำนวนรถยนต์ที่ต้องการ		
		A	B	C
1	2	1	1	0
2	2	1	1	2
3	2	0	0	0
4	2	0	1	0
5	2	0	0	2

ตารางที่ 2-4 รุ่นรถยนต์ที่ถูกระบุสี

Model	A	A	B	B	B	C	C	C	C
Priority	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Color	1	2	1	2	4	2	2	5	5

จากลำดับการผลิตในตารางที่ 2-1 จะถูกนำมาวิเคราะห์หาจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสี โดยจะนำสีของลำดับการผลิตสุดท้ายของวันก่อนหน้า เพื่อพิจารณาว่าต้องทำความสะอาดหัวปืนพ่นสีก่อนเริ่มกระบวนการหรือไม่ เมื่อทำความสะอาดหัวปืนพ่นสีจะนับเป็นการเปลี่ยนแปลงสีหนึ่งครั้ง พิจารณาไปจนครบลำดับการผลิตของวัน แสดงการคำนวณหาจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสีดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 การคำนวณหาจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสี

ลำดับ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
รถยนต์	C	A	B	C	B	B	C	C	C	A
สี	2	1	4	2	1	2	2	5	5	2
จำนวนครั้งเปลี่ยนสี	-	1	1	1	1	1	0	1	0	1
ผลรวม										7

(2) พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 2 ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิต

การพิจารณาปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิต จะต้องมีข้อมูลสายการผลิตที่ผ่านการจัดสมดุลเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้เป็นไปตามข้อจำกัดทั้งด้านทรัพยากร (Capacity Constraints) และชั้นงานก่อนหน้า (Precedence Constraints) แสดงชั้นงานการผลิตดังตารางที่ 2-6 ตัวเลือกข้อกำหนดอัตราส่วนดังตารางที่ 2-7 และสายการประกอบตัวอย่างที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิตดังภาพที่ 2-13

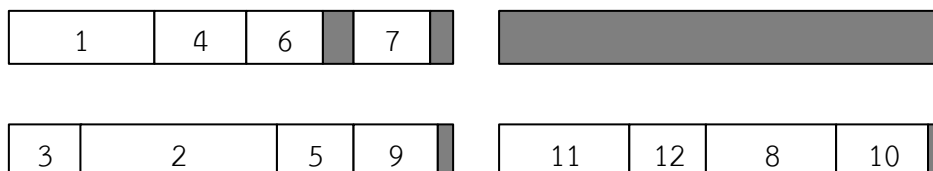
ตารางที่ 2-6 ชั้นงานและเวลาดำเนินงานประกอบรถยนต์แต่ละรุ่น

ชั้นงาน	ตำแหน่ง ชั้นงาน	ชั้นงาน ก่อนหน้า	เวลาดำเนินการ (ต่อ 1 หน่วย)			เวลาเฉลี่ย แบบถ่วงน้ำหนัก
			A	B	C	
1	L	-	2	3	1	1.89
2	R	-	3	3	3	3.00
3	E	-	2	0	1	1.33
4	L	1	3	2	1	1.78
5	E	2	1	2	3	2.22
6	L	3	1	0	2	1.67
7	E	4,5	1	2	1	1.33
8	R	5	3	1	2	1.89
9	E	5,6	2	1	0	1.40
10	E	7,8	2	3	1	1.89
11	E	9	1	2	3	2.22
12	R	11	0	1	2	1.57

ตารางที่ 2-7 ตัวเลือก ชั้นงาน และข้อกำหนดอัตราส่วน

ตัวเลือก	ชั้นงาน	p/q	รุ่นรถยนต์		
			A	B	C
1	12	1/3	0	1	1
2	3	2/3	1	0	1
3	6	1/3	1	0	1
4	9	1/3	1	1	0

จากตารางที่ 2-6 และ 2-7 จะเห็นได้ว่ารถยนต์ทุกคันจะมีชิ้นงานเหมือนกันทั้งหมด แต่ต่างตรงบางรุ่นจะไม่มีประกอบบางชิ้นงาน เนื่องจากเป็นชิ้นงานที่เกี่ยวกับตัวเลือก โดยสามารถกำหนดอัตราส่วน $p_o:q_o$ ของแต่ละตัวเลือกตามความต้องการผู้ผลิตหรือคำนวณจากสมการที่ 2-1 และ 2-2



ภาพที่ 2-13 สายการประกอบตัวอย่างที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต

จากภาพที่ 2-15 แสดงสายการประกอบตัวอย่างที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิตที่สัดส่วนรุ่นการผลิต (MPS) เท่ากับ 2:3:4

ตารางที่ 2-8 เวลาดำเนินงานของรถยนต์แต่ละรุ่นบนแต่ละสถานีงาน

คู่สถานี	สถานีงาน	Model Sequence			รอบเวลาการผลิต
		A	B	C	
1	1	7	7	8	8
	2	8	6	7	8
2	3	0	0	0	8
	4	6	7	8	8

จากตารางที่ 2-8 เป็นตารางแสดงการคำนวณหาเวลาดำเนินงานของรถยนต์แต่ละรุ่นที่ทำงานบนสถานีงานซึ่งถูกจัดสมดุลสายการประกอบแล้ว

เมื่อได้เวลาดำเนินงานของรถยนต์แต่ละรุ่นบนแต่ละสถานีงานและรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) แล้ว จึงนำมาคำนวณหาค่าเวลาการผลิตทั้งหมด (Lead Time: T), ความยาวคู่สถานีงาน (L_{nm}) และช่วงเวลาการปล่อยรถยนต์เข้าสู่กระบวนการ (γ) ตามสมการที่ 2-9 ถึงสมการที่ 2-11 ตามลำดับ ผู้วิจัยกำหนดความเร็วสายพาน (v_c) เท่ากับ 1

ตัวอย่างการคำนวณค่าเวลาการผลิตทั้งหมด (Lead Time: T) จากสมการที่ 2-9 โดยใช้เวลาดำเนินงานจากตารางที่ 2-8

$$T = \max((7 \times 2) + (7 \times 3) + (8 \times 4), (8 \times 2) + (6 \times 3) + (7 \times 4)) \\ + \max((0 \times 2) + (0 \times 3) + (0 \times 4), (6 \times 2) + (7 \times 3) + (8 \times 4))$$

$$T = \max(67, 62) + \max(0, 65)$$

$$T = 132$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าความยาวคู่สถานีงาน (L_{n_m}) จากสมการที่ 2-10 โดยใช้รอบเวลาการผลิต (Cycle Time) จากตารางที่ 2-8

$$L_{n_m} = 8 \times 1$$

$$L_{n_m} = 8$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าช่วงเวลาการปล่อยรถยนต์เข้าสู่กระบวนการ (γ) จากสมการที่ 2-11

$$\gamma = \frac{132}{9 \times 2}$$

$$\gamma = 7.3333$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ (U_{i,n_m}) และจุดเริ่มต้นการทำงาน (Z_{i,n_m}) จากสมการที่ 2-5 และ 2-6 ตามลำดับ แสดงผลลัพธ์การคำนวณในตารางที่ 2-9 และ 2-10

$$Z_{1,1} = 0$$

$$U_{1,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max \left[0, \frac{0 + (1 \times 7) + (0 \times 7) + (0 \times 8) - 8}{1} \right] \\ + \max \left[0, \frac{0 + (1 \times 8) + (0 \times 6) + (0 \times 7) - 8}{1} \right] \right\} = 0$$

$$Z_{2,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max[0, \min(0 + (0 \times 7) + (1 \times 7) + (0 \times 8) - (7.33 \times 1), 8 - (7.33 \times 1))] \\ \max[0, \min(0 + (0 \times 8) + (1 \times 6) + (0 \times 7) - (7.33 \times 1), 8 - (7.33 \times 1))] \end{array} \right\} \\ = 0.6667$$

$$U_{2,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max \left[0, \frac{0.67 + (0 \times 7) + (1 \times 7) + (0 \times 8) - 8}{1} \right] \\ + \max \left[0, \frac{0.67 + (0 \times 8) + (1 \times 6) + (0 \times 7) - 8}{1} \right] \end{array} \right\} = 0$$

$$Z_{3,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max[0, \min(0.67 + (0 \times 7) + (0 \times 7) + (1 \times 8) - (7.33), 8 - (7.33))] \\ \max[0, \min(0.67 + (0 \times 8) + (0 \times 6) + (1 \times 7) - (7.33), 8 - (7.33))] \end{array} \right\} \\ = 0.3333$$

$$U_{3,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max \left[0, \frac{0.33 + (0 \times 7) + (0 \times 7) + (1 \times 8) - 8}{1} \right] \\ + \max \left[0, \frac{0.33 + (0 \times 8) + (0 \times 6) + (1 \times 7) - 8}{1} \right] \end{array} \right\} = 0.3333$$

ตารางที่ 2-9 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จและจุดเริ่มต้นการทำงาน ณ คู่สถานีงาน 1

i	$Z_{i,1}$	$U_{i,1}$
1	0	0
2	0.6667	0
3	0.3333	0.3333
4	0.6667	0
5	0.3333	0
6	0	0
7	0.6667	0.6667
8	0.6667	0.6667
9	0.6667	0.6667
10	0.6667	-
$\sum_{i=1}^9 U_{i,1} + \frac{Z_{10,1}}{v_c} = (0 + 0 + \dots + 0.6667) + \frac{0.6667}{1} = 3$		

ตารางที่ 2-10 ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จและจุดเริ่มต้นการทำงาน ณ คู่สถานีงาน 2

i	$Z_{i,2}$	$U_{i,2}$
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0.6667	0
5	0.3333	0
6	0	0
7	0.6667	0
8	0.6667	0.6667
9	0.6667	0.6667
10	0	-
$\sum_{i=1}^9 U_{i,2} + \frac{Z_{10,2}}{v_c} = (0 + 0 + \dots + 0.6667) + \frac{0}{1} = 1.33$		

ดังนั้นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จทั้งหมดมีค่าเท่ากับ $3 + 1.33 = 4.33$

(3) พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 3 เวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่สถานีงาน

การพิจารณาเวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่สถานีงาน จะต้องมีข้อมูลสายการผลิตที่ผ่านการจัดสมดุลเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป็นข้อมูลเดียวกับข้อมูลในการคำนวณวัตถุประสงค์ที่ 2

ตัวอย่างการคำนวณเวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่สถานีงาน (Q_{i,n_m}) จากสมการที่ 2-13 และ 2-14 โดยใช้ค่า Z_{i,n_m} จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 แสดงผลลัพธ์การคำนวณในตารางที่ 2-11

$$Q_{1,1} = 0$$

$$Q_{2,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max[0, (7.33 \times 1) - (0 + (1 \times 7) + (0 \times 7) + (0 \times 8))] \\ + \max[0, (7.33 \times 1) - (0 + (1 \times 8) + (0 \times 6) + (0 \times 7))] \end{array} \right\} = 0.3333$$

$$Q_{3,1} = \left\{ \begin{array}{l} \max[0, (7.33 \times 1) - (0 + (0 \times 7) + (1 \times 7) + (0 \times 8))] \\ + \max[0, (7.33 \times 1) - (0 + (0 \times 8) + (1 \times 6) + (0 \times 7))] \end{array} \right\} = 0.6667$$

ตารางที่ 2-11 เวลาทั้งหมดที่รอคอยงานเข้าสู่คู่อานงานที่ 1 และ 2

i	$Q_{i,1}$	$Q_{i,2}$
1	0	0
2	0.3333	1.3333
3	0.6667	0.3333
4	0	0
5	0.6667	0
6	1	0
7	0.3333	0
8	0	0
9	0	0
$\frac{1}{v_c} \sum_{n_m=1}^2 \sum_{i=1}^9 Q_{i,n_m} = 1 \times ((0 + 0.3333 + \dots + 0) + (0 + 1.3333 + \dots + 0)) = 4.67$		

(4) พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 4 จำนวนการละเมิดตัวเลือกรวม

การพิจารณาจำนวนการละเมิดตัวเลือกรวม จะต้องมีข้อมูลตัวเลือกและอัตราส่วนข้อกำหนดของรถยนต์แต่ละรุ่น ดังตารางที่ 2-12

ตารางที่ 2-12 ตัวเลือกและอัตราส่วนข้อกำหนด

ตัวเลือก	อัตราส่วนข้อกำหนด (p/q)	รุ่นของรถยนต์		
		A	B	C
1	1/3	0	1	1
2	2/3	1	0	1
3	1/3	1	0	1
4	1/3	1	1	0

จากลำดับการผลิตในตารางที่ 2-1 จะถูกนำมาวิเคราะห์หาจำนวนการละเมิดตัวเลือกรวม โดยจะนำรุ่นรถยนต์ลำดับการผลิตก่อนหน้ามาเพื่อพิจารณาเงื่อนไขอัตราส่วนข้อกำหนด ตัวอย่างเช่น $p_o : q_o$ เท่ากับ 1 : 3 แสดงว่าทุก ๆ 3 คัน จะต้องประกอบรถยนต์ที่มีตัวเลือก o ได้ไม่เกิน 1 คัน หากเกินจะนับเป็นการละเมิด 1 ครั้ง (หากรถยนต์ q_o คัน มีตัวเลือกเกินกว่า p_o แต่ตัวเลือกไม่ได้ถูกผลิตบนลำดับ i จะไม่นับการละเมิด เพื่อไม่ให้เกิดการซ้ำของจำนวนครั้งที่ละเมิด) ทำการพิจารณาไปจน

ครบทุกลำดับการผลิต แสดงการคำนวณหาจำนวนการละเมิดรวมด้วยสมการที่ 2-17 ดังตารางที่ 2-13 และ 2-14

ตารางที่ 2-13 การคำนวณหาจำนวนการละเมิดตัวเลือกรวม

ลำดับการผลิต (i)	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
รถยนต์ (m)	C	C	A	B	C	B	B	C	C	C	A
1/3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
2/3	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
1/3	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
1/3	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1

หมายเหตุ: 1 หมายถึงรถยนต์ในลำดับที่ i มีตัวเลือก o และ 0 หมายถึงไม่มีตัวเลือก

ตัวอย่างการพิจารณาจำนวนละเมิดตัวเลือกรวม ดังตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-14 ตัวอย่างการพิจารณาจำนวนละเมิดตัวเลือกรวม

ลำดับการผลิต (i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	จำนวน การละเมิด
รถยนต์ (m)	A	B	C	B	B	C	C	C	A	
1/3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	7
2/3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	3
1/3	1	0	1	0	0	0	1	1	1	5
1/3	0	1	0	1	1	0	0	0	0	3
ผลรวม										18

หมายเหตุ: 1 หมายถึงเกิดการละเมิดบนลำดับที่ i ตัวเลือกที่ o และ 0 หมายถึงไม่เกิดการละเมิด

จากตารางที่ 2-13 และ 2-14 จะเห็นได้ว่าจำนวนการละเมิดจะถูกพิจารณาตั้งแต่ตำแหน่งที่ $i - q_0 + 1$ ไปจนถึงตำแหน่งที่ i ตัวอย่างเช่น ตัวเลือกที่ 1 มีอัตราส่วนข้อกำหนดเท่ากับ 1 : 3 เริ่มที่ตำแหน่ง $i - q_0 + 1$ ในตัวอย่างนี้ $i - q_0 + 1$ คือตำแหน่งที่ -1 จากนั้นทำการพิจารณาจากตำแหน่ง $i - q_0 + 1$ ถึง i ซึ่งก็คือ -1 ถึง 1 จะเห็นได้ว่าจำนวนตัวเลือกเกินกว่าข้อกำหนดแต่ไม่นับเป็นจำนวนละเมิดของลำดับการผลิตที่ 1 เนื่องจากตำแหน่งที่ i หรือตัวลำดับการผลิตที่ 1 เอง ไม่มีตัวเลือกนี้ พิจารณาถัดไปที่ i อยู่ตำแหน่ง 2 คือตั้งแต่ตำแหน่ง 0 ถึง 2 จะเห็นได้ว่าจำนวนตัวเลือกเกินกว่าข้อกำหนดและตำแหน่งที่ i หรือตำแหน่งที่ 2 มีตัวเลือกนี้อยู่ จึงนับเป็นการละเมิด

ตัวอย่างการคำนวณหาจำนวนละเมิดตัวเลือกรวมด้วยสมการที่ 2-18 ($V_{o,i}$ จากตารางที่ 2-13) ซึ่งผลลัพธ์การคำนวณจะเท่ากับผลของการคำนวณด้วยสมการที่ 2-17 ดังตารางที่ 2-14

การละเมิดตัวเลือกที่ 1 ตำแหน่งที่ 1

$$PV_{1,1}(i - q_o + 1, \dots, i) = \max\{0, 0 - 1 + \max[0, \min(1, \{1 + 1 + 0\} - 1)]\} = 0$$

การละเมิดตัวเลือกที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

$$PV_{1,2}(i - q_o + 1, \dots, i) = \max\{0, 1 - 1 + \max[0, \min(1, \{1 + 0 + 1\} - 1)]\} = 1$$

การละเมิดตัวเลือกที่ 2 ตำแหน่งที่ 1

$$PV_{2,1}(i - q_o + 1, \dots, i) = \max\{0, 1 - 1 + \max[0, \min(1, \{1 + 1 + 1\} - 2)]\} = 1$$

การละเมิดตัวเลือกที่ 2 ตำแหน่งที่ 2

$$PV_{2,2}(i - q_o + 1, \dots, i) = \max\{0, 0 - 1 + \max[0, \min(1, \{1 + 1 + 0\} - 2)]\} = 0$$

(5) พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 5 ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิต

การพิจารณาความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิต สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-19 โดยใช้สัดส่วนการผลิตของลำดับการผลิต

ตัวอย่างการคำนวณความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิต แสดงผลลัพธ์การคำนวณในตารางที่ 2-15

$$\sum_{m=1}^M \left| \left(\sum_{l=1}^i \frac{X_{l,m}}{i} \right) - \frac{d_m}{nc} \right| =$$

$$\text{ที่ } i = 1 \quad \left| \left(\frac{1}{1} \right) - \frac{2}{9} \right| + \left| \left(\frac{0}{1} \right) - \frac{3}{9} \right| + \left| \left(\frac{0}{1} \right) - \frac{4}{9} \right| = 1.5556$$

$$\text{ที่ } i = 2 \quad \left| \left(\frac{1+0}{2} \right) - \frac{2}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+1}{2} \right) - \frac{3}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+0}{2} \right) - \frac{4}{9} \right| = 0.8881$$

$$\text{ที่ } i = 3 \quad \left| \left(\frac{1+0+0}{3} \right) - \frac{2}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+1+0}{3} \right) - \frac{3}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+0+1}{3} \right) - \frac{4}{9} \right| = 0.2222$$

$$\text{ที่ } i = 4 \quad \left| \left(\frac{1+0+0+0}{4} \right) - \frac{2}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+1+0+1}{4} \right) - \frac{3}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+0+1+0}{4} \right) - \frac{4}{9} \right| = 0.3889$$

$$\text{ที่ } i = 5 \quad \left| \left(\frac{1+0+0+0+0}{5} \right) - \frac{2}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+1+0+1+1}{5} \right) - \frac{3}{9} \right| + \left| \left(\frac{0+0+1+0+0}{5} \right) - \frac{4}{9} \right| = 0.5333$$

ตารางที่ 2-15 ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิต

i	Model		
	A	B	C
1	0.7778	0.3333	0.4444
2	0.2778	0.1667	0.4444
3	0.1111	0	0.1111
4	0.0278	0.1667	0.1944
5	0.0222	0.2667	0.2444
6	0.0556	0.1667	0.1111
7	0.0794	0.0952	0.0159
8	0.0972	0.0417	0.0556
9	0	0	0

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{m=1}^3 \left| \left(\sum_{l=1}^i \frac{X_{l,m}}{i} \right) - \frac{d_m}{nc} \right| = (0.78 + 0.33 + 0.44) + \dots + (0 + 0 + 0) = 4.3071$$

(6) พิจารณาวัตถุประสงค์ที่ 6 ความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วน

การพิจารณาความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-20 ถึง 2-22 โดยใช้สัดส่วนการผลิตของลำดับการผลิต และแสดงชิ้นส่วนแต่ละชนิดที่ถูกใช้ประกอบในแต่ละผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 2-16

ตารางที่ 2-16 ชิ้นส่วนแต่ละชนิดที่ถูกใช้ประกอบในแต่ละผลิตภัณฑ์

Parts (j)	Model (m)		
	A	B	C
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	0	1
4	1	1	0
5	1	0	1

หมายเหตุ: 1 หมายถึงรถยนต์รุ่นที่ m ใช้ชิ้นส่วน j ในการประกอบ และ 0 หมายถึงไม่ใช้

ตัวอย่างการคำนวณความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบ แสดงผลลัพธ์การคำนวณในตารางที่ 2-17

ที่ $j = 1$ และ $i = 1$

$$N_1 = (2 \times 0) + (3 \times 1) + (4 \times 1) = 7$$

$$UT_{1,1} = (1 \times 0) + (0 \times 1) + (0 \times 1) = 0$$

ที่ $j = 1$ และ $i = 2$

$$UT_{1,2} = ((1 + 0) \times 0) + ((0 + 1) \times 1) + ((0 + 0) \times 1) = 1$$

ที่ $j = 1$ และ $i = 3$

$$UT_{1,3} = ((1 + 0 + 0) \times 0) + ((0 + 1 + 0) \times 1) + ((0 + 0 + 1) \times 1) = 2$$

ที่ $j = 2$ และ $i = 1$

$$N_2 = (2 \times 1) + (3 \times 0) + (4 \times 1) = 6$$

$$UT_{2,1} = (1 \times 1) + (0 \times 0) + (0 \times 1) = 1$$

ที่ $j = 2$ และ $i = 2$

$$UT_{2,2} = ((1 + 0) \times 1) + ((0 + 1) \times 0) + ((0 + 0) \times 1) = 1$$

ที่ $j = 2$ และ $i = 3$

$$UT_{2,3} = ((1 + 0 + 0) \times 1) + ((0 + 1 + 0) \times 0) + ((0 + 0 + 1) \times 1) = 2$$

$$\sum_{j=1}^{\beta} \left(\frac{i \times N_j}{nc} - UT_{j,i} \right)^2 =$$

$$\text{ที่ } i = 1 \quad \left(\frac{1 \times 7}{9} - 0 \right)^2 + \left(\frac{1 \times 6}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{1 \times 6}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{1 \times 5}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{1 \times 6}{9} - 1 \right)^2 \\ = 1.1358$$

$$\text{ที่ } i = 2 \quad \left(\frac{2 \times 7}{9} - 0 \right)^2 + \left(\frac{2 \times 6}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{2 \times 6}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{2 \times 5}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{2 \times 6}{9} - 1 \right)^2 \\ = 1.4321$$

$$\text{ที่ } i = 3 \quad \left(\frac{3 \times 7}{9} - 0 \right)^2 + \left(\frac{3 \times 6}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{3 \times 6}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{3 \times 5}{9} - 1 \right)^2 + \left(\frac{3 \times 6}{9} - 1 \right)^2 \\ = 0.2222$$

ตารางที่ 2-17 ความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบ

Sequence (i)	Parts (j)				
	1	2	3	4	5
1	0.6049	0.1111	0.1111	0.1975	0.1111
2	0.3086	0.1111	0.1111	0.7901	0.1111
3	0.1111	0	0	0.1111	0
4	0.0123	0.4444	0.4444	0.6049	0.4444
5	0.0123	1.7778	1.7778	1.4938	1.7778
6	0.1111	1	1	0.4444	1
7	0.3086	0.4444	0.4444	0.0123	0.4444
8	0.6049	0.1111	0.1111	0.1975	0.1111
9	0	0	0	0	0
$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^5 \left(\frac{i \times N_j}{nc} - UT_{j,i} \right)^2 = (0.605 + \dots + 0.111) + \dots + (0 + \dots + 0) = 17.9259$					

2.1.3 การวัดสมรรถนะอัลกอริทึม

เนื่องจากปัญหาการจัดลำดับการผลิตเป็นปัญหาประเภทเอ็นพีฮาร์ด (NP-Hard) จึงไม่สามารถบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากการใช้อัลกอริทึม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจึงจะต้องพิจารณาจากกลุ่มคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 (1st Frontier หรือ Pareto Optimal Frontier) ของแต่ละอัลกอริทึม นำมาหากกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่หามาได้ หรือเรียกว่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate Pareto Optimal Frontier) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะในการแก้ปัญหา ระหว่างอัลกอริทึม

กลุ่มคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดควรเป็นกลุ่มคำตอบที่มีจำนวนคำตอบมากเพียงพอ และมีคำตอบที่เป็นกลุ่มคำตอบที่แท้จริงหรือใกล้เคียงที่สุด โดย Jiang, Ong, Zhang, and Feng (2014) ได้แบ่งประเภทของตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์เป็น 5 ประเภท ได้แก่ ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics), ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Convergence-Diversity Metrics), ตัวชี้วัดด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics), ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics) และตัวชี้วัดด้านเวลาดำเนินงานของอัลกอริทึม (Computational Time)

2.1.3.1 ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ

การวัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics) เป็นการเปรียบเทียบระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม (Obtained Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้กลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณเป็นตัวแทนของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-23 และ 2-24

$$GD(S_j, S^*) = \frac{1}{|S_j|} \sum_{x \in S_j} \min\{d_{xy} | y \in S^*\} \quad (2-23)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \quad (2-24)$$

เมื่อ	GD_j	คือ Generational Distance ของอัลกอริทึม j
	S_j	คือ กลุ่มคำตอบพرونเทียร์ที่ 1 (1 st Frontier) ซึ่งได้จากอัลกอริทึม j
	S^*	คือ กลุ่มคำตอบที่แท้จริง
	$ S_j $	คือ จำนวนคำตอบของกลุ่มคำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ได้จากอัลกอริทึม j
	$ S^* $	คือ จำนวนคำตอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
	d_{xy}	คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่หาได้ (x) กับคำตอบที่แท้จริง (y)
	f_k^{\max}	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มีค่ามากที่สุดของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
	f_k^{\min}	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ที่มีค่าน้อยที่สุดของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
	$f_k(x)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่หาได้
	$f_k(y)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของคำตอบที่แท้จริง
	x	คือ คำตอบที่หาได้
	y	คือ คำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบของอัลกอริทึม j มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม j ลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากและเป็นอัลกอริทึมที่ดี

2.1.3.2 ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ

การวัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics) เป็นการเปรียบเทียบระยะห่างที่น้อยที่สุดของคำตอบที่แท้จริงที่แต่ละค่ากับกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-25

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

(2-25)

เมื่อ IGD_j คือ Inverted Generational Distance ของอัลกอริทึม j

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบของอัลกอริทึม j มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าเป็นอัลกอริทึมที่ดี เพราะว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม j ลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและมีความหลากหลายของคำตอบมาก แต่ตัวชี้วัดนี้ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าอัลกอริทึมมีสมรรถนะทางด้านการลู่อู่เข้าหรือด้านความหลากหลายดีกว่ากัน จึงต้องพิจารณาพร้อมกับตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้า (GD) และตัวชี้วัดด้านความหลากหลาย (Δ^*)

2.1.3.3 ตัวชี้วัดด้านปริมาณคำตอบ

การวัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics) เป็นการพิจารณาสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-Dominated Solution) โดยเปรียบเทียบจำนวนของคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 (1st Frontier Solution) ซึ่งได้จากอัลกอริทึมที่ j ว่ามีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำจากคำตอบของอัลกอริทึมอื่นคิดเป็นสัดส่วนเท่าใด โดยแบ่งเปรียบเทียบสมรรถนะเป็นสองด้านดังนี้

(1) การเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม (Self-comparison)

การเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบที่แท้จริงที่อยู่ในกลุ่มคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 เพื่อพิจารณาสัดส่วน ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 ของอัลกอริทึม j โดยส่วนใหญ่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-26

$$R_{NDS1}(S_j) = \frac{|S_j - \{x \in S_j | \exists y \in S^*: y < x\}|}{|S_j|} \quad (2-26)$$

(2) การเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Pareto-optimum comparison)

การเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนของคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 ที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง เพื่อพิจารณาสัดส่วน ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 ของอัลกอริทึม j โดยส่วนใหญ่เป็นคำตอบที่ดีที่สุดของทุก ๆ อัลกอริทึม แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-27

$$R_{NDS2}(S_j) = \frac{|S_j - \{x \in S_j | \exists y \in S^*: y < x\}|}{|S^*|} \quad (2-27)$$

เมื่อ $y < x$ คือ คำตอบที่แท้จริง (y) ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบที่หาได้ (x)

2.1.3.4 ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ

ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics) แบ่งการวัดสมรรถนะเป็นสองด้าน ได้แก่ 1) ด้านการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของคำตอบที่หาได้ (Distribution Measures) ซึ่งเป็นการวัดผลต่างระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบ โดยยังมีค่าผลต่างที่น้อยแสดงถึงคำตอบมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมาก และ 2) ความกว้างของการแพร่กระจายของคำตอบที่หา

ได้ (Spread Indicates) เป็นการวัดระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริง กับคำตอบที่หาได้ เพื่อประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้มีคำตอบที่ครอบคลุมดีหรือไม่ โดยยังมีค่าระยะที่น้อยแสดงถึงคำตอบมีการแพร่กระจายที่ดี แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2-28 และ 2-29

$$\Delta^*(S_j, S^*) = \frac{\sum_{c=1}^C d(E_c) + \sum_{i=1}^{|S_j|} |d(x_i) - \bar{d}|}{\sum_{c=1}^C d(E_c) + |S_j| \bar{d}} \quad (2-28)$$

$$d(x_i) = \min_{y \in S_j} \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(\frac{f_k(x_i) - f_k(x_y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \quad (2-29)$$

- เมื่อ $d(x_i)$ คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่ i กับคำตอบตำแหน่งที่ y โดยที่ $y \neq i$
- \bar{d} คือ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างคำตอบที่หาได้
- $d(E_c)$ คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริง (Extreme solution in the set of true Pareto-front) กับคำตอบขอบเขตของคำตอบที่หาได้ (Boundary solution in the set of obtained solution)
- C คือ จำนวนคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริง

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านความหลากหลายของคำตอบของอัลกอริทึม j มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม j มีความหลากหลายทั้งด้านการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและการแพร่กระจายของคำตอบที่ดี

2.1.3.5 ตัวชี้วัดด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม

เวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม คือเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยจะสามารถเปรียบเทียบเวลาได้เมื่อจำนวนคำตอบที่ทำการพัฒนาทั้งหมด (Number of function evaluations) ของอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบมีจำนวนเท่ากัน อัลกอริทึมที่ดีควรใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อย (จำนวนคำตอบที่ทำการพัฒนาทั้งหมดของแต่ละอัลกอริทึม เท่ากับ จำนวนประชากรของแต่ละอัลกอริทึม คูณกับ จำนวนเจเนอเรชันในการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึม)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้แบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับการผลิตรถยนต์
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดลำดับการผลิตรถยนต์

Ribeiro, Aloise, Noronha, Rocha, and Urrutia (2008) ได้เข้าร่วมการแข่งขัน ROADEF เมื่อปี 2005 ณ โรงงานผลิตรถยนต์ Renault โดยนำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีการค้นหาในย่านใกล้เคียงแปรผัน (Variable Neighborhood Search: VNS) และวิธีค้นหาเฉพาะที่แบบวนรอบซ้ำ (Iterated Local Search: ILS) การแข่งขัน ROADEF ได้กำหนดวัตถุประสงค์ไว้ 3 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) จำนวนการละเมิดตัวเลือกความสำคัญสูง 2) จำนวนการละเมิดตัวเลือกความสำคัญต่ำ และ 3) จำนวนการเปลี่ยนแปลงสี ให้มีค่าน้อยที่สุด Ribeiro, Aloise et al. ได้ทำการปรับปรุงฮิวริสติก ซึ่งสามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้มากขึ้น

Chutima and Olarnviwatchai (2016) ได้ศึกษาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน การผลิตถูกกำหนดกลุ่มของรถที่ต้องผลิตให้เสร็จในแต่ละวัน โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของปัญหา 3 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) จำนวนการเปลี่ยนแปลงสี 2) จำนวนการละเมิดตัวเลือก และ 3) ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จ ให้มีค่าน้อยที่สุด ปัญหาการจัดลำดับนั้นถูกจัดเป็นปัญหาชนิดเอ็นพียาก Chutima and Olarnviwatchai จึงเสนออัลกอริทึมการบรรจบแบบขยาย (Extended Coincident Algorithm: COIN-E) เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหา โดยใช้ตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วย 3 ตัวชี้วัด ดังนี้ 1) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง 2) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ และ 3) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำ เพื่อนำ COIN-E เปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับได้แก่ อัลกอริทึมการบรรจบ (Coincident Algorithm: COIN), อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบจำ II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA II), อัลกอริทึมวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) พบว่า COIN-E มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่กล่าวมาทั้งในด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง และอัตราส่วนจำนวนกลุ่มคำตอบ แต่ใช้เวลาในการหาคำตอบไม่แตกต่างกับ COIN

Golle, Rothlauf, and Boysen (2014) ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่างการจัดลำดับผลิตรถยนต์ (Car Sequencing: CS) และการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ผสม (Mixed-Model Sequencing: MMS) บนสายการประกอบรถยนต์ โดยแต่ละวิธีการมีวัตถุประสงค์เพื่อลดภาระงานที่เกินกว่ากำหนด ตัวแทนของวัตถุประสงค์ของ CS และ MMS คือ จำนวนการละเมิดตัวเลือกน้อยที่สุด และจำนวนงานที่ภาระเกินกว่ากำหนดน้อยที่สุด ตามลำดับ พบว่าการจัดลำดับทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน แต่ทั้งนี้วิธี CS ให้ผลลัพธ์ในการลดจำนวนภาระงานเกินกว่ากำหนดได้ไม่ดีเท่าวิธี MS

Tanontong (2015) ได้ศึกษาการจัดลำดับผลิตรถยนต์แบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน การผลิตถูกกำหนดกลุ่มของรถที่ต้องผลิตให้เสร็จในแต่ละวัน โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของปัญหา 3 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) จำนวนการเปลี่ยนแปลงสี 2) จำนวนการละเมิดตัวเลือก และ 3) ปริมาณงานที่ไม่เสร็จ ให้มีค่าน้อยที่สุด ปัญหาการจัดลำดับนั้นถูกจัดเป็นปัญหาชนิดเอ็นพียาก Tanontong (2015) จึงเสนออัลกอริทึมการบรรจบแบบขยายร่วมกับฟัชซีลอจิก (Coincident Algorithm with Fuzzy Logic: COIN-F) เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหา โดยใช้ตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วย 6 ตัวชี้วัด ดังนี้ 1) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง 2) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านการกระจายของกลุ่มคำตอบที่ได้ 3) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ 4) ตัวชี้วัดสมรรถนะของคำตอบด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง 5) จำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ และ 6) เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ เพื่อนำ COIN-F เปรียบเทียบกับอัลกอริทึมที่ได้รับการยอมรับได้แก่ อัลกอริทึมการบรรจบแบบขยาย (Extended Coincident Algorithm: COIN-E), อัลกอริทึมการบรรจบ (Coincident Algorithm: COIN), อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบงำ II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA II), อัลกอริทึมวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาคชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete Particle Swarm Optimization: DPSO) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตตามภูมิศาสตร์ (Biogeography-Based Optimization: BBO) พบว่า COIN-F มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ ที่กล่าวมาทั้งในด้านการเข้าสู่คำตอบที่แท้จริง และอัตราส่วนจำนวนกลุ่มคำตอบ แต่ใช้เวลาในการหาคำตอบมากกว่า COIN-E และอัลกอริทึมอื่น ๆ เนื่องจาก COIN-F มีการเพิ่มกระบวนการทำงานให้กับอัลกอริทึมทำให้ใช้เวลาในกระบวนการค้นหาคำตอบที่นานกว่า

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสม

Rahimi-Vahed et al. (2007) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยวิธีการค้นหาแบบกระจาย (Multi-Objective Scatter Search: MOSS) โดยพิจารณา 3 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) ปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด 2) ความแปรผันอัตราการผลิตน้อยที่สุด และ 3) ต้นทุนการตั้งค่าน้อยที่สุด ปัญหาการจัดลำดับนั้นถูกจัดเป็นปัญหาชนิดเอ็นพียาก Rahimi-Vahed, Rabbani et al. ได้เสนอ MOSS เพื่อใช้ในการหาคำตอบ โดยนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับขั้นตอนเชิงพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Genetic Algorithms: MOGAs) ได้แก่ PS-NC GA, NSGA II และ SPEA II พบว่า MOSS ให้ผลลัพธ์ทางคำตอบไม่แตกต่างจาก MOGAs แต่จะให้ผลลัพธ์ทางเวลาที่ดีกว่าในกรณีกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่

Manavizadeh et al. (2013) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับแบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมในกรณีผลิตตามใบสั่งซื้อ ในงานวิจัยได้พิจารณาวัตถุประสงค์ทั้งหมด 6 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) ต้นทุนปริมาณงานที่ทำไม่เสร็จน้อยที่สุด 2) ต้นทุนการตั้งค่าน้อยที่สุด 3) ต้นทุนความแปรผันอัตราการผลิตน้อยที่สุด 4) ต้นทุนปริมาณว่างงานน้อยที่สุด 5) ต้นทุนความผิดพลาดของพนักงานน้อยที่สุด และ 6) ต้นทุนเวลาล่าช้า น้อยที่สุด ปัญหาการจัดลำดับนั้นถูกจัดเป็นปัญหาชนิดเอ็นพียาก Manavizadeh, Tavakoli et al. ได้ใช้ Particle Swarm Optimization (PSO) และ Simulated Annealing (SA) ในการหาคำตอบ พบว่า PSO ดีกว่า SA ในเรื่องของคำตอบจากแต่ละวัตถุประสงค์

Kampirom (2008) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ผสมแบบหลายวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบตัวอยู่ในระบบผลิตแบบทันเวลาพอดี โดยกำหนดวัตถุประสงค์ทั้งหมด 2 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เวลาการปรับตั้งเครื่องจักรน้อยที่สุด 2) ความผันแปรของภาระงานมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะเพื่อเปรียบเทียบอัลกอริทึมทั้งหมด 3 ตัว คือ 1) ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence Measurement) 2) ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread Measurement) และ 3) ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านอัตราส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-Dominated Solution)

Alaghebandha et al. (2017) ได้ศึกษาปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ผสมแบบทันเวลาพอดี (Just In Time: JIT) ที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของปัญหา 2 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) อัตราการใช้ชิ้นส่วนประกอบคงที่ และ 2) ภาระงานคงที่ในแต่ละสถานีงาน ปัญหาการจัดลำดับนั้น ถูกจัดเป็นปัญหาชนิดเอ็นพียาก Alaghebandha, Hajipour et al. จึงเสนออัลกอริทึมการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญห และนำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับ NSGA-II พบว่า PSO สามารถหาคำตอบที่ดีกว่า ของปัญหา จัดลำดับการผลิตแบบทันเวลา

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายการประกอบแบบสองด้าน

Kucukkoc and Zhang (2016) ได้ศึกษาการจัดสมดุลสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมขนานแบบสองด้านด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยระบบอาณาจักรมด (A Flexible Agent-Based Ant Colony Optimization Approach) โดยพิจารณา 2 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) ความยาวรวมของสายการผลิตน้อยที่สุด และ 2) จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด ปัญหาการจัดสมดุลนั้นถูกจัดเป็นปัญหาชนิดเอ็นพียาก Kucukkoc and Zhang ได้ทำการทดสอบปัญหาทั้งหมด 24 ตัวอย่างกับฮิวริสติกอีก 6 ตัว พบว่าคำตอบที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่คำตอบที่ได้ยังสามารถดีได้กว่านี้ เนื่องจากตัวอย่างที่ทดสอบยังไม่ผ่านการจัดลำดับการผลิต

Ozcan and Toklu (2009) ได้ศึกษาลักษณะปัญหาการจัดสมดุลการผลิตบนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยนำเสนอสมการคณิตศาสตร์และวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) โดยกำหนดค่ารอบเวลาทำงาน (Cycle Time) และ วัตถุประสงค์ 2 วัตถุประสงค์ดังนี้ 1) จำนวนคู่สถานีงาน (Mated Station) น้อยที่สุด และ 2) จำนวนสถานีงานน้อยที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 สรุปท้ายบท

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์ที่มีมากกว่า 1 วัตถุประสงค์ เป็นที่สนใจอย่างมากทั้งในวงอุตสาหกรรมและวงวิชาการ จึงทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหามากมายและต่อเนื่องมาจนปัจจุบัน โดยมีเมตาฮิวริสติกเป็นหนึ่งในวิธีการที่โดดเด่นและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน เนื่องจากวิธีการนี้ไม่เจาะจงในการแก้ปัญหาเฉพาะด้าน จึงทำให้สามารถแก้ปัญหามากมายรูปแบบ คุ่มค่าต่อการวิจัยและพัฒนาต่อ

ในปัจจุบัน มีเมตาฮิวริสติกหลากหลายรูปแบบถูกพัฒนาขึ้น เพื่อตอบสนองต่อผู้ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น เวลาการค้นหาคำตอบ ประสิทธิภาพของคำตอบ ปริมาณคำตอบ และความพึงพอใจต่อคำตอบ อีกทั้งยังพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ในแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนที่มากขึ้น

MODE/D เป็นหนึ่งในเมตาฮิวริสติก ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการแก้ไขปัญหาล้วนไป ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อย และให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ยังคงมีข้อจำกัดในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาที่มีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ให้ประสิทธิภาพได้ไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากมีกระบวนการพัฒนาคำตอบเพียงรูปแบบเดียว จึงทำให้คำตอบที่ได้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางอื่น ๆ

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงต้องการพัฒนาเมตาฮิวริสติกสำหรับการแก้ปัญหา เพื่อให้เกิดวิธีการแก้ไขปัญหารูปแบบใหม่ ที่สามารถแก้ปัญหาที่มีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ และให้คำตอบที่ดีขึ้นกว่าเดิม ได้ ด้วยการเรียนรู้และปรับปรุงกระบวนการค้นหาคำตอบของตัวอัลกอริทึมเอง ไม่จำเป็นต้องปรับแก้ด้วยมือหรือดำเนินงานเครื่องมือซ้ำซ้อน ง่ายต่อการใช้ดำเนินงานและลดเวลาในการค้นหาตอบ โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์เป็นปัญหาตัวอย่างในการเปรียบเทียบสมรรถนะของเมตาฮิวริสติกต่าง ๆ



บทที่ 3

ทฤษฎีเกี่ยวกับอัลกอริทึม

ในบทนี้ นำเสนอขั้นตอนและวิธีการพัฒนาคำตอบของปัญหา Travelling Salesman หรือที่เรียกว่า Combinatorial Optimization โดยในส่วนแรกจะนำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (การคัดเลือกคำตอบ) ด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดและวิธีเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับความสำคัญ กระบวนการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์เฉพาะส่วน และการแบ่งปัญหาหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาวัตถุประสงค์เดียว และในส่วนหลัง จะอธิบายวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง ซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมของงานวิจัย

3.1 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิต

3.1.1 วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach)

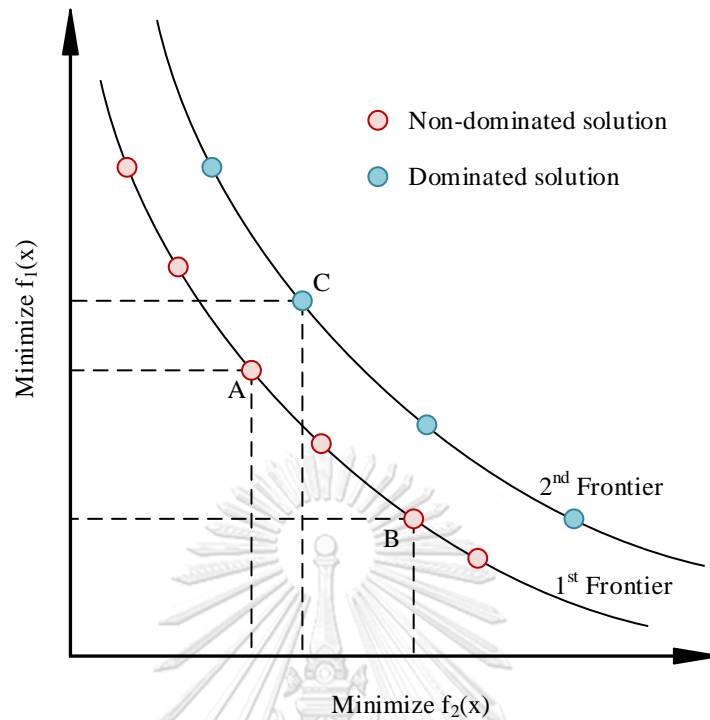
วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดเป็นวิธีการพื้นฐานที่ใช้ในการกำหนดความแข็งแรงของคำตอบ และใช้ได้กับปัญหาทุกรูปแบบ โดยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด จะกำหนดให้คำตอบที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าเป็นคำตอบที่มีค่าความแข็งแรง (Fitness) น้อยกว่า แสดงดังสมการที่ 3-1

$$\text{Minimize } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (3-1)$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (สตริงคำตอบ) โดยที่ $x = \{x_1, \dots, x_n\}$
 $f_k(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ k ของเวกเตอร์ x
 m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

กรณีหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุด เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x จะให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ y ก็ต่อเมื่อ $f_k(x) \leq f_k(y)$ ทุกค่า และ $f_k(x) < f_k(y)$ อย่างน้อย 1 ค่า โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

กรณีหาค่าคำตอบที่มากที่สุด เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ x จะให้คำตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ y ก็ต่อเมื่อ $f_k(x) \geq f_k(y)$ ทุกค่า และ $f_k(x) > f_k(y)$ อย่างน้อย 1 ค่า โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$



ภาพที่ 3-1 Pareto Optimal Solution

จากภาพที่ 3-1 เป็นกราฟแสดงกลุ่มคำตอบของฟังก์ชันที่มี 2 วัตถุประสงค์ โดยแต่ละจุดคือคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ จะเห็นได้ว่าจุด A และ B อยู่ในกลุ่มคำตอบเดียวกันและเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าจุดใดเป็นคำตอบที่ดีกว่ากันได้ (Non-Dominated Set) แต่สามารถระบุได้ว่ากลุ่มคำตอบฟรอนเทียร์ที่ 1 (1st Frontier) ดีกว่ากลุ่มคำตอบฟรอนเทียร์ที่ 2 (2nd Frontier) ทุกจุด (Chutima & Chimklai, 2012)

แสดงขั้นตอนการกำหนดค่าความแข็งแรง (Non-dominated Sorting) ให้กับคำตอบ ด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด โดยแสดงในรูปรหัสเทียม (Pseudo Code) ดังนี้ (เมื่อ Fitness คือค่าความแข็งแรงของคำตอบใด ๆ P คือเซตของคำตอบที่ต้องการกำหนดค่าความแข็งแรง และ C คือจำนวนเวกเตอร์คำตอบหรือสตริงคำตอบภายในเซต P)

รหัสเทียมของการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด

```

1:  $P = \{x^1, x^2, \dots, x^C\}$ 
2: For all  $fitness_i = 1, i = 1, 2, \dots, C$ 
3:  $i = 1$ 
4: while  $i \leq C$  do
5:    $j = i + 1$ 
6:   while  $j \leq C$  do
7:     if  $fitness_i = fitness_j$  then
8:       if  $x^j > x^i$  then //  $x^i$  dominates  $x^j$ 
9:          $fitness_j = fitness_j + 1$ 
10:      else
11:        if  $x^j < x^i$  then //  $x^j$  dominates  $x^i$ 
12:           $fitness_i = fitness_i + 1$ 
13:         $j = 0$ 
14:      end if
15:    end if
16:  end if
17:   $j = j + 1$ 
18: end while
19:  $i = i + 1$ 
20: end while

```

3.1.2 วิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach)

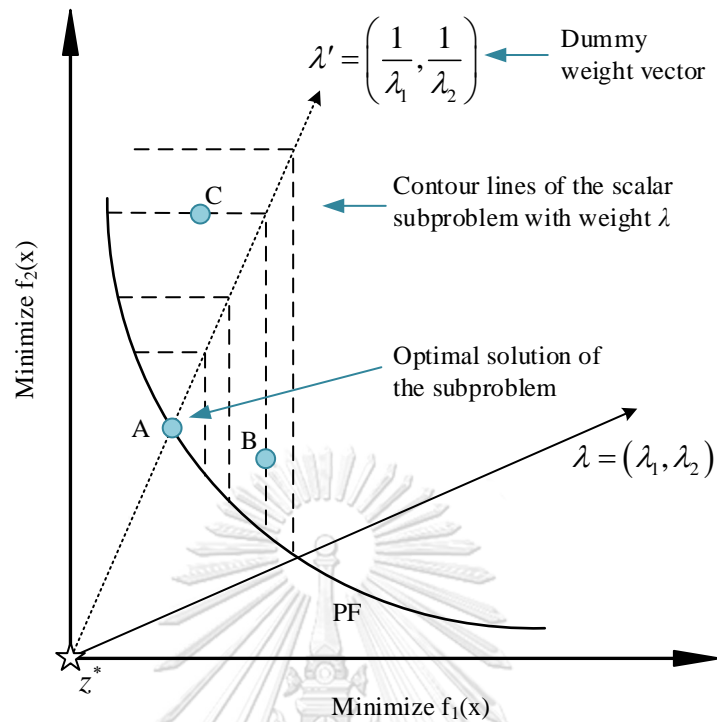
วิธีเทบปีเชฟฟ์ จะคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดเพียงคำตอบเดียวสำหรับเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก (λ) ใด ๆ โดยมีแนวคิดในการหาผลต่างที่น้อยที่สุดระหว่างค่าที่ดีที่สุด (เวกเตอร์ค่าเป้าหมาย) กับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบ หากคำตอบใด มีค่าผลต่างที่น้อยกว่าจะเป็นคำตอบที่ดีกว่า แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 3-2

$$\text{minimize } g^{te}(x|\lambda^i, z^*) = \max_{1 \leq k \leq m} \{\lambda_k^i | f_k(x) - z_k^* | \} \quad (3-2)$$

- เมื่อ $g^{te}(x)$ คือ ผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าวัตถุประสงค์ของสตริง i กับค่าเป้าหมายของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ของปัญหาย่อยที่ i
- z^* คือ เวกเตอร์ค่าเป้าหมาย โดยที่ $z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_m^*)$ กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด $z_k^* = \min\{f_k(x)\}$ กรณีหาค่าของคำตอบที่มากที่สุด $z_k^* = \max\{f_k(x)\}$
- λ^i คือ เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $\lambda^i = \{\lambda_1^i, \dots, \lambda_m^i\}$
- m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

แสดงตัวอย่างการคัดเลือกคำตอบของปัญหาที่ค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ λ ด้วยวิธีเทบปีเชฟฟ์ในกรณีการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุด ดังภาพที่ 3-2

เนื่องจากตัวอย่างเป็นกรณีการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุด จึงแสดงเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักในรูปส่วนกลับหรือเรียกว่า เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักดัมมี่ (Dummy weight vector) เพื่อให้สามารถอธิบายพิกัดของคำตอบบนภาพได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 3-2 Tchebycheff Approach

จากภาพที่ 3-2 เป็นกราฟแสดงกลุ่มคำตอบของฟังก์ชันที่มี 2 วัตถุประสงค์ บนปัญหาที่มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ λ โดยแต่ละจุดคือคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ จะเห็นได้ว่าจุด A เป็นคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหานี้ เนื่องจากอยู่บนเส้นผ่านจุด λ' และใกล้จุดเวกเตอร์เป้าหมาย (z^*) มากที่สุด ส่วนจุด B และ C อยู่บนเส้นคอนทัวร์ (Contour line) เดียวกัน (ระยะห่างระหว่างจุดตัดบนเส้นผ่านจุด λ' กับค่าเป้าหมายเท่ากัน) ซึ่งทำให้จุด B และ C มีค่าเทบปีเซฟฟ์เท่ากัน ไม่สามารถระบุได้ว่าคำตอบใดดีกว่า

เนื่องด้วยข้อจำกัดของวิธีเทบปีเซฟฟ์ในตัวอย่างข้างต้นและปัญหาในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์บางค่าเป็นจำนวนเต็ม จึงทำให้เกิดคำตอบที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียวกัน มีค่าเท่ากันเป็นจำนวนมาก แต่ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่น ๆ มีค่าแตกต่างกัน ส่งผลให้วิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบปกติ อาจเจอคำตอบที่อยู่บนเส้นคอนทัวร์เดียวกันได้เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ใช้งานไม่ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงนำวิธีการเทบปีเซฟฟ์มาทำการประยุกต์ เรียกว่า วิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับความสำคัญ โดยให้ค่า $\lambda_k^i |f_k(x) - z_k^*|$ ที่มากมีความสำคัญมากถูกนำมาเปรียบเทียบก่อน โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$ แสดงตัวอย่างการคัดเลือกคำตอบด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับความสำคัญของคำตอบที่มี 3 วัตถุประสงค์ ดังตารางที่ 3-19

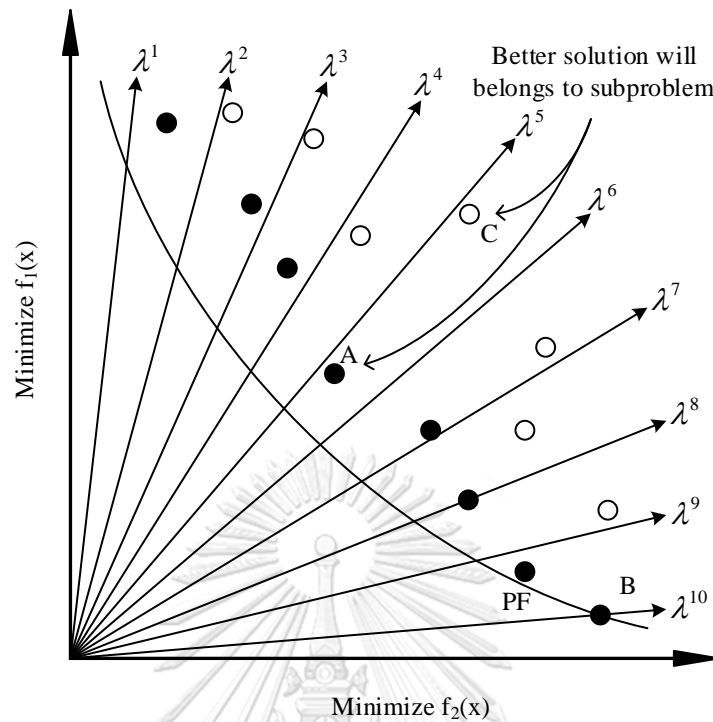
ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างการคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการเพนซีเฟฟแบบไล่ระดับความสำคัญ

x	$\lambda_k f_k(x) - z_k^* $		
1	<u>0.3499</u>	0.0530	0.0278
2	<u>0.2333</u>	0.0833	0.0454
3	<u>0.2333</u>	0.0833	0.0546

ตารางที่ 3-1 เป็นตารางแสดงค่าเพนซีเฟฟของเวกเตอร์คำตอบที่ 1 2 และ 3 ซึ่งเรียงลำดับค่าเพนซีเฟฟของแต่ละคำตอบจากมากไปน้อย โดยจะเห็นได้ว่า ระดับความสำคัญที่ 1 คำตอบที่ 1 มีค่าเพนซีเฟฟมากที่สุด ส่วนคำตอบที่ 2 และ 3 มีค่าเพนซีเฟฟเท่ากันและน้อยที่สุดในระดับความสำคัญนี้ จึงไม่สามารถตัดสินได้ว่าคำตอบที่ 2 หรือ 3 เป็นคำตอบที่ดีกว่ากัน ดังนั้น จึงต้องพิจารณาคำตอบที่ 2 และ 3 ต่อที่ระดับความสำคัญที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ทั้งสองคำตอบยังคงมีค่าเพนซีเฟฟที่เท่ากันคือ 0.0833 จึงต้องพิจารณาต่อในระดับความสำคัญที่ 3 จะเห็นได้ว่า ในระดับความสำคัญนี้ คำตอบที่ 2 มีค่าเพนซีเฟฟน้อยกว่าคำตอบที่ 3 จึงสรุปได้ว่า คำตอบที่ 2 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่ค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ λ

3.2 การแบ่งปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว

การแบ่งปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ออกเป็นปัญหาย่อย ๆ (ปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวหลายปัญหา) หรือการจำแนกปัญหา เป็นพื้นฐานแนวคิดของ MOEA/D โดยจะแบ่งปัญหาด้วยเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก (λ^i) ที่แตกต่างกันของคำตอบในแต่ละปัญหาย่อย เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถคัดเลือกคำตอบที่ดีที่สุดของกลุ่มในแต่ละเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก ด้วยวิธีนี้ จะทำให้คำตอบที่หาได้ ไม่รวมตัวอยู่เป็นกระจุกและมีคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แสดงตัวอย่างการจำแนกปัญหา กรณีหาค่าน้อยที่สุด 2 วัตถุประสงค์ ดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-3 การแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย

จากภาพที่ 3-6 เป็นกราฟแสดงกลุ่มคำตอบของฟังก์ชันที่มี 2 วัตถุประสงค์ โดยจุดสีดำคือคำตอบพารามิเตอร์ที่ 1 จะเห็นได้ว่า จุด A เป็นคำตอบที่ดีกว่าคำตอบจุด C สำหรับปัญหาย่อยที่ 5 และดีที่สุดสำหรับปัญหาย่อยที่ 6 เช่นกัน ดังนั้น ทั้งสองปัญหาย่อยจะถูกแทนที่คำตอบที่ดีกว่าคือจุด A (ปัญหาย่อยข้างเคียงมีโอกาสเป็นคำตอบเดียวกันได้) ส่วนจุด B เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) สำหรับปัญหาย่อยที่ 10

Q. Zhang and Li (2007) ได้เสนอการกำหนดจำนวนประชากรและเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักใน MOEA/D ซึ่งใช้พารามิเตอร์จำนวนนับ (H) เป็นตัวควบคุม โดยที่ $\lambda^1, \dots, \lambda^N$ คือ เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละปัญหาย่อย และในแต่ละเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนักจะประกอบด้วยค่าน้ำหนัก ดังนี้

$$\left\{ \frac{0}{H}, \frac{1}{H}, \dots, \frac{H}{H} \right\}$$

ดังนั้น จำนวนประชากร (จำนวนเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก) จะเท่ากับ $N = C_{m-1}^{H+m-1}$ โดยที่ m คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวอย่างเช่น $H = 33$ และมี 3 วัตถุประสงค์ จะมีจำนวนประชากรเท่ากับ 595 ($N = 595$)

3.3 กระบวนการแลกเปลี่ยนสายพันธุเฉพาะส่วน

การแลกเปลี่ยนสายพันธุเฉพาะส่วน (Partially-Mapped Crossover: PMX) เป็นกระบวนการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm Operator) และเป็นวิธีการที่ให้สมรรถนะสูงกว่าการครอสโอเวอร์แบบอื่น ๆ (Singh & Choudhary, 2009) แสดงขั้นตอนการทำงานของ Two-Point Partially-Mapped Crossover Operator แบบสร้างเพียงคำตอบเดียว ดังนี้

1. สุ่มเลือก 2 คำตอบ เพื่อเป็นคำตอบรุ่นพ่อแม่ โดยกำหนดให้ Parent 1 เป็นคำตอบหลัก
2. สุ่ม 2 ตำแหน่งที่จะทำการครอสโอเวอร์ในช่วง 1 ถึง $n - 1$ จากนั้นทำการแลกเปลี่ยนค่าจากคำตอบหลักไปยังคำตอบรุ่นลูก (ในตัวอย่างนี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 3 และ 8)
3. ทำการตรวจสอบว่าส่วนที่ทำการแลกเปลี่ยน (ขีดเส้นใต้) จาก Parent 1 มีเลขซ้ำกับส่วนที่ไม่เกิดการแลกเปลี่ยนของ Parent 2 หรือไม่ หากไม่มีให้ทำการแลกเปลี่ยนส่วนที่เหลือจาก Parent 2 (ในตัวอย่างนี้มีเลขซ้ำ แสดงเป็นอักษรตัวหนาสีแดง)

Parent 1: 8 4 7 3 6 2 5 1 9 0

Parent 2: 0 **1 2** 3 4 5 6 7 8 9

Child 1: _ _ _ 3 6 **2 5 1** _ _

4. ทำการแลกเปลี่ยนเลขที่**ไม่มีการซ้ำ**จาก Parent 2 ไปยังคำตอบรุ่นลูกในตำแหน่งเดียวกัน

Parent 1: 8 4 7 3 6 2 5 1 9 0

Parent 2: 0 **1 2** 3 4 5 6 7 8 9

Child 1: 0 _ _ 3 6 **2 5 1** 8 9

5. ทำการแลกเปลี่ยนเลขที่มีการซ้ำ โดยเริ่มจากเลขใดก็ได้ ในตัวอย่างนี้เริ่มจากเลข 1 จะเห็นได้ว่า หากนำเลข 1 จาก Parent 2 ลงมาจะเกิดเลขซ้ำในคำตอบรุ่นลูก ดังนั้นให้แลกเปลี่ยนโดยเทียบเลข 1 ของคำตอบรุ่นลูกกับเลขที่ตำแหน่งเดียวกันของ Parent 2 คือ 7 หาก 7 สามารถอยู่ในตำแหน่งเดียวกับเลข 1 ของ Parent 2 ได้ โดยไม่มีเลขซ้ำ ให้ทำการแลกเปลี่ยน

Parent 1: 8 4 7 3 6 2 5 1 9 0

Parent 2: 0 **1 2** 3 4 5 6 **7** 8 9

Child 1: 0 **7** _ 3 6 **2 5 1** 8 9

6. ทำการแลกเปลี่ยนเลขที่มีการซ้ำตัวถัดไป (เลข 2) จะเห็นได้ว่าเลข 2 ของคำตอบรุ่นลูกอยู่ตำแหน่งเดียวกับเลข 5 ของ Parent 2 ซึ่ง 5 ไม่สามารถลงมาอยู่ในคำตอบรุ่นลูกได้ เนื่องจากมีเลขซ้ำให้ทำการเทียบเลข 5 ของคำตอบรุ่นลูกกับเลขที่ตำแหน่งเดียวกันของ Parent 2 คือ 6 ซึ่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นกัน ให้ทำการเทียบเลข 6 ของคำตอบรุ่นลูก ซึ่งอยู่ตำแหน่งเดียวกับเลข 4 ของ Parent 2 และสามารถแลกเปลี่ยนได้

Parent 1: 8 4 7 3 6 2 5 1 9 0

Parent 2: 0 **1 2** 3 4 5 6 7 8 9

Child 1: 0 7 4 3 6 **2 5 1** 8 9

ในตัวอย่างนี้แสดงการหาเพียงคำตอบเดียว หากต้องการทั้งสองคำตอบรุ่นลูก ให้ผลัดกันเป็นคำตอบหลักระหว่าง Parent 1 และ Parent 2

3.4 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (Differential Evolution: DE) เป็นเครื่องมือแก้ปัญหาโดยใช้พื้นฐานของประชากร (Population-based Optimizer) ถูกพัฒนาโดย Storn and Price (1997) มีทิศทางการค้นหาคำตอบที่แตกต่างและอิสระต่อกันในแต่ละเวกเตอร์คำตอบของประชากร เริ่มต้นปัญหาโดยการสร้างเวกเตอร์เป้าหมาย (Target vector) ในหลายจุดพิกัดแบบสุ่มเลือก ด้วยขอบเขตพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ จากนั้น DE จะเข้าสู่กระบวนการพัฒนาคำตอบ ได้แก่ การกลายพันธุ์ (Mutation), การครอสโอเวอร์ (Recombination) และการคัดเลือกคำตอบ (Selection)

กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากระบวนการเชิงพันธุกรรมอื่น ๆ (GA Operator เช่น SBX และ UNDX) ในการแก้ปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียว (Single-Objective Optimization) ด้วยเหตุผลนี้ จึงนำ DE Operator เข้ามาพัฒนาคำตอบแทนวิธี GA Operator เดิมใน MOEA/D (Li & Zhang, 2009)

เนื่องจาก DE เป็นอัลกอริทึมที่มีกระบวนการ รูปแบบกลยุทธ์ การคัดเลือกคำตอบ และพารามิเตอร์ควบคุมที่หลากหลาย S. M. Venske et al. (2014) ได้แบ่งประเภท DE ออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution: Classical DE) และวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (Adaptive Differential Evolution: ADE)

3.4.1 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างมีพารามิเตอร์ควบคุม 3 ตัว ได้แก่ N , F และ CR โดย N คือจำนวนหรือขนาดของประชากร ส่วนค่าปัจจัยขยายผลต่าง (F) ใช้ในการปรับขนาดของค่าผลต่างระหว่างสองเวกเตอร์สุ่ม ซึ่งจะถูกนำมาบวกเพิ่มกับเวกเตอร์พื้นฐาน (Base vector) และจะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ (Mutant vector: v) โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง (Differential mutation) จากนั้นจะทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์กลายพันธุ์ (v) กับเวกเตอร์เป้าหมาย (Target vector: x) ด้วยอัตราครอสโอเวอร์ (CR) โดยสุดท้ายจะได้เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u) เป็นเวกเตอร์คำตอบรุ่นใหม่ เพื่อนำมาเปรียบเทียบและคัดเลือกคำตอบที่ดี โดยส่วนประกอบของเวกเตอร์คือ จุดพิกัด (Coordinate) และจำนวนพิกัดในแต่ละเวกเตอร์คือ ขนาดของเวกเตอร์ (n)

DE Operator เป็นการในการค้นหาคำตอบแบบเวกเตอร์ โดยใช้ผลต่างระหว่างจุดบนแกน (Coordinate) เดียวกันและพารามิเตอร์ควบคุม 2 ตัว เป็นตัวกำหนดทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ x ใด ๆ ให้เปลี่ยนแปลงไป (Price, Storn, & Lampinen, 2006) จึงทำให้ DE Operator เหมาะในการแก้ปัญหา Continuous SOPs และปัญหาที่มีรูปแบบที่เป็นไปได้ของคำตอบหลากหลายได้ดี DE จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ในการพัฒนาคำตอบ ได้แก่ ขั้นตอนการกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง (Differential mutation), ขั้นตอนรีคอมบิเนชัน (Recombination) และการคัดเลือก (Selection)

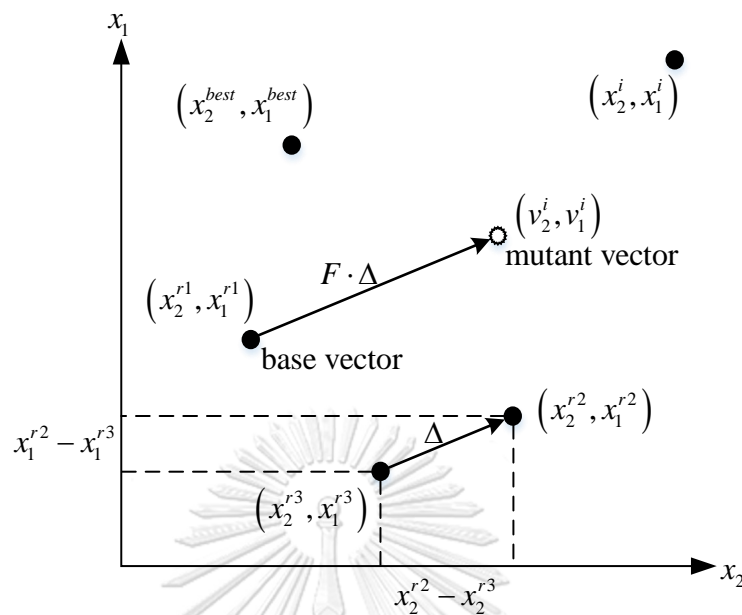
3.4.1.1 การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง

การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง (Differential mutation) มีหลากหลายกลยุทธ์ที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งรูปแบบต่าง ๆ จะแสดงด้วยสัญลักษณ์ $DE/strategy/n_v/o_x$ เพื่อบ่งบอกกลยุทธ์หรือรูปแบบในการค้นหาคำตอบของ DE (o_x คือ รูปแบบของการครอสโอเวอร์ n_v คือ จำนวนคู่ของผลต่าง และ strategy คือ รูปแบบของกลยุทธ์) โดยมีรูปแบบของกลยุทธ์ซึ่งเป็นที่นิยม 4 แบบหลัก ๆ ดังนี้

1. $DE/rand/n_v/o_x$ เป็นกลยุทธ์การกลายพันธุ์แบบทั่วไปของ DE นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยกลยุทธ์นี้ จะใช้จุดพิกัดพื้นฐาน (Base coordinate) จากการสุ่มเลือกเวกเตอร์ในการค้นหาคำตอบ เพื่อคำนวณหาจุดพิกัดกลายพันธุ์ (Mutant coordinate) ด้วยวิธีนี้ เป็นการสุ่มเลือกเวกเตอร์ทั้งหมดในการพัฒนาคำตอบ ทำให้คำตอบที่ได้มีความหลากหลายและกระจายตัวกว้าง แต่มีการลู่เข้าของคำตอบที่ช้าและไม่มีทิศทางในการค้นหาคำตอบที่ชัดเจน แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ในรูปแบบของจุดพิกัดและสูตรคำนวณในรูปแบบของเวกเตอร์ ดังภาพที่ 3-4 และสมการที่ 3-3 ตามลำดับ

$$v^i = x^{r1} + F \sum_{k=1}^{n_v} (x^{r(2k)} - x^{r(2k+1)})$$

(3-3)

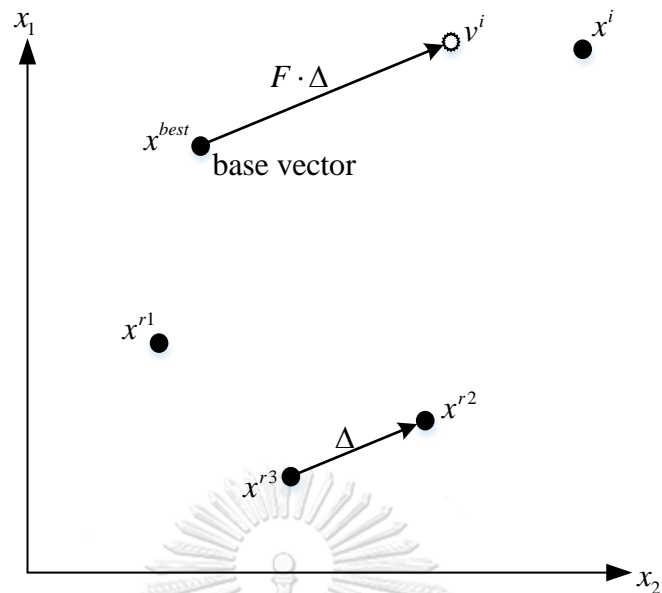


ภาพที่ 3-4 การกลายพันธุ์ด้วยกลยุทธ์ DE/rand/1

2. DE/best/ n_v/o_x เป็นกลยุทธ์การกลายพันธุ์แบบเลือกจุดพิกัดพื้นฐาน โดยจะเลือกใช้จุดพิกัดของเวกเตอร์ที่ให้คำตอบดีที่สุดในการเริ่มพัฒนาคำตอบ เพื่อให้สามารถค้นหาจุดพิกัดคำตอบที่ดีกว่าในบริเวณใกล้เคียงกับจุดพิกัดคำตอบเดิมที่ดี ทำให้กลยุทธ์นี้ มีความโดดเด่นในด้านการรู้เข้าของคำตอบที่รวดเร็วแต่ไม่หลากหลาย จึงเสี่ยงต่อการติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม ไม่สามารถหาคำตอบใหม่ ๆ ได้ แสดงตัวอย่างเวกเตอร์และสูตรคำนวณดังภาพที่ 3-5 และสมการที่ 3-4 ตามลำดับ

$$v^i = x^{best} + F \sum_{k=1}^{n_p} (x^{r(2k-1)} - x^{r(2k)})$$

(3-4)



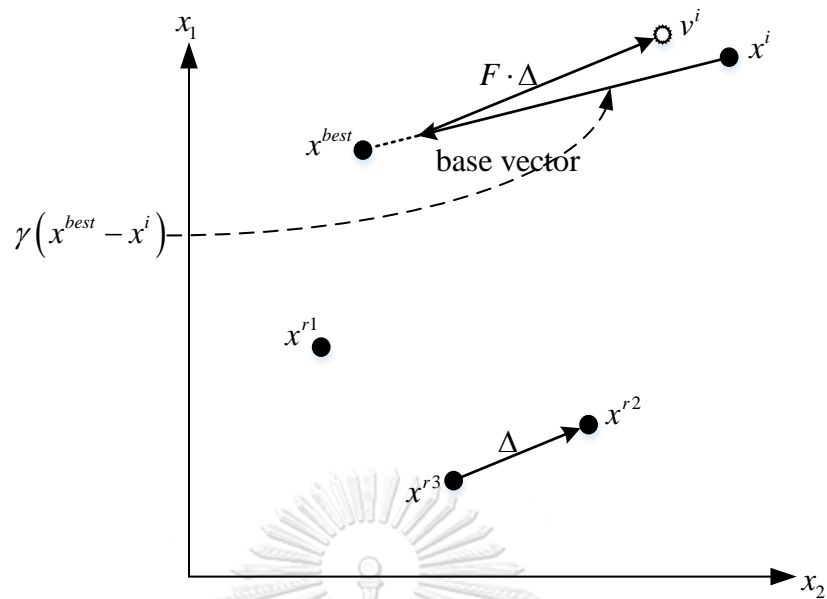
ภาพที่ 3-5 การกลายพันธุ์ด้วยกลยุทธ์ DE/best/1

3. DE/current-to-best/ n_v/o_x เป็นกลยุทธ์ที่ปรับปรุงมาจาก DE/best/ n_v/o_x โดย Sk. Minhazul Islam, Swagatam Das มีแนวคิดที่ว่า จุดพิกัดเป้าหมายหรือจุดพิกัดปัจจุบัน (Target vector หรือ Current vector) ของแต่ละเวกเตอร์คำตอบ จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดขณะนั้น หากเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Best so far solution) ก็จะไม่ถูกคัดออก จึงทำให้กลยุทธ์นี้ มีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วย่างมากและมีโอกาสติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่มน้อยลงจาก DE/best/ n_v/o_x แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ดังภาพที่ 3-6 และแสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 3-5

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$v^i = x^i + \gamma(x^{best} - x^i) + F \sum_{k=1}^{n_v} (x^{r(2k-1)} - x^{r(2k)})$$

(3-5)

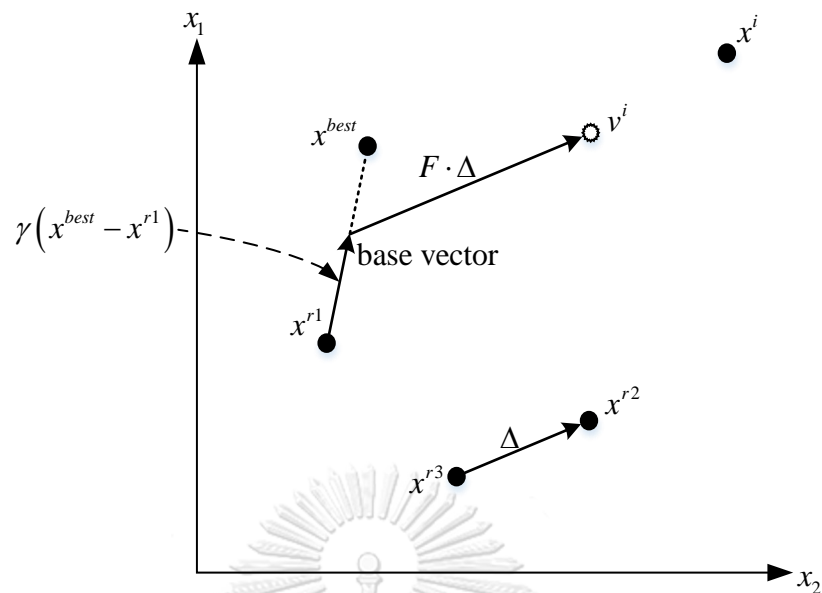


ภาพที่ 3-6 การกลายพันธุ์ด้วยกลยุทธ์ DE/current-to-best/1

4. DE/rand-to-best/ n_v/o_x เป็นกลยุทธ์ที่ปรับปรุงมาจาก DE/best/ n_v/o_x เพื่อให้สามารถพัฒนาคำตอบที่มีความหลากหลายไม่ติดในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม แต่ยังสามารถหาคำตอบในจุดพิกัดใกล้เคียงกับคำตอบเดิมที่ดีที่สุด โดยกลยุทธ์นี้ จะมีจุดพิกัดพื้นฐาน 2 จุด กับค่าถ่วงน้ำหนัก γ เพื่อสร้างให้เกิดจุดพิกัดพื้นฐานใหม่อยู่ในช่วงระหว่างจุดพิกัดของเวกเตอร์คำตอบที่ดีที่สุดกับเวกเตอร์สุ่ม แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ดังภาพที่ 3-7 และแสดงสูตรคำนวณ ดังสมการที่ 3-6

$$v^i = x^{r1} + \gamma(x^{best} - x^{r1}) + F \sum_{k=1}^{n_v} (x^{r(2k)} - x^{r(2k+1)})$$

(3-6)



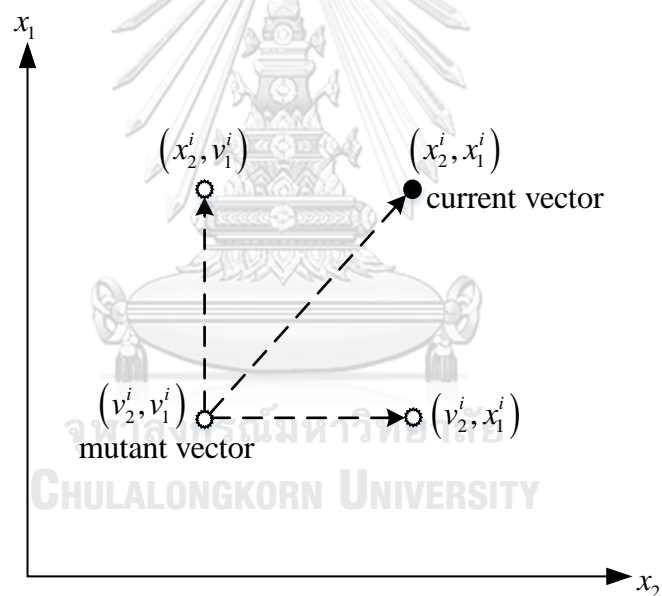
ภาพที่ 3-7 การกลายพันธุ์ด้วยกลยุทธ์ DE/rand-to-best/1

- เมื่อ
- i คือ เลขลำดับของเวกเตอร์ปัจจุบันหรือเวกเตอร์เป้าหมาย (The current vector index หรือ The target vector index)
 - $r1$ คือ เลขลำดับของเวกเตอร์พื้นฐาน ซึ่งได้จากการสุ่มเลือก (The base vector index can be determined in a variety of ways)
 - $r2, r3$ คือ เลขลำดับของเวกเตอร์ผลต่าง ซึ่งได้จากการสุ่มเลือก (The difference vector indices)
 - n คือ ขนาดของเวกเตอร์
 - x^i คือ เวกเตอร์เป้าหมายหรือเวกเตอร์ปัจจุบัน (Target vector หรือ Current vector) ที่ i ซึ่งประกอบด้วยจุดพิกัดเป้าหมาย (Target coordinate) จำนวน n จุด โดยที่ $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$
 - v^i คือ เวกเตอร์กลายพันธุ์ (Mutant vector) ที่ i ซึ่งประกอบด้วยจุดพิกัดกลายพันธุ์ (Mutant coordinate) จำนวน n จุด, $v^i = (v_1^i, \dots, v_n^i)$
 - u^i คือ เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) ที่ i ซึ่งประกอบด้วยจุดพิกัดทดลอง (Trial coordinate) จำนวน n จุด โดยที่ $u^i = (u_1^i, u_2^i, \dots, u_n^i)$
 - F คือ ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (Scaling factor)
 - CR คือ อัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate)
 - γ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน (Weight of base vectors)

3.4.1.2 การรีคอมบิเนชัน

การรีคอมบิเนชัน (Recombination) เป็นการทำครอสโอเวอร์ระหว่างจุดพิกัดเป้าหมาย (จุดพิกัดเดิม: x^i) กับจุดพิกัดกลายพันธุ์ (จุดพิกัดใหม่: v^i) เพื่อให้เกิดค่าตอบที่หลากหลายและยังคงจุดพิกัด j ใด ๆ ของเวกเตอร์เดิมไว้บางจุด (โดยที่ $j = 1, 2, \dots, n$) การรีคอมบิเนชันมี 2 รูปแบบที่นิยมและนำมาใช้กับ DE Operator ได้แก่ เอกซ์โพเนนเชียลครอสโอเวอร์ (Exponential Crossover) และยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover หรือ Binomial Crossover) แสดงสูตรยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์และการครอสโอเวอร์ระหว่างจุดพิกัด ดังสมการที่ 3-7 และภาพที่ 3-8 ตามลำดับ

$$u_j^i = \begin{cases} v_j^i, & \text{if } rand_{i,j} \leq CR \text{ or } j = rand_{i_i} \\ x_j^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-7)$$



ภาพที่ 3-8 รูปแบบผลลัพธ์จุดพิกัดจากการรีคอมบิเนชัน 2 ตัวแปร

3.4.1.3 การคัดเลือกคำตอบ

กระบวนการคัดเลือกคำตอบ (Selection) จะเลือกหนึ่งคำตอบที่ดีกว่าระหว่างเวกเตอร์คำตอบเดิม (x^i) กับเวกเตอร์คำตอบทดลอง (u^i) ที่ลำดับ i เดียวกัน โดยประเมินจาก $f(\cdot)$ ที่ดีกว่า แสดงการคัดเลือกกรณีการหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุดในรูปของสมการ ดังสมการที่ 3-8

$$x^i = \begin{cases} u^i, & \text{if } f(u^i) < f(x^i) \\ x^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3-8)$$

หาก $f(u^i) < f(x^i)$ จะเกิดการแทนที่คำตอบในกระบวนการคัดเลือกดังสมการที่ 3-8 ซึ่งจะเรียกว่า ความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ (Successfully creating offspring vector) และในส่วนของพารามิเตอร์ควบคุม (F และ CR) ที่ทำให้เกิดความสำเร็จในการสร้างคำตอบ จะถูกเรียกว่า Successful mutant factor และ Successful crossover probability ตามลำดับ

3.4.2 วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว

สำหรับวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution) จะกำหนดพารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นค่าคงที่ ไม่มีเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทำงานอัลกอริทึม จึงมีการคิดค้นอัลกอริทึมแบบปรับตัว (Adaptive algorithms) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์หรือวิธีการพัฒนาคำตอบในระหว่างดำเนินงานอัลกอริทึมได้ ตัวอย่างเช่น SaDE, JADE, jDE, EPSDE, ENS-MOEA/D และ FADE โดยสำหรับวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง จะแบ่งการปรับตัวออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม (Parameter adaptation) และการปรับตัวด้วยกลยุทธ์ (Strategy adaptation)

วิธีวิวัฒนาการแบบปรับตัว (Adaptive Differential Evolution) ถูกพิสูจน์ว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วและน่าเชื่อถือ (เสถียรและความแปรปรวนต่ำ) กว่า Classical DE (Brest, Greiner, Boskovic, Mernik, & Zumer, 2006; Qin & Suganthan, 2005) โดยมีรูปแบบกลยุทธ์ของ DE ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับกระบวนการปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ (Parameter adaptation operations) เป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพอัลกอริทึมอย่างมาก Qin and Suganthan (2005); Teo (2006) ได้พัฒนา Adaptive DE จากโครงสร้างของ Classical DE ด้วยกลยุทธ์ DE/rand/1/bin ซึ่งมีความแข็งแกร่งและเป็นที่ยอมรับอย่างมาก แต่กลยุทธ์นี้มีอัตราการลู่เข้าของคำตอบที่ช้า ส่วน Huang, Qin, and Suganthan (2006) ใช้กลยุทธ์ DE/rand/1/bin ไปพร้อมกับ DE/current-to-best/1/bin ด้วยการสุ่มเลือกหนึ่งกลยุทธ์ในการพัฒนาคำตอบ และทำการปรับค่าความน่าจะเป็นในการเลือกใช้กลยุทธ์จากจำนวนความสำเร็จในการสร้างคำตอบที่ดีของแต่ละกลยุทธ์

3.4.2.1 การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม

วิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างเป็นอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพสำหรับหลากหลายปัญหาจริงในปัจจุบัน (Joshi & Sanderson, 1999; Price et al., 2006; Storn & Price, 1997; J. Zhang, Avasarala, Sanderson, & Mullen, 2008; J. Zhang, Avasarala, & Subbu, 2010) แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างยังคงขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าพารามิเตอร์ควบคุม (Control parameters) เช่น ปัจจัยการกลายพันธุ์ (Mutation factor) และความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (Crossover probability) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Gämperle, Müller, and Koumoutsakos (2002) และการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของ J. Zhang and Sanderson (2007) แม้ว่าในปัจจุบันจะมีข้อเสนอแนะสำหรับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ควบคุม (Gämperle et al., 2002; Mezura-Montes, Velázquez-Reyes, & Coello Coello, 2006; Price et al., 2006) แต่ยังคงมีความซับซ้อนจากผลกระทบระหว่างพารามิเตอร์ควบคุม ซึ่งยากต่อการกำหนดค่าที่ให้ผลที่ดีที่สุด จึงเป็นเหตุผลหลักในการไม่กำหนดค่าพารามิเตอร์ควบคุมคงที่ เนื่องจากไม่อาจหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับหลากหลายปัญหาได้

วิธีการลองผิดลองถูก (Trial-and-error method) ถูกนำมาใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม ซึ่งจำเป็นต้องทำซ้ำเป็นจำนวนมากและกำหนดค่าพารามิเตอร์คงที่ตลอดจนจบการดำเนินงานของอัลกอริทึม ดังนั้น Abbass (2002); Brest et al. (2006); Liu and Lampinen (2005) จึงนำเสนอการปรับตัวด้วยผลต่าง (Different adaptive) หรือกลไกการปรับตัว (Self-adaptive mechanisms) ซึ่งเป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมแบบพลวัต (Dynamic control parameters) โดยไม่มีการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์และคุณลักษณะของปัญหาจากผู้ใช้งานอัลกอริทึม (J. Zhang & Sanderson, 2009a)

การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม (Parameter adaptation) ดังกล่าว สามารถแบ่งได้ตามวิธีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ควบคุม แบ่งออกเป็น 3 แบบ นำเสนอโดย Angeline (1995); A. E. Eiben, Hinterding, and Michalewicz (1999); A. E. Eiben and Smith (2008) ดังนี้

1. การควบคุมพารามิเตอร์เชิงกำหนด (Deterministic Parameter Control) พารามิเตอร์ควบคุมจะถูกกำหนดค่าจากผู้ใช้งานอัลกอริทึม โดยไม่สนใจผลตอบรับ (Feedback) และสถานการณ์ในการค้นหาคำตอบ ณ ขณะใด ๆ หนึ่งในตัวอย่างการควบคุมพารามิเตอร์เชิงกำหนดคือ การปรับค่าอัตราการกลายพันธุ์ตามระยะเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม (The time-dependent change of the mutation rates) ซึ่งถูกเสนอโดย (Holland, 1992)
2. การควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัว (Adaptive Parameter Control) ผลตอบรับจากการพัฒนาคำตอบของอัลกอริทึมในทิศทางต่าง ๆ จะถูกนำมาปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมให้

เหมาะสมกับสถานการณ์ ตัวอย่างการควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัว เช่น Rechenberg's "1/5-th rule" (Back, 1996), Fuzzy-logic adaptive DE (Liu & Lampinen, 2005), SaDE (Qin & Suganthan, 2005), jDE (Brest et al., 2006) และ SaNSDE (Yang, Tang, & Yao, 2008)

3. การควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัวด้วยตนเอง (Self-adaptive Parameter Control) วิธี The evolution of evolution ถูกใช้ในการปรับตัวเองของพารามิเตอร์ควบคุม โดยจะพัฒนาคำตอบควบคู่กับการปรับตัวของค่าพารามิเตอร์ควบคุมแบบเฉพาะเจาะจงในแต่ละคำตอบ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ดีของแต่ละคำตอบจะทำให้ทิศทางการค้นหาคำตอบมีแนวโน้มที่ดีและหลากหลายมากขึ้น ตัวอย่างการควบคุมพารามิเตอร์แบบปรับตัวด้วยตนเอง เช่น SPDE ของ (Abbass, 2002) สำหรับการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ และ DESAP (Teo, 2006)

3.4.2.2 การปรับตัวด้วยกลยุทธ์

การปรับตัวด้วยกลยุทธ์ (Strategy adaptation) เป็นกระบวนการที่ทำให้อัลกอริทึมสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของระบบ และปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ให้เหมาะสมกับสถานการณ์ในระหว่างการทำงานอัลกอริทึมได้

ประสิทธิภาพและประสิทธิผลของ DE ได้รับการพิสูจน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น ด้านการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) โดย Storn and Price (1997), ด้านการสื่อสาร (Communication) โดย Ilonen, Kamarainen, and Lampinen (2003) และด้านวิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical engineering) โดย Storn (1996) อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ควบคุม (Control parameters) และกลยุทธ์การเรียนรู้ (Learning strategies) ที่เหมือนกันของ DE จะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัญหาที่กำลังพิจารณา โดยเฉพาะสำหรับปัญหาที่เจาะจงงานหรือมีข้อจำกัดมาก อาจต้องใช้เวลาทำการทดลองปรับใช้กลยุทธ์ต่าง ๆ และทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก ดังนั้น Qin and Suganthan (2005) จึงคิดค้น SaDE เพื่อแก้ปัญหาโดยทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการให้อัลกอริทึมสามารถเรียนรู้ภาวะของระบบและเลือกใช้กลยุทธ์ที่เหมาะสมกับระบบในขณะนั้น ๆ ได้

3.4.2.3 ตัวอย่างวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัว

(1) SaDE

SaDE เป็นวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัวด้วยกลยุทธ์ ถูกเสนอโดย Qin and Suganthan (2005) ซึ่งวิธีนี้ จะมีสองกลยุทธ์ในการกลายพันธุ์คำตอบ ได้แก่ DE/rand/1 และ DE/current-to-best/1 โดยจะปรับใช้กลยุทธ์ด้วยค่าความน่าจะเป็น ซึ่งได้จากสัดส่วนความสำเร็จที่เกิดขึ้นจากการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ที่ดีใน 50 เจเนอเรชันก่อนหน้า โดยขั้นตอนการปรับตัวนี้ จะสามารถเรียนรู้และปรับใช้กลยุทธ์ที่เหมาะสมกับสถานการณ์ที่แตกต่างกันได้ ส่วนด้านพารามิเตอร์ ปัจจัยการกลายพันธุ์จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3 โดยมีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 2 ด้วยวิธีนี้ จะสามารถค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงคำตอบเดิม (F_i มีค่าน้อย) และสามารถค้นหาคำตอบที่แตกต่างจากคำตอบเดิมได้ (F_i มีค่ามาก) ส่วนความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบปกติที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ CR_m และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1 โดย SaDE จะคงค่า F_i และ CR_i เป็นจำนวน 5 เจเนอเรชัน ก่อนจะสุ่มค่าใหม่จากค่าเฉลี่ยเริ่มต้น CR_m เท่ากับ 0.5 ซึ่งจะถูกรับปรุงค่าตามทิศทางการค้นหาคำตอบในทุก ๆ 25 เจเนอเรชัน

(2) jDE

Brest et al. (2006) ได้นำเสนอวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบใหม่ (A new adaptive DE: jDE) ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก Classical DE กลยุทธ์ DE/rand/1/bin โดย jDE จะกำหนดจำนวนประชากรคงที่ตลอดการดำเนินงานอัลกอริทึม และปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม F_i และ CR_i ตามความน่าจะเป็น τ_1 และ τ_2 ตามลำดับ ในการเริ่มต้นกระบวนการ จะกำหนดค่า F_i เท่ากับ 0.5 มีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0.1 ถึง 1 และ CR_i เท่ากับ 0.9 มีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่ง jDE จะทำการสุ่มค่า F_i และ CR_i ด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform distribution)

ผลการทดลองพบว่า jDE ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า Classical DE กลยุทธ์ DE/rand/1/bin, FEP and CEP (Yao, Liu, & Lin, 1999), the adaptive LEP, Best Levy (Lee & Yao, 2004) และ FADE (Liu & Lampinen, 2005)

(3) JADE

J. Zhang and Sanderson (2009b) ได้นำเสนอ JADE ซึ่งเป็นวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างที่ทำการพัฒนากลยุทธ์ขึ้นมาใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบให้หลากหลายและลู่เข้าอย่างรวดเร็ว โดยได้แก่กลยุทธ์ DE/current-to-pbest/1 และ DE/rand-to-pbest/1 และแบ่งออกเป็นอย่างละ 2 ประเภท คือ มีตัวเลือกการสุ่มภายนอก (Optional external archive: EA) และไม่มี

กลยุทธ์ในการค้นหาคำตอบของ JADE มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ DE/current-to-best/1 แบบปกติ แต่จะสามารถเลือกสุ่มเวกเตอร์ผลต่าง (Difference vector) จาก EA ได้ ทำให้มีทิศทางที่เป็นไปได้ของผลต่างเวกเตอร์หลากหลายมากขึ้น

JADE มีการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมคล้ายคลึงกับ Adaptive DE อื่น ๆ โดย F_i จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบโคชี (Cauchy distribution) ที่ค่าเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1 โดยมีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 และ CR_i จะถูกสุ่มค่าอิสระด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม ที่ค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.9 โดยมีขอบเขตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1

ผลการทดลองพบว่า JADE มีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วกว่า Adaptive DE ทั้งหมด อีกทั้งยังมีการปรับพารามิเตอร์ได้ด้วยตนเอง

บทที่ 4

อัลกอริทึมที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัย

ในบทนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัย ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D), วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE), วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm based on Decomposition: MODE/D) และวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Adaptive MOEA/D hybridised with Differential Evolution: AMOEAD-DE)

การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน มีข้อมูลนำเข้าเพื่อใช้ในการแก้ปัญหา ดังนี้ จำนวนของรถยนต์แต่ละรุ่น สัดส่วนรถยนต์ลำดับความสัมพันธ์ก่อนหลังของชิ้นงาน เวลาดำเนินงานของแต่ละชิ้นงานในแต่ละรุ่นรถยนต์ สีของรถยนต์แต่ละรุ่น สีของรถยนต์ในรอบการผลิตก่อนหน้า รุ่นของรถยนต์ในรอบการผลิตก่อนหน้า และสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลแล้ว โดยตัวอย่างขั้นตอนการดำเนินงานของอัลกอริทึมในบทนี้ จะใช้โจทย์ตัวอย่างจากบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.2.4 (การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์)

ในงานวิจัยนี้ ไม่มีการใช้ประชากรภายนอก (External Population: EP) หรือที่เรียกว่า Non-Elitist แต่จะใช้คำตอบ (Internal Population) จากเจเนอเรชันสุดท้ายแทนคำตอบที่หาได้

4.1 วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) มีหลักแนวคิดในการแก้ปัญหาด้วยการวิวัฒนาการคำตอบที่มีไปพร้อม ๆ กัน โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ซึ่งใช้ระยะห่างระหว่างผลรวมค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก (λ^i) ในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นตัวเลือกสตริงคำตอบที่จะนำมาสุ่มเพื่อพัฒนาคำตอบ การพัฒนาคำตอบในประชากร (Population) แต่ละตัว ใช้การครอสโอเวอร์ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อให้ได้คำตอบรุ่นใหม่ที่มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิมที่เป็นค่าที่ดี ทำให้คำตอบถูกพัฒนาต่อทุก ๆ สตริงคำตอบ (Q. Zhang & Li, 2007)

4.1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D ในการแก้ปัญหา

การทำงานของ MOEA/D จะนำสตริงคำตอบจากทุกเจเนอเรชัน (Generation) มาคัดเลือกหา กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยแต่ละเจเนอเรชันประกอบไปด้วยประชากร (สตริงเริ่มต้น) ตามจำนวนที่กำหนด ซึ่งจะถูกทำการพัฒนาคำตอบจากการสุ่มมาสองสตริงจากสตริงข้างเคียงของสตริงหลัก จากนั้นประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริง หากสตริงที่ถูกพัฒนาให้คำตอบที่ดีกว่าสตริงหลัก จะนำสตริงที่ถูกพัฒนาไปแทนที่สตริงหลักและประเมินสตริงที่ถูกพัฒนาที่ค่าถ่วงน้ำหนักของทุกสตริง หากให้คำตอบที่ดีกว่า ค่าถ่วงน้ำหนักใด ๆ สตริงที่ถูกพัฒนาจะถูกนำไปแทนที่สตริงเดิมที่ค่าถ่วงน้ำหนักนั้น โดยวนสตริงหลักตั้งแต่สตริงที่ 1 จนถึง สตริงสุดท้ายของประชากร เก็บสตริงคำตอบเป็นอันจบเจเนอเรชัน ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D ในการหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ มีดังนี้

การนำเข้าข้อมูล

- N คือ จำนวนประชากรหรือจำนวนปัญหาย่อย (Subproblem) โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$
- G คือ จำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยที่ $g = 1, \dots, G$
- Nb คือ จำนวนสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Number of weight vectors in the neighborhood)
- NR คือ จำนวนการแทนที่สูงที่สุดของสตริงคำตอบรุ่นลูกในแต่ละตัว (Maximum number of solutions replaced by each offspring)
- $B(i)$ คือ เซตสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_k^i โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m)
2. คำนวณระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ทั้งหมด (Euclidean distances) ดังสมการที่ 4-1 และจัดเก็บสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยที่ i ลงในเซต $B(i)$

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (\lambda_k^i - \lambda_k^j)^2} \quad \forall i \in N \quad \forall j \in N \quad (4-1)$$

เมื่อ d_{ij} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าถ่วงน้ำหนัก
สตริงที่ i กับสตริงที่ j โดย $i = 1, 2, \dots, N$ และ $j = 1, 2, \dots, N$

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ความยาวสตริงเท่ากับ
จำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) จากนั้นกำหนด g และ i เท่ากับ 1

4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น จากนั้นให้กำหนดค่าเป้าหมาย
 $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

ขั้นตอนที่ 2 การปรับปรุง

ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$

1. สุ่มเลือกสองสตริงจากสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ซึ่งเป็นสตริงที่มีระยะห่างระหว่าง
จุดของค่าถ่วงน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับสตริงที่ i โดยจำนวนของสตริงข้างเคียงจะถูกกำหนดไว้ตั้งแต่
เริ่มต้น

2. นำสตริงที่ได้จากการสุ่มสองตัวมาสร้างสตริงรุ่นต่อไปโดยใช้ครอสโอเวอร์ (Crossover)
ของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm Operator)

3. ปรับปรุงสตริงรุ่นใหม่ (Offspring) ให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution)

4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นใหม่ และทำการจัดเก็บค่าสูงสุด
(ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบนั้น ๆ จากนั้นให้ประเมินค่า
เป้าหมาย (z_k^*) ถ้า $z_k^* > f_k(y)$ แล้ว $z_k^* = f_k(y)$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

5. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริง $j \in B(i)$, สตริง
คำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมายด้วยค่า ff_k^{\max} และ ff_k^{\min} เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าระหว่าง
วัตถุประสงค์ได้ (จะได้ค่า $f_k^N(x^j)$, $f_k^N(y)$ และ z_k^* โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$)

6. กำหนดค่าจำนวนการแทนที่เท่ากับศูนย์ ($n_r = 0$) จากนั้นทำการประเมินค่าวัตถุประสงค์
ของสตริง $j \in B(i)$ ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 3-2 โดยมีขั้นตอนการประเมินดังนี้

ก. ทำงานการสุ่มลำดับการเข้าประเมินของสตริง $j \in B(i)$ โดยให้สตริง $j = i$ เป็นสตริง
แรกที่ได้รับการประเมินก่อนเสมอ

ข. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่ที่ต้องน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุด ($n_r < NR$)
จึงจะเกิดการประเมินค่าวัตถุประสงค์ต่อในข้อถัดไป หากไม่ตรงเงื่อนไขข้ามไปข้อที่ 7

ค. นำสตริงคำตอบรุ่นใหม่ แทนค่าด้วย λ^j ของสตริง j หากค่า λ^j ทำให้สตริงคำตอบรุ่น
ใหม่ได้ค่า $g^{te}(y|\lambda^j, z^N)$ ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j เดิม ให้

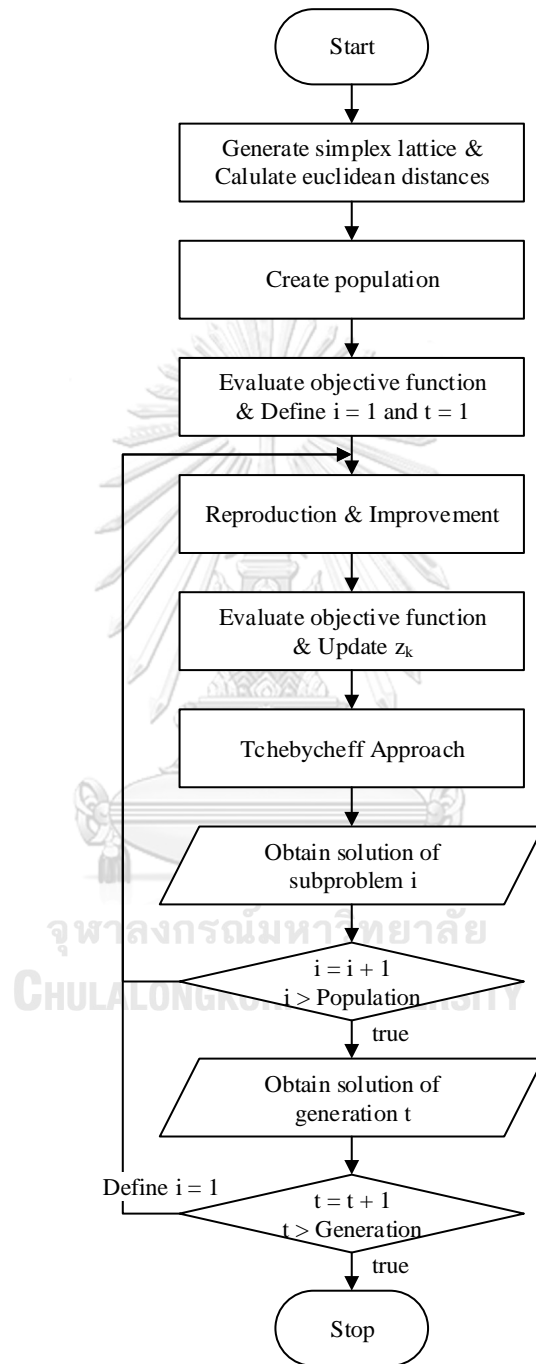
- ทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเดิม (x^j) ในปัญหาย่อยที่ j ด้วยค่าของสตริงคำตอบรุ่นใหม่ (y)
- ง. จบการประเมินค่าวัตถุประสงค์ของสตริง j จากนั้นกลับไปทำการประเมินต่อ ให้กับสตริงลำดับถัดไปในข้อที่ 6(ข) จนครบทุกสตริง $j \in B(i)$
7. จบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i กำหนดให้ $i = i + 1$

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการปรับปรุงคำตอบตามความพึงพอใจหรือตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด หากต้องการปรับปรุงคำตอบให้กำหนด $g = g + 1$ แล้วนำสตริงคำตอบที่ได้ในเจเนอเรชันก่อนหน้า ไปทำการปรับปรุงต่อในขั้นตอนที่ 2 กำหนด $i = 1$



4.1.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D
แสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4-1 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

4.1.3 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ MOEA/D

- 1: Generate N weight vectors $\lambda^i = (\lambda_1^i, \lambda_2^i, \dots, \lambda_m^i)$, $i = 1, \dots, N$
- 2: For $i = 1, \dots, N$, define the set of indexes $B(i) = \{i_1, \dots, i_{Nb}\}$ where $\{\lambda^{i_1}, \dots, \lambda^{i_{Nb}}\}$ are the Nb closest weight vectors to λ^i
(by the Euclidean distance)
- 3: Generate an initial population $P_0 = \{x^1, \dots, x^N\}$, $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_{nc}^i)$
- 4: Evaluate each individual in the initial population P_0 and associate x^i with λ^i
- 5: Initialize $z^* = (z_1^*, \dots, z_m^*)$ by setting $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$, $k = 1, 2, \dots, m$
- 6: Set $g = 1$
- 7: For all $SR_{i,j,g}^s$ and $DSR_{i,j,g}^s$ are set zero
- 8: **repeat**
- 9: **for** each parent vector x^i , $i = 1, \dots, N$ **do**
- 10: Randomly select two vector indexes from the neighborhood $B(i)$
- 11: Generate a new solution y from two random vectors by genetic operators
(repair it if necessary)
- 12: Update z^* , $z_k^* = \min(z_k^*, f_k(y))$
- 13: Set $n_r = 0$
- 14: **for** each subproblem $j \in B(i)$ **do**
- 15: **if** $n_r < NR$ **then**
- 16: **if** $g^{te}(y|\lambda^j, z^*) \leq g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$ **then**
- 17: Replace x^j by y , increment n_r and set $SR_{i,j,g}^s = 1$
- 18: **if** $g^{te}(y|\lambda^j, z^*) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$ **then**
- 19: Set $DSR_{i,j,g}^s = 1$ // true is equal to one
- 20: **end if**
- 21: **end if**
- 22: **end if**
- 23: **end for**
- 24: **end for**
- 25: $g = g + 1$
- 26: **until** $g > G$

4.1.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MOEA/D ในการแก้ปัญหา

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก มีดังนี้

- | | | |
|----------------------------------|----|------------|
| 1. จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) | 12 | สตริงคำตอบ |
| 2. จำนวนสตริงข้างเคียง (Nb) | 4 | สตริงคำตอบ |
| 3. จำนวนการแทนที่สูงสุด (NR) | 1 | สตริงคำตอบ |

4.1.4.1 การสร้างค่าถ่วงน้ำหนักและคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนัก

การสร้างตารางค่าถ่วงน้ำหนักด้วยวิธีการซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ ให้สร้างตารางค่าถ่วงน้ำหนักขนาดเท่ากับ $N \times m$ แสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (6 component and 1 degree with axial points)

Subproblem (i)	Weight of objectives function k (λ_k^i)					
	1	2	3	4	5	6
1	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333
2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000
3	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333
4	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333
6	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333
7	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333
9	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
11	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333
12	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-1 แสดงผลลัพธ์การคำนวณในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ประชากร 12 ตัว

From To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.10	0.71	1.10	0.71	0.71	0.46	0.71	1.10	1.10	0.71	1.10
2	1.10	0	1.10	1.41	1.10	1.10	1.41	0.46	1.41	1.41	1.10	1.41
3	0.71	1.10	0	1.10	0.71	0.71	1.10	0.71	0.46	1.10	0.71	1.10
4	1.10	1.41	1.10	0	1.10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	0.46	1.41
5	0.71	1.10	0.71	1.10	0	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.71	0.46
6	0.71	1.10	0.71	1.10	0.71	0	1.10	0.71	1.10	0.46	0.71	1.10
7	0.46	1.41	1.10	1.41	1.10	1.10	0	1.10	1.41	1.41	1.10	1.41
8	0.71	0.46	0.71	1.10	0.71	0.71	1.10	0	1.10	1.10	0.71	1.10
9	1.10	1.41	0.46	1.41	1.10	1.10	1.41	1.10	0	1.41	1.10	1.41
10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.10	0.46	1.41	1.10	1.41	0	1.10	1.41
11	0.71	1.10	0.71	0.46	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0	1.10
12	1.10	1.41	1.10	1.41	0.46	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	1.10	0

เมื่อได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักแล้ว ให้ทำการกำหนดสตริงข้างเคียง โดยเรียงค่าระยะห่างของค่าถ่วงน้ำหนักจากน้อยไปมากและตัดให้เหลือเท่ากับจำนวนสตริงข้างเคียงที่กำหนดไว้ข้างต้น จะได้สตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย แสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 เซตสตริงข้างเคียงที่ประชากร 12 ตัว และสตริงข้างเคียง 4 ตัว

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

ตารางที่ 4 3 เซตสตริงข้างเคียงที่ประชากร 12 ตัว และสตริงข้างเคียง 4 ตัว (ต่อ)

Subproblem	Neighborhood			
8	8	2	6	5
9	9	3	8	11
10	10	6	11	8
11	11	4	8	6
12	12	5	11	8

4.1.4.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มเลือกแบบอิสระ โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรที่ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด แสดงตัวอย่างสตริงจากการสุ่มดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 สตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	Priority	Sequence
1	1	7 6 4 9 8 2 1 5 3	C C B C C A A B B
2	2	9 5 4 8 1 3 6 7 2	C B B C A B C C A
3	3	3 7 2 4 5 9 8 1 6	B C A B B C C A C
4	4	8 9 6 3 1 2 5 4 7	C C C B A A B B C
5	5	3 7 8 6 2 1 4 9 5	B C C C A A B C B
6	6	9 6 7 3 2 8 5 4 1	C C C B A C B B A
7	7	6 7 2 1 4 5 9 3 8	C C A A B B C B C
8	8	7 6 5 3 4 2 8 9 1	C C B B B A C C A
9	9	5 2 1 6 3 9 8 7 4	B A A C B C C C B
10	10	3 9 2 8 5 6 1 7 4	B C A C B C A C B
11	11	9 3 5 6 8 1 2 7 4	C B B C C A A C B
12	12	6 9 1 5 2 8 3 4 7	C C A B A C B B C

4.1.4.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทที่ 2 แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	1	7	4.6667	4.0000	19	4.9810	25.4815
2	2	8	3.6667	4.0000	17	3.5183	13.7037
3	3	7	4.6667	6.3333	17	3.5849	17.0370
4	4	7	5.0000	5.6667	18	4.8548	19.0370
5	5	6	5.0000	5.3333	18	3.7714	13.2593
6	6	6	4.3333	3.6667	19	5.1484	21.7037
7	7	6	4.6667	5.6667	19	4.3992	17.9259
8	8	7	4.6667	5.6667	19	4.3627	19.4815
9	9	8	5.3333	5.6667	17	4.6714	14.3704
10	10	7	4.0000	4.3333	19	2.7048	5.4815
11	11	8	4.0000	4.3333	18	3.5159	11.4815
12	12	7	4.3333	5.0000	19	4.0103	14.3704

4.1.4.4 การพัฒนาคำตอบ

การพัฒนาคำตอบจะพัฒนาไปที่ละปัญหาย่อย (Subproblem) โดยแต่ละปัญหาย่อยที่ i ประกอบไปด้วยสตริงที่ i และเซตของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อยที่ i หรือ $B(i)$ ดังนั้นแต่ละเจเนอเรชันจะเกิดกระบวนการพัฒนาคำตอบเท่ากับจำนวนประชากร (จำนวนปัญหาย่อย) โดยผู้วิจัยจะแสดงตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 ดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มเลือกสองสตริงจาก $B(1)$ ซึ่งประกอบไปด้วยสตริงที่ 1 7 3 และ 5 จะได้สตริงรุ่นพ่อแม่มาเพื่อทำการพัฒนา โดยตัวอย่างนี้สุ่มได้สตริงที่ 1 และ 5

2. การครอสโอเวอร์เป็นการนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงซึ่งกันและกัน เพื่อให้เกิดสตริงรุ่นใหม่หรือสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบพาเซิลแมพครอสโอเวอร์ 1 ตำแหน่ง (One-Point Partially-mapped crossover: PMX) แบบสร้างคำตอบทั้งหมด ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

- ก. ทำการสุมค่าจำนวนเต็ม R^1 ในช่วง 1 ถึง $nc-1$ เพื่อระบุขอบเขตการแลกเปลี่ยน โดยตัวอย่างนี้สุมได้ตำแหน่งที่ 5 (เครื่องหมาย “|” คือขอบเขตการแลกเปลี่ยน)

สตริงคำตอบบรุ่มพ่อแม่

$$\text{สตริงที่ 1} \quad [7 \ 6 \ 4 \ 9 \ 8 \mid 2 \ 1 \ 5 \ 3]$$

$$\text{สตริงที่ 5} \quad [3 \ 7 \ 8 \ 6 \ 2 \mid 1 \ 4 \ 9 \ 5]$$

สตริงคำตอบบรุ่มลูก (หมายเหตุ: สตริงที่ a.b คือ สตริงบรุ่มลูกที่ b ในเจเนอเรชันที่ a)

$$\text{สตริงที่ 1.1} \quad [7 \ 6 \ 4 \ 9 \ 8 \mid 1 \ 4 \ 9 \ 5]$$

$$\text{สตริงที่ 1.2} \quad [3 \ 7 \ 8 \ 6 \ 2 \mid 2 \ 1 \ 5 \ 3]$$

- ข. หากสตริงบรุ่มลูกเป็นคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ให้ทำการสุมค่า R^2 ระหว่าง 0 และ 1 เพื่อกำหนดส่วนของสตริงที่ไม่เปลี่ยนแปลง หาก R^2 เท่ากับ 0 สตริงส่วนแรกหรือฝั่งซ้ายจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่หากเท่ากับ 1 สตริงส่วนหลังหรือฝั่งขวาจะไม่เปลี่ยนแปลง โดยตัวอย่างนี้สุมได้ R^2 เท่ากับ 0
- ค. เมื่อได้ส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว ให้ทำการตรวจสอบหาตำแหน่งในส่วนที่เปลี่ยนแปลงที่มีเลขซ้ำกับส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลง

สตริงคำตอบบรุ่มลูก (ก่อนปรับปรุง)

$$\text{สตริงที่ 1.1} \quad [7 \ 6 \ 4 \ 9 \ 8 \mid 1 \ 4 \ 9 \ 5]$$

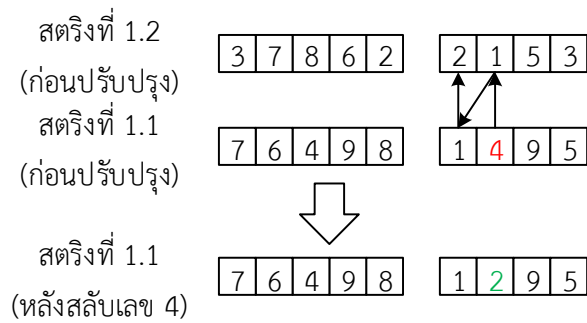
$$\text{สตริงที่ 1.2} \quad [3 \ 7 \ 8 \ 6 \ 2 \mid 2 \ 1 \ 5 \ 3]$$

สตริงคำตอบบรุ่มลูก (ตรวจสอบตัวซ้ำในแต่ละสตริง)

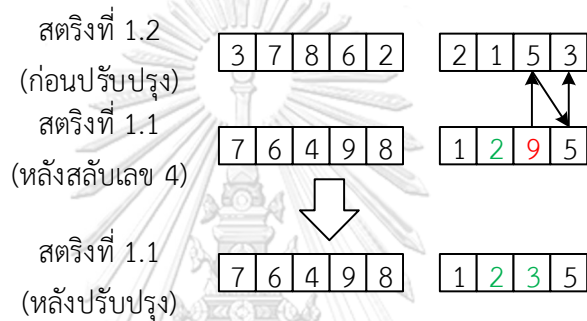
$$\text{สตริงที่ 1.1} \quad [7 \ 6 \ 4 \ 9 \ 8 \mid 1 \ 4 \ 9 \ 5]$$

$$\text{สตริงที่ 1.2} \quad [3 \ 7 \ 8 \ 6 \ 2 \mid 2 \ 1 \ 5 \ 3]$$

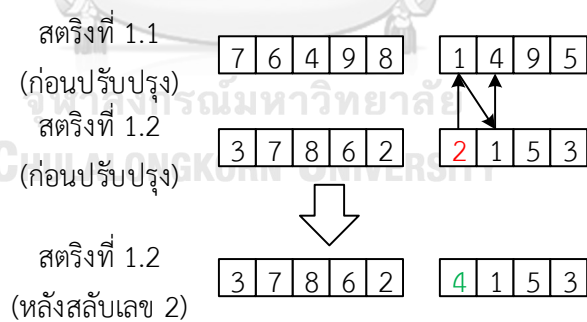
- ง. ทำการปรับปรุงเลขตัวที่มีการซ้ำในสตริงที่ละตัวกับคู่สตริงด้วยการสลับ (ก่อนปรับปรุง) ณ ตำแหน่งเดียวกัน หากปรับปรุงแล้วยังมีเลขซ้ำในสตริงให้สลับเลขกับคู่สตริง ณ ตำแหน่งของเลขที่ซ้ำในสตริงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไม่มีเลขซ้ำกัน แสดงขั้นตอนการปรับปรุงและสตริงคำตอบบรุ่มลูก ดังภาพที่ 4-2 ถึง 4-5 และตารางที่ 4-6 ตามลำดับ



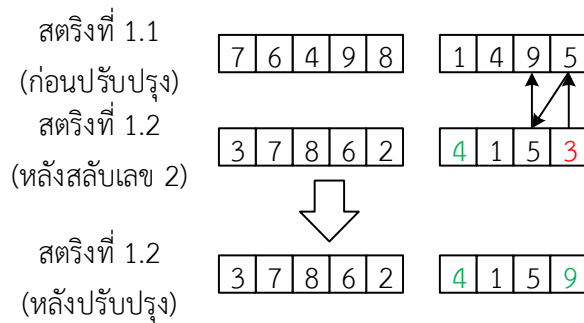
ภาพที่ 4-2 ปรับปรุงสตริงที่ 1.1 (เลข 4)



ภาพที่ 4-3 ปรับปรุงสตริงที่ 1.1 (เลข 9)



ภาพที่ 4-4 ปรับปรุงสตริงที่ 1.2 (เลข 2)



ภาพที่ 4-5 ปรับปรุงสตริงที่ 1.2 (เลข 3)

ตารางที่ 4-6 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Offspring	Priority	Sequence
1.1	7 6 4 9 8 1 2 3 5	C C B C C A A B B
1.2	3 7 8 6 2 4 1 5 9	B C C C A B A B C

3. ทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Offspring	$f_1(y)$	$f_2(y)$	$f_3(y)$	$f_4(y)$	$f_5(y)$	$f_6(y)$
1.1	7	4.6667	4.0000	19	4.9810	25.4815
1.2	6	5.3333	6.3333	18	3.5214	9.0370

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรุ่นลูกแล้ว ให้ทำการจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละวัตถุประสงค์ในรอบนั้น ๆ (หาค่าใหม่ทุก ๆ รอบที่เริ่มปัญหาย่อยถัดไปให้หาค่าสูงสุดและต่ำสุดของรอบนั้น ๆ ไม่มีจัดเก็บค่าเก่าของรอบก่อนหน้า) แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 4-8 (ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้บวกค่าคงที่เท่ากับ 0.0005 ให้กับค่า ff_k^{\max} เพื่อป้องกันกรณีส่วนหารเท่ากับ 0)

ตารางที่ 4-8 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

max/min	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
ff_k^{\max}	8.0005	5.3338	6.3338	19.0005	5.1489	25.4820
ff_k^{\min}	6	3.6667	3.6667	17	2.7048	5.4815

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว ให้นำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (z_k^*) หาก $z_k^* > f_k(y)$ จะกำหนดให้ z_k^* เท่ากับ $f_k(y)$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$ แสดงดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ค่าเป้าหมายของแต่ละวัตถุประสงค์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Target	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
z_k^*	6	3.6667	3.6667	17	2.7048	5.4815

4. ทำการนอร์มัลไล (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อยที่ i ($j \in B(i)$), สตริงคำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมายด้วยค่า ff_k^{max} และ ff_k^{min} แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-10 (ค่าเป้าหมายที่ผ่านการนอร์มัลไลหรือ z_k^N สามารถติดลบได้ หากในรอบนั้นค่าต่ำสุดมีค่ามากกว่าค่า z_k^*)

ตารางที่ 4-10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 หลังทำการนอร์มัลไล

$j \in B(1)$	String	f_1^N	f_2^N	f_3^N	f_4^N	f_5^N	f_6^N
1	1	0.4999	0.5998	0.1250	0.9998	0.9313	1.0000
3	3	0.4999	0.5998	0.9998	0	0.3601	0.5778
5	5	0	0.7998	0.6249	0.4999	0.4364	0.3889
7	7	0	0.5998	0.7499	0.9998	0.6933	0.6222
-	1.1	0.4999	0.5998	0.1250	0.9998	0.9313	1.0000
-	1.2	0	0.9997	0.9998	0.4999	0.3341	0.1778
-	z_k^N	0	0	0	0	0	0

5. เปรียบเทียบสตริงคำตอบรุ่นลูกด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ โดยใช้เวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ของปัญหาย่อยที่ i (ตัวอย่างการคำนวณนี้เป็นปัญหาย่อยที่ 1 ดังนั้น $i = 1$) สามารถคำนวณเทบปีเซฟฟ์ได้จากสมการที่ 3-2 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 ค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

Offspring	$\{\lambda_k^1 f_k^N(y) - z_k^N \}$						$g^{te}(y \lambda^1, z^N)$
1.1	0.0417	0.3499	0.0104	0.0833	0.0776	0.0833	0.3499
1.2	0	0.5832	0.0833	0.0417	0.0278	0.0148	0.5832

จากตารางที่ 4-11 จะพบว่าสตริงที่ 1.1 ให้ค่า $g^{te}(y|\lambda^1, z^N)$ ที่ต่ำที่สุดในสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ เจเนอเรชัน 1 จึงเลือกสตริงที่ 1.1 มาดำเนินการต่อและตัดสตริงที่ 1.2 ออก

4.1.4.5 การหาค่าที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้ บางวัตถุประสงค์มีค่าเป็นจำนวนเต็มจึงทำให้เกิดสตริงคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ นั้น ๆ เท่ากันเป็นจำนวนมาก แต่ค่าวัตถุประสงค์อื่น ๆ มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้วิธีการเทบปีเซฟฟ์ แบบปกติทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงนำวิธีการเทบปีเซฟฟ์มาทำการประยุกต์ เรียกว่า วิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับความสำคัญ โดยให้ค่าที่มากมีความสำคัญมากถูกนำมาเปรียบเทียบ ก่อน แสดงตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.1.2

การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละค่าถ่วงน้ำหนัก โดยจะประเมินเฉพาะสตริง j ที่อยู่ใน $B(i)$ หรือสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ i เท่านั้น การประเมินจะเข้าไปที่ละสตริง (สุ่มลำดับการประเมินโดยให้สตริงที่ $j = i$ เป็นสตริงแรกที่ได้ประเมินก่อนเสมอ) แสดงขั้นตอนการหาค่าตอบที่ดีที่สุด ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่ของสตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยปัจจุบัน ต้องมีค่าน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุด ($n_r < NR$) หากไม่ตรงเงื่อนไขจะจบการประเมินในปัญหาย่อยปัจจุบันทันที
2. ให้ทำการคำนวณค่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j และคำนวณค่า $g^{te}(y|\lambda^j, z^N)$ ของสตริงรุ่นลูกที่ค่าถ่วงน้ำหนักเดียวกับสตริง j
3. ทำการเปรียบเทียบค่ามากที่สุดของ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(y|\lambda^j, z^N)$ หากค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมน้อยกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงรุ่นลูก ($g^{te}(y|\lambda^j, z^N) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$) จะกำหนดให้ลำดับ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และค่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j เท่ากับของสตริงรุ่นลูก แต่หาก $g^{te}(y|\lambda^j, z^N) = g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ จะต้องทำการเปรียบเทียบค่ามากที่สุดที่รองลงมาของ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(y|\lambda^j, z^N)$ ไปทีละคู่ แสดงตัวอย่างการหาค่าตอบที่ดีที่สุดเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 (เรียงค่าเทบปีเซฟฟ์จากมากไปน้อย) ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 การหาคำตอบที่ดีที่สุดในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

$j \in B(1)$	R_j	Conditions	$g^{te}(x^j \lambda^j, z^N)$		$g^{te}(y \lambda^j, z^N)$		SR(DSR)
1	0.4426	pass	0.3499	0.0833	0.3499	0.0833	False
			0.0833	0.0776	0.0833	0.0776	(False)
			0.0417	0.0104	0.0417	0.0104	
3	0.4854	pass	0.0833	0.0500	0.5832	0.0833	False
			0.0481	0.0417	0.0776	0.0500	(False)
			0.0300	0	0.0417	0.0104	
7	0.8003	pass	0.5998	0	0.5998	0	True
			0	0	0	0	(False)
			0	0	0	0	
5	0.1419	fail	0.0666	0.0521	0.2916	0.0833	False
			0.0417	0.0364	0.0833	0.0776	(False)
			0.0324	0	0.0500	0.0104	

หมายเหตุ: SR คือ การแทนที่ของคำตอบ (Solution Replacement) และ DSR คือ การแทนที่ของคำตอบที่ครอบงำ (Dominated Solution Replacement)

จากตารางที่ 4-12 ซึ่งเป็นการหาคำตอบที่ดีที่สุดที่เจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 จะเห็นว่า สตรีงคำตอบที่ 1 ผ่านเงื่อนไขการเข้าประเมินเนื่องจากเป็นสตรีงแรกที่ทำกรประเมินจึงยังไม่เกิดการแทนที่ของคำตอบใด ๆ ($n_r = 0$) โดยในปัญหาย่อยนี้ มีสตรีงคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการเข้าประเมินคือ 1 3 และ 7 ส่วนสตรีงคำตอบที่ 5 ไม่เกิดการประเมิน เนื่องจากไม่ผ่านเงื่อนไข

จากการเปรียบเทียบค่า $g^{te}(y|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตรีงคำตอบที่ 1 3 และ 7 พบว่าค่า $g^{te}(y|\lambda^3, z^N)$ ไม่ดีกว่า $g^{te}(x^3|\lambda^3, z^N)$ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคำตอบของสตรีงที่ 3 และในส่วนสตรีงที่ 1 และ 7 จะเห็นว่าค่า $g^{te}(y|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตรีงคำตอบที่ 1 และ 7 เมื่อประเมินแบบไล่ระดับจากมากไปน้อยแล้ว ทุกค่ามีค่าเท่ากัน จึงทำการสุ่มค่า R_j ระหว่าง 0 ถึง 1 หากสุ่มได้ค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในตัวอย่างนี้จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสตรีงที่ 7

แสดงชุดสตรีงคำตอบหลักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการพัฒนาคำตอบในทุก ๆ ปัญหาย่อย ณ เจเนอเรชันที่ 1 แล้ว ดังตารางที่ 4-13 และ 4-14

ตารางที่ 4-13 สตริงคำตอบหลักหลังจบเงื่อนไขที่ 1

Subproblem	String	Priority	Sequence
1	1	7 6 4 9 8 2 1 5 3	C C B C C A A B B
2	2	9 5 4 8 1 3 6 7 2	C B B C A B C C A
3	1.5	5 2 1 6 3 9 8 7 4	B A A C B C C C B
4	1.7	7 2 1 6 3 9 8 5 4	C A A C B C C B B
5	5	3 7 8 6 2 1 4 9 5	B C C C A A B C B
6	1.12	3 9 1 6 5 2 8 7 4	B C A C B A C C B
7	1.1	7 6 4 9 8 1 2 3 5	C C B C C A A B B
8	1.15	7 2 5 3 4 6 8 9 1	C A B B B C C C A
9	9	5 2 1 6 3 9 8 7 4	B A A C B C C C B
10	10	3 9 2 8 5 6 1 7 4	B C A C B C A C B
11	1.7	7 2 1 6 3 9 8 5 4	C A A C B C C B B
12	12	6 9 1 5 2 8 3 4 7	C C A B A C B B C

ตารางที่ 4-14 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลักหลังจบเงื่อนไขที่ 1

Subproblem	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	1	7	4.6667	4.0000	19	4.9810	25.4815
2	2	8	3.6667	4.0000	17	3.5183	13.7037
3	1.5	6	5.3333	5.6667	17	4.6714	14.3704
4	1.7	8	3.6667	3.3333	21	4.2476	20.8148
5	5	6	5.0000	5.3333	18	3.7714	13.2593
6	1.12	9	4.3333	5.3333	17	3.4881	10.5926
7	1.1	7	4.6667	4.0000	19	4.9810	25.4815
8	1.15	8	4.0000	4.3333	18	3.3159	10.3704
9	9	8	5.3333	5.6667	17	4.6714	14.3704
10	10	7	4.0000	4.3333	19	2.7048	5.4815
11	1.7	8	3.6667	3.3333	21	4.2476	20.8148
12	12	7	4.3333	5.0000	19	4.0103	14.3704

4.1.4.6 การประเมินจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา

จำนวนคำตอบที่เกิดการแทนที่ (The Number of Solution Replacement: NSR) และจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา (The Number of Dominate Solution Replacement: NDSR) เป็นตัวชี้วัดการพัฒนาคำตอบในแต่ละเจเนอเรชัน หากมีค่าเข้าใกล้จำนวนประชากร แสดงว่าคำตอบมีการพัฒนาในทุก ๆ ปัญหาย่อย แต่หากมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่เกิดการพัฒนาคำตอบเลยในเจเนอเรชันนั้น ๆ

โดยกำหนดให้ “True” มีค่าเท่ากับ 1 และ “False” มีค่าเท่ากับ 0 ที่ $g = 1, 2, \dots, G$, $i = 1, 2, \dots, N$ และ $j = 1, 2, \dots, N$ แสดงจำนวนคำตอบที่เกิดการแทนที่และเกิดการพัฒนาในแต่ละเจเนอเรชัน ดังสมการที่ 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ

$$NSR_g = \sum_{j=1}^N \min \left(1, \sum_{i=1}^N SR_{i,j,g} \right) \quad \forall g \in G \quad (4-2)$$

$$NDSR_g = \sum_{j=1}^N \min \left(1, \sum_{i=1}^N DSR_{i,j,g} \right) \quad \forall g \in G \quad (4-3)$$

4.1.4.7 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม

ในแต่ละเจเนอเรชันจะประกอบไปด้วยปัญหาย่อยจำนวนเท่ากับจำนวนประชากร เมื่อจบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i แล้ว จะกลับไปพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ $i + 1$ โดยใช้ชุดสตริงหลักที่พัฒนาแล้ว ด้วยวิธีในหัวข้อที่ 4.1.4.4 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบทุกปัญหาย่อย จึงจะเริ่มเจเนอเรชันถัดไปด้วยชุดสตริงหลักที่พัฒนาแล้ว โดยจะเริ่มต้นที่ปัญหาย่อยที่ 1 ในหัวข้อที่ 4.1.4.4 เช่นกัน ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด

การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึมจะใช้จำนวนเจเนอเรชัน, NSR หรือ NDSR เป็นตัวกำหนดเมื่ออัลกอริทึมดำเนินงานครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนดหรือ NDSR เท่ากับ 0 ติดต่อกันหลายเจเนอเรชัน จะให้อัลกอริทึมหยุดการดำเนินงาน

4.2 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์

วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (MODE) เป็นเครื่องมือแก้ปัญหาโดยใช้พื้นฐานของประชากร (Population-based Optimizer) มีหลักแนวคิดในการแก้ปัญหาเหมือนกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยทั่วไปด้วยการใช้ประชากรในเจเนอเรชันปัจจุบันในการพัฒนาคำตอบ ซึ่งกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) จะใช้เลขจำนวนจริงในการพัฒนาคำตอบหรือกำหนดทิศทางของเวกเตอร์ โดยเรียกส่วนประกอบของเวกเตอร์ว่า จุดพิกัด และจำนวนพิกัดในแต่ละเวกเตอร์ว่า ขนาดของเวกเตอร์ (Alatas, Akin, & Karci, 2008)

ในงานวิจัยนี้ MODE ใช้การวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical DE) ด้วยกลยุทธ์ “DE/rand/1/bin” ในการพัฒนาคำตอบ

4.2.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE ในการแก้ปัญหา

การทำงานของ MODE เริ่มต้นด้วยการสุ่มเวกเตอร์เป้าหมาย (Target vector) ชุดแรกเท่ากับจำนวนประชากร (N) เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจุดเริ่มต้นของเวกเตอร์ จากนั้นสุ่มเลือกเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจุดพิกัดของเวกเตอร์ด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่มสองเวกเตอร์ โดยมีหลายทางเลือกในการกลายพันธุ์เช่น DE/rand/1, DE/best/1, DE/rand-to-best/1, DE/best/2 และ DE/rand/2 จะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ (Mutant vector) เมื่อทำการกลายพันธุ์จนครบจำนวนประชากรแล้ว จะทำการแลกเปลี่ยนค่าพิกัด (Recombination) ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมายและเวกเตอร์กลายพันธุ์ด้วยอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover Rate: CR) เวกเตอร์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนค่าพิกัดแล้ว จะถูกเรียกว่าเวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) หลังจบกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) แล้ว ให้นำเวกเตอร์ทดลองไปคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย โดยใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในการคัดเลือก N คำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นเวกเตอร์เป้าหมายของเจเนอเรชันถัดไป ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE ในการหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ มีดังนี้

การนำเข้าข้อมูล

- N คือ จำนวนประชากร (Population) โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$
- G คือ จำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยที่ $g = 1, \dots, G$
- F คือ ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (Scaling factor)
- CR คือ อัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate)

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น (สตริงเป้าหมาย) ตามจำนวนประชากรโดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc)
2. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงเป้าหมาย
3. เข้ารหัส (Encode) สตริงเป้าหมาย โดยกำหนดให้ค่า x_j^i ของลำดับการผลิตที่ 1 สตริง i มีค่าน้อยที่สุดและลำดับสุดท้ายมีค่ามากที่สุด ตัวอย่างเช่น ลำดับการผลิต 4-3-1-2-5 จะได้ว่า $x_1^i = 0.5$, $x_2^i = 0.75$, $x_3^i = 0.25$, $x_4^i = 0$ และ $x_5^i = 1$ (ผู้วิจัยกำหนดค่าเริ่มต้นในช่วง 0 ถึง 1)

ขั้นตอนที่ 2 การปรับปรุง

1. สุ่มค่า r_1 , r_2 และ r_3 โดยทั้งสามมีค่าอยู่ในช่วงเท่ากับ 1 ถึง N และ $r_1 \neq r_2 \neq r_3$
2. ทำการพัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย) ด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution: DE/rand/1) ดังสมการที่ 3-3
3. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย (x^i) และเวกเตอร์กลายพันธุ์ (v^i) ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover) โดยมีโอกาสเกิดการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่ j บนสตริง i เท่ากับค่าอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate: CR) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง nc ทั้งหมด N ตัว นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่เวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u^i) แสดงเป็นรูปแบบสูตรดังสมการที่ 4-4

$$u_j^i = \begin{cases} v_j^i, & \text{if } rand_{i,j} \leq CR \text{ or } j = rand_i \\ x_j^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad \forall j \in nc \quad (4-4)$$

เมื่อ u_j^i คือ จุดพิกัดของเวกเตอร์ทดลองหรือค่าเข้ารหัสสตริงทดลองตำแหน่งไพรอริตี (Priority) ที่ j บนสตริง i

4. ถอดรหัส (Decode) เวกเตอร์ทดลอง โดยเรียงค่า u_j^i บนสตริง i จากน้อยไปมาก จะได้สตริงทดลองออกมาทั้งหมด N สตริง
5. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงทดลอง
6. ประเมินค่าวัตถุประสงค์ของทุกสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Non-dominating Sorting) โดยการคัดเลือก N สตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากเซต $P_g \cup Q_g$ เพื่อเป็นสตริงคำตอบปัจจุบัน

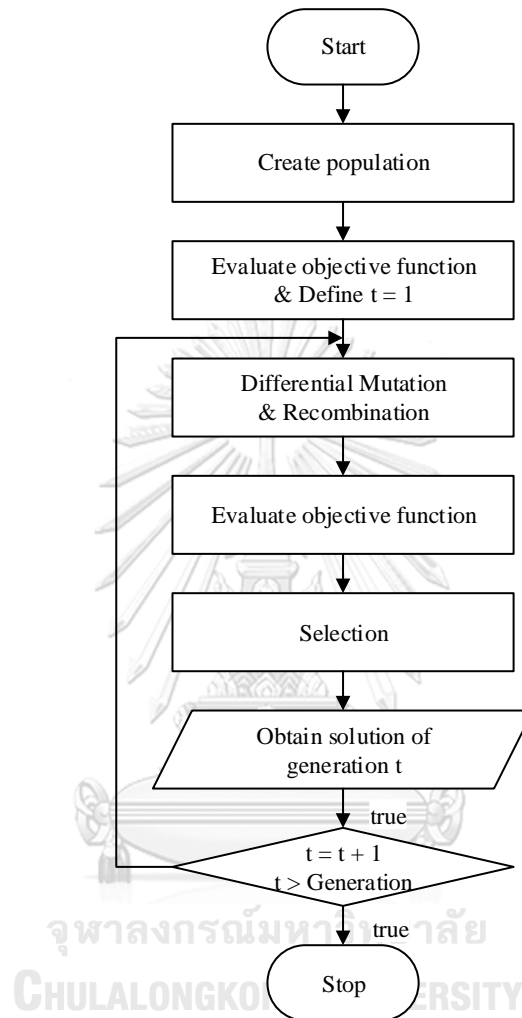
ของเซต P_{g+1} (P_g คือเซตของประชากรหรือกลุ่มสตริงคำตอบในปัจจุบันมีขนาดเท่ากับ N ที่เจเนอเรชัน g และ Q_g คือกลุ่มสตริงคำตอบรุ่นใหม่ซึ่งได้จากการกลายพันธุ์ของสตริงคำตอบในเซต P_g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-1

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการปรับปรุงคำตอบตามความพึงพอใจหรือตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด หากต้องการปรับปรุงคำตอบให้กำหนด $g = g + 1$ แล้วนำสตริงคำตอบที่ได้ในเจเนอเรชันก่อนหน้าไปทำการปรับปรุงต่อในขั้นตอนที่ 2



4.2.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE
แสดงดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4-6 ขั้นตอนการทำงานของ MODE

4.2.3 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ MODE

- 1: Generate an initial population $P_1 = \{x^1, \dots, x^N\}$, $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_{nc}^i)$
- 2: Evaluate each individual in the initial population P_1
- 3: Set $g = 1$
- 4: **repeat**
- 5: **for** $i = 1, \dots, N$ **do**
- 6: Randomly select vector indexes from P_g
- 7: Generate a new solution u^i by DE operator (repair it if necessary)
- 8: **end for**
- 9: Choose N best solutions from $P_g \cup Q_g$ to form P_{g+1} , $Q_g = \{u^1, \dots, u^N\}$,
 $u^i = (u_1^i, u_2^i, \dots, u_{nc}^i)$
- 10: $g = g + 1$
- 11: **until** $g > G$



4.2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MODE ในการแก้ปัญหา

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ มีดังนี้

- | | | |
|-----------------------------------|-----|------------|
| 1. จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) | 12 | สตริงคำตอบ |
| 2. ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (F) | 2.0 | |
| 3. อัตราการครอสโอเวอร์ (CR) | 0.7 | |

4.2.4.1 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ จะใช้วิธีการสุ่มค่าพิคัดในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากร (N) ที่ความยาวเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) แสดงตัวอย่างค่าพิคัดจากการสุ่มดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 ค่าพิคัดของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.228	0.526	0.983	0.388	0.866	0.061	0.954	0.271	0.449
2	0.711	0.121	0.919	0.347	0.367	0.653	0.220	0.830	0.912
3	0.342	0.793	0.379	0.523	0.047	0.083	0.416	0.723	0.879
4	0.119	0.246	0.684	0.931	0.139	0.814	0.633	0.374	0.207
5	0.703	0.031	0.743	0.175	0.970	0.161	0.442	0.027	0.555
6	0.173	0.706	0.761	0.960	0.758	0.776	0.274	0.827	0.864
7	0.944	0.588	0.670	0.753	0.156	0.135	0.458	0.549	0.973
8	0.835	0.214	0.269	0.484	0.337	0.806	0.400	0.366	0.388
9	0.893	0.729	0.518	0.078	0.105	0.792	0.754	0.006	0.837
10	0.920	0.850	0.843	0.669	0.349	0.468	0.202	0.979	0.500
11	0.546	0.570	0.946	0.816	0.096	0.630	0.109	0.158	0.742
12	0.001	0.797	0.578	0.513	0.643	0.374	0.263	0.982	0.099

เมื่อได้ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว ทำการถอดรหัส (Decoding) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ (Priority) โดยเรียงค่าพิกัดจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 4-16

ตารางที่ 4-16 สตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority	Sequence
1	6 1 8 4 9 2 5 7 3	C A C B C A B C B
2	2 7 4 5 6 1 8 9 3	A C B B C A C C B
3	5 6 1 3 7 4 8 2 9	B C A B C B C A C
4	1 5 9 2 8 7 3 6 4	A B C A C C B C B
5	8 2 6 4 7 9 1 3 5	C A C B C C A B B
6	1 7 2 5 3 6 8 9 4	A C A B B C C C B
7	6 5 7 8 2 3 4 1 9	C B C C A B B A C
8	2 3 5 8 9 7 4 6 1	A B B C C C B C A
9	8 4 5 3 2 7 6 9 1	C B B B A C C C A
10	7 5 6 9 4 3 2 1 8	C B C C B B A A C
11	5 7 8 1 2 6 9 4 3	B C C A A C C B B
12	1 9 7 6 4 3 5 2 8	A C C C B B B A C

4.2.4.2 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทที่ 2 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	8	3.6667	3.3333	20	3.5492	13.9259
2	7	4.0000	4.3333	19	3.4825	8.3704
3	7	4.3333	5.3333	18	3.1849	10.5926
4	8	4.3333	4.0000	19	4.2048	12.8148
5	7	4.0000	3.3333	20	3.9143	21.0370
6	8	4.6667	5.0000	19	4.6714	15.4815
7	7	4.6667	5.6667	17	3.3627	9.2593
8	7	4.6667	5.0000	17	4.3516	12.8148

ตารางที่ 4 17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
9	6	4.6667	5.6667	19	4.3071	27.7037
10	6	4.6667	5.6667	16	3.8294	14.1481
11	7	4.6667	5.0000	18	3.6254	17.0370
12	8	5.3333	7.0000	19	4.3071	17.7037

4.2.4.3 การพัฒนาคำตอบ

การพัฒนาคำตอบของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ จะใช้ผลต่างของค่าฟังก์ชันระหว่างสตริงคำตอบที่ค่าความสำคัญเดียวกันในการหาทิศทางของคำตอบที่ดี โดยผู้วิจัยจะแสดงตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม r_1 , r_2 และ r_3 ในช่วงระหว่าง 1 ถึงจำนวนประชากร ($[1, N]$) ให้สตริงหลักหรือที่เรียกว่าสตริงเป้าหมาย (ในเจเนอเรชันที่ 1 สตริงเป้าหมาย คือสตริงคำตอบเริ่มต้น) โดยที่ $r_1 \neq r_2 \neq r_3$ แสดงตัวอย่างค่าสุ่มดังตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4-18 ค่าสุ่ม r_1 , r_2 และ r_3 ของแต่ละสตริงเป้าหมายในเจเนอเรชันที่ 1

Target String	r_1	r_2	r_3
1	2	3	11
2	5	11	7
3	2	6	5
4	9	8	7
5	1	3	8
6	4	5	6
7	3	2	7
8	6	11	7
9	2	12	8
10	2	3	4
11	8	7	5
12	12	9	10

2. ทำการพัฒนาค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสเป้าหมายด้วยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution) จะได้ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสกลายพันธุ์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-3 แสดงตัวอย่างการคำนวณและผลลัพธ์ฟังก์ชันค่าฟิตเนสกลายพันธุ์ดังตารางที่ 4-19

$$\begin{aligned}v_1^1 &= x_1^2 + F(x_1^3 - x_1^{11}) = 0.711 + 2(0.342 - 0.546) = 0.303 \\v_2^1 &= x_2^2 + F(x_2^3 - x_2^{11}) = 0.121 + 2(0.793 - 0.570) = 0.568 \\v_1^6 &= x_1^4 + F(x_1^5 - x_1^6) = 0.119 + 2(0.703 - 0.173) = 1.180 \\v_2^6 &= x_2^4 + F(x_2^5 - x_2^6) = 0.246 + 2(0.031 - 0.706) = -1.104\end{aligned}$$

ตารางที่ 4-19 ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสกลายพันธุ์ในเจเนอเรชันที่ 1

Mutant String	Priority								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.303	0.568	-0.216	-0.241	0.267	-0.441	0.834	1.959	1.185
2	-0.092	-0.006	1.295	0.301	0.850	1.151	-0.256	-0.755	0.093
3	-0.350	1.471	0.956	1.917	-0.056	1.885	-0.117	2.430	1.529
4	0.675	-0.019	-0.285	-0.461	0.467	2.135	0.637	-0.360	-0.333
5	-0.758	1.684	1.203	0.465	0.285	-1.387	0.987	0.985	1.430
6	1.180	-1.104	0.647	-0.639	0.562	-0.417	0.969	-1.226	-0.411
7	-0.124	-0.141	0.878	-0.291	0.468	1.119	-0.061	1.285	0.757
8	-0.622	0.669	1.314	1.086	0.638	1.766	-0.424	0.045	0.402
9	-0.957	1.287	1.538	0.405	0.978	-0.211	-0.054	2.062	0.334
10	1.157	1.215	0.309	-0.471	0.183	-0.810	-0.214	1.527	2.256
11	1.316	1.328	0.123	1.640	-1.289	0.755	0.431	1.411	1.225
12	-0.052	0.555	-0.073	-0.668	0.155	1.023	1.366	-0.965	0.773

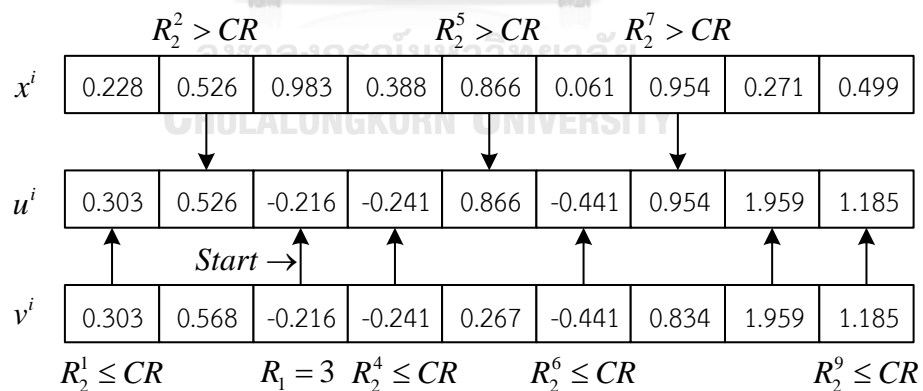
3. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสเป้าหมายและค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสกลายพันธุ์ จะได้ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้วิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover) ซึ่งมีวิธีดังต่อไปนี้

- ก. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม R_1 ในช่วง 1 ถึง nc เพื่อระบุตำแหน่งแรกของการแลกเปลี่ยน โดยตัวอย่างนี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 5
- ข. ทำการสุ่มค่า R_2^j ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ $j = 1, 2, \dots, nc$ ถ้า $R_2^j \leq CR$ แล้ว จะแทนที่ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสเป้าหมาย (x^j) ด้วยค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสกลายพันธุ์ (v^j) โดยที่

$i = 1, 2, \dots, N$ แสดงค่าสุมและตัวอย่างการแลกเปลี่ยนค่าพิกัดของสตริงที่ 1 ดังตารางที่ 4-20 และภาพที่ 4-7 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-20 ค่าสุมของการครอสโอเวอร์ในเจเนอเรชันที่ 1

String	R_2^1	R_2^2	R_2^3	R_2^4	R_2^5	R_2^6	R_2^7	R_2^8	R_2^9	R_1
1	0.06	0.91	0.90	0.19	0.86	0.02	0.96	0.43	0.03	3
2	0.41	0.78	0.07	0.59	0.50	0.58	0.69	0.26	0.15	4
3	0.57	0.37	0.24	0.66	0.87	0.91	0.54	0.64	0.02	7
4	0.05	0.58	0.28	0.96	0.76	0.49	0.50	0.71	0.97	8
5	0.89	0.90	0.48	0.46	0.79	0.61	0.72	0.42	0.42	7
6	0.38	0.01	0.62	0.80	0.79	0.72	0.52	0.12	0.28	4
7	0.53	0.02	0.33	0.37	0.57	0.50	0.49	0.24	0.46	6
8	0.18	0.53	0.30	0.02	1.00	0.19	0.63	0.44	0.36	4
9	0.90	0.00	0.64	0.49	0.72	0.10	0.73	0.39	0.70	2
10	0.28	0.91	0.37	0.19	0.49	0.54	0.84	0.40	0.85	5
11	0.43	0.65	0.38	0.30	0.82	0.75	0.15	0.22	0.58	5
12	0.27	0.97	0.09	0.83	0.62	0.69	0.87	0.48	0.34	5



ภาพที่ 4-7 การแลกเปลี่ยนค่าพิกัดของสตริงที่ 1 ในเจเนอเรชันที่ 1

เมื่อทำการครอสโอเวอร์เสร็จสิ้นแล้วจะได้สตริงคำตอบแสดงดังตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-21 ค่าฟังก์ชันของสตริงทดลองในเจเนอเรชันที่ 1

Trial String	Priority								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.303	0.526	-0.216	-0.241	0.866	-0.441	0.954	1.959	1.185
2	-0.092	0.121	1.295	0.301	0.850	1.151	-0.256	-0.755	0.093
3	-0.350	1.471	0.956	1.917	0.047	0.083	-0.117	2.430	1.529
4	0.675	-0.019	-0.285	0.931	0.139	2.135	0.637	-0.360	0.207
5	0.703	0.031	1.203	0.465	0.970	-1.387	0.987	0.985	1.430
6	1.180	-1.104	0.647	-0.639	0.758	0.776	0.969	-1.226	-0.411
7	-0.124	-0.141	0.878	-0.291	0.468	1.119	-0.061	1.285	0.757
8	-0.622	0.669	1.314	1.086	0.337	1.766	-0.424	0.045	0.402
9	0.893	1.287	1.538	0.405	0.105	-0.211	0.754	2.062	0.837
10	1.157	0.850	0.309	-0.471	0.183	-0.810	0.202	1.527	0.500
11	1.316	1.328	0.123	1.640	-1.289	0.630	0.431	1.411	1.225
12	-0.052	0.797	-0.073	0.513	0.155	1.023	0.263	-0.965	0.773

4. ทำการถอดรหัสของสตริงทดลองให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ โดยเรียงค่าฟังก์ชันจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-22 สตริงคำตอบทดลองในเจเนอเรชันที่ 1

Trial String	Priority									Sequence								
	1	6	4	3	1	2	5	7	9	8	C	B	B	A	A	B	C	C
2	8	7	1	9	2	4	5	6	3	C	C	A	C	A	B	B	C	B
3	1	7	5	6	3	2	9	4	8	A	C	B	C	B	A	C	B	C
4	8	3	2	5	9	7	1	4	6	C	B	A	B	C	C	A	B	C
5	6	2	4	1	5	8	7	3	9	C	A	B	A	B	C	C	B	C
6	8	2	4	9	3	5	6	7	1	C	A	B	C	B	B	C	C	A
7	4	2	1	7	5	9	3	6	8	B	A	A	C	B	C	B	C	C
8	1	7	8	5	9	2	4	3	6	A	C	C	B	C	A	B	B	C

ตารางที่ 4 22 สตริงคำตอบทดลองในเจเนอเรชันที่ 1 (ต่อ)

Trial String	Priority	Sequence
9	6 5 4 7 9 1 2 3 8	C B B C C A A B C
10	6 4 5 7 3 9 2 1 8	C B B C B C A A C
11	5 3 7 6 9 1 2 8 4	B B C C C A A C B
12	8 3 1 5 7 4 9 2 6	C B A B C B C A C

5. ทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง ดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง

Trial String	$f_1(u)$	$f_2(u)$	$f_3(u)$	$f_4(u)$	$f_5(u)$	$f_6(u)$
1	9	5.0000	6.0000	17	4.1119	19.0370
2	7	4.0000	4.3333	21	4.8492	29.2593
3	8	4.3333	4.6667	19	3.2325	5.9259
4	6	4.3333	4.6667	18	2.6770	5.2593
5	7	4.6667	5.0000	18	3.5325	9.4815
6	7	3.6667	4.0000	18	3.0183	9.7037
7	9	5.3333	6.3333	17	4.8341	15.7037
8	8	4.6667	5.3333	18	3.9659	13.4815
9	8	4.3333	5.3333	17	3.4881	10.5926
10	8	4.0000	5.0000	18	3.9738	20.8148
11	6	5.3333	6.3333	18	4.6270	18.1481
12	7	4.0000	4.3333	19	2.9627	9.7037

4.2.4.4 การหาค่าที่ดีที่สุด

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลองแล้ว ให้นำสตริงคำตอบเป้าหมายและสตริงคำตอบทดลองมาเรียงรวมกัน ($P_g \cup Q_g$) และเปรียบเทียบกัน (หมายเหตุ: สตริงที่ a.b คือ สตริงทดลองที่ b ในเจเนอเรชันที่ a)

การหาค่าที่ดีที่สุดของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ จะใช้วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ของแต่ละสตริงคำตอบ โดยยังมีค่าความแข็งแรงที่น้อย หมายถึงสตริงคำตอบนั้นเป็นคำตอบที่ดี สามารถกำหนดค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบได้จากสมการที่ 3-1 จะได้ค่าความแข็งแรงของตัวอย่างดังตารางที่ 4-24

ตารางที่ 4-24 ค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ

String	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	Fitness
1	8	3.6667	3.3333	20	3.5492	13.9259	1
2	7	4.0000	4.3333	19	3.4825	8.3704	1
3	7	4.3333	5.3333	18	3.1849	10.5926	2
4	8	4.3333	4.0000	19	4.2048	12.8148	2
5	7	4.0000	3.3333	20	3.9143	21.0370	1
6	8	4.6667	5.0000	19	4.6714	15.4815	3
7	7	4.6667	5.6667	17	3.3627	9.2593	1
8	7	4.6667	5.0000	17	4.3516	12.8148	1
9	6	4.6667	5.6667	19	4.3071	27.7037	2
10	6	4.6667	5.6667	16	3.8294	14.1481	1
11	7	4.6667	5.0000	18	3.6254	17.0370	2
12	8	5.3333	7.0000	19	4.3071	17.7037	3
1.1	9	5.0000	6.0000	17	4.1119	19.0370	2
1.2	7	4.0000	4.3333	21	4.8492	29.2593	2
1.3	8	4.3333	4.6667	19	3.2325	5.9259	2
1.4	6	4.3333	4.6667	18	2.6770	5.2593	1
1.5	7	4.6667	5.0000	18	3.5325	9.4815	2
1.6	7	3.6667	4.0000	18	3.0183	9.7037	1
1.7	9	5.3333	6.3333	17	4.8341	15.7037	2
1.8	8	4.6667	5.3333	18	3.9659	13.4815	3
1.9	8	4.3333	5.3333	17	3.4881	10.5926	1
1.10	8	4.0000	5.0000	18	3.9738	20.8148	2
1.11	6	5.3333	6.3333	18	4.6270	18.1481	2
1.12	7	4.0000	4.3333	19	2.9627	9.7037	1

เมื่อได้ค่าความแข็งแรงของสตริงทั้งหมดแล้ว ให้ทำการคัดเลือกสตริงที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มาจำนวนเท่ากับประชากรเริ่มต้น (N) ถ้าสตริงที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีมากกว่าจำนวนประชากรให้เลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแออัด (Crowding Distance) มาก เป็นอันดับถัดไป มาเท่ากับจำนวนประชากร แต่ถ้าสตริงที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีน้อยกว่าจำนวนประชากรให้เลือกสตริงที่มีค่าความแข็งแรงมากในลำดับถัดไป มาเพิ่มจนครบจำนวน แสดงค่าฟิตัดและสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2 ดังตารางที่ 4-25 และ 4-26

ตารางที่ 4-25 ค่าฟิตัดของสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2

String	Priority								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.228	0.526	0.983	0.388	0.866	0.061	0.954	0.271	0.449
2	0.711	0.121	0.919	0.347	0.367	0.653	0.220	0.830	0.912
5	0.703	0.031	0.743	0.175	0.970	0.161	0.442	0.027	0.555
7	0.944	0.588	0.670	0.753	0.156	0.135	0.458	0.549	0.973
8	0.835	0.214	0.269	0.484	0.337	0.806	0.400	0.366	0.388
10	0.920	0.850	0.843	0.669	0.349	0.468	0.202	0.979	0.500
1.4	0.675	-0.019	-0.285	0.931	0.139	2.135	0.637	-0.360	0.207
1.6	1.180	-1.104	0.647	-0.639	0.758	0.776	0.969	-1.226	-0.411
1.9	0.893	1.287	1.538	0.405	0.105	-0.211	0.754	2.062	0.837
1.12	-0.052	0.797	-0.073	0.513	0.155	1.023	0.263	-0.965	0.773
3	0.342	0.793	0.379	0.523	0.047	0.083	0.416	0.723	0.879
4	0.119	0.246	0.684	0.931	0.139	0.814	0.633	0.374	0.207

ตารางที่ 4-26 สตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2

String	Priority	Sequence
1	6 1 8 4 9 2 5 7 3	C A C B C A B C B
2	2 7 4 5 6 1 8 9 3	A C B B C A C C B
5	8 2 6 4 7 9 1 3 5	C A C B C C A B B
7	6 5 7 8 2 3 4 1 9	C B C C A B B A C
8	2 3 5 8 9 7 4 6 1	A B B C C C B C A
10	7 5 6 9 4 3 2 1 8	C B C C B B A A C
1.4	8 3 2 5 9 7 1 4 6	C B A B C C A B C
1.6	8 2 4 9 3 5 6 7 1	C A B C B B C C A
1.9	6 5 4 7 9 1 2 3 8	C B B C C A A B C
1.12	8 3 1 5 7 4 9 2 6	C B A B C B C A C
3	5 6 1 3 7 4 8 2 9	B C A B C B C A C
4	1 5 9 2 8 7 3 6 4	A B C A C C B C B

4.2.4.5 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม

เมื่อจบการพัฒนาคำตอบของเจเนอเรชันที่ g แล้ว จะนำสตริงคำตอบเป้าหมายสุดท้ายกลับไปพัฒนาคำตอบต่อไปในเจเนอเรชันที่ $g + 1$ ด้วยวิธีในหัวข้อที่ 4.2.4.3 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบเจเนอเรชันที่กำหนด

การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึมจะใช้จำนวนเจเนอเรชันเป็นตัวกำหนด เมื่ออัลกอริทึมดำเนินงานครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด จะให้อัลกอริทึมหยุดการดำเนินงาน

4.3 วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MODE/D) มีหลักแนวคิดในการแก้ปัญหาด้วยการพัฒนาคำตอบโดยใช้ผลต่างระหว่างจุดมาสร้างเวกเตอร์เพื่อค้นหาทิศทางของคำตอบที่ดี อีกทั้งยังพัฒนาคำตอบที่มีไปพร้อม ๆ กัน เช่นเดียวกับ MOEA/D จึงทำให้เกิดคำตอบที่หลากหลายและมีทิศทางในการค้นหาคำตอบของแต่ละปัญหาย่อยอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยนี้ MODE/D ใช้การวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical DE) ด้วยกลยุทธ์ “DE/rand/1/bin” ในการพัฒนาคำตอบ

4.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE/D ในการแก้ปัญหา

MODE/D คือ MOEA/D ที่ใช้การพัฒนาคำตอบด้วยค่าผลต่างของเวกเตอร์ ดังนั้นการทำงานอื่น ๆ ของอัลกอริทึมจะเหมือนกับ MOEA/D ทั้งหมด โดย MODE/D มีขั้นตอนการดำเนินงานในการหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ ดังนี้

การนำเข้าข้อมูล

- N คือ จำนวนประชากรหรือจำนวนปัญหาย่อย (Subproblem) โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$
- G คือ จำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยที่ $g = 1, \dots, G$
- Nb คือ จำนวนสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Number of weight vectors in the neighborhood)
- NR คือ จำนวนการแทนที่สูงสุดของสตริงคำตอบรุ่นลูกในแต่ละตัว (Maximum number of solutions replaced by each offspring)
- $B(i)$ คือ เซตสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$
- F คือ ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (Scaling factor)
- CR คือ อัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate)
- p_m คือ ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation probability)
- η คือ ดัชนีการกระจายตัวของการแจกแจงแบบพหุนาม (Distribution index of polynomial mutation)

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_k^i โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m)
2. คำนวณระยะห่างระหว่างจุดพิคัดของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ทั้งหมด ดังสมการที่ 4-1 และจัดเก็บสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยที่ i ลงในเซต $B(i)$
3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) จากนั้นกำหนด g และ i เท่ากับ 1
4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น จากนั้นให้กำหนดค่าเป้าหมาย $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

ขั้นตอนที่ 2 การปรับปรุง

ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$

1. สุ่มเลือกสตริง r_1, r_2 และ r_3 จากสตริงข้างเคียงซึ่งเป็นสตริงที่มีระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับสตริงที่ i โดย $r_1 \neq r_2 \neq r_3$
2. ทำการพัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย) ด้วยวิธีวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical DE: DE/rand/1) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3-3
3. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย (x^i) และเวกเตอร์กลายพันธุ์ (v^i) ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ โดยมีโอกาสเกิดการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่ n บนสตริง i เท่ากับค่าอัตราการครอสโอเวอร์ (CR) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง nc นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่เวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u^i) แสดงดังสมการที่ 4-4
4. ปรับปรุงเวกเตอร์ทดลองด้วยวิธีการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (Polynomial Mutation) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 4-5 และ 4-6 (กำหนดให้ $y = u^i$ โดยที่ $y = (y_1, \dots, y_{nc})$)

$$y'_n = \begin{cases} y_n + \sigma_n(y_n^{Up} - y_n^{Lw}) & \text{with probability } p_m \\ y_n & \text{with probability } 1 - p_m \end{cases} \quad (4-5)$$

$$\sigma_n = \begin{cases} (2 \times rand_\sigma)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1 & \text{if } rand_\sigma < 0.5 \\ 1 - [2(1 - rand_\sigma)]^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-6)$$

เมื่อ y_n^{Up} คือ ค่าขอบเขตบน (Upper bounds) ของเวกเตอร์เป้าหมายตำแหน่งที่ n บนสตริงรุ่นใหม่

y_n^{Lw} คือ ค่าขอบเขตล่าง (Lower bounds) ของเวกเตอร์เป้าหมายตำแหน่งที่ n บนสตริงรุ่นใหม่

5. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นใหม่ และทำการจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบนั้น ๆ จากนั้นให้ประเมินค่าเป้าหมาย (z_k^*) ถ้า $z_k^* > f_k(y')$ แล้ว $z_k^* = f_k(y')$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

6. ทำการนอร์มัลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริง $j \in B(i)$, สตริงคำตอบลูก และค่าเป้าหมายด้วยค่า ff_k^{\max} และ ff_k^{\min} เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าระหว่างวัตถุประสงค์ได้ (จะได้ค่า $f_k^N(x^j)$, $f_k^N(y')$ และ z_k^* โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$)

7. กำหนดค่าจำนวนการแทนที่เท่ากับศูนย์ ($n_r = 0$) จากนั้นทำการประเมินค่าวัตถุประสงค์ของสตริง $j \in B(i)$ ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 3-2 โดยมีขั้นตอนการประเมินดังนี้

ก. ทำงานการสุ่มลำดับการเข้าประเมินของสตริง $j \in B(i)$ โดยให้สตริง $j = i$ เป็นสตริงแรกที่ได้รับการประเมินก่อนเสมอ

ข. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่ที่ต้องน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุด ($n_r < NR$) จึงจะเกิดการประเมินค่าวัตถุประสงค์ต่อในข้อถัดไป หากไม่ตรงเงื่อนไขข้ามไปข้อที่ 8

ค. นำสตริงคำตอบรุ่นใหม่ แทนค่าด้วย λ^j ของสตริง j หากค่า λ^j ทำให้สตริงคำตอบรุ่นใหม่ได้ค่า $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N)$ ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j เดิม ให้ทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเดิม (x^j) ในปัญหาย่อยที่ j ด้วยค่าของสตริงคำตอบรุ่นใหม่ (y')

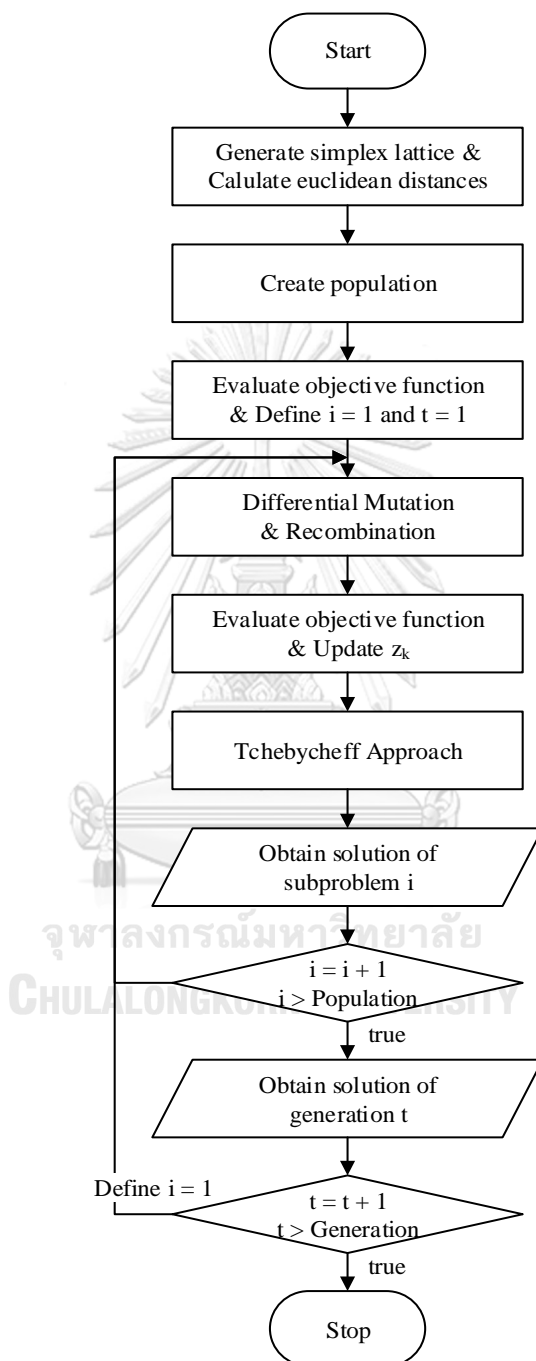
ง. จบการประเมินค่าวัตถุประสงค์ของสตริง j จากนั้นกลับไปทำการประเมินต่อ ให้กับสตริงลำดับถัดไปในข้อที่ 7(ข) จนครบทุกสตริง $j \in B(i)$

8. จบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i กำหนดให้ $i = i + 1$

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการปรับปรุงคำตอบตามความพึงพอใจหรือตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด หากต้องการปรับปรุงคำตอบให้กำหนด $g = g + 1$ แล้วนำสตริงคำตอบที่ได้ในเจเนอเรชันก่อนหน้า ไปทำการปรับปรุงต่อในขั้นตอนที่ 2 กำหนด $i = 1$

4.3.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE/D
แสดงดังภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4-8 ขั้นตอนการทำงานของ MODE/D

4.3.3 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ MODE/D

- 1: Generate N weight vectors $\lambda^i = (\lambda_1^i, \lambda_2^i, \dots, \lambda_m^i)$, $i = 1, \dots, N$
- 2: For $i = 1, \dots, N$, define the set of indexes $B(i) = \{i_1, \dots, i_{Nb}\}$ where $\{\lambda^{i_1}, \dots, \lambda^{i_{Nb}}\}$ are the Nb closest weight vectors to λ^i
(by the Euclidean distance)
- 3: Generate an initial population $P_0 = \{x^1, \dots, x^N\}$, $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_{nc}^i)$
- 4: Evaluate each individual in the initial population P_0 and associate x^i with λ^i
- 5: Initialize $z^* = (z_1^*, \dots, z_m^*)$ by setting $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$, $k = 1, 2, \dots, m$
- 6: Set $g = 1$
- 7: For all $SR_{i,j,g}^s$ and $DSR_{i,j,g}^s$ are set zero
- 8: **repeat**
- 9: **for** each parent vector x^i , $i = 1, \dots, N$ **do**
- 10: Randomly select vector indexes from the neighborhood $B(i)$
- 11: Generate a new solution y by DE operator (repair it if necessary)
- 12: Apply polynomial mutation to produce y' (repair it if necessary)
- 13: Update z^* , $z_k^* = \min(z_k^*, f_k(y))$
- 14: Set $n_r = 0$
- 15: **for** each subproblem $j \in B(i)$ **do**
- 16: **if** $n_r < NR$ **then**
- 17: **if** $g^{te}(y'|\lambda^j, z^*) \leq g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$ **then**
- 18: Replace x^j by y' , increment n_r and set $SR_{i,j,g}^s = 1$
- 19: **if** $g^{te}(y'|\lambda^j, z^*) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$ **then**
- 20: Set $DSR_{i,j,g}^s = 1$ //true is equal to one
- 21: **end if**
- 22: **end if**
- 23: **end if**
- 24: **end for**
- 25: **end for**
- 26: $t = t + 1$
- 27: **until** $g > G$

ตารางที่ 4-27 ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (6 component and 1 degree with axial points) (ต่อ)

Subproblem (i)	Weight of objectives function k (λ_k^i)					
	1	2	3	4	5	6
7	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333
9	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
11	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333
12	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

ตารางที่ 4-28 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ประชากร 12 ตัว

From To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.10	0.71	1.10	0.71	0.71	0.46	0.71	1.10	1.10	0.71	1.10
2	1.10	0	1.10	1.41	1.10	1.10	1.41	0.46	1.41	1.41	1.10	1.41
3	0.71	1.10	0	1.10	0.71	0.71	1.10	0.71	0.46	1.10	0.71	1.10
4	1.10	1.41	1.10	0	1.10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	0.46	1.41
5	0.71	1.10	0.71	1.10	0	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.71	0.46
6	0.71	1.10	0.71	1.10	0.71	0	1.10	0.71	1.10	0.46	0.71	1.10
7	0.46	1.41	1.10	1.41	1.10	1.10	0	1.10	1.41	1.41	1.10	1.41
8	0.71	0.46	0.71	1.10	0.71	0.71	1.10	0	1.10	1.10	0.71	1.10
9	1.10	1.41	0.46	1.41	1.10	1.10	1.41	1.10	0	1.41	1.10	1.41
10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.10	0.46	1.41	1.10	1.41	0	1.10	1.41
11	0.71	1.10	0.71	0.46	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0	1.10
12	1.10	1.41	1.10	1.41	0.46	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	1.10	0

ตารางที่ 4-29 เซตสตริงข้างเคียงที่ประชากร 12 ตัว และสตริงข้างเคียง 4 ตัว

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

4.3.4.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกจะใช้วิธีการสุ่มค่าพิกัดในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากร (N) ที่ความยาวเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) แสดงตัวอย่างค่าพิกัดจากการสุ่มดังตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Sub-problem	String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.23	0.53	0.98	0.39	0.87	0.06	0.95	0.27	0.45
2	2	0.71	0.12	0.92	0.35	0.37	0.65	0.22	0.83	0.91
3	3	0.34	0.79	0.38	0.52	0.05	0.08	0.42	0.72	0.88
4	4	0.12	0.25	0.68	0.93	0.14	0.81	0.63	0.37	0.21
5	5	0.70	0.03	0.74	0.18	0.97	0.16	0.44	0.03	0.56
6	6	0.17	0.71	0.76	0.96	0.76	0.78	0.27	0.83	0.86
7	7	0.94	0.59	0.67	0.75	0.16	0.14	0.46	0.55	0.97
8	8	0.84	0.21	0.27	0.48	0.34	0.81	0.40	0.37	0.39

ตารางที่ 4 30 ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

Sub-problem	String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	9	0.89	0.73	0.52	0.08	0.11	0.79	0.75	0.01	0.84
10	10	0.92	0.85	0.84	0.67	0.35	0.47	0.20	0.98	0.50
11	11	0.55	0.57	0.95	0.82	0.10	0.63	0.11	0.16	0.74
12	12	0.00	0.78	0.58	0.51	0.64	0.37	0.26	0.98	0.10

เมื่อได้ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว ทำการถอดรหัส (Decoding) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ (Priority) โดยเรียงค่าพิกัดจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 4-31

ตารางที่ 4-31 สตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	Priority	Sequence
1	1	6 1 8 4 9 2 5 7 3	C A C B C A B C B
2	2	2 7 4 5 6 1 8 9 3	A C B B C A C C B
3	3	5 6 1 3 7 4 8 2 9	B C A B C B C A C
4	4	1 5 9 2 8 7 3 6 4	A B C A C C B C B
5	5	8 2 6 4 7 9 1 3 5	C A C B C C A B B
6	6	1 7 2 5 3 6 8 9 4	A C A B B C C C B
7	7	6 5 7 8 2 3 4 1 9	C B C C A B B A C
8	8	2 3 5 8 9 7 4 6 1	A B B C C C B C A
9	9	8 4 5 3 2 7 6 9 1	C B B B A C C C A
10	10	7 5 6 9 4 3 2 1 8	C B C C B B A A C
11	11	5 7 8 1 2 6 9 4 3	B C C A A C C B B
12	12	1 9 7 6 4 3 5 2 8	A C C C B B B A C

4.3.4.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทที่ 2 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 4-32

ตารางที่ 4-32 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	1	7	3.6667	3.3333	20	3.5492	13.9259
2	2	7	4.0000	4.3333	19	3.4825	8.3704
3	3	8	4.3333	5.3333	18	3.1849	10.5926
4	4	8	4.3333	4.0000	19	4.2048	12.8148
5	5	7	4.0000	3.3333	20	3.9143	21.0370
6	6	7	4.6667	5.0000	19	4.6714	15.4815
7	7	7	4.6667	5.6667	17	3.3627	9.2593
8	8	6	4.6667	5.0000	17	4.3516	12.8148
9	9	7	4.6667	5.6667	19	4.3071	27.7037
10	10	7	4.6667	5.6667	16	3.8294	14.1481
11	11	9	4.6667	5.0000	18	3.6254	17.0370
12	12	7	5.3333	7.0000	19	4.3071	17.7037

4.3.4.4 การพัฒนาคำตอบ

การพัฒนาคำตอบของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก จะพัฒนาคำตอบไปที่ละปัญหาย่อยเช่นเดียวกับ MOEA/D แต่จะใช้วิธีกลายพันธุ์ด้วยผลต่างแบบ MODE แทน แสดงตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 ดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม e_1 , e_2 และ e_3 ในช่วงระหว่าง $[1, Nb]$ โดยที่ $e_1 \neq e_2 \neq e_3$ เมื่อ e แทนลำดับของสตริงคำตอบในเซตของสตริงข้างเคียง ตัวอย่างเช่น ปัญหาย่อยที่ 1 มีสตริงข้างเคียงคือ 1 7 3 และ 5 หาก e_1 เท่ากับ 2 ค่า r_1 จะเท่ากับ 7 และหาก e_2 เท่ากับ 1 ค่า r_2 จะเท่ากับ 1 แสดงตัวอย่างค่าสุ่มดังตารางที่ 4-33

ตารางที่ 4-33 ค่าสุ่ม r_1 , r_2 และ r_3 ของแต่ละสตริงเป้าหมายในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Subproblem	Target String	$e_1(r_1)$	$e_2(r_2)$	$e_3(r_3)$
1	1	3(3)	2(7)	4(5)

2. ทำการพัฒนาค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสด้วยวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบคลาสสิก (Classical Differential Evolution) จะได้ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนส โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-3 แสดงผลลัพธ์การคำนวณฟังก์ชันค่าฟิตเนสดังตารางที่ 4-34

ตารางที่ 4-34 ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Sub-problem	Mutant String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.82	1.90	0.23	1.68	-1.58	0.03	0.45	1.77	1.72

3. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงเป้าหมายและค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงกลายพันธุ์ จะได้ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้วิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover) ซึ่งมีวิธีดังต่อไปนี้

- ก. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม R_1 ในช่วง 1 ถึง nc เพื่อระบุตำแหน่งแรกของการแลกเปลี่ยน โดยตัวอย่างนี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 9
- ข. ทำการสุ่มค่า R_2^n ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ $n = 1, 2, \dots, nc$ ถ้า $R_2^n \leq CR$ แล้วจะแทนที่ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงเป้าหมาย (x_n^i) ด้วยค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงกลายพันธุ์ (v_n^i) แสดงค่าสุ่มของปัญหาย่อยที่ 1 ดังตารางที่ 4-35

ตารางที่ 4-35 ค่าสุ่มของการครอสโอเวอร์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Sub-problem	R_1^1	R_2^2	R_3^3	R_4^4	R_5^5	R_6^6	R_7^7	R_8^8	R_9^9	R_{10}
1	0.16	0.97	0.96	0.49	0.80	0.14	0.42	0.92	0.79	9

เมื่อทำการครอสโอเวอร์เสร็จสิ้นแล้วจะได้สตริงคำตอบทดลองแสดงดังตารางที่ 4-36

ตารางที่ 4-36 ค่าฟังก์ชันค่าฟิตเนสของสตริงทดลองในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Sub-problem	Trial String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.82	0.53	0.98	1.68	0.87	0.03	0.45	0.27	1.72

4. ปรับปรุงสตริงทดลองด้วยวิธีการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (Polynomial Mutation) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-5 และ 4-6 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 4-37 (ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้ค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างเท่ากับ 1 และ 0 ตามลำดับ)

ตารางที่ 4-37 ค่าพิกัดของสตริงทดลองในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 หลังกลายพันธุ์ (PM)

$p_m = 0.11$	Priority								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$rand < p_m$	0.81	0.91	0.13	0.91	0.63	0.10	0.28	0.55	0.96
$rand_\sigma$	-	-	-	-	-	0.36	-	-	-
y'	0.82	0.53	0.98	1.68	0.87	0.01	0.45	0.27	1.72

5. ทำการถอดรหัสของสตริงทดลองให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ โดยเรียงค่าพิกัดจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 4-38

ตารางที่ 4-38 สตริงคำตอบบรันลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Offspring	Priority	Sequence
1.1	6 8 7 2 1 5 3 4 9	C C C A A B B B C

6. ทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบบรันลูก แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบบรันลูก ดังตารางที่ 4-39

ตารางที่ 4-39 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบบรันลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Offspring	$f_1(y')$	$f_2(y')$	$f_3(y')$	$f_4(y')$	$f_5(y')$	$f_6(y')$
1.1	7	5.3333	6.6667	20	5.2659	31.0370

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบบรันลูกแล้ว ให้ทำการจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละวัตถุประสงค์ในรอบนั้น ๆ ดังตารางที่ 4-40

ตารางที่ 4-40 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

max/min	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
ff_k^{\max}	9.0005	5.3338	7.0005	20.0005	4.6719	27.7042
ff_k^{\min}	6	3.6667	3.3333	16	3.1849	8.3704

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว ให้นำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (z_k^*) หาก $z_k^* > f_k(y')$ จะกำหนดให้ z_k^* เท่ากับ $f_k(y')$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$ แสดงดังตารางที่ 4-41

ตารางที่ 4-41 ค่าเป้าหมายของแต่ละวัตถุประสงค์ในเงื่อนไขที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Target	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
z_k^*	6	3.6667	3.3333	16	3.1849	8.3704

7. ทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อยที่ i ($j \in B(i)$), สตริงคำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมายด้วยค่า ff_k^{\max} และ ff_k^{\min} แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-42

ตารางที่ 4-42 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในเงื่อนไขที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 หลังทำการนอร์มัลไล

$j \in B(1)$	String	f_1^N	f_2^N	f_3^N	f_4^N	f_5^N	f_6^N
1	1	0.3333	0	0	0.9999	0.1750	0.2451
3	3	0.6666	0.3999	0.5454	0.4999	0	0.0980
5	5	0.3333	0.1999	0	0.9999	0.3504	0.5588
7	7	0.3333	0.5998	0.6363	0.2500	0.0854	0.0392
-	1.1	0.3333	0.9997	0.9090	0.9999	0.9998	1.0000
-	z_k^N	0	0	0	0	0	0

4.3.4.5 การหาค่าที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้ บางวัตถุประสงค์มีค่าเป็นจำนวนเต็มจึงทำให้เกิดสตริงคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์นั้น ๆ เท่ากันเป็นจำนวนมาก แต่ค่าวัตถุประสงค์อื่น ๆ มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้วิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบปกติทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงนำวิธีการเทบปีเซฟฟ์มาทำการประยุกต์ เรียกว่าวิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับความสำคัญ โดยให้ค่าที่มากมีความสำคัญมากถูกนำมาเปรียบเทียบก่อน แสดงตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.1.2

การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละค่าถ่วงน้ำหนัก โดยจะประเมินเฉพาะสตริง j ที่อยู่ใน $B(i)$ หรือสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ i เท่านั้น การประเมินจะทำได้เฉพาะสตริง (สุ่มลำดับการประเมินโดยให้สตริงที่ $j = i$ เป็นสตริงแรกที่ได้ประเมินก่อนเสมอ) แสดงขั้นตอนการหาคำตอบที่ดีที่สุด ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่ของสตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยปัจจุบัน ต้องมีค่าน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุด ($n_r < NR$) หากไม่ตรงเงื่อนไขจะจบการประเมินในปัญหาย่อยปัจจุบันทันที

2. ให้ทำการคำนวณค่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j และคำนวณค่า $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N)$ ของสตริงรุ่นลูกที่ค่าถ่วงน้ำหนักเดียวกับสตริง j

3. ทำการเปรียบเทียบค่ามากที่สุดของ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N)$ หากค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมน้อยกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงรุ่นลูก ($g^{te}(y'|\lambda^j, z^N) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$) จะกำหนดให้ลำดับ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และค่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j เท่ากับของสตริงรุ่นลูก แต่หาก $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N) = g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ จะต้องทำการเปรียบเทียบค่ามากที่สุดที่รองลงมาของ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N)$ ไปทีละคู่ แสดงตัวอย่างการหาคำตอบที่ดีที่สุดเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 (เรียงค่าเทบปีเซฟฟ์จากมากไปน้อย) ดังตารางที่ 4-43

ตารางที่ 4-43 การหาคำตอบที่ดีที่สุดเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

$j \in B(1)$	R_j	Conditions	$g^{te}(x^j \lambda^j, z^N)$		$g^{te}(y' \lambda^j, z^N)$		SR(DSR)
1	0.9621	pass	0.0833	0.0278	0.5832	0.0833	False
			0.0204	0.0146	0.0833	0.0833	(False)
			0	0	0.0757	0.0278	
3	0.1248	pass	0.2916	0.0555	0.5832	0.0833	False
			0.0454	0.0333	0.0833	0.0833	(False)
			0.0082	0	0.0757	0.0278	
7	0.6534	pass	0.5998	0	0.9997	0	False
			0	0	0	0	(False)
			0	0	0	0	
5	0.7653	pass	0.1944	0.0833	0.1944	0.0833	False
			0.0466	0.0292	0.0833	0.0833	(False)
			0.0167	0	0.0833	0.0757	

หมายเหตุ: SR คือ การแทนที่ของคำตอบ (Solution Replacement) และ DSR คือ การแทนที่ของคำตอบที่ครอบงำ (Dominate Solution Replacement)

จากตารางที่ 4-43 ซึ่งเป็นการหาคำตอบที่ดีที่สุดใ้จเนอเรชั่นที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 จะเห็นว่าทุกสตริงคำตอบผ่านเงื่อนไขการเข้าประเมินเนื่องจากไม่เกิดการแทนที่ของคำตอบใด ๆ ($n_r = 0$)

จากการเปรียบเทียบค่า $g^{te}(y^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริงคำตอบที่ 1 3 7 และ 5 พบว่าค่า $g^{te}(y^j|\lambda^j, z^N)$ ไม่ดีกว่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ในทุกสตริงคำตอบ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคำตอบ

แสดงชุดสตริงคำตอบหลักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการพัฒนาคำตอบในทุก ๆ ปัญหาย่อย ณ เจเนอเรชั่นที่ 1 แล้ว ดังตารางที่ 4-44 และ 4-45

ตารางที่ 4-44 สตริงคำตอบหลักหลังจบเจเนอเรชั่นที่ 1

Subproblem	String	Priority	Sequence
1	1	6 1 8 4 9 2 5 7 3	C A C B C A B C B
2	2	2 7 4 5 6 1 8 9 3	A C B B C A C C B
3	1.3	5 3 1 7 6 4 8 9 2	B B A C C B C C A
4	4	1 5 9 2 8 7 3 6 4	A B C A C C B C B
5	1.4	5 3 6 7 9 8 4 1 2	B B C C C C B A A
6	1.8	2 4 1 7 5 6 8 9 3	A B A C B C C C B
7	7	6 5 7 8 2 3 4 1 9	C B C C A B B A C
8	1.11	2 4 7 8 1 3 5 6 9	A B C C A B B C C
9	1.9	3 8 5 4 7 9 2 1 6	B C B B C C A A C
10	1.10	2 4 1 6 5 7 9 8 3	A B A C B C C C B
11	11	5 7 8 1 2 6 9 4 3	B C C A A C C B B
12	12	1 9 7 6 4 3 5 2 8	A C C C B B B A C

ตารางที่ 4-45 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลักหลังจบเจเนอเรชันที่ 1

Subproblem	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	1	7	3.6667	3.3333	20	3.5492	13.9259
2	2	7	4.0000	4.3333	19	3.4825	8.3704
3	1.3	6	5.3333	6.3333	16	4.7960	21.4815
4	4	8	4.3333	4.0000	19	4.2048	12.8148
5	1.4	6	5.6667	6.0000	17	5.3056	25.0370
6	1.8	8	5.0000	4.6667	18	4.8937	13.9259
7	7	7	4.6667	5.6667	17	3.3627	9.2593
8	1.11	7	5.0000	6.0000	17	3.8675	9.7037
9	1.9	8	4.6667	6.3333	17	4.5849	29.2593
10	1.10	8	5.0000	4.6667	18	4.8937	13.9259
11	11	9	4.6667	5.0000	18	3.6254	17.0370
12	12	7	5.3333	7.0000	19	4.3071	17.7037

4.3.4.6 การประเมินจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา

จำนวนคำตอบที่เกิดการแทนที่ (The Number of Solution Replacement: NSR) และจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา (The Number of Dominate Solution Replacement: NDSR) เป็นตัวชี้วัดการพัฒนาคำตอบในแต่ละเจเนอเรชัน หากมีค่าเข้าใกล้จำนวนประชากร แสดงว่าคำตอบมีการพัฒนาในทุก ๆ ปัญหาย่อย แต่หากมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่เกิดการพัฒนาคำตอบเลยในเจเนอเรชันนั้น ๆ NSR และ NDSR สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ

4.3.4.7 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม

ในแต่ละเจเนอเรชันจะประกอบไปด้วยปัญหาย่อยจำนวนเท่ากับจำนวนประชากร เมื่อจบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i แล้ว จะกลับไปพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ $i + 1$ โดยใช้ชุดสตริงหลักที่พัฒนาแล้ว ด้วยวิธีในหัวข้อที่ 4.3.4.4 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบทุกปัญหาย่อย จึงจะเริ่มเจเนอเรชันถัดไปด้วยชุดสตริงหลักที่พัฒนาแล้ว โดยจะเริ่มต้นที่ปัญหาย่อยที่ 1 ในหัวข้อที่ 4.3.4.4 เช่นกัน ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด

การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึมจะใช้จำนวนเจเนอเรชัน, NSR หรือ NDSR เป็นตัวกำหนดเมื่ออัลกอริทึมดำเนินงานครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนดหรือ NDSR เท่ากับ 0 ติดต่อกันหลายเจเนอเรชัน จะให้อัลกอริทึมหยุดการดำเนินงาน

4.4 วิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

วิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (AMOEVA/D-DE) มีหลักแนวคิดในการแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย (Subproblem) เพื่อพัฒนาคำตอบที่ดีในแต่ละด้านไปพร้อม ๆ กัน โดยใช้ความสัมพันธ์ของสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ซึ่งได้จากระยะห่างระหว่างเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก (λ^i) พัฒนาสตริงคำตอบด้วย DE Operator และคัดเลือกคำตอบที่ดีด้วยวิธีเทปปีเซฟฟ์ อีกทั้งอัลกอริทึมยังเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงของคำตอบที่หาได้ และปรับตัวเพื่อให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีและหลากหลายมากขึ้น แสดงรายละเอียดและขั้นตอนทำงานของ AMOEVA/D-DE ในบทที่ 5



บทที่ 5

วิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก

ในบทนี้ นำเสนอทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Adaptive MOEA/D hybridised with Differential Evolution: AMOEAD-DE) และแนวคิดของการปรับตัวจากวิธีการ SaDE, jDE และ JADE ซึ่งได้นำมาพัฒนาและปรับใช้กับ MOEA/D เพื่อให้การค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมเกิดความหลากหลายเพิ่มขึ้น และทำให้ความสามารถในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ตัวอย่างขั้นตอนการดำเนินงานของอัลกอริทึมในบทนี้ จะใช้โจทย์ตัวอย่างจากบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.2.4 (การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์)

5.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับ AMOEAD-DE

วิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (AMOEAD-DE) มีแนวคิดและแรงบันดาลใจจากเครื่องมือการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์แบบดั้งเดิม, MOEA/D และ MODE/D (Li & Zhang, 2009; Q. Zhang & Li, 2007; Q. Zhang, Liu, Tsang, & Virginas, 2010) โดยมี MOEA/D เป็นอัลกอริทึมพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึม

MOEA/D มีหลักแนวคิดในการรวมรวมคำตอบ (Ehrgott, 2006) โดยจะแบ่งปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOPs) ออกเป็นปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวหลาย ๆ ปัญหา (หรือที่เรียกว่าปัญหาย่อย: Subproblem) ด้วยการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเชิงเส้น (λ) ที่แตกต่างกันให้กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละปัญหาย่อย ซึ่งแต่ละปัญหาย่อยจะถูกกำหนดความสัมพันธ์ด้วยระยะห่างของค่าถ่วงน้ำหนักที่ต่างกัน (เรียกว่าปัญหาย่อยข้างเคียง: Neighborhood) อีกทั้งยังพัฒนาคำตอบไปพร้อม ๆ กัน โดยใช้คำตอบจากปัญหาย่อยข้างเคียง

ในงานวิจัยนี้ ได้นำ SaDE, jDE และ JADE ซึ่งเป็นวิธีเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบปรับตัว (Adaptive DE: ADE) มาประยุกต์ใช้กับ MOEA/D เนื่องจาก DE Operator เป็นวิธีการพัฒนาคำตอบที่ถูกพิสูจน์ว่าดีสำหรับปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียว อีกทั้งการนำ ADE เข้ามาปรับใช้ ยังทำให้อัลกอริทึมสามารถเรียนรู้ทิศทางของระบบว่าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด และสามารถปรับตัวให้เข้ากับสถานการณ์ของอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบได้

5.1.1 การปรับตัวด้วยกลยุทธ์ของ AMOEA/D-DE

การปรับตัวด้วยกลยุทธ์ (Strategy Adaptation) มีแนวคิดจาก SaDE ของ Huang et al. (2006) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีการเรียนรู้พฤติกรรมของระบบ และสุ่มเลือกกลยุทธ์ในการค้นหาคำตอบ จากค่าความน่าจะเป็นให้เหมาะสมกับสถานการณ์

ในงานวิจัยนี้ ได้พัฒนา *sbest* (Best so far solution) จาก *best* (Best solution) แบบเดิม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการประยุกต์ใช้กับ MOEA/D โดยหลักการพื้นฐานของ *sbest* จะเหมือนกับ *best* ทุกอย่าง คือเลือกเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดมาเป็นเวกเตอร์เริ่มต้น (Base vector) แล้วพัฒนาคำตอบด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่ม เมื่อขึ้นเงื่อนไขเรชันถัดไป ก็จะมีการเลือกเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีใหม่อีกครั้ง ซึ่งอาจจะดีหรือแย่กว่ารอบก่อนหน้าก็ได้ ดังนั้น *sbest* จึงถูกเพิ่มการจัดเก็บเวกเตอร์ที่ให้คำตอบที่ดีที่สุดไว้ และจะถูกแทนที่คำตอบเมื่อมีคำตอบที่ดีกว่าเท่านั้น โดยผู้วิจัย ได้พัฒนาและเลือกใช้กลยุทธ์ทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

1. กลยุทธ์ที่ 1: DE/rand/1/bin เป็นกลยุทธ์แบบดั้งเดิมของวิวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE) และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยกลยุทธ์นี้ จะทำการสุ่มเลือกเวกเตอร์พื้นฐาน (Base vector) จำนวน 1 เวกเตอร์ และสุ่มเลือกเวกเตอร์ผลต่าง (Difference vector) จำนวน 2 เวกเตอร์ มาใช้ในการคำนวณหาเวกเตอร์คำตอบกลายพันธุ์ (Mutant vector) และทำการยูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ จะได้เวกเตอร์คำตอบรุ่นใหม่หรือเวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) นำมาใช้ประเมินและคัดเลือกคำตอบ (Storn & Price, 1997) แสดงดังสมการที่ 5-1

$$v^i = x^{r1} + F(x^{r2} - x^{r3}) \quad (5-1)$$

2. กลยุทธ์ที่ 2: DE/*sbest*/1/bin เป็นกลยุทธ์ที่มีความคล้ายคลึงกับ DE/*best*/1/bin แบบดั้งเดิม แต่กลยุทธ์นี้ จะจัดเก็บค่าที่ดีที่สุด (Best so far: *sbest*) ของแต่ละปัญหาย่อยไว้ โดยหากไม่มีเวกเตอร์คำตอบที่ดีกว่าเวกเตอร์ *sbest*^{*i*} ของปัญหาย่อยที่ *i* จะไม่เกิดการแทนที่หรือเปลี่ยนแปลงคำตอบของเวกเตอร์ *sbest* ดังนั้น กลยุทธ์นี้ นอกจากจะมีการสุ่มเลือกคำตอบที่รวดเร็วเหมือนกลยุทธ์แบบดั้งเดิมแล้ว อีกทั้งยังคงเก็บค่าที่ดีที่สุด ไม่เกิดการสูญหายของคำตอบที่ดีจากการแทนที่ของปัญหาย่อยข้างเคียง จึงทำให้ทิศทางในการค้นหาคำตอบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบกะทันหัน แสดงดังสมการที่ 5-2

$$v^i = sbest^i + F(x^{r2} - x^{r3}) \quad (5-2)$$

3. กลยุทธ์ที่ 3: DE/rand-to-sbest/1/bin เป็นกลยุทธ์ที่มีความคล้ายคลึงกับ DE/rand-to-sbest/1/bin แบบดั้งเดิม โดยใช้หลักการเก็บค่าที่ดีที่สุดไว้เช่นเดียวกับ DE/sbest/1/bin โดยกลยุทธ์นี้มีเวกเตอร์พื้นฐาน 2 เวกเตอร์ คือ เวกเตอร์สุ่มและเวกเตอร์ *sbest* ถูกถ่วงน้ำหนักด้วยค่า γ เพื่อหาจุดพิคัดเริ่มต้นในการพัฒนาคำตอบเช่นเดียวกับกลยุทธ์อื่น ๆ โดย DE/rand-to-sbest/1/bin จะมีการค้นหาคำตอบที่หลากหลายแต่ไม่มากเท่า DE/rand/1/bin และมีการลู่เข้าของคำตอบที่รวดเร็วกว่าแต่ไม่เท่า DE/sbest/1/bin จึงทำให้กลยุทธ์นี้ มีการค้นหาคำตอบอยู่ระหว่าง 2 กลยุทธ์ข้างต้น และด้วยเหตุนี้ อาจทำให้ช่วยสร้างรูปแบบของคำตอบที่หลากหลายและดีขึ้นได้ แสดงดังสมการที่ 5-3

$$v^i = x^{r1} + \gamma(sbest^i - x^{r1}) + F(x^{r2} - x^{r3}) \quad (5-3)$$

การเริ่มต้นดำเนินงานของการปรับตัวด้วยกลยุทธ์ ในแต่ละกลยุทธ์จะมีความน่าจะเป็นเท่ากัน โดยจะเกิดการเรียนรู้และปรับความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ไปเรื่อย ๆ จากจำนวนความสำเร็จและไม่สำเร็จที่เกิดขึ้น (S. M. S. Venske, Goncalves, & Delgado, 2012) แสดงสูตรคำนวณซึ่งผู้วิจัยได้ดัดแปลงบางส่วนเพื่อให้เหมาะกับอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย ดังสมการที่ 5-4 ถึง 5-7

$$p_{s,g+1} = p_{\min} + (1 - S \times p_{\min}) \cdot \left[(1 - \alpha)p_{s,g} + \alpha \cdot \left(\frac{Suc_{s,g}}{\sum_{s=1}^S Suc_{s,g}} \right) \right] \quad (5-4)$$

$$Suc_{s,g} = \frac{ns_{s,g}}{ns_{s,g} + nf_{s,g}} + \varepsilon \quad (5-5)$$

$$ns_{s,g} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N DSR_{i,j,g}^s \quad (5-6)$$

$$nf_{s,g} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (1 - SR_{i,j,g}^s) \quad (5-7)$$

เมื่อ	$p_{s,g}$	คือ ค่าความน่าจะเป็นในการเลือกใช้กลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (The probability of choosing s^{th} strategy) โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$
	$Suc_{s,g}$	คือ สัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของกลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (The rate of offspring vectors successfully creating by the s^{th} strategy)
	$ns_{s,g}$	คือ จำนวนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของกลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (Number of strategy s successfully creating survival offspring vectors in generation g)
	$nf_{s,g}$	คือ จำนวนความไม่สำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของกลยุทธ์ที่ s ในเจเนอเรชันที่ g (Number of strategy s unsuccessfully creating survival offspring vectors in generation g)
	$SR_{i,j,g}^s$	คือ การแทนที่คำตอบ (Solution Replacement) ซึ่งได้จากกลยุทธ์ที่ s จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเกิดความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ในปัญหาย่อยที่ i สตริงที่ j เจเนอเรชันที่ g (Strategy s successfully creating offspring vector that are better than or equal to the parent vector and its neighboring solutions of subproblem i)
	$DSR_{i,j,g}^s$	คือ การแทนที่คำตอบแบบครอบงำ (Dominated Solution Replacement) ซึ่งได้จากกลยุทธ์ที่ s จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเกิดความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่แบบครอบงำคำตอบเดิมในปัญหาย่อยที่ i สตริงที่ j เจเนอเรชันที่ g (Strategy s successfully creating offspring vector that are better than the parent vector and its neighboring solutions of subproblem i)
	p_{\min}	คือ ค่าความน่าจะเป็นต่ำสุดของกลยุทธ์ (The minimum probability of each strategy)
	S	คือ จำนวนกลยุทธ์ (Number of strategy)
	α	คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation rate) มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1
	ε	คือ ค่าคงที่เพื่อหลีกเลี่ยงกรณีหาค่าไม่ได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่า 0.0001 (The constant value is used to avoid possible null rates of success)
	$sbest^i$	คือ เวกเตอร์คำตอบที่ดีที่สุด (Best so far vector) สำหรับปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $sbest = (sbest_1, \dots, sbest_n)$ และ $i = 1, 2, \dots, N$

5.1.2 การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุมของ AMOEVA/D-DE

การปรับตัวด้วยพารามิเตอร์ควบคุม (Parameter Adaptation) มีกระทบต่อค่าผลลัพธ์ของคำตอบอย่างมาก เนื่องจาก DE Operator ใช้พารามิเตอร์ควบคุมเป็นตัวกำหนดระยะเคลื่อนของจุดพิกัด ตัวอย่างเช่น หากกำหนดค่า F ที่มาก จะทำให้การเคลื่อนของจุดพิกัดห่างจากจุดเริ่มต้นมาก ส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าที่ดีกว่าในบริเวณใกล้เคียงจุดเริ่มต้นได้ หรือหากกำหนดค่า F ที่น้อย จะทำให้การเคลื่อนของจุดพิกัดใกล้จุดเริ่มต้น ทำให้มีโอกาสติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่มได้

ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำแนวคิดของ jDE และ JADE จาก Brest et al. (2006); J. Zhang and Sanderson (2009a, 2009b) มาพัฒนาและประยุกต์ใช้กับ MOEA/D ให้เกิดการเรียนรู้และปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุม เมื่อคำตอบที่มีในระบบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงตัววัดการเปลี่ยนแปลงของระบบดังสมการที่ 5-8 และ 5-9

$$\tau_{i,g}^s = 1 - \left[(1 - \beta) \cdot \frac{\sum_{k=1}^g ASR_{i,j,k}^s}{\sum_{k=1}^g X_{i,k}^s} \right] - \left[\beta \cdot \frac{\sum_{k=1}^g \sum_{j=1}^N ASR_{i,j,k}^s}{NR \sum_{k=1}^g X_{i,k}^s} \right] \quad (5-8)$$

$$ASR_{i,j,g}^s = \frac{1}{2} (SR_{i,j,g}^s + DSR_{i,j,g}^s) \quad (5-9)$$

- เมื่อ $\tau_{i,g}^s$ คือ ค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่จากการใช้กลยุทธ์ที่ s ในปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g (The ratio of unsuccessfully creating offspring vector that are better than the parent vector from using strategy s in subproblem i generation g)
- $ASR_{i,j,g}^s$ คือ ค่าเฉลี่ยการแทนที่คำตอบกับการแทนที่แบบครอบงำในปัญหาย่อยที่ i สตริงที่ j เจเนอเรชันที่ g (Average of $SR_{i,j,g}^s$ and $DSR_{i,j,g}^s$)
- β คือ ค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของปัญหาย่อยที่ i กับความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของปัญหาย่อยที่ $j \in B(i)$ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 หากกำหนดค่าเท่ากับ 1 หมายถึงสนใจสตริงคำตอบทั้งหมดของ $B(i)$ หากเท่ากับ 0 หมายถึงสนใจเฉพาะสตริงที่ i ของปัญหาย่อย i (Scaling factor for weighting the successfully creating offspring at the subproblem i and the successfully creating offspring in the neighborhood of subproblem i)

- $X_{i,k}^s$ คือ เลขฐานสอง เท่ากับ 1 เมื่อใช้กลยุทธ์ที่ s ในปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g
- NR คือ จำนวนการแทนที่ค่าตอบสูงสุด (Maximum number of solutions replacement)

5.1.2.1 การปรับตัวของค่าปัจจัยขยายผลต่าง

การปรับตัวของค่าปัจจัยขยายผลต่าง (Adaptation of scaling factor) ในงานวิจัยนี้ ได้นำแนวคิดการปรับพารามิเตอร์จาก JADE โดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ควบคุมในทุกปัญหาย่อยทุกเจเนอเรชันด้วยการแจกแจงแบบโคชี (Cauchy Distribution) เมื่อค่าสุ่มน้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ แสดงสูตรการปรับพารามิเตอร์ควบคุมดังสมการที่ 5-10 และ 5-11

$$F_{i,g+1}^s = \begin{cases} \text{cauchy}(\mu_{F,i,t+1}^s, 0.1), & \text{if } rand_1 < \tau_{i,g}^s \\ F_{i,g}^s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-10)$$

$$\mu_{F,i,g+1}^s = \begin{cases} (1 - LR) \cdot \mu_{F,i,g}^s + LR \cdot F_{i,g}^s & \text{if } \sum_{j=1}^N DSR_{i,j,g}^s > 0 \\ \mu_{F,i,g}^s & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-11)$$

- เมื่อ $F_{i,g}^s$ คือ ค่าปัจจัยขยายผลต่าง (Scaling factor) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g
- $\mu_{F,i,g}^s$ คือ ค่าเฉลี่ยปัจจัยขยายผลต่าง (Mean of scaling factor) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g
- LR คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

5.1.2.2 การปรับตัวของอัตราการครอสโอเวอร์

การปรับตัวของอัตราการครอสโอเวอร์ (Adaptation of crossover rate) ในงานวิจัยนี้ ใช้สมการถดถอยในการปรับพารามิเตอร์ เนื่องจากค่า CR ที่น้อยจะทำให้ค่าฟังก์ชันไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมมาก ส่งผลให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีในบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีเดิม ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ค่า CR น้อยลงเมื่อเทียบกับจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการดำเนินงานอัลกอริทึม โดยจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมในทุกปัญหาย่อยทุกเจเนอเรชัน เมื่อค่าสุ่มน้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่

เนื่องจากค่าอัตราการครอสโอเวอร์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของคำตอบที่มาก เมื่ออัลกอริทึมดำเนินงานใกล้ครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด จะกำหนดให้ค่าอัตราการครอสโอเวอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดที่ในบริเวณพิกัดนั้น ๆ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำสมการถดถอยจากแนวคิดของ Lin et al. (2015) มาดัดแปลงให้เหมาะสมกับอัลกอริทึมและปัญหาที่ใช้ในงานวิจัย แสดงสมการถดถอยในการปรับพารามิเตอร์ควบคุมดังสมการที่ 5-12 และ 5-13

$$CR_{i,g}^s = \begin{cases} 0.55 + \left[\frac{1}{\pi} \times \arctan \left(\frac{1 - \frac{NA_{i,g}^s}{RG} - 0.8}{0.1} \right) \right], & \text{if } rand_2 < \tau_{i,g}^s \\ CR_{i,g}^s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-12)$$

$$NA_{i,g}^s = \sum_{k=1}^g na_{i,k}^s \quad \forall s \in S \quad (5-13)$$

- เมื่อ $CR_{i,g}^s$ คือ อัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g
- $NA_{i,g}^s$ คือ จำนวนครั้งที่เกิดการปรับพารามิเตอร์ CR (Cumulative number of crossover probability adjustments) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g
- $na_{i,g}^s$ คือ เลขฐานสอง เท่ากับ 1 เมื่อเกิดการปรับพารามิเตอร์ CR ของกลยุทธ์ที่ s ในปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g
- RG คือ จำนวนเจเนอเรชันที่เหลือ (Remaining number of generations)

5.1.2.3 การปรับตัวของค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน

การปรับตัวของค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน (Adaptation of weight of base vectors) ในงานวิจัยนี้ นำแนวคิดการปรับพารามิเตอร์จาก jDE โดยจะทำการปรับพารามิเตอร์ควบคุมในทุกปัญหาย่อยทุกเจเนอเรชันด้วยการแจกแจงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Distribution) เมื่อค่าสุ่มน้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่

เนื่องจากไม่สามารถบ่งบอกได้ว่าค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐานควรเป็นเท่าใด จึงกำหนดให้ปรับตัวแบบกระจายเท่า ๆ กัน เพื่อเพิ่มความหลากหลายของรูปแบบคำตอบให้มากที่สุด แสดงสูตรการปรับพารามิเตอร์ควบคุมดังสมการที่ 5-14

$$Y_{i,g+1}^s = \begin{cases} rand_4, & \text{if } rand_3 < \tau_{i,g}^s \\ Y_{i,g}^s, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-14)$$

เมื่อ $Y_{i,g}^s$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน (Weight of base vectors) ของกลยุทธ์ที่ s ปัญหาย่อยที่ i ในเจเนอเรชันที่ g

5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ AMOEA/D-DE ในการแก้ปัญหา

การทำงานของ AMOEA/D-DE จะสุ่มเลือกกลยุทธ์ในการพัฒนาคำตอบมาดำเนินการตามวิธีของ DE Operator และ Polynomial Mutation จากนั้นประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกสตริง หากสตริงที่ถูกพัฒนาให้คำตอบที่ดีกว่าสตริงเดิมในปัญหาย่อยนั้น ๆ จะนำสตริงที่ถูกพัฒนาไปแทนที่สตริงเดิมและจะประเมินสตริงที่ถูกพัฒนากับค่าถ่วงน้ำหนักของสตริงข้างเคียง (ปัญหาย่อยข้างเคียง) ทุกตัว หากให้คำตอบที่ดีกว่าที่ปัญหาย่อยใด สตริงที่ถูกพัฒนาจะถูกนำไปแทนที่สตริงเดิมที่ปัญหาย่อยนั้น โดย AMOEA/D-DE มีขั้นตอนการดำเนินงานในการหาคำตอบ ดังนี้

การนำเข้าข้อมูล

- N คือ จำนวนประชากรหรือจำนวนปัญหาย่อย (Subproblem) โดยที่ $j = 1, 2, \dots, N$
- G คือ จำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยที่ $g = 1, \dots, G$
- Nb คือ จำนวนสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Number of weight vectors in the neighborhood)
- NR คือ จำนวนการแทนที่สูงสุดของสตริงคำตอบรุ่นลูกในแต่ละตัว (Maximum number of solutions replaced by each offspring)

$B(i)$ คือ เซตสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Neighborhood) ของปัญหาย่อยที่ i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$

μ_F คือ ค่าปัจจัยการขยายผลต่างเริ่มต้น (Initial Mean of Scaling factor)

CR คือ อัตราการครอสโอเวอร์เริ่มต้น (Initial Crossover rate)

γ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักเวกเตอร์พื้นฐาน (Weight of base vectors)

p_m คือ ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (Mutation probability)

η คือ ดัชนีการกระจายตัวของการแจกแจงแบบพหุนาม (Distribution index of polynomial mutation)

S คือ จำนวนกลยุทธ์

β คือ ค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของปัญหาย่อยที่ i กับความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ของปัญหาย่อยที่ $j \in B(i)$

α คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation rate)

LR คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. สร้างค่าถ่วงน้ำหนัก λ_k^i โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับ จำนวนประชากร (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (m)
2. คำนวณระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเวกเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก λ^i ทั้งหมด (Euclidean distances) ดังสมการที่ 5-15 และจัดเก็บสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยที่ i ลงในเซต $B(i)$

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (\lambda_k^i - \lambda_k^j)^2} \quad \forall i \in N \quad \forall j \in N \quad (5-15)$$

เมื่อ d_{ij} คือ ระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าถ่วงน้ำหนักสตริงที่ i กับสตริงที่ j โดย $i = 1, 2, \dots, N$ และ $j = 1, 2, \dots, N$

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) จากนั้นกำหนด g และ i เท่ากับ 1

4. กำหนดค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้นของทุกกลยุทธ์ ($p_{s,1}$) เท่ากับ $1/S$ และ $\tau_{i,0}^s = 0$

5. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น และจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และค่าต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จากนั้นให้กำหนดค่าเป้าหมาย $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

ขั้นตอนที่ 2 การปรับปรุง

ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$

1. สุ่มเลือกกลยุทธ์จากค่าความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ในเจเนอเรชันที่ g ($p_{s,g}$)
2. สุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับพารามิเตอร์ควบคุมทุกตัว หากค่าสุ่มของพารามิเตอร์ควบคุมใด น้อยกว่าค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ ($\tau_{i,g-1}^s$) ของเจเนอเรชันที่ $g-1$ จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมนั้น ในเจเนอเรชันที่ t แสดงดังสมการที่ 5-10 5-12 และ 5-14
3. ทำการนอร์มัลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และคัดเลือก s_{best} จากสตริงคำตอบข้างเคียง ($j \in B(i)$) ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 3-2
4. สุ่มเลือกสตริง r_1, r_2 และ r_3 จากสตริงข้างเคียงซึ่งเป็นสตริงที่มีระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับสตริงที่ i โดย $r_1 \neq r_2 \neq r_3$
5. ทำการพัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย) ด้วยกลยุทธ์ที่ s โดย $s = 1, 2, \dots, S$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-1 ถึง 5-3
6. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย (x^i) และเวกเตอร์กลายพันธุ์ (v^i) ด้วยวิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ โดยมีโอกาสเกิดการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่ n บนสตริง i เท่ากับค่าอัตราการครอสโอเวอร์ (CR_i^s) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง nc นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่เวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์เรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector: u^i) แสดงดังสมการที่ 5-16

$$u_n^i = \begin{cases} v_n^i, & \text{if } rand_{i,n} \leq CR_i^s \text{ or } n = rand_{i_i} \\ x_n^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad \forall n \in nc \quad \forall s \in S \quad (5-16)$$

เมื่อ u_n^i คือ จุดพิกัดของเวกเตอร์ทดลองหรือค่าเข้ารหัสสตริงทดลองตำแหน่งไพรอริตี (Priority) ที่ n บนสตริง i

7. ปรับปรุงเวกเตอร์ทดลองด้วยวิธีการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (Polynomial Mutation) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 5-17 และ 5-18 (กำหนดให้ $y = u^i$ โดยที่ $y = (y_1, \dots, y_{nc})$)

$$y'_n = \begin{cases} y_n + \sigma_n(y_n^{Up} - y_n^{Lw}) & \text{with probability } p_m \\ y_n & \text{with probability } 1 - p_m \end{cases} \quad (5-17)$$

$$\sigma_n = \begin{cases} (2 \times rand_\sigma)^{\frac{1}{\eta+1}} - 1 & \text{if } rand_\sigma < 0.5 \\ 1 - [2(1 - rand_\sigma)]^{\frac{1}{\eta+1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5-18)$$

เมื่อ y_n^{Up} คือ ค่าขอบเขตบน (Upper bounds) ของเวกเตอร์เป้าหมายตำแหน่งที่ n บนสตริงรุ่นใหม่
 y_n^{Lw} คือ ค่าขอบเขตล่าง (Lower bounds) ของเวกเตอร์เป้าหมายตำแหน่งที่ n บนสตริงรุ่นใหม่

8. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นใหม่ และทำการจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรอบนั้น ๆ จากนั้นให้ประเมินค่าเป้าหมาย (z_k^*) ถ้า $z_k^* > f_k(y')$ แล้ว $z_k^* = f_k(y')$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$

9. ทำการนอร์มัลไลซ์ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริง $j \in B(i)$, สตริงคำตอบลูก และค่าเป้าหมายด้วยค่า ff_k^{\max} และ ff_k^{\min} เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าระหว่างวัตถุประสงค์ได้ (จะได้ค่า $f_k^N(x^j)$, $f_k^N(y')$ และ z_k^* โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$)

10. กำหนดค่าจำนวนการแทนที่เท่ากับศูนย์ ($n_r = 0$) จากนั้นทำการประเมินค่าวัตถุประสงค์ของสตริง $j \in B(i)$ ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 3-2 โดยมีขั้นตอนการประเมินดังนี้

- ก. ทำงานการสุ่มลำดับการเข้าประเมินของสตริง $j \in B(i)$ โดยให้สตริง $j = i$ เป็นสตริงแรกที่ได้รับการประเมินก่อนเสมอ
- ข. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่ที่ต้องน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุด ($n_r < NR$) จึงจะเกิดการประเมินค่าวัตถุประสงค์ต่อในข้อถัดไป หากไม่ตรงเงื่อนไขข้ามไปข้อที่ 11
- ค. นำสตริงคำตอบรุ่นใหม่ แทนค่าด้วย λ^j ของสตริง j หากค่า λ^j ทำให้สตริงคำตอบรุ่นใหม่ได้ค่า $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N)$ ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j เดิม

ให้ทำการแทนที่สตริงคำตอบและค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเดิม (x^j) ในปัญหาย่อยที่ j ด้วยค่าของสตริงคำตอบรุ่นใหม่ (y')

ง. จบการประเมินค่าวัตถุประสงค์ของสตริง j จากนั้นกลับไปทำการประเมินต่อ ให้กับสตริงลำดับถัดไปในข้อที่ 10(ข) จนครบทุกสตริง $j \in B(i)$

11. คำนวณค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ ($\tau_{i,g}^s$) ของปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-8 และ 5-9 โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$

12. จบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i กำหนดให้ $i = i + 1$

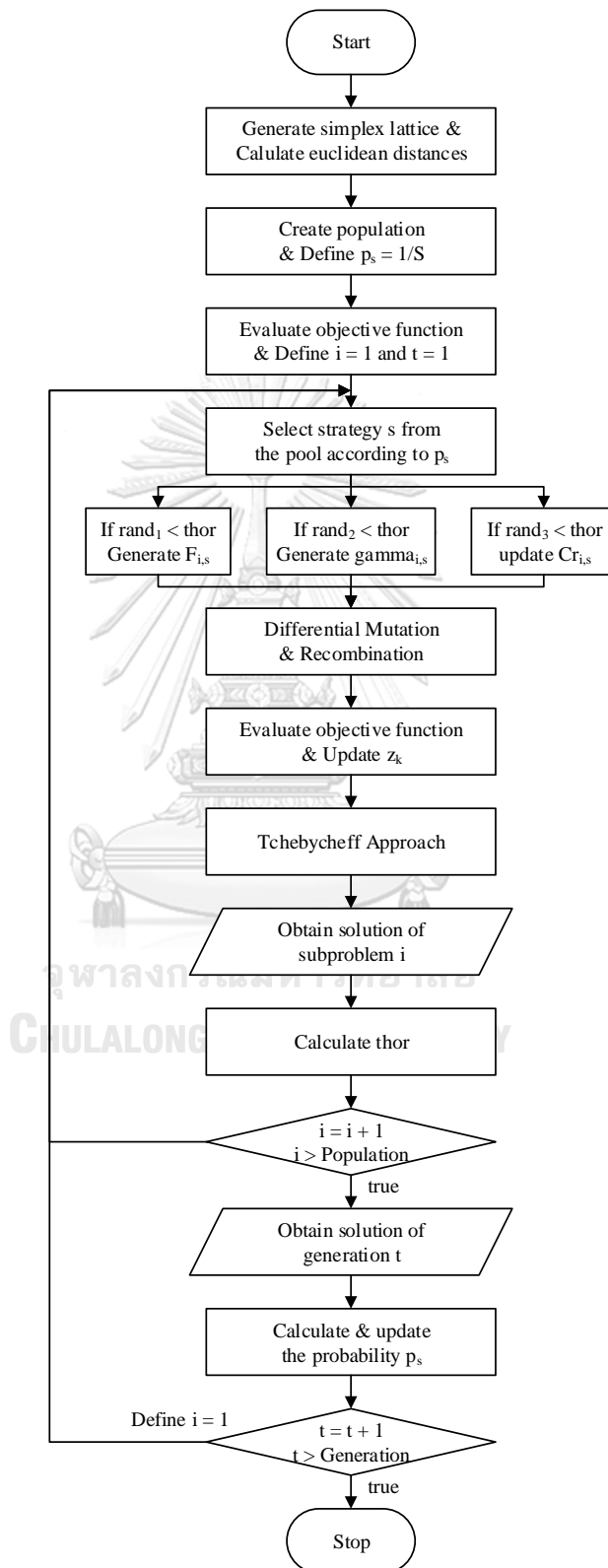
ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

1. จบการพัฒนาคำตอบของเจเนอเรชันที่ t ให้คำนวณค่าความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ในเจเนอเรชันที่ $g + 1$ ($p_{s,g+1}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-4 ถึง 5-7 โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$

2. หยุดการปรับปรุงคำตอบตามความพึงพอใจหรือตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด หากต้องการปรับปรุงคำตอบให้กำหนด $g = g + 1$ แล้วนำสตริงคำตอบที่ได้ในเจเนอเรชันก่อนหน้าไปทำการปรับปรุงต่อในขั้นตอนที่ 2 กำหนด $i = 1$

5.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ AMOEAD-DE

แสดงดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 5-1 ขั้นตอนการทำงานของ AMOEAD-DE

5.4 รหัสเทียม (Pseudo Code) ของ AMOEA/D-DE

- 1: Generate N weight vectors $\lambda^i = (\lambda_1^i, \lambda_2^i, \dots, \lambda_m^i)$, $i = 1, \dots, N$
- 2: For $i = 1, \dots, N$, define the set of indexes $B(i) = \{i_1, \dots, i_{Nb}\}$ where $\{\lambda^{i_1}, \dots, \lambda^{i_{Nb}}\}$ are the Nb closest weight vectors to λ^i (by the Euclidean distance)
- 3: Generate an initial population $P_0 = \{x^1, \dots, x^N\}$, $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_{nc}^i)$
- 4: Evaluate each individual in the initial population P_0 and associate x^i with λ^i
- 5: For $i = 1, \dots, N$, set $sbest^i = x^i$
- 6: Initialize $z^* = (z_1^*, \dots, z_m^*)$ by setting $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x^i)\}$, $k = 1, 2, \dots, m$
- 7: Set $g = 1$
- 8: For all strategies $s = 1, \dots, S$, set $p_{s,g} = 1/S$
- 9: For all $s = 1, \dots, S$ and $i = 1, \dots, N$, set $\tau_{i,0}^s = 0$
- 10: For all $SR_{i,j,g}^s$ and $DSR_{i,j,g}^s$ are set zero
- 11: **repeat**
- 12: **for** each parent vector x^i , $i = 1, \dots, N$ **do**
- 13: Select strategy s from the pool according to $p_{s,g}$
- 14: **if** $rand_1 < \tau_{i,g-1}^s$ **then** //Adaptation of F ($rand$ in $U[0,1]$)
- 15: Generate $F_{i,g}^s = \text{cauchy}(\mu_{F,i,g+1}^s, 0.1)$
- 16: **else**
- 17: $F_{i,g}^s = F_{i,g-1}^s$
- 18: **end if**
- 19: **if** $rand_2 < \tau_{i,g-1}^s$ **then** //Adaptation of CR
- 20: Calculate $CR_{i,g}^s = 0.55 + \left[\frac{1}{\pi} \times \arctan \left(\frac{1 - \frac{NA_{i,g}^s}{RG} - 0.8}{0.1} \right) \right]$
- 21: **else**
- 22: $CR_{i,g}^s = CR_{i,g-1}^s$
- 23: **end if**
- 24: **if** $rand_3 < \tau_{i,g-1}^s$ **then** //Adaptation of γ
- 25: Generate $\gamma_{i,g}^s = rand$
- 26: **else**
- 27: $\gamma_{i,g}^s = \gamma_{i,g-1}^s$

```

28:     end if
29:     If the tchebycheff value of  $x^j$  is better than  $sbest^i$ ,  $j \in B(i)$  then
30:         Set  $sbest^i = x^j$ 
31:     end if
32:     Generate a new solution  $y$  by DE operator (repair it if necessary)
33:     Apply polynomial mutation to produce  $y'$  (repair it if necessary)
34:     Update  $z^*$ ,  $z_k^* = \min(z_k^*, f_k(y'))$  and set  $n_r = 0$ 
35:     for each subproblem  $j \in B(i)$  do
36:         if  $n_r < NR$  then
37:             if  $g^{te}(y'|\lambda^j, z^*) \leq g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$  then
38:                 Replace  $x^j$  by  $y'$ , increment  $n_r$  and set  $SR_{i,j,g}^s = 1$ 
39:                 if  $g^{te}(y'|\lambda^j, z^*) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^*)$  then
40:                     Set  $DSR_{i,j,g}^s = 1$ //true is equal to one
41:                 end if
42:             end if
43:         end if
44:     end for
45:     if any  $DSR_{i,j,g}^s$  of subproblem  $j \in B(i)$  be true then
46:         Update  $\mu_{F,i,g+1}^s$ 
47:     else
48:          $\mu_{F,i,g+1}^s = \mu_{F,i,g}^s$ 
49:     end if
50:     Calculate all  $ASR_{i,j,g}^s$  and  $\tau_{i,g}^s$  for each strategy
51: end for
52: Calculate and update the probability  $p_{s,g+1}$  for each strategy
53:  $g = g + 1$ 
54: until  $g > G$ 

```


ตารางที่ 5 1 ซิมเพล็กซ์แลตทิซไชน์ (6 component and 1 degree with axial points) (ต่อ)

Subproblem (i)	Weight of objectives function k (λ_k^i)					
	1	2	3	4	5	6
7	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.08333	0.08333	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333
9	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
11	0.08333	0.08333	0.58333	0.08333	0.08333	0.08333
12	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-1 แสดงตัวอย่างการคำนวณและผลลัพธ์การคำนวณในตารางที่ 5-2

$$d_{11} = \sqrt{(0.08 - 0.08)^2 + (0.58 - 0.58)^2 + (0.08 - 0.08)^2 + \dots + (0.08 - 0.08)^2} = 0$$

$$d_{12} = \sqrt{(0.08 - 0)^2 + (0.58 - 0)^2 + (0.08 - 0)^2 + \dots + (0.08 - 0)^2} = 1.10$$

$$d_{13} = \sqrt{(0.08 - 0.08)^2 + (0.58 - 0.08)^2 + (0.08 - 0.08)^2 + \dots + (0.08 - 0.08)^2} = 0.71$$

$$d_{14} = \sqrt{(0.08 - 0)^2 + (0.58 - 0)^2 + (0.08 - 1)^2 + \dots + (0.08 - 0)^2} = 1.10$$

ตารางที่ 5-2 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ประชากร 12 ตัว

From To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.10	0.71	1.10	0.71	0.71	0.46	0.71	1.10	1.10	0.71	1.10
2	1.10	0	1.10	1.41	1.10	1.10	1.41	0.46	1.41	1.41	1.10	1.41
3	0.71	1.10	0	1.10	0.71	0.71	1.10	0.71	0.46	1.10	0.71	1.10
4	1.10	1.41	1.10	0	1.10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	0.46	1.41
5	0.71	1.10	0.71	1.10	0	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0.71	0.46
6	0.71	1.10	0.71	1.10	0.71	0	1.10	0.71	1.10	0.46	0.71	1.10

ตารางที่ 5 2 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ประชากร 12 ตัว (ต่อ)

From To	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	0.46	1.41	1.10	1.41	1.10	1.10	0	1.10	1.41	1.41	1.10	1.41
8	0.71	0.46	0.71	1.10	0.71	0.71	1.10	0	1.10	1.10	0.71	1.10
9	1.10	1.41	0.46	1.41	1.10	1.10	1.41	1.10	0	1.41	1.10	1.41
10	1.10	1.41	1.10	1.41	1.10	0.46	1.41	1.10	1.41	0	1.10	1.41
11	0.71	1.10	0.71	0.46	0.71	0.71	1.10	0.71	1.10	1.10	0	1.10
12	1.10	1.41	1.10	1.41	0.46	1.10	1.41	1.10	1.41	1.41	1.10	0

เมื่อได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าถ่วงน้ำหนักแล้ว ให้ทำการกำหนดสตริงข้างเคียง โดยเรียงค่าระยะห่างของค่าถ่วงน้ำหนักจากน้อยไปมากและตัดให้เหลือเท่ากับจำนวนสตริงข้างเคียงที่กำหนดไว้ข้างต้น จะได้สตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย แสดงดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 เซตสตริงข้างเคียงที่ประชากร 12 ตัว และสตริงข้างเคียง 4 ตัว

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

5.5.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนกจะใช้วิธีการสุ่มค่าพิกัดในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากร (N) ที่ความยาวเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) แสดงตัวอย่างค่าพิกัดจากการสุ่มดังตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Sub-problem	String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.23	0.53	0.98	0.39	0.87	0.06	0.95	0.27	0.45
2	2	0.71	0.12	0.92	0.35	0.37	0.65	0.22	0.83	0.91
3	3	0.34	0.79	0.38	0.52	0.05	0.08	0.42	0.72	0.88
4	4	0.12	0.25	0.68	0.93	0.14	0.81	0.63	0.37	0.21
5	5	0.70	0.03	0.74	0.18	0.97	0.16	0.44	0.03	0.56
6	6	0.17	0.71	0.76	0.96	0.76	0.78	0.27	0.83	0.86
7	7	0.94	0.59	0.67	0.75	0.16	0.14	0.46	0.55	0.97
8	8	0.84	0.21	0.27	0.48	0.34	0.81	0.40	0.37	0.39
9	9	0.89	0.73	0.52	0.08	0.11	0.79	0.75	0.01	0.84
10	10	0.92	0.85	0.84	0.67	0.35	0.47	0.20	0.98	0.50
11	11	0.55	0.57	0.95	0.82	0.10	0.63	0.11	0.16	0.74
12	12	0.00	0.78	0.58	0.51	0.64	0.37	0.26	0.98	0.10

เมื่อได้ค่าพิกัดของสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว ทำการถอดรหัส (Decoding) ให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ (Priority) โดยเรียงค่าพิกัดจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 สตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	Priority	Sequence
1	1	6 1 8 4 9 2 5 7 3	C A C B C A B C B
2	2	2 7 4 5 6 1 8 9 3	A C B B C A C C B
3	3	5 6 1 3 7 4 8 2 9	B C A B C B C A C
4	4	1 5 9 2 8 7 3 6 4	A B C A C C B C B
5	5	8 2 6 4 7 9 1 3 5	C A C B C C A B B
6	6	1 7 2 5 3 6 8 9 4	A C A B B C C C B

ตารางที่ 5 5 สตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

Subproblem	String	Priority	Sequence
7	7	6 5 7 8 2 3 4 1 9	C B C C A B B A C
8	8	2 3 5 8 9 7 4 6 1	A B B C C C B C A
9	9	8 4 5 3 2 7 6 9 1	C B B B A C C C A
10	10	7 5 6 9 4 3 2 1 8	C B C C B B A A C
11	11	5 7 8 1 2 6 9 4 3	B C C A A C C B B
12	12	1 9 7 6 4 3 5 2 8	A C C C B B B A C

5.5.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทที่ 2 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	1	7	3.6667	3.3333	20	3.5492	13.9259
2	2	7	4.0000	4.3333	19	3.4825	8.3704
3	3	8	4.3333	5.3333	18	3.1849	10.5926
4	4	8	4.3333	4.0000	19	4.2048	12.8148
5	5	7	4.0000	3.3333	20	3.9143	21.0370
6	6	7	4.6667	5.0000	19	4.6714	15.4815
7	7	7	4.6667	5.6667	17	3.3627	9.2593
8	8	6	4.6667	5.0000	17	4.3516	12.8148
9	9	7	4.6667	5.6667	19	4.3071	27.7037
10	10	7	4.6667	5.6667	16	3.8294	14.1481
11	11	9	4.6667	5.0000	18	3.6254	17.0370
12	12	7	5.3333	7.0000	19	4.3071	17.7037

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้นแล้ว ให้ทำการจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละวัตถุประสงค์ แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 5-7 (ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้บวกค่าคงที่เท่ากับ 0.0005 ให้กับค่า ff_k^{\max} เพื่อป้องกันกรณีส่วนหารเท่ากับ 0)

ตารางที่ 5-7 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

max/min	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
ff_k^{\max}	9.0005	5.3338	7.0005	20.0005	4.6719	27.7042
ff_k^{\min}	6	3.6667	3.3333	16	3.1849	8.3704

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว กำหนดให้ค่าเป้าหมาย (z_k^*) เท่ากับค่าต่ำสุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ff_k^{\min}) โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$ แสดงดังตารางที่ 5-8

ตารางที่ 5-8 ค่าเป้าหมายของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Target	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
z_k^*	6	3.6667	3.3333	16	3.1849	8.3704

5.5.4 การพัฒนาคำตอบ

การพัฒนาคำตอบของวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก จะพัฒนาคำตอบไปที่ละปัญหาย่อย โดยใช้วิธีการกลายพันธุ์ด้วยผลต่างตามรูปแบบของกลยุทธ์ที่กำหนด แสดงตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 ($g = 1$ และ $i = 1$) ดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มกลยุทธ์ที่ใช้สำหรับปัญหาย่อยที่ 1 เจเนอเรชันที่ 1 จากค่าความน่าจะเป็น $p_{s,1}$ ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $1/S$ หรือ 0.33 โดยที่ $s = 1, 2, \dots, S$ (ในตัวอย่างนี้ได้ค่าสุ่ม 0.7634 เมื่อเทียบกับค่าความน่าจะเป็นสะสม เลือกกลยุทธ์ที่ 3 มาดำเนินการสำหรับปัญหาย่อยที่ 1 เจเนอเรชันที่ 1)

2. ทำการสุ่มค่า 0 ถึง 1 ให้กับ $rand_1, rand_2$ และ $rand_3$ หากค่าใดน้อยกว่า $\tau_{i,g-1}^s$ จะเกิดการปรับตัวของพารามิเตอร์ควบคุม $F_{i,g}^s, CR_{i,g}^s$ และ $\gamma_{i,g}^s$ ตามลำดับ ดังสมการที่ 5-10 5-12 และ 5-14 ($\tau_{i,0}^s = 0, i = 1, 2, \dots, N$ และ $s = 1, 2, \dots, S$) ในตัวอย่างนี้ไม่เกิดการปรับตัว

3. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม e_1, e_2 และ e_3 ในช่วงระหว่าง $[1, Nb]$ โดยที่ $e_1 \neq e_2 \neq e_3$ เมื่อ e แทนลำดับของสตริงคำตอบในเซตของสตริงข้างเคียง ตัวอย่างเช่น ปัญหาย่อยที่ 1 มีสตริงข้างเคียงคือ 1 7 3 และ 5 หาก e_1 เท่ากับ 3 ค่า r_1 จะเท่ากับ 3 และหาก e_2 เท่ากับ 4 ค่า r_2 จะเท่ากับ 5 แสดงตัวอย่างค่าสุ่มดังตารางที่ 5-9

ตารางที่ 5-9 ค่าสุ่ม r_1, r_2 และ r_3 ของแต่ละสตริงเป้าหมายในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Subproblem	Target String	$e_1(r_1)$	$e_2(r_2)$	$e_3(r_3)$
1	1	3(3)	2(7)	4(5)

4. ทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และคัดเลือก sbest ของปัญหาย่อยที่ 1 ในเจเนอเรชันที่ 1 จากสตริงข้างเคียง ($j \in B(i)$) ด้วยวิธีเทบปีเซฟฟ์ คำนวณได้จากสมการที่ 3-2 แสดงดังตารางที่ 5-10 และ 3-11 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-10 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 หลังทำการนอร์มัลไล

$j \in B(1)$	String	f_1^N	f_2^N	f_3^N	f_4^N	f_5^N	f_6^N
1	1	0.3333	0	0	0.9999	0.2450	0.2873
3	3	0.6666	0.3999	0.5454	0.4999	0	0.1149
5	5	0.3333	0.1999	0	0.9999	0.4905	0.6552
7	7	0.3333	0.5998	0.6363	0.2500	0.1196	0.0460
-	z_k^N	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 5-11 การคัดเลือก sbest ด้วยเทบปีเซฟฟ์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

$j \in B(1)$	$g^{te}(x \lambda^1, z^*) = \max_{1 \leq k \leq m} \{\lambda_k^1 f_k(x) - z_k^* \}$					
1	<u>0.0833</u>	0.0278	0.0239	0.0204	0	0
7	<u>0.3499</u>	0.0530	0.0278	0.0208	0.0100	0.0038
3	<u>0.2333</u>	0.0555	0.0454	0.0417	0.0096	0
5	<u>0.1166</u>	0.0833	0.0546	0.0409	0.0278	0

จากตารางที่ 5-11 จะเห็นได้ว่าค่ามากที่สุดของเทบปีเซฟฟ์ในระดับแรกไม่มีค่าน้อยที่สุดใดที่เท่ากัน จึงสามารถประเมินค่าเทบปีเซฟฟ์ในระดับนี้ได้ โดยคำตอบที่ดีที่สุด คือคำตอบที่มีค่าเทบปีเซฟฟ์ที่น้อยที่สุด ในตัวอย่างนี้สตริงที่ 1 เป็นสตริงที่ดีที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักของปัญหาย่อยที่ 1 ในเจเนอเรชันที่ 1 เลือกสตริงที่ 1 เป็น sbest ของปัญหาย่อยที่ 1

5. ทำการพัฒนาค่าฟิตต์สตริงเป้าหมายด้วยกลยุทธ์ที่สุ่มได้จากข้อแรก จะได้ค่าฟิตต์สตริงกลายพันธุ์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-1 ถึง 5-3 แสดงตัวอย่างการคำนวณและผลลัพธ์สตริงกลายพันธุ์ดังตารางที่ 5-12

$$\begin{aligned} v_1^1 &= x_1^3 + \gamma(sbest_1^1 - x_1^3) + F(x_1^7 - x_1^5) \\ &= 0.34 + 0.5(0.23 - 0.34) + 2(0.94 - 0.70) \\ &= 0.41 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2^1 &= x_2^3 + \gamma(sbest_2^1 - x_2^3) + F(x_2^7 - x_2^5) \\ &= 0.79 + 0.5(0.53 - 0.79) + 2(0.59 - 0.03) \\ &= 0.94 \end{aligned}$$

ตารางที่ 5-12 ค่าฟิตต์ของสตริงกลายพันธุ์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

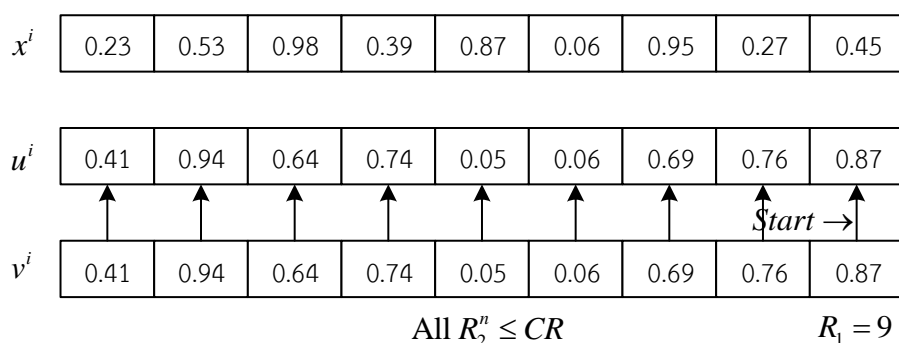
Sub-problem	Mutant String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.41	0.94	0.64	0.74	0.05	0.06	0.69	0.76	0.87

6. ทำการครอสโอเวอร์ระหว่างค่าฟิตต์ของสตริงเป้าหมายและค่าฟิตต์ของสตริงกลายพันธุ์ จะได้ค่าฟิตต์ของสตริงทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้วิธียูนิฟอร์มครอสโอเวอร์ (Uniform Crossover) แสดงดังสมการที่ 5-16 ซึ่งมีวิธีดังต่อไปนี้

- ก. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม R_1 ในช่วง 1 ถึง nc เพื่อระบุตำแหน่งแรกของการแลกเปลี่ยน โดยตัวอย่างนี้สุ่มได้ตำแหน่งที่ 9
- ข. ทำการสุ่มค่า R_2^n ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ $n = 1, 2, \dots, nc$ ถ้า $R_2^n \leq CR$ แล้วจะแทนที่ค่าฟิตต์ของสตริงเป้าหมาย (x_n^i) ด้วยค่าฟิตต์ของสตริงกลายพันธุ์ (v_n^i) แสดงค่าสุ่มของปัญหาย่อยที่ 1 และตัวอย่างการแลกเปลี่ยนค่าฟิตต์ ดังตารางที่ 5-13 และภาพที่ 5-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-13 ค่าสุ่มของการครอสโอเวอร์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Sub-problem	R_2^1	R_2^2	R_2^3	R_2^4	R_2^5	R_2^6	R_2^7	R_2^8	R_2^9	R_1
1	0.16	0.97	0.96	0.49	0.80	0.14	0.42	0.92	0.79	9



ภาพที่ 5-2 การแลกเปลี่ยนค่าพิกัดของปัญหาย่อยที่ 1 ในเจเนอเรชันที่ 1

ในตัวอย่างนี้กำหนดอัตราครอสโอเวอร์เริ่มต้นเท่ากับ 1 ดังนั้น สตริงคำตอบทดลองจึงเท่ากับ สตริงคำตอบปลายพันธุ์ แสดงสตริงคำตอบทดลองดังตารางที่ 5-14

ตารางที่ 5-14 ค่าพิกัดของสตริงทดลองในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Sub-problem	Trial String	Priority								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0.41	0.94	0.64	0.74	0.05	0.06	0.69	0.76	0.87

7. ปรับปรุงสตริงทดลองด้วยวิธีการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (Polynomial Mutation) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5-17 และ 5-18 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 5-15 (ในตัวอย่างนี้ กำหนดให้ค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างเท่ากับ 1 และ 0 ตามลำดับ)

ตารางที่ 5-15 ค่าพิกัดของสตริงทดลองในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 หลังกลายพันธุ์ (PM)

$p_m = 0.11$	Priority								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$rand < p_m$	0.81	0.84	0.13	0.06	0.63	0.33	0.56	0.28	0.64
$rand_\sigma$	-	-	-	0.09	-	-	-	-	-
y'	0.41	0.94	0.64	0.67	0.05	0.06	0.69	0.76	0.87

8. ทำการถอดรหัสของสตริงทดลองให้อยู่ในรูปแบบของค่าความสำคัญ โดยเรียงค่าพิกัดจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 5-16

ตารางที่ 5-16 สตริงคำตอบรูนลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Offspring	Priority	Sequence
1.1	5 6 1 3 4 7 8 9 2	B C A B B C C C A

หมายเหตุ: สตริงที่ a.b คือ สตริงรูนลูกของปัญหาย่อยที่ b ในเจเนอเรชันที่ a

9. ทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรูนลูก แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรูนลูก ดังตารางที่ 5-17

ตารางที่ 5-17 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรูนลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Offspring	$f_1(y')$	$f_2(y')$	$f_3(y')$	$f_4(y')$	$f_5(y')$	$f_6(y')$
1.1	7	4.6667	5.6667	17	3.6405	17.4815

เมื่อได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งสตริงคำตอบเริ่มต้นและสตริงคำตอบรูนลูกแล้ว ให้ทำการจัดเก็บค่าสูงสุด (ff_k^{\max}) และต่ำสุด (ff_k^{\min}) ของแต่ละวัตถุประสงค์ในรอบนั้น ๆ ดังตารางที่ 5-18

ตารางที่ 5-18 ค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

max/min	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
ff_k^{\max}	9.0005	5.3338	7.0005	20.0005	4.6719	27.7042
ff_k^{\min}	6	3.6667	3.3333	16	3.1849	8.3704

เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว ให้นำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (z_k^*) หาก $z_k^* > f_k(y')$ จะกำหนดให้ z_k^* เท่ากับ $f_k(y')$ โดยที่ $k = 1, 2, \dots, m$ แสดงดังตารางที่ 5-19

ตารางที่ 5-19 ค่าเป้าหมายของแต่ละวัตถุประสงค์ในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

Target	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
z_k^*	6	3.6667	3.3333	16	3.1849	8.3704

10. ทำการนอร์มัลไลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อยที่ i ($j \in B(i)$), สตริงคำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมายด้วยค่า ff_k^{\max} และ ff_k^{\min} แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 5-20

ตารางที่ 5-20 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 หลังทำการนอร์มัลไล

$j \in B(1)$	String	f_1^N	f_2^N	f_3^N	f_4^N	f_5^N	f_6^N
1	1	0.3333	0	0	0.9999	0.2450	0.2873
3	3	0.6666	0.3999	0.5454	0.4999	0	0.1149
5	5	0.3333	0.1999	0	0.9999	0.4905	0.6552
7	7	0.3333	0.5998	0.6363	0.2500	0.1196	0.0460
-	1.1	0.3333	0.5998	0.6363	0.2500	0.3064	0.4713
-	z_k^N	0	0	0	0	0	0

5.5.5 การหาค่าที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้ บางวัตถุประสงค์มีค่าเป็นจำนวนเต็มจึงทำให้เกิดสตริงคำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์นั้น ๆ เท่ากันเป็นจำนวนมาก แต่ค่าวัตถุประสงค์อื่น ๆ มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้วิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบปกติทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงนำวิธีการเทบปีเซฟฟ์มาทำการประยุกต์ เรียกว่าวิธีการเทบปีเซฟฟ์แบบไล่ระดับความสำคัญ โดยให้ค่าที่มากมีความสำคัญมากถูกนำมาเปรียบเทียบกับก่อน แสดงตัวอย่างในหัวข้อที่ 3.1.2

การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละค่าถ่วงน้ำหนัก โดยจะประเมินเฉพาะสตริง j ที่อยู่ใน $B(i)$ หรือสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยที่ i เท่านั้น การประเมินจะทำได้เฉพาะสตริง (สุ่มลำดับการประเมินโดยให้สตริงที่ $j = i$ เป็นสตริงแรกที่ได้ประเมินก่อนเสมอ) แสดงขั้นตอนการหาค่าตอบที่ดีที่สุด ดังต่อไปนี้

1. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่ของสตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยปัจจุบัน ต้องมีค่าน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุด ($n_r < NR$) หากไม่ตรงเงื่อนไขจะจบการประเมินในปัญหาย่อยปัจจุบันทันที

2. ให้ทำการคำนวณค่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j และคำนวณค่า $g^{te}(y^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริงรุ่นลูกที่ค่าถ่วงน้ำหนักเดียวกับสตริง j

3. ทำการเปรียบเทียบค่ามากที่สุดของ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(y^j|\lambda^j, z^N)$ หากค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมน้อยกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงรุ่นลูก ($g^{te}(y^j|\lambda^j, z^N) < g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$) จะกำหนดให้ลำดับ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และค่า $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ ของสตริง j เท่ากับของสตริงรุ่นลูก

แต่หาก $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N) = g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ จะต้องทำการเปรียบเทียบค่ามากที่สุดรองลงมาของ $g^{te}(x^j|\lambda^j, z^N)$ และ $g^{te}(y'|\lambda^j, z^N)$ ไปทีละคู่ แสดงตัวอย่างการหาคำตอบที่ดีที่สุดเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 (เรียงค่าเทบปีเซฟฟ์จากมากไปน้อย) ดังตารางที่ 5-21

ตารางที่ 5-21 การหาคำตอบที่ดีที่สุดในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

$j \in B(1)$	R_j	Conditions	$g^{te}(x^j \lambda^j, z^N)$		$g^{te}(y' \lambda^j, z^N)$		SR(DSR)
1	0.9621	pass	0.0833	0.0278	0.3499	0.0530	False
			0.0239	0.0204	0.0393	0.0278	(False)
			0	0	0.0255	0.0208	
3	0.1248	pass	0.2916	0.0555	0.1458	0.0530	True
			0.0454	0.0333	0.0500	0.0393	(True)
			0.0096	0	0.0278	0.0255	
5	0.6534	fail	-	-	-	-	False
			-	-	-	-	(False)
			-	-	-	-	
7	0.7653	fail	-	-	-	-	False
			-	-	-	-	(False)
			-	-	-	-	

หมายเหตุ: SR คือ การแทนที่ของคำตอบ (Solution Replacement) และ DSR คือ การแทนที่ของคำตอบที่ครอบงำ (Dominate Solution Replacement)

จากตารางที่ 5-21 ซึ่งเป็นการหาคำตอบที่ดีที่สุดเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 จะเห็นว่าสตริงคำตอบที่ 1 และ 3 เท่านั้น ที่ผ่านเงื่อนไขการเข้าประเมินเนื่องจากจำนวนการแทนที่ของคำตอบน้อยกว่าจำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด ($n_r < NR$)

จากการเปรียบเทียบค่า $g^{te}(y'|\lambda^1, z^N)$ และ $g^{te}(x^1|\lambda^1, z^N)$ ของสตริงคำตอบที่ 1 พบว่าสตริงคำตอบเดิมให้ค่าเทบปีเซฟฟ์ที่ดีกว่าสตริงคำตอบรุ่นใหม่ จึงไม่เกิดการแทนที่คำตอบ ส่วนค่า $g^{te}(y'|\lambda^3, z^N)$ และ $g^{te}(x^3|\lambda^3, z^N)$ ของสตริงคำตอบที่ 3 สตริงคำตอบรุ่นใหม่ให้ค่าเทบปีเซฟฟ์ที่ดีกว่าของสตริงคำตอบเดิม จึงเกิดการแทนที่คำตอบแบบครอบงำ

1. ทำการปรับปรุงค่าเฉลี่ยปัจจัยขยายผลต่าง ($\mu_{F,i,g+1}^r$) ของปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g ตามสมการที่ 5-11

2. คำนวณค่าสัดส่วนความสำเร็จในการสร้างคำตอบรุ่นใหม่ ($\tau_{i,g}^3$) ของปัญหาย่อยที่ i เจเนอเรชันที่ g ดังสมการที่ 5-8 และ 5-9 แสดงตัวอย่างการคำนวณของปัญหาย่อยที่ 1 เจเนอเรชันที่ 1 กลยุทธ์ที่ 3 สตริงคำตอบที่ 3 (สตริงข้างเคียง) ดังนี้

$$ASR_{1,3,1}^3 = \frac{1}{2} [(0 + 0 + 1) + (0 + 0 + 1)] = 0.5$$

$$1 - \tau_{1,1}^3 = \left[(1 - 0.5) \cdot \frac{(1 \times 0)}{1} \right] + \left[0.5 \cdot \frac{1 \times (0 + 0 + 1 + \dots + 0)}{1 \times 1} \right]$$

$$\tau_{1,1}^3 = 0.5$$

3. เมื่อจบการพัฒนาและหาคำตอบที่ดีที่สุดของทุกปัญหาย่อยแล้ว ให้ทำการคำนวณและปรับปรุงค่าความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ ดังสมการที่ 5-5 ถึง 5-7

แสดงชุดสตริงคำตอบหลักและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการพัฒนาคำตอบในทุก ๆ ปัญหาย่อย ณ เจเนอเรชันที่ 1 แล้ว ดังตารางที่ 5-22 และ 3-23

ตารางที่ 5-22 สตริงคำตอบหลักหลังจบเจเนอเรชันที่ 1

Subproblem	String	Priority	Sequence
1	1.5	6 1 8 4 5 9 2 7 3	C A C B B C A C B
2	2	2 7 4 5 6 1 8 9 3	A C B B C A C C B
3	1.1	5 6 1 3 4 7 8 9 2	B C A B B C C C A
4	1.4	6 4 8 2 7 3 1 9 5	C B C A C B A C B
5	5	8 2 6 4 7 9 1 3 5	C A C B C C A B B
6	1.6	1 7 5 6 2 4 9 8 3	A C B C A B C C B
7	1.7	6 5 1 7 8 4 3 2 9	C B A C C B B A C
8	1.8	5 2 7 4 1 6 9 3 8	B A C B A C C B C
9	1.9	5 8 7 6 1 4 3 9 2	B C C C A B B C A
10	1.10	2 6 4 7 8 5 1 3 9	A C B C C B A B C
11	1.11	7 5 1 2 6 8 4 9 3	C B A A C C B C B
12	1.12	5 7 2 1 4 6 8 9 3	B C A A B C C C B

ตารางที่ 5-23 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลักหลังจบเงื่อนไขที่ 1

Subproblem	String	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	$f_4(x)$	$f_5(x)$	$f_6(x)$
1	1.5	8	3.3333	3.6667	20	3.1492	9.0370
2	2	7	4.0000	4.3333	19	3.4825	8.3704
3	1.1	7	4.6667	5.6667	17	3.6405	17.4815
4	1.4	7	3.6667	3.3333	19	2.8825	6.8148
5	5	7	4.0000	3.3333	20	3.9143	21.0370
6	1.6	8	4.3333	4.0000	18	3.4825	8.5926
7	1.7	7	4.3333	5.3333	17	2.6960	6.3704
8	1.8	7	5.0000	6.0000	17	3.8103	9.9259
9	1.9	8	4.6667	5.6667	17	3.6405	10.5926
10	1.1	8	4.6667	5.0000	18	3.2992	6.8148
11	1.11	8	4.3333	4.0000	18	3.3159	11.4815
12	1.12	7	5.0000	5.3333	17	3.5603	10.1481

5.5.6 การประเมินจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา

จำนวนคำตอบที่เกิดการแทนที่ (The Number of Solution Replacement: NSR) และจำนวนคำตอบที่เกิดการพัฒนา (The Number of Dominate Solution Replacement: NDSR) เป็นตัวชี้วัดการพัฒนาคำตอบในแต่ละเงื่อนไข หากมีค่าเข้าใกล้จำนวนประชากร แสดงว่าคำตอบมีการพัฒนาในทุก ๆ ปัญหาย่อย แต่หากมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าไม่เกิดการพัฒนาคำตอบเลยในเงื่อนไขนั้น ๆ

โดยกำหนดให้ “True” มีค่าเท่ากับ 1 และ “False” มีค่าเท่ากับ 0 ที่ $g = 1, 2, \dots, G$, $i = 1, 2, \dots, N$ และ $j = 1, 2, \dots, N$ แสดงจำนวนคำตอบที่เกิดการแทนที่และเกิดการพัฒนาในแต่ละเงื่อนไข ดังสมการที่ 5-19 และ 5-20 ตามลำดับ

$$NSR_g = \sum_{j=1}^N \min \left(1, \sum_{i=1}^N SR_{i,j,g} \right) \quad \forall g \in G \quad (5-19)$$

$$NDSR_g = \sum_{j=1}^N \min \left(1, \sum_{i=1}^N DSR_{i,j,g} \right) \quad \forall g \in G \quad (5-20)$$

5.5.7 การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึม

ในแต่ละเจเนอเรชันจะประกอบไปด้วยปัญหาย่อยจำนวนเท่ากับจำนวนประชากร เมื่อจบการพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ i แล้ว จะกลับไปพัฒนาคำตอบของปัญหาย่อยที่ $i + 1$ โดยใช้ชุดสตริงหลักที่พัฒนาแล้ว ด้วยวิธีในหัวข้อที่ 5.5.4 ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบทุกปัญหาย่อย จึงจะเริ่มเจเนอเรชันถัดไปด้วยชุดสตริงหลักที่พัฒนาแล้ว โดยจะเริ่มต้นที่ปัญหาย่อยที่ 1 ในหัวข้อที่ 5.5.4 เช่นกัน ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนด

การหยุดดำเนินงานของอัลกอริทึมจะใช้จำนวนเจเนอเรชัน, NSR หรือ NDSR เป็นตัวกำหนด เมื่ออัลกอริทึมดำเนินงานครบจำนวนเจเนอเรชันที่กำหนดหรือ NDSR เท่ากับ 0 ติดต่อกันหลายเจเนอเรชัน จะให้อัลกอริทึมหยุดการดำเนินงาน

5.6 สรุปอัลกอริทึม AMOEA/D-DE

ปัญหาแบบมัลติวัตถุประสงค์ (MaOPs) เป็นปัญหาที่มีจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากกว่า 3 ฟังก์ชันขึ้นไป โดยแต่ละวัตถุประสงค์อาจขัดแย้งหรือคล้ายตามกัน จึงทำให้อัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (MOEAs) ให้ประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและคำตอบปลายสุด (Extremely solution) ของทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดีไม่เท่าที่ควร แนวคิดการจำแนกปัญหาหรือแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย (Decomposition) จึงถูกนำมาใช้ เพื่อกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญของแต่ละวัตถุประสงค์ในแต่ละปัญหาย่อย ทำให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาย่อยที่ค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญต่าง ๆ ได้

MOEA/D เป็นอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาแบบมัลติวัตถุประสงค์ (MaOEA) และใช้การครอสโอเวอร์ในการพัฒนาคำตอบ ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาที่มีค่าไม่ต่อเนื่อง จึงถูกปรับใช้กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) เข้ามาแทนการพัฒนาคำตอบแบบเดิม เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาที่มีค่าต่อเนื่อง (Continuous MaOPs) หรือรูปแบบของคำตอบจำนวนมากได้ดียิ่งขึ้น โดยเรียกอัลกอริทึมนี้ว่า MOEA/D

กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) เป็นกระบวนการในการค้นหาเวกเตอร์คำตอบใหม่ (เวกเตอร์ทดลอง) โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การกลายพันธุ์ด้วยผลต่าง และการรีคอมบินชัน ซึ่งในส่วนแรก จะสร้างเวกเตอร์คำตอบกลายพันธุ์ด้วย F เท่าของผลต่างระหว่างเวกเตอร์สุ่มสองเวกเตอร์ และในส่วนที่สอง จะทำการครอสโอเวอร์ด้วยความน่าจะเป็น CR ระหว่างเวกเตอร์คำตอบกลายพันธุ์กับเวกเตอร์คำตอบเดิม เพื่อสร้างเวกเตอร์คำตอบใหม่ให้เกิดคำตอบที่หลากหลาย จะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ F และ CR มีผลกระทบต่อค่าจุดพิคกิ้งของเวกเตอร์คำตอบอย่างมาก หาก F มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จะทำให้ค่าจุดพิคกิ้งของเวกเตอร์กลายพันธุ์เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงระยะของค่าผลต่างเวกเตอร์สุ่ม ซึ่งเสี่ยงต่อการเจอคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม และ

ไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นได้ แต่หาก F มีค่ามากกว่า 1 ก็จะทำให้จุดพิกต์กลายพันธุ์อยู่ห่างจากจุดพิกต์ของเวกเตอร์เดิมออกไปมาก จึงไม่สามารถค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงที่ดีกว่าคำตอบเดิมได้ ส่วนของอัตราการครอสโอเวอร์ CR หากมีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้เวกเตอร์คำตอบใหม่เป็นคำตอบเดียวกับเวกเตอร์กลายพันธุ์ แต่หาก CR เท่ากับ 0 จะทำให้เวกเตอร์คำตอบใหม่ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเป็นคำตอบเดียวกับเวกเตอร์เดิม จะเห็นได้ว่า หาก CR มีค่าเข้าใกล้ 1 ก็จะทำให้จุดพิกต์ของเวกเตอร์ส่วนใหญ่เป็นของเวกเตอร์กลายพันธุ์ ซึ่งอาจทำให้เสียจุดพิกต์ที่ให้คำตอบที่ดีไป หรือหากค่า CR เข้าใกล้ 0 ก็จะทำให้เกิดคำตอบที่ไม่แตกต่างจากเวกเตอร์คำตอบเดิม จึงเสี่ยงต่อการติดในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ F และ CR ให้เป็นค่าคงที่ จึงเป็นหนึ่งในข้อจำกัดของ DE Operator ที่ทำให้กระบวนการพัฒนาคำตอบใช้งานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

การกลายพันธุ์ด้วยผลต่างของ DE Operator มีหลากหลายทางเลือกในการค้นหาคำตอบ ซึ่งถูกเรียกว่า กลยุทธ์ โดยแต่ละกลยุทธ์จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เช่น DE/rand/1 จะให้คำตอบที่หลากหลาย เกิดคำตอบที่กระจายออกแต่ไม่มีทิศทางที่ชัดเจน DE/best/1 จะให้คำตอบในบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดที่มีอยู่ อาจทำให้เจอคำตอบที่ดีขึ้นหรืออาจทำให้ไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นได้ เนื่องจากติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม และ DE/rand-to-best/1 เป็นการผสมระหว่างกลยุทธ์ทั้งสองข้างต้น ทำให้เกิดคำตอบที่กระจายตัว แต่ยังคงอยู่ในบริเวณที่ไม่ห่างจากคำตอบที่ดีมากนัก

จากที่กล่าวมา AMOEA/D-DE จึงถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ข้างต้น โดยแนวคิดการปรับกลยุทธ์และค่าพารามิเตอร์ของ AMOEA/D-DE ถูกประยุกต์และพัฒนามาจาก SaDE, jDE และ JADE ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวที่ใช้ DE Operator ในการพัฒนาคำตอบ ร่วมกับ MODE/D ทำให้อัลกอริทึมสามารถปรับเปลี่ยนกลยุทธ์และค่าพารามิเตอร์เมื่อระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของคำตอบในทิศทางที่ดีขึ้นได้ โดย AMOEA/D-DE จะมีกลยุทธ์ในการค้นหาคำตอบ 3 แบบ ได้แก่ DE/rand/1 ช่วยให้คำตอบกระจายตัว ได้คำตอบที่หลากหลาย, DE/sbest/1 ช่วยค้นหาคำตอบที่ดีกว่าในบริเวณของใกล้เคียงของคำตอบที่ดี และ DE/rand-to-sbest/1 ช่วยค้นหาคำตอบในบริเวณใกล้เคียงคำตอบที่ดี แต่ยังคงการกระจายตัวของคำตอบ ซึ่งอัลกอริทึมจะทำการสุ่มเลือกกลยุทธ์ที่ทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ดี มาใช้พัฒนาคำตอบตามสถานการณ์ต่าง ๆ ที่ระบบเจอ และเมื่อระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง อัลกอริทึมจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยการสุ่มค่า F จากการแจกแจงแบบโคชี (Cauchy distribution) เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของ F ที่ดี ซึ่งระบบได้จดจำไว้ แต่ยังคงมีโอกาสสุ่มได้ค่า F ที่แตกต่างจากค่าเฉลี่ย โดยค่า F ที่หลากหลายจะทำให้เกิดระยะการเปลี่ยนแปลงจุดพิกต์ที่เหมาะสมกับแต่ละสถานการณ์ของระบบได้ และ AMOEA/D-DE ยังใช้สมการถดถอยในการปรับค่า CR ซึ่งจะกำหนดให้ CR มีค่ามากในเจเนอเรชันแรกและลดลงตามลำดับ เพื่อให้เจเนอเรชันท้าย ๆ ของการดำเนินงานอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบที่ดีกว่าใน

บริเวณจุดพิกัดใกล้เคียงของจุดพิกัดของเวกเตอร์คำตอบเดิมได้ (เพิ่มความละเอียดในการเปลี่ยนแปลงจุด)

ด้านความซับซ้อนในการดำเนินงาน อัลกอริทึมโดยทั่วไปจะคัดเลือกคำตอบด้วย Non-dominated sorting ร่วมกับ Crowding distance ตัวอย่างเช่น MODE และ NSGA II ซึ่งมีความซับซ้อนของการดำเนินงานในแต่ละเจเนอเรชันเท่ากับ $O(mN^2)$ เมื่อ m คือจำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ N คือจำนวนประชากร ส่วนอัลกอริทึมแบบจำแนกปัญหาจะคัดเลือกคำตอบด้วยเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff approach) ตัวอย่างเช่น MOEA/D และ MODE/D รวมถึง AMOEAD-DE ซึ่งอัลกอริทึมประเภทนี้จำเป็นต้องจัดเก็บค่าเป้าหมาย (z^*) โดยคิดเป็นขนาดเท่ากับ $O(m)$ และทำการประเมินเพื่อคัดเลือกคำตอบในแต่ละปัญหาย่อยเป็นจำนวน Nb ปัญหาย่อยข้างเคียง โดยมีจำนวนการแทนที่คำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละปัญหาย่อยเท่ากับ NR และ $NR \leq Nb$ จึงทำให้มีความซับซ้อนของการดำเนินงานในแต่ละเจเนอเรชันเท่ากับ $O(mN \cdot [NR, Nb])$ เมื่อ N คือจำนวนปัญหาย่อยหรือจำนวนประชากร Nb คือจำนวนปัญหาย่อยข้างเคียงหรือสตริงคำตอบข้างเคียง $[a, b]$ คือช่วงของจำนวนเต็มที่มีค่าตั้งแต่ a ถึง b จะเห็นได้ว่าหากอัลกอริทึมทั้งสองประเภทกำหนดจำนวนประชากรเท่ากัน อัลกอริทึมแบบจำแนกปัญหาจะมีความซับซ้อนที่น้อยกว่า แสดงสัดส่วนความซับซ้อนในการดำเนินงานระหว่างอัลกอริทึมทั้งสองประเภทในแต่ละเจเนอเรชัน ดังนี้

$$\frac{O(mN \cdot [NR, Nb])}{O(mN^2)} = \frac{O([NR, Nb])}{O(N)}$$

เมื่อ Nb มีค่าน้อยกว่า N อัลกอริทึมแบบจำแนกปัญหา จะมีความซับซ้อนในการดำเนินงานที่น้อยกว่าอัลกอริทึมโดยทั่วไปในแต่ละเจเนอเรชัน

ในกรณีที่ เป็นอัลกอริทึมแบบจำแนกปัญหาด้วยกัน อัลกอริทึมที่เกิดจำนวนการแทนที่คำตอบมากกว่า (สามารถพัฒนาคำตอบใหม่ที่ดียิ่งได้มากกว่า) ในปัญหาย่อยนั้น ๆ จะมีความซับซ้อนน้อยกว่า เนื่องจากอัลกอริทึมจะหยุดการประเมินในปัญหาย่อยนั้นทันที เมื่อ $n_r = NR$ โดยที่ n_r คือจำนวนการแทนที่คำตอบที่เกิดขึ้นของปัญหาย่อยใด ๆ

บทที่ 6

การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ในบทนี้ นำเสนอตัวอย่างและวิธีการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์ของแต่ละอัลกอริทึม โดยใช้ตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม เรียงตามลำดับความสำคัญ ดังนี้ Generational Distance, Ratio of Non-Dominated Solution I (Self-comparison), Inverted Generational Distance, Ratio of Non-Dominated Solution II (Pareto-optimum comparison) และ Distribution and Spread

6.1 การทดสอบค่าพารามิเตอร์

เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยนี้มีหลากหลายข้อจำกัดที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทดสอบค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมให้เหมาะสมสำหรับแต่ละปัญหา เพื่อให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้ดีที่สุด โดยจะทำการทดสอบพารามิเตอร์ของแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ General Full Factorial Design โดยผู้วิจัยแบ่งการทดลองเป็น 4 ส่วน ตามจำนวนของพารามิเตอร์ที่ทำการทดสอบในแต่ละอัลกอริทึม ดังนี้ 1) จำนวน 2 พารามิเตอร์ (ได้แก่ MOEA/D และ MODE), 2) จำนวน 4 พารามิเตอร์ (ได้แก่ MODE/D) และ 3) จำนวน 5 พารามิเตอร์ (ได้แก่ AMOEAD-DE) แสดงพารามิเตอร์ทั้งหมดของแต่ละอัลกอริทึม ดังตารางที่ 6-1

ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์จำนวนประชากร (N) และค่าพารามิเตอร์ของการกลายพันธุ์แบบพหุนาม (p_m และ η) ที่ใช้สำหรับการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งเป็นค่าที่ถูกอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ๆ และปรับให้เหมาะสมกับวิธีการในงานวิจัยนี้

Peng, Zhang, and Li (2009) ใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 100 และ S. M. Venske et al. (2014) กำหนดค่า $p_m = 1/nc$ และ $\eta = 20$

ตารางที่ 6-1 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมในงานวิจัย

Algorithm	Parameter	Value	Reference
MOEA/D	N	133	Based on SLD
	Nb	Experiment	
	NR		
MODE	N	133	Equivalent to other algorithm
	F	Experiment	
	CR		
MODE/D	N	133	Based on SLD
	Nb	Experiment	
	NR		
	F		
	CR		
	p_m	$1/nc$	S. M. Venske et al. (2014)
	η	20	
AMOEAD-DE	N	133	Based on SLD
	Nb	Experiment	
	NR		
	μ_F		
	CR		
	γ	0.5	S. M. Venske et al. (2014)
	p_m	$1/nc$	
	η	20	
	β	Experiment	
	α		
	LR		

หมายเหตุ: SLD คือ Simplex lattice design

6.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม Minitab 17 มีดังนี้

1. สร้างตารางการทดลองแบบ General Full Factorial Design โดยกำหนดจำนวนปัจจัยเป็นจำนวนพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่จะทำการทดสอบ ที่ปัจจัยละ 2 ระดับ และกำหนดจำนวนทำซ้ำเท่ากับ 3 รอบ

2. ดำเนินงานอัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่จะทำการทดสอบ

3. นำค่าตัวชี้วัดทั้ง 5 ตัว ซึ่งได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรม มาเป็นค่าตัวแปรตอบสนอง

4. ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธีตัดปัจจัยแบบย้อนกลับ (Analysis of Variance with Backward Elimination) และทำการทดสอบความแตกต่างด้วยวิธีฟิชเชอร์แพร์ไวส์ (Fisher pairwise comparisons test) ด้วยโปรแกรมทีละ 1 ตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) โดยเรียงตามลำดับความสำคัญข้างต้น และพิจารณาตามหลักการต่อไปนี้

ก. หากปัจจัยร่วม (Interaction factor) ของค่าตัวแปรตอบสนองใด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p - value < \alpha$, โดยที่ $\alpha = 0.05$) จะตัดสนใจยอมรับพารามิเตอร์ที่มีปัจจัยกระทบร่วมชุดนั้นทั้งหมด โดยเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด

ข. หากปัจจัยร่วมของค่าตัวแปรตอบสนองไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p - value \geq \alpha$, โดยที่ $\alpha = 0.05$) จะตัดสนใจไม่ยอมรับพารามิเตอร์ที่มีปัจจัยกระทบร่วมชุดนั้น และพิจารณาต่อกับปัจจัยหลัก (Main factor) ในแบบเดียวกัน

ค. หากทั้งปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักของค่าตัวแปรตอบสนองไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ให้ทำการพิจารณาค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ถัดไปจนกว่าจะยอมรับ หากไม่มีค่าที่สามารถยอมรับได้ ให้เลือกปัจจัยร่วมที่ใช้เวลาในการดำเนินงานอัลกอริทึมน้อยที่สุด

5. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

6.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้ จะแสดงตัวอย่างของค่าตัวแปรตอบสนอง (ค่าตัวชี้วัด) ผลการทดสอบ DOE และการวิเคราะห์ผลการทดลอง (แสดงเฉพาะของปัญหา L3) โดยวิธีการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองของปัญหาอื่น ๆ จะดำเนินการเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ผู้วิจัยนำเสนอ

แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของแต่ละอัลกอริทึม ดังตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

Algorithm	Parameter (Factor)	Level factor	
MOEA/D	<i>Nb</i>	5	20
	<i>NR</i>	2	5
MODE	<i>F</i>	0.5	1.0
	<i>CR</i>	0.7	0.9
MODE/D	<i>Nb</i>	5	20
	<i>NR</i>	2	5
	<i>F</i>	0.5	1.0
	<i>CR</i>	0.9	1.0
AMOEAD-DE	<i>Nb</i>	5	20
	<i>NR</i>	2	5
	β	0.5	0.8
	α	0.3	0.5
	<i>LR</i>	0.3	0.5

เมื่อทดลองค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดกับอัลกอริทึมเรียบร้อยแล้ว ให้คำนวณค่าตัวชี้วัดและนำมาเป็นค่าตัวแปรตอบสนองของการทดสอบ แสดงตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

6.3.1 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ MOEA/D

แสดงตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา L3 ดังตารางที่ 6-3

ตารางที่ 6-3 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา L3

Level Factor		Replicate	<i>GD</i>	<i>IGD</i>	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
5	2	1	0.0753	0.1586	0.5889	0.6533	0.3630	28378.02
20	2	1	0.6106	0.7712	0.5821	0.0000	0.0000	28356.83
5	5	1	0.0000	0.1440	0.5861	1.0000	0.5556	28483.16
20	5	1	0.9326	1.0960	0.6812	0.0000	0.0000	28731.59
5	2	2	0.4954	0.5430	0.5906	0.0000	0.0000	28066.98
20	2	2	0.4165	0.6972	0.5912	0.0000	0.0000	27889.28
5	5	2	0.2160	0.2993	0.5197	0.1200	0.0667	27936.88
20	5	2	0.9534	1.2194	0.7240	0.0000	0.0000	28530.27

ตารางที่ 6-3 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา L3 (ต่อ)

Level	Factor	Replicate	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
5	2	3	0.2632	0.3621	0.6325	0.0067	0.0037	27723.89
20	2	3	0.5206	0.6191	0.5784	0.0000	0.0000	27837.25
5	5	3	0.3199	0.3285	0.5449	0.0200	0.0111	28964.08
20	5	3	0.9760	1.1016	0.6122	0.0000	0.0000	28223.22

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัดที่ลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังภาพที่ 6-1

MOEA/D: GD 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

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.77015	0.77015	38.12	0.000
NR	1	0.08605	0.08605	4.26	0.073
Nb*NR	1	0.21665	0.21665	10.72	0.011
Error	8	0.16164	0.02020		
Total	11	1.23450			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.142144	86.91%	82.00%	70.54%

ภาพที่ 6-1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (MOEA/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ MOEA/D พบว่า มีปัจจัยร่วมอย่างน้อย 1 ตัว แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าปัจจัยร่วมมีผลกระทบต่อค่า GD ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ก) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้

ด้วยการทำ Comparisons test เพื่อหาปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แสดงผลลัพธ์จากโปรแกรมดังภาพที่ 6-2

MOEA/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = GD, Term = Nb*NR

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb*NR	N	Mean	Grouping
20 5	3	0.954007	A
20 2	3	0.515910	B
5 2	3	0.277971	B C
5 5	3	0.178600	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ภาพที่ 6-2 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (MOEA/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยร่วมพบว่า ที่ระดับปัจจัย 5*2 และ 5*5 อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุด คือ 5*5

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ MOEA/D สำหรับปัญหา L3 คือ $Nb = 5$ และ $NR = 5$

6.3.2 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ MODE

แสดงตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา L3 ดังตารางที่ 6-4

ตารางที่ 6-4 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา L3

Level	Factor	Replicate	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
0.5	0.7	1	13.7085	3.5131	0.4107	0.0000	0.0000	27908.64
1.0	0.7	1	10.3927	3.5079	0.4227	0.0000	0.0000	27674.09
0.5	0.9	1	0.2867	0.3507	0.3992	0.1203	0.0860	28183.39
1.0	0.9	1	0.6394	0.4623	0.5613	0.0301	0.0215	28509.28
0.5	0.7	2	11.3260	3.4564	0.4017	0.0000	0.0000	27942.44
1.0	0.7	2	12.2402	3.6589	0.4766	0.0000	0.0000	27725.55
0.5	0.9	2	0.9012	0.6311	0.3415	0.0000	0.0000	27750.97
1.0	0.9	2	0.2384	0.3047	0.4258	0.2481	0.1774	29937.02
0.5	0.7	3	11.0950	3.0903	0.3938	0.0000	0.0000	28026.52
1.0	0.7	3	11.3140	3.9326	0.4010	0.0000	0.0000	27650.97
0.5	0.9	3	0.0000	0.0934	0.3410	1.0000	0.7151	28848.61
1.0	0.9	3	3.3545	1.0020	0.5599	0.0000	0.0000	27426.55

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัดที่ลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังภาพที่ 6-3

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

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	0.062	0.062	0.04	0.848
CR	1	348.368	348.368	218.62	0.000
Error	9	14.342	1.594		
Lack-of-Fit	1	2.277	2.277	1.51	0.254
Pure Error	8	12.065	1.508		
Total	11	362.771			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.26234	96.05%	95.17%	92.97%

ภาพที่ 6-3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ MODE พบว่า ปัจจัยร่วมถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัย ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้เฉพาะปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญ จึงทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย CR เพื่อหาปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด และต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป เพื่อหาปัจจัย F ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แสดงผล Comparisons test ดังภาพที่ 6-4

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

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

CR	N	Mean	Grouping
0.7	6	11.6794	A
0.9	6	0.9034	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ภาพที่ 6-4 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (MODE)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยหลักพบว่า ที่ระดับปัจจัย 0.7 และ 0.9 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยหลักที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด คือ 0.9

แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution I ดังภาพที่ 6-5

**MODE: RNDS1 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

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	0.05910	0.05910	0.77	0.403
CR	1	0.16298	0.16298	2.12	0.179
Error	9	0.69188	0.07688		
Lack-of-Fit	1	0.05910	0.05910	0.75	0.413
Pure Error	8	0.63279	0.07910		
Total	11	0.91396			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.277264	24.30%	7.48%	0.00%

ภาพที่ 6-5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา L3 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution I ของ MODE พบว่า ปัจจัยร่วมถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีระดับปัจจัยของปัจจัยหลักใดที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance ดังภาพที่ 6-6

MODE: IGD 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

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	0.2504	0.2504	3.63	0.089
CR	1	27.9533	27.9533	405.72	0.000
Error	9	0.6201	0.0689		
Lack-of-Fit	1	0.0100	0.0100	0.13	0.727
Pure Error	8	0.6101	0.0763		
Total	11	28.8237			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.262484	97.85%	97.37%	96.18%

ภาพที่ 6-6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด IGD ปัญหา L3 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance ของ MODE พบว่า ปัจจัยร่วมถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และมีปัจจัยหลัก CR ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ได้ถูกสรุปค่าพารามิเตอร์แล้วจาก GD จึงไม่ต้องทำ Comparisons test อีก ทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution II ดังภาพที่ 6-7

MODE: RNDS2 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

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	0.03022	0.03022	0.77	0.403
CR	1	0.08333	0.08333	2.12	0.179
Error	9	0.35376	0.03931		
Lack-of-Fit	1	0.03022	0.03022	0.75	0.413
Pure Error	8	0.32354	0.04044		
Total	11	0.46730			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.198258	24.30%	7.48%	0.00%

ภาพที่ 6-7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา L3 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution II ของ MODE พบว่า ปัจจัยร่วมถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีระดับปัจจัยของ ปัจจัยหลักใด ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป แสดงผลการทดสอบ สมมติฐานของตัวชี้วัด Distribution and Spread ดังภาพที่ 6-8

MODE: Spread 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

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	0.026090	0.026090	8.09	0.019
CR	1	0.001248	0.001248	0.39	0.549
Error	9	0.029021	0.003225		
Lack-of-Fit	1	0.011486	0.011486	5.24	0.051
Pure Error	8	0.017535	0.002192		
Total	11	0.056360			

Model Summary

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0.0567851	48.51%	37.07%	8.46%

ภาพที่ 6-8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด Δ^* ปัญหา L3 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Distribution and Spread ของ MODE พบว่า ปัจจัยร่วมถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปัจจัยหลัก 1 ปัจจัย ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้เฉพาะปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญ จึงทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย F เพื่อหาปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แสดงผล Comparisons test ดังภาพที่ 6-9

MODE: Fisher Pairwise Comparisons: Response = Spread, Term = F

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

F	N	Mean	Grouping
1.0	6	0.474552	A
0.5	6	0.381295	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ภาพที่ 6-9 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด Δ^* ปัญหา L3 (MODE)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยหลักพบว่า ที่ระดับปัจจัย 0.5 และ 1.0 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยหลักที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด คือ 0.5

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ MODE สำหรับปัญหา L3 คือ $F = 0.5$ และ $CR = 0.9$

6.3.3 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ MODE/D

ตารางที่ 6-5 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE/D ปัญหา L3

Level Factor				Rep.	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
5	2	0.5	0.9	1	0.2193	0.3128	0.6186	0.0230	0.0023	27941.34
20	2	0.5	0.9	1	0.0104	0.2221	0.6021	0.8727	0.1114	28010.20
5	5	0.5	0.9	1	0.2601	0.3055	0.5268	0.0000	0.0000	27790.78
20	5	0.5	0.9	1	0.1129	0.2184	0.6141	0.1042	0.0116	28081.41
5	2	1	0.9	1	0.2875	0.3762	0.5287	0.0000	0.0000	28169.63
20	2	1	0.9	1	0.1403	0.2974	0.5127	0.2692	0.0325	28296.28
5	5	1	0.9	1	0.3624	0.4335	0.4488	0.0000	0.0000	28140.61
20	5	1	0.9	1	0.1065	0.2277	0.5438	0.2264	0.0278	28594.83
5	2	0.5	1	1	0.1956	0.2987	0.6136	0.0206	0.0023	28087.27
20	2	0.5	1	1	0.0401	0.2412	0.5846	0.6140	0.0812	28269.52
5	5	0.5	1	1	0.2102	0.2909	0.5202	0.0000	0.0000	29239.03
20	5	0.5	1	1	0.1108	0.2385	0.6412	0.1667	0.0209	28987.59
5	2	1	1	1	0.3147	0.4149	0.5084	0.0000	0.0000	27592.92
20	2	1	1	1	0.1204	0.2374	0.6339	0.3982	0.0522	28360.13
5	5	1	1	1	0.2429	0.3030	0.5015	0.1000	0.0139	27671.44
20	5	1	1	1	0.0726	0.2107	0.7140	0.5269	0.0568	27674.77
5	2	0.5	0.9	2	0.2404	0.3211	0.4162	0.0377	0.0046	27787.13
20	2	0.5	0.9	2	0.1357	0.2496	0.5991	0.0297	0.0035	27860.58
5	5	0.5	0.9	2	0.1958	0.2833	0.5845	0.0455	0.0046	27784.45
20	5	0.5	0.9	2	0.0032	0.2389	0.5889	0.9592	0.1091	28069.36
5	2	1	0.9	2	0.2860	0.4379	0.4965	0.0120	0.0012	28047.28
20	2	1	0.9	2	0.2329	0.3217	0.5479	0.0000	0.0000	28132.59
5	5	1	0.9	2	0.2543	0.3727	0.4901	0.0465	0.0046	28102.45
20	5	1	0.9	2	0.0172	0.2599	0.6513	0.8155	0.0974	28091.91

ตารางที่ 6-5 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE/D ปัญหา L3 (ต่อ)

Level Factor				Rep.	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
5	2	0.5	1	2	0.2026	0.2959	0.5719	0.0297	0.0035	29028.56
20	2	0.5	1	2	0.1446	0.2342	0.6741	0.0000	0.0000	35058.66
5	5	0.5	1	2	0.2735	0.3369	0.5260	0.0000	0.0000	28350.52
20	5	0.5	1	2	0.0880	0.2540	0.6838	0.1284	0.0162	28635.94
5	2	1	1	2	0.3559	0.4152	0.5295	0.0000	0.0000	28057.41
20	2	1	1	2	0.1493	0.2224	0.7108	0.2411	0.0313	27647.67
5	5	1	1	2	0.2670	0.3362	0.5155	0.0000	0.0000	27669.14
20	5	1	1	2	0.1426	0.2110	0.7217	0.2544	0.0336	28090.08
5	2	0.5	0.9	3	0.1359	0.2376	0.6852	0.1412	0.0139	27786.66
20	2	0.5	0.9	3	0.1065	0.2384	0.6129	0.1009	0.0128	27862.17
5	5	0.5	0.9	3	0.2560	0.3444	0.5248	0.0395	0.0035	27874.08
20	5	0.5	0.9	3	0.1102	0.2373	0.6039	0.0300	0.0035	28223.86
5	2	1	0.9	3	0.1911	0.3504	0.5967	0.1630	0.0174	28113.23
20	2	1	0.9	3	0.0870	0.2206	0.6247	0.4231	0.0510	28218.23
5	5	1	0.9	3	0.1546	0.3526	0.6322	0.3133	0.0302	34051.78
20	5	1	0.9	3	0.1224	0.2631	0.5704	0.1485	0.0174	28114.59
5	2	0.5	1	3	0.2407	0.3291	0.5463	0.0000	0.0000	28879.50
20	2	0.5	1	3	0.1522	0.2454	0.6792	0.0098	0.0012	30074.91
5	5	0.5	1	3	0.2547	0.3105	0.5651	0.0000	0.0000	28507.69
20	5	0.5	1	3	0.0368	0.2148	0.7394	0.5842	0.0684	27729.05
5	2	1	1	3	0.3063	0.3759	0.5763	0.0000	0.0000	27620.53
20	2	1	1	3	0.1024	0.2060	0.6334	0.4078	0.0487	27588.75
5	5	1	1	3	0.2928	0.3406	0.4458	0.0174	0.0023	27660.94
20	5	1	1	3	0.1759	0.2509	0.6815	0.0606	0.0070	29268.00

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัด
ที่ลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังภาพที่ 6-10

MODE/D: GD versus Nb, NR, F, CR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

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

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
F	Fixed	2	0.5, 1.0
CR	Fixed	2	0.9, 1.0

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	0.281137	0.070284	26.69	0.000
Linear	4	0.281137	0.070284	26.69	0.000
Nb	1	0.252165	0.252165	95.76	0.000
NR	1	0.001566	0.001566	0.59	0.445
F	1	0.022921	0.022921	8.70	0.005
CR	1	0.004486	0.004486	1.70	0.199
Error	43	0.113226	0.002633		
Lack-of-Fit	11	0.019731	0.001794	0.61	0.803
Pure Error	32	0.093496	0.002922		
Total	47	0.394364			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0513144	71.29%	68.62%	64.22%

ภาพที่ 6-10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (MODE/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ MODE/D พบว่า ปัจจัยร่วมทั้งหมดถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้เฉพาะปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญ จึงทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย *Nb* และ *F* เพื่อหาปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด และต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป เพื่อหาปัจจัยที่เหลือที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แสดงผล Comparisons test ดังภาพที่ 6-11

MODE/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = GD, Term = Nb

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb	N	Mean	Grouping
5	24	0.250003	A
20	24	0.105042	B

Means that do not share a letter are significantly different.

MODE/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = GD, Term = F

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

F	N	Mean	Grouping
1.0	24	0.199374	A
0.5	24	0.155670	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ภาพที่ 6-11 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (MODE/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย *Nb* พบว่า ที่ระดับปัจจัย 5 และ 20 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยหลักที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด คือ 20

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย *F* พบว่า ที่ระดับปัจจัย 0.5 และ 1.0 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยหลักที่ให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด คือ 0.5

แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution I ดังภาพที่ 6-12

MODE/D: RNDS1 versus Nb, NR, F, CR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

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

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
F	Fixed	2	0.5, 1.0
CR	Fixed	2	0.9, 1.0

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	0.89808	0.224519	4.84	0.003
Linear	4	0.89808	0.224519	4.84	0.003
Nb	1	0.84858	0.848576	18.28	0.000
NR	1	0.01245	0.012453	0.27	0.607
F	1	0.00494	0.004941	0.11	0.746
CR	1	0.03210	0.032105	0.69	0.410
Error	43	1.99572	0.046412		
Lack-of-Fit	11	0.07570	0.006882	0.11	1.000
Pure Error	32	1.92002	0.060001		
Total	47	2.89380			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.215435	31.03%	24.62%	14.06%

ภาพที่ 6-12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา L3 (MODE/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution I ของ MODE/D พบว่า ปัจจัยร่วมทั้งหมดถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ มีเพียงระดับปัจจัยของปัจจัย Nb เท่านั้น ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญและถูกกำหนดค่าแล้วจากการทดสอบตัวชี้วัดก่อนหน้า จึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance ดังภาพที่ 6-13

MODE/D: IGD versus Nb, NR, F, CR

Backward Elimination of Terms

 α to remove = 0.05

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

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
F	Fixed	2	0.5, 1.0
CR	Fixed	2	0.9, 1.0

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	0.159455	0.026576	29.91	0.000
Linear	4	0.143237	0.035809	40.30	0.000
Nb	1	0.121424	0.121424	136.65	0.000
NR	1	0.001481	0.001481	1.67	0.204
F	1	0.018347	0.018347	20.65	0.000
CR	1	0.001986	0.001986	2.23	0.143
2-Way Interactions	2	0.016218	0.008109	9.13	0.001
Nb*F	1	0.011610	0.011610	13.07	0.001
F*CR	1	0.004608	0.004608	5.19	0.028
Error	41	0.036431	0.000889		
Lack-of-Fit	9	0.009717	0.001080	1.29	0.279
Pure Error	32	0.026714	0.000835		
Total	47	0.195886			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0298087	81.40%	78.68%	74.51%

ภาพที่ 6-13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด IGD ปัญหา L3 (MODE/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance ของ MODE/D พบว่า มีปัจจัยร่วม $Nb*F$ และ $F*CR$ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ก) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลปัจจัยร่วมที่มีนัยสำคัญได้ จึงทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย $Nb*F$ และ $F*CR$ เพื่อหาปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด และต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป เพื่อหาปัจจัยที่เหลือที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผล Comparisons test ดังภาพที่ 6-14

MODE/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = IGD, Term = Nb*F

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb*F	N	Mean	Grouping
5 1.0	12	0.375753	A
5 0.5	12	0.305548	B
20 1.0	12	0.244057	C
20 0.5	12	0.236061	C

Means that do not share a letter are significantly different.

MODE/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = IGD, Term = F*CR

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

F*CR	N	Mean	Grouping
1.0 0.9	12	0.326135	A
1.0 1.0	12	0.293675	B
0.5 1.0	12	0.274170	B C
0.5 0.9	12	0.267438	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ภาพที่ 6-14 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา L3 (MODE/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย $Nb*F$ พบว่า ที่ระดับปัจจัย 20*1.0 และ 20*0.5 อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แต่เนื่องจากปัจจัย Nb และ F ถูกสรุปค่าระดับปัจจัยที่ดีกับตัวชี้วัดก่อนหน้าแล้ว จึงทำการประเมินโดยให้ความสำคัญกับค่าเดิม มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ โดยค่าเดิมของ Nb และ F คือ 20 และ 0.5 ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนอง (ตัวชี้วัด IGD) ดีที่สุดกับปัจจัยร่วม $Nb*F$ เช่นกัน คือ 20*0.5

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย $F*CR$ พบว่า ที่ระดับปัจจัย 0.5*0.9 และ 0.5*1.0 อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แต่เนื่องจากปัจจัย F ถูกสรุปค่าระดับปัจจัยที่ดีกับตัวชี้วัดก่อนหน้าแล้ว จึงทำการประเมินโดยให้ความสำคัญกับค่าเดิม มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ โดยค่าเดิมของ F คือ 0.5 ซึ่งเป็นค่าระดับปัจจัยในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนอง (ตัวชี้วัด IGD) ดีที่สุด จึงทำให้สามารถเลือกระดับปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุดได้ เนื่องจากค่าระดับปัจจัยของ F เท่ากัน คือ 0.5*0.9

แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution II ดังภาพที่ 6-15

MODE/D: RNDS2 versus Nb, NR, F, CR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

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

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
F	Fixed	2	0.5, 1.0
CR	Fixed	2	0.9, 1.0

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	0.013469	0.003367	5.04	0.002
Linear	4	0.013469	0.003367	5.04	0.002
Nb	1	0.013041	0.013041	19.52	0.000
NR	1	0.000070	0.000070	0.10	0.748
F	1	0.000054	0.000054	0.08	0.777
CR	1	0.000303	0.000303	0.45	0.504
Error	43	0.028728	0.000668		
Lack-of-Fit	11	0.001131	0.000103	0.12	1.000
Pure Error	32	0.027597	0.000862		
Total	47	0.042197			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0258476	31.92%	25.59%	15.17%

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 6-15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา L3 (MODE/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution II ของ MODE/D พบว่า ปัจจัยร่วมทั้งหมดถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ มีเพียงระดับปัจจัยของปัจจัย *Nb* เท่านั้น ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญและถูกกำหนดค่าแล้วจากการทดสอบตัวชี้วัดก่อนหน้า จึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Distribution and Spread ดังภาพที่ 6-16

MODE/D: Spread versus Nb, NR, F, CR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

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

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
F	Fixed	2	0.5, 1.0
CR	Fixed	2	0.9, 1.0

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	0.162431	0.027072	9.94	0.000
Linear	4	0.123078	0.030770	11.30	0.000
Nb	1	0.100887	0.100887	37.05	0.000
NR	1	0.000096	0.000096	0.04	0.852
F	1	0.005336	0.005336	1.96	0.169
CR	1	0.016759	0.016759	6.15	0.017
2-Way Interactions	2	0.039353	0.019676	7.23	0.002
Nb*NR	1	0.011568	0.011568	4.25	0.046
Nb*CR	1	0.027785	0.027785	10.20	0.003
Error	41	0.111641	0.002723		
Lack-of-Fit	9	0.009057	0.001006	0.31	0.965
Pure Error	32	0.102584	0.003206		
Total	47	0.274072			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0521819	59.27%	53.30%	44.17%

ภาพที่ 6-16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด Δ^* ปัญหา L3 (MODE/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Distribution and Spread ของ MODE/D พบว่า มีปัจจัยร่วม $Nb*NR$ และ $Nb*CR$ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ก) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลปัจจัยร่วมที่มีนัยสำคัญได้ จึงทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย $Nb*NR$ และ $Nb*CR$ เพื่อหาปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดี ที่สุด แสดงผล Comparisons test ดังภาพที่ 6-17

MODE/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	12	0.646162	A
20 2	12	0.617949	A
5 2	12	0.557306	B
5 5	12	0.523423	B

Means that do not share a letter are significantly different.

MODE/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = Spread, Term = Nb*CR

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb*CR	N	Mean	Grouping
20 1.0	12	0.674800	A
20 0.9	12	0.589311	B
5 0.9	12	0.545738	C
5 1.0	12	0.534990	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ภาพที่ 6-17 ผลการทำ Comparison test ของตัวชี้วัด Δ^* ปัญหา L3 (MODE/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย $Nb*NR$ พบว่า ที่ระดับปัจจัย $5*2$ และ $5*5$ อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แต่เนื่องจากปัจจัย Nb ถูกสรุปค่าระดับปัจจัยที่ดีกับตัวชี้วัดก่อนหน้าแล้ว จึงทำการประเมินโดยให้ความสำคัญกับค่าเดิม มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ โดยค่าเดิมของ Nb คือ 20 ซึ่งมีปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุด คือ $20*2$ ตามลำดับความสำคัญของตัวชี้วัด

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย $Nb*CR$ พบว่า ที่ระดับปัจจัย $5*0.9$ และ $0.5*1.0$ อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แต่เนื่องจากปัจจัย Nb และ CR ถูกสรุปค่าระดับปัจจัยที่ดีกับตัวชี้วัดก่อนหน้าแล้ว จึงทำการประเมินโดยให้ความสำคัญกับค่าเดิม มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ โดยค่าเดิมของ Nb และ CR คือ 20 และ 0.9 ตามลำดับ ซึ่งมีปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุด คือ $20*0.9$ ตามลำดับความสำคัญของตัวชี้วัด

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ MODE/D สำหรับปัญหา L3 คือ $Nb = 20, NR = 2, F = 0.5$ และ $CR = 0.9$

6.3.4 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา L3 ของ AMOEA/D-DE

ตารางที่ 6-6 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ AMOEA/D-DE ปัญหา L3

Level Factor					Rep.	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
5	2	0.5	0.3	0.3	1	0.2390	0.2970	0.5586	0.0000	0.0000	29711.25
20	2	0.5	0.3	0.3	1	0.2183	0.2697	0.6452	0.0000	0.0000	28464.66
5	5	0.5	0.3	0.3	1	0.2108	0.2648	0.6671	0.0000	0.0000	28627.69
20	5	0.5	0.3	0.3	1	0.2248	0.2909	0.5570	0.0000	0.0000	29902.41
5	2	0.8	0.3	0.3	1	0.1727	0.2612	0.5901	0.0250	0.0019	28447.78
20	2	0.8	0.3	0.3	1	0.1649	0.2426	0.5581	0.0080	0.0006	28506.09
5	5	0.8	0.3	0.3	1	0.1651	0.2310	0.5842	0.0085	0.0006	28823.34
20	5	0.8	0.3	0.3	1	0.1972	0.2652	0.5506	0.0179	0.0013	28518.75
5	2	0.5	0.5	0.3	1	0.2875	0.3533	0.6135	0.0000	0.0000	28410.47
20	2	0.5	0.5	0.3	1	0.2771	0.3127	0.5668	0.0000	0.0000	28243.03
5	5	0.5	0.5	0.3	1	0.2526	0.3227	0.6454	0.0086	0.0006	28200.09
20	5	0.5	0.5	0.3	1	0.1126	0.2138	0.5859	0.2917	0.0223	28202.16
5	2	0.8	0.5	0.3	1	0.1761	0.2852	0.6340	0.0603	0.0045	28267.69
20	2	0.8	0.5	0.3	1	0.1303	0.2204	0.6634	0.1092	0.0083	28266.09
5	5	0.8	0.5	0.3	1	0.1583	0.2349	0.6217	0.1122	0.0077	28340.06
20	5	0.8	0.5	0.3	1	0.0943	0.1872	0.6318	0.2645	0.0204	28437.38
5	2	0.5	0.3	0.5	1	0.1915	0.2729	0.6073	0.0283	0.0019	28376.06
20	2	0.5	0.3	0.5	1	0.1004	0.2028	0.5443	0.2583	0.0198	28273.13
5	5	0.5	0.3	0.5	1	0.0895	0.1938	0.6214	0.2605	0.0198	28259.06
20	5	0.5	0.3	0.5	1	0.2392	0.3049	0.7182	0.0093	0.0006	28261.41
5	2	0.8	0.3	0.5	1	0.1952	0.2623	0.5996	0.0000	0.0000	28280.34
20	2	0.8	0.3	0.5	1	0.0871	0.1991	0.6865	0.3707	0.0274	28235.16
5	5	0.8	0.3	0.5	1	0.0470	0.1956	0.6616	0.5339	0.0402	29990.34
20	5	0.8	0.3	0.5	1	0.1141	0.2113	0.6387	0.1849	0.0140	28695.84
5	2	0.5	0.5	0.5	1	0.2179	0.2945	0.6311	0.0088	0.0006	29065.97
20	2	0.5	0.5	0.5	1	0.2349	0.3022	0.5645	0.0167	0.0013	28283.34
5	5	0.5	0.5	0.5	1	0.1648	0.2551	0.6226	0.0085	0.0006	28287.56
20	5	0.5	0.5	0.5	1	0.1470	0.2209	0.6219	0.0672	0.0051	29244.00
5	2	0.8	0.5	0.5	1	0.2132	0.2897	0.6746	0.0165	0.0013	30687.28
20	2	0.8	0.5	0.5	1	0.2213	0.3017	0.6066	0.0500	0.0038	29007.00
5	5	0.8	0.5	0.5	1	0.1376	0.2175	0.5892	0.1321	0.0089	28804.31

ตารางที่ 6-6 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ AMOEVA/D-DE ปัญหา L3 (ต่อ)

Level Factor					Rep.	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
20	5	0.8	0.5	0.5	1	0.1839	0.2442	0.6536	0.0085	0.0006	28325.16
5	2	0.5	0.3	0.3	2	0.2733	0.3049	0.6128	0.0000	0.0000	28474.97
20	2	0.5	0.3	0.3	2	0.1123	0.2100	0.6067	0.1102	0.0083	28475.06
5	5	0.5	0.3	0.3	2	0.1685	0.2493	0.6015	0.0265	0.0019	28583.34
20	5	0.5	0.3	0.3	2	0.1039	0.2010	0.5979	0.1513	0.0115	28683.75
5	2	0.8	0.3	0.3	2	0.1096	0.1938	0.5822	0.1044	0.0077	28484.16
20	2	0.8	0.3	0.3	2	0.1690	0.2443	0.5900	0.0424	0.0032	28475.81
5	5	0.8	0.3	0.3	2	0.1762	0.2651	0.6247	0.0455	0.0032	29186.91
20	5	0.8	0.3	0.3	2	0.0044	0.2200	0.5973	0.9597	0.0759	28484.06
5	2	0.5	0.5	0.3	2	0.1455	0.2332	0.6571	0.0084	0.0006	28440.00
20	2	0.5	0.5	0.3	2	0.1355	0.2254	0.5798	0.0796	0.0057	28409.81
5	5	0.5	0.5	0.3	2	0.1502	0.2339	0.5597	0.0588	0.0045	28213.13
20	5	0.5	0.5	0.3	2	0.2838	0.3495	0.6116	0.0000	0.0000	28189.03
5	2	0.8	0.5	0.3	2	0.1289	0.2162	0.5724	0.0413	0.0032	28228.50
20	2	0.8	0.5	0.3	2	0.1253	0.2158	0.6600	0.0244	0.0019	28263.19
5	5	0.8	0.5	0.3	2	0.2705	0.3121	0.6494	0.0000	0.0000	28349.06
20	5	0.8	0.5	0.3	2	0.1257	0.2168	0.6436	0.2000	0.0153	28413.84
5	2	0.5	0.3	0.5	2	0.2191	0.2745	0.5702	0.0000	0.0000	28310.53
20	2	0.5	0.3	0.5	2	0.1413	0.2162	0.5950	0.0806	0.0064	28258.31
5	5	0.5	0.3	0.5	2	0.1972	0.2647	0.5602	0.0427	0.0032	28236.09
20	5	0.5	0.3	0.5	2	0.1640	0.2434	0.5655	0.0960	0.0077	28249.31
5	2	0.8	0.3	0.5	2	0.1873	0.2486	0.5439	0.0250	0.0019	28287.00
20	2	0.8	0.3	0.5	2	0.1470	0.2421	0.5655	0.1083	0.0083	28225.69
5	5	0.8	0.3	0.5	2	0.1445	0.2329	0.6205	0.0153	0.0013	29680.22
20	5	0.8	0.3	0.5	2	0.0637	0.2070	0.6534	0.5259	0.0389	28692.38
5	2	0.5	0.5	0.5	2	0.0981	0.2086	0.6180	0.2727	0.0211	28268.06
20	2	0.5	0.5	0.5	2	0.2528	0.2999	0.5512	0.0000	0.0000	28333.50
5	5	0.5	0.5	0.5	2	0.0273	0.1837	0.6653	0.7414	0.0549	28511.81
20	5	0.5	0.5	0.5	2	0.0877	0.1999	0.5911	0.2222	0.0166	34503.28
5	2	0.8	0.5	0.5	2	0.0831	0.1875	0.6510	0.2479	0.0191	37915.50
20	2	0.8	0.5	0.5	2	0.2112	0.2589	0.6466	0.0000	0.0000	28926.94
5	5	0.8	0.5	0.5	2	0.0255	0.1912	0.6194	0.7692	0.0574	28345.78

ตารางที่ 6-6 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ AMOEVA/D-DE ปัญหา L3 (ต่อ)

Level Factor					Rep.	GD	IGD	Δ^*	R_{NDS1}	R_{NDS2}	Time
20	5	0.8	0.5	0.5	2	0.2529	0.3156	0.6503	0.0000	0.0000	28507.50
5	2	0.5	0.3	0.3	3	0.0384	0.1889	0.5993	0.6087	0.0447	28426.59
20	2	0.5	0.3	0.3	3	0.0762	0.1976	0.6862	0.3421	0.0249	28539.75
5	5	0.5	0.3	0.3	3	0.1011	0.1946	0.5710	0.1197	0.0089	29819.16
20	5	0.5	0.3	0.3	3	0.1553	0.2393	0.5738	0.0167	0.0013	28443.47
5	2	0.8	0.3	0.3	3	0.1756	0.2571	0.6717	0.1091	0.0077	28508.72
20	2	0.8	0.3	0.3	3	0.2846	0.3191	0.6538	0.0000	0.0000	28477.22
5	5	0.8	0.3	0.3	3	0.1143	0.1994	0.5171	0.1570	0.0121	28632.09
20	5	0.8	0.3	0.3	3	0.0635	0.1827	0.6348	0.3750	0.0268	28411.97
5	2	0.5	0.5	0.3	3	0.2195	0.2968	0.5813	0.0164	0.0013	28342.78
20	2	0.5	0.5	0.3	3	0.2380	0.3260	0.6585	0.0085	0.0006	28211.72
5	5	0.5	0.5	0.3	3	0.0371	0.1977	0.6552	0.6640	0.0530	28194.19
20	5	0.5	0.5	0.3	3	0.0958	0.2047	0.6392	0.1810	0.0134	28259.25
5	2	0.8	0.5	0.3	3	0.1501	0.2279	0.5735	0.0090	0.0006	28254.00
20	2	0.8	0.5	0.3	3	0.0857	0.2019	0.6095	0.3280	0.0262	28285.13
5	5	0.8	0.5	0.3	3	0.0999	0.2129	0.5122	0.1930	0.0140	28392.38
20	5	0.8	0.5	0.3	3	0.1692	0.2332	0.5835	0.0000	0.0000	28384.22
5	2	0.5	0.3	0.5	3	0.2163	0.2957	0.6539	0.0000	0.0000	28383.19
20	2	0.5	0.3	0.5	3	0.1848	0.2573	0.6192	0.0374	0.0026	28288.97
5	5	0.5	0.3	0.5	3	0.0815	0.1963	0.6985	0.2743	0.0198	28219.88
20	5	0.5	0.3	0.5	3	0.1912	0.2610	0.5880	0.0000	0.0000	28221.28
5	2	0.8	0.3	0.5	3	0.1913	0.2582	0.6324	0.0000	0.0000	28315.41
20	2	0.8	0.3	0.5	3	0.1046	0.2028	0.6443	0.1026	0.0077	28995.00
5	5	0.8	0.3	0.5	3	0.3293	0.3683	0.6283	0.0179	0.0013	28732.50
20	5	0.8	0.3	0.5	3	0.1406	0.2196	0.6147	0.1177	0.0089	29882.53
5	2	0.5	0.5	0.5	3	0.1020	0.2063	0.6536	0.2174	0.0160	28230.84
20	2	0.5	0.5	0.5	3	0.0949	0.1932	0.6404	0.2203	0.0166	28287.56
5	5	0.5	0.5	0.5	3	0.0450	0.1809	0.6116	0.5983	0.0447	29003.91
20	5	0.5	0.5	0.5	3	0.1413	0.2248	0.6512	0.1220	0.0096	30269.81
5	2	0.8	0.5	0.5	3	0.1975	0.2844	0.6620	0.0093	0.0006	30440.63
20	2	0.8	0.5	0.5	3	0.0793	0.1893	0.6230	0.3217	0.0236	29301.47
5	5	0.8	0.5	0.5	3	0.1485	0.2303	0.5986	0.1849	0.0140	28336.69
20	5	0.8	0.5	0.5	3	0.1478	0.2157	0.5863	0.0684	0.0051	28387.31

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัดที่ลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังภาพที่ 6-18

AMOEAD-DE: GD versus Nb, NR, Beta, Alpha, LR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: Nb, NR, Beta, Alpha, LR

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
Beta	Fixed	2	0.5, 0.8
Alpha	Fixed	2	0.3, 0.5
LR	Fixed	2	0.3, 0.5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0.022471	0.004494	0.96	0.447
Linear	5	0.022471	0.004494	0.96	0.447
Nb	1	0.000378	0.000378	0.08	0.777
NR	1	0.004026	0.004026	0.86	0.356
Beta	1	0.016520	0.016520	3.53	0.064
Alpha	1	0.000005	0.000005	0.00	0.974
LR	1	0.001543	0.001543	0.33	0.567
Error	90	0.421539	0.004684		
Lack-of-Fit	26	0.108853	0.004187	0.86	0.661
Pure Error	64	0.312686	0.004886		
Total	95	0.444010			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0684380	5.06%	0.00%	0.00%

ภาพที่ 6-18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา L3 (AMOEAD-DE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance ของ AMOEAD-DE พบว่า ปัจจัยร่วมถูกตัดออกที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีระดับปัจจัยของปัจจัยหลักใดที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution I ดังภาพที่ 6-19

AMOEAD/DE: RNDS1 versus Nb, NR, Beta, Alpha, LR

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

At your request, the stepwise procedure included these terms in every model: Nb, NR, Beta, Alpha, LR

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Nb	Fixed	2	5, 20
NR	Fixed	2	2, 5
Beta	Fixed	2	0.5, 0.8
Alpha	Fixed	2	0.3, 0.5
LR	Fixed	2	0.3, 0.5

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	0.74234	0.057103	1.62	0.096
Linear	5	0.23833	0.047667	1.35	0.251
Nb	1	0.00083	0.000832	0.02	0.878
NR	1	0.00555	0.005545	0.16	0.693
Beta	1	0.20394	0.203944	5.79	0.018
Alpha	1	0.00435	0.004348	0.12	0.726
LR	1	0.02367	0.023666	0.67	0.415
2-Way Interactions	6	0.18517	0.030862	0.88	0.516
Nb*Beta	1	0.03775	0.037747	1.07	0.304
Nb*LR	1	0.06773	0.067728	1.92	0.169
Beta*NR	1	0.01335	0.013349	0.38	0.540
Beta*Alpha	1	0.01588	0.015883	0.45	0.504
Beta*LR	1	0.00653	0.006533	0.19	0.668
NR*Alpha	1	0.04393	0.043934	1.25	0.267
3-Way Interactions	2	0.31883	0.159415	4.52	0.014
Nb*Beta*LR	1	0.15776	0.157761	4.48	0.037
Beta*NR*Alpha	1	0.16107	0.161069	4.57	0.036
Error	82	2.88979	0.035241		
Lack-of-Fit	18	0.54839	0.030466	0.83	0.656
Pure Error	64	2.34140	0.036584		
Total	95	3.63213			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.187727	20.44%	7.82%	0.00%

ภาพที่ 6-19 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา L3 (AMOEAD/DE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Ratio of Non-Dominated Solution I ของ AMOEAD/DE พบว่า มีปัจจัยร่วม $Nb*\beta*LR$ และ $\beta*NR*\alpha$ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ก) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลปัจจัยร่วมที่มีนัยสำคัญได้ จึงทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย $Nb*\beta*LR$ และ $\beta*NR*\alpha$ เพื่อหาปัจจัย

ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด และต้องทำการวิเคราะห์หัตถ์ชีวิตถัดไป เพื่อหาปัจจัยที่เหลือที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด แสดงผล Comparisons test ดังภาพที่ 6-20

AMOE/D-DE: Fisher Pairwise Comparisons: Response = RNDS1, Term = Nb*Beta*LR

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb*Beta*LR	N	Mean	Grouping
5 0.8 0.5	12	0.298250	A
20 0.8 0.3	12	0.204802	A B
20 0.5 0.5	12	0.130557	B
20 0.8 0.5	12	0.118504	B
5 0.8 0.3	12	0.116150	B
20 0.5 0.3	12	0.087700	B
5 0.5 0.3	12	0.081884	B
5 0.5 0.5	12	0.068833	B

Means that do not share a letter are significantly different.

AMOE/D-DE: Fisher Pairwise Comparisons: Response = RNDS1, Term = Beta*NR*Alpha

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Beta*NR*Alpha	N	Mean	Grouping
0.8 2 0.5	12	0.246980	A
0.8 5 0.3	12	0.246580	A
0.8 5 0.5	12	0.161058	A B
0.5 2 0.3	12	0.122137	A B
0.5 5 0.5	12	0.101488	A B
0.8 2 0.3	12	0.083088	B
0.5 5 0.3	12	0.074616	B
0.5 2 0.5	12	0.070735	B

Means that do not share a letter are significantly different.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 6-20 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา L3 (AMOE/D-DE)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย $Nb*\beta*LR$ พบว่า ที่ระดับปัจจัย $5*0.8*0.5$ และ $20*0.8*0.3$ อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุด คือ $5*0.8*0.5$

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัย $\beta*NR*\alpha$ พบว่า ที่ระดับปัจจัย $0.8*2*0.5$, $0.8*5*0.3$, $0.8*5*0.5$, $0.5*2*0.3$ และ $0.5*5*0.5$ อยู่ในกลุ่มของปัจจัยที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองดีที่สุด โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกปัจจัยร่วมที่ให้ค่าตอบสนองดีที่สุด คือ $0.8*2*0.5$

สรุปค่าพารามิเตอร์ของ AMOE/D-DE สำหรับปัญหา L3 คือ $Nb = 5$, $NR = 2$, $\beta = 0.8$, $\alpha = 0.5$ และ $LR = 0.5$

6.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ในงานวิจัยนี้ จะแสดงผลสรุปการทดสอบค่าตัวแปรตอบสนองของแต่ละปัญหาในรูปแบบของตาราง แสดงสัญลักษณ์และความหมายสำหรับอ่านตาราง ดังนี้

- เมื่อ คือ แต่ละระดับปัจจัยของปัจจัยนั้น ๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
- คือ ไม่มีการวิเคราะห์ปัจจัยนั้น ๆ เนื่องจากได้ผลการวิเคราะห์แล้ว
- ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้น ๆ ที่ได้จากผลสรุปการวิเคราะห์ของค่าตัวแปรตอบสนองนั้น ๆ (ระดับปัจจัยของปัจจัยหลักมีนัยสำคัญ)
- ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้น ๆ ที่ได้จากผลสรุปการวิเคราะห์ของค่าตัวแปรตอบสนองนั้น ๆ (ระดับปัจจัยของปัจจัยร่วมมีนัยสำคัญ)
- ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้น ๆ ถูกนำมาประเมินใหม่ เนื่องจากเกิดปัจจัยร่วมของตัวแปรตอบสนองอื่น ๆ โดยที่ค่าพารามิเตอร์เดิมจะถูกนำมาพิจารณาในการหาค่าระดับปัจจัยของปัจจัยร่วมใหม่
- ตัวเลข^A คือ ค่าพารามิเตอร์ ซึ่งได้จากผลสรุปการวิเคราะห์ของปัจจัยร่วมกลุ่มที่ A ของตัวแปรตอบสนองนั้น ๆ ยกตัวอย่างกรณีปัจจัยร่วม 2 ปัจจัย เช่น $Nb = 20^1$, $F = 0.5^{1,2}$ และ $CR = 1.0^2$ หมายความว่า ปัจจัยร่วมกลุ่มที่ 1 คือ $Nb * F$ ได้ค่าระดับปัจจัยเท่ากับ $20 * 0.5$ และปัจจัยร่วมกลุ่มที่ 2 คือ $F * CR$ ได้ค่าระดับปัจจัยเท่ากับ $0.5 * 1.0$

แสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนองของแต่ละปัญหา ดังตารางที่ 6-7 ถึง 6-15 (หากเป็น ทั้งหมดให้เลือกค่าพารามิเตอร์ตามกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ)

ตารางที่ 6-7 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S1 และ S2

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*	
S1	MOEA/D	Nb	✗	✗	✗	✗	✗	
		NR	✗	✗	✗	✗	✗	
	MODE	F	✗	✗	✗	✗	✗	
		CR	✗	✗	✗	✗	✗	
	MODE/D	Nb	✗	✗	✗	✗	✗	
		NR	2	-	-	-	-	
		F	0.5	-	-	-	-	
		CR	✗	✗	0.9	-	-	
	AMOEAD/DE	Nb	✗	✗	20^1	-	-	
		β	✗	✗	$0.8^{1,2}$	-	-	
		NR	✗	✗	$2^{1,2}$	-	-	
		α	✗	✗	$0.3^{1,2}$	-	-	
		LR	✗	✗	0.3^2	-	-	
	S2	MOEA/D	Nb	✗	✗	✗	✗	✗
			NR	✗	✗	✗	✗	✗
MODE		F	✗	✗	✗	✗	✗	
		CR	✗	✗	✗	✗	✗	
MODE/D		Nb	20	-	20^1	-	-	
		NR	✗	✗	5^1	-	-	
		F	1.0^1	-	1.0^1	-	-	
		CR	0.9^1	-	-	-	-	
AMOEAD/DE		Nb	✗	✗	$20^{1,2}$	-	20^1	
		β	✗	✗	0.5^2	-	-	
		NR	✗	✗	$5^{1,2}$	-	5^1	
		α	✗	✗	✗	✗	0.5^1	
		LR	✗	✗	0.3^1	-	-	

ตารางที่ 6-8 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S3 และ S4

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*	
S3	MOEA/D	Nb	✗	✗	✗	✗	✗	
		NR	✗	✗	✗	✗	✗	
	MODE	F	✗	✗	✗	✗	✗	
		CR	0.9	-	-	-	-	
	MODE/D	Nb	20	20^1	-	-	-	
		NR	✗	2^1	-	-	-	
		F	✗	1.0^1	-	-	-	
		CR	✗	✗	0.9	-	-	
	AMOEAD-DE	Nb	5^2	-	-	-	-	
		β	$0.5^{1,2}$	-	-	-	-	
		NR	✗	5^1	-	-	-	
		α	0.5^1	0.5^1	-	-	-	
		LR	$0.5^{1,2}$	0.5^1	-	-	-	
	S4	MOEA/D	Nb	✗	✗	5	-	-
			NR	✗	✗	✗	✗	✗
MODE		F	✗	✗	✗	✗	✗	
		CR	✗	✗	✗	✗	0.7	
MODE/D		Nb	20	-	20	-	-	
		NR	✗	✗	✗	✗	✗	
		F	0.5	-	0.5	-	-	
		CR	0.9	-	-	-	-	
AMOEAD-DE		Nb	✗	20^1	20	-	-	
		β	✗	✗	0.8	-	-	
		NR	✗	2^1	-	-	-	
		α	✗	0.3^1	-	-	-	
		LR	✗	0.5^1	-	-	-	

ตารางที่ 6-9 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S5 และ S6

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*	
S5	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x	
		NR	x	x	x	x	x	
	MODE	F	x	x	x	x	x	
		CR	x	0.9	-	-	-	
	MODE/D	Nb	20^1	20^1	20^1	-	-	
		NR	x	x	5^1	-	-	
		F	$1.0^{1,2}$	1.0^1	1.0^1	-	-	
		CR	0.9^2	0.9^1	-	-	-	
	AMOEAD/DE	Nb	$5^{1,2}$	-	-	-	$5^{1,2}$	
		β	0.8^1	-	-	-	0.8^1	
		NR	x	x	x	x	$2^{1,2}$	
		α	$0.3^{1,2}$	-	-	-	0.3^2	
		LR	0.3^2	-	-	-	$0.3^{1,2}$	
	S6	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	5
			NR	x	x	x	x	2
MODE		F	x	x	x	x	x	
		CR	x	x	x	x	0.7	
MODE/D		Nb	$20^{1,2}$	-	-	-	-	
		NR	2^1	2^1	-	-	-	
		F	x	0.5^1	-	-	-	
		CR	1.0^2	1.0^1	-	-	-	
AMOEAD/DE		Nb	x	x	5^1	-	-	
		β	0.8	-	-	-	-	
		NR	x	x	5^1	-	-	
		α	x	x	0.5^1	-	-	
		LR	0.5	-	0.5^1	-	-	

ตารางที่ 6-10 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M1 และ M2

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*
M1	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-
		NR	2	-	-	-	-
	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.9	-	-	-	-
	MODE/D	Nb	20	20	-	-	-
		NR	x	x	x	x	x
		F	0.5	0.5	-	-	-
		CR	x	x	x	x	x
	AMOEAD/DE	Nb	x	x	20^1	-	-
		β	0.8	0.8	-	-	-
		NR	2	-	2^2	-	-
		α	x	0.3	0.3^1	-	-
		LR	x	x	0.5^2	-	-
	M2	MOEA/D	Nb	5	-	-	-
NR			5	-	-	-	-
MODE		F	x	x	x	x	x
		CR	0.9	-	-	-	-
MODE/D		Nb	20	20	-	-	20^1
		NR	x	x	x	x	x
		F	0.5	0.5	-	-	0.5^1
		CR	x	x	x	x	0.9^1
AMOEAD/DE		Nb	5^1	-	-	-	-
		β	x	x	x	x	0.8
		NR	x	2	-	-	-
		α	0.3^1	-	-	-	0.3
		LR	0.3^1	0.3	-	-	-

ตารางที่ 6-11 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M3 และ M4

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*
M3	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-
		NR	5	-	-	-	-
	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.9	-	-	-	-
	MODE/D	Nb	20^1	-	-	-	-
		NR	5^1	-	-	-	-
		F	0.5^1	-	-	-	-
		CR	1.0	-	-	-	-
	AMOEAD/D-DE	Nb	5^1	-	-	-	-
		β	0.8^2	-	-	-	-
		NR	5^2	-	-	-	-
		α	0.5^1	-	-	-	-
		LR	x	0.5	-	-	-
	M4	MOEA/D	Nb	5	-	-	-
NR			x	x	x	x	x
MODE		F	0.5	-	-	-	-
		CR	0.9	-	-	-	-
MODE/D		Nb	20	$20^{1,2}$	-	-	-
		NR	5	$5^{1,3}$	-	-	-
		F	x	x	x	x	x
		CR	1.0	$1.0^{2,3}$	-	-	-
AMOEAD/D-DE		Nb	x	x	x	x	20^1
		β	x	x	x	x	0.5^1
		NR	x	x	x	x	5^1
		α	x	x	x	x	0.5^1
		LR	x	x	x	x	0.5^1

ตารางที่ 6-12 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M5 และ M6

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*
M5	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-
		NR	2	-	-	-	-
	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	0.9	-	-	-	-
	MODE/D	Nb	20	20 ¹	-	-	-
		NR	x	x	x	x	x
		F	1.0	1.0 ¹	-	-	-
		CR	1.0	1.0 ¹	-	-	-
	AMOEAD/DE	Nb	x	x	x	x	x
		β	x	x	x	x	x
		NR	x	x	x	x	5
		α	x	x	x	x	0.3
		LR	0.5	-	-	-	-
	M6	MOEA/D	Nb	x	x	5	-
NR			x	x	x	x	x
MODE		F	x	0.5	-	-	-
		CR	0.9	0.9	-	-	-
MODE/D		Nb	20 ¹	-	-	-	-
		NR	2 ¹	-	-	-	-
		F	0.5	-	-	-	-
		CR	1.0 ¹	-	-	-	-
AMOEAD/DE		Nb	20	-	20 ^{1,2}	-	-
		β	x	x	0.5 ³	-	-
		NR	x	x	5 ^{1,3}	-	-
		α	0.5	-	0.5 ²	-	-
		LR	x	x	0.3 ¹	-	-

ตารางที่ 6-13 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L1 และ L2

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*	
L1	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-	
		NR	5	-	-	-	-	
	MODE	F	x	x	1.0	-	-	
		CR	0.9	-	0.9	-	-	
	MODE/D	Nb	20	20	-	-	-	
		NR	x	x	x	x	x	
		F	0.5	0.5	-	-	-	
		CR	x	x	x	x	0.9	
	AMOEAD/DE	Nb	$0.7^{1,2}$	-	-	-	-	
		β	0.8^2	-	-	-	-	
		NR	0.5^1	-	-	-	-	
		α	0.5^1	-	-	-	-	
		LR	$0.5^{1,2}$	-	-	-	-	
	L2	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-
			NR	x	x	x	x	x
MODE		F	0.5	-	-	-	-	
		CR	0.9	-	-	-	-	
MODE/D		Nb	20^1	20^1	-	-	-	
		NR	x	5	-	-	-	
		F	$0.5^{1,2}$	0.5^1	-	-	-	
		CR	0.9^2	0.9^1	-	-	-	
AMOEAD/DE		Nb	$0.3^{1,3}$	-	-	-	-	
		β	0.5^2	-	-	-	-	
		NR	x	x	x	x	x	
		α	$0.3^{1,2}$	-	-	-	-	
		LR	0.3^3	-	-	-	-	

ตารางที่ 6-14 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L3 และ L4

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*	
L3	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-	
		NR	5	-	-	-	-	
	MODE	F	x	x	x	x	0.5	
		CR	0.9	-	-	-	-	
	MODE/D	Nb	20	-	20^1	-	$20^{1,2}$	
		NR	x	x	x	x	2^1	
		F	0.5	-	$0.5^{1,2}$	-	-	
		CR	x	x	0.9^2	-	0.9^2	
	AMOEAD/DE	Nb	x	0.3^1	-	-	-	
		β	x	$0.8^{1,2}$	-	-	-	
		NR	x	0.5^2	-	-	-	
		α	x	0.5^2	-	-	-	
		LR	x	0.5^1	-	-	-	
	L4	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	-
			NR	2	-	-	-	-
MODE		F	0.5	-	-	-	-	
		CR	0.9	-	-	-	-	
MODE/D		Nb	20	$20^{1,2}$	-	-	-	
		NR	x	5^2	-	-	-	
		F	0.5	$0.5^{1,2}$	-	-	-	
		CR	0.9	0.9^1	-	-	-	
AMOEAD/DE		Nb	x	0.3^1	-	-	-	
		β	0.5	$0.5^{1,2}$	-	-	-	
		NR	x	$0.8^{1,2}$	-	-	-	
		α	0.5	$0.5^{1,2}$	-	-	-	
		LR	x	0.3^2	-	-	-	

ตารางที่ 6-15 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L5 และ L6

Problem	Algorithm	Parameter	GD	R_{NDS1}	IGD	R_{NDS2}	Δ^*	
L5	MOEA/D	Nb	5	-	-	-	5	
		NR	✗	✗	✗	✗	5	
	MODE	F	✗	✗	0.5	-	-	
		CR	0.9	-	-	-	-	
	MODE/D	Nb	20^1	-	-	-	-	
		NR	2^2	-	-	-	-	
		F	1.0^1	-	-	-	-	
		CR	$1.0^{1,2}$	-	-	-	-	
	AMOEAD/DE	Nb	0.3^1	-	-	-	0.3^1	
		β	$0.8^{1,2}$	-	-	-	-	
		NR	0.5^2	-	-	-	-	
		α	✗	✗	✗	✗	0.5^1	
		LR	$0.3^{1,2}$	-	-	-	0.3^1	
	L6	MOEA/D	Nb	5	-	5	-	-
			NR	✗	✗	5	-	-
MODE		F	✗	✗	0.5	-	-	
		CR	0.9	-	0.9	-	-	
MODE/D		Nb	20	-	-	-	-	
		NR	2^1	-	-	-	-	
		F	1.0^2	-	-	-	-	
		CR	$1.0^{1,2}$	-	-	-	-	
AMOEAD/DE		Nb	0.3^1	-	-	-	-	
		β	0.5^1	-	-	-	-	
		NR	0.8^1	-	-	-	-	
		α	0.3^1	-	-	-	-	
		LR	0.3^1	-	-	-	-	

6.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ด้วยโปรแกรมมินิแท็บ 17 (Minitab 17) เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดกับแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึมนั้น ๆ แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 6-16

ตารางที่ 6-16 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Set	MOEA/D		MODE		MODE/D				AMOEAD-DE				
	<i>Nb</i>	<i>NR</i>	<i>F</i>	<i>CR</i>	<i>Nb</i>	<i>NR</i>	<i>F</i>	<i>CR</i>	<i>Nb</i>	<i>NR</i>	β	α	<i>LR</i>
S1	5	5	1.0	0.9	5	2	0.5	0.9	20	2	0.8	0.3	0.3
S2	5	5	1.0	0.9	20	5	1.0	0.9	20	5	0.5	0.5	0.3
S3	5	2	1.0	0.9	20	2	1.0	0.9	5	5	0.5	0.5	0.5
S4	5	2	0.5	0.7	20	2	0.5	0.9	20	2	0.8	0.3	0.5
S5	5	2	1.0	0.9	20	5	1.0	0.9	5	2	0.8	0.3	0.3
S6	5	2	1.0	0.7	20	2	0.5	1.0	5	5	0.8	0.5	0.5
M1	5	2	0.5	0.9	20	5	0.5	1.0	20	2	0.8	0.3	0.5
M2	5	5	1.0	0.9	20	2	0.5	0.9	5	2	0.8	0.3	0.3
M3	5	5	1.0	0.9	20	5	0.5	1.0	5	5	0.8	0.5	0.5
M4	5	2	0.5	0.9	20	5	0.5	1.0	20	5	0.5	0.5	0.5
M5	5	2	1.0	0.9	20	2	1.0	1.0	20	5	0.8	0.3	0.5
M6	5	2	0.5	0.9	20	2	0.5	1.0	20	5	0.5	0.5	0.3
L1	5	5	1.0	0.9	20	5	0.5	0.9	20	2	0.8	0.5	0.5
L2	5	5	0.5	0.9	20	5	0.5	0.9	5	2	0.5	0.3	0.3
L3	5	5	0.5	0.9	20	2	0.5	0.9	5	2	0.8	0.5	0.5
L4	5	2	0.5	0.9	20	5	0.5	0.9	5	5	0.5	0.5	0.3
L5	5	5	0.5	0.9	20	2	1.0	1.0	5	2	0.8	0.5	0.3
L6	5	5	0.5	0.9	20	2	1.0	1.0	5	5	0.5	0.3	0.3

บทที่ 7

การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

ในบทนี้ นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมด้วยค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง ในบทก่อนหน้า โดยมีอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบทั้งหมด 4 อัลกอริทึม ได้แก่ MOEA/D, MODE, MODE/D และ AMOEA/D-DE ซึ่งนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน จำนวนทั้งสิ้น 18 ปัญหา โดยแบ่งเป็นปัญหาขนาดเล็ก ปัญหาขนาดกลาง และปัญหาขนาดใหญ่ อย่างละ 6 ปัญหา โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมจากบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.1.3

7.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม

การดำเนินงานของอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการแก้ปัญหาทั้ง 18 ปัญหา ด้วยวิธีการของแต่ละอัลกอริทึม โดยกำหนดจำนวนทำซ้ำ 3 รอบ และจำนวนเจเนอเรชันในการพัฒนาคำตอบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึมจำนวน 3000 รอบ
2. เมื่อได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว ให้นำคำตอบทั้งหมดมากำหนดค่าความแข็งแกร่งด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Non-dominated Sorting) และคัดเลือกเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าความแข็งแกร่งเท่ากับ 1) มาเป็นกลุ่มคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate Pareto Frontier)
3. คำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ด้วยคำตอบที่หาได้ของแต่ละอัลกอริทึม กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
4. เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละด้านของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว ให้นำตัวชี้วัดในด้านเดียวกันมาเปรียบเทียบทางสถิติ โดยในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 อัลกอริทึม จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิธีพิชเซอร์แพร์ไวส์ (Fisher pairwise comparisons test) ในการทดสอบความแตกต่างของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้โปรแกรม MATLAB r2015b ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านด้วยอัลกอริทึม MOEA/D, MODE, MODE/D และ AMOEA/D-DE บนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz RAM 16 GB Windows 10 64 bit operation system

7.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละอัลกอริทึม

เนื่องจากแต่ละปัญหาที่ใช้ในการทดลอง มีความแตกต่างกันในรายละเอียดของปัญหา ดังนั้น การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมในการแก้ปัญหา จะได้ผลค่าตอบที่ดีที่สุด เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งในงานวิจัยนี้ บางค่าพารามิเตอร์จะใช้ผลการทดลองของงานวิจัยอื่น ที่ทำการแก้ปัญหามาจัดลำดับการผลิที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาของงานวิจัยนี้ แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของอัลกอริทึม ดังตารางที่ 7-1 ถึง 7-4

ตารางที่ 7-1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MOEA/D

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร (N)	133	เทียบเคียงจาก Peng et al. (2009)
จำนวนสตริงข้างเคียง (Nb)	สำหรับทุกปัญหา: 5	การทดลอง (บทที่ 6)
จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR)	ปัญหา S1: 5 ปัญหา S2: 5 ปัญหา S3-M1: 2 ปัญหา M2: 5 ปัญหา M3: 5 ปัญหา M4: 2 ปัญหา M5: 2 ปัญหา M6: 2 ปัญหา L1: 5 ปัญหา L2: 5 ปัญหา L3: 5 ปัญหา L4: 2 ปัญหา L5: 5 ปัญหา L6: 5	การทดลอง (บทที่ 6)
วิธีการครอสโอเวอร์	PMX	Zhao, Chen, Wang, and Zhang (2016)

ตารางที่ 7-2 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MODE

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร (N)	133	เท่ากับอัลกอริทึมอื่น ๆ
ค่าปัจจัยขยายผลต่าง (F)	ปัญหา S1: 1.0 ปัญหา S2: 1.0 ปัญหา S3: 1.0 ปัญหา S4: 0.5 ปัญหา S5: 1.0 ปัญหา S6: 1.0 ปัญหา M1: 0.5 ปัญหา M2: 1.0 ปัญหา M3: 1.0 ปัญหา M4: 0.5 ปัญหา M5: 1.0 ปัญหา M6: 0.5 ปัญหา L1: 1.0 ปัญหา L2-L6: 0.5	การทดลอง (บทที่ 6)
อัตราการครอสโอเวอร์ (CR)	ปัญหา S1: 0.9 ปัญหา S2: 0.9 ปัญหา S3: 0.9 ปัญหา S4: 0.7 ปัญหา S5: 0.9 ปัญหา S6: 0.7 ปัญหา M1-L6: 0.9	การทดลอง (บทที่ 6)
รูปแบบกลยุทธ์	DE/rand/1/bin	Alatas et al. (2008)

ตารางที่ 7-3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MODE/D

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร (N)	133	เทียบเคียงจาก Peng et al. (2009)
จำนวนสตริงข้างเคียง (Nb)	ปัญหา S1: 5 ปัญหา S2-9.2: 20	การทดลอง (บทที่ 6)
จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR)	ปัญหา S1: 2 ปัญหา S2: 5 ปัญหา S3: 2 ปัญหา S4: 2 ปัญหา S5: 5 ปัญหา S6: 2 ปัญหา M1: 5 ปัญหา M2: 2 ปัญหา M3: 5 ปัญหา M4: 5 ปัญหา M5: 2 ปัญหา M6: 2 ปัญหา L1: 5 ปัญหา L2: 5 ปัญหา L3: 2 ปัญหา L4: 5 ปัญหา L5: 2 ปัญหา L6: 2	การทดลอง (บทที่ 6)

ตารางที่ 7-3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ MODE/D (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
ค่าปัจจัยขยายผลต่าง (F)	ปัญหา S1: 0.5 ปัญหา S2: 1.0 ปัญหา S3: 1.0 ปัญหา S4: 0.5 ปัญหา S5: 1.0 ปัญหา S6-M4: 0.5 ปัญหา M5: 1.0 ปัญหา M6-L4: 0.5 ปัญหา L5: 1.0 ปัญหา L6: 1.0	การทดลอง (บทที่ 6)
อัตราการครอสโอเวอร์ (CR)	ปัญหา S1-S5: 0.9 ปัญหา S6: 1.0 ปัญหา M1: 1.0 ปัญหา M2: 0.9 ปัญหา M3-M6: 1.0 ปัญหา L1-8.2: 0.9 ปัญหา L5: 1.0 ปัญหา L6: 1.0	การทดลอง (บทที่ 6)
รูปแบบกลยุทธ์	DE/rand/1/bin	Li and Zhang (2006)
ความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (p_m)	$1/nc$	S. M. Venske et al. (2014)
ดัชนีการกระจายตัวของการแจกแจงแบบพหุนาม (η)	20	S. M. Venske et al. (2014)

ตารางที่ 7-4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ AMOEVA/D-DE

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
จำนวนประชากร (N)	133	เทียบเคียงจาก Peng et al. (2009)
จำนวนสตริงข้างเคียง (Nb)	ปัญหา S1: 20 ปัญหา S2: 20 ปัญหา S3: 5 ปัญหา S4: 20 ปัญหา S5: 5 ปัญหา S6: 5 ปัญหา M1: 20 ปัญหา M2: 5 ปัญหา M3: 5 ปัญหา M4-L1: 20 ปัญหา L2-L6: 5	การทดลอง (บทที่ 6)
จำนวนการแทนที่คำตอบสูงสุด (NR)	ปัญหา S1: 2 ปัญหา S2: 5 ปัญหา S3: 5 ปัญหา S4: 2 ปัญหา S5: 2 ปัญหา S6: 5 ปัญหา M1: 2 ปัญหา M2: 2 ปัญหา M3-M6: 5 ปัญหา L1-L3: 2 ปัญหา L4: 5 ปัญหา L5: 2 ปัญหา L6: 5	การทดลอง (บทที่ 6)

ตารางที่ 7-4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ AMOEVA/D-DE (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
ค่าเฉลี่ยปัจจัยการขยายผลต่าง เริ่มต้น (μ_F)	ปัญหา S1: 0.5 ปัญหา S2: 1.0 ปัญหา S3: 1.0 ปัญหา S4: 0.5 ปัญหา S5: 1.0 ปัญหา S6-M4: 0.5 ปัญหา M5: 1.0 ปัญหา M6-L4: 0.5 ปัญหา L5: 1.0 ปัญหา L6: 1.0	การทดลอง (บทที่ 6)
อัตราการครอสโอเวอร์เริ่มต้น (CR)	ปัญหา S1-S5: 0.9 ปัญหา S6: 1.0 ปัญหา M1: 1.0 ปัญหา M2: 0.9 ปัญหา M3-M6: 1.0 ปัญหา L1-8.2: 0.9 ปัญหา L5: 1.0 ปัญหา L6: 1.0	การทดลอง (บทที่ 6)
ค่าถ่วงน้ำหนัก เวกเตอร์พื้นฐานเริ่มต้น (γ)	สำหรับทุกปัญหา: 0.5	S. M. Venske et al. (2014)
รูปแบบกลยุทธ์	DE/rand/1/bin DE/sbest/1/bin DE/rand-to-sbest/1/bin	J. Zhang and Sanderson (2009a)
ความน่าจะเป็น ของการกลายพันธุ์ (p_m)	1/nc	S. M. Venske et al. (2014)
ดัชนีการกระจายตัว ของการแจกแจงแบบพหุนาม (η)	20	S. M. Venske et al. (2014)

ตารางที่ 7-4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ AMOEVA/D-DE (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
สัดส่วนขนาดขอบเขตที่สนใจของ การเปลี่ยนแปลงคำตอบในระบบ (si)	ปัญหา S1: 0.8 ปัญหา S2: 0.5 ปัญหา S3: 0.5 ปัญหา S4-M3: 0.8 ปัญหา M4: 0.5 ปัญหา M5: 0.8 ปัญหา M6: 0.5 ปัญหา L1: 0.8 ปัญหา L2: 0.5 ปัญหา L3: 0.8 ปัญหา L4: 0.5 ปัญหา L5: 0.8 ปัญหา L6: 0.5	การทดลอง (บทที่ 6)
สัดส่วนรางวัลสำหรับการปรับ ค่าความน่าจะเป็นของกลยุทธ์ (α)	ปัญหา S1: 0.3 ปัญหา S2: 0.5 ปัญหา S3: 0.5 ปัญหา S4: 0.3 ปัญหา S5: 0.3 ปัญหา S6: 0.5 ปัญหา M1: 0.3 ปัญหา M2: 0.3 ปัญหา M3: 0.5 ปัญหา M4: 0.5 ปัญหา M5: 0.3 ปัญหา M6-L1: 0.5 ปัญหา L2: 0.3 ปัญหา L3-L5: 0.5 ปัญหา L6: 0.3	การทดลอง (บทที่ 6)

ตารางที่ 7-4 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของ AMOEVA/D-DE (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	อ้างอิง
อัตราการเรียนรู้ (LR)	ปัญหา S1: 0.3	การทดลอง (บทที่ 6)
	ปัญหา S2: 0.3	
	ปัญหา S3: 0.5	
	ปัญหา S4: 0.5	
	ปัญหา S5: 0.3	
	ปัญหา S6: 0.5	
	ปัญหา M1: 0.5	
	ปัญหา M2: 0.3	
	ปัญหา M3-M5: 0.5	
	ปัญหา M6: 0.3	
	ปัญหา L1: 0.5	
	ปัญหา L2: 0.3	
	ปัญหา L3: 0.5	
	ปัญหา L4-L6: 0.3	

7.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

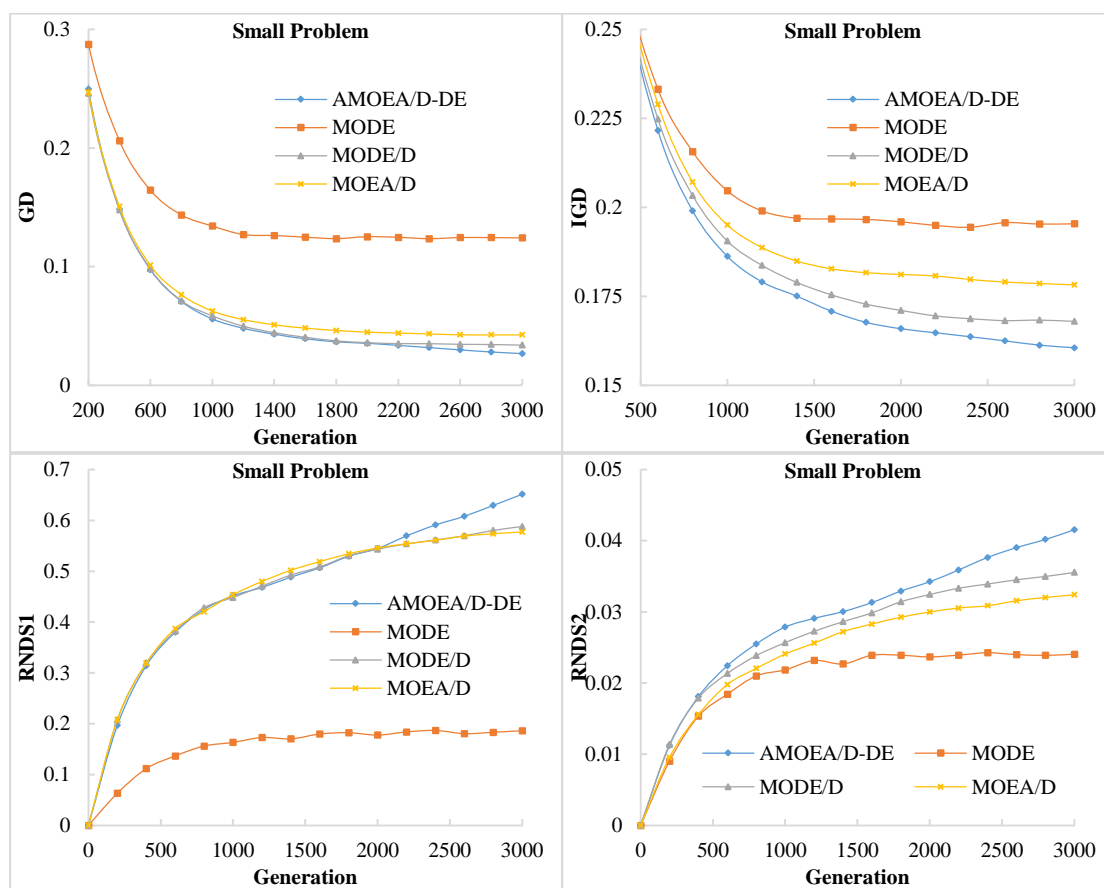
การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมจากผลการดำเนินงานในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ปัญหา S1 ถึง L6 ด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม 6 ตัว ดังนี้

1. การรู่เข้าของคำตอบ (Generational Distance)
2. การรู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance)
3. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I)
4. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II)
5. การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Distribution and Spread)
6. เวลาในการดำเนินงาน (Computational Time)

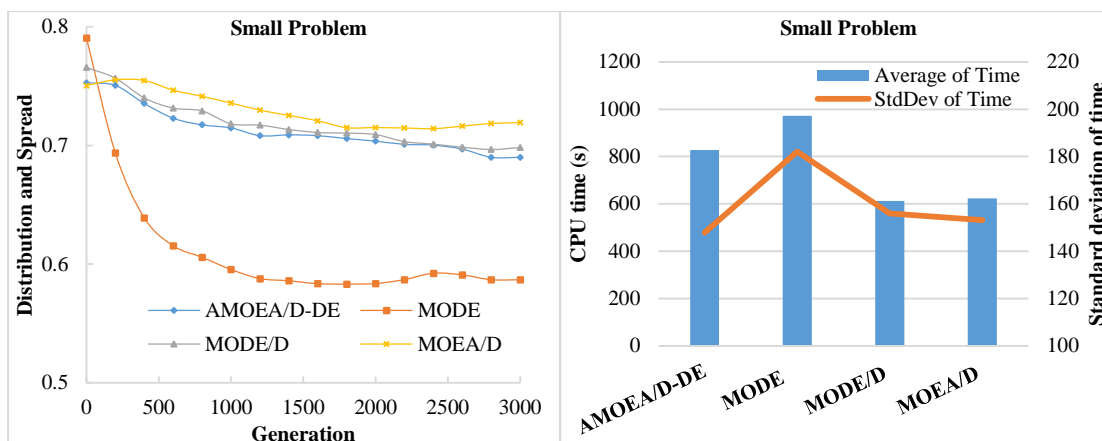
ในบทนี้ จะนำเสนอเพียงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม โดยวิเคราะห์ภาพรวมของ ปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ รวมทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง ส่วนผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ของปัญหาทั้งหมด จะแสดงในภาคผนวก ข.

7.3.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจเนอเรชันและค่าเฉลี่ย ผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ 7-1 และตารางที่ 7-5 ตามลำดับ



ภาพที่ 7-1 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก



ภาพที่ 7-1 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก (ต่อ)

ตารางที่ 7-5 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหาขนาดเล็ก

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02530 (0.01413) ¹	0.12396 (0.04738) ²	0.03325 (0.01394) ¹	0.04245 (0.04046) ¹
IGD	0.15981 (0.00799) ¹	0.19542 (0.04821) ²	0.16758 (0.01046) ¹	0.17783 (0.02597) ^{1,2}
Distribution & Spread	0.68994 (0.13414) ²	0.58681 (0.12877) ¹	0.69991 (0.13571) ²	0.72008 (0.12706) ²
RNDS1	0.67314 (0.16735) ¹	0.18922 (0.15384) ²	0.59566 (0.17508) ¹	0.58057 (0.29366) ¹
RNDS2	0.04291 (0.02401) ¹	0.02422 (0.02899) ²	0.03610 (0.02242) ^{1,2}	0.03277 (0.02426) ^{1,2}
CPU time (s)	827.834 (147.797) ²	972.905 (182.057) ³	612.390 (156.002) ¹	623.793 (153.801) ¹

หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ 7-1 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบที่เร็วกว่า MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD แต่ MODE จะดีกว่าในด้านความ

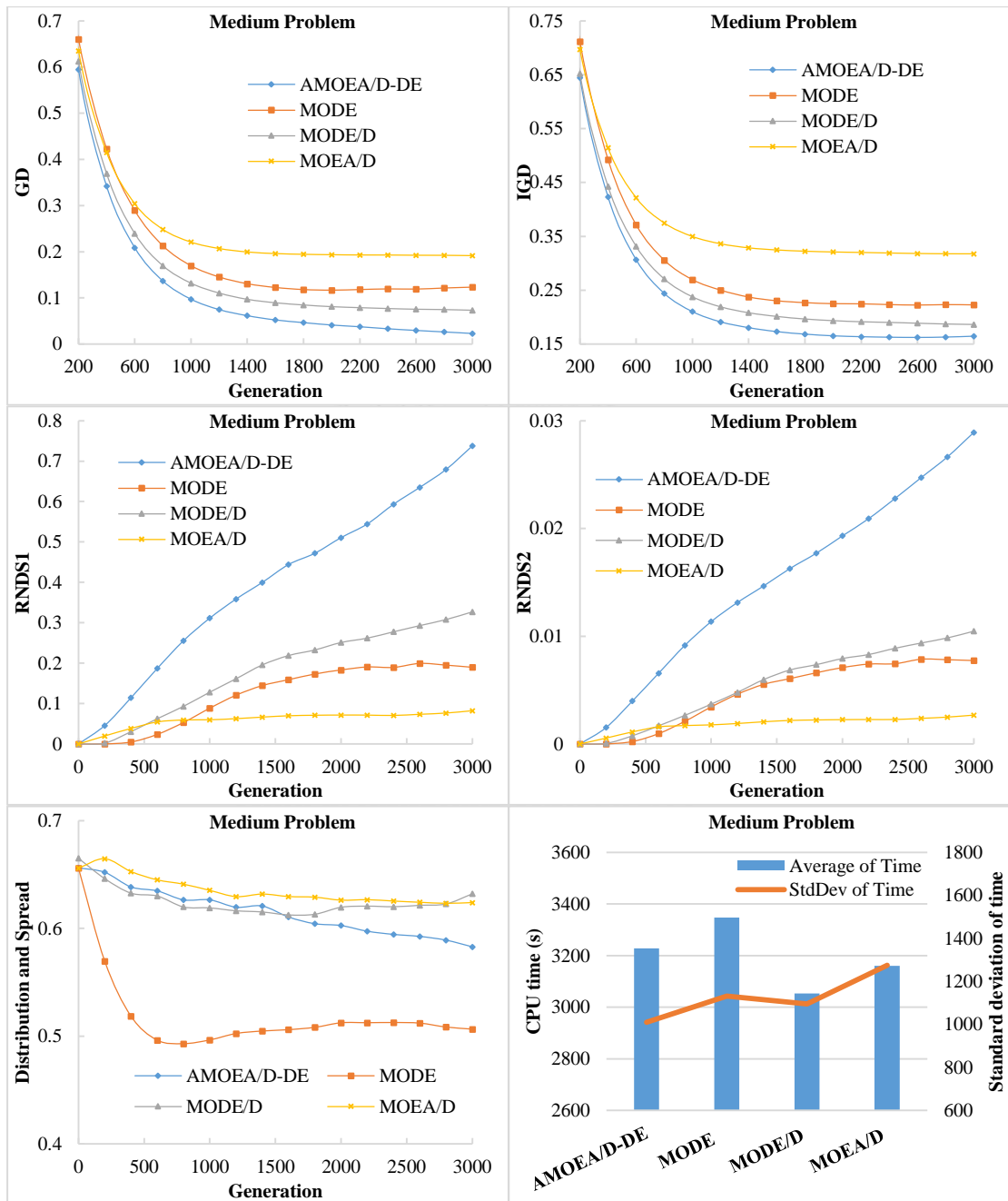
หลากหลายของคำตอบ สามารถดูได้จากกราฟ IGD และ Distribution and Spread ส่วนด้าน ปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูก ครอบงำตั้งแต่เจเนอเรชันแรก ๆ ซึ่งแตกต่างกับ MODE อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ ดังนั้น AMOEA/D-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดีเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับ อัลกอริทึมอื่น ๆ

จากตารางที่ 7-5 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ย ตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มี ค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดี ที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านในนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วน AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D และ MOEA/D ใช้เวลาในการ ดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

7.3.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ 7-2 และตารางที่ 7-6 ตามลำดับ



ภาพที่ 7-2 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง

ตารางที่ 7-6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหาขนาดกลาง

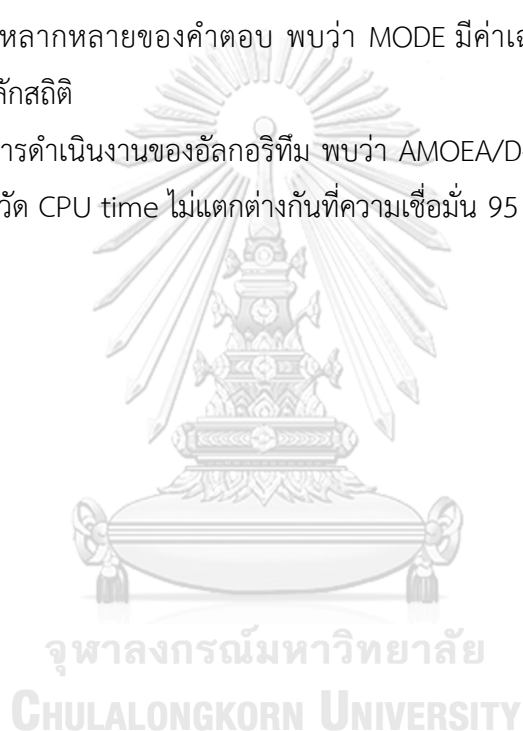
Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01973 (0.02274)¹	0.12527 (0.04857) ³	0.07191 (0.03353) ²	0.19094 (0.09764) ⁴
IGD	0.16635 (0.01468)¹	0.22238 (0.04206) ²	0.18557 (0.01286)¹	0.31748 (0.08045) ³
Distribution & Spread	0.57673 (0.05078) ²	0.50458 (0.08353)¹	0.64143 (0.07816) ³	0.62458 (0.09307) ^{2,3}
RNDS1	0.79570 (0.17074)¹	0.18455 (0.12526) ³	0.34599 (0.25444) ²	0.08826 (0.16807) ³
RNDS2	0.03118 (0.00999)¹	0.00766 (0.00461) ²	0.01109 (0.00782) ²	0.00287 (0.00498) ³
CPU time (s)	3228.260 (1010.137)¹	3347.376 (1131.570)¹	3053.405 (1095.170)¹	3160.642 (1274.500)¹

หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ 7-2 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย จะเห็นว่า MODE มีความหลากหลายที่ดีที่สุด สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

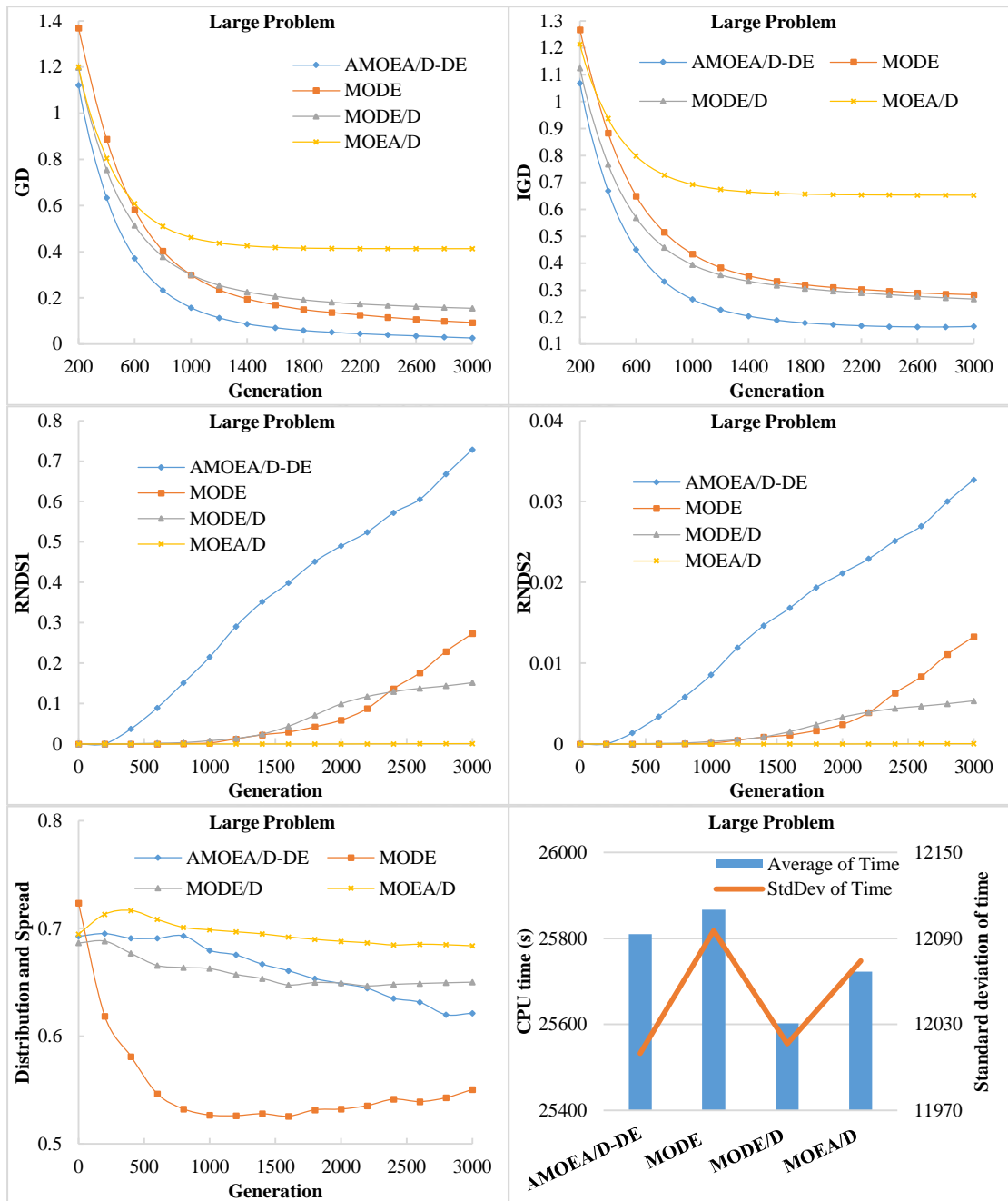
จากตารางที่ 7-6 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการรู้เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ดีที่สุดตามหลักสถิติ
2. ด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ดีที่สุดตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



7.3.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ 7-3 และตารางที่ 7-7 ตามลำดับ



ภาพที่ 7-3 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่

ตารางที่ 7-7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหาขนาดใหญ่

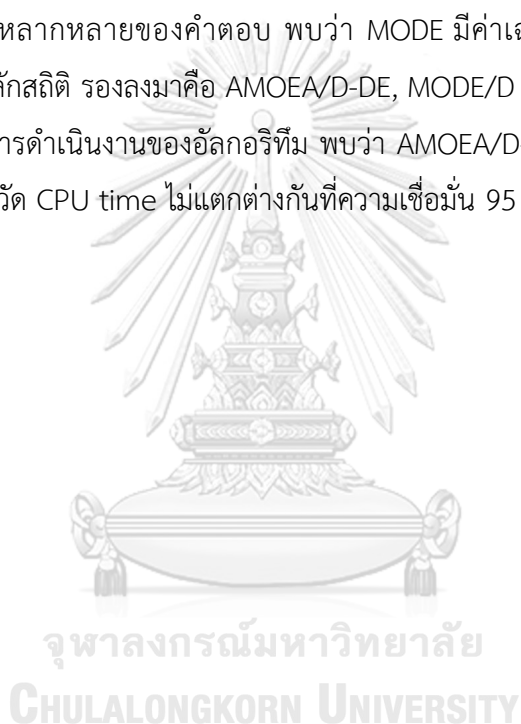
Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02235 (0.01493)¹	0.08736 (0.06343) ²	0.15163 (0.09591) ³	0.41347 (0.15321) ⁴
IGD	0.16766 (0.01774)¹	0.28005 (0.03858) ²	0.26285 (0.07110) ²	0.65279 (0.24703) ³
Distribution & Spread	0.62281 (0.05107) ²	0.55820 (0.06734)¹	0.65062 (0.05533) ^{2,3}	0.68284 (0.09812) ³
RNDS1	0.78963 (0.10517)¹	0.31746 (0.30440) ²	0.15972 (0.25959) ³	0.00093 (0.00396) ⁴
RNDS2	0.03539 (0.00816)¹	0.01546 (0.01583) ²	0.00570 (0.00873) ³	0.00004 (0.00015) ³
CPU time (s)	25810.073 (12009.785)¹	25867.082 (12095.489)¹	25602.596 (12016.434)¹	25723.012 (12074.333)¹

หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ 7-3 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย จะเห็นว่า MODE มีความหลากหลายที่ดีที่สุด สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดที่สุดอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

จากตารางที่ 7-7 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการรู้เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE, MODE/D และ MOEA/D ตามลำดับ
2. ด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE/D, MODE และ MOEA/D ตามลำดับ
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE, MODE/D และ MOEA/D ตามลำดับ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D ตามลำดับ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



7.4 สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

จากการนำอัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึม คือ AMOEA/D-DE, MODE, MODE/D และ MOEA/D มาแก้ปัญหาลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านทั้ง 18 ปัญหา พบว่า AMOEA/D-DE มีสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD), การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD), และสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ (RND1 และ RND2) ดีที่สุดในปัญหาทุกขนาด โดยจะเห็นได้ชัดเจนที่ปัญหาขนาดกลางขึ้นไป

ส่วนด้านความหลากหลายของคำตอบในเรื่องการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและความกว้างในการแพร่กระจายของคำตอบที่หาได้ (Distribution and Spread) พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านนี้ดีที่สุดในปัญหาทุกขนาด และ AMOEA/D-DE มีแนวโน้มของสมรรถนะด้านนี้ในปัญหาขนาดใหญ่ที่ใกล้เคียงกับ MODE มากขึ้น

ในด้านเวลาดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด รองลงมาคือ MOEA/D และ AMOEA/D-DE ตามลำดับ ส่วน MODE ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากที่สุด

จากการเปรียบเทียบอัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึม จะเห็นได้ว่า MOEA/D จะมีสมรรถนะโดยรวมที่ดีกว่า MODE ในปัญหาขนาดเล็ก เนื่องจากจำนวนรูปแบบของคำตอบมีจำนวนน้อย ซึ่งในปัญหาขนาดกลางและใหญ่ จำนวนรูปแบบของคำตอบมีจำนวนมาก ทำให้ปัญหาที่มีความใกล้เคียงกับปัญหาแบบต่อเนื่อง (Continuous MOPs) การใช้ DE Operator จึงเห็นผลที่ดีกว่าอย่างชัดเจน โดยสรุป ถึงแม้ว่า AMOEA/D-DE จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่มากกว่า MODE/D และ MOEA/D แต่ยังให้สมรรถนะในเกือบทุกด้านดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ และครอบคลุมปัญหาทุกขนาด

แสดงค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ของทั้ง 18 ปัญหา และผลสรุปการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมแบบภาพรวม ดังตารางที่ 7-8 และ 7-9 ตามลำดับ

ตารางที่ 7-8 สรุปผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ

Algorithm	Problem Set																	
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Generational Distance																		
AMOEAD-DE	0.0046 (0.0039)	0.0327 (0.0075)	0.0296 (0.0079)	0.0217 (0.0131)	0.0366 (0.0180)	0.0266 (0.0099)	0.0368 (0.0377)	0.0303 (0.0413)	0.0110 (0.0046)	0.0063 (0.0031)	0.0141 (0.0076)	0.0198 (0.0120)	0.0178 (0.0078)	0.0210 (0.0132)	0.0397 (0.0284)	0.0183 (0.0078)	0.0219 (0.0122)	0.0155 (0.0081)
MODE	0.0506 (0.0113)	0.0923 (0.0200)	0.1351 (0.0296)	0.1684 (0.0133)	0.1690 (0.0373)	0.1284 (0.0193)	0.1466 (0.0275)	0.0837 (0.0246)	0.1460 (0.0242)	0.1471 (0.0478)	0.1223 (0.0689)	0.1061 (0.0767)	0.0878 (0.0376)	0.0913 (0.0605)	0.1004 (0.0790)	0.0604 (0.0552)	0.0521 (0.0434)	0.1321 (0.1082)
MODE/D	0.0127 (0.0038)	0.0253 (0.0136)	0.0319 (0.0046)	0.0361 (0.0083)	0.0460 (0.0039)	0.0475 (0.0078)	0.0971 (0.0158)	0.0788 (0.0243)	0.0504 (0.0140)	0.0601 (0.0400)	0.0970 (0.0280)	0.0480 (0.0491)	0.2794 (0.0975)	0.1039 (0.0423)	0.1854 (0.0661)	0.1109 (0.1283)	0.1219 (0.0355)	0.1082 (0.0923)
MOEA/D	0.0196 (0.0160)	0.0888 (0.0681)	0.0267 (0.0163)	0.0238 (0.0124)	0.0461 (0.0482)	0.0497 (0.0359)	0.3009 (0.1184)	0.2678 (0.0347)	0.0850 (0.0748)	0.1334 (0.0588)	0.1767 (0.0804)	0.1820 (0.0324)	0.6159 (0.0845)	0.3796 (0.2905)	0.3203 (0.0267)	0.4521 (0.0912)	0.4089 (0.0446)	0.3041 (0.0226)
Inverted Generational Distance																		
AMOEAD-DE	0.1517 (0.0050)	0.1612 (0.0050)	0.1592 (0.0036)	0.1567 (0.0047)	0.1698 (0.0090)	0.1656 (0.0030)	0.1720 (0.0218)	0.1645 (0.0178)	0.1755 (0.0107)	0.1507 (0.0049)	0.1577 (0.0062)	0.1777 (0.0038)	0.1612 (0.0202)	0.1904 (0.0128)	0.1694 (0.0120)	0.1795 (0.0027)	0.1462 (0.0082)	0.1592 (0.0053)
MODE	0.1210 (0.0050)	0.1518 (0.0071)	0.2049 (0.0148)	0.2456 (0.0125)	0.2074 (0.0174)	0.2418 (0.0221)	0.2345 (0.0161)	0.1731 (0.0111)	0.2291 (0.0109)	0.2674 (0.0797)	0.2064 (0.0251)	0.2238 (0.0139)	0.2558 (0.0097)	0.2701 (0.0210)	0.3409 (0.0114)	0.2877 (0.0139)	0.2575 (0.0124)	0.2682 (0.0631)
MODE/D	0.1601 (0.0050)	0.1663 (0.0069)	0.1605 (0.0074)	0.1603 (0.0022)	0.1799 (0.0039)	0.1784 (0.0118)	0.1863 (0.0135)	0.1846 (0.0136)	0.1786 (0.0033)	0.1727 (0.0071)	0.1923 (0.0122)	0.1990 (0.0129)	0.3513 (0.1251)	0.2292 (0.0202)	0.2818 (0.0383)	0.2532 (0.0760)	0.2287 (0.0241)	0.2330 (0.0437)
MOEA/D	0.1671 (0.0070)	0.2130 (0.0452)	0.1616 (0.0110)	0.1643 (0.0111)	0.1744 (0.0234)	0.1866 (0.0041)	0.3664 (0.1089)	0.3626 (0.0307)	0.2386 (0.0081)	0.2696 (0.0318)	0.3708 (0.1272)	0.2968 (0.0251)	0.8397 (0.2084)	0.6954 (0.5079)	0.5074 (0.0682)	0.7904 (0.2313)	0.5525 (0.0653)	0.5314 (0.0500)
RND51																		
AMOEAD-DE	0.9713 (0.0294)	0.6320 (0.0677)	0.5790 (0.0568)	0.6269 (0.1602)	0.5773 (0.1769)	0.6525 (0.0799)	0.6881 (0.2801)	0.7356 (0.3125)	0.8563 (0.0538)	0.9059 (0.0536)	0.8174 (0.0784)	0.7708 (0.1077)	0.8198 (0.0695)	0.8153 (0.0952)	0.6749 (0.1861)	0.8401 (0.0509)	0.7647 (0.0952)	0.8230 (0.0729)
MODE	0.4662 (0.0924)	0.2556 (0.1061)	0.1604 (0.0441)	0.0852 (0.0544)	0.0802 (0.0483)	0.0877 (0.0414)	0.1028 (0.0845)	0.2627 (0.0343)	0.1128 (0.0615)	0.1103 (0.0264)	0.2356 (0.1735)	0.2832 (0.1917)	0.1905 (0.1651)	0.3559 (0.2983)	0.2782 (0.4002)	0.4461 (0.4053)	0.3885 (0.4823)	0.2456 (0.2132)
MODE/D	0.8743 (0.0420)	0.7336 (0.1268)	0.5589 (0.0371)	0.5192 (0.0926)	0.4709 (0.0475)	0.4170 (0.0599)	0.1129 (0.1068)	0.3238 (0.2352)	0.5106 (0.0696)	0.3131 (0.3370)	0.2126 (0.1475)	0.6030 (0.3051)	0.0000 (0.0000)	0.1790 (0.1810)	0.0513 (0.0888)	0.4417 (0.3832)	0.0224 (0.0194)	0.2639 (0.4057)
MOEA/D	0.8098 (0.0937)	0.3439 (0.4951)	0.6376 (0.1398)	0.6688 (0.1320)	0.4946 (0.3958)	0.5287 (0.3015)	0.0179 (0.0309)	0.0000 (0.0000)	0.3408 (0.3033)	0.0814 (0.0708)	0.0774 (0.1340)	0.0121 (0.0210)	0.0000 (0.0000)	0.0056 (0.0097)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)

ตารางที่ 7-8 สรุปผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ (ต่อ)

Algorithm		Problem Set																	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	M1	M2	M3	M4	M5	M6	L1	L2	L3	L4	L5	L6
RNDS2																			
AMOEAD-DE	0.0804 (0.0047)	0.0490 (0.0085)	0.0286 (0.0024)	0.0225 (0.0057)	0.0286 (0.0087)	0.0283 (0.0029)	0.0405 (0.0153)	0.0266 (0.0119)	0.0260 (0.0008)	0.0413 (0.0031)	0.0287 (0.0029)	0.0240 (0.0031)	0.0424 (0.0071)	0.0320 (0.0036)	0.0416 (0.0117)	0.0272 (0.0020)	0.0397 (0.0059)	0.0287 (0.0008)	
MODE	0.0726 (0.0144)	0.0492 (0.0204)	0.0093 (0.0026)	0.0038 (0.0024)	0.0055 (0.0033)	0.0049 (0.0023)	0.0074 (0.0061)	0.0106 (0.0014)	0.0039 (0.0021)	0.0055 (0.0013)	0.0091 (0.0067)	0.0094 (0.0064)	0.0116 (0.0100)	0.0154 (0.0129)	0.0180 (0.0260)	0.0168 (0.0153)	0.0218 (0.0271)	0.0091 (0.0079)	
MODE/D	0.0652 (0.0038)	0.0671 (0.0094)	0.0257 (0.0017)	0.0186 (0.0041)	0.0235 (0.0026)	0.0167 (0.0029)	0.0067 (0.0065)	0.0099 (0.0070)	0.0137 (0.0030)	0.0126 (0.0138)	0.0064 (0.0041)	0.0173 (0.0088)	0.0000 (0.0000)	0.0067 (0.0069)	0.0029 (0.0051)	0.0145 (0.0125)	0.0011 (0.0010)	0.0090 (0.0139)	
MOEA/D	0.0617 (0.0047)	0.0342 (0.0518)	0.0293 (0.0076)	0.0238 (0.0055)	0.0243 (0.0199)	0.0233 (0.0132)	0.0011 (0.0019)	0.0000 (0.0000)	0.0097 (0.0089)	0.0035 (0.0030)	0.0025 (0.0044)	0.0003 (0.0006)	0.0000 (0.0000)	0.0002 (0.0004)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	0.0000 (0.0000)	
Distribution and Spread																			
AMOEAD-DE	0.8353 (0.0176)	0.5925 (0.0513)	0.5780 (0.0070)	0.5361 (0.0356)	0.8627 (0.0138)	0.7350 (0.0201)	0.5567 (0.0385)	0.5595 (0.0275)	0.6032 (0.0339)	0.5158 (0.0266)	0.5985 (0.0398)	0.6267 (0.0643)	0.6426 (0.0562)	0.6995 (0.0242)	0.5932 (0.0195)	0.6193 (0.0181)	0.6173 (0.0058)	0.5649 (0.0430)	
MODE	0.6101 (0.0734)	0.5117 (0.0646)	0.4848 (0.0714)	0.4536 (0.0152)	0.7949 (0.0022)	0.6657 (0.0154)	0.5267 (0.0600)	0.5062 (0.0310)	0.4622 (0.0227)	0.4100 (0.0580)	0.4745 (0.0375)	0.6479 (0.0202)	0.5407 (0.0099)	0.6364 (0.0270)	0.6198 (0.0415)	0.5202 (0.0564)	0.5557 (0.0372)	0.4766 (0.0627)	
MODE/D	0.8348 (0.0457)	0.5960 (0.0078)	0.6125 (0.0768)	0.5370 (0.0103)	0.8822 (0.0098)	0.7370 (0.0401)	0.5762 (0.0268)	0.5907 (0.0864)	0.6678 (0.0444)	0.5897 (0.0165)	0.6648 (0.0568)	0.7593 (0.0361)	0.6198 (0.0753)	0.6745 (0.0411)	0.7030 (0.0114)	0.6457 (0.0254)	0.6490 (0.0934)	0.6117 (0.0214)	
MOEA/D	0.8525 (0.0155)	0.6332 (0.0975)	0.6305 (0.0723)	0.5769 (0.0124)	0.8813 (0.0231)	0.7461 (0.0343)	0.5133 (0.0281)	0.6028 (0.0404)	0.6724 (0.0208)	0.5699 (0.0236)	0.6036 (0.0419)	0.7855 (0.0392)	0.6044 (0.0710)	0.8118 (0.1388)	0.6892 (0.0419)	0.6413 (0.0523)	0.7194 (0.0627)	0.6310 (0.0789)	
Computational time (sec)																			
AMOEAD-DE	683.85 (2.51)	696.30 (3.13)	771.55 (1.22)	763.60 (4.29)	1028.00 (1.60)	1023.70 (1.92)	2183.88 (3.58)	2175.40 (2.04)	2957.15 (1.36)	2974.05 (3.17)	4593.42 (2.76)	4485.66 (2.30)	10368.531 (9.400)	10281.198 (34.700)	28092.339 (530.000)	29219.948 (65.545)	38170.042 (1106.590)	38728.380 (611.565)	
MODE	776.23 (10.66)	725.20 (13.63)	969.67 (4.06)	1006.13 (5.06)	1165.38 (8.00)	1194.82 (12.79)	2235.26 (11.60)	2229.61 (10.43)	2974.87 (5.20)	2993.06 (30.40)	4705.70 (9.86)	4945.76 (396.00)	10318.026 (15.200)	10322.021 (120.500)	28078.323 (534.000)	29190.661 (188.606)	37996.802 (1376.961)	39296.656 (1031.302)	
MODE/D	470.00 (1.87)	462.26 (0.85)	548.65 (0.51)	550.93 (1.25)	821.55 (1.96)	820.95 (0.78)	1976.84 (15.33)	1968.98 (3.36)	2690.03 (2.20)	2684.44 (15.57)	4460.04 (13.16)	4540.11 (78.40)	10125.703 (23.100)	10042.813 (30.100)	28234.167 (1534.000)	28925.906 (229.296)	37409.370 (752.173)	38877.620 (1236.215)	
MOEA/D	485.82 (5.83)	479.79 (7.38)	558.13 (1.78)	560.13 (0.93)	830.60 (2.30)	828.28 (1.34)	1980.41 (18.90)	1979.71 (1.03)	2709.65 (3.72)	2692.38 (7.73)	4482.41 (3.74)	5119.31 (785.00)	10157.042 (33.700)	10080.620 (43.900)	28252.922 (571.000)	29168.776 (156.315)	37537.464 (691.065)	39141.250 (1023.600)	

ตารางที่ 7-9 สรุปผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมแบบภาพรวม

Algorithm	Problem Set		
	Small	Medium	Large
Generational Distance			
AMOEAD/DE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
MODE	4	3	2
MODE/D	<u>2</u>	2	3
MOEA/D	<u>3</u>	4	4
Inverted Generational Distance			
AMOEAD/DE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
MODE	4	3	2
MODE/D	<u>2</u>	<u>2</u>	3
MOEA/D	<u>3</u>	4	4
RND1			
AMOEAD/DE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
MODE	4	3	2
MODE/D	<u>2</u>	2	3
MOEA/D	<u>3</u>	4	4
RND2			
AMOEAD/DE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
MODE	4	3	2
MODE/D	<u>2</u>	2	3
MOEA/D	<u>3</u>	4	4
Distribution and Spread			
AMOEAD/DE	2	2	2
MODE	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
MODE/D	3	4	3
MOEA/D	4	3	4
Computational time (sec.)			
AMOEAD/DE	3	<u>3</u>	<u>3</u>
MODE	4	4	4
MODE/D	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
MOEA/D	<u>2</u>	<u>2</u>	<u>2</u>

หมายเหตุ: ตัวเลข หมายถึง อันดับ (Rank) และ ตัวเลข หมายถึง สมรรถนะใกล้เคียงกัน

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ลักษณะของปัญหา การนำวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (AMOEAD-DE) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา และข้อเสนอแนะของงานวิจัย

8.1 บทสรุป

ในงานวิจัยฉบับนี้ เป็นการศึกษาวิธีการสำหรับแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน ซึ่งจัดเป็นปัญหาประเภทเอ็นพีฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard: NP-Hard) เนื่องจากมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนของปัญหา ทำให้ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมาก ดังนั้น วิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) และเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic) จึงเป็นวิธีแก้ปัญหามีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีในระดับที่ยอมรับได้ และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อยลง โดยปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านในงานวิจัยนี้ พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมกันทั้งหมด 6 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด ปริมาณงานที่ไม่เสร็จในการผลิตน้อยที่สุด เวลารอคอยงานรวมในการผลิตน้อยที่สุด จำนวนรถยนต์ที่ละเมิดตัวเลือกรวมน้อยที่สุด ความแปรผันรวมของสัดส่วนการผลิตน้อยที่สุด และความแปรผันรวมของการใช้ชิ้นส่วนในการประกอบน้อยที่สุด ซึ่งปัญหานี้จัดเป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) ทำให้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) ทั่วไป มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบลดลง จึงมีการนำวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MaOEAs) มาใช้ในการแก้ปัญหา โดยหลักของ MaOEAs ส่วนใหญ่ จะแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย ๆ ด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ ทำให้สามารถค้นหาคำตอบที่ดีของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้มากขึ้น

การแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อยถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์สำหรับแก้ปัญหา MaOPs ในทางกลับกัน MOEAs ใช้การคัดเลือกคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำในการวัดคุณภาพของคำตอบระหว่างการค้นหาเท่านั้น จึงทำให้อัลกอริทึมเหล่านี้ให้ผลลัพธ์การค้นหาคำตอบที่ไม่ดีเท่าที่ควร เพราะเกิดการกระจุกตัวของคำตอบจำนวนมาก

ผู้วิจัย ได้นำเสนอวิธีการวิวัฒนาการแบบปรับตัวโดยใช้ผลต่างสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (AMOEAD-DE) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลาย

วัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) อัลกอริทึม AMOEA/D-DE จะแบ่งปัญหา MaOPs ออกเป็นปัญหาย่อย จากนั้นจะทำการพัฒนาคำตอบของแต่ละปัญหาย่อยไปพร้อม ๆ กันด้วยกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) โดยที่แต่ละปัญหาย่อยจะถูกกำหนดปัญหาย่อยข้างเคียงด้วยระยะห่างของจุดพิกัดค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละปัญหาย่อย เพื่อเปรียบเทียบคำตอบที่พัฒนากับปัญหาย่อยในจุดพิกัดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัญหาย่อยที่มีจุดพิกัดของค่าถ่วงน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันควรมีคำตอบที่ใกล้เคียงกัน

การวัดสมรรถนะของ AMOEA/D-DE ในการแก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านทั้ง 18 ปัญหา โดยการนำไปเปรียบเทียบสมรรถนะกับอัลกอริทึมอื่น ๆ ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหา MaOPs ได้แก่ MOEA/D, MODE และ MODE/D ทั้งนี้ การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม จะอาศัยตัวชี้วัดภายใต้หลักการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Non-dominated Sorting) จำนวน 5 ด้าน ได้แก่ ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics), ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence-Diversity Metrics), ตัวชี้วัดด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics), ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics) และตัวชี้วัดด้านเวลาดำเนินงานของอัลกอริทึม (Computational Time)

จากการนำ AMOEA/D-DE มาใช้แก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์บนสายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน โดยเปรียบเทียบสมรรถนะกับ MODE, MODE/D และ MOEA/D พบว่า AMOEA/D-DE ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่น้อยกว่า MODE และแตกต่างกับ MODE/D และ MOEA/D ไม่มาก แต่ให้สมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ และด้านปริมาณคำตอบที่ดีกว่าอัลกอริทึม MODE, MODE/D และ MOEA/D อย่างชัดเจนในปัญหาขนาดกลางขึ้นไป หรือปัญหาที่มีรูปแบบความเป็นไปได้จำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการ AMOEA/D-DE ครอบคลุมทั้งปัญหามากวัตถุประสงค์แบบทั่วไปและแบบต่อเนื่อง (MaOPs และ Continuous MaOPs ตามลำดับ) อีกทั้งยังสามารถค้นหาคำตอบที่ให้ค่าต่ำสุด ซึ่งดีกว่าคำตอบที่มีค่าต่ำสุดของอัลกอริทึมอื่น ๆ ทั้งนี้ วิธีการเมตาฮิวริสติกต่าง ๆ จะสามารถช่วยลดระยะเวลาในการวางแผนงานของอุตสาหกรรมจริงได้ ไม่มากนักน้อย และยังง่ายต่อการใช้งาน ผู้ใช้งานเครื่องมือไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญหรือมีประสบการณ์ในด้านนี้มาก ก็สามารถดำเนินงานอัลกอริทึมและนำผลลัพธ์ไปปรับใช้จริงได้ตามความเหมาะสม

8.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยมีดังนี้

1. ปัญหาการจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตตูประสงค์ ควรพิจารณาเลือกวัตตูประสงค์ ให้มีความเหมาะสมกับโรงงานนั้น ๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา
2. ข้อกำหนด เงื่อนไขหรือสมมติฐาน ยังไม่ครอบคลุมกับปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรมรถยนต์ ปัจจุบันทั้งหมด จึงต้องปรับปรุงปัญหา เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ในแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึม ควรทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับ ปัญหาและอัลกอริทึมนั้น ๆ เพื่อให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด
4. ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์ ควรทดสอบหาจำนวนทำซ้ำที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดค่าความ ผิดพลาดที่น้อยลง
5. เนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัย มีทั้งอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหา แบบทั่วไปและแบบต่อเนื่อง อีกทั้งยังเป็นอัลกอริทึมแบบแก้ปัญหาหลายวัตตูประสงค์และมาก วัตตูประสงค์ ทำให้ในบางข้อสรุปไม่อาจบอกได้อย่างชัดเจนในบางอัลกอริทึมว่าดีกว่าในด้านใด
6. วิธีการแบ่งปัญหาออกเป็นปัญหาย่อย จะมีประสิทธิภาพที่ดีเมื่อปัญหามีรูปแบบที่เป็นไปได้ ของคำตอบหลากหลาย ไม่มีการกระจุกตัวของคำตอบมาก โดยสามารถแก้ปัญหานี้ได้ ด้วยการ ทดสอบค่าพารามิเตอร์จำนวนประชากร เพื่อหาจำนวนประชากรที่เหมาะสมกับปัญหา
7. ในปัญหาที่ต่างกัน ค่าพารามิเตอร์จำนวนปัญหาย่อยข้างเคียงไม่ค่อยมีผลต่อประสิทธิภาพ ในการค้นหาคำตอบของ MOEA/D, MODE/D และ AMOEA/D-DE แต่จะมีผลเมื่อปรับค่าจำนวนการ แทนที่สูงสุด ซึ่งตรงกับผลสรุป MOEA/D ของ Q. Zhang and Li (2007)
8. ในงานวิจัยนี้ เป็นการแก้ปัญหาในลักษณะของ Travelling Salesman Problem (TSP) ซึ่ง AMOEA/D-DE ให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเทียบกับ MOEA/D, MODE และ MODE/D ดังนั้น จึงควรนำ AMOEA/D-DE ไปทดลองแก้ปัญหามาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับ อัลกอริทึมอื่น ๆ ที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

รายการอ้างอิง

- Abbass, H. A. (2002). *The self-adaptive pareto differential evolution algorithm*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on.
- Akgündüz, O. S., & Tunalı, S. (2010). An adaptive genetic algorithm approach for the mixed-model assembly line sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 48(17), 5157-5179. doi:10.1080/00207540903117857
- Akgündüz, O. S., & Tunalı, S. (2011). A review of the current applications of genetic algorithms in mixed-model assembly line sequencing. *International Journal of Production Research*, 49(15), 4483-4503. doi:10.1080/00207543.2010.495085
- Alaghebandha, M., Hajipour, V., & Hemmati, M. (2017). Optimizing multi-objective sequencing problem in mixed-model assembly line on just-in-time: particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1-11. doi:10.1080/17509653.2016.1258593
- 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. doi:10.1016/j.asoc.2007.05.003
- Angeline, P. J. (1995). *Adaptive and self-adaptive evolutionary computations*. Paper presented at the Computational intelligence: a dynamic systems perspective.
- Back, T. (1996). *Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms*: Oxford university press.
- Betancourt, L. C. (2007). *ASALBP: the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem. Formalization and Resolution Procedures*. (Doctoral), Technical University Of Catalonia,
- Bolat, A., & Yano, C. A. (1992b). Scheduling algorithms to minimize utility work at a single station on a paced assembly line. *Production Planning & Control*, 3(4), 393-405.

- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693. doi:10.1016/j.ejor.2006.10.010
- Brest, J., Greiner, S., Boskovic, B., Mernik, M., & Zumer, V. (2006). Self-adapting control parameters in differential evolution: A comparative study on numerical benchmark problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 10(6), 646-657.
- Brockhoff, D., & Zitzler, E. (2009). Objective reduction in evolutionary multi-objective optimization: Theory and applications. *Evolutionary Computation*, 17(2), 135-166.
- 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(1), 39-55. doi:10.1016/j.cie.2011.08.015
- Chutima, P., & Olarnviwatchai, S. (2016). A multi-objective car sequencing problem on two-sided assembly lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-016-1201-6
- Ehrgott, M. (2006). A discussion of scalarization techniques for multiple objective integer programming. *Annals of Operations Research*, 147(1), 343-360.
- Eiben, Á. E., Hinterding, R., & Michalewicz, Z. (1999). Parameter control in evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(2), 124-141.
- Eiben, A. E., & Smith, J. E. (2008). Introduction to evolutionary computing (natural computing series). Publisher: Springer-Verlag New York, LLC.
- Gämperle, R., Müller, S. D., & Koumoutsakos, P. (2002). A parameter study for differential evolution. *Advances in intelligent systems, fuzzy systems, evolutionary computation*, 10(10), 293-298.
- Golle, U., Rothlauf, F., & Boysen, N. (2014). Car sequencing versus mixed-model sequencing: A computational study. *European Journal of Operational Research*, 237(1), 50-61. doi:10.1016/j.ejor.2014.01.012
- He, Z., & Yen, G. G. (2016). Many-Objective Evolutionary Algorithm: Objective Space Reduction and Diversity Improvement. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(1), 145-160. doi:10.1109/tevc.2015.2433266

- Hoffman, P., Grinstein, G., Marx, K., Grosse, I., & Stanley, E. (1997). *DNA visual and analytic data mining*. Paper presented at the Visualization'97., Proceedings.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*: MIT press.
- Huang, V. L., Qin, A. K., & Suganthan, P. N. (2006). *Self-adaptive differential evolution algorithm for constrained real-parameter optimization*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2006. CEC 2006. IEEE Congress on.
- Hyun, C. J., Kim, Y., & Kim, Y. K. (1998). A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research*, 25(7-8), 675-690.
- Ibrahim, A., Rahnamayan, S., Martin, M. V., & Deb, K. (2016). *3D-RadVis: Visualization of Pareto front in many-objective optimization*. Paper presented at the Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on.
- Ilonen, J., Kamarainen, J.-K., & Lampinen, J. (2003). Differential evolution training algorithm for feed-forward neural networks. *Neural Processing Letters*, 17(1), 93-105.
- Jiang, S., Ong, Y. S., Zhang, J., & Feng, L. (2014). Consistencies and contradictions of performance metrics in multiobjective optimization. *IEEE Trans Cybern*, 44(12), 2391-2404. doi:10.1109/TCYB.2014.2307319
- Joshi, R., & Sanderson, A. C. (1999). Minimal representation multisensor fusion using differential evolution. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 29(1), 63-76.
- Kampirom, N. (2008). *APPLICATION OF MEMETIC ALGORITHM FOR MULTI-OBJECTIVE SEQUENCING PROBLEM ON MIXED-MODEL U-SHAPED ASSEMBLY LINE IN JIT PRODUCTION SYSTEMS*. (Master's degree), Chulalongkorn University,
- Konak, A., Coit, D. W., & Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(9), 992-1007. doi:10.1016/j.res.2005.11.018

- Kucukkoc, I., & Zhang, D. Z. (2016). Mixed-model parallel two-sided assembly line balancing problem: A flexible agent-based ant colony optimization approach. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 58-72. doi:10.1016/j.cie.2016.04.001
- Lee, C.-Y., & Yao, X. (2004). Evolutionary programming using mutations based on the Lévy probability distribution. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(1), 1-13.
- Li, H., & Zhang, Q. (2006). A multiobjective differential evolution based on decomposition for multiobjective optimization with variable linkages. In *Parallel problem solving from nature-PPSN IX* (pp. 583-592): Springer.
- Li, H., & Zhang, Q. (2009). Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets, MOEA/D and NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(2), 284-302.
- Lin, Q., Zhu, Q., Huang, P., Chen, J., Ming, Z., & Yu, J. (2015). A novel hybrid multi-objective immune algorithm with adaptive differential evolution. *Computers & Operations Research*, 62, 95-111. doi:10.1016/j.cor.2015.04.003
- Liu, J., & Lampinen, J. (2005). A fuzzy adaptive differential evolution algorithm. *Soft Computing*, 9(6), 448-462.
- Manavizadeh, N., Tavakoli, L., Rabbani, M., & Jolai, F. (2013). A multi-objective mixed-model assembly line sequencing problem in order to minimize total costs in a Make-To-Order environment, considering order priority. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 124-137. doi:10.1016/j.jmsy.2012.09.001
- Mansouri, S. A. (2005). A Multi-Objective Genetic Algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines. *European Journal of Operational Research*, 167(3), 696-716. doi:10.1016/j.ejor.2004.07.016
- Mezura-Montes, E., Velázquez-Reyes, J., & Coello Coello, C. A. (2006). *A comparative study of differential evolution variants for global optimization*. Paper presented at the Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation.
- Olanviwatchai, S. (2013). *Multi-Objective Car Sequencing Problem on Mixed-Model Two-Sided Assembly Lines*. (Master's degree), Chulalongkorn University,

- Ozcan, U., & Toklu, B. (2009). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 217-227. doi:DOI 10.1016/j.cie.2008.11.012
- Özcan, U., & Toklu, B. (2009). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 217-227. doi:10.1016/j.cie.2008.11.012
- Peng, W., Zhang, Q., & Li, H. (2009). Comparison between MOEA/D and NSGA-II on the multi-objective travelling salesman problem. In *Multi-objective memetic algorithms* (pp. 309-324): Springer.
- Price, K., Storn, R. M., & Lampinen, J. A. (2006). *Differential evolution: a practical approach to global optimization*: Springer Science & Business Media.
- Qin, A. K., & Suganthan, P. N. (2005). *Self-adaptive differential evolution algorithm for numerical optimization*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on.
- Rahimi-Vahed, A. R., Rabbani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Torabi, S. A., & Jolai, F. (2007). A multi-objective scatter search for a mixed-model assembly line sequencing problem. *Advanced Engineering Informatics*, 21(1), 85-99. doi:10.1016/j.aei.2006.09.007
- Ribeiro, C. C., Aloise, D., Noronha, T. F., Rocha, C., & Urrutia, S. (2008). A hybrid heuristic for a multi-objective real-life car sequencing problem with painting and assembly line constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 981-992. doi:10.1016/j.ejor.2007.04.034
- Scholl, A., & Boysen, N. (2009). Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure. *International Journal of Production Economics*, 119(1), 90-100. doi:10.1016/j.ijpe.2009.01.011
- Singh, V., & Choudhary, S. (2009, 14-16 March 2009). *Genetic algorithm for Traveling Salesman Problem: Using modified Partially-Mapped Crossover operator*. Paper presented at the 2009 International Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies.

- Storn, R. (1996). *Differential evolution design of an IIR-filter*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 1996., Proceedings of IEEE International Conference on.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359.
- Tanontong, W. (2015). *Multi-Objective Car Sequencing Problem on Mixed-Model Two-Sided Assembly Lines with Combinatorial Optimization with Coincidence with Fuzzy Logic*. (Master's degree), Chulalongkorn University,
- Teo, J. (2006). Exploring dynamic self-adaptive populations in differential evolution. *Soft Computing*, 10(8), 673-686.
- Venske, S. M., Gonçalves, R. A., & Delgado, M. R. (2014). ADEMO/D: Multiobjective optimization by an adaptive differential evolution algorithm. *Neurocomputing*, 127, 65-77. doi:10.1016/j.neucom.2013.06.043
- Venske, S. M. S., Goncalves, R. A., & Delgado, M. R. (2012). *ADEMO/D: Adaptive Differential Evolution for Multiobjective Problems*. Paper presented at the 2012 Brazilian Symposium on Neural Networks.
- Yang, Z., Tang, K., & Yao, X. (2008). *Self-adaptive differential evolution with neighborhood search*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on.
- Yao, X., Liu, Y., & Lin, G. (1999). Evolutionary programming made faster. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(2), 82-102.
- Zhang, J., Avasarala, V., Sanderson, A. C., & Mullen, T. (2008). *Differential evolution for discrete optimization: An experimental study on combinatorial auction problems*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2008. CEC 2008.(IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE Congress on.
- Zhang, J., Avasarala, V., & Subbu, R. (2010). Evolutionary optimization of transition probability matrices for credit decision-making. *European Journal of Operational Research*, 200(2), 557-567.

- Zhang, J., & Sanderson, A. C. (2007). *An approximate Gaussian model of differential evolution with spherical fitness functions*. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on.
- Zhang, J., & Sanderson, A. C. (2009a). *Adaptive Differential Evolution: A Robust Approach to Multimodal Problem Optimization* (Vol. 1). Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., Chennai, India.
- Zhang, J., & Sanderson, A. C. (2009b). JADE: adaptive differential evolution with optional external archive. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(5), 945-958.
- Zhang, Q., & Li, H. (2007). MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712-731.
- Zhang, Q., Liu, W., Tsang, E., & Virginas, B. (2010). Expensive multiobjective optimization by MOEA/D with Gaussian process model. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 14(3), 456-474.
- Zhao, F., Chen, Z., Wang, J., & Zhang, C. (2016). An improved MOEA/D for multi-objective job shop scheduling problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(6), 616-640. doi:10.1080/0951192x.2016.1187301
- Zinlou, A., Gagné, C., & Gravel, M. (2008). Design of an Efficient Genetic Algorithm to Solve the Industrial Car Sequencing Problem. *Advances in Evolutionary Algorithms*, 377-400.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

1. รายละเอียดของปัญหาการทดลอง

ตารางที่ ก-1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

ปัญหาการทดลอง		จำนวนรุ่น รถยนต์	สัดส่วนผลิตภัณฑ์ (MPS)	ความยาว สตริง	จำนวนสี รถยนต์	จำนวน ตัวเลือก	จำนวน ชิ้นส่วน	
Small	Set 1	S1	5	7:3:2:2:1	15	5:3	4	10
		S2	5	4:3:3:3:2	15	5:3	4	10
	Set 2	S3	5	8:7:2:2:1	20	5:3	4	10
		S4	5	5:4:4:4:3	20	5:3	4	10
	Set 3	S5	10	7:5:1:1:1:1:1:1:1	20	9:4	7	20
		S6	10	4:4:4:2:1:1:1:1:1	20	9:4	7	20
Medium	Set 4	M1	10	6:5:5:5:4:4:3:3:3:2	40	10:4	7	30
		M2	10	11:7:5:5:4:2:2:2:1:1	40	10:4	7	30
	Set 5	M3	12	8:7:5:5:5:4:4:4:3:3:1:1	50	10:4	8	30
		M4	12	12:9:8:6:5:3:2:1:1:1:1:1	50	10:4	8	30
	Set 6	M5	14	8:7:7:7:6:6:5:4:4:2:1:1:1	60	12:5	10	45
		M6	14	15:15:5:4:4:4:3:2:2:2:1:1:1	60	12:5	10	45
Large	Set 7	L1	15	20:20:20:15:15: 1:1:1:1:1:1:1:1:1	100	15:7	10	60
		L2	15	15:15:10:10:10:10: 10:10:4:1:1:1:1:1:1	100	15:7	10	60
	Set 8	L3	15	20:20:20:15:15:10:20: 10:5:20:5:10:10:10:10	200	15:7	12	60
		L4	15	25:20:15:20:10:10:15: 5:15:15:10:15:10:10:5	200	15:7	12	60
	Set 9	L5	18	45:30:30:15:10:10:10: 8:7:7:7:7:5:3:3:1:1:1	200	18:9	12	75
		L6	18	25:25:20:20:20:20:15: 10:10:5:5:5:5:5:2:2:1	200	18:9	12	75

2. สีและลำดับการผลิตรถยนต์ก่อนหน้า

ในการวางแผนการผลิตรถยนต์ให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องนำข้อมูลสีและลำดับการผลิตก่อนหน้ามาใช้ในการตัดสินใจและวางแผนลำดับการผลิตปัจจุบัน เพื่อให้สามารถลดระยะเวลาการผลิตให้สั้นลง และทำให้สายการประกอบมีความสมดุลไม่มีภาระงานที่หนักเกินกว่ากำหนด แสดงสีและลำดับการผลิตรถยนต์ก่อนหน้า ดังตารางที่ ก-2

ตารางที่ ก-2 สีและลำดับการผลิตรถยนต์ก่อนหน้า

Set	สีรถยนต์ลำดับผลิตก่อนหน้า	รหัสรถยนต์ที่ผลิตลำดับก่อนหน้า (รุ่นรถยนต์)
1	2,1	5,1,4,1 (E,A,D,A)
2	5,3	1,3 (A,C)
3	1,9	5,6,2,1,6,1,8,1,1,9,8,4 (E,F,B,A,F,A,H,A,I,H,D)
4	5,7	3,1,3,9,7,7,10,1 (C,A,C,I,G,G,J,A)
5	3,4	2,6,5,7,4,2,3,1,5,8,9 (B,F,E,G,D,B,C,A,E,H,I)
6	7,10,2,11	5,4,1,13,1,2,5,12,14,2,7,2,11,2,2,5,4,7,2,11 (E,D,A,M,A,B,E,L,N,B,G,B,K,B,B,E,D,G,B,K)
7	3,6,5,10	5,11,9,6,6,4,13,2,6,2,14,1,4,6,14,8,4,5,14,1 (E,K,I,F,D,M,B,F,B,N,A,D,F,N,H,D,E,N,A)
8	7,9,2,4,1	13,7,1,5,8,3,10,15,7,2,9,15,2,11,11,7,11,1,10,13 (M,G,A,E,H,C,J,O,G,B,I,O,B,K,K,G,K,A,J,M)
9	10,5,1,11,4	5,13,5,1,16,3,8,16,15,18,15,8,2,13,9,18,7,7,6,3,17,14,10,7,14,7,4,9,4,8,10,12 (E,M,E,A,P,C,H,P,O,R,O,H,B,M,I,R,G,G,F,C,Q,N,J,G,N,G,D,I,D,H,J,L)

3. เวลาการดำเนินงานของชั้นงานในปัญหาการทดลอง

3.1 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 1 (Set 1)

ตารางที่ ก-3 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 1

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน					ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	3	1	2	2	2	13	0	0	0	2	7
2	7	9	1	6	7	14	9	5	4	2	6
3	7	9	8	8	5	15	5	4	2	4	3
4	5	7	1	3	1	16	9	7	9	1	5
5	4	6	6	2	5	17	2	5	3	5	5
6	3	4	2	2	3	18	7	4	2	6	7
7	1	4	1	1	3	19	0	0	0	7	7
8	3	0	0	2	3	20	9	4	1	9	5
9	6	9	2	6	3	21	8	3	5	8	5
10	0	0	4	4	0	22	4	8	4	4	2
11	1	4	2	3	4	23	9	7	9	4	3
12	3	8	5	8	2	24	9	7	6	8	7

3.2 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 2 (Set 2)

ตารางที่ ก-4 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 2

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน					ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	29	27	22	36	22	19	19	23	21	22	24
2	3	0	0	2	3	20	29	21	27	27	21
3	5	5	6	6	4	21	6	4	4	6	7
4	22	20	27	22	21	22	10	8	11	9	8
5	6	6	6	4	6	23	0	0	15	0	15
6	14	12	14	14	15	24	23	16	21	29	21
7	2	1	1	1	2	25	5	6	6	6	5
8	5	5	6	5	3	26	5	5	5	5	5
9	22	25	16	22	20	27	5	5	4	3	4
10	30	26	33	34	22	28	40	41	30	35	33
11	23	19	27	25	28	29	0	0	0	1	0
12	30	23	29	30	29	30	0	5	4	5	0
13	23	18	26	26	29	31	5	4	4	5	3
14	2	2	2	1	2	32	1	1	0	0	1
15	19	24	14	15	19	33	40	36	40	42	33
16	29	32	26	32	29	34	2	2	2	1	1
17	2	1	1	2	1	35	2	1	2	1	2
18	2	2	1	1	1						

3.3 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 3 (Set 3)

ตารางที่ ก-5 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 3

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	971	1019	896	1019	935	941	919	984	958	1060
2	142	151	141	142	138	146	140	139	137	143
3	0	0	128	141	0	143	121	0	146	126
4	0	0	0	0	150	131	0	0	0	139
5	103	107	101	99	107	109	105	107	103	101
6	96	92	98	95	99	98	98	93	96	93
7	99	94	92	98	103	96	100	95	96	97
8	1207	1228	1111	1183	1175	1231	1108	1222	1155	1183
9	160	156	162	172	156	150	153	157	153	153
10	180	172	190	169	162	160	195	170	181	170
11	82	74	81	85	77	79	83	76	70	87
12	60	62	58	59	60	59	60	61	58	59
13	112	117	101	119	109	111	94	104	121	99
14	420	387	435	444	449	447	458	406	443	399
15	1556	1604	1590	1509	1422	1595	1598	1508	1546	1554
16	236	246	257	232	218	233	225	229	214	217
17	259	263	272	235	242	253	260	276	289	259
18	125	136	132	133	127	135	132	128	128	130
19	601	650	558	618	577	563	575	688	608	654
20	80	0	0	72	75	0	68	76	0	72
21	80	73	83	79	81	83	76	78	80	77
22	70	64	67	75	74	69	73	65	80	69
23	89	89	83	86	94	87	94	88	84	90

ตารางที่ ก-5 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 3 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
24	89	91	88	89	80	89	82	92	93	87
25	105	0	0	96	111	109	0	0	106	98
26	330	333	345	299	297	353	352	336	312	334
27	132	129	142	140	133	143	140	126	139	138
28	69	63	67	63	65	60	60	63	66	66
29	0	0	0	0	101	106	107	0	98	110
30	70	72	72	74	66	73	69	76	68	73
31	70	68	68	73	76	69	72	70	80	72
32	158	168	153	144	149	146	152	150	156	155
33	191	204	180	196	181	205	206	170	187	201
34	70	67	74	71	63	72	72	71	67	70
35	53	52	57	51	57	56	52	50	55	54
36	50	53	48	48	46	54	48	52	48	52
37	125	121	124	127	123	126	123	127	125	129
38	353	330	370	347	357	361	362	341	359	351
39	70	73	76	66	73	75	69	74	71	71
40	0	131	139	0	120	125	0	142	136	137
41	0	0	0	63	63	0	68	0	0	67
42	1775	1750	1692	1682	1862	1887	1687	1706	1835	1809
43	91	95	88	87	95	96	84	98	92	90
44	91	90	88	94	92	89	94	89	93	93
45	113	119	106	123	107	113	102	123	121	128
46	487	498	448	483	501	482	481	477	464	473
47	138	138	150	134	141	138	147	139	141	141

ตารางที่ ก-5 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 3 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
48	80	77	74	76	85	78	80	87	79	76
49	80	82	73	81	78	74	75	76	73	75
50	65	60	64	69	69	70	67	65	64	59
51	40	40	37	38	38	38	41	37	37	40
52	742	714	688	701	688	706	689	729	703	730
53	1085	1063	1123	1060	1008	1114	1014	971	1009	1061

3.4 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 4 (Set 4)

ตารางที่ ก-6 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 4

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	35	26	28	33	10	27	28	32	20	39
2	14	15	38	6	21	21	25	33	11	4
3	1	54	58	15	31	46	29	65	51	71
4	18	1	11	6	8	16	3	17	14	7
5	36	33	16	24	17	17	36	20	21	44
6	29	26	2	19	28	26	40	23	30	21
7	159	61	88	128	9	67	112	132	143	78
8	70	5	54	87	9	126	44	54	24	50
9	24	16	32	8	45	35	13	44	7	28
10	0	0	0	0	33	29	0	0	42	128
11	56	56	40	33	67	43	62	56	30	35
12	51	47	12	29	39	20	26	27	38	27
13	94	132	33	124	95	107	117	130	62	86

ตารางที่ ก-6 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 4 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
14	29	6	54	37	40	38	37	54	19	30
15	39	15	33	28	12	42	40	51	13	27
16	15	16	121	125	9	38	45	12	72	131
17	11	2	12	30	12	14	20	8	15	6
18	74	58	184	124	136	169	142	173	85	121
19	34	14	10	4	28	15	7	36	32	6
20	19	19	77	69	104	3	94	106	153	38
21	14	32	36	26	29	22	41	29	12	26
22	12	24	8	24	14	8	15	6	21	17
23	19	61	8	36	58	19	46	30	53	32
24	38	76	22	56	6	21	58	51	53	30
25	89	43	33	79	35	77	58	61	22	82
26	66	45	45	58	43	59	48	71	47	56
27	27	6	35	41	50	38	18	28	51	52
28	189	249	227	145	211	187	225	170	194	177
29	2	48	82	85	17	19	87	35	14	118
30	0	0	25	28	0	28	30	0	0	24
31	6	5	4	4	4	5	4	4	4	6
32	18	12	3	7	27	3	16	1	1	32
33	13	53	3	11	45	24	1	50	10	28
34	41	39	52	19	71	47	59	57	30	29
35	21	63	34	99	68	74	79	99	38	43
36	33	28	8	41	50	49	54	9	17	69
37	147	103	79	133	127	75	108	125	151	131

ตารางที่ ก-6 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 4 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
38	43	12	85	33	51	89	81	92	53	46
39	15	24	19	15	32	20	24	15	10	19
40	27	1	7	24	2	17	1	21	1	8
41	4	5	17	39	40	15	26	1	11	11
42	25	80	104	125	19	45	1	59	11	51
43	22	18	28	22	27	34	21	22	23	23
44	3	7	23	17	33	17	44	17	4	7
45	44	35	15	13	4	21	19	13	43	31
46	26	34	20	12	36	19	14	5	27	28
47	2	19	10	7	10	5	3	17	20	2
48	41	44	18	0	50	0	0	35	0	44
49	9	3	16	5	23	8	24	15	16	14
50	8	46	5	37	16	24	25	12	46	3
51	20	13	40	9	31	11	31	21	1	5
52	7	7	9	8	12	7	7	12	15	10
53	14	5	2	7	3	7	3	3	6	11
54	38	93	35	99	66	70	100	36	112	71
55	11	23	12	39	35	41	4	26	22	6
56	56	7	79	32	108	57	64	48	36	27
57	23	98	67	1	17	1	68	12	11	56
58	52	64	23	27	28	37	41	49	21	34
59	0	2	0	7	5	6	1	0	19	6
60	1	7	3	10	9	6	4	7	3	7

ตารางที่ ก-6 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 4 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
61	0	0	37	73	16	0	78	0	1	0
62	0	4	15	0	18	0	0	0	0	19
63	0	0	0	68	39	1	166	19	137	6
64	54	85	143	64	115	111	99	183	84	140
65	35	26	55	58	57	44	60	61	43	49

3.5 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 5 (Set 5)

ตารางที่ ก-7 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 5

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	1673	1626	1536	1834	1624	1763	1596	1456	1797	1736	1520	1468
2	985	936	948	1006	1033	1024	979	989	972	1004	982	994
3	1836	2014	1882	1803	1757	1928	1836	1875	1802	1872	1823	1770
4	1622	826	1002	913	662	615	1700	1002	950	1084	165	935
5	1700	1847	1696	1537	1718	1757	1695	1848	1671	1667	1715	1894
6	2881	2695	2796	2705	2892	2773	2767	2885	2771	2932	2734	2740
7	2231	2390	2361	2297	2043	2365	2190	2340	2175	2390	2375	2211
8	1040	943	1024	957	1064	928	1053	988	1026	969	1103	1005
9	0	0	1620	1819	0	0	0	1564	0	0	0	1639
10	1250	1281	1178	1192	1142	1181	1234	1267	1127	1155	1217	1207
11	733	1407	393	259	714	716	347	731	929	924	285	23
12	464	442	453	459	420	439	461	420	431	446	462	440
13	500	530	523	486	529	496	517	466	526	504	551	484
14	1133	1040	1104	1200	1106	1029	1077	1075	1109	1127	1074	1136

ตารางที่ ก-7 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 5 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
15	418	571	897	311	627	305	777	813	301	590	291	231
16	483	496	504	507	529	496	517	488	521	492	505	505
17	880	963	875	934	838	941	854	855	876	923	860	854
18	667	688	705	730	608	662	715	708	650	639	710	696
19	600	634	586	561	629	590	601	609	553	573	615	574
20	306	235	190	97	253	315	301	132	357	283	408	162
21	408	370	404	428	418	408	402	420	386	376	388	423
22	847	911	880	809	772	964	879	756	912	863	927	922
23	767	700	722	794	804	747	750	797	749	785	770	706
24	850	815	827	929	931	904	913	899	960	834	931	901
25	780	855	718	820	749	770	733	730	731	744	785	766
26	912	834	961	915	1002	917	835	965	894	964	843	944
27	748	675	673	681	696	727	672	721	672	673	694	653
28	0	1686	0	0	1959	0	0	0	0	0	1790	0
29	714	723	756	710	765	747	695	750	743	732	739	742
30	1004	0	1023	0	0	913	0	0	0	0	0	0
31	713	734	712	758	719	715	746	715	723	694	709	669
32	642	670	601	640	681	633	662	639	668	637	657	622
33	629	734	633	561	84	605	298	430	867	295	682	590
34	1234	1204	1137	1337	1138	1192	1311	1140	1290	1271	1134	1222
35	1143	1034	1133	1069	1050	1112	1022	1123	1023	1043	1036	1044
36	1266	1367	1336	1297	1245	1238	1307	1306	1402	1319	1266	1301
37	792	746	782	721	776	769	784	787	768	749	759	811

ตารางที่ ก-7 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 5 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
38	1251	1341	1349	1274	1321	1325	1297	1263	1301	1278	1304	1359
39	1310	1322	1391	1340	1320	1298	1300	1290	1308	1363	1308	1368
40	663	724	726	699	646	675	733	720	683	753	721	734
41	0	506	0	0	510	0	0	0	0	0	558	485
42	1288	1255	1162	1385	1289	1225	1146	1365	1310	1367	1253	1303
43	792	863	769	819	727	707	833	792	850	780	793	813
44	578	546	623	551	623	588	600	601	637	542	597	617
45	594	596	631	640	616	628	618	638	611	622	613	604
46	578	547	554	540	589	559	575	592	629	554	562	563
47	622	671	563	598	668	587	647	623	602	590	610	578
48	578	563	634	543	619	483	557	546	549	596	563	644
49	564	554	520	539	555	542	570	547	545	560	556	561
50	578	606	594	563	597	593	566	578	587	562	580	599
51	578	561	526	635	531	524	538	625	640	601	580	545
52	578	563	552	556	635	559	590	589	538	501	649	581
53	578	545	568	585	545	595	551	564	599	554	568	546
54	578	528	569	552	615	568	467	594	542	528	467	550
55	578	588	628	632	590	602	643	582	626	607	630	604
56	578	598	623	555	611	604	595	591	601	633	656	626
57	578	570	614	623	634	564	581	623	582	620	600	596
58	578	615	570	559	596	584	557	589	551	618	583	622
59	578	524	603	611	520	615	566	599	619	572	549	532
60	578	596	523	559	619	552	610	610	589	557	598	627

ตารางที่ ก-7 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 5 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
61	0	549	552	605	548	0	589	0	0	0	0	0
62	578	606	573	605	624	612	610	587	608	584	607	564
63	578	618	558	594	616	615	562	579	544	600	583	574
64	578	539	574	550	613	576	558	565	589	536	586	593
65	578	607	555	623	613	552	590	623	595	620	582	609
66	578	569	524	582	622	613	599	593	563	545	583	626
67	578	566	579	568	554	580	588	563	574	574	576	567
68	578	536	565	567	628	555	632	470	516	563	552	614
69	467	467	468	485	475	478	460	479	474	472	472	475
70	996	880	860	823	929	1214	940	1887	1332	1084	647	375
71	396	394	374	372	420	402	401	415	423	429	393	381
72	814	518	1396	1267	2186	893	601	1102	1030	1176	1479	205
73	0	0	0	0	0	0	0	0	1105	0	0	0
74	2543	2736	2733	2533	2541	2574	2642	2568	2723	2773	2658	2671
75	764	771	819	699	812	818	737	844	787	805	765	721
76	357	357	383	373	375	384	346	377	355	345	342	368
77	701	644	643	699	706	625	717	738	729	658	674	616
78	1164	1131	1217	1136	1266	1084	1237	1260	1303	1067	1344	1129
79	0	0	272	304	0	0	0	280	0	0	0	258
80	2100	1893	2156	2260	1984	2340	2149	1993	1819	1838	2039	2086
81	450	416	410	489	465	448	419	454	462	424	475	435
82	1300	1192	1260	1306	1285	1223	1229	1243	1304	1380	1303	1203
83	0	0	0	0	0	0	0	3689	0	0	0	0

3.6 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 6 (Set 6)

ตารางที่ ก-8 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 6

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	692	170	280	391	213	500	91	488	413	478	420	291	175	137
2	42	40	19	3	14	25	10	16	23	13	28	13	41	21
3	261	233	83	229	129	222	71	240	174	152	110	180	143	133
4	261	174	193	99	80	111	183	152	132	99	167	219	145	162
5	157	94	57	137	144	66	89	77	74	124	93	129	140	134
6	90	4	35	10	80	28	71	37	30	52	64	48	28	56
7	54	27	40	17	18	15	27	35	11	52	23	41	29	35
8	67	55	24	54	41	62	15	54	50	21	23	47	65	47
9	30	4	9	17	26	18	11	23	11	24	19	24	19	22
10	106	100	79	54	46	99	85	24	87	84	69	76	79	100
11	32	15	20	32	18	16	14	14	7	32	12	9	19	24
12	62	19	46	58	15	54	38	48	22	13	25	58	19	37
13	54	24	15	33	48	36	17	34	21	30	18	30	32	14
14	67	63	60	57	19	54	35	11	28	28	24	66	58	45
15	30	22	15	20	13	15	10	14	24	16	14	27	22	18
16	106	73	63	65	55	93	57	82	102	92	72	73	84	63
17	32	15	25	22	26	15	32	13	10	13	29	14	28	7
18	62	27	55	37	21	33	39	46	25	47	45	52	36	46
19	56	45	31	44	30	48	33	53	36	51	45	33	22	43
20	67	51	66	25	26	48	57	21	34	54	51	60	29	29
21	86	61	58	65	36	29	57	50	53	57	86	59	69	75
22	37	18	33	35	34	30	22	27	32	25	17	21	45	33
23	41	18	17	40	19	21	32	24	24	18	30	29	28	20

ตารางที่ ก-8 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 6 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
24	72	55	32	64	42	38	32	58	63	43	25	59	47	60
25	86	45	65	53	32	57	71	76	83	67	73	71	82	57
26	16	15	11	9	4	11	9	7	14	7	11	5	10	9
27	51	39	47	34	25	49	30	47	41	20	34	22	19	28
28	66	23	47	42	18	32	46	27	65	37	47	41	22	31
29	41	30	21	13	29	31	39	23	24	32	36	40	29	17
30	72	55	67	65	39	43	55	62	34	20	56	68	43	26
31	51	0	0	22	27	31	0	32	0	50	51	19	32	28
32	16	7	11	16	11	5	8	7	11	9	5	8	8	16
33	15	5	11	4	8	5	2	14	14	7	5	8	7	13
34	15	4	4	9	6	2	11	6	4	8	4	13	10	10
35	12	43	46	27	62	58	27	55	54	40	53	25	20	54
36	0	45	0	7	0	0	40	0	23	0	0	30	39	47
37	23	15	21	14	16	20	13	17	14	13	7	9	5	11
38	13	4	3	4	6	2	2	1	13	1	4	8	3	2
39	19	11	10	5	14	7	9	13	16	10	6	15	16	4
40	108	64	105	31	52	66	86	59	91	68	53	104	69	57
41	214	141	209	127	125	136	78	93	107	122	198	202	114	174
42	80	33	47	22	67	36	75	21	41	43	56	63	58	55
43	37	11	29	26	22	33	26	17	36	15	11	18	32	17
44	84	38	31	41	79	58	57	82	59	79	38	54	62	72
45	18	12	0	16	5	12	7	0	0	0	16	13	0	7
46	12	9	12	7	1	7	2	4	2	9	6	2	3	11

ตารางที่ ก-8 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 6 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
47	29	25	11	22	13	26	19	9	28	17	29	22	23	21
48	37	9	23	14	28	18	17	11	14	36	31	14	33	22
49	13	0	0	0	9	13	0	0	0	3	10	0	0	0
50	0	0	0	0	17	0	16	0	0	0	59	0	69	0
51	217	111	55	147	211	132	165	70	112	174	152	131	120	157
52	72	8	34	29	45	40	33	72	67	26	35	32	50	58
53	85	63	39	71	66	59	64	74	52	54	41	73	68	56
54	43	28	21	33	24	37	29	17	29	14	36	43	35	37
55	97	65	73	96	80	40	56	48	91	44	92	71	45	64
56	37	8	18	14	23	33	37	13	22	35	25	16	13	24
57	13	2	6	5	1	11	8	9	10	13	3	4	3	5
58	35	24	26	14	31	18	21	33	25	15	18	24	26	25
59	217	86	44	110	202	217	112	97	92	217	114	80	57	197
60	72	33	20	28	41	53	16	47	48	31	24	20	29	8
61	85	0	12	0	66	0	0	85	31	21	0	0	66	0
62	25	5	21	16	6	8	9	22	20	14	20	19	5	23
63	37	11	23	21	27	25	11	34	17	34	23	17	14	21
64	37	29	4	18	13	24	12	17	33	8	27	25	27	8
65	103	65	81	72	55	73	90	71	100	97	88	81	76	68
66	140	49	131	29	53	60	90	139	110	76	78	125	89	72
67	49	33	47	36	46	13	15	24	22	15	16	37	26	16
68	35	27	23	19	16	23	14	11	28	18	26	15	13	28
69	51	36	35	21	28	38	33	24	50	23	24	47	19	44

ตารางที่ ก-8 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 6 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
70	88	37	27	31	33	26	69	80	45	82	76	55	42	32
71	36	15	31	53	32	24	63	48	42	44	41	31	44	19
72	144	133	134	127	120	78	107	43	63	51	123	76	98	100
73	337	153	160	199	317	309	330	100	237	218	126	262	99	154
74	107	41	77	34	28	86	79	76	77	65	59	80	89	82
75	371	184	117	122	0	0	0	286	170	225	249	0	0	253
76	0	19	11	0	0	73	71	0	0	76	65	0	56	0
77	166	65	144	116	139	117	103	96	94	76	142	103	161	157
78	92	33	56	43	77	57	28	85	74	76	57	67	31	83
79	0	67	0	0	91	57	0	68	0	0	26	0	0	0
80	106	93	65	67	80	86	56	101	75	104	92	68	101	69
81	49	16	20	23	13	20	48	49	24	31	39	22	17	16
82	92	10	77	38	76	39	61	69	57	60	74	23	85	65
83	371	178	132	228	230	239	271	210	224	265	276	109	128	300
84	87	85	72	40	61	52	67	61	33	77	75	61	53	67
85	162	77	157	83	124	47	122	95	79	129	124	75	54	107
86	96	25	82	49	31	64	42	20	53	54	42	63	92	91
87	79	65	34	19	64	61	46	78	22	19	15	48	54	35
88	96	60	73	56	45	87	68	84	25	89	81	75	52	32
89	42	25	27	17	15	9	34	40	33	29	19	33	25	27
90	88	18	48	87	26	62	31	47	28	44	55	64	81	64
91	90	50	89	65	86	32	69	82	77	57	72	49	62	88
92	97	51	63	54	45	76	53	76	88	77	78	86	60	82

ตารางที่ ก-8 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 6 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
93	270	193	209	130	201	198	231	150	237	211	118	96	179	112
94	452	132	269	325	363	366	301	400	443	398	303	406	231	199
95	48	39	15	17	47	39	21	19	28	29	11	42	17	11
96	338	151	141	194	213	312	177	197	219	207	110	158	168	283
97	34	21	34	27	20	21	19	25	34	26	24	34	22	29
98	65	0	0	9	0	31	19	13	24	22	16	0	0	0
99	50	13	38	9	12	23	33	29	36	50	42	16	32	29
100	112	83	75	63	68	73	103	87	92	66	96	58	111	103

3.7 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (Set 7)

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	12	10	10	6	3	11	2	7	8	11	1	1	2	10	4
2	10	24	1	24	12	5	4	22	4	9	17	16	24	4	15
3	7	6	1	4	5	3	2	3	1	4	7	4	6	2	3
4	42	16	19	46	22	20	15	45	32	46	21	30	34	31	9
5	26	3	29	12	19	20	26	1	19	11	5	27	9	26	21
6	5	7	1	6	2	3	2	5	7	4	1	5	2	3	1
7	27	33	25	26	25	12	7	23	24	17	23	19	20	20	13
8	11	11	32	32	12	16	25	12	32	9	30	27	12	15	3
9	20	33	30	8	8	24	30	29	11	26	6	26	20	11	31
10	21	29	8	16	20	19	15	12	29	20	25	15	27	2	3
11	3	18	12	1	12	5	8	4	11	6	5	11	10	4	18

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
12	7	2	2	10	7	3	4	6	8	3	7	6	8	4	2
13	10	2	10	13	6	6	8	7	1	13	11	3	6	10	5
14	6	15	16	7	13	0	12	8	14	2	2	12	3	1	0
15	16	10	10	35	17	30	28	15	23	21	17	27	19	30	8
16	23	23	39	18	15	26	12	5	39	32	33	28	21	30	39
17	6	3	2	6	5	3	4	3	6	1	5	1	2	4	3
18	3	12	23	7	3	12	5	20	15	4	5	6	23	17	15
19	0	0	0	23	14	2	0	4	12	0	13	17	11	12	23
20	6	6	4	2	4	3	2	3	1	3	3	6	4	3	1
21	5	6	7	7	6	7	1	4	3	3	4	6	6	2	7
22	1	5	8	4	6	4	3	5	3	6	7	4	4	1	3
23	10	8	8	7	10	6	4	8	5	2	3	2	9	7	3
24	6	6	5	2	3	1	6	4	5	5	2	6	4	6	1
25	3	11	2	5	7	7	5	8	6	1	10	3	11	1	5
26	10	13	5	13	5	8	2	11	7	1	5	9	1	3	12
27	4	8	7	3	2	6	6	4	1	5	3	1	1	2	7
28	24	17	14	11	17	21	6	4	9	16	8	23	13	22	24
29	2	10	6	9	10	4	3	1	8	6	9	5	2	4	5
30	18	25	2	7	9	24	6	10	11	4	25	20	10	14	23
31	3	4	9	4	6	5	9	6	9	7	9	1	3	1	4
32	1	6	8	6	3	3	6	1	2	4	1	3	7	8	4
33	13	2	4	11	8	2	12	5	1	1	10	9	5	10	9
34	20	16	7	30	8	5	5	19	3	11	9	16	22	14	23

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
35	40	23	5	33	22	28	17	27	21	33	38	13	19	40	18
36	20	23	24	11	6	12	22	9	10	5	9	15	8	19	22
37	3	2	5	2	1	5	2	2	4	2	3	2	3	2	1
38	75	9	37	23	33	74	39	53	72	33	21	48	5	3	26
39	7	6	3	6	2	5	2	4	1	6	6	3	2	7	6
40	12	0	0	14	0	0	0	7	2	12	2	0	0	11	0
41	38	15	12	24	6	5	29	9	7	11	33	15	7	8	27
42	5	6	2	9	5	5	8	9	4	4	3	2	2	4	9
43	8	29	20	25	11	17	20	24	10	18	4	6	27	4	18
44	62	23	37	6	25	14	49	28	1	3	37	7	59	55	41
45	52	34	78	10	77	23	16	7	55	51	30	61	4	30	56
46	7	5	3	2	3	2	6	6	5	5	4	1	6	5	6
47	21	10	42	6	41	5	28	2	40	20	15	28	13	42	19
48	1	5	8	13	12	3	11	4	6	3	9	6	1	9	6
49	26	20	41	40	10	28	23	9	24	35	3	21	5	13	14
50	23	25	34	12	32	10	26	22	16	21	5	24	10	23	4
51	18	15	25	7	3	21	2	7	9	4	15	6	17	19	12
52	6	7	10	7	8	7	2	4	4	9	7	8	1	5	9
53	51	61	28	74	37	18	69	37	18	15	29	22	30	64	42
54	13	18	23	10	9	8	11	7	20	10	12	19	22	23	8
55	3	3	2	5	1	4	5	3	2	3	3	1	2	5	2
56	33	40	11	26	17	10	26	1	22	0	17	16	22	16	11
57	7	3	9	10	1	6	8	9	3	2	2	1	8	4	4

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
58	33	42	9	43	26	25	43	27	36	9	37	15	24	12	32
59	4	14	2	2	11	8	1	10	9	4	13	8	11	3	5
60	3	2	2	1	1	3	2	1	3	1	2	1	3	3	2
61	1	2	1	3	3	3	1	3	1	2	1	1	2	2	1
62	5	5	3	5	3	3	1	3	1	2	1	1	2	2	1
63	13	14	7	15	7	12	7	7	13	8	9	5	6	8	11
64	26	4	22	25	10	16	18	21	14	8	4	16	20	10	12
65	1	4	4	3	3	4	1	4	1	3	1	1	2	1	1
66	19	15	14	9	3	19	6	4	6	2	13	5	19	8	7
67	8	4	5	5	3	1	1	4	5	4	3	7	6	7	2
68	14	3	10	6	8	11	5	4	4	3	2	7	1	3	9
69	4	6	3	13	10	11	12	6	5	2	10	4	12	10	11
70	12	7	6	12	3	5	3	8	8	4	5	5	6	9	8
71	27	46	48	34	8	14	32	23	45	41	46	32	21	23	27
72	14	4	14	25	6	11	17	9	13	22	7	21	11	6	21
73	23	37	27	19	29	22	37	10	9	7	23	26	17	32	23
74	29	18	31	29	24	18	15	29	22	28	17	29	25	21	30
75	51	17	24	34	17	42	30	32	21	6	7	41	49	40	35
76	5	1	4	5	3	4	3	3	1	5	1	4	1	4	5
77	23	10	28	24	6	16	28	6	20	11	10	15	9	18	21
78	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
79	15	107	90	78	77	67	85	29	106	50	24	99	57	102	38
80	4	1	2	2	4	4	1	1	1	4	1	4	1	3	3

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
81	14	12	4	8	8	7	11	5	12	13	10	4	12	11	7
82	7	9	6	3	1	4	1	1	8	5	1	6	3	8	6
83	20	9	8	17	15	3	6	11	15	16	10	6	7	15	8
84	7	13	7	24	8	16	14	18	11	4	12	17	20	21	6
85	13	8	9	18	14	3	4	7	13	6	13	3	18	11	12
86	13	21	12	8	17	13	14	19	21	15	19	4	8	11	20
87	42	13	13	9	22	11	24	36	32	15	23	28	20	16	14
88	9	1	18	20	9	7	12	11	13	19	5	11	7	5	3
89	5	10	6	12	12	8	12	4	7	9	3	9	12	10	9
90	15	9	2	9	15	10	2	13	3	8	14	7	10	1	8
91	40	83	37	93	73	23	44	74	25	79	24	93	74	21	91
92	6	0	0	10	9	12	0	10	7	0	23	5	10	21	9
93	25	4	27	17	21	5	7	13	5	8	16	20	23	20	9
94	29	43	27	12	27	16	28	10	14	4	34	8	36	40	18
95	18	2	10	16	6	5	3	18	8	10	4	11	15	12	14
96	9	13	13	17	14	11	14	8	12	8	4	16	15	17	5
97	6	12	5	2	6	2	12	1	7	10	2	6	4	3	5
98	31	5	23	32	10	20	16	14	29	13	10	27	16	22	9
99	13	49	44	24	30	7	43	18	37	47	10	13	8	32	22
100	20	31	34	16	9	16	7	14	12	19	21	13	12	24	30
101	7	11	13	6	12	7	8	3	5	7	6	13	5	12	2
102	17	4	6	19	12	17	3	9	1	15	10	13	12	11	10
103	8	3	14	7	11	4	6	14	4	13	8	3	14	10	8

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
104	1	20	14	35	9	11	27	23	32	15	6	26	29	23	33
105	44	44	35	35	32	36	50	49	64	26	39	78	43	50	36
106	1	5	12	6	3	5	1	5	6	11	6	9	5	8	7
107	9	8	6	7	8	1	2	3	5	8	4	7	2	9	6
108	7	12	2	37	9	4	15	28	34	21	3	17	19	3	5
109	32	33	14	19	25	31	13	21	8	19	11	31	20	27	24
110	20	28	20	8	23	21	15	21	24	14	22	14	19	9	11
111	6	9	14	9	8	3	10	5	10	12	8	1	5	13	7
112	87	70	94	9	64	25	68	14	78	59	7	28	67	12	65
113	7	3	12	11	6	7	4	7	2	1	1	6	4	1	9
114	26	24	16	19	16	14	21	19	20	34	22	20	19	19	25
115	15	5	3	11	6	3	12	11	15	13	10	8	6	7	14
116	2	12	22	4	13	3	14	7	13	15	12	18	3	22	21
117	5	10	14	19	12	18	2	10	8	13	6	12	17	8	14
118	9	9	22	9	15	6	18	5	16	22	21	9	19	3	12
119	22	23	47	24	41	46	40	30	44	29	31	35	18	14	26
120	23	21	14	30	24	7	12	7	11	18	27	30	12	8	21
121	22	0	0	20	10	7	6	20	18	0	21	16	20	17	15
122	20	13	25	8	16	2	7	13	23	20	16	8	21	5	9
123	14	18	6	8	15	12	17	14	5	9	18	12	7	11	14
124	1	5	15	12	15	10	3	6	9	13	11	9	4	13	6
125	12	13	6	11	6	5	8	3	9	8	3	4	9	4	13
126	39	42	5	27	11	24	29	12	7	33	23	16	38	27	19

ตารางที่ ก-9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 7 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
127	24	5	26	39	37	7	6	24	11	23	36	21	28	37	6
128	5	4	9	9	3	8	3	1	6	9	5	1	7	4	6
129	8	7	8	2	5	1	7	4	4	4	6	5	4	1	1
130	6	9	2	5	5	9	2	5	3	5	1	4	4	2	7
131	9	11	11	15	12	4	6	5	13	13	5	4	11	14	8
132	3	16	3	12	14	12	10	13	3	5	14	16	11	15	7
133	0	0	0	9	7	3	0	0	14	0	8	0	5	5	13
134	0	0	13	10	0	6	0	12	4	0	19	7	6	16	0
135	0	0	0	0	0	0	0	23	30	0	0	0	0	0	0
136	50	62	23	45	32	60	13	46	29	54	25	47	9	48	36
137	18	2	18	12	5	16	9	11	7	8	6	3	14	5	6
138	7	2	15	15	9	8	23	9	11	14	7	11	19	12	8
139	23	1	24	34	8	32	3	27	5	7	12	32	21	27	10
140	0	0	0	7	0	20	0	17	6	0	11	14	0	9	0
141	89	123	7	9	59	111	64	14	55	21	48	27	71	83	29
142	85	48	62	76	65	79	34	25	60	16	66	50	84	59	24
143	48	30	22	6	24	30	13	32	15	36	31	12	16	23	40
144	70	98	131	100	67	112	75	88	79	52	64	38	76	89	102
145	90	112	58	110	79	43	49	78	62	98	80	74	65	62	91
146	47	45	48	13	15	31	16	28	45	16	28	26	19	40	46
147	61	6	20	75	18	14	34	17	38	9	64	51	23	34	67
148	65	18	15	19	34	47	18	22	65	36	19	26	60	42	46

3.8 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 8 (Set 8)

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 8

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	692	170	280	391	213	500	91	488	413	478	420	291	175	137	88
2	42	40	19	3	14	25	10	16	23	13	28	13	41	21	34
3	261	233	83	229	129	222	71	240	174	152	110	180	143	133	157
4	261	174	193	99	80	111	183	152	132	99	167	219	145	162	117
5	157	94	57	137	144	66	89	77	74	124	93	129	140	134	81
6	90	4	35	10	80	0	71	37	30	52	64	48	28	56	0
7	54	27	40	17	18	15	27	35	11	52	23	41	29	35	13
8	67	55	24	54	41	62	15	54	50	21	23	47	65	47	62
9	30	4	9	17	26	18	11	23	11	24	19	24	19	22	28
10	106	100	79	54	46	99	85	24	87	84	69	76	79	100	105
11	32	15	20	32	18	16	14	14	7	32	12	9	19	24	29
12	62	19	46	58	15	54	38	48	22	13	25	58	19	37	51
13	54	24	15	33	48	36	17	34	21	30	18	30	32	14	37
14	67	63	60	57	19	54	35	11	28	28	24	66	58	45	35
15	30	22	15	20	13	15	10	14	24	16	14	27	22	18	13
16	106	73	63	65	55	93	57	82	102	92	72	73	84	63	80
17	32	15	25	22	26	15	32	13	10	13	29	14	28	7	16
18	62	27	55	37	21	33	39	46	25	47	45	52	36	46	54
19	56	45	31	44	30	48	33	53	36	51	45	33	22	43	52
20	67	51	66	25	26	48	57	21	34	54	51	60	29	29	44
21	86	61	58	65	36	29	57	50	53	57	86	59	69	75	64
22	37	18	33	35	34	30	22	27	32	25	17	21	45	33	34
23	41	18	17	40	19	21	32	24	24	18	30	29	28	20	36

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
24	72	55	32	64	42	38	32	58	63	43	25	59	47	60	44
25	86	45	65	53	32	57	71	76	83	67	73	71	82	57	79
26	16	15	11	9	4	11	9	7	14	7	11	5	10	9	13
27	51	39	47	34	25	49	30	47	41	20	34	22	19	28	51
28	66	23	47	42	18	32	46	27	65	37	47	41	22	31	58
29	41	30	21	13	29	31	39	23	24	32	36	40	29	17	28
30	72	55	67	65	39	43	55	62	34	20	56	68	43	26	58
31	51	16	19	22	27	31	24	32	33	50	51	19	32	28	44
32	16	7	11	16	11	5	8	7	11	9	5	8	8	16	13
33	15	5	11	4	8	5	2	14	14	7	5	8	7	13	15
34	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0
35	12	43	46	27	62	58	27	55	54	40	53	25	20	54	59
36	59	45	54	7	31	9	40	12	23	13	25	30	39	47	56
37	23	15	21	14	16	20	13	17	14	13	7	9	5	11	21
38	0	0	0	4	6	2	0	1	13	0	4	8	3	2	2
39	19	11	10	5	14	7	9	13	16	10	6	15	16	4	16
40	108	64	105	31	52	66	86	59	91	68	53	104	69	57	98
41	214	141	209	127	125	136	78	93	107	122	198	202	114	174	178
42	80	33	47	22	67	36	75	21	41	43	56	63	58	55	60
43	37	11	29	26	22	33	26	17	36	15	11	18	32	17	31
44	84	38	31	41	79	58	57	82	59	79	38	54	62	72	80
45	18	12	13	16	5	12	7	3	17	6	16	13	3	7	4
46	12	9	12	7	1	7	2	4	2	9	6	2	3	11	9

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
47	29	25	11	22	13	26	19	9	28	17	29	22	23	21	23
48	37	9	23	14	28	18	17	11	14	36	31	14	33	22	29
49	0	0	0	9	9	13	0	0	11	0	10	0	12	10	12
50	70	21	18	40	17	30	16	47	18	33	59	46	69	47	69
51	217	111	55	147	211	132	165	70	112	174	152	131	120	157	175
52	72	8	34	29	45	40	33	72	67	26	35	32	50	58	61
53	85	63	39	71	66	59	64	74	52	54	41	73	68	56	65
54	43	28	21	33	24	37	29	17	29	14	36	43	35	37	31
55	97	65	73	96	80	40	56	48	91	44	92	71	45	64	53
56	37	8	18	14	23	33	37	13	22	35	25	16	13	24	30
57	13	2	6	5	1	11	8	9	10	13	3	4	3	5	11
58	35	24	26	14	31	18	21	33	25	15	18	24	26	25	31
59	217	86	44	110	202	217	112	97	92	217	114	80	57	197	111
60	72	33	20	28	41	53	16	47	48	31	24	20	29	8	54
61	85	25	12	37	66	28	47	85	31	21	49	40	66	62	81
62	25	5	21	16	6	8	9	22	20	14	20	19	5	23	16
63	37	11	23	21	27	25	11	34	17	34	23	17	14	21	24
64	37	29	4	18	13	24	12	17	33	8	27	25	27	8	19
65	103	65	81	72	55	73	90	71	100	97	88	81	76	68	92
66	140	49	131	29	53	60	90	139	110	76	78	125	89	72	129
67	49	33	47	36	46	13	15	24	22	15	16	37	26	16	41
68	35	27	23	19	16	23	14	11	28	18	26	15	13	28	20
69	51	36	35	21	28	38	33	24	50	23	24	47	19	44	41

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
70	88	37	27	31	33	26	69	80	45	82	76	55	42	32	65
71	36	15	31	53	32	24	63	48	42	44	41	31	44	19	29
72	144	133	134	127	120	78	107	43	63	51	123	76	98	100	88
73	337	153	160	199	317	309	330	100	237	218	126	262	99	154	202
74	107	41	77	34	28	86	79	76	77	65	59	80	89	82	104
75	371	184	117	122	349	105	274	286	170	225	249	310	108	253	201
76	97	19	11	80	56	73	71	61	55	76	65	43	56	92	61
77	166	65	144	116	139	117	103	96	94	76	142	103	161	157	99
78	92	33	56	43	77	57	28	85	74	76	57	67	31	83	79
79	92	67	54	53	91	57	75	68	78	50	26	83	49	59	72
80	106	93	65	67	80	86	56	101	75	104	92	68	101	69	80
81	49	16	20	23	13	20	48	49	24	31	39	22	17	16	27
82	92	10	77	38	76	39	61	69	57	60	74	23	85	65	77
83	371	178	132	228	230	239	271	210	224	265	276	109	128	300	264
84	87	85	72	40	61	52	67	61	33	77	75	61	53	67	74
85	162	77	157	83	124	47	122	95	79	129	124	75	54	107	101
86	96	25	82	49	31	64	42	20	53	54	42	63	92	91	89
87	79	65	34	19	64	61	46	78	22	19	15	48	54	35	68
88	96	60	73	56	45	87	68	84	25	89	81	75	52	32	79
89	42	25	27	17	15	9	34	40	33	29	19	33	25	27	37
90	88	18	48	87	26	62	31	47	28	44	55	64	81	64	73
91	90	50	89	65	86	32	69	82	77	57	72	49	62	88	69
92	97	51	0	0	45	76	0	0	0	77	0	0	60	82	0

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
93	270	193	209	130	201	198	231	150	237	211	118	96	179	112	91
94	452	132	269	325	363	366	301	400	443	398	303	406	231	199	325
95	48	39	15	17	47	39	21	19	28	29	11	42	17	11	31
96	338	151	141	194	213	312	177	197	219	207	110	158	168	283	309
97	34	21	34	27	20	21	19	25	34	26	24	34	22	29	0
98	65	0	0	9	0	0	0	13	24	22	16	0	0	52	0
99	50	13	38	9	12	23	33	29	36	50	42	16	32	29	41
100	112	83	75	63	68	73	103	87	92	66	96	58	111	103	57
101	48	15	28	12	43	11	23	25	33	17	28	44	40	18	26
102	117	52	72	105	112	106	92	91	85	75	97	70	94	70	102
103	50	40	8	21	24	19	22	28	44	32	42	38	41	23	37
104	68	57	18	41	29	60	25	50	65	45	31	55	62	55	46
105	232	121	111	177	232	202	224	150	177	122	143	230	209	198	212
106	122	94	109	112	118	95	80	89	114	75	112	101	87	77	91
107	151	128	75	137	70	92	112	138	84	78	108	123	120	73	141
108	31	23	29	13	20	11	16	18	29	19	26	24	17	9	24
109	97	72	82	75	42	66	47	44	52	76	61	87	52	77	91
110	308	221	255	191	218	213	138	155	179	276	208	250	292	146	233
111	116	86	94	114	93	83	110	106	89	79	88	81	69	98	91
112	312	202	196	280	131	183	193	178	170	209	302	257	249	123	299
113	34	24	34	33	14	29	18	29	29	34	23	18	22	29	21
114	128	80	95	70	100	75	115	127	117	111	108	99	81	116	103
115	54	13	32	45	20	18	37	33	31	35	44	54	37	53	44

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
116	175	108	161	118	171	148	158	149	162	105	91	95	106	123	127
117	55	28	39	40	44	23	24	36	30	53	40	52	31	22	19
118	0	0	261	255	0	213	0	240	138	0	286	256	273	265	0
119	59	30	22	48	43	50	49	53	58	45	47	37	33	29	51
120	59	28	32	22	33	45	48	58	51	57	44	34	30	33	49
121	66	20	18	26	57	62	48	39	41	49	64	53	54	64	51
122	66	60	66	45	53	50	58	62	50	57	62	29	33	37	41
123	23	15	18	7	18	20	14	18	7	23	21	16	23	10	17
124	244	165	172	190	116	143	239	170	218	119	149	165	205	160	183
125	54	36	53	42	54	40	26	42	37	52	26	38	36	23	40
126	294	147	112	114	248	285	103	288	189	220	190	137	234	190	222
127	84	70	65	57	28	60	83	71	50	45	31	66	78	52	47
128	61	44	19	49	39	37	35	28	52	49	31	39	23	57	50
129	57	30	41	42	45	17	37	57	48	57	32	31	18	57	49
130	38	26	33	37	29	24	22	31	19	16	26	19	34	18	28
131	944	362	706	669	727	826	610	746	446	243	633	577	462	901	647
132	511	440	462	311	510	433	293	347	370	280	316	294	437	438	370
133	625	291	593	504	467	451	567	579	390	475	458	585	565	498	554
134	445	343	200	433	287	341	311	399	391	306	443	420	306	425	267
135	68	33	64	38	15	65	55	52	39	44	47	51	63	57	42
136	53	29	23	51	39	50	44	39	42	32	26	36	42	14	33
137	49	20	24	26	37	48	33	37	47	42	34	22	28	33	41
138	92	34	48	76	37	43	51	53	46	59	34	89	36	58	57

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
139	236	81	208	231	233	207	236	181	125	179	188	221	179	116	123
140	0	0	0	80	0	62	0	103	114	0	91	71	0	101	0
141	265	121	243	255	246	213	102	253	174	188	153	208	151	174	261
142	149	70	61	128	105	138	101	143	137	109	98	149	139	120	144
143	74	24	36	56	64	74	32	64	51	60	57	69	47	38	67
144	332	246	211	134	237	317	242	321	176	238	189	304	269	278	287
145	140	75	115	77	97	61	156	111	108	98	73	125	88	76	103
146	104	87	90	83	51	75	102	92	76	88	63	100	98	101	89
147	51	40	50	51	22	34	43	24	36	31	41	36	34	44	24
148	58	35	46	16	37	26	47	58	33	39	35	38	40	46	50
149	67	26	56	37	53	29	46	32	43	33	22	66	48	56	38
150	49	20	44	38	25	43	26	43	21	40	27	47	35	41	39
151	107	73	60	84	67	100	85	98	64	81	82	101	73	74	91
152	38	26	11	22	14	28	18	23	25	30	22	34	28	21	13
153	27	21	17	27	16	23	20	9	19	13	21	23	26	11	17
154	68	63	20	38	46	48	57	38	66	32	40	62	58	28	35
155	207	112	81	144	151	171	99	141	134	204	191	180	145	204	196
156	202	84	99	124	160	143	132	180	146	192	178	85	96	111	145
157	83	29	74	31	65	57	81	67	54	42	61	57	71	79	63
158	35	7	26	28	8	33	18	20	11	18	34	15	17	24	23
159	58	34	54	40	56	57	41	17	58	43	49	33	58	49	57
160	47	39	41	33	40	38	42	34	39	53	33	30	23	34	39
161	68	54	24	49	65	15	56	41	56	49	28	42	21	63	46

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
162	68	21	52	55	48	57	54	61	58	40	52	64	38	59	31
163	68	62	64	51	68	46	54	50	68	46	59	30	42	48	61
164	103	49	81	96	58	99	48	69	97	54	65	103	99	101	67
165	103	63	97	55	49	73	61	74	99	37	47	51	65	82	88
166	103	0	0	73	89	79	97	90	80	0	91	64	82	66	100
167	103	80	64	69	76	77	70	67	66	57	87	91	82	88	75
168	103	65	86	103	91	70	74	93	77	95	89	82	76	59	92
169	68	59	53	45	50	47	67	43	62	56	34	49	39	55	61
170	103	56	75	94	68	93	70	55	83	95	54	78	71	89	99
171	68	66	38	37	56	41	52	64	68	39	38	47	51	53	60
172	103	50	89	102	73	88	86	90	78	92	101	77	84	92	98
173	103	70	95	54	97	91	59	67	72	81	68	96	63	83	85
174	68	51	34	48	38	66	31	42	48	58	62	36	44	57	63
175	103	62	65	79	101	84	97	93	60	95	89	84	90	71	73
176	103	59	85	61	77	98	68	97	84	75	92	88	79	90	100
177	10	1	7	10	6	2	3	4	3	3	5	10	8	7	8
178	77	245	157	138	119	122	114	175	121	83	152	128	198	143	167
179	134	0	0	74	66	88	0	104	68	0	90	78	85	132	76
180	89	42	62	52	60	55	48	56	69	62	57	80	73	72	81
181	58	45	15	54	51	11	34	46	20	42	49	47	38	29	57
182	49	46	22	39	34	46	39	34	38	47	42	25	29	31	42
183	134	86	117	131	112	132	123	114	102	86	134	98	128	115	126
184	53	36	40	31	23	48	30	35	48	29	51	40	47	34	44

ตารางที่ ก-10 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 8 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
185	334	149	267	224	113	274	290	302	232	283	198	322	222	234	309
186	24	11	9	16	7	19	12	5	22	13	20	24	19	17	14
187	76	42	74	51	60	62	56	71	75	66	68	58	64	32	55
188	76	51	69	59	35	43	66	54	62	63	52	40	38	70	67
189	192	188	172	136	155	145	152	164	175	169	158	143	119	120	147
190	98	78	61	66	81	98	78	60	70	74	87	93	69	50	67
191	258	170	110	154	218	177	157	250	175	202	167	229	210	190	242
192	165	153	92	132	161	153	148	137	123	103	98	120	161	134	88
193	0	0	0	0	0	0	0	13	29	0	0	0	0	0	0
194	115	90	69	114	74	112	107	83	94	72	87	99	103	89	99
195	83	51	40	81	74	77	63	80	55	78	46	81	78	65	76
196	56	44	26	49	37	47	41	33	37	46	43	48	45	39	51
197	29	25	13	20	24	26	5	27	15	24	20	27	26	22	28
198	303	236	197	257	189	227	278	108	279	281	161	181	177	293	216
199	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0
200	29	25	14	8	14	27	22	28	23	29	18	16	13	20	21
201	154	123	107	92	121	91	137	75	139	87	111	148	102	98	87
202	90	49	86	62	67	75	84	68	89	72	79	76	70	81	88
203	93	70	62	87	72	82	39	65	79	87	68	62	56	81	90
204	94	84	80	74	82	59	86	90	85	71	79	92	89	67	78
205	165	101	99	135	128	164	145	134	158	114	139	94	123	154	148

3.9 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 9 (Set 9)

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 9

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	692	170	280	391	213	500	91	488	413	478	420	291	175	137	88	192	314	282
2	42	40	19	3	14	25	10	16	23	13	28	13	41	21	34	87	86	183
3	261	233	83	229	129	222	71	240	174	152	110	180	143	133	157	127	61	143
4	261	174	193	99	80	111	183	152	132	99	167	219	145	162	117	167	85	202
5	157	94	57	137	144	66	89	77	74	124	93	129	140	134	81	269	85	197
6	90	4	35	10	80	28	71	37	30	52	64	48	28	56	81	186	46	135
7	54	27	40	17	18	15	27	35	11	52	23	41	29	35	13	5	29	178
8	67	55	24	54	41	62	15	54	50	21	23	47	65	47	62	246	237	144
9	0	0	0	17	26	0	11	0	0	24	19	24	19	0	0	0	0	0
10	106	100	79	54	46	99	85	24	87	84	69	76	79	100	105	195	158	67
11	32	15	20	32	18	16	14	14	7	32	12	9	19	24	29	64	162	34
12	62	19	46	58	15	54	38	48	22	13	25	58	19	37	51	172	120	153
13	54	24	15	33	48	36	17	34	21	30	18	30	32	14	37	213	260	181
14	67	63	60	57	19	54	35	11	28	28	24	66	58	45	35	263	296	74
15	30	22	15	20	13	15	10	14	24	16	14	27	22	18	13	252	1	281
16	106	73	63	65	55	93	57	82	102	92	72	73	84	63	80	57	172	172
17	32	15	25	22	26	15	32	13	10	13	29	14	28	7	16	107	196	306
18	62	27	55	37	21	33	39	46	25	47	45	52	36	46	54	182	124	17
19	56	45	31	44	30	48	33	53	36	51	45	33	22	43	52	311	207	80
20	67	51	66	25	26	48	57	21	34	54	51	60	29	29	44	316	221	169
21	86	61	58	65	36	29	57	50	53	57	86	59	69	75	64	233	22	287
22	37	18	33	35	34	30	22	27	32	25	17	21	45	33	34	285	46	287
23	41	18	17	40	19	21	32	24	24	18	30	29	28	20	36	113	266	287

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
24	72	55	32	64	42	38	32	58	63	43	25	59	47	60	44	320	246	15
25	86	0	0	53	32	57	71	0	0	67	0	71	0	0	0	0	81	0
26	16	15	11	9	4	11	9	7	14	7	11	5	10	9	13	46	190	209
27	51	39	47	34	25	49	30	47	41	20	34	22	19	28	51	173	249	314
28	66	23	47	42	18	32	46	27	65	37	47	41	22	31	58	269	78	148
29	41	30	21	13	29	31	39	23	24	32	36	40	29	17	28	11	62	64
30	72	55	67	65	39	43	55	62	34	20	56	68	43	26	58	171	222	169
31	51	16	19	22	27	31	24	32	33	50	51	19	32	28	44	103	321	248
32	16	7	11	16	11	5	8	7	11	9	5	8	8	16	13	131	131	116
33	15	5	11	4	8	5	2	14	14	7	5	8	7	13	15	145	229	97
34	15	4	4	9	6	2	11	6	4	8	4	13	10	10	6	235	231	231
35	0	0	46	27	0	0	0	55	54	40	53	25	0	54	59	0	74	0
36	59	45	54	7	31	9	40	12	23	13	25	30	39	47	56	3	234	247
37	23	15	21	14	16	20	13	17	14	13	7	9	5	11	21	170	231	52
38	13	4	3	4	6	2	2	1	13	1	4	8	3	2	2	1	222	111
39	19	11	10	5	14	7	9	13	16	10	6	15	16	4	16	41	29	149
40	108	64	105	31	52	66	86	59	91	68	53	104	69	57	98	157	88	186
41	214	141	209	127	125	136	78	93	107	122	198	202	114	174	178	38	211	299
42	80	33	47	22	67	36	75	21	41	43	56	63	58	55	60	162	24	45
43	37	11	29	26	22	33	26	17	36	15	11	18	32	17	31	31	111	319
44	84	38	31	41	79	58	57	82	59	79	38	54	62	72	80	173	24	241
45	18	12	13	16	5	12	7	3	17	6	16	13	3	7	4	68	295	81
46	12	9	12	7	1	7	2	4	2	9	6	2	3	11	9	308	20	186
47	29	25	11	22	13	26	19	9	28	17	29	22	23	21	23	210	219	83

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
48	37	9	23	14	28	18	17	11	14	36	31	14	33	22	29	9	279	134
49	13	6	9	9	9	13	5	8	11	3	10	5	12	10	12	96	2	212
50	70	21	18	40	17	30	16	47	18	33	59	46	69	47	69	26	128	309
51	217	111	55	147	211	132	165	70	112	174	152	131	120	157	175	176	180	207
52	72	8	34	29	45	40	33	72	67	26	35	32	50	58	61	261	119	166
53	85	63	39	71	66	59	64	74	52	54	41	73	68	56	65	167	285	95
54	43	28	21	33	24	37	29	17	29	14	36	43	35	37	31	142	173	163
55	97	65	73	96	80	40	56	48	91	44	92	71	45	64	53	318	18	141
56	37	8	18	14	23	33	37	13	22	35	25	16	13	24	30	121	208	21
57	13	2	6	5	1	11	8	9	10	13	3	4	3	5	11	240	259	258
58	35	24	26	14	31	18	21	33	25	15	18	24	26	25	31	60	273	208
59	217	86	44	110	202	217	112	97	92	217	114	80	57	197	111	310	256	26
60	72	33	20	28	41	53	16	47	48	31	24	20	29	8	54	35	209	166
61	85	25	12	37	66	28	47	85	31	21	49	40	66	62	81	271	305	37
62	25	5	21	16	6	8	9	22	20	14	20	19	5	23	16	296	227	302
63	37	11	23	21	27	25	11	34	17	34	23	17	14	21	24	118	237	17
64	37	29	4	18	13	24	12	17	33	8	27	25	27	8	19	313	241	138
65	103	65	81	72	55	73	90	71	100	97	88	81	76	68	92	235	321	53
66	0	0	131	0	53	60	0	139	110	76	0	125	0	72	0	293	157	0
67	49	33	47	36	46	13	15	24	22	15	16	37	26	16	41	296	231	279
68	35	27	23	19	16	23	14	11	28	18	26	15	13	28	20	148	128	284
69	51	36	35	21	28	38	33	24	50	23	24	47	19	44	41	21	50	189
70	88	37	27	31	33	26	69	80	45	82	76	55	42	32	65	44	159	182

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
71	36	15	31	53	32	24	63	48	42	44	41	31	44	19	29	250	279	234
72	144	133	134	127	120	78	107	43	63	51	123	76	98	100	88	77	245	287
73	337	153	160	199	317	309	330	100	237	218	126	262	99	154	202	224	320	110
74	107	41	77	34	28	86	79	76	77	65	59	80	89	82	104	247	149	30
75	371	184	117	122	349	105	274	286	170	225	249	310	108	253	201	207	47	207
76	97	19	11	80	56	73	71	61	55	76	65	43	56	92	61	153	9	89
77	166	0	0	116	0	0	103	0	0	76	142	103	161	0	0	71	211	15
78	92	33	56	43	77	57	28	85	74	76	57	67	31	83	79	25	238	85
79	92	67	54	53	91	57	75	68	78	50	26	83	49	59	72	18	170	56
80	106	93	65	67	80	86	56	101	75	104	92	68	101	69	80	44	248	151
81	49	16	20	23	13	20	48	49	24	31	39	22	17	16	27	317	9	81
82	92	10	77	38	76	39	61	69	57	60	74	23	85	65	77	18	117	200
83	371	178	132	228	230	239	271	210	224	265	276	109	128	300	264	60	21	197
84	87	85	72	40	61	52	67	61	33	77	75	61	53	67	74	212	34	237
85	162	77	157	83	124	47	122	95	79	129	124	75	54	107	101	79	128	316
86	96	25	82	49	31	64	42	20	53	54	42	63	92	91	89	205	208	219
87	79	65	34	19	64	61	46	78	22	19	15	48	54	35	68	44	2	270
88	0	60	73	56	0	87	0	0	25	0	0	0	52	32	79	0	57	155
89	42	25	27	17	15	9	34	40	33	29	19	33	25	27	37	177	245	318
90	88	18	48	87	26	62	31	47	28	44	55	64	81	64	73	207	6	5
91	90	50	89	65	86	32	69	82	77	57	72	49	62	88	69	317	109	247
92	97	51	63	54	45	76	53	76	88	77	78	86	60	82	41	309	15	238
93	270	193	209	130	201	198	231	150	237	211	118	96	179	112	91	24	111	158
94	0	0	0	325	363	0	0	400	0	0	303	406	231	199	325	167	0	0

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
95	48	39	15	17	47	39	21	19	28	29	11	42	17	11	31	162	132	133
96	338	151	141	194	213	312	177	197	219	207	110	158	168	283	309	225	52	317
97	34	21	34	27	20	21	19	25	34	26	24	34	22	29	0	152	29	107
98	65	38	18	9	43	31	19	13	24	22	16	64	15	52	65	85	283	71
99	50	13	38	9	12	23	33	29	36	50	42	16	32	29	41	65	163	108
100	112	83	75	63	68	73	103	87	92	66	96	58	111	103	57	61	131	299
101	48	15	28	12	43	11	23	25	33	17	28	44	40	18	26	262	184	277
102	117	52	72	105	112	106	92	91	85	75	97	70	94	70	102	220	79	315
103	50	40	8	21	24	19	22	28	44	32	42	38	41	23	37	239	128	73
104	68	57	18	41	29	60	25	50	65	45	31	55	62	55	46	16	175	3
105	232	121	111	177	232	202	224	150	177	122	143	230	209	198	212	225	274	276
106	122	94	109	112	118	95	80	89	114	75	112	101	87	77	91	168	301	314
107	151	128	75	137	70	92	112	138	84	78	108	123	120	73	141	31	161	70
108	31	23	29	13	20	11	16	18	29	19	26	24	17	9	24	315	290	54
109	97	72	82	75	42	66	47	44	52	76	61	87	52	77	91	151	253	182
110	308	221	255	191	218	213	138	155	179	276	208	250	292	146	233	143	266	301
111	116	86	94	114	93	83	110	106	89	79	88	81	69	98	91	99	245	245
112	312	202	196	280	131	183	193	178	170	209	302	257	249	123	299	241	196	30
113	34	24	34	33	14	29	18	29	29	34	23	18	22	29	21	82	212	191
114	128	80	95	70	100	75	115	127	117	111	108	99	81	116	103	3	127	93
115	54	13	32	45	20	18	37	33	31	35	44	54	37	53	44	176	253	200
116	175	108	161	118	171	148	158	149	162	105	91	95	106	123	127	111	189	242

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
117	55	28	39	40	44	23	24	36	30	53	40	52	31	22	19	167	174	94
118	306	228	261	255	303	213	275	240	138	148	286	256	273	265	277	78	282	58
119	59	30	22	48	43	50	49	53	58	45	47	37	33	29	51	226	210	243
120	59	28	32	22	33	45	48	58	51	57	44	34	30	33	49	228	175	316
121	66	20	18	26	57	62	48	39	41	49	64	53	54	64	51	65	12	14
122	66	60	66	45	53	50	58	62	50	57	62	29	33	37	41	213	0	191
123	23	15	18	7	18	20	14	18	7	23	21	16	23	10	17	73	106	237
124	244	165	172	190	116	143	239	170	218	119	149	165	205	160	183	137	174	309
125	54	36	53	0	54	40	26	0	37	52	0	0	36	0	0	251	305	29
126	294	147	112	114	248	285	103	288	189	220	190	137	234	190	222	246	184	11
127	84	70	65	57	28	60	83	71	50	45	31	66	78	52	47	264	169	167
128	61	44	19	49	39	37	35	28	52	49	31	39	23	57	50	100	250	110
129	57	30	41	42	45	17	37	57	48	57	32	31	18	57	49	149	79	241
130	38	26	33	37	29	24	22	31	19	16	26	19	34	18	28	230	258	260
131	944	362	706	669	727	826	610	746	446	243	633	577	462	901	647	18	218	82
132	511	440	462	311	510	433	293	347	370	280	316	294	437	438	370	35	43	296
133	625	291	593	504	467	451	567	579	390	475	458	585	565	498	554	248	99	177
134	445	343	200	433	287	341	311	399	391	306	443	420	306	425	267	111	97	118
135	68	33	64	38	15	65	55	52	39	44	47	51	63	57	42	270	206	106
136	53	29	23	51	39	50	44	39	42	32	26	36	42	14	33	148	0	273
137	49	20	24	26	37	48	33	37	47	42	34	22	28	33	41	31	120	164
138	92	34	48	76	37	43	51	53	46	59	34	89	36	58	57	51	119	73

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
139	236	81	208	231	233	207	236	181	125	179	188	221	179	116	123	60	148	74
140	116	62	86	80	96	62	81	103	114	102	91	71	82	101	93	28	153	74
141	265	121	243	255	246	213	102	253	174	188	153	208	151	174	261	215	313	118
142	149	70	61	128	105	138	101	143	137	109	98	149	139	120	144	226	256	254
143	74	24	36	56	64	74	32	64	51	60	57	69	47	38	67	112	56	11
144	332	246	211	134	237	317	242	321	176	238	189	304	269	278	287	198	149	71
145	140	75	115	77	97	61	156	111	108	98	73	125	88	76	103	179	34	64
146	104	87	90	83	51	75	102	92	76	88	63	100	98	101	89	240	197	138
147	51	40	50	51	22	34	43	24	36	31	41	36	34	44	24	214	10	5
148	58	35	46	16	37	26	47	58	33	39	35	38	40	46	50	35	106	57
149	0	26	0	0	53	29	46	32	43	0	0	0	0	0	38	0	0	0
150	49	20	44	38	25	43	26	43	21	40	27	47	35	41	39	112	131	86
151	107	73	60	84	67	100	85	98	64	81	82	101	73	74	91	205	47	87
152	38	26	11	22	14	28	18	23	25	30	22	34	28	21	13	181	68	239
153	27	21	17	27	16	23	20	9	19	13	21	23	26	11	17	99	255	97
154	68	63	20	38	46	48	57	38	66	32	40	62	58	28	35	201	230	33
155	207	112	81	144	151	171	99	141	134	204	191	180	145	204	196	199	131	168
156	202	84	99	124	160	143	132	180	146	192	178	85	96	111	145	238	295	80
157	83	29	74	31	65	57	81	67	54	42	61	57	71	79	63	270	130	257
158	35	7	26	28	8	33	18	20	11	18	34	15	17	24	23	95	37	304
159	58	34	54	40	56	57	41	17	58	43	49	33	58	49	57	81	200	178
160	47	39	41	33	40	38	42	34	39	53	33	30	23	34	39	209	101	225

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
161	68	54	24	49	65	15	56	41	56	49	28	42	21	63	46	70	187	266
162	68	21	52	55	48	57	54	61	58	40	52	64	38	59	31	277	226	4
163	68	62	64	51	68	46	54	50	68	46	59	30	42	48	61	147	228	299
164	103	49	81	96	58	99	48	69	97	54	65	103	99	101	67	210	111	22
165	103	63	97	55	49	73	61	74	99	37	47	51	65	82	88	206	106	141
166	103	86	71	73	89	79	97	90	80	89	91	64	82	66	100	6	149	320
167	103	80	64	69	76	77	70	67	66	57	87	91	82	88	75	308	111	143
168	103	65	86	103	91	70	74	93	77	95	89	82	76	59	92	261	179	145
169	68	59	53	45	50	47	67	43	62	56	34	49	39	55	61	77	24	47
170	103	56	75	94	68	93	70	55	83	95	54	78	71	89	99	108	142	129
171	68	66	38	37	56	41	52	64	68	39	38	47	51	53	60	141	177	301
172	103	50	89	102	73	88	86	90	78	92	101	77	84	92	98	166	197	275
173	103	70	95	54	97	91	59	67	72	81	68	96	63	83	85	293	249	284
174	68	51	34	48	38	66	31	42	48	58	62	36	44	57	63	231	273	295
175	103	62	65	79	101	84	97	93	60	95	89	84	90	71	73	309	12	190
176	103	59	85	61	77	98	68	97	84	75	92	88	79	90	100	185	32	72
177	10	1	7	10	6	2	3	4	3	3	5	10	8	7	8	319	20	291
178	77	245	157	138	119	122	114	175	121	83	152	128	198	143	167	308	119	58
179	134	127	130	74	66	88	124	104	68	119	90	78	85	132	76	169	144	187
180	89	42	62	52	60	55	48	56	69	62	57	80	73	72	81	245	151	288
181	58	45	15	54	51	11	34	46	20	42	49	47	38	29	57	189	155	61

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
182	49	46	22	39	34	46	39	34	38	47	42	25	29	31	42	122	214	98
183	134	86	117	131	112	132	123	114	102	86	134	98	128	115	126	204	263	84
184	53	36	40	31	23	48	30	35	48	29	51	40	47	34	44	282	79	67
185	334	149	267	224	113	274	290	302	232	283	198	322	222	234	309	127	93	147
186	24	11	9	16	7	19	12	5	22	13	20	24	19	17	14	295	84	228
187	76	42	74	51	60	62	56	71	75	66	68	58	64	32	55	10	74	192
188	76	51	69	59	35	43	66	54	62	63	52	40	38	70	67	260	18	219
189	192	188	172	136	155	145	152	164	175	169	158	143	119	120	147	309	178	205
190	98	78	61	66	81	98	78	60	70	74	87	93	69	50	67	74	142	49
191	258	170	110	154	218	177	157	250	175	202	167	229	210	190	242	296	85	79
192	165	153	92	132	161	153	148	137	123	103	98	120	161	134	88	26	237	43
193	38	29	20	36	28	35	28	13	29	38	8	12	13	23	37	139	197	29
194	115	90	69	114	74	112	107	83	94	72	87	99	103	89	99	113	233	302
195	83	51	40	81	74	77	63	80	55	78	46	81	78	65	76	5	190	144
196	56	44	26	49	37	47	41	33	37	46	43	48	45	39	51	1	23	21
197	29	25	13	20	24	26	5	27	15	24	20	27	26	22	28	227	322	115
198	303	236	197	257	189	227	278	108	279	281	161	181	177	293	216	195	157	153
199	18	7	8	6	10	13	12	12	17	18	15	11	8	9	10	202	10	113
200	29	25	14	8	14	27	22	28	23	29	18	16	13	20	21	104	212	283
201	154	123	107	92	121	91	137	75	139	87	111	148	102	98	87	113	85	183
202	90	49	86	62	67	75	84	68	89	72	79	76	70	81	88	166	309	130
203	93	70	62	87	72	82	39	65	79	87	68	62	56	81	90	177	4	37

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
204	94	84	80	74	82	59	86	90	85	71	79	92	89	67	78	283	321	127
205	165	101	99	135	128	164	145	134	158	114	139	94	123	154	148	255	193	225
206	270	277	275	247	280	190	207	173	195	203	520	495	566	486	542	140	2	1
207	270	260	256	268	293	78	71	83	81	77	99	89	92	91	93	303	171	189
208	130	142	131	137	127	140	134	149	141	147	182	167	176	171	195	15	151	119
209	0	142	0	161	0	241	0	248	238	0	80	0	0	0	0	174	0	219
210	190	187	204	205	207	430	471	413	465	421	514	490	491	563	518	226	44	102
211	293	313	294	316	297	90	87	84	89	81	96	93	91	105	95	133	61	49
212	348	349	335	337	379	110	100	110	116	118	50	52	53	51	48	72	240	305
213	182	191	190	181	163	9	9	8	9	8	272	266	299	247	254	68	21	95
214	490	525	513	510	535	430	456	427	400	399	226	232	228	210	223	11	287	202
215	212	228	228	202	198	130	133	138	141	119	194	210	197	180	178	105	238	247
216	248	268	263	223	249	289	296	265	313	272	164	161	147	175	164	112	182	161
217	248	265	247	241	265	110	105	100	108	102	96	95	97	91	96	158	304	184
218	248	242	224	253	225	160	172	168	144	158	107	109	113	116	116	43	2	117
219	248	231	249	261	263	442	452	482	404	438	108	106	100	107	104	301	47	305
220	248	269	257	245	256	159	148	166	154	161	167	174	176	172	177	158	36	71
221	268	289	278	283	290	250	261	254	252	250	98	103	100	102	106	93	5	229
222	268	285	253	280	259	190	190	204	173	177	82	74	83	84	86	264	250	183
223	268	261	248	266	248	184	196	192	176	177	482	503	504	487	508	317	215	179
224	288	299	308	281	267	690	696	632	748	756	72	66	68	70	75	170	190	27
225	248	251	227	268	249	72	65	72	71	69	50	47	54	49	51	28	165	290

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
226	268	270	265	242	245	190	200	178	207	179	130	137	123	142	137	232	122	294
227	60	55	54	62	55	190	178	194	200	181	230	240	240	218	233	60	125	12
228	268	284	281	249	241	90	90	88	81	97	50	50	54	48	53	59	200	128
229	240	232	245	258	237	889	906	885	871	843	240	216	238	234	250	175	272	196
230	240	258	242	238	254	170	155	178	179	168	190	176	194	202	194	94	284	99
231	171	161	160	182	155	155	156	158	141	141	190	204	203	196	204	7	16	263
232	0	491	456	508	519	190	0	0	177	176	240	0	221	225	262	238	233	0
233	182	177	168	170	173	130	140	120	117	130	74	69	78	70	70	95	4	271
234	170	154	176	153	177	390	377	356	397	409	139	140	146	132	142	163	111	272
235	306	330	281	289	336	301	275	326	275	274	339	310	330	372	322	163	142	138
236	108	114	104	116	118	54	52	56	57	50	260	247	274	253	268	66	194	207
237	248	230	232	244	231	227	242	225	228	245	132	133	143	120	125	234	75	281
238	190	206	197	187	174	142	145	136	139	144	550	577	569	537	521	252	55	284
239	240	234	236	238	241	184	183	193	192	181	420	412	427	441	384	130	224	57
240	339	357	353	320	322	741	749	720	667	729	152	156	161	153	154	282	18	143
241	288	290	266	267	272	868	782	828	862	889	12	11	11	12	12	309	288	80
242	248	246	243	271	254	230	230	236	240	231	90	98	95	87	83	178	123	150
243	455	440	472	462	471	121	120	130	131	125	5	4	4	4	5	227	271	132
244	268	263	289	256	268	320	325	310	289	343	128	118	132	133	121	138	104	39
245	270	285	296	271	273	126	123	138	134	137	100	108	90	100	107	173	22	79
246	180	176	174	173	171	440	421	476	475	450	120	124	128	123	129	160	162	250
247	121	116	124	115	130	127	126	128	120	138	100	97	108	105	96	48	78	85

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
248	270	284	262	279	257	134	131	143	125	128	320	346	318	301	307	177	63	320
249	440	473	463	462	405	150	161	135	136	162	835	887	751	759	815	220	201	147
250	249	249	272	262	260	140	126	145	134	140	740	715	682	675	797	92	146	104
251	194	184	190	196	179	110	109	112	117	103	223	224	243	223	204	134	293	140
252	162	172	164	162	160	320	306	335	293	345	100	107	100	92	92	204	262	202
253	130	117	119	137	134	250	248	232	240	267	390	404	357	387	358	10	222	233
254	388	370	412	419	410	232	217	223	235	245	140	149	142	130	140	275	124	134
255	90	97	89	96	93	188	183	177	191	174	304	276	302	323	285	39	147	3
256	212	205	220	191	191	250	256	226	261	248	120	120	117	117	108	142	125	218
257	246	246	228	239	265	377	400	351	352	375	403	421	429	373	402	204	71	245
258	188	187	195	200	177	90	97	97	81	96	21	19	19	21	20	200	86	33
259	270	273	281	270	245	140	134	128	131	150	246	247	221	239	260	163	23	41
260	160	161	174	166	160	90	92	96	85	95	160	167	165	154	159	33	11	137
261	79	80	84	71	84	90	91	88	97	84	1019	1064	996	1097	970	229	186	59
262	466	454	468	438	461	70	72	64	71	64	34	30	33	36	36	34	41	128
263	240	247	252	236	229	90	94	93	86	98	120	122	131	109	121	184	1	11
264	137	148	138	134	129	110	109	110	120	105	68	66	74	67	61	12	70	222
265	184	174	170	190	190	150	162	150	159	140	910	835	923	988	930	49	17	209
266	110	104	112	104	103	101	96	109	110	110	302	304	307	329	303	272	68	29
267	0	297	0	292	255	0	356	351	0	362	778	832	701	0	0	0	201	0
268	149	146	145	152	151	118	117	108	107	110	101	108	107	101	108	150	273	191
269	280	277	254	268	281	290	310	292	313	316	1310	1343	1189	1278	1220	165	250	142

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเขตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
270	119	122	110	123	123	209	205	195	220	197	20	19	21	19	19	91	306	123
271	184	198	177	194	192	150	158	155	144	157	278	279	282	274	305	187	62	241
272	140	132	132	140	149	150	144	151	147	152	81	88	75	88	78	65	259	318
273	150	156	163	140	151	79	86	78	71	74	290	271	300	312	263	200	299	132
274	190	203	204	175	205	150	135	158	142	160	100	109	102	92	103	178	238	207
275	150	136	159	164	149	91	100	95	83	95	372	336	403	342	375	127	27	23
276	150	156	163	142	153	59	60	64	63	62	72	73	69	64	73	162	232	262
277	284	280	292	259	278	218	204	222	196	199	28	25	30	28	30	19	200	1
278	192	195	186	197	196	351	319	362	329	352	90	96	95	88	83	109	89	43
279	347	330	352	342	356	873	878	789	883	909	250	257	253	228	265	138	165	44
280	232	240	219	238	220	130	125	133	123	117	144	144	152	130	137	211	139	111
281	140	152	147	140	143	68	69	67	68	67	303	293	326	300	319	101	272	75
282	608	654	663	551	601	126	138	126	135	115	220	209	240	219	209	138	32	219
283	80	83	82	77	85	120	109	130	128	120	58	60	57	52	58	122	259	33
284	40	37	37	42	39	227	229	221	241	232	224	212	246	234	229	33	50	118
285	130	141	125	130	125	198	204	182	178	211	211	206	217	228	199	229	84	210
286	110	120	102	114	114	132	131	131	126	121	99	91	93	95	105	194	125	113
287	350	383	345	318	322	121	132	125	115	112	44	46	40	48	46	271	64	308
288	140	139	144	131	137	150	136	150	147	150	120	108	112	112	123	175	109	35
289	240	245	238	223	231	100	97	106	100	95	70	73	74	65	71	304	89	217
290	240	231	223	238	235	38	40	38	40	38	421	429	419	431	426	28	106	123
291	90	87	94	87	88	70	65	69	74	67	231	247	215	225	235	174	289	145
292	54	52	58	53	58	355	342	354	356	389	214	213	233	205	210	138	267	32
293	294	321	305	308	306	284	264	270	264	293	196	197	179	187	213	41	201	285

ตารางที่ ก-11 เวลาการดำเนินงานของเซตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

ชั้นงาน	เวลาดำเนินงาน																	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
294	203	196	183	198	185	122	126	121	129	133	280	290	296	288	273	256	284	277
295	150	158	144	155	164	75	71	74	79	75	398	415	359	418	367	201	61	146
296	270	293	264	252	256	160	151	172	148	165	72	72	74	67	79	215	100	175
297	155	142	157	167	155	140	136	139	136	128	280	284	304	289	268	208	105	105

4. เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานของสายการประกอบที่ใช้ในงานวิจัย

4.1 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับเซตปัญหาที่ 1 (Set 1) 24 ชั้นงาน

ตารางที่ ก-12 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 24 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงาน ก่อนหน้า		ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงาน ก่อนหน้า		ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงาน ก่อนหน้า	
1	L	0	0	9	E	6	0	17	E	12	0
2	L	0	0	10	E	7	0	18	E	13	0
3	R	0	0	11	L	1	0	19	E	13	14
4	R	0	0	12	L	8	9	20	R	15	0
5	L	2	0	13	E	9	0	21	L	16	17
6	E	2	3	14	R	9	10	22	E	18	0
7	R	3	0	15	R	4	0	23	R	19	20
8	E	5	0	16	L	11	0	24	E	20	0

หมายเหตุ: 0 หมายถึง ไม่มีชั้นงาน

4.2 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับเซตปัญหาที่ 2 (Set 2) 35 ชั้นงาน

ตารางที่ ก-13 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 35 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
1	E	0	0	0	0	19	R	18	0	0	0
2	E	1	0	0	0	20	E	17	19	0	0
3	E	2	0	0	0	21	E	16	20	0	0
4	E	3	0	0	0	22	E	21	0	0	0
5	E	1	0	0	0	23	E	22	0	0	0
6	E	5	0	0	0	24	E	23	0	0	0
7	R	1	6	0	0	25	L	21	0	0	0
8	R	6	0	0	0	26	R	25	0	0	0
9	L	8	0	0	0	27	R	24	26	0	0
10	L	1	0	0	0	28	R	11	13	27	0
11	E	4	0	0	0	29	L	28	0	0	0
12	E	1	0	0	0	30	L	21	0	0	0
13	E	9	0	0	0	31	E	30	0	0	0
14	E	7	10	0	0	32	E	21	31	0	0
15	E	14	0	0	0	33	E	11	13	27	32
16	L	15	0	0	0	34	E	27	0	0	0
17	L	0	0	0	0	35	R	33	0	0	0
18	R	7	12	0	0						

4.3 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับเซตปัญหาที่ 3 (Set 3) 53 ชั้นงาน

ตารางที่ ก-14 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 53 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า					
1	R	0	0	0	0	0	0
2	R	1	0	0	0	0	0
3	E	1	0	0	0	0	0
4	E	1	0	0	0	0	0
5	E	1	0	0	0	0	0
6	E	1	0	0	0	0	0
7	L	1	0	0	0	0	0
8	R	0	0	0	0	0	0
9	E	4	5	6	7	8	0
10	L	9	0	0	0	0	0
11	E	10	0	0	0	0	0
12	E	11	0	0	0	0	0
13	R	12	0	0	0	0	0
14	L	12	0	0	0	0	0
15	L	12	0	0	0	0	0
16	E	13	15	0	0	0	0
17	E	13	15	0	0	0	0
18	R	13	0	0	0	0	0
19	E	17	0	0	0	0	0
20	R	19	0	0	0	0	0
21	E	19	0	0	0	0	0
22	L	14	19	0	0	0	0
23	E	20	0	0	0	0	0
24	E	21	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-14 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 53 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า					
25	R	22	0	0	0	0	0
26	R	25	0	0	0	0	0
27	E	26	0	0	0	0	0
28	E	27	0	0	0	0	0
29	R	16	28	0	0	0	0
30	E	16	28	0	0	0	0
31	E	16	28	0	0	0	0
32	E	28	0	0	0	0	0
33	E	28	0	0	0	0	0
34	L	28	0	0	0	0	0
35	L	29	30	31	32	33	34
36	R	2	3	23	24	35	0
37	E	36	0	0	0	0	0
38	E	37	0	0	0	0	0
39	R	37	0	0	0	0	0
40	E	37	0	0	0	0	0
41	R	38	39	40	0	0	0
42	E	18	41	0	0	0	0
43	L	42	0	0	0	0	0
44	L	42	0	0	0	0	0
45	L	42	0	0	0	0	0
46	E	42	0	0	0	0	0
47	E	42	0	0	0	0	0
48	R	43	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-15 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 65 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า										
42	E	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	E	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	E	44	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	L	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	L	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	E	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	E	28	29	30	35	39	40	48	0	0	0	0
51	R	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	E	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	L	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	E	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	R	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	E	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	E	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	L	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	R	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	E	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	R	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	E	31	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	L	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	L	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	E	51	52	53	54	55	57	58	59	60	61	64

4.5 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับเซตปัญหาที่ 5 (Set 5) 83 ชั้นงาน

ตารางที่ ก-16 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 83 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
1	R	0	0	0	0	25	R	10	0	0	0
2	E	1	0	0	0	26	R	20	0	0	0
3	E	2	0	0	0	27	E	21	22	0	0
4	E	2	0	0	0	28	E	17	24	0	0
5	R	2	0	0	0	29	R	24	0	0	0
6	E	3	4	0	0	30	R	29	0	0	0
7	R	4	0	0	0	31	R	30	0	0	0
8	L	5	0	0	0	32	R	25	28	0	0
9	E	6	0	0	0	33	E	32	0	0	0
10	L	6	0	0	0	34	E	32	0	0	0
11	L	7	0	0	0	35	L	32	0	0	0
12	R	9	0	0	0	36	E	32	0	0	0
13	R	10	0	0	0	37	R	33	0	0	0
14	E	10	0	0	0	38	E	36	0	0	0
15	E	11	0	0	0	39	L	15	31	36	0
16	R	12	0	0	0	40	R	37	0	0	0
17	R	13	0	0	0	41	E	38	0	0	0
18	L	13	0	0	0	42	R	39	0	0	0
19	E	14	0	0	0	43	R	39	0	0	0
20	E	13	15	0	0	44	L	39	0	0	0
21	E	17	0	0	0	45	E	41	0	0	0
22	L	17	0	0	0	46	R	44	0	0	0
23	E	18	0	0	0	47	E	45	0	0	0
24	E	19	0	0	0	48	R	46	0	0	0

ตารางที่ ก-16 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 83 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
49	R	47	0	0	0	67	R	66	0	0	0
50	L	48	0	0	0	68	L	67	0	0	0
51	L	50	0	0	0	69	L	27	49	0	0
52	R	51	0	0	0	70	E	69	0	0	0
53	E	52	0	0	0	71	R	69	0	0	0
54	E	53	0	0	0	72	E	70	0	0	0
55	L	54	0	0	0	73	L	71	72	0	0
56	E	55	0	0	0	74	L	23	26	68	73
57	E	56	0	0	0	75	L	39	68	73	0
58	R	57	0	0	0	76	L	74	75	0	0
59	E	58	0	0	0	77	E	8	16	34	35
60	R	59	0	0	0	78	E	8	16	34	35
61	E	60	0	0	0	79	E	77	78	0	0
62	E	61	0	0	0	80	R	79	0	0	0
63	E	62	0	0	0	81	E	79	0	0	0
64	R	63	0	0	0	82	R	80	0	0	0
65	R	64	0	0	0	83	E	81	82	0	0
66	L	65	0	0	0						

4.6 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับเซตปัญหาที่ 6 (Set 6) 100 ชั้นงาน

ตารางที่ ก-17 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 100 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
1	E	0	0	0	0	25	L	15	0	0	0
2	L	0	0	0	0	26	L	16	0	0	0
3	L	0	0	0	0	27	E	18	0	0	0
4	R	0	0	0	0	28	E	14	0	0	0
5	E	0	0	0	0	29	L	17	0	0	0
6	R	0	0	0	0	30	R	21	0	0	0
7	L	0	0	0	0	31	E	18	0	0	0
8	E	0	0	0	0	32	E	20	0	0	0
9	E	0	0	0	0	33	R	23	0	0	0
10	E	0	0	0	0	34	E	23	0	0	0
11	R	0	0	0	0	35	R	23	0	0	0
12	R	11	0	0	0	36	E	23	0	0	0
13	E	8	0	0	0	37	R	23	0	0	0
14	E	4	0	0	0	38	R	23	0	0	0
15	L	6	0	0	0	39	R	25	0	0	0
16	E	7	0	0	0	40	L	27	0	0	0
17	R	5	0	0	0	41	L	11	26	0	0
18	E	10	0	0	0	42	L	29	0	0	0
19	L	6	0	0	0	43	L	29	0	0	0
20	L	10	0	0	0	44	E	29	0	0	0
21	L	6	0	0	0	45	E	31	0	0	0
22	E	9	0	0	0	46	E	31	0	0	0
23	R	1	2	3	12	47	L	36	0	0	0
24	L	22	0	0	0	48	L	35	0	0	0

ตารางที่ ก-17 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 100 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
49	E	39	0	0	0	74	R	56	0	0	0
50	R	40	0	0	0	75	L	57	0	0	0
51	E	6	38	0	0	76	L	58	0	0	0
52	L	46	0	0	0	77	E	23	59	0	0
53	L	37	0	0	0	78	E	74	75	76	0
54	E	41	46	0	0	79	E	66	0	0	0
55	E	13	24	47	48	80	R	64	0	0	0
56	L	49	0	0	0	81	L	64	0	0	0
57	R	51	0	0	0	82	E	67	0	0	0
58	L	52	0	0	0	83	E	68	77	0	0
59	E	50	0	0	0	84	R	83	0	0	0
60	E	52	0	0	0	85	L	83	0	0	0
61	R	51	0	0	0	86	E	80	0	0	0
62	R	45	51	0	0	87	R	8	78	0	0
63	R	54	0	0	0	88	E	81	82	0	0
64	E	55	0	0	0	89	L	82	0	0	0
65	L	55	0	0	0	90	E	84	0	0	0
66	E	55	0	0	0	91	E	88	0	0	0
67	L	55	0	0	0	92	E	60	85	0	0
68	E	55	0	0	0	93	L	88	0	0	0
69	E	55	0	0	0	94	E	90	0	0	0
70	R	55	0	0	0	95	E	46	68	91	0
71	E	55	0	0	0	96	L	91	92	0	0
72	R	55	0	0	0	97	E	41	64	92	0
73	E	55	0	0	0	98	R	44	72	91	0

ตารางที่ ก-17 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 100 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
99	E	94	0	0	0	100	E	98	0	0	0

4.7 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับเซตปัญหาที่ 7 (Set 7) 148 ชั้นงาน

ตารางที่ ก-18 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 148 ชั้นงาน

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
1	E	0	0	0	0	21	R	20	0	0	0
2	E	0	0	0	0	22	L	20	0	0	0
3	E	2	0	0	0	23	L	20	0	0	0
4	E	3	0	0	0	24	R	20	0	0	0
5	E	1	3	0	0	25	R	21	22	23	24
6	E	1	3	0	0	26	R	21	22	23	24
7	E	1	3	0	0	27	L	21	22	23	24
8	E	1	4	0	0	28	L	21	22	23	24
9	E	6	0	0	0	29	E	25	26	27	28
10	E	8	0	0	0	30	R	0	0	0	0
11	E	0	0	0	0	31	E	29	0	0	0
12	E	11	0	0	0	32	L	0	0	0	0
13	E	12	0	0	0	33	R	0	0	0	0
14	E	5	7	9	10	34	L	32	0	0	0
15	L	14	0	0	0	35	R	33	0	0	0
16	R	14	0	0	0	36	R	31	34	35	0
17	E	15	16	0	0	37	R	36	0	0	0
18	L	17	0	0	0	38	R	37	0	0	0
19	R	17	0	0	0	39	R	38	0	0	0
20	E	18	19	0	0	40	R	39	0	0	0

ตารางที่ ก-18 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 148 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
41	R	40	0	0	0	66	E	65	0	0	0
42	L	0	0	0	0	67	E	63	66	0	0
43	L	42	0	0	0	68	E	67	0	0	0
44	L	43	0	0	0	69	R	51	0	0	0
45	L	37	0	0	0	70	R	0	0	0	0
46	L	45	0	0	0	71	R	64	70	0	0
47	L	46	0	0	0	72	R	55	64	0	0
48	E	40	47	0	0	73	E	56	0	0	0
49	L	47	0	0	0	74	E	0	0	0	0
50	E	0	0	0	0	75	E	59	74	0	0
51	L	50	0	0	0	76	E	55	0	0	0
52	L	0	0	0	0	77	E	76	0	0	0
53	L	51	52	0	0	78	E	77	0	0	0
54	L	55	0	0	0	79	E	57	78	90	0
55	R	40	47	0	0	80	E	79	0	0	0
56	E	0	0	0	0	81	E	80	0	0	0
57	L	0	0	0	0	82	E	69	0	0	0
58	L	0	0	0	0	83	E	82	0	0	0
59	E	0	0	0	0	84	E	58	73	0	0
60	E	0	0	0	0	85	E	84	0	0	0
61	E	0	0	0	0	86	E	58	73	0	0
62	E	61	0	0	0	87	E	55	59	73	0
63	E	62	0	0	0	88	E	55	73	75	0
64	R	0	0	0	0	89	E	82	0	0	0
65	E	64	0	0	0	90	E	89	0	0	0

ตารางที่ ก-18 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 148 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า				ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า			
91	E	105	0	0	0	116	E	113	0	0	0
92	E	0	0	0	0	117	E	0	0	0	0
93	L	0	0	0	0	118	E	0	0	0	0
94	E	0	0	0	0	119	E	105	0	0	0
95	E	68	0	0	0	120	E	113	0	0	0
96	E	73	0	0	0	121	E	120	0	0	0
97	E	75	0	0	0	122	E	121	0	0	0
98	E	68	0	0	0	123	E	113	0	0	0
99	E	65	0	0	0	124	E	123	0	0	0
100	E	99	0	0	0	125	E	115	124	0	0
101	E	95	98	100	0	126	E	118	122	0	0
102	E	101	0	0	0	127	E	102	103	0	0
103	E	101	0	0	0	128	L	113	0	0	0
104	E	96	0	0	0	129	L	128	0	0	0
105	E	0	0	0	0	130	L	129	0	0	0
106	E	81	0	0	0	131	L	130	0	0	0
107	E	106	0	0	0	132	E	0	0	0	0
108	E	107	0	0	0	133	L	54	0	0	0
109	E	108	0	0	0	134	R	72	0	0	0
110	E	109	0	0	0	135	E	92	132	134	0
111	E	88	0	0	0	136	E	135	0	0	0
112	L	111	0	0	0	137	L	130	0	0	0
113	L	112	0	0	0	138	E	0	0	0	0
114	E	113	0	0	0	139	E	138	0	0	0
115	E	114	0	0	0	140	E	139	0	0	0

ตารางที่ ก-19 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 205 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า															
68	E	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
69	E	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
70	E	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
71	E	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
72	E	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
73	E	71	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
74	E	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
75	E	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
76	E	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
77	E	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
78	L	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
79	R	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
80	E	67	68	77	78	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
81	E	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
82	E	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
83	E	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
84	E	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
85	E	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
86	E	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
87	E	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
88	E	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
89	E	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
90	R	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
91	R	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
92	R	41	47	50	52	53	58	60	61	75	82	83	87	89	91	0	

ตารางที่ ก-20 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า								
34	L	30	31	0	0	0	0	0	0	0
35	R	34	0	0	0	0	0	0	0	0
36	E	32	0	0	0	0	0	0	0	0
37	R	28	0	0	0	0	0	0	0	0
38	L	33	0	0	0	0	0	0	0	0
39	E	36	37	0	0	0	0	0	0	0
40	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0
41	E	38	0	0	0	0	0	0	0	0
42	R	35	0	0	0	0	0	0	0	0
43	R	39	0	0	0	0	0	0	0	0
44	L	29	40	0	0	0	0	0	0	0
45	R	41	0	0	0	0	0	0	0	0
46	E	42	0	0	0	0	0	0	0	0
47	R	43	0	0	0	0	0	0	0	0
48	E	4	0	0	0	0	0	0	0	0
49	E	44	0	0	0	0	0	0	0	0
50	R	45	0	0	0	0	0	0	0	0
51	R	46	0	0	0	0	0	0	0	0
52	R	47	48	0	0	0	0	0	0	0
53	E	49	0	0	0	0	0	0	0	0
54	L	50	0	0	0	0	0	0	0	0
55	R	51	0	0	0	0	0	0	0	0
56	E	4	0	0	0	0	0	0	0	0
57	R	52	0	0	0	0	0	0	0	0
58	E	53	54	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-20 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า								
84	E	40	73	74	75	76	77	0	0	0
85	R	79	80	0	0	0	0	0	0	0
86	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0
87	R	81	0	0	0	0	0	0	0	0
88	E	82	0	0	0	0	0	0	0	0
89	R	82	0	0	0	0	0	0	0	0
90	R	83	0	0	0	0	0	0	0	0
91	R	84	0	0	0	0	0	0	0	0
92	E	85	0	0	0	0	0	0	0	0
93	L	86	0	0	0	0	0	0	0	0
94	L	4	0	0	0	0	0	0	0	0
95	R	90	0	0	0	0	0	0	0	0
96	L	91	0	0	0	0	0	0	0	0
97	E	40	73	74	75	76	77	0	0	0
98	E	92	93	0	0	0	0	0	0	0
99	R	59	87	88	89	0	0	0	0	0
100	L	59	87	88	89	0	0	0	0	0
101	R	94	95	96	97	0	0	0	0	0
102	E	98	0	0	0	0	0	0	0	0
103	R	99	0	0	0	0	0	0	0	0
104	E	100	0	0	0	0	0	0	0	0
105	E	4	0	0	0	0	0	0	0	0
106	R	101	0	0	0	0	0	0	0	0
107	E	102	0	0	0	0	0	0	0	0
108	E	103	104	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-20 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า								
259	E	4	0	0	0	0	0	0	0	0
260	E	253	0	0	0	0	0	0	0	0
261	L	254	255	0	0	0	0	0	0	0
262	R	255	0	0	0	0	0	0	0	0
263	L	256	0	0	0	0	0	0	0	0
264	E	257	0	0	0	0	0	0	0	0
265	E	258	0	0	0	0	0	0	0	0
266	E	259	0	0	0	0	0	0	0	0
267	E	260	0	0	0	0	0	0	0	0
268	R	261	0	0	0	0	0	0	0	0
269	E	261	262	0	0	0	0	0	0	0
270	R	263	0	0	0	0	0	0	0	0
271	R	230	264	266	0	0	0	0	0	0
272	E	265	0	0	0	0	0	0	0	0
273	E	267	0	0	0	0	0	0	0	0
274	L	268	269	270	271	0	0	0	0	0
275	R	272	0	0	0	0	0	0	0	0
276	R	273	0	0	0	0	0	0	0	0
277	E	274	0	0	0	0	0	0	0	0
278	R	247	274	0	0	0	0	0	0	0
279	E	239	0	0	0	0	0	0	0	0
280	L	275	0	0	0	0	0	0	0	0
281	E	276	0	0	0	0	0	0	0	0
282	E	274	0	0	0	0	0	0	0	0
283	E	277	278	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-20 เงื่อนไขการจัดสรรชั้นงานสำหรับปัญหา 297 ชั้นงาน (ต่อ)

ชั้นงาน	ด้าน	ชั้นงานก่อนหน้า								
284	R	249	0	0	0	0	0	0	0	0
285	E	238	0	0	0	0	0	0	0	0
286	E	279	0	0	0	0	0	0	0	0
287	E	174	0	0	0	0	0	0	0	0
288	E	174	0	0	0	0	0	0	0	0
289	E	230	0	0	0	0	0	0	0	0
290	R	280	0	0	0	0	0	0	0	0
291	L	281	0	0	0	0	0	0	0	0
292	E	108	0	0	0	0	0	0	0	0
293	E	282	283	287	288	290	291	292	0	0
294	E	284	285	286	289	0	0	0	0	0
295	R	181	0	0	0	0	0	0	0	0
296	R	54	0	0	0	0	0	0	0	0
297	E	30	0	0	0	0	0	0	0	0

5. สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต

5.1 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S1

ตารางที่ ก-21 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S1

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชิ้นงาน			
		2	0	0	0
1	1	2	0	0	0
	2	4	0	0	0
2	3	1	5	0	0
	4	3	0	0	0
3	5	8	11	0	0
	6	6	7	0	0
4	7	10	0	0	0
	8	9	0	0	0
5	9	13	0	0	0
	10	15	0	0	0
6	11	18	0	0	0
	12	20	0	0	0
7	13	22	0	0	0
	14	24	0	0	0
8	15	12	0	0	0
	16	14	0	0	0
9	17	16	0	0	0
	18	17	0	0	0
10	19	21	0	0	0
	20	19	0	0	0
11	21	0	0	0	0
	22	23	0	0	0

5.2 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S2

ตารางที่ ก-22 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S2

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน			
1	1	2	0	0	0
	2	3	0	0	0
2	3	1	11	0	0
	4	6	4	0	0
3	5	16	0	0	0
	6	7	10	0	0
4	7	5	8	0	0
	8	9	0	0	0
5	9	12	0	0	0
	10	13	0	0	0
6	11	18	0	0	0
	12	17	15	0	0
7	13	21	0	0	0
	14	20	0	0	0
8	15	22	0	0	0
	16	24	0	0	0
9	17	0	0	0	0
	18	14	0	0	0
10	19	0	0	0	0
	20	19	0	0	0
11	21	0	0	0	0
	22	23	0	0	0

5.3 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S3

ตารางที่ ก-23 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S3

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชิ้นงาน				
1	1	17	0	5	0	0
	2	1	2	3	0	0
2	3	10	0	0	0	0
	4	12	0	0	0	0
3	5	4	0	0	0	0
	6	6	7	18	8	14
4	7	11	0	0	0	0
	8	19	0	0	0	0
5	9	9	0	0	0	0
	10	20	0	0	0	0
6	11	13	0	0	0	0
	12	15	0	0	0	0
7	13	16	21	0	0	0
	14	0	0	0	0	0
8	15	22	25	30	31	32
	16	0	26	23	0	0
9	17	24	0	0	0	0
	18	0	27	34	0	0
10	19	33	0	29	0	0
	20	28	0	0	0	0
11	21	0	0	0	0	0
	22	35	0	0	0	0

5.4 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S4

ตารางที่ ก-24 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา S4

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชิ้นงาน			
		1	5	17	2
1	1	1	5	17	2
	2	0	0	0	0
2	3	10	0	0	0
	4	3	4	0	0
3	5	11	0	0	0
	6	6	8	7	14
4	7	9	0	0	0
	8	15	0	0	0
5	9	13	0	0	0
	10	12	18	0	0
6	11	16	0	0	0
	12	19	0	0	0
7	13	20	21	25	0
	14	0	0	0	0
8	15	30	31	32	0
	16	22	23	26	0
9	17	0	0	0	0
	18	24	27	34	0
10	19	33	29	0	0
	20	28	0	0	0
11	21	0	0	0	0
	22	35	0	0	0

5.7 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M1

ตารางที่ ก-27 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M1

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน						
1	1	29	30	2	3	4	49	6
	2	1	44	13	41	27	0	0
2	3	12	9	5	43	10	45	0
	4	42	11	26	23	0	0	0
3	5	46	47	48	24	25	0	0
	6	28	0	0	0	0	0	0
4	7	0	0	0	0	0	0	0
	8	7	8	14	0	0	0	0
5	9	15	22	20	16	17	31	62
	10	18	19	21	0	32	60	0
6	11	63	64	53	0	0	0	0
	12	55	52	54	59	51	36	33
7	13	58	34	56	57	0	39	0
	14	37	38	40	0	0	0	0
8	15	0	0	0	0	0	0	0
	16	61	35	65	50	0	0	0

5.8 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M2

ตารางที่ ก-28 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M2

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน								
1	1	29	30	2	3	23	12	49	0	0
	2	1	13	44	4	11	0	0	0	0
2	3	6	5	9	10	41	42	0	0	0
	4	7	8	14	22	0	0	0	0	0
3	5	20	16	17	43	25	0	0	0	0
	6	15	18	19	21	0	0	0	0	0
4	7	45	46	24	31	54	58	0	0	0
	8	27	26	0	56	55	59	60	32	52
5	9	33	34	53	62	36	63	47	0	0
	10	28	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	37	38	39	0	0	0	0	0	0
	12	61	35	51	57	0	40	0	0	0
7	13	64	65	48	50	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.9 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M3

ตารางที่ ก-29 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M3

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชิ้นงาน					
1	1	0	0	0	0	0	0
	2	1	2	4	0	0	0
2	3	3	0	11	15	0	0
	4	7	0	0	0	0	0
3	5	6	0	0	0	0	0
	6	5	0	0	0	0	0
4	7	10	0	18	23	0	0
	8	0	13	20	26	25	0
5	9	9	8	0	0	0	0
	10	14	19	24	29	0	0
6	11	0	0	0	0	0	0
	12	30	12	16	31	17	0
7	13	21	22	27	0	35	0
	14	28	32	33	0	0	0
8	15	36	38	41	0	0	0
	16	34	37	40	0	0	0
9	17	39	44	0	0	0	0
	18	45	47	0	43	46	48
10	19	50	51	0	55	0	0
	20	0	52	53	54	49	0
11	21	56	57	69	70	0	0
	22	0	58	59	60	61	0
12	23	62	63	0	66	0	0
	24	0	64	65	0	67	0

ตารางที่ ก-29 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M3 (ต่อ)

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน					
13	25	68	0	73	75	0	0
	26	72	71	42	0	0	0
14	27	74	76	77	0	0	0
	28	0	0	0	0	0	0
15	29	0	0	0	0	0	0
	30	78	79	81	0	0	0
16	31	0	0	0	0	0	0
	32	80	82	0	0	0	0
17	33	83	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0

5.10 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M4

ตารางที่ ก-30 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M4

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน					
1	1	0	0	0	0	0	0
	2	1	2	4	0	0	0
2	3	3	8	0	0	0	0
	4	5	0	0	0	0	0
3	5	0	0	0	0	0	0
	6	6	0	0	0	0	0
4	7	9	10	11	0	0	0
	8	7	12	16	0	0	0
5	9	0	18	23	14	19	0
	10	13	15	20	26	25	0

ตารางที่ ก-30 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา M4 (ต่อ)

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน					
6	11	24	0	28	22	0	0
	12	17	21	29	30	32	0
7	13	36	39	44	0	0	0
	14	31	34	33	37	0	0
8	15	35	0	50	51	0	0
	16	46	43	48	40	0	52
9	17	0	55	56	57	27	0
	18	53	54	42	0	58	0
10	19	38	41	45	47	0	0
	20	59	60	61	62	63	64
11	21	0	66	0	68	69	0
	22	65	0	67	49	0	71
12	23	70	72	73	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0
13	25	75	74	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0
14	27	76	77	78	79	81	0
	28	0	0	0	0	0	0
15	29	0	0	0	0	0	0
	30	80	82	0	0	0	0
16	31	83	0	0	0	0	0
	32	0	0	0	0	0	0

5.13 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L1

ตารางที่ ก-33 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L1

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชิ้นงาน									
1	1	58	59	50	51	32	34	0	0	0	0
	2	70	64	65	71	33	74	61	0	0	0
2	3	57	141	42	62	63	11	0	0	0	0
	4	138	69	82	99	100	83	0	0	0	0
3	5	12	13	2	91	1	0	0	0	0	0
	6	142	89	90	132	3	0	0	0	0	0
4	7	43	92	105	6	52	0	0	0	0	0
	8	146	75	7	97	0	0	0	0	0	0
5	9	119	143	9	66	67	0	0	0	0	0
	10	5	35	139	140	56	0	0	0	0	0
6	11	144	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	73	84	86	96	104	85	0	0	0	0
7	13	53	44	68	95	0	0	0	0	0	0
	14	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	15	147	4	8	0	0	0	0	0	0	0
	16	148	98	101	102	103	0	0	0	0	0
9	17	127	0	15	0	18	0	22	23	27	0
	18	10	14	16	17	19	20	21	24	0	26
10	19	28	29	31	0	45	0	0	0	0	0
	20	25	0	36	37	38	39	40	0	0	0
11	21	46	47	49	48	54	133	0	0	0	0
	22	41	0	55	88	111	76	72	77	78	0
12	23	112	87	81	0	0	0	0	0	0	0
	24	79	80	134	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-33 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L1 (ต่อ)

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน									
		13	25	135	136	113	114	115	0	0	0
	26	106	107	108	109	110	120	0	0	0	0
14	27	121	128	129	130	137	131	123	124	125	60
	28	116	117	118	122	126	93	94	30	0	0

5.14 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L2

ตารางที่ ก-34 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L2

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน											
		1	1	138	61	32	34	50	51	57	56	1	0
	2	74	92	64	59	33	35	65	0	0	0	0	0
2	3	141	58	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	91	73	70	69	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	105	84	85	66	82	83	0	0	0	0	0	0
	6	142	71	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	7	144	132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	75	97	146	99	0	0	0	0	0	0	0	0
5	9	143	90	52	53	11	0	0	0	0	0	0	0
	10	100	145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	147	119	96	104	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	148	12	13	139	86	2	3	6	0	0	0	0
7	13	5	4	8	10	14	0	0	0	0	0	0	0
	14	7	9	140	63	67	68	98	0	0	0	0	0
8	15	15	0	18	0	22	23	28	27	29	31	42	0
	16	16	17	19	20	24	21	0	25	26	95	101	103

ตารางที่ ก-37 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L5 (ต่อ)

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน													
32	63	244	246	291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	64	241	281	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	66	0	245	255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
34	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	68	248	262	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
35	69	294	0	261	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	70	249	284	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
36	71	269	274	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	72	254	0	268	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	73	282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
38	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	76	277	278	283	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	78	293	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

5.18 สายการประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้านที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L6

ตารางที่ ก-38 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L6

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน											
1	1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	3	4	56	26	0	25	60	68	40	34	0	0	
	4	0	61	65	111	22	24	30	27	31	48	0	

ตารางที่ ก-38 สายการประกอบที่ผ่านการจัดสมดุลการผลิต ปัญหา L6 (ต่อ)

คู่สถานี	สถานีงาน	ลำดับชั้นงาน										
3	5	259	266	247	116	29	33	38	0	0	0	0
	6	105	83	90	297	95	0	0	0	0	0	0
4	7	94	9	7	10	180	129	86	0	0	0	0
	8	5	6	122	172	175	179	82	88	35	0	0
5	9	134	141	151	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	252	110	42	46	51	81	0	0	0	0	0
6	11	0	59	8	14	20	15	11	16	12	0	0
	12	163	87	55	136	139	253	13	0	0	0	0
7	13	260	267	273	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	142	152	164	17	19	258	138	41	45	0	0
8	15	18	265	272	93	0	54	0	0	0	0	0
	16	276	281	0	275	50	89	0	0	0	0	0
9	17	280	73	109	291	44	49	0	0	0	0	0
	18	0	290	221	99	0	0	0	0	0	0	0
10	19	53	58	64	72	78	80	79	121	128	125	162
	20	223	225	0	85	92	98	0	0	0	0	0
11	21	102	107	113	167	171	100	104	108	115	114	0
	22	192	201	296	103	0	120	150	0	0	0	0
12	23	292	161	119	127	157	21	0	28	32	36	39
	24	118	126	0	23	0	37	0	43	47	0	0
13	25	0	63	67	70	75	0	74	97	84	0	0
	26	52	57	71	77	62	76	66	69	0	0	0
14	27	0	96	191	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	91	0	101	106	112	0	0	0	0	0	0

6. สีและตัวเลือกที่ใช้ในปัญหาการทดลอง

6.1 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 1 (Set 1)

ตารางที่ ก-39 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 1

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model				
		A	B	C	D	E
1	3	0	2	0	0	0
2	3	0	0	2	0	0
3	3	0	1	0	2	0
4	3	0	0	0	0	1
5	3	7	0	0	0	0

ตารางที่ ก-40 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 1

Option	RC Constraint (p/q)		Car model				
	S1	S2	A	B	C	D	E
1	1/1	1/1	1	0	0	1	1
2	1/2	1/2	0	0	1	1	0
3	2/5	2/5	0	0	0	1	1
4	1/2	1/2	0	0	0	1	1

6.2 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 2 (Set 2)

ตารางที่ ก-41 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 2

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model				
		A	B	C	D	E
1	3	0	4	1	0	0
2	3	3	2	0	0	0
3	3	0	0	0	2	0
4	3	5	1	0	0	1
5	3	0	0	1	0	0

ตารางที่ ก-42 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 2

Option	RC Constraint (p/q)		Car model				
	S3	S4	A	B	C	D	E
1	1/3	1/3	0	0	1	0	1
2	1/2	1/2	1	0	0	1	1
3	1/3	1/3	0	0	0	1	0
4	1/2	1/2	0	1	1	1	0

6.3 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 3 (Set 3)

ตารางที่ ก-43 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 3

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
4	4	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
5	4	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
6	4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
8	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	4	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0

ตารางที่ ก-44 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 3

Option	RC Constraint (p/q)		Car model									
	S5	S6	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	2/5	2/5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1
2	5/9	5/8	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
3	10/13	2/3	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1
4	1/2	1/2	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
5	1/2	1/2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
6	1/2	1/2	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
7	2/3	1/2	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1

6.4 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 4 (Set 4)

ตารางที่ ก-45 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 4

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	4	0	2	1	1	0	0	0	2	0	0
2	4	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
3	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	4	1	0	0	1	1	1	1	0	2	0
6	4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
7	4	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
8	4	1	0	2	1	1	0	0	0	0	1
9	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
10	4	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0

ตารางที่ ก-46 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 4

Option	RC Constraint (p/q)		Car model									
	M1	M2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1/3	1/3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
2	1/2	1/2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
3	1/5	1/6	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
4	5/9	5/9	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0
5	1/4	2/9	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
6	1/2	1/2	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1
7	5/8	2/3	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1

6.5 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 5 (Set 5)

ตารางที่ ก-47 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 5

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	4	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	4	2	2	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	4	3	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
5	4	0	0	1	2	0	0	0	1	0	0	0	0
6	4	0	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
7	4	2	0	0	0	1	1	1	2	0	1	1	0
8	4	0	0	2	0	0	0	0	0	1	2	0	0
9	4	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	1
10	4	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-48 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 5

Option	RC Constraint (p/q)		Car model											
	M3	M4	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	1/3	1/3	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
2	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	5/12	5/12	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
4	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	2/3	2/3	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	5/11	5/11	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
7	1/3	1/3	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
8	5/9	5/9	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1

6.6 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 6 (Set 6)

ตารางที่ ก-49 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 6

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	5	0	0	1	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2	5	2	0	2	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0
3	5	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
4	5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0
5	5	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1
6	5	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	5	0	0	2	2	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	5	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
10	5	3	4	0	2	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0
11	5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
12	5	1	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-50 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 6

Option	RC Constraint (p/q)		Car model													
	M5	M6	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	10/19	5/8	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
2	10/21	5/8	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
3	1/6	1/5	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
4	5/14	5/9	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
5	2/3	2/3	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
6	1/2	5/13	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0
7	10/17	5/7	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
8	10/17	5/7	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
9	2/5	10/21	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
10	10/13	10/11	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0

6.7 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 7 (Set 7)

ตารางที่ ก-51 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 7

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model														
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	7	0	3	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7	6	2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	7	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	7	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	7	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	7	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	7	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
10	7	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	7	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	7	0	5	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	7	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
14	7	3	2	0	2	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
15	7	1	0	7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-52 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 7

Option	RC Constraint (p/q)		Car model														
	L1	L2	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	2/3	5/9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
2	10/21	2/5	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0
3	5/7	10/21	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
4	5/11	5/14	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
5	2/9	2/9	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
6	2/3	2/3	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	5/6	2/3	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0

ตารางที่ ก-54 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 8

Option	RC Constraint (p/q)		Car model														
	L3	L4	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	5/9	1/2	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
2	10/13	5/7	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0
3	1/4	1/3	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
4	1/2	1/2	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1
5	2/5	2/5	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
6	1/2	1/2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	5/12	5/12	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
8	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	5/16	10/13	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
10	5/11	10/21	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
11	1/2	1/2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
12	10/21	10/19	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0

6.9 สีและตัวเลือกที่ใช้สำหรับเซตปัญหาที่ 9 (Set 9)

ตารางที่ ก-55 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 9

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model																	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	9	6	0	0	1	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
2	9	0	4	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	9	5	2	3	0	0	1	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0
4	9	2	4	4	2	2	3	1	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	9	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
6	9	3	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
7	9	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
8	9	3	0	5	1	1	0	0	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-55 สีของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 9 (ต่อ)

Color	Maximum Batch Size	Required number of car model																	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
9	9	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
10	9	1	3	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	9	5	2	2	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
12	9	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0
13	9	0	0	1	2	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
14	9	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15	9	6	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
16	9	4	3	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	9	10	2	1	1	1	2	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
18	9	0	3	2	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ ก-56 ตัวเลือกของรถยนต์สำหรับเซตปัญหาที่ 9

Option	RC Constraint (p/q)		Car model																	
	L5	L6	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	5/22	2/11	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0
2	5/13	5/13	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
3	10/33	5/17	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
4	5/7	2/3	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
5	1/12	1/12	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
6	1/3	2/5	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	5/7	5/9	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
8	5/8	10/17	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
9	5/8	10/17	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
10	10/19	10/19	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
11	5/16	5/19	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0
12	5/9	5/8	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1

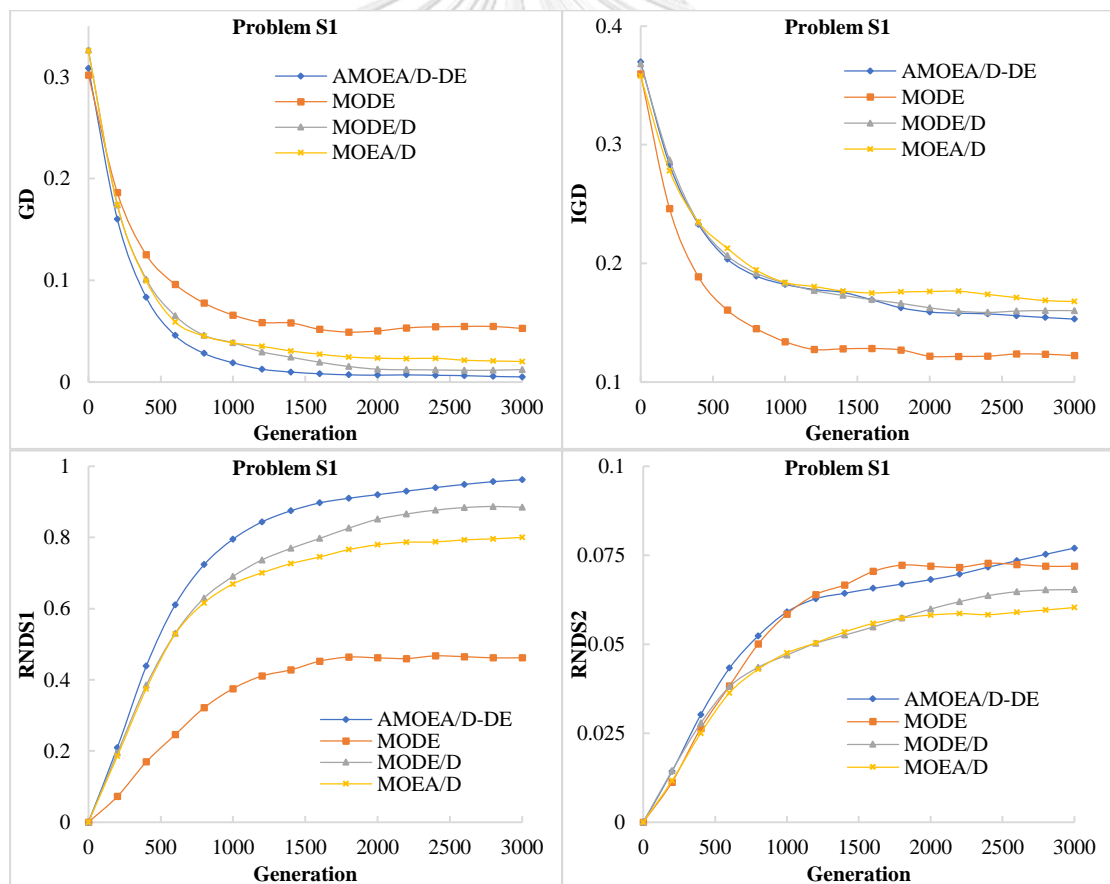
ภาคผนวก ข

ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

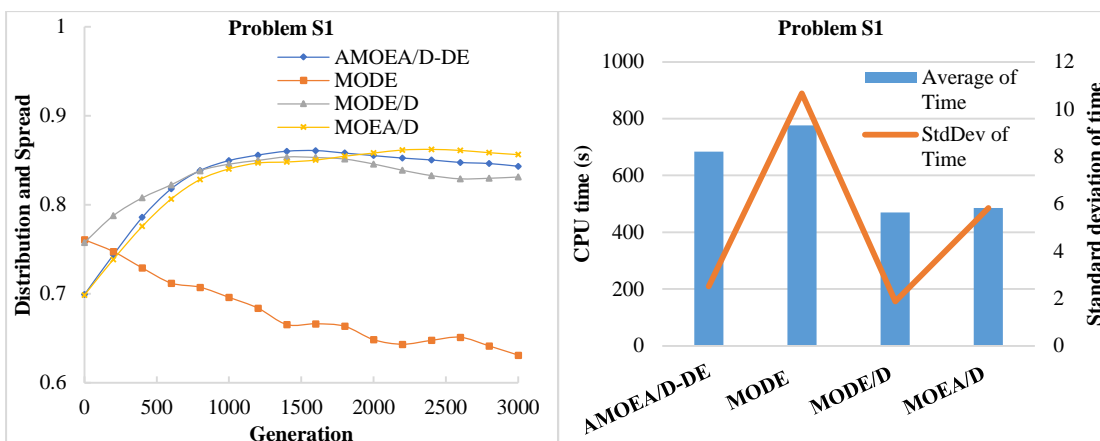
ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะและวิวัฒนาการของแต่ละอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาทั้งหมด แสดงดังตารางต่อไปนี้

1. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S1

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-1 และตารางที่ ข-1 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-1 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S1



ภาพที่ ข-1 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S1 (ต่อ)

ตารางที่ ข-1 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา S1

Metrics	AMOEA/D-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.00455 (0.00395) ¹	0.05064 (0.01132) ²	0.01273 (0.00378) ¹	0.01961 (0.01598) ¹
IGD	0.15173 (0.00497) ²	0.12098 (0.00503) ¹	0.16009 (0.00498) ^{2,3}	0.16708 (0.00702) ³
Distribution & Spread	0.83533 (0.01755) ²	0.61010 (0.07341) ¹	0.83483 (0.04569) ²	0.85247 (0.01554) ²
RNDS1	0.97126 (0.02943) ¹	0.46617 (0.09239) ³	0.87433 (0.04199) ^{1,2}	0.80983 (0.09373) ²
RNDS2	0.08041 (0.00473) ¹	0.07260 (0.01439) ^{1,2}	0.06518 (0.00376) ^{1,2}	0.06167 (0.00473) ²
CPU time (s)	683.854 (2.509) ³	776.234 (10.664) ⁴	469.995 (1.872) ¹	485.818 (5.828) ²

หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

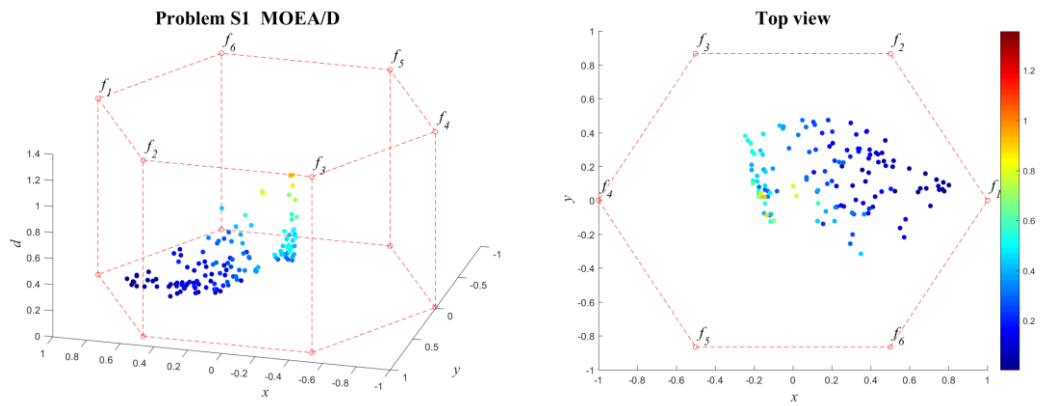
จากภาพที่ ข-1 จะเห็นได้ว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของค่าตอบที่เร็วกว่า MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD แต่ MODE จะดีกว่าในด้านความ

หลากหลายของคำตอบ สามารถดูได้จากกราฟ IGD และ Distribution and Spread ส่วนด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำตั้งแต่เจเนอเรชันแรก ๆ ซึ่งแตกต่างกับ MODE อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดย AMOEA/D-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดีเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

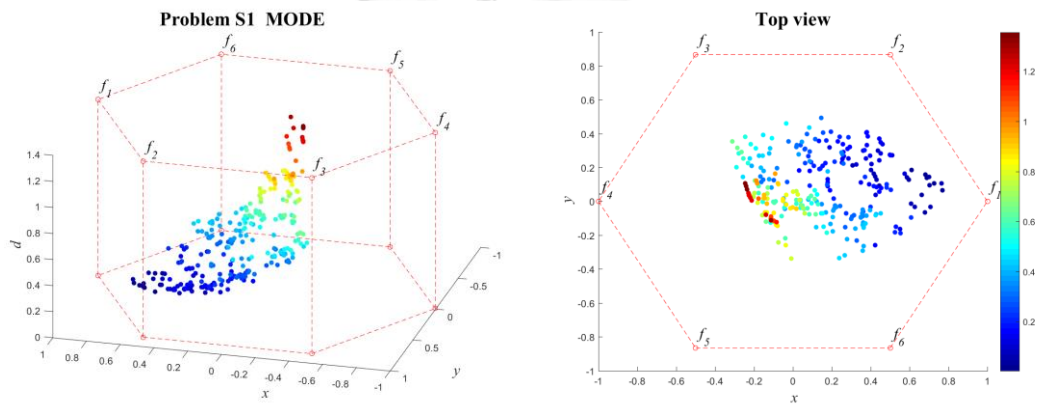
จากตารางที่ ข-1 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านในนี้ดีที่สุด ตามหลักสถิติ ส่วน AMOEA/D-DE กับ MODE/D และ MODE/D กับ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามลำดับ
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS1 ที่ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วนค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS2 พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดดีที่สุดตามหลักสถิติ แสดงให้เห็นว่า AMOEA/D-DE มีสมรรถนะด้านปริมาณคำตอบที่ดีที่สุด เนื่องจากจำนวนคำตอบที่หาได้ของอัลกอริทึม มีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำเทียบกับคำตอบที่หาได้และคำตอบที่แท้จริงคิดเป็นสัดส่วนที่มาก
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านในนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วน AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

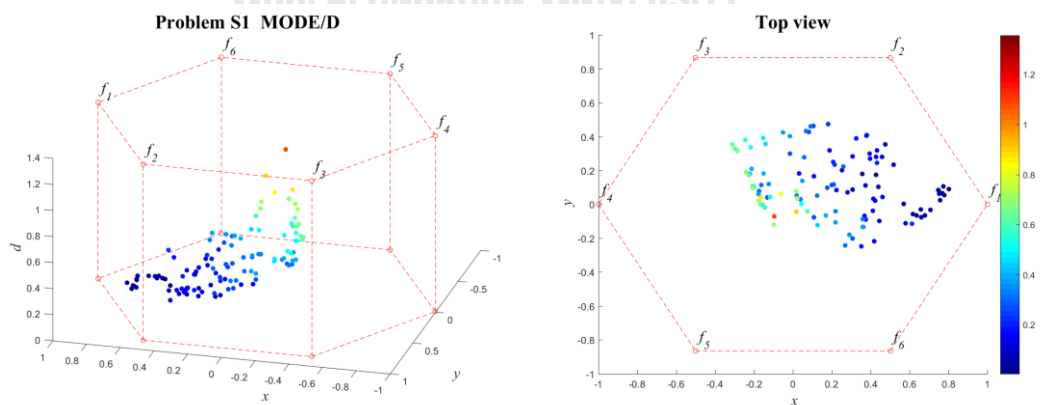
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตรถยนต์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-2 ถึง ข-6



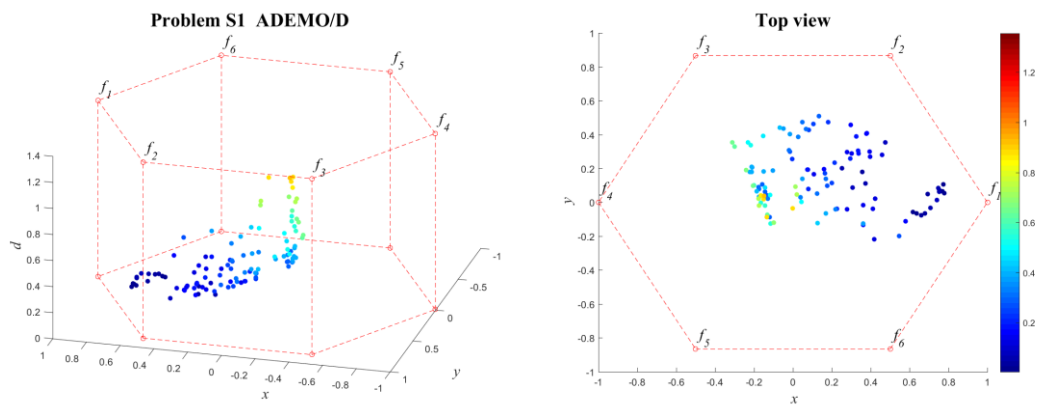
ภาพที่ ข-2 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา S1 (3D-RadVis)



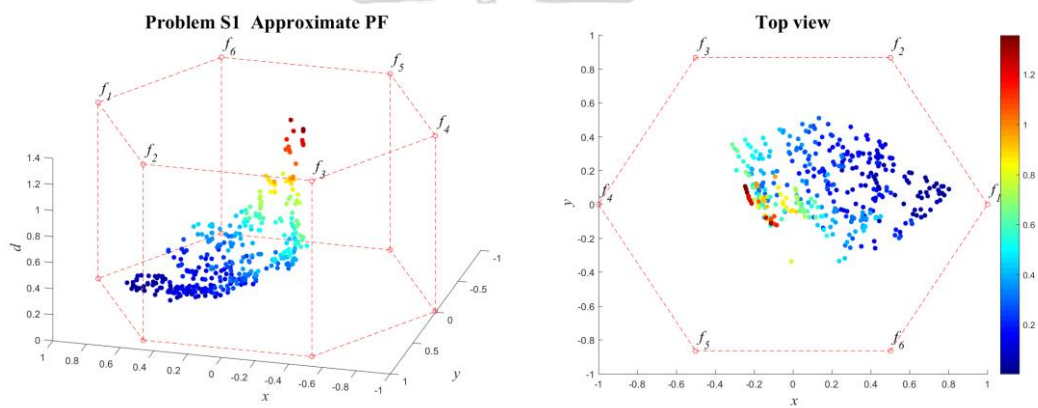
ภาพที่ ข-3 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา S1 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-4 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา S1 (3D-RadVis)



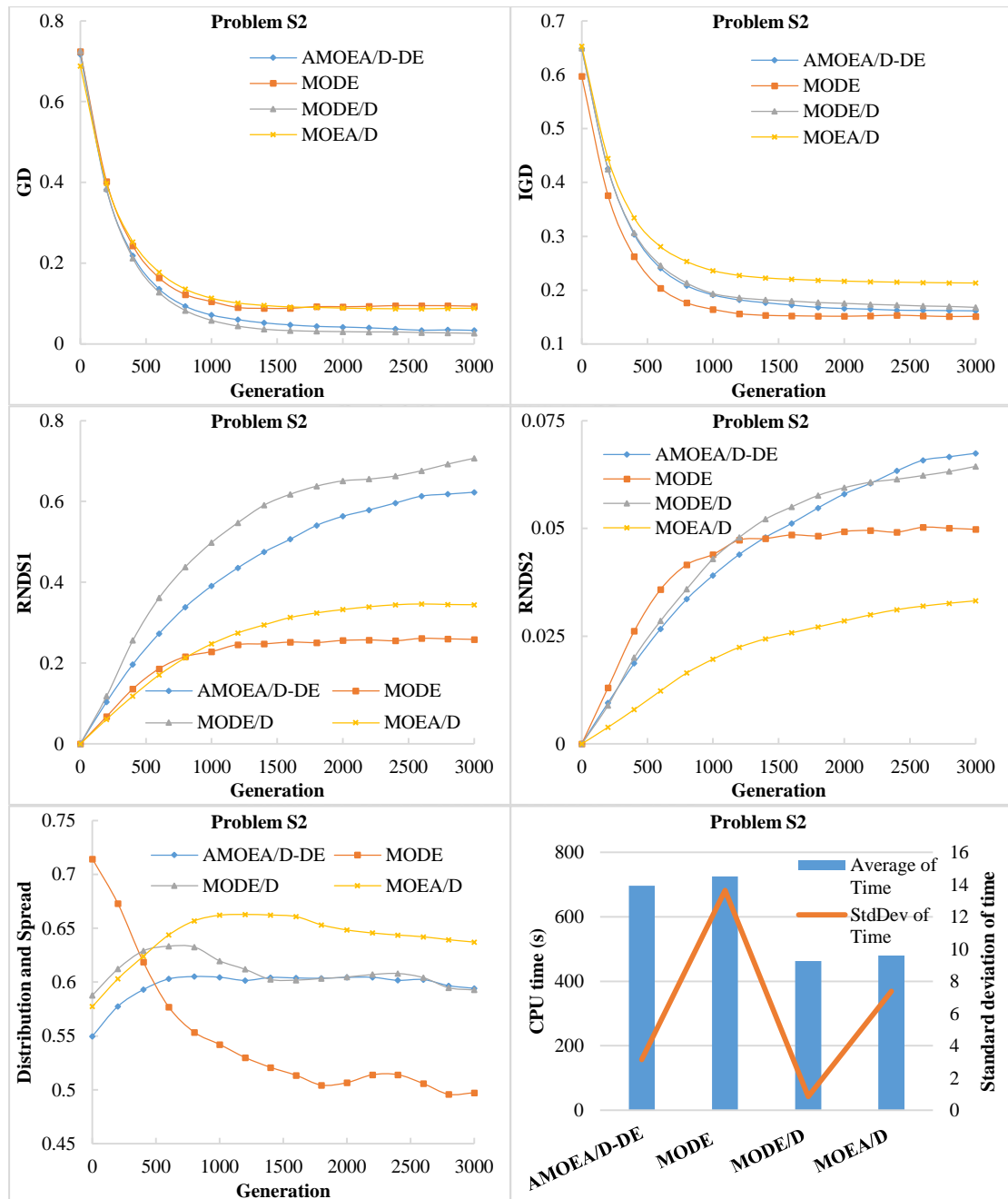
ภาพที่ ข-5 คำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAVD-DE ปัญหา S1 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-6 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา S1 (3D-RadVis)

2. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S2

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-7 และตารางที่ ข-2 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-7 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S2

ตารางที่ ข-2 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา S2

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.03269 (0.00748) ¹	0.09228 (0.01999) ¹	0.02533 (0.01361) ¹	0.08877 (0.06813) ¹
IGD	0.16118 (0.00502) ¹	0.15185 (0.00707) ¹	0.16631 (0.00686) ¹	0.21305 (0.04518) ²
Distribution & Spread	0.59246 (0.05129) ^{1,2}	0.51173 (0.06464) ¹	0.59597 (0.00777) ^{1,2}	0.63324 (0.09750) ²
RNDS1	0.63201 (0.06766) ¹	0.25564 (0.10606) ¹	0.73357 (0.12677) ¹	0.34385 (0.49507) ¹
RNDS2	0.06898 (0.00848) ¹	0.04920 (0.02041) ¹	0.06705 (0.00942) ¹	0.03425 (0.05180) ¹
CPU time (s)	696.297 (3.133) ³	725.203 (13.628) ⁴	462.260 (0.852) ¹	479.792 (7.379) ²

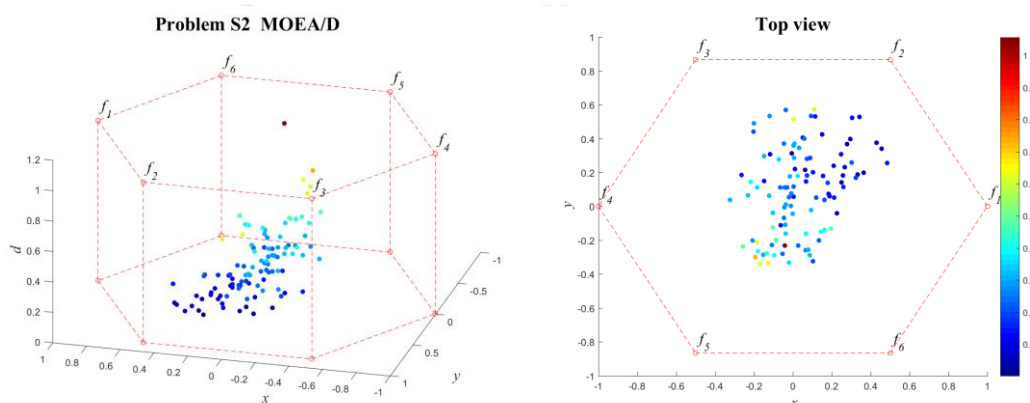
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-2 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE และ MODE/D มีการลู่เข้าของคำตอบที่เร็วกว่า MOEA/D และ MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD โดยที่ MODE จะดีกว่าในด้านความหลากหลายของคำตอบ รองลงมาคือ AMOEAD-DE และ MODE/D ตามลำดับ สามารถดูได้จากกราฟ IGD และ Distribution and Spread ส่วนด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE และ MODE/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำตั้งแต่เจเนอเรชันแรก ๆ ซึ่งแตกต่างกับ MODE และ MOEA/D เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดย AMOEAD-DE และ MODE/D มีการลู่เข้าของคำตอบและเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดีเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

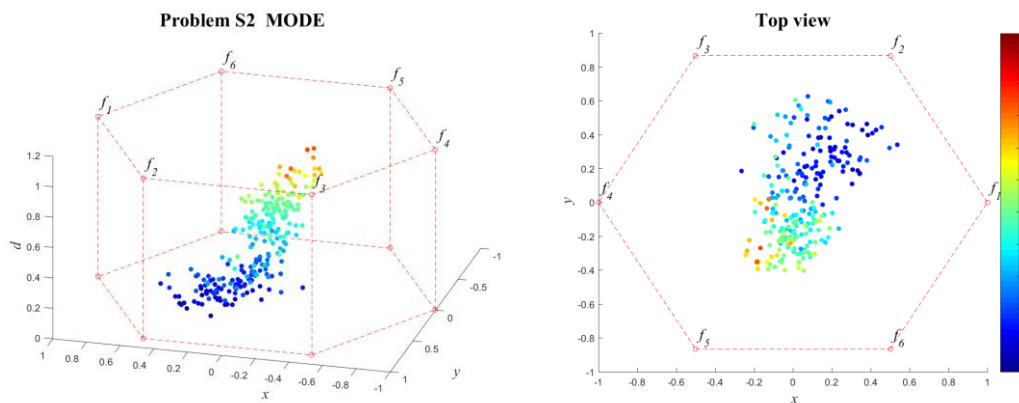
จากตารางที่ ข-2 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE/D มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE/D มีค่าเฉลี่ย RNDS1 ที่ดีที่สุด และ AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

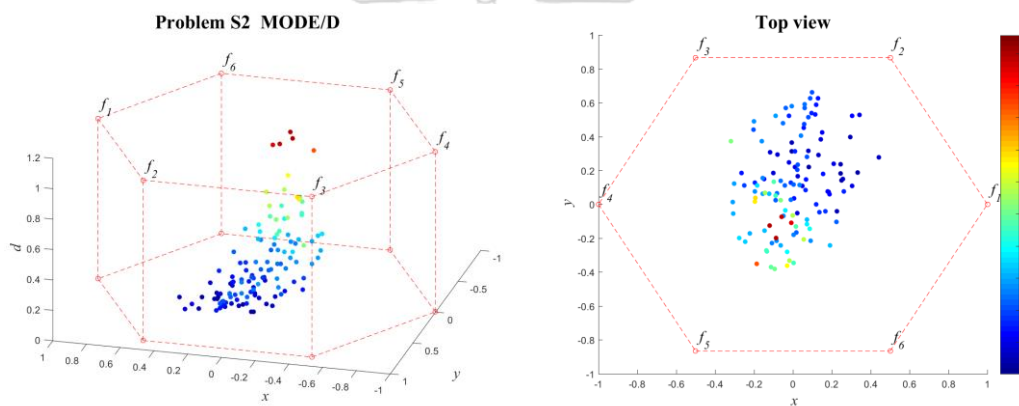
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์รถยนต์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-8 ถึง ข-12



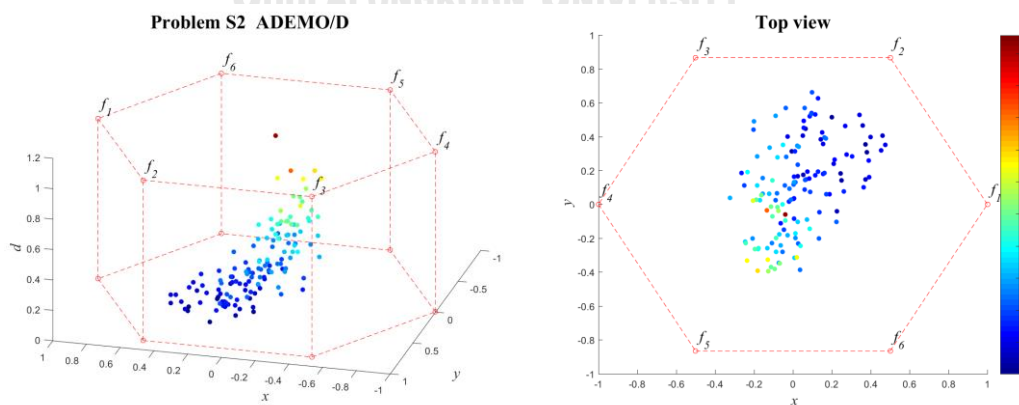
ภาพที่ ข-8 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา S2 (3D-RadVis)



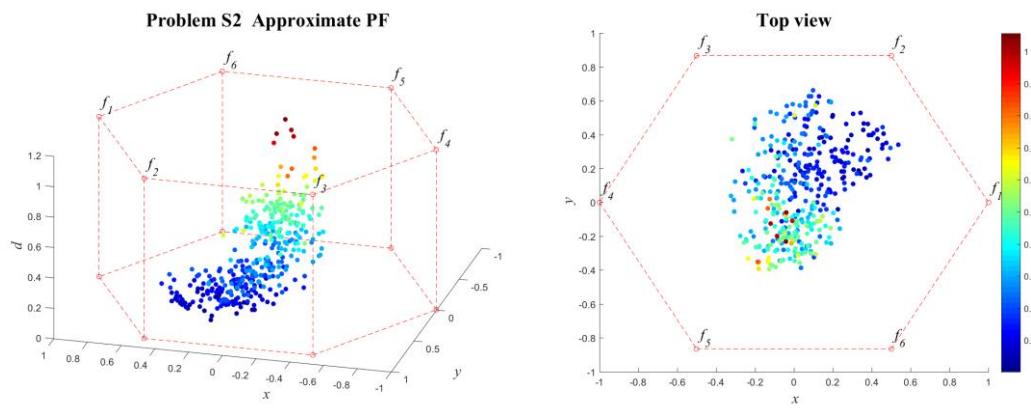
ภาพที่ ข-9 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา S2 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-10 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา S2 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-11 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา S2 (3D-RadVis)

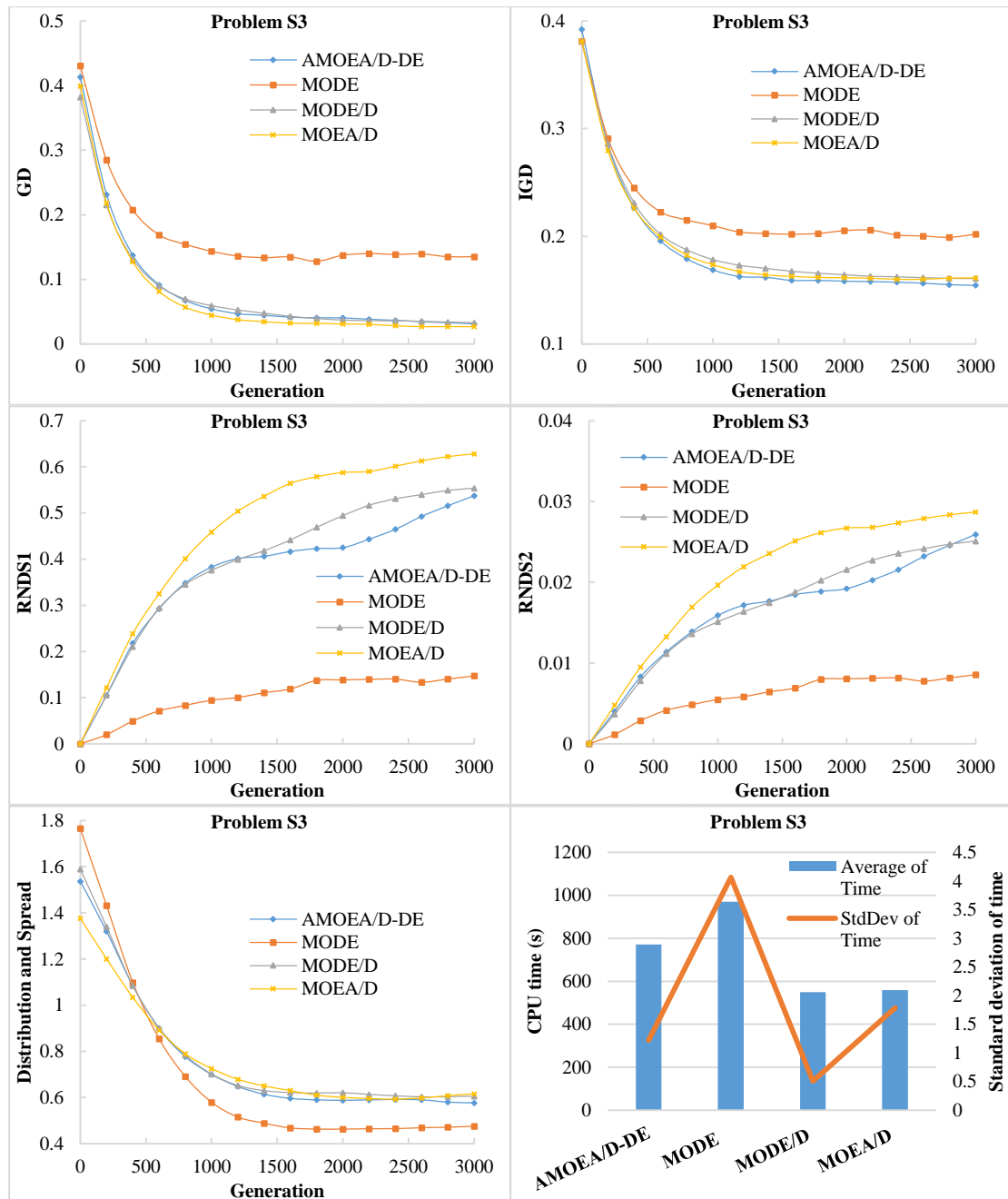


ภาพที่ ข-12 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา S2 (3D-RadVis)



3. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S3

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-13 และตารางที่ ข-3 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-13 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S3

ตารางที่ ข-3 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา S3

Metrics	AMOEAD/DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02959 (0.00791) ¹	0.13513 (0.02959) ²	0.03192 (0.00463) ¹	0.02672 (0.01631) ¹
IGD	0.15388 (0.00359) ¹	0.20485 (0.01478) ²	0.16049 (0.00735) ¹	0.16161 (0.01096) ¹
Distribution & Spread	0.57798 (0.00696) ^{1,2}	0.48481 (0.07138) ¹	0.61249 (0.07677) ²	0.63049 (0.07231) ²
RNDS1	0.57897 (0.05682) ¹	0.16040 (0.04406) ²	0.55893 (0.03712) ¹	0.63765 (0.13984) ¹
RNDS2	0.02857 (0.00241) ¹	0.00933 (0.00256) ²	0.02565 (0.00166) ¹	0.02930 (0.00762) ¹
CPU time (s)	771.552 (1.222) ³	969.670 (4.060) ⁴	548.651 (0.510) ¹	558.130 (1.780) ²

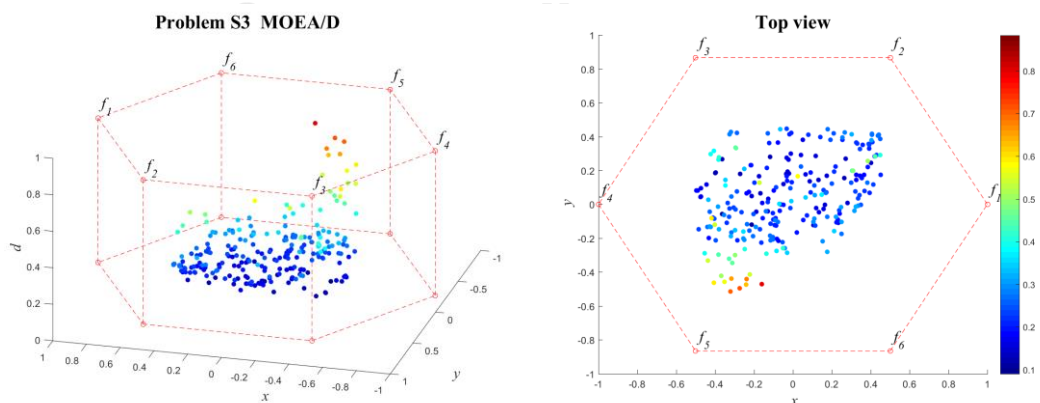
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-3 จะเห็นได้ว่า AMOEAD/DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ แต่ MODE จะดีกว่าด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจายมากกว่า สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread ส่วนด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD/DE, MODE/D และ MOEA/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำตั้งแต่เจเนอเรชันแรก ๆ ซึ่งแตกต่างกับ MODE อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD/DE, MODE/D และ MOEA/D มีสมรรถนะอัลกอริทึมในระดับที่ใกล้เคียงกันสำหรับปัญหานี้

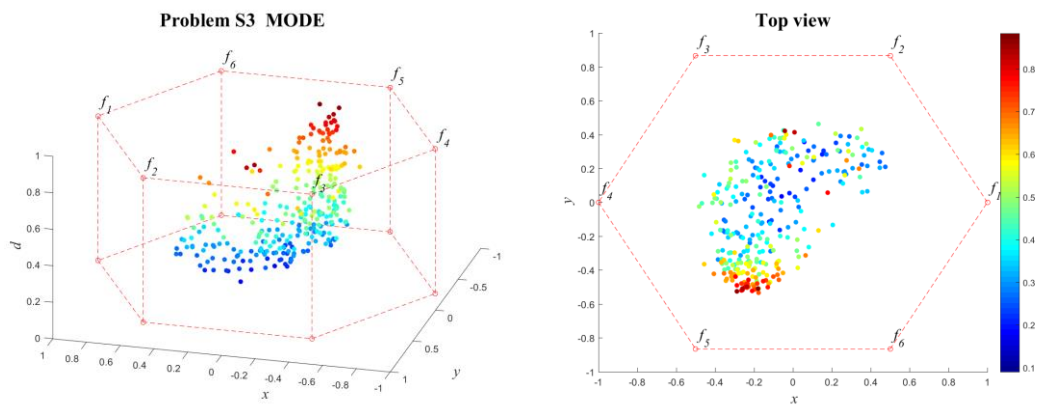
จากตารางที่ ข-3 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MOEA/D มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MOEA/D มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

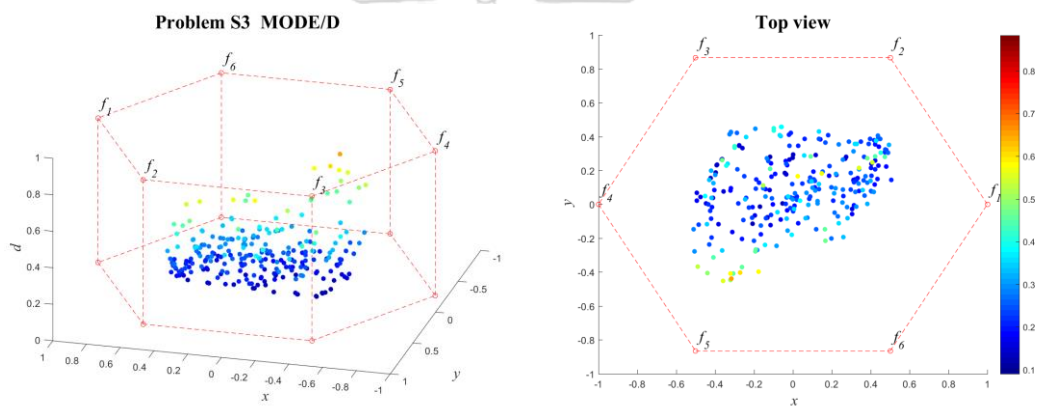
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-14 ถึง ข-18



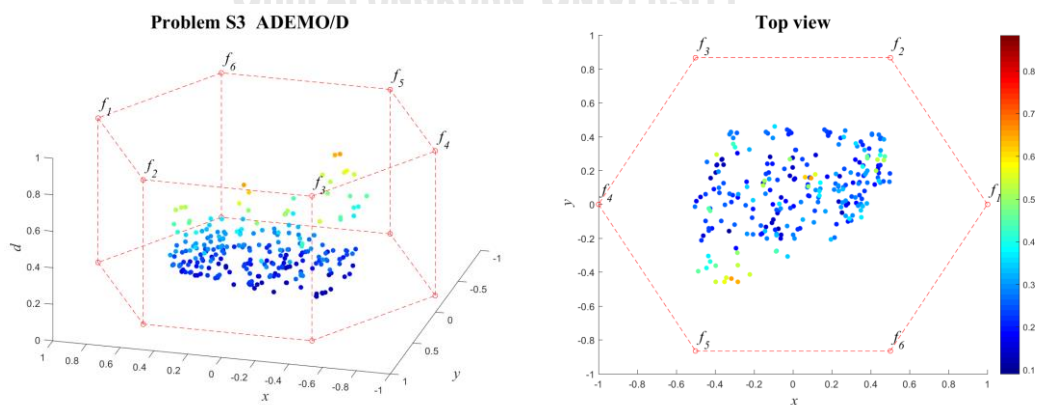
ภาพที่ ข-14 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา S3 (3D-RadVis)



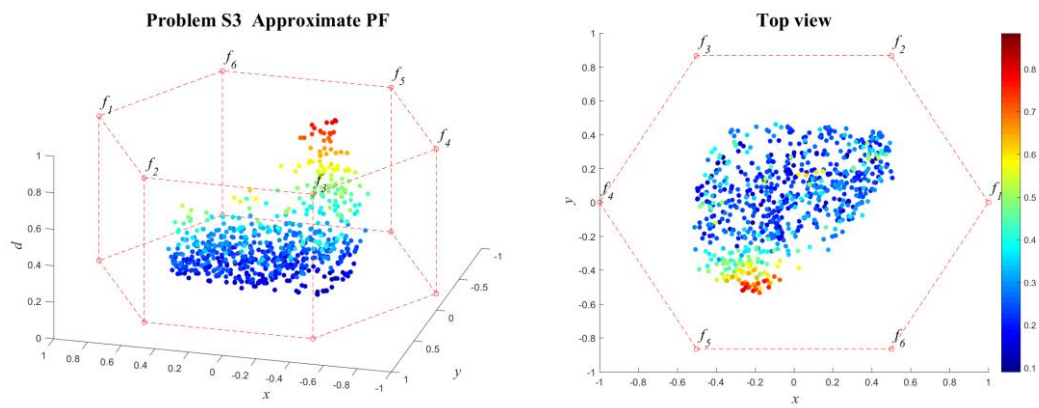
ภาพที่ ข-15 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา S3 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-16 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา S3 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-17 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา S3 (3D-RadVis)

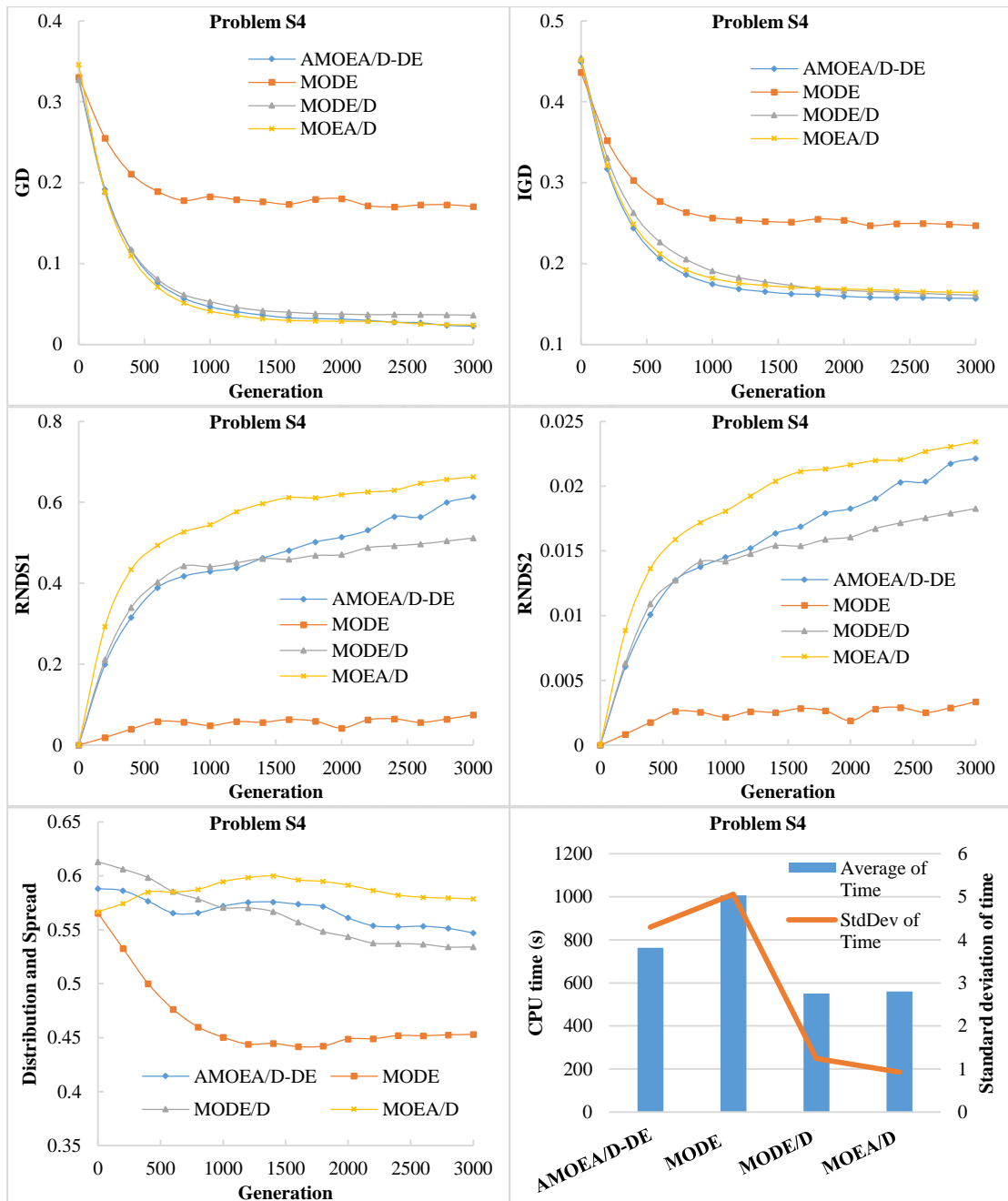


ภาพที่ ข-18 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา S3 (3D-RadVis)



4. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S4

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-19 และตารางที่ ข-4 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-19 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S4

ตารางที่ ข-4 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา S4

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02171 (0.01306) ¹	0.16835 (0.01335) ²	0.03606 (0.00831) ¹	0.02380 (0.01242) ¹
IGD	0.15668 (0.00466) ¹	0.24564 (0.01249) ²	0.16031 (0.00215) ¹	0.16428 (0.01105) ¹
Distribution & Spread	0.53610 (0.03556) ²	0.45358 (0.01516) ¹	0.53700 (0.01026) ²	0.57690 (0.01243) ³
RNDS1	0.62691 (0.16023) ¹	0.08521 (0.05439) ²	0.51920 (0.09260) ¹	0.66875 (0.13196) ¹
RNDS2	0.02254 (0.00572) ¹	0.00381 (0.00243) ²	0.01861 (0.00411) ¹	0.02377 (0.00547) ¹
CPU time (s)	763.604 (4.290) ³	1006.125 (5.060) ⁴	550.932 (1.246) ¹	560.130 (0.930) ²

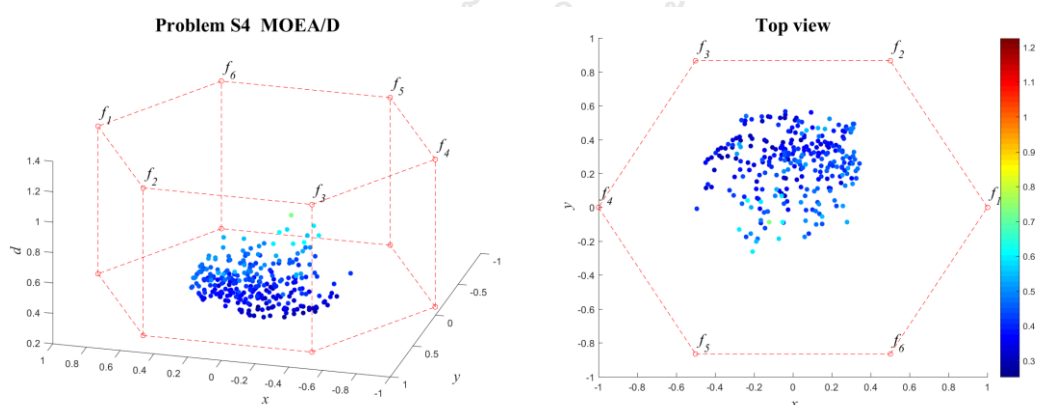
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-4 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ แต่ MODE จะดีกว่าด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจายมากกว่า สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread ส่วนด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดแต่เจเนอเรชันแรก ๆ ซึ่งแตกต่างกับ MODE อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีสมรรถนะอัลกอริทึมในระดับที่ใกล้เคียงกันสำหรับปัญหานี้

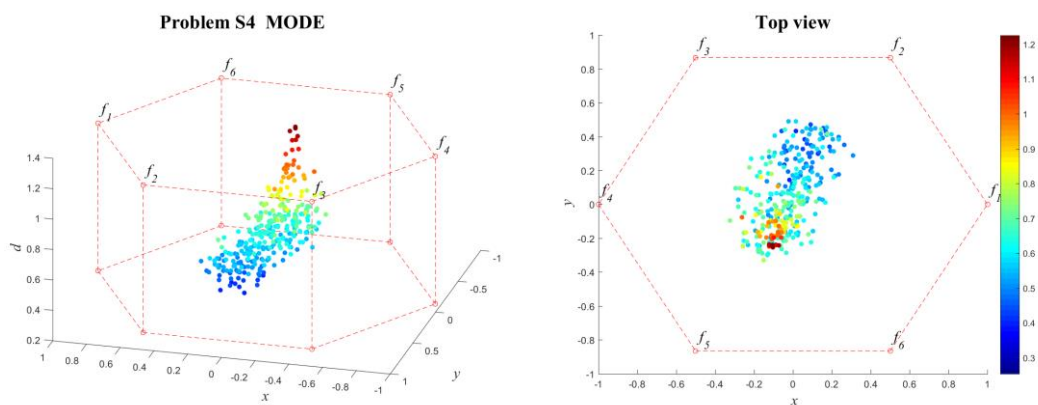
จากตารางที่ ข-4 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MOEA/D มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วน AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

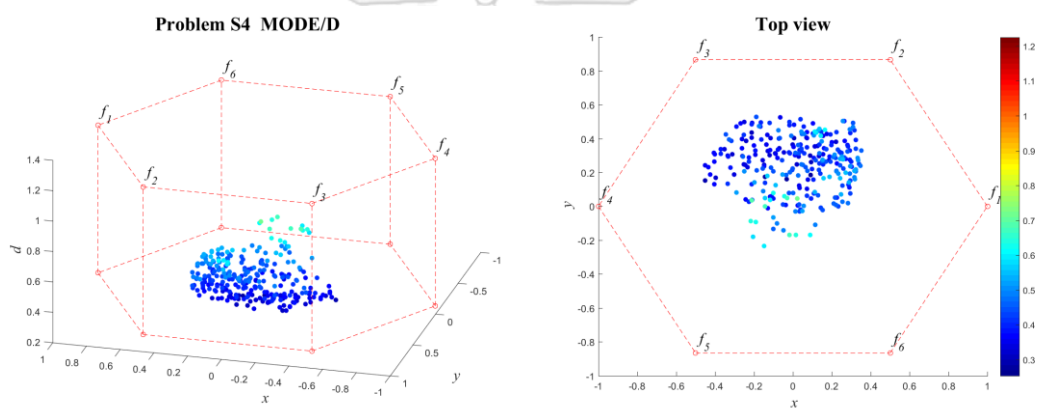
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-20 ถึง ข-24



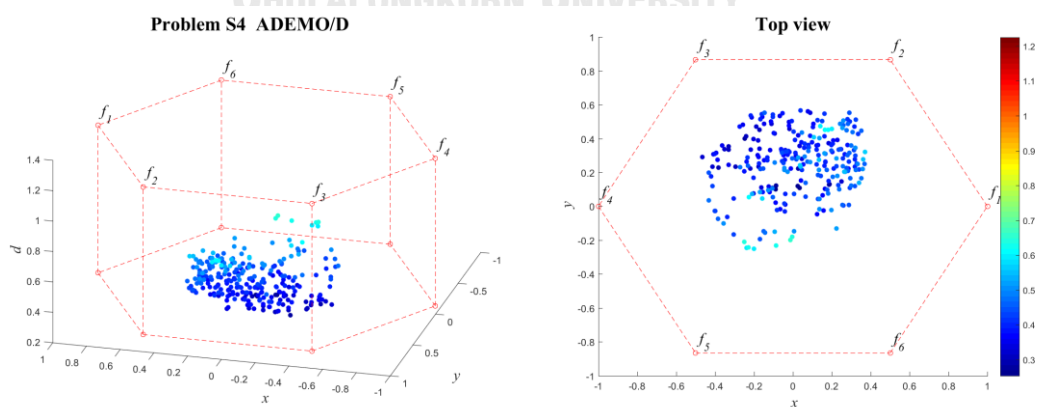
ภาพที่ ข-20 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา S4 (3D-RadVis)



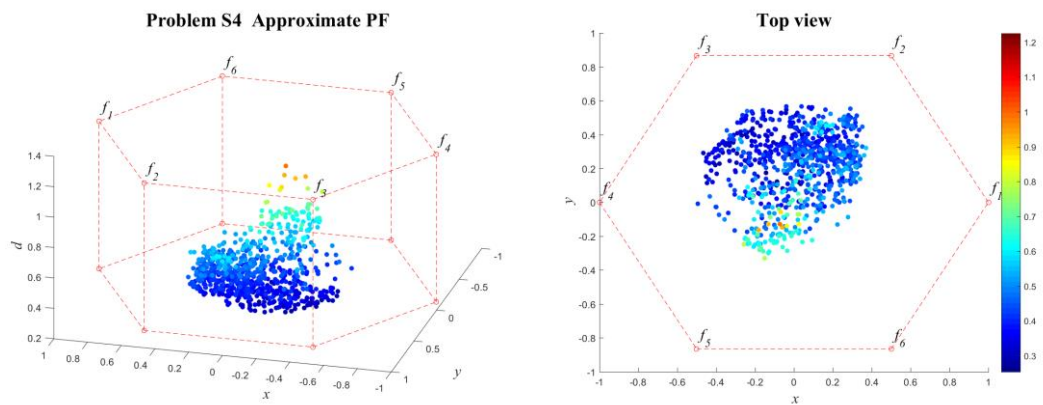
ภาพที่ ข-21 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา S4 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-22 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา S4 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-23 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา S4 (3D-RadVis)

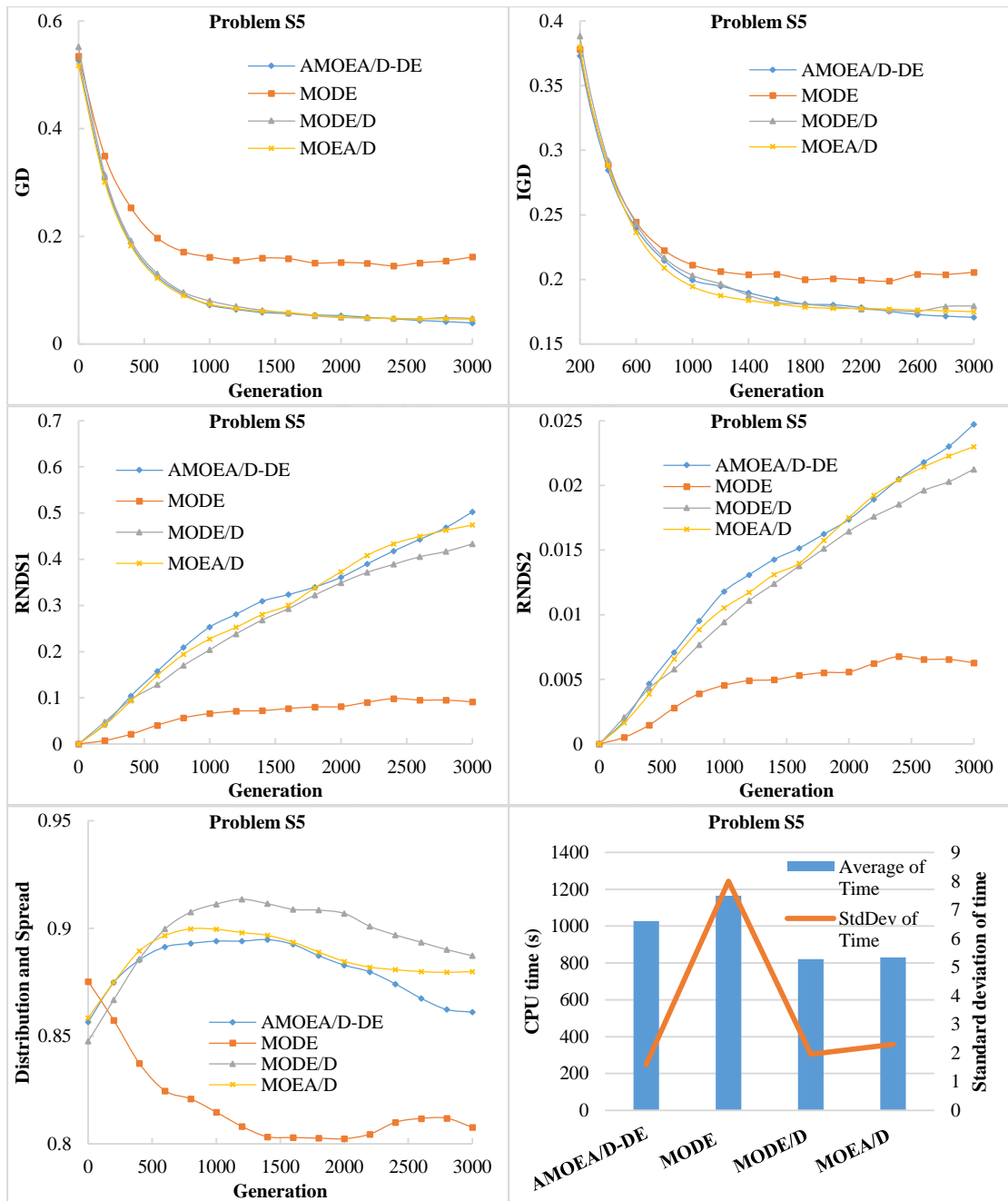


ภาพที่ ข-24 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา S4 (3D-RadVis)



5. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S5

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-25 และตารางที่ ข-5 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-25 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S5

ตารางที่ ข-5 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา S5

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.03664 (0.01798) ¹	0.16897 (0.03726) ²	0.04595 (0.00391) ¹	0.04612 (0.04816) ¹
IGD	0.16975 (0.00903) ¹	0.20743 (0.01742) ²	0.17988 (0.00388) ^{1,2}	0.17442 (0.02342) ¹
Distribution & Spread	0.86272 (0.01378) ²	0.79492 (0.00221) ¹	0.88219 (0.00980) ²	0.88127 (0.02306) ²
RNDS1	0.57726 (0.17692) ¹	0.08020 (0.04834) ²	0.47094 (0.04748) ^{1,2}	0.49458 (0.39581) ¹
RNDS2	0.02864 (0.00868) ¹	0.00552 (0.00333) ²	0.02346 (0.00255) ^{1,2}	0.02433 (0.01989) ^{1,2}
CPU time (s)	1028.000 (1.600) ³	1165.375 (8.000) ⁴	821.547 (1.960) ¹	830.604 (2.300) ²

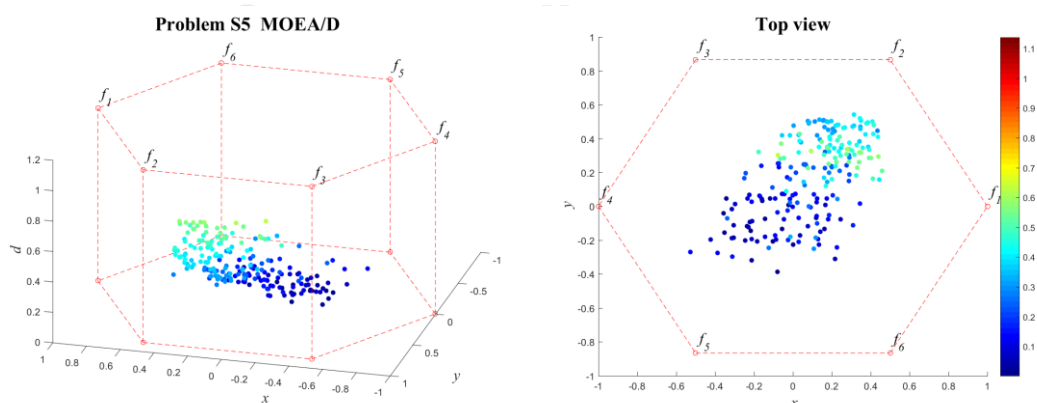
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-5 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ แต่ MODE จะดีกว่าด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจายมากกว่า สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread ส่วนด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดแต่เจเนอเรชันแรก ๆ ซึ่งแตกต่างกับ MODE อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีสมรรถนะอัลกอริทึมในระดับที่ใกล้เคียงกันสำหรับปัญหานี้

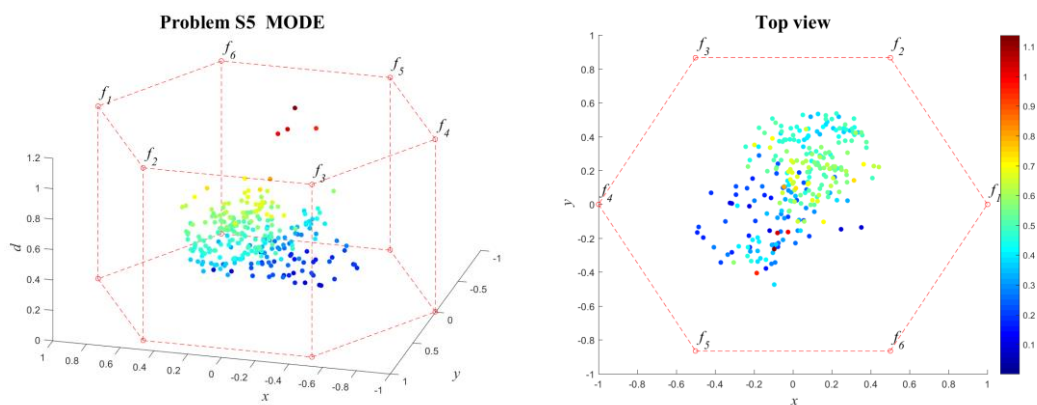
จากตารางที่ ข-5 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของค่าตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของค่าตอบ พบว่าอัลกอริทึมกลุ่มแรกคือ AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่สองคือ MOEA/D และ MODE มีค่าตัวชี้วัดที่ไม่แตกต่างกัน โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณค่าตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของค่าตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วน AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

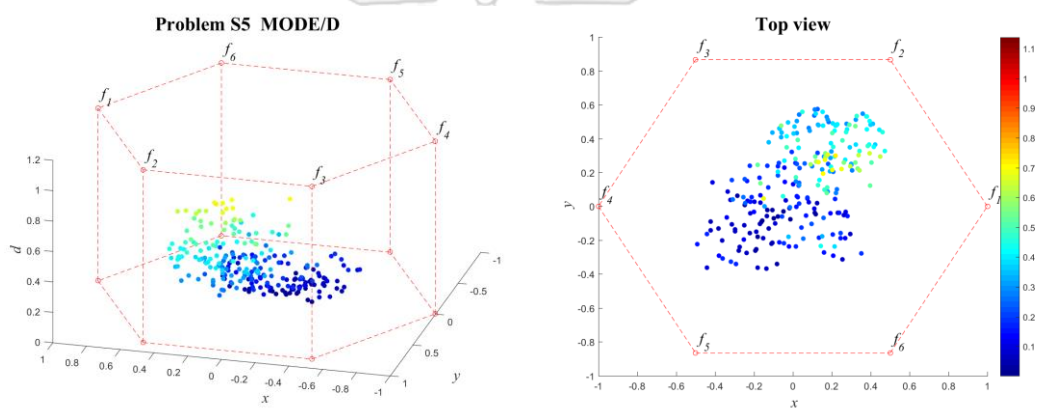
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-26 ถึง ข-30



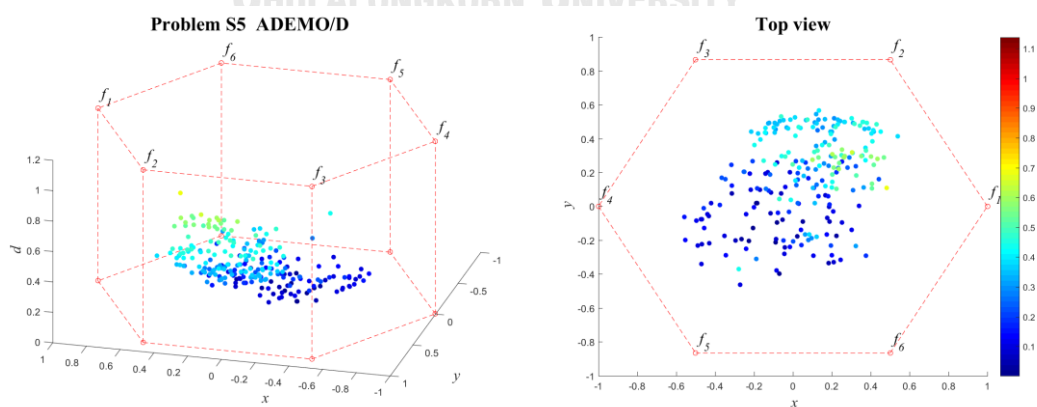
ภาพที่ ข-26 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา S5 (3D-RadVis)



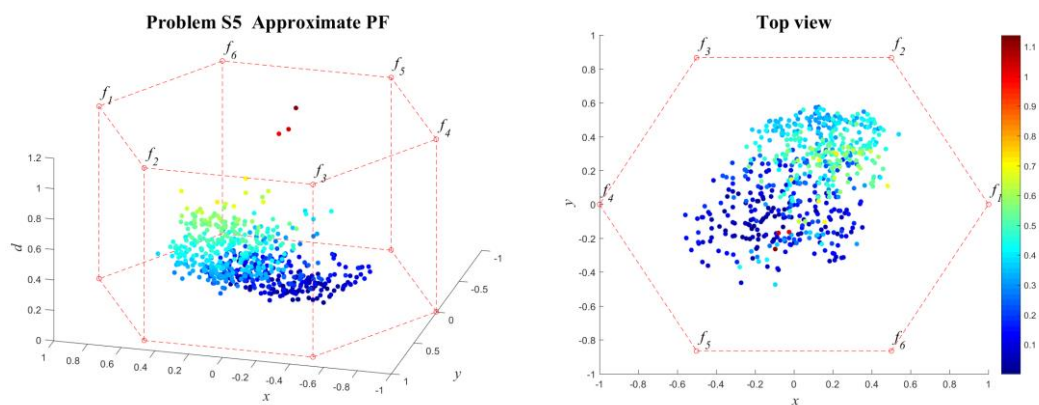
ภาพที่ ข-27 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา S5 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-28 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา S5 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-29 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา S5 (3D-RadVis)

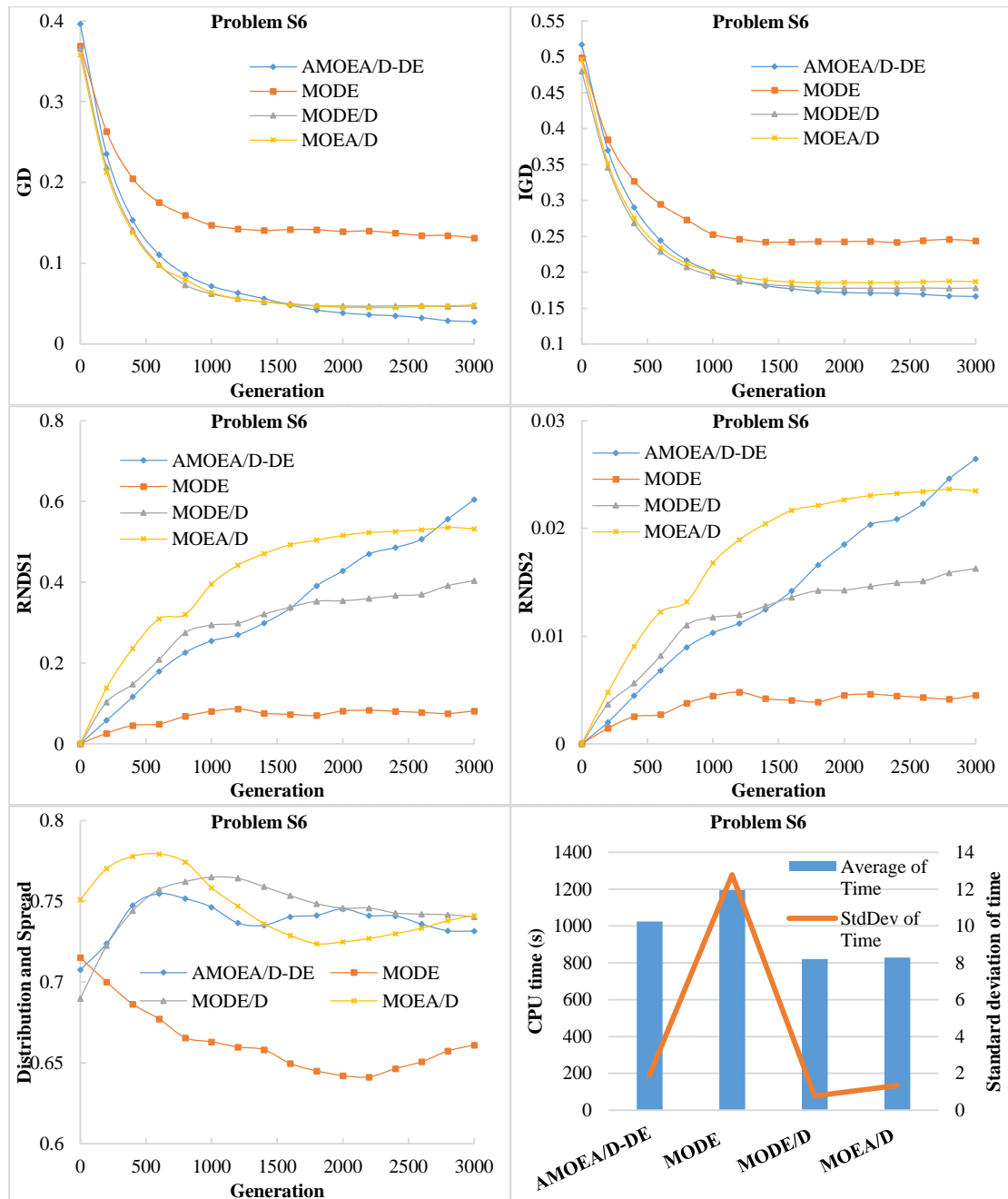


ภาพที่ ข-30 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา S5 (3D-RadVis)



6. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S6

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-31 และตารางที่ ข-6 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-31 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา S6

ตารางที่ ข-6 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา S6

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02661 (0.00991) ¹	0.12838 (0.01825) ²	0.04749 (0.00782) ¹	0.04967 (0.03587) ¹
IGD	0.16564 (0.00297) ¹	0.24176 (0.02214) ²	0.17840 (0.01184) ¹	0.18656 (0.00411) ¹
Distribution & Spread	0.73502 (0.02012) ²	0.66570 (0.01543) ¹	0.73696 (0.04007) ²	0.74610 (0.03432) ²
RNDS1	0.65246 (0.07492) ¹	0.08772 (0.04141) ²	0.41697 (0.05893) ¹	0.52874 (0.30154) ¹
RNDS2	0.02831 (0.00288) ¹	0.00486 (0.00229) ²	0.01665 (0.00288) ^{1,2}	0.02331 (0.01322) ¹
CPU time (s)	1023.698 (1.920) ²	1194.823 (12.790) ³	820.953 (0.778) ¹	828.281 (1.341) ¹

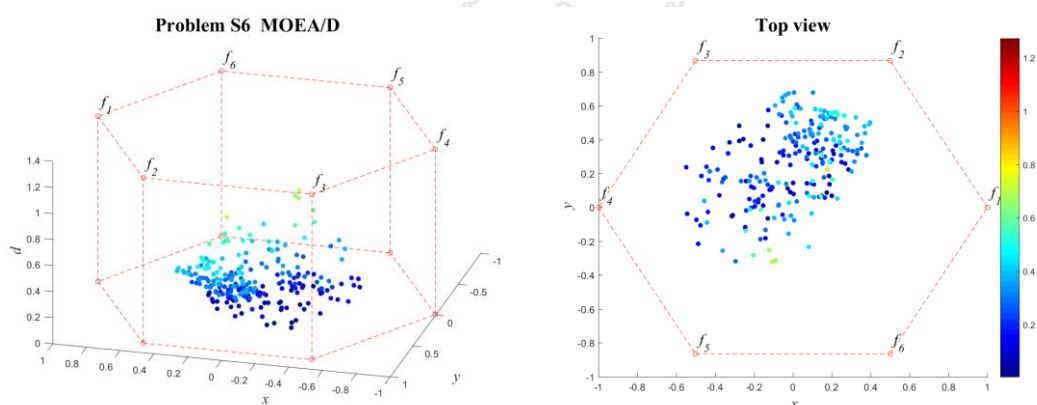
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-6 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ แต่ MODE จะดีกว่าด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจายมากกว่า สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread ส่วนด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งแตกต่างกับ MODE อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีสมรรถนะอัลกอริทึมในระดับที่ใกล้เคียงกันสำหรับปัญหานี้

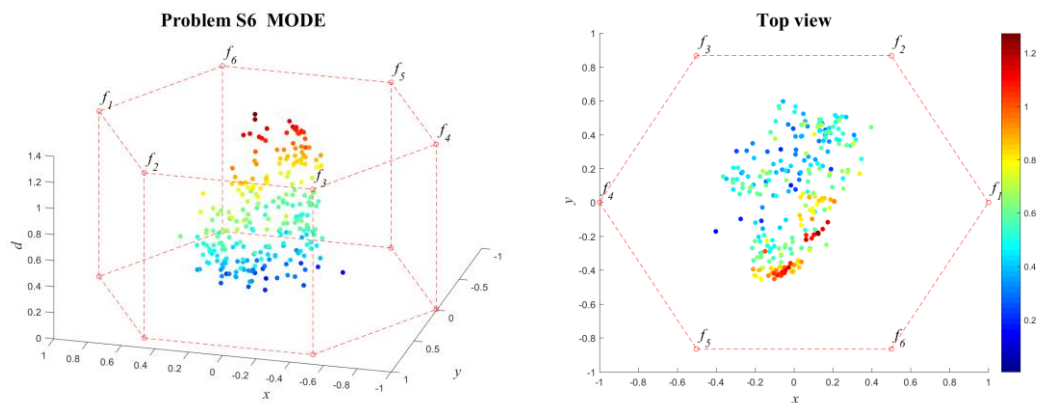
จากตารางที่ ข-6 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วน AMOEA/D-DE, MODE/D และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D และ MOEA/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

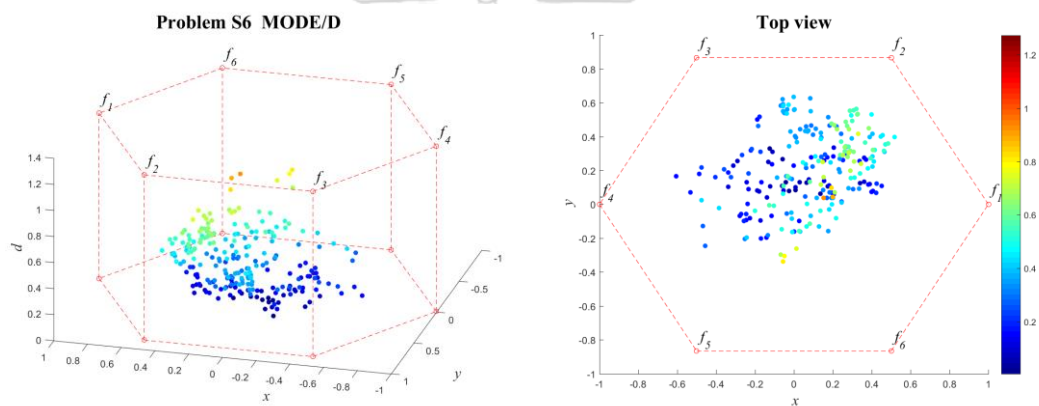
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-32 ถึง ข-36



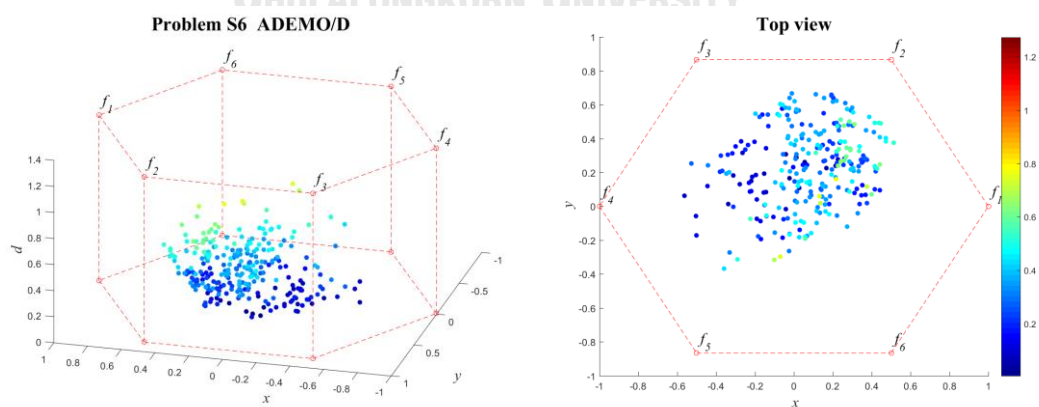
ภาพที่ ข-32 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา S6 (3D-RadVis)



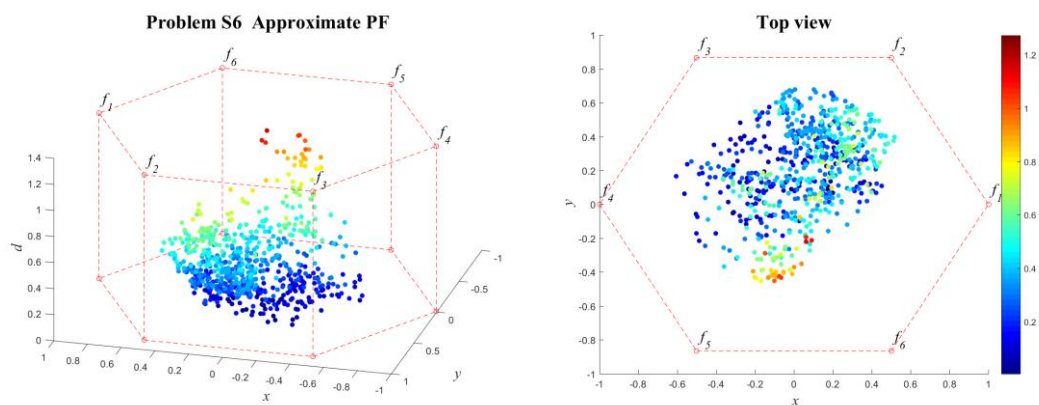
ภาพที่ ข-33 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา S6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-34 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา S6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-35 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา S6 (3D-RadVis)

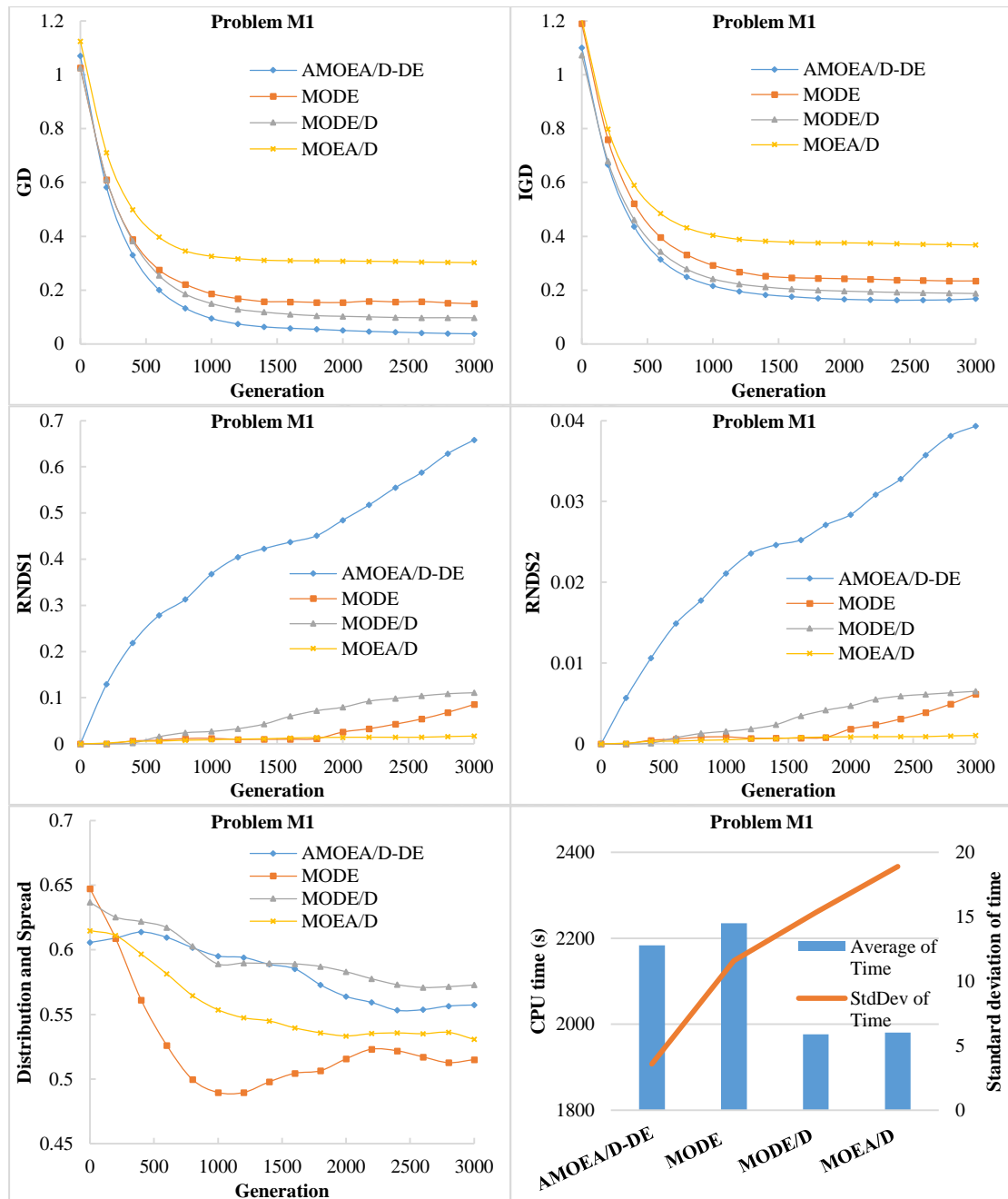


ภาพที่ ข-36 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา S6 (3D-RadVis)



7. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M1

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-37 และตารางที่ ข-7 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-37 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M1

ตารางที่ ข-7 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา M1

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.03680 (0.03770) ¹	0.14658 (0.02747) ¹	0.09713 (0.01578) ¹	0.30089 (0.11843) ²
IGD	0.17197 (0.02179) ¹	0.23448 (0.01611) ¹	0.18628 (0.01351) ¹	0.36643 (0.10888) ²
Distribution & Spread	0.55673 (0.03849) ¹	0.52667 (0.06003) ¹	0.57620 (0.02676) ¹	0.51326 (0.02814) ¹
RNDS1	0.68814 (0.28015) ¹	0.10276 (0.08451) ²	0.11287 (0.10682) ²	0.01786 (0.03093) ²
RNDS2	0.04051 (0.01535) ¹	0.00742 (0.00610) ²	0.00669 (0.00652) ²	0.00109 (0.00188) ²
CPU time (s)	2183.880 (3.580) ²	2235.260 (11.600) ³	1976.844 (15.330) ¹	1980.406 (18.900) ¹

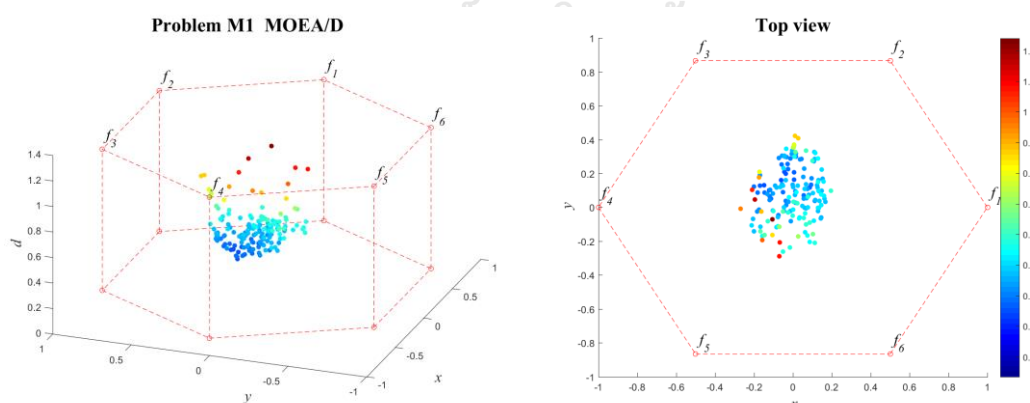
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-7 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MOEA/D โดย AMOEAD-DE มีการลู่เข้าเร็วที่สุด สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE และ MOEA/D ให้ค่าที่ดีกว่า สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งแตกต่างกับ MOEA/D, MODE และ MODE/D อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ ดังนั้น AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

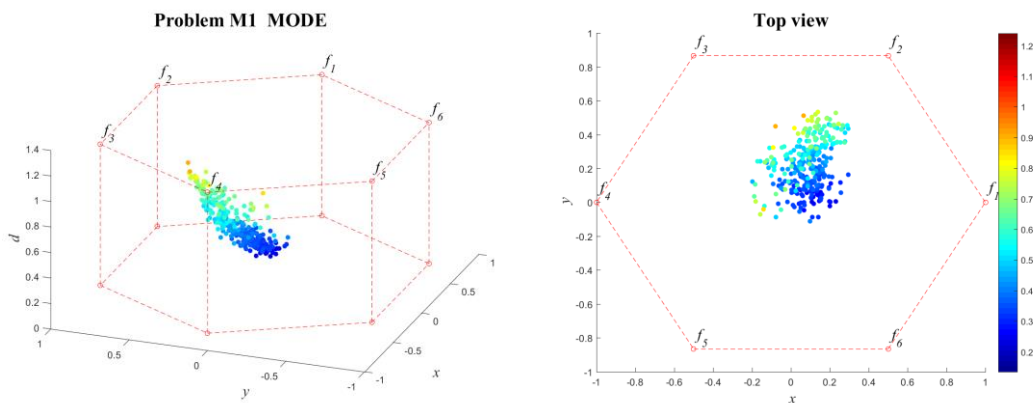
จากตารางที่ ข-7 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MODE และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MOEA/D มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D และ MOEA/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

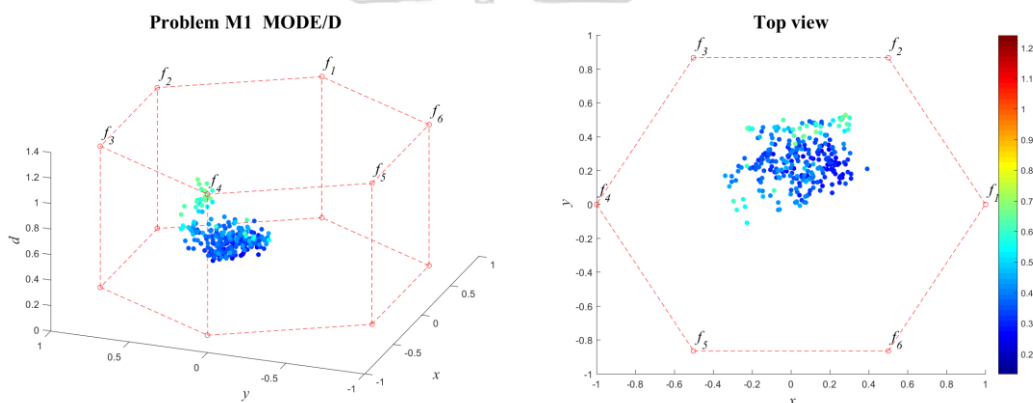
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-38 ถึง ข-42



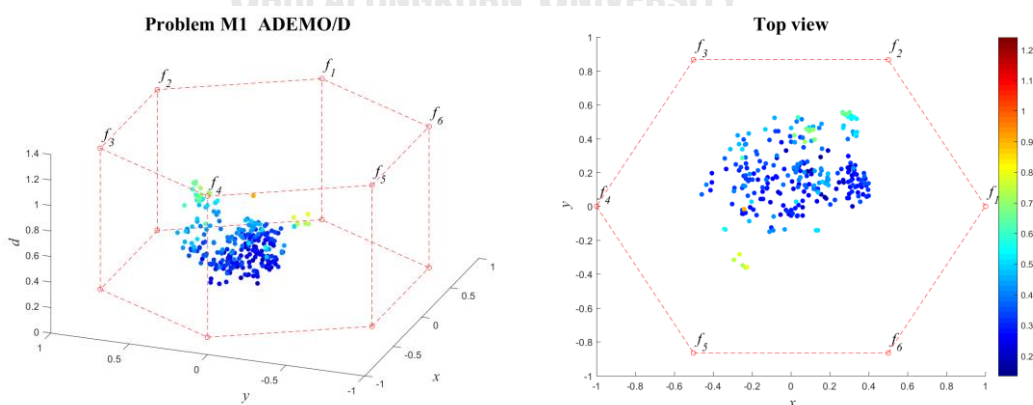
ภาพที่ ข-38 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา M1 (3D-RadVis)



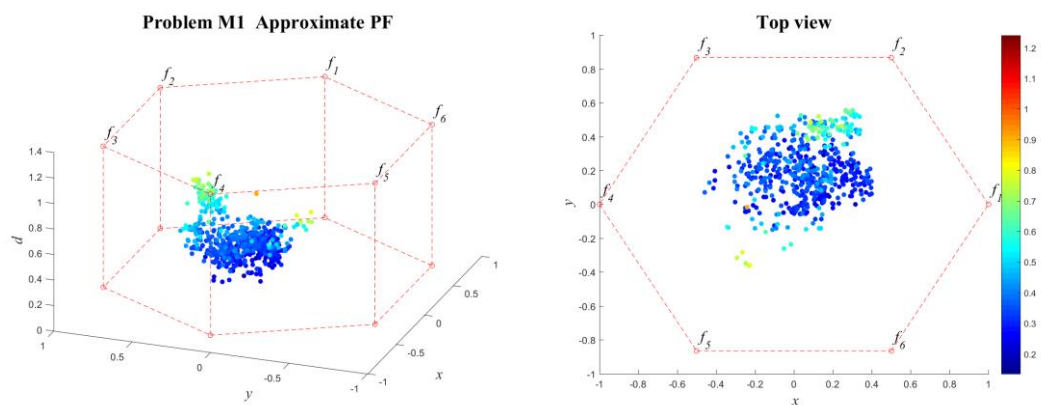
ภาพที่ ข-39 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา M1 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-40 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา M1 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-41 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAD-DE ปัญหา M1 (3D-RadVis)

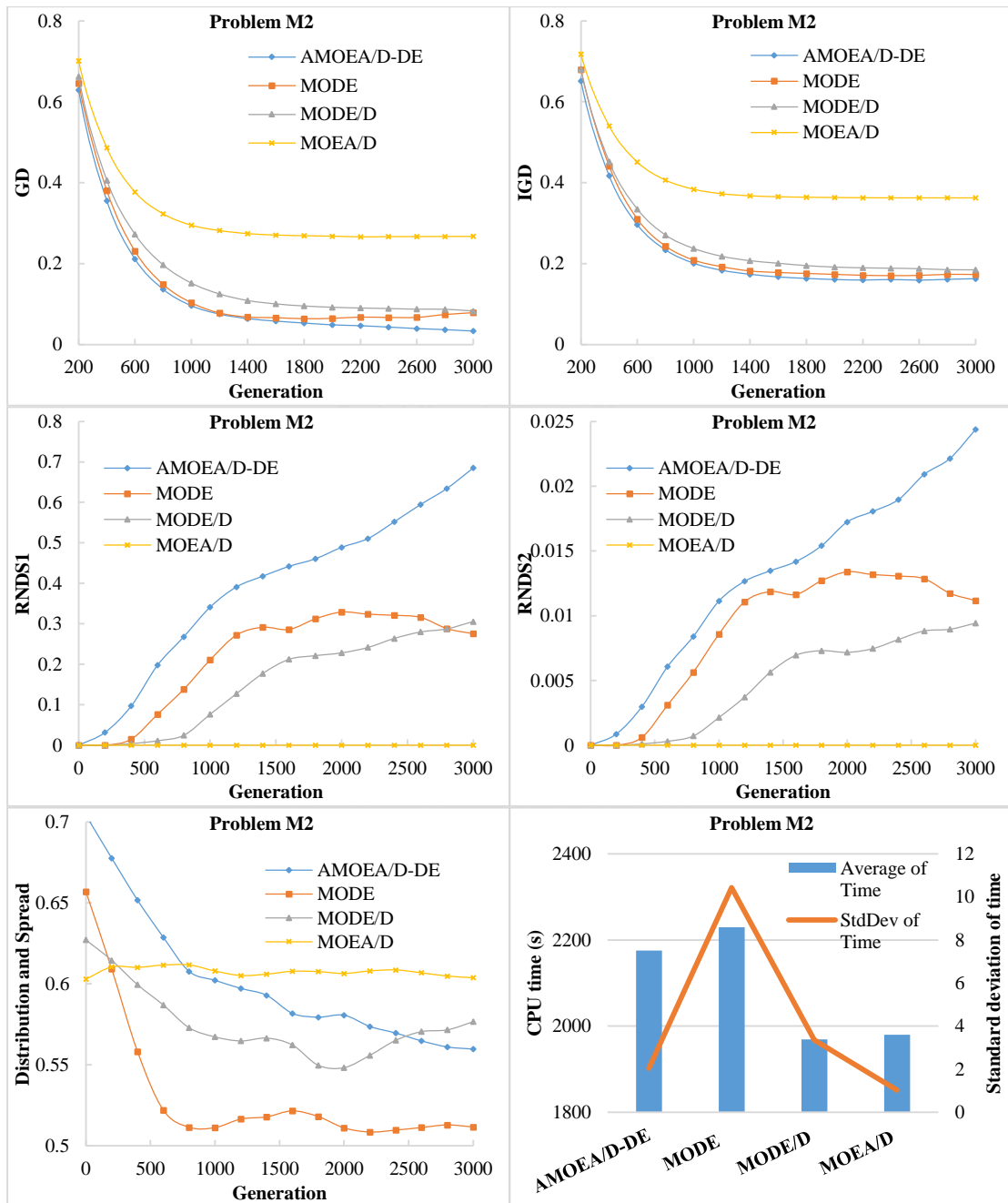


ภาพที่ ข-42 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา M1 (3D-RadVis)



8. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M2

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-43 และตารางที่ ข-8 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-43 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M2

ตารางที่ ข-8 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา M2

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.03029 (0.04133) ¹	0.08367 (0.02461) ¹	0.07881 (0.02425) ¹	0.26776 (0.03469) ²
IGD	0.16454 (0.01776) ¹	0.17313 (0.01115) ¹	0.18461 (0.01360) ¹	0.36259 (0.03068) ²
Distribution & Spread	0.55948 (0.02751) ¹	0.50623 (0.03098) ¹	0.59071 (0.08640) ¹	0.60277 (0.04044) ¹
RNDS1	0.73556 (0.31249) ¹	0.26267 (0.03431) ²	0.32376 (0.23520) ²	0.00000 (0.00000) ²
RNDS2	0.02662 (0.01191) ¹	0.01061 (0.00138) ²	0.00989 (0.00699) ²	0.00000 (0.00000) ²
CPU time (s)	2175.396 (2.040) ³	2229.609 (10.430) ⁴	1968.979 (3.360) ¹	1979.708 (1.030) ²

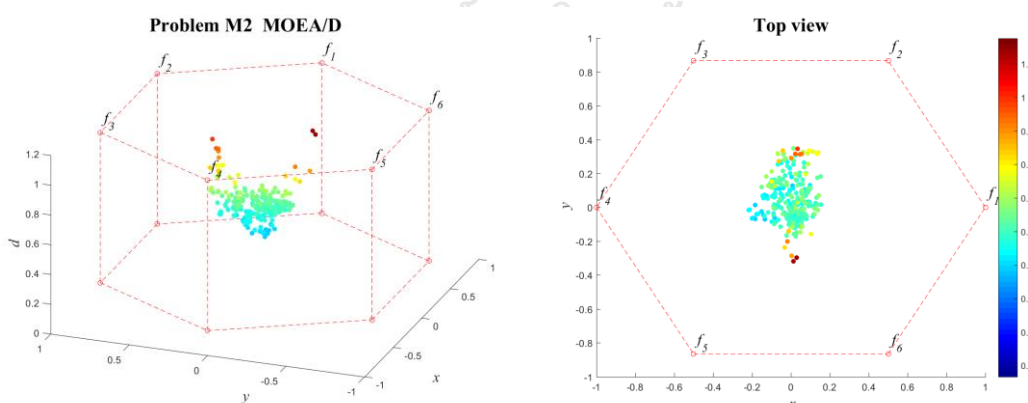
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-8 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MOEA/D สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่า สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

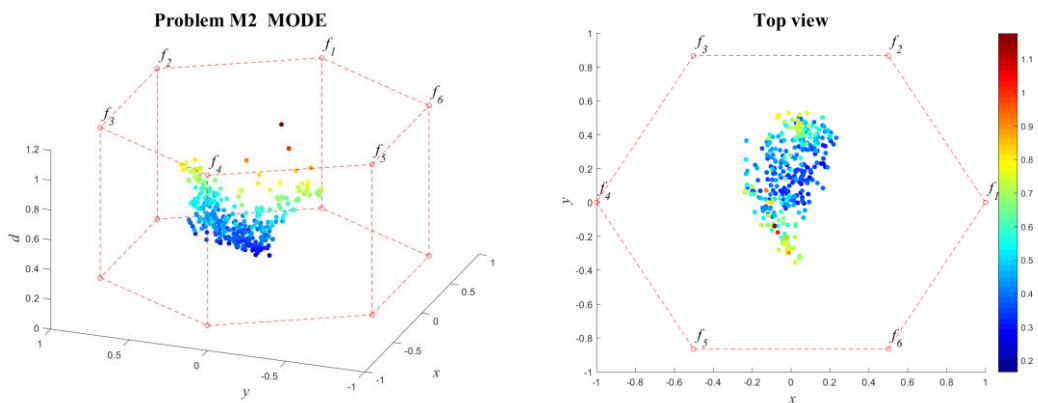
จากตารางที่ ข-8 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MODE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

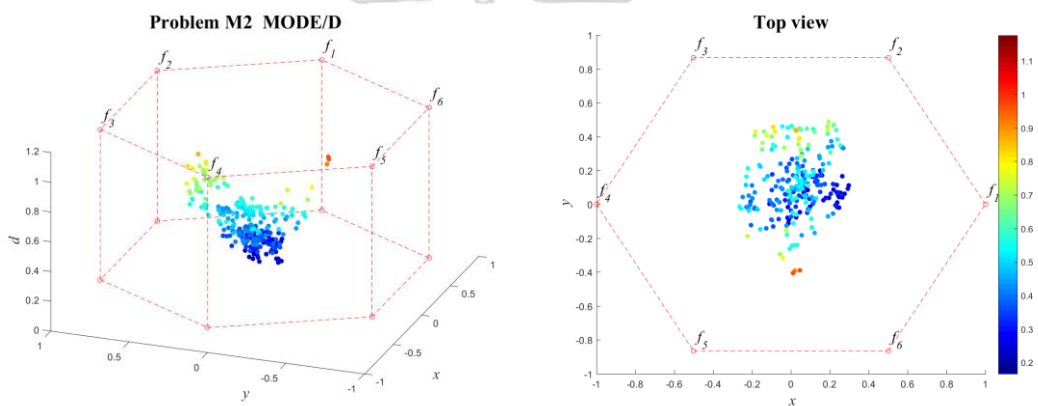
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-44 ถึง ข-48



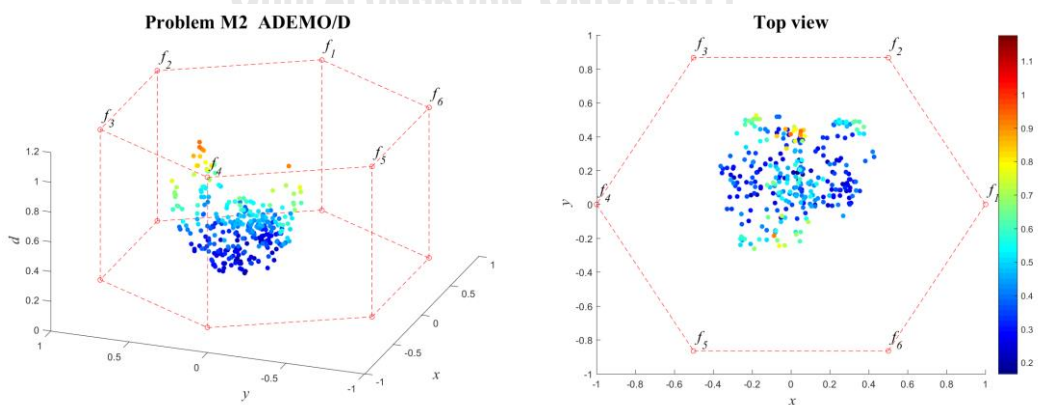
ภาพที่ ข-44 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา M2 (3D-RadVis)



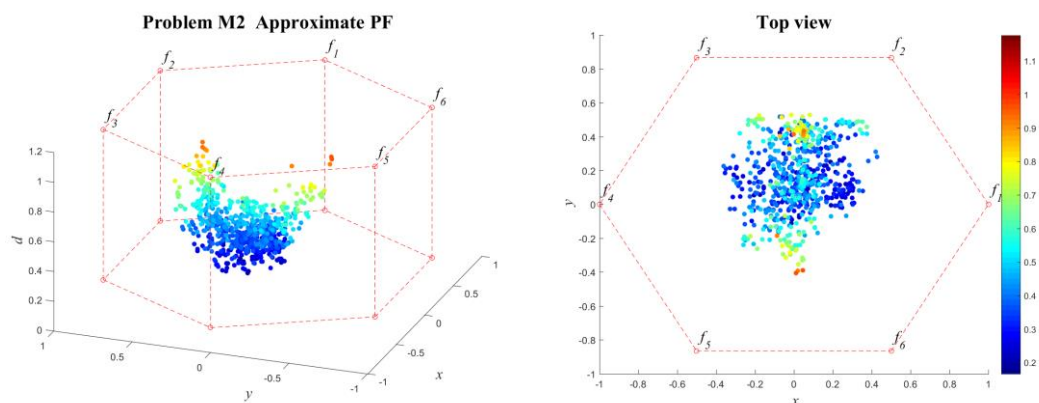
ภาพที่ ข-45 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา M2 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-46 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา M2 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-47 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAD-DE ปัญหา M2 (3D-RadVis)

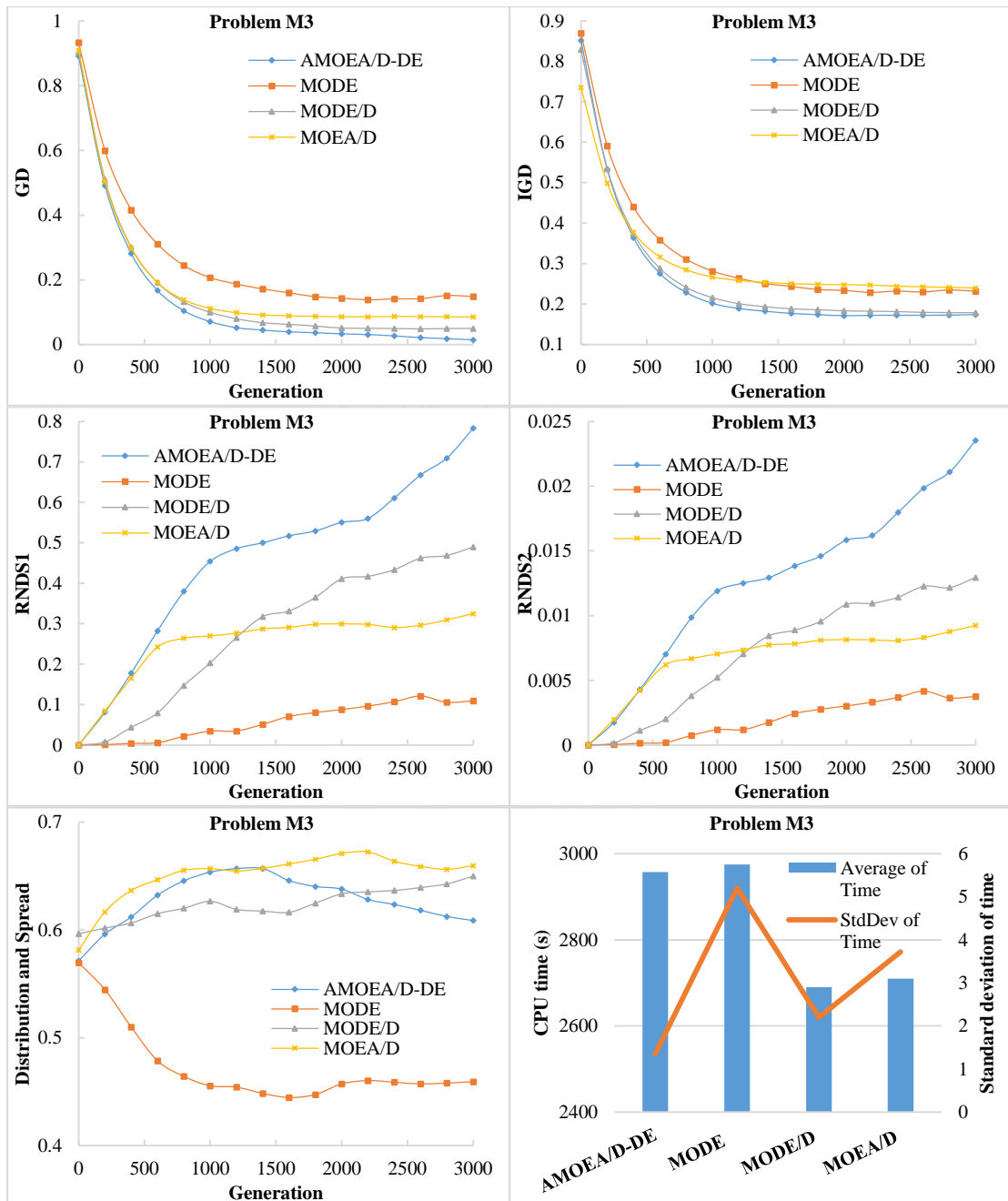


ภาพที่ ข-48 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา M2 (3D-RadVis)



9. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M3

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-49 และตารางที่ ข-9 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-49 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M3

ตารางที่ ข-9 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา M3

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01102 (0.00464)¹	0.14597 (0.02423) ²	0.05041 (0.01401)¹	0.08498 (0.07482)^{1,2}
IGD	0.17546 (0.01071)¹	0.22909 (0.01085) ²	0.17855 (0.00328)¹	0.23858 (0.00809) ²
Distribution & Spread	0.60316 (0.03386) ²	0.46216 (0.02269)¹	0.66784 (0.04438) ³	0.67239 (0.02476) ³
RNDS1	0.85633 (0.05375)¹	0.11278 (0.06154) ³	0.51063 (0.06957) ²	0.34079 (0.30333) ^{2,3}
RNDS2	0.02595 (0.00079)¹	0.00388 (0.00212) ³	0.01371 (0.00298) ²	0.00974 (0.00895) ^{2,3}
CPU time (s)	2957.151 (1.360) ³	2974.865 (5.200) ⁴	2690.026 (2.200)¹	2709.646 (3.720) ²

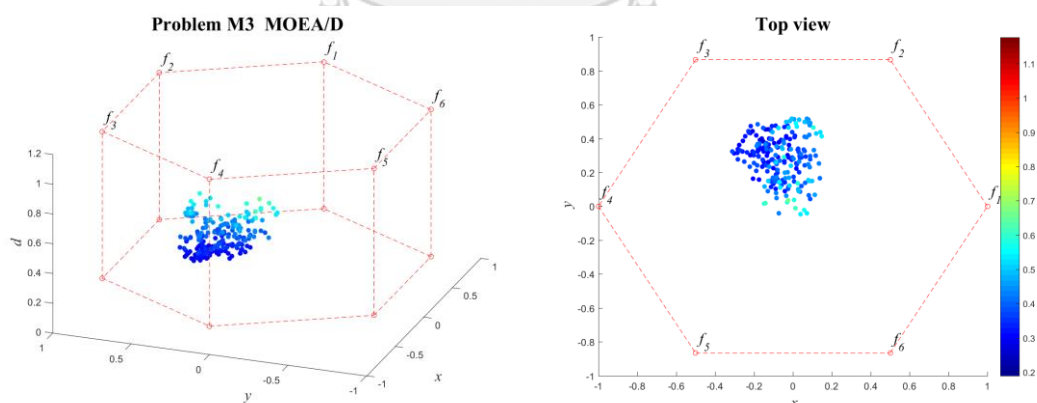
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-9 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบที่เร็วกว่า MODE อย่างชัดเจน และ AMOEAD-DE และ MODE/D มีความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

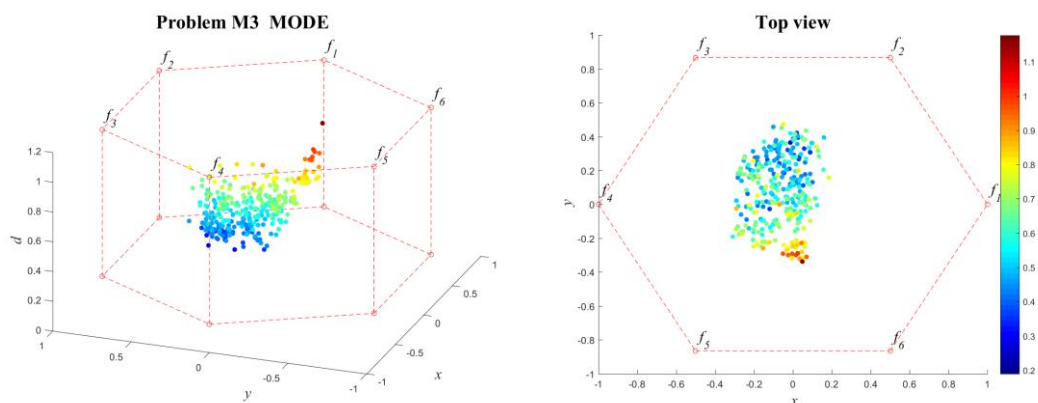
จากตารางที่ ข-9 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดทั้ง RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านในนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ ส่วน AMOEAD-DE, MODE/D และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันตามหลักสถิติ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEAD-DE และ MODE ตามลำดับ

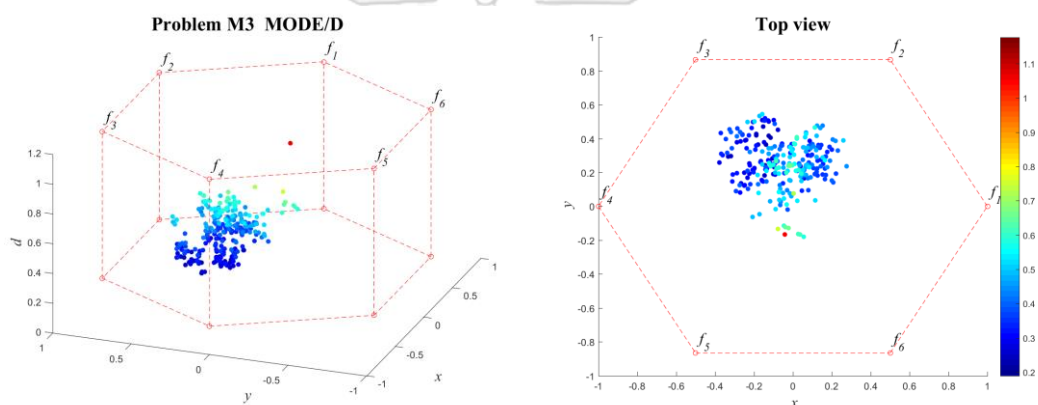
แสดงภาพคำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-50 ถึง ข-54



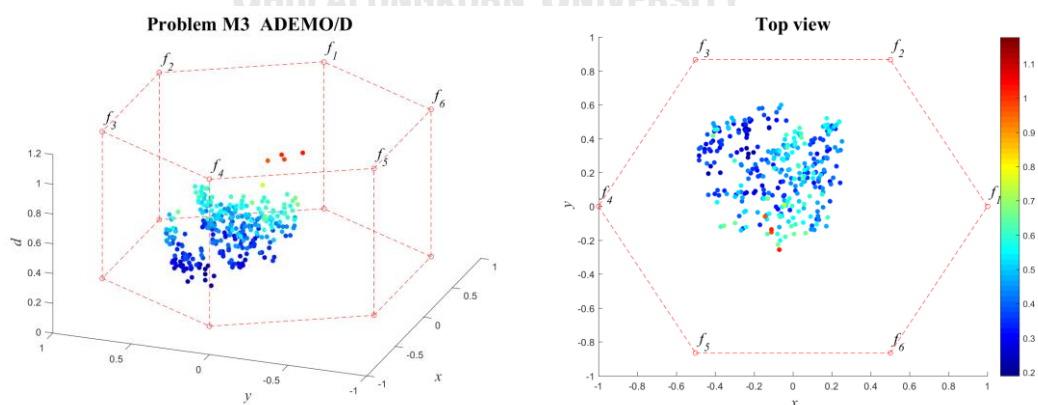
ภาพที่ ข-50 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา M3 (3D-RadVis)



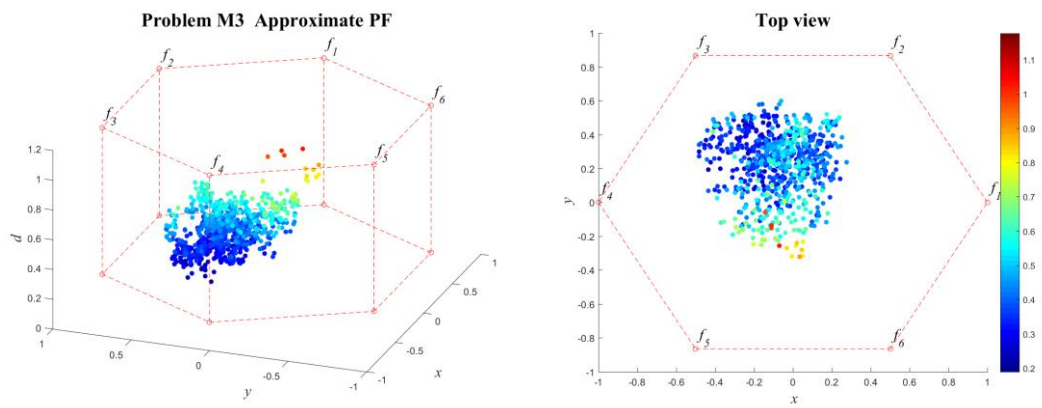
ภาพที่ ข-51 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา M3 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-52 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา M3 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-53 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAD-DE ปัญหา M3 (3D-RadVis)

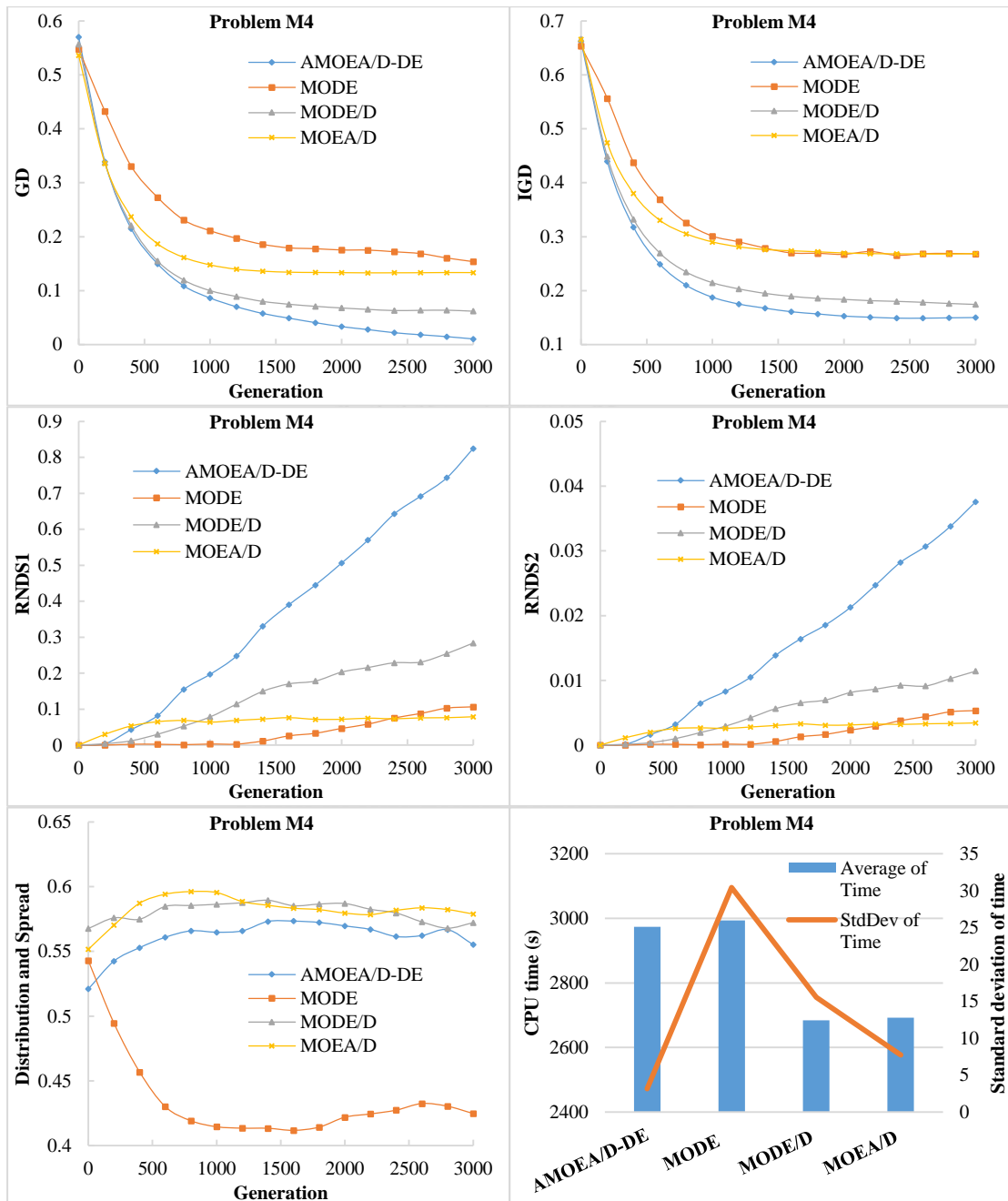


ภาพที่ ข-54 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา M3 (3D-RadVis)



10. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M4

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-55 และตารางที่ ข-10 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-55 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M4

ตารางที่ ข-10 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา M4

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.00634 (0.00307) ¹	0.14711 (0.04781) ³	0.06012 (0.04003) ^{1,2}	0.13339 (0.05884) ^{2,3}
IGD	0.15073 (0.00489) ¹	0.26740 (0.07973) ²	0.17273 (0.00711) ¹	0.26963 (0.03179) ²
Distribution & Spread	0.51583 (0.02661) ²	0.41001 (0.05805) ¹	0.58968 (0.01647) ³	0.56991 (0.02360) ^{2,3}
RNDS1	0.90591 (0.05357) ¹	0.11028 (0.02641) ²	0.31308 (0.33696) ²	0.08138 (0.07076) ²
RNDS2	0.04131 (0.00314) ¹	0.00552 (0.00132) ²	0.01255 (0.01379) ²	0.00352 (0.00304) ²
CPU time (s)	2974.047 (3.170) ²	2993.063 (30.400) ²	2684.438 (15.570) ¹	2692.375 (7.730) ¹

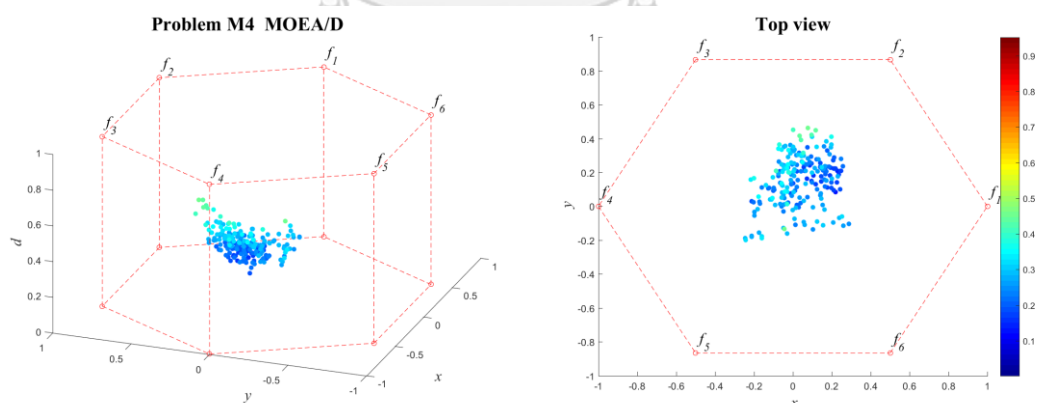
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-10 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบที่เร็วที่สุดและมีความหลากหลายในเรื่องของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีที่สุด รองลงมาคือ MODE/D, MOEA/D และ MODE ตามลำดับ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

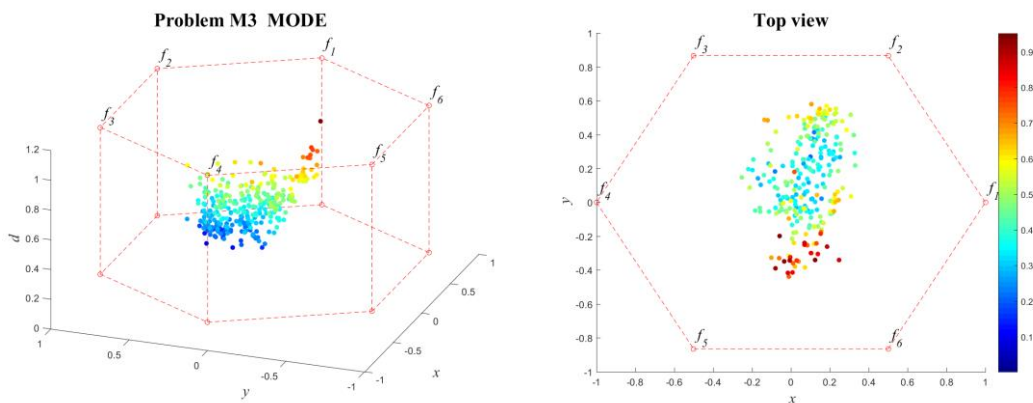
จากตารางที่ ข-10 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด รองลงมาคือ MODE/D, MODE และ MOEA/D ตามลำดับ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านในนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEA/D-DE, MOEA/D และ MODE/D ตามลำดับ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D และ MOEA/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEA/D-DE และ MODE ตามลำดับ

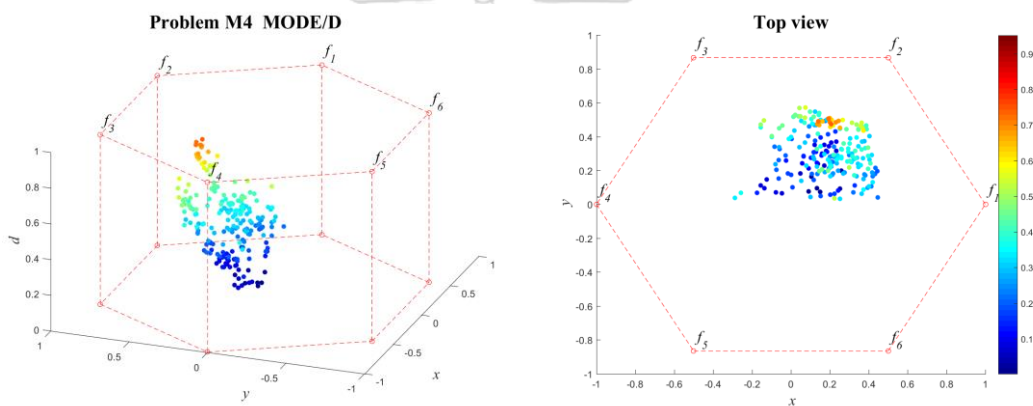
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-56 ถึง ข-60



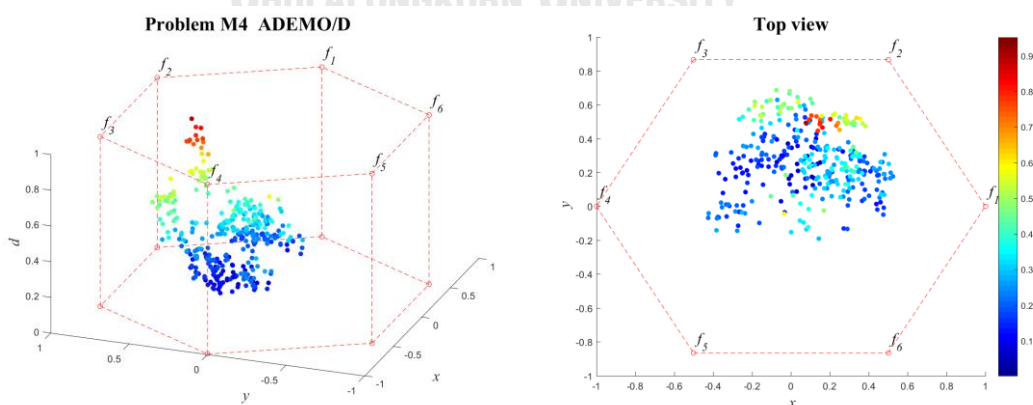
ภาพที่ ข-56 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา M4 (3D-RadVis)



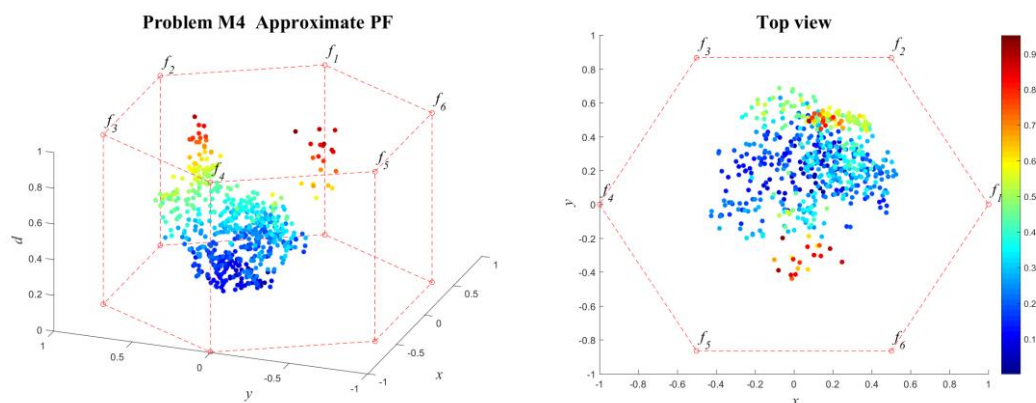
ภาพที่ ข-57 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา M4 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-58 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา M4 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-59 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา M4 (3D-RadVis)

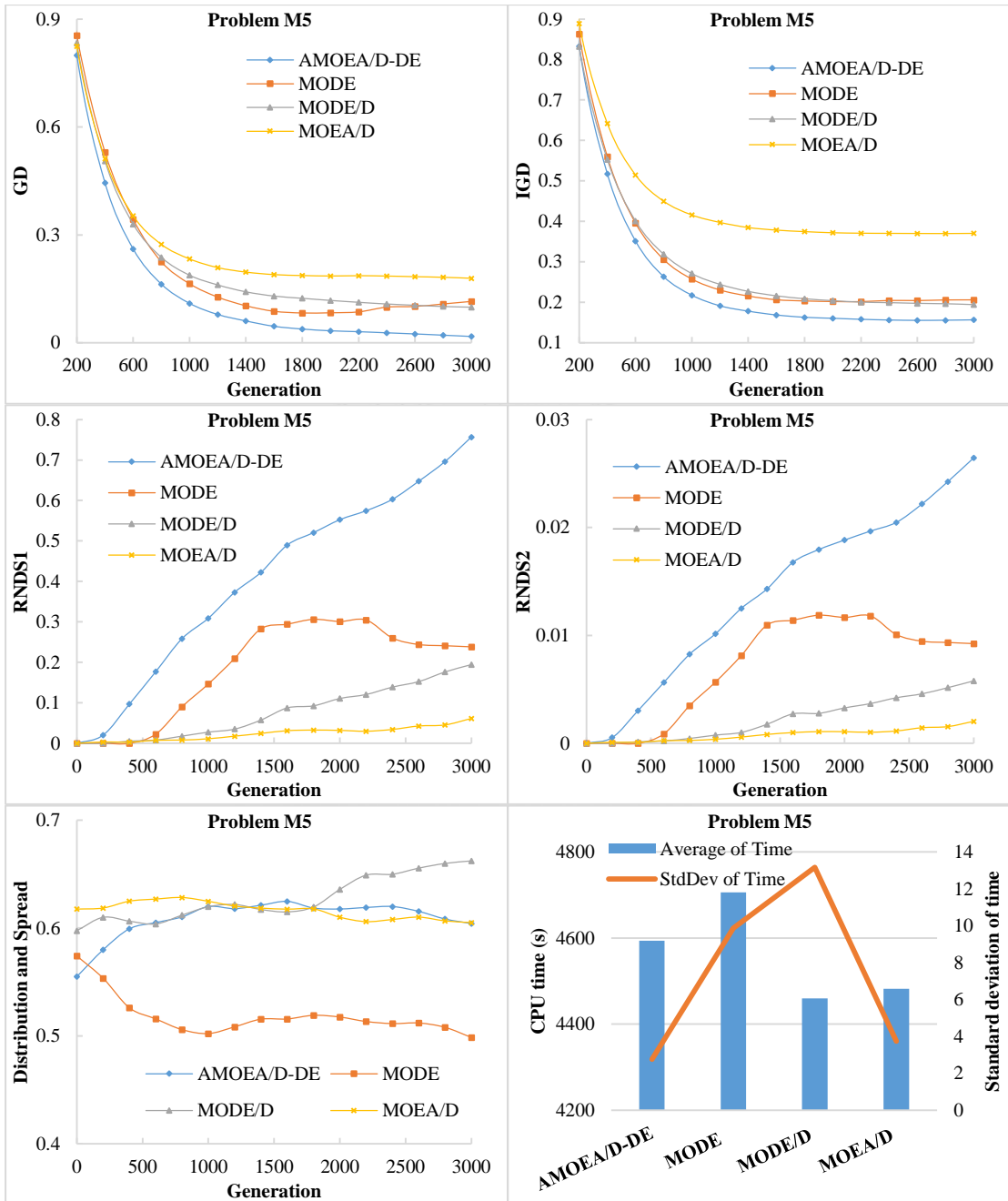


ภาพที่ ข-60 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา M4 (3D-RadVis)



11. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M5

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-61 และตารางที่ ข-11 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-61 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M5

ตารางที่ ข-11 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา M5

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01409 (0.00757) ¹	0.12226 (0.06888) ²	0.09697 (0.02797) ^{1,2}	0.17667 (0.08044) ²
IGD	0.15768 (0.00617) ¹	0.20637 (0.02508) ¹	0.19229 (0.01221) ¹	0.37083 (0.12720) ²
Distribution & Spread	0.59849 (0.03981) ²	0.47445 (0.03749) ¹	0.66484 (0.05680) ²	0.60362 (0.04192) ²
RNDS1	0.81744 (0.07838) ¹	0.23559 (0.17348) ²	0.21260 (0.14747) ²	0.07738 (0.13403) ²
RNDS2	0.02865 (0.00292) ¹	0.00913 (0.00672) ²	0.00641 (0.00413) ²	0.00253 (0.00437) ²
CPU time (s)	4593.422 (2.760) ³	4705.698 (9.860) ⁴	4460.036 (13.160) ¹	4482.406 (3.740) ²

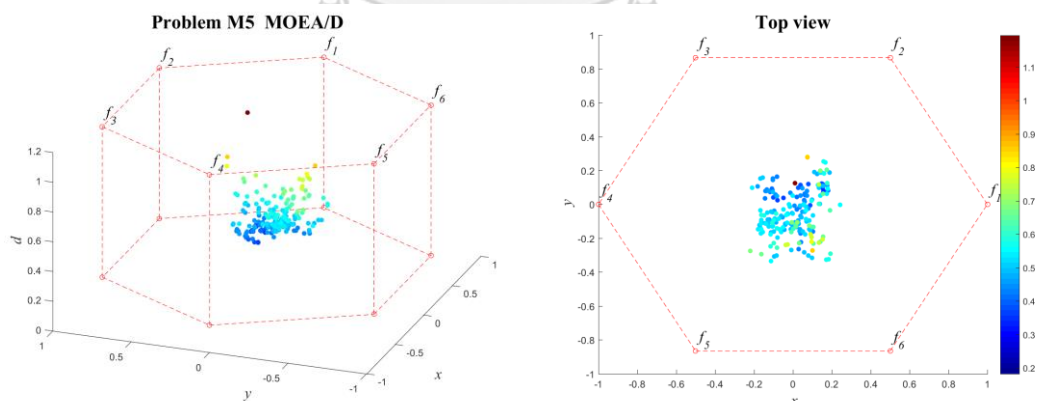
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-11 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MOEA/D อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

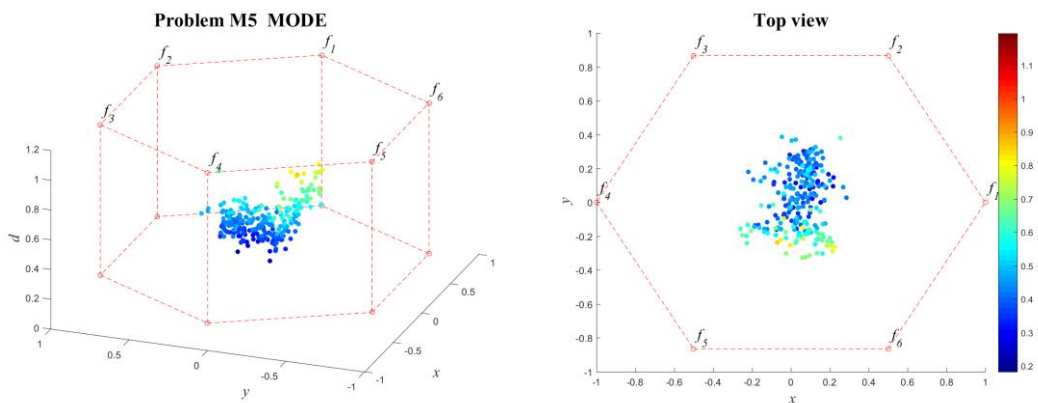
จากตารางที่ ข-11 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด ส่วน MODE/D, MODE และ MOEA/D ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีสมรรถนะด้านในนี้ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEAD-DE และ MODE/D ตามลำดับ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D ใช้เวลาในการดำเนินงานเฉลี่ยน้อยที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D, AMOEAD-DE และ MODE ตามลำดับ

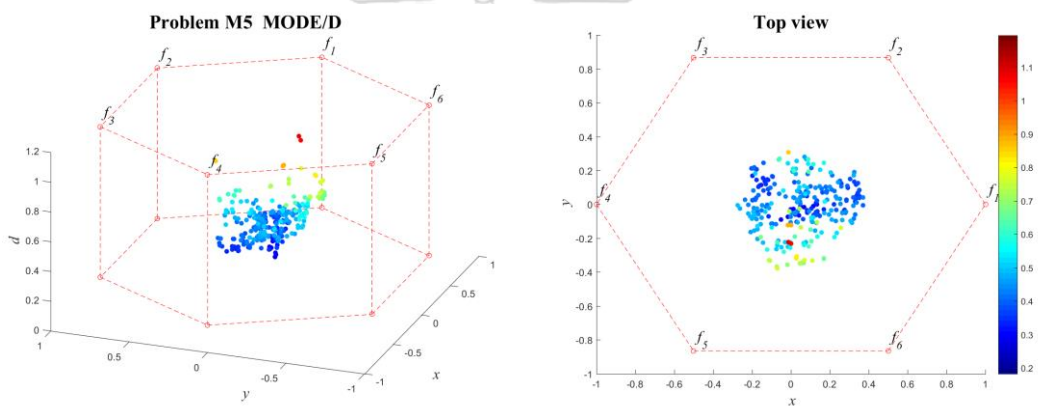
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-62 ถึง ข-66



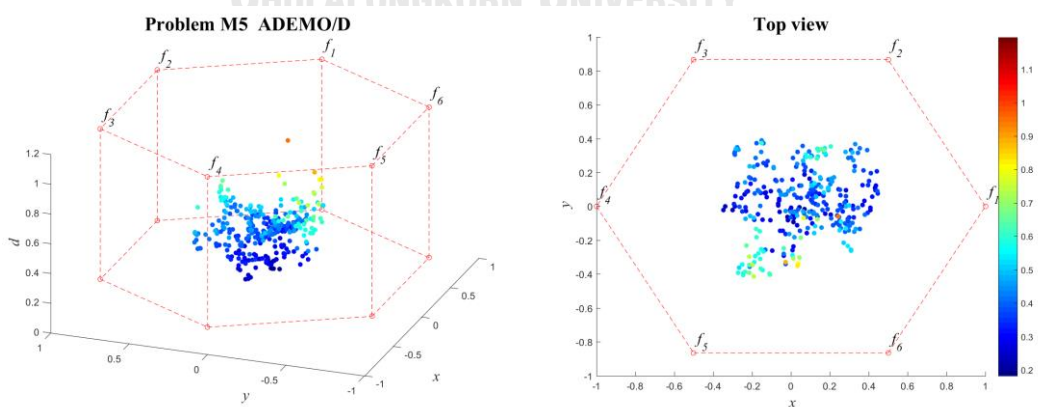
ภาพที่ ข-62 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา M5 (3D-RadVis)



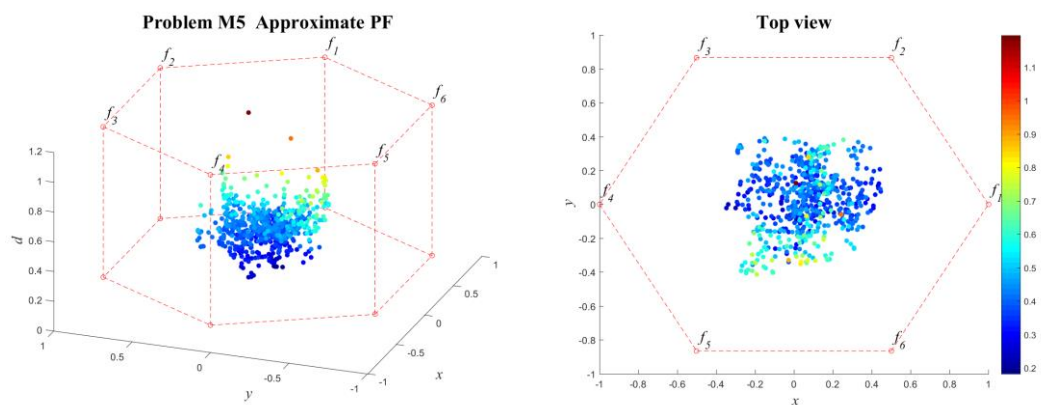
ภาพที่ ข-63 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา M5 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-64 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา M5 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-65 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAD-DE ปัญหา M5 (3D-RadVis)

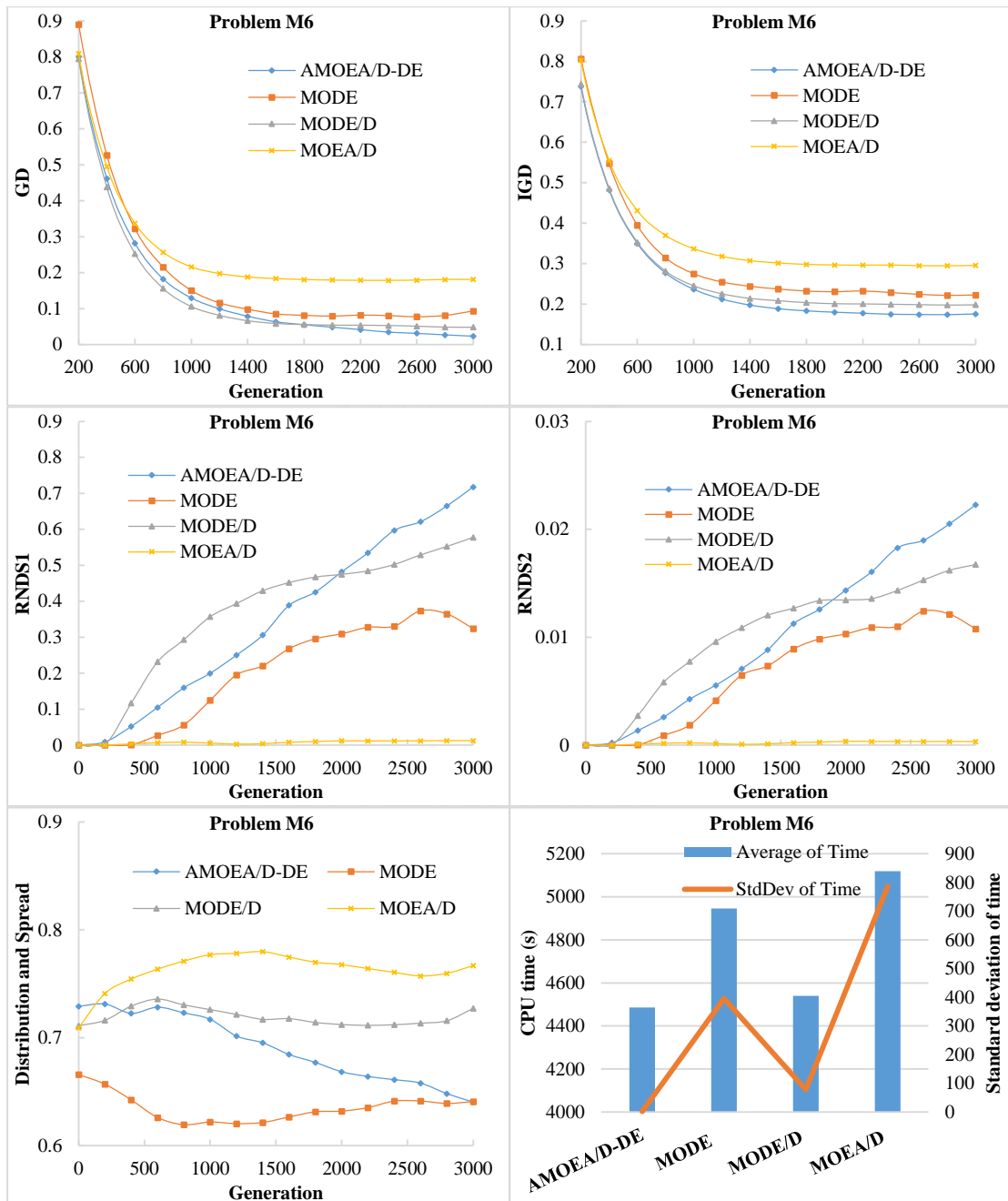


ภาพที่ ข-66 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา M5 (3D-RadVis)



12. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M6

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-67 และตารางที่ ข-12 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-67 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา M6

ตารางที่ ข-12 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา M6

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01984 (0.01199) ¹	0.10605 (0.07665) ^{1,2}	0.04804 (0.04912) ¹	0.18197 (0.03238) ²
IGD	0.17772 (0.00384) ¹	0.22381 (0.01387) ²	0.19898 (0.01291) ^{1,2}	0.29684 (0.02512) ³
Distribution & Spread	0.62669 (0.06426) ¹	0.64794 (0.02016) ¹	0.75930 (0.03614) ²	0.78553 (0.03924) ²
RNDS1	0.77084 (0.10773) ¹	0.28321 (0.19174) ^{2,3}	0.60301 (0.30513) ^{1,2}	0.01212 (0.02099) ³
RNDS2	0.02402 (0.00308) ¹	0.00943 (0.00638) ^{2,3}	0.01727 (0.00880) ^{1,2}	0.00033 (0.00058) ³
CPU time (s)	4485.661 (2.300) ¹	4945.760 (396.000) ¹	4540.109 (78.400) ¹	5119.307 (785.000) ¹

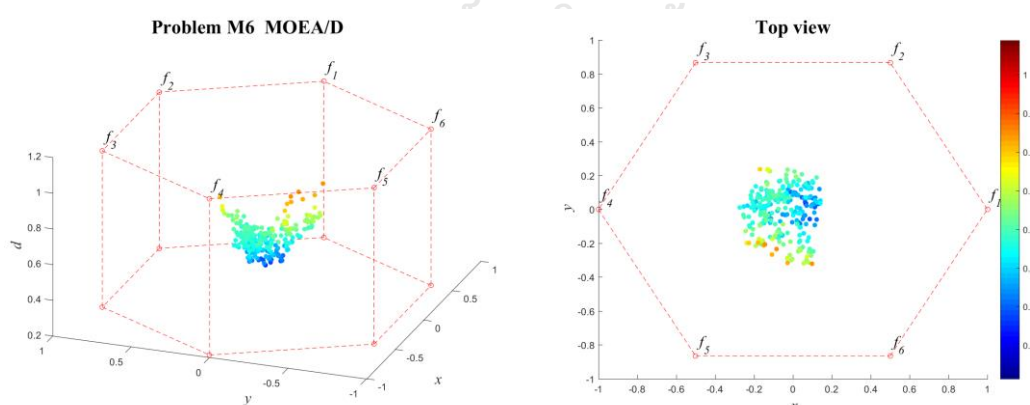
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-12 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงดีกว่า MOEA/D อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

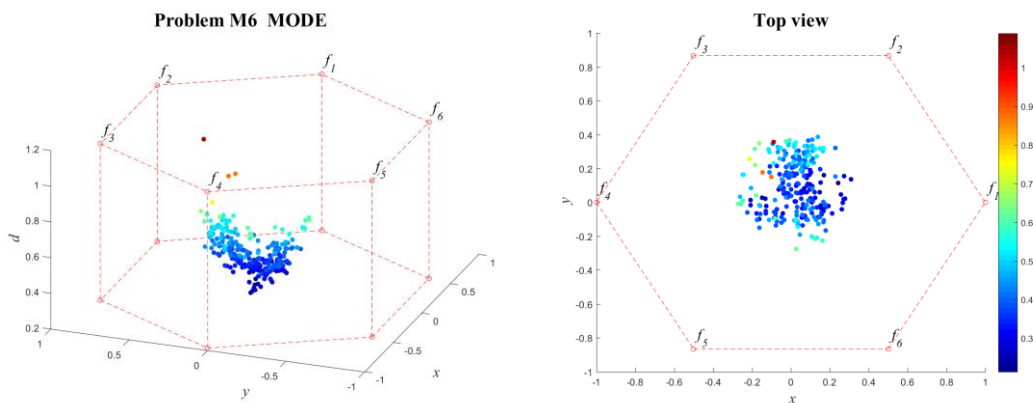
จากตารางที่ ข-12 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ที่ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE/D, MODE และ MOEA/D
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D และ MODE/D ตามลำดับ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย Distribution and Spread ที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

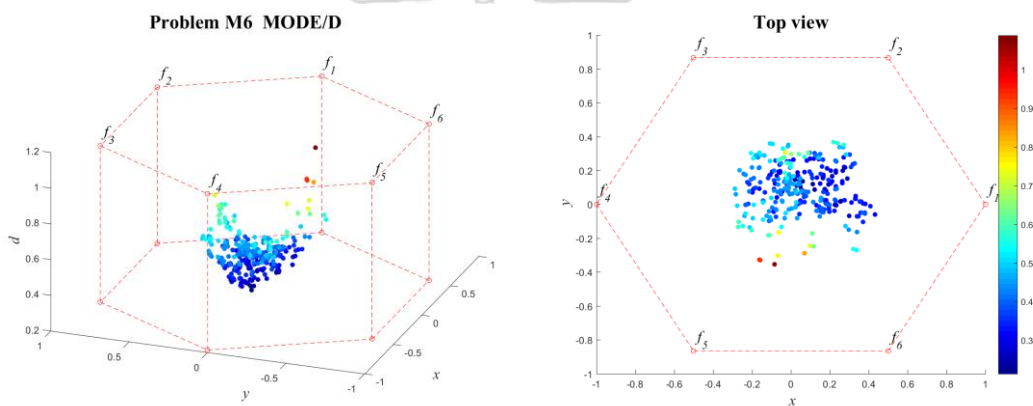
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาคำจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-68 ถึง ข-72



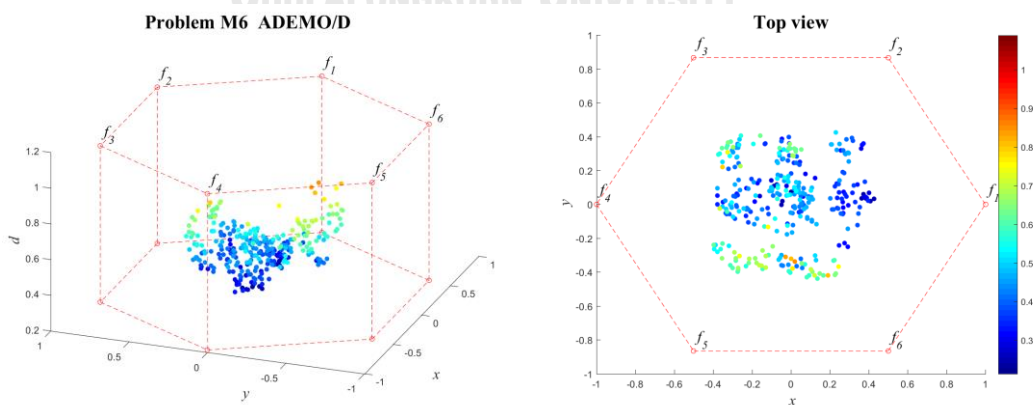
ภาพที่ ข-68 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา M6 (3D-RadVis)



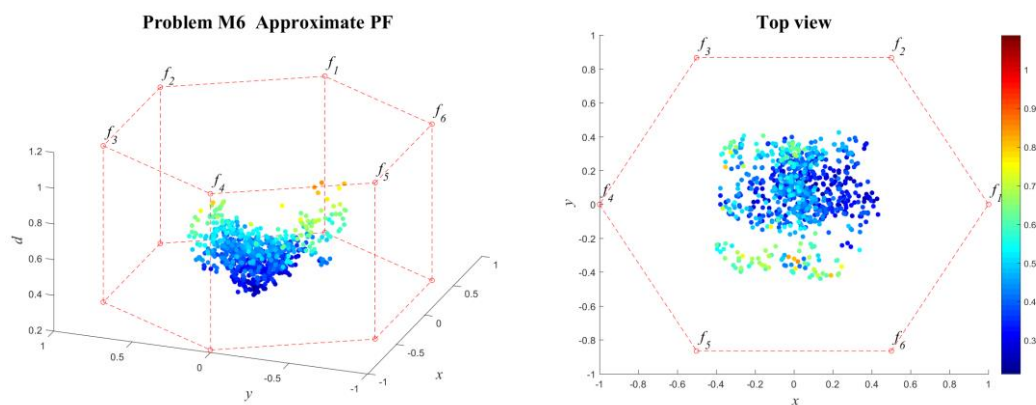
ภาพที่ ข-69 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา M6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-70 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา M6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-71 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา M6 (3D-RadVis)

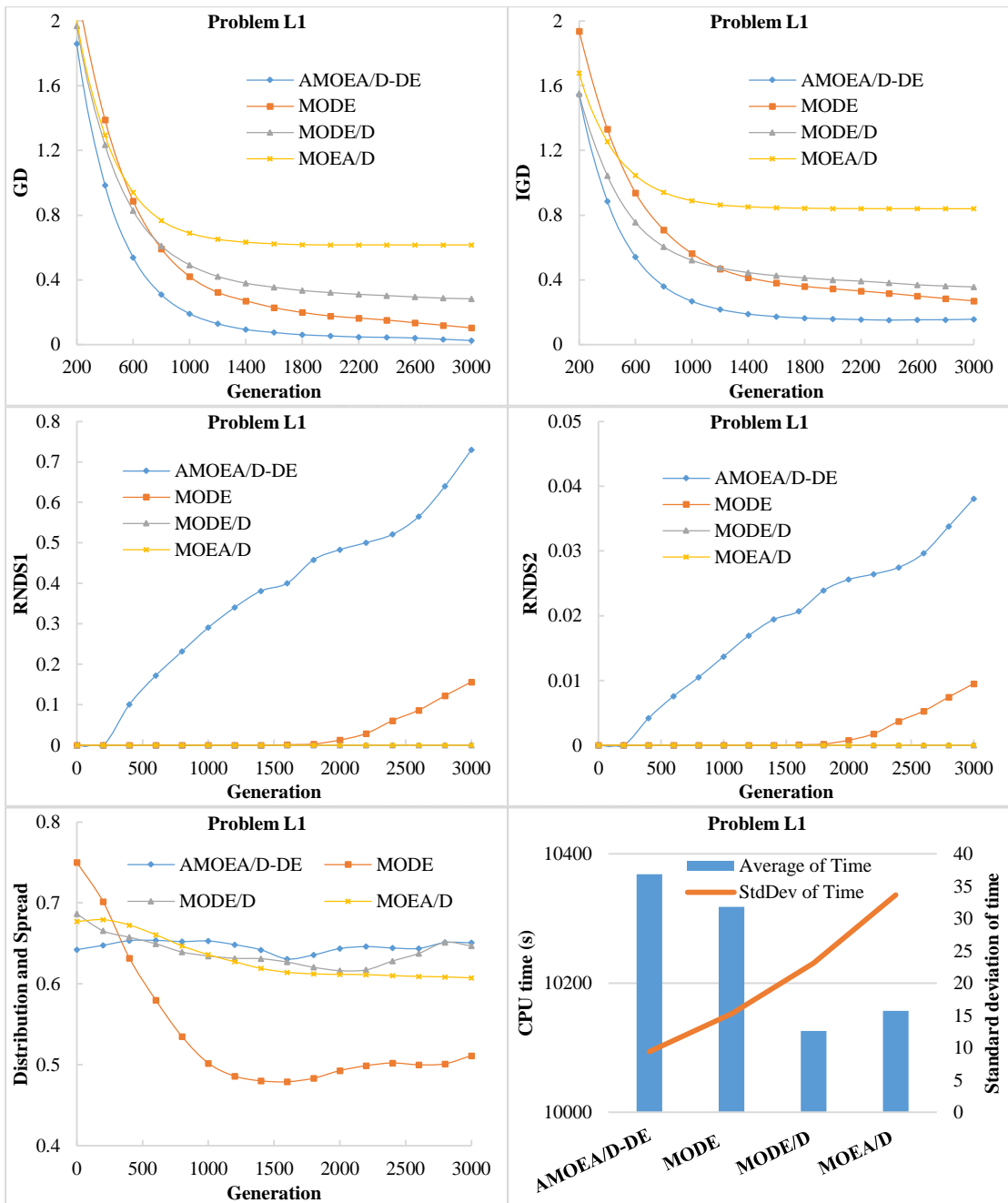


ภาพที่ ข-72 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา M6 (3D-RadVis)



13. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L1

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-73 และตารางที่ ข-13 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-73 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L1

ตารางที่ ข-13 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา L1

Metrics	AMOEAD/DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01776 (0.00776) ¹	0.08782 (0.03761) ¹	0.27944 (0.09747) ²	0.61595 (0.08449) ³
IGD	0.16120 (0.02019) ¹	0.25581 (0.00966) ¹	0.35128 (0.12506) ¹	0.83969 (0.20840) ²
Distribution & Spread	0.64264 (0.05620) ¹	0.54066 (0.00984) ¹	0.61984 (0.07525) ¹	0.60439 (0.07104) ¹
RNDS1	0.81976 (0.06951) ¹	0.19048 (0.16513) ²	0.00000 (0.00000) ³	0.00000 (0.00000) ³
RNDS2	0.04235 (0.00709) ¹	0.01158 (0.01004) ²	0.00000 (0.00000) ³	0.00000 (0.00000) ³
CPU time (s)	10368.531 (9.400) ³	10318.026 (15.200) ²	10125.703 (23.100) ¹	10157.042 (33.700) ¹

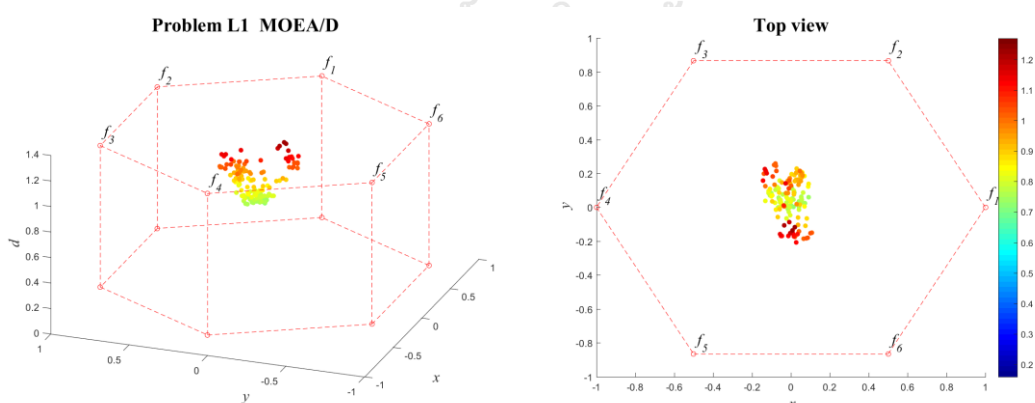
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-13 จะเห็นได้ว่า AMOEAD/DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD/DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ โดยสรุป AMOEAD/DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

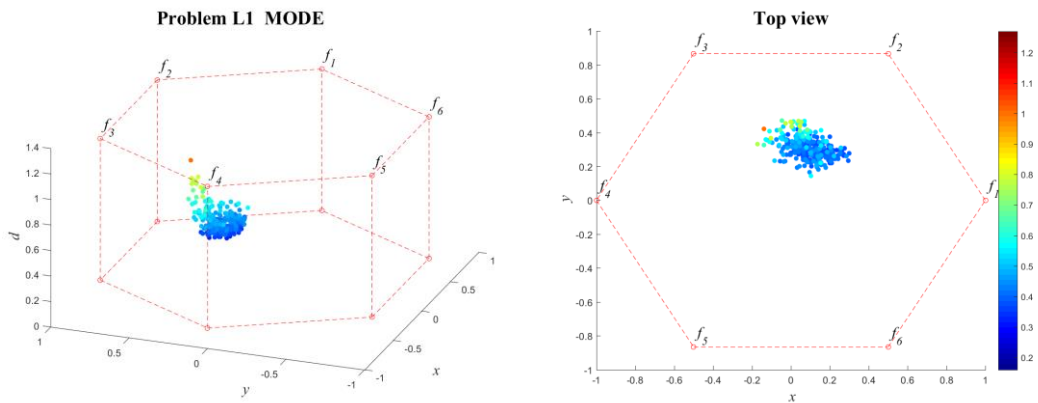
จากตารางที่ ข-13 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE และ AMOEAD-DE ตามลำดับ

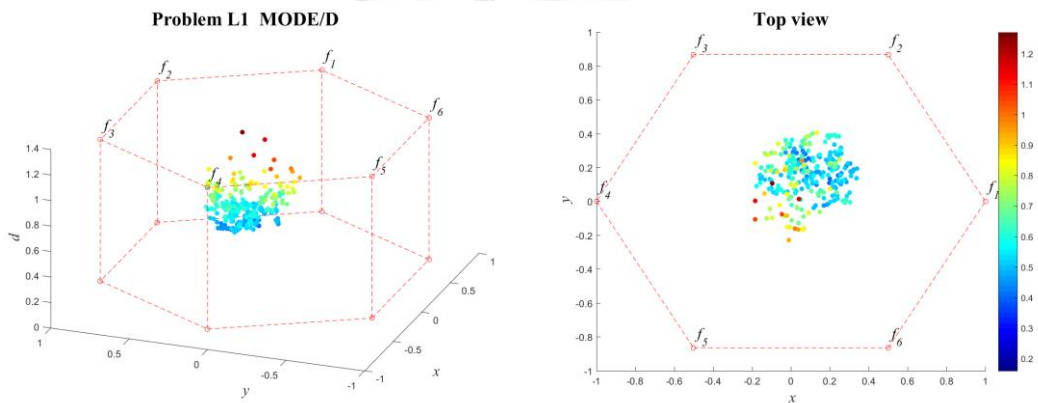
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-74 ถึง ข-78



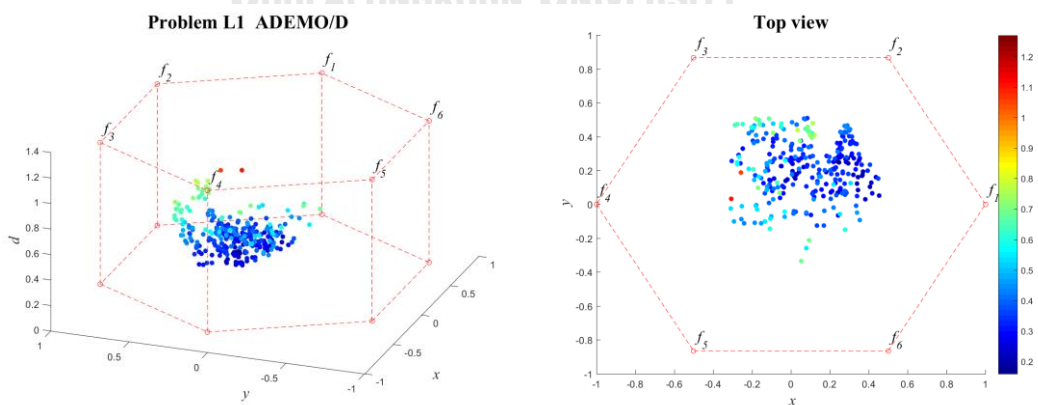
ภาพที่ ข-74 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา L1 (3D-RadVis)



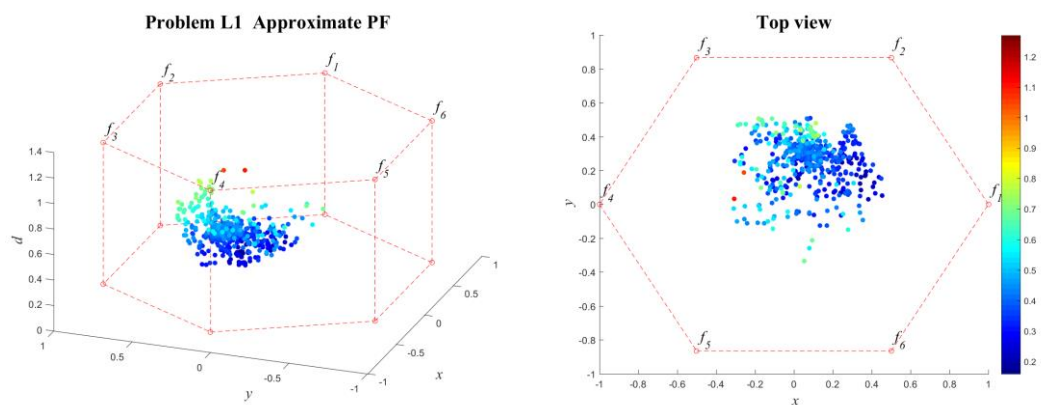
ภาพที่ ข-75 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา L1 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-76 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา L1 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-77 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา L1 (3D-RadVis)

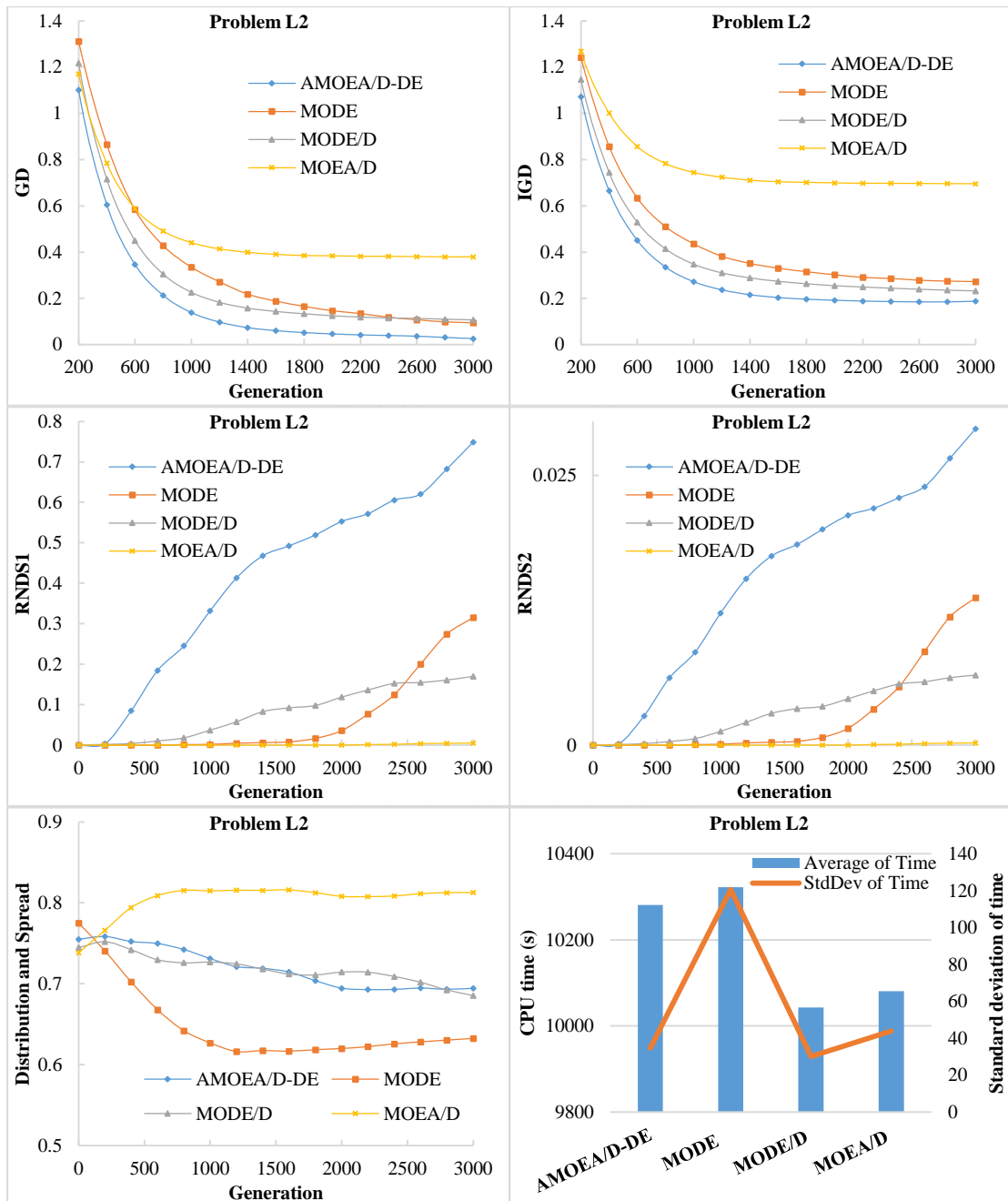


ภาพที่ ข-78 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา L1 (3D-RadVis)



14. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L2

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-79 และตารางที่ ข-14 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-79 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L2

ตารางที่ ข-14 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา L2

Metrics	AMOEAD/DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02096 (0.01316) ¹	0.09131 (0.06052) ¹	0.10385 (0.04234) ^{1,2}	0.37956 (0.29051) ²
IGD	0.19043 (0.01277) ¹	0.27014 (0.02103) ^{1,2}	0.22924 (0.02015) ^{1,2}	0.69539 (0.50785) ²
Distribution & Spread	0.69953 (0.02423) ^{1,2}	0.63640 (0.02700) ¹	0.67450 (0.04115) ^{1,2}	0.81183 (0.13882) ²
RNDS1	0.81526 (0.09525) ¹	0.35589 (0.29833) ²	0.17900 (0.18098) ^{2,3}	0.00560 (0.00970) ³
RNDS2	0.03204 (0.00357) ¹	0.01542 (0.01293) ²	0.00673 (0.00687) ^{2,3}	0.00022 (0.00038) ³
CPU time (s)	10281.198 (34.700) ²	10322.021 (120.500) ²	10042.813 (30.100) ¹	10080.620 (43.900) ¹

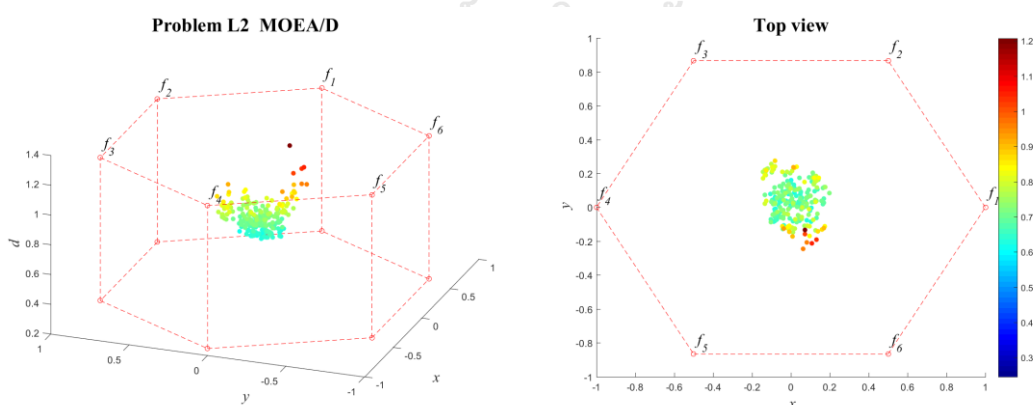
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-14 จะเห็นได้ว่า AMOEAD/DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย MODE ให้ค่าที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD/DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD/DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

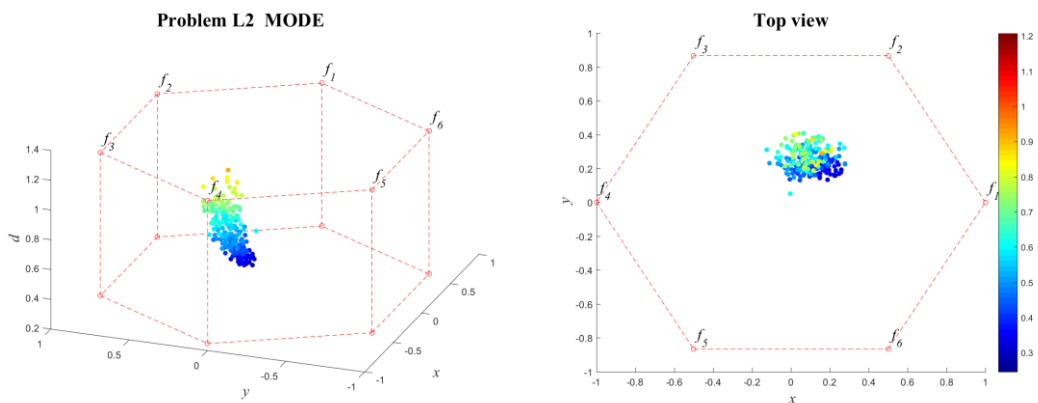
จากตารางที่ ข-14 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า MODE/D และ MOEA/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE และ AMOEA/D-DE ตามลำดับ

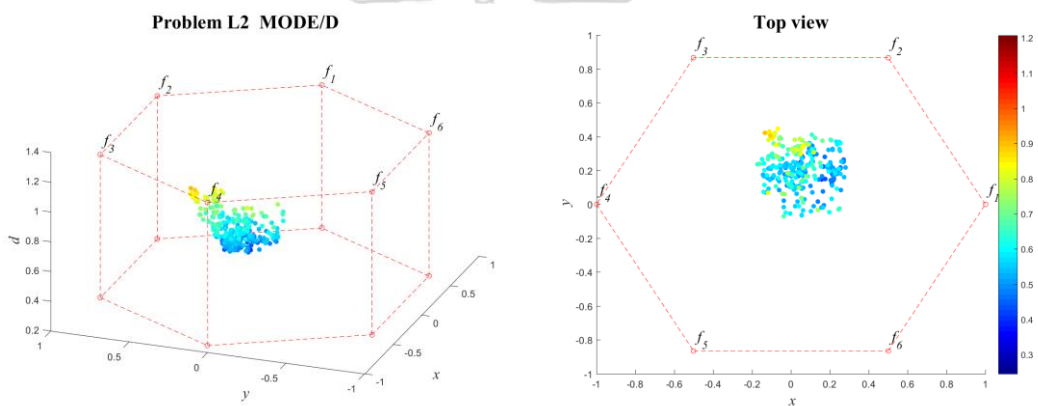
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-80 ถึง ข-84



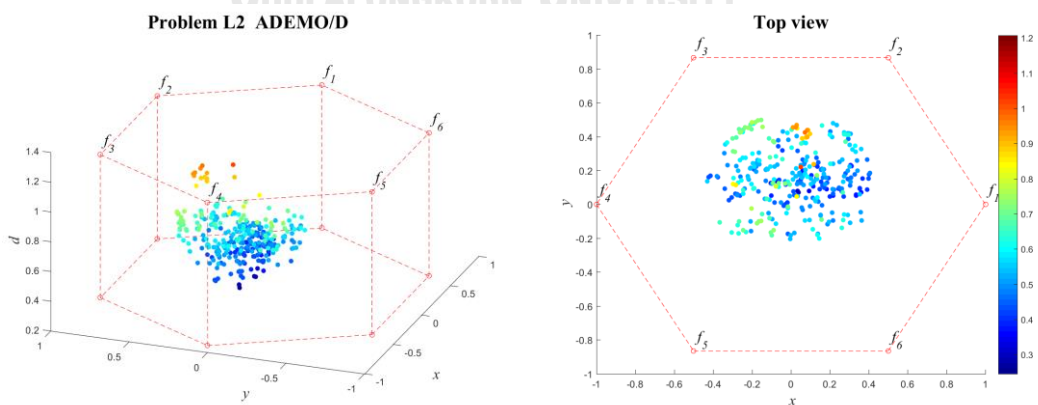
ภาพที่ ข-80 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา L2 (3D-RadVis)



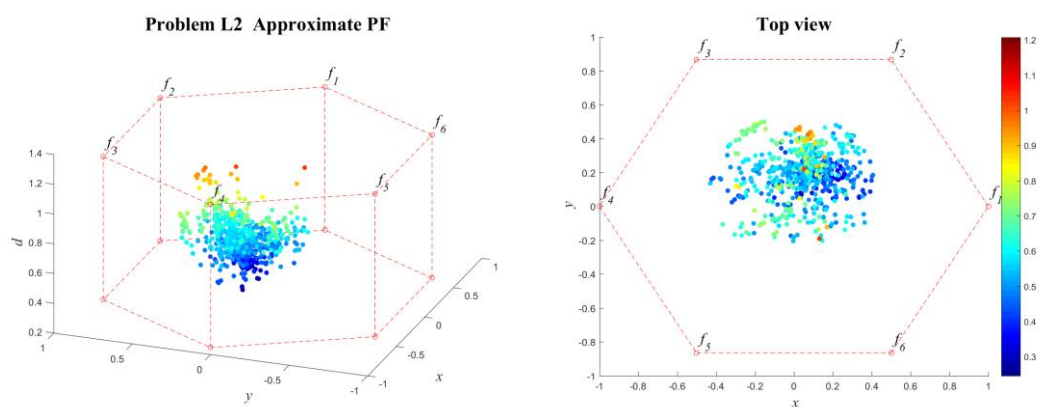
ภาพที่ ข-81 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา L2 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-82 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา L2 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-83 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา L2 (3D-RadVis)

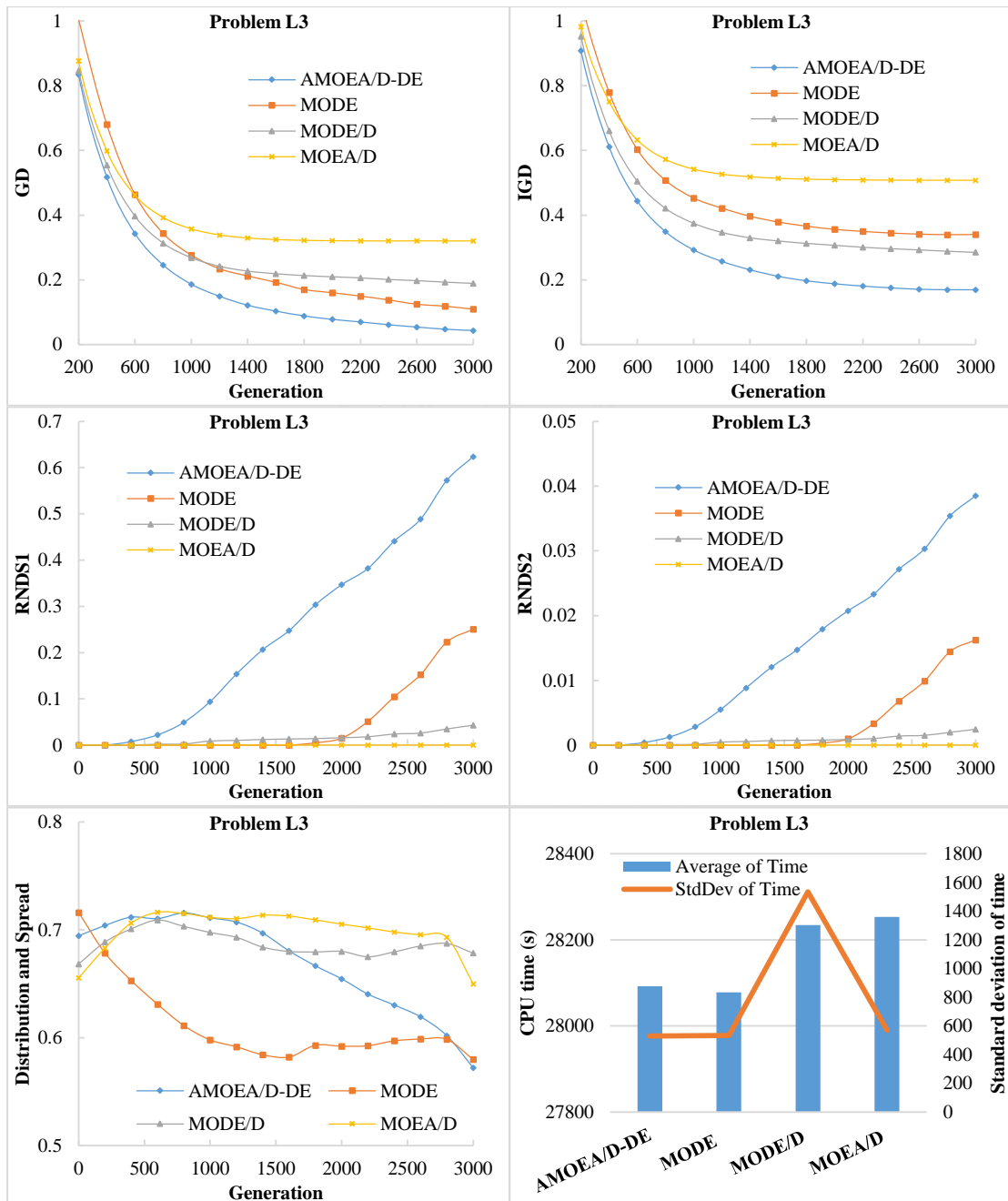


ภาพที่ ข-84 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา L2 (3D-RadVis)



15. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L3

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-85 และตารางที่ ข-15 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-85 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L3

ตารางที่ ข-15 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา L3

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.03968 (0.02839) ¹	0.10041 (0.07904) ^{1,2}	0.18540 (0.06613) ²	0.32026 (0.02667) ³
IGD	0.16941 (0.01198) ¹	0.34092 (0.01141) ²	0.28175 (0.03830) ²	0.50738 (0.06819) ³
Distribution & Spread	0.59322 (0.01954) ¹	0.61976 (0.04155) ¹	0.70302 (0.01140) ²	0.68922 (0.04190) ²
RNDS1	0.67489 (0.18612) ¹	0.27819 (0.40019) ^{1,2}	0.05128 (0.08883) ²	0.00000 (0.00000) ²
RNDS2	0.04161 (0.01168) ¹	0.01804 (0.02595) ^{1,2}	0.00293 (0.00507) ²	0.00000 (0.00000) ²
CPU time (s)	28092.339 (530.000) ¹	28078.323 (534.000) ¹	28234.167 (1534.000) ¹	28252.922 (571.000) ¹

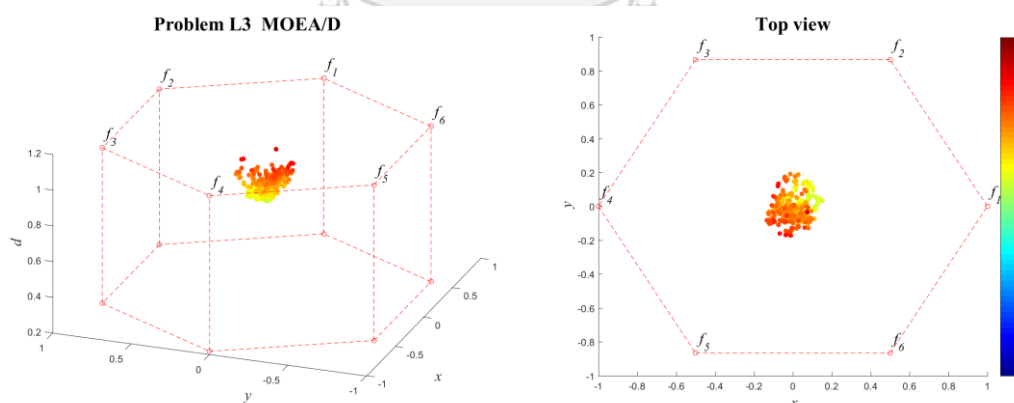
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-15 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย จะเห็นว่า MODE มีความหลากหลายที่ดีและ AMOEAD-DE มีแนวโน้มของความหลากหลายที่ดีขึ้นเรื่อย ๆ สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำที่ดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

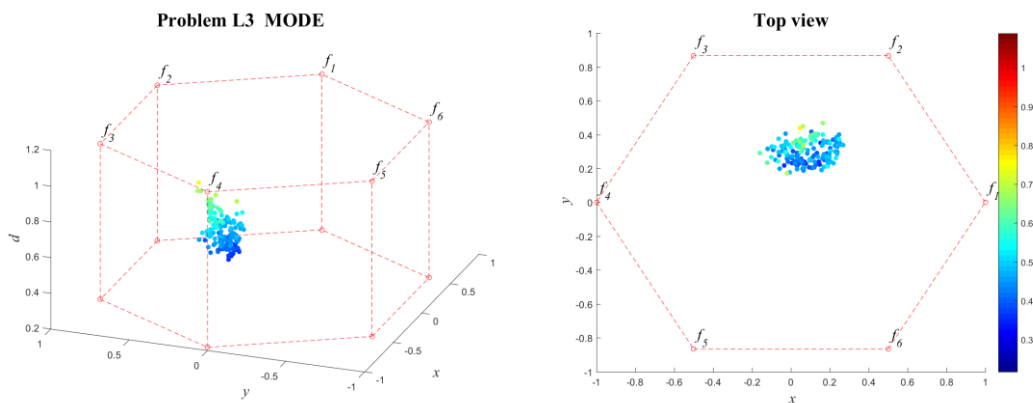
จากตารางที่ ข-15 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ที่ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE/D, MODE และ MOEA/D
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MOEA/D และ MODE/D ตามลำดับ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

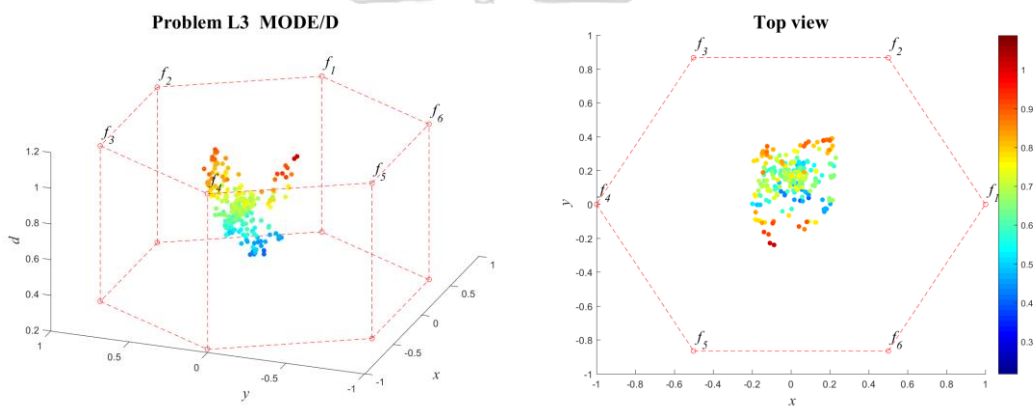
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-86 ถึง ข-90



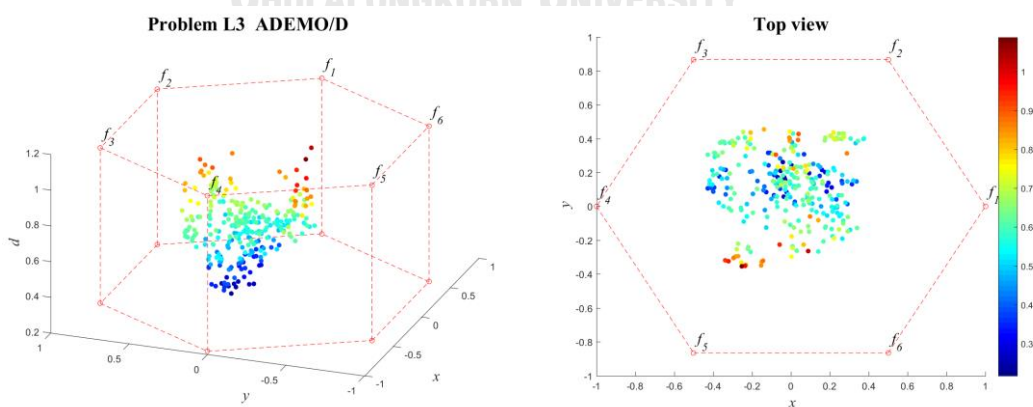
ภาพที่ ข-86 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา L3 (3D-RadVis)



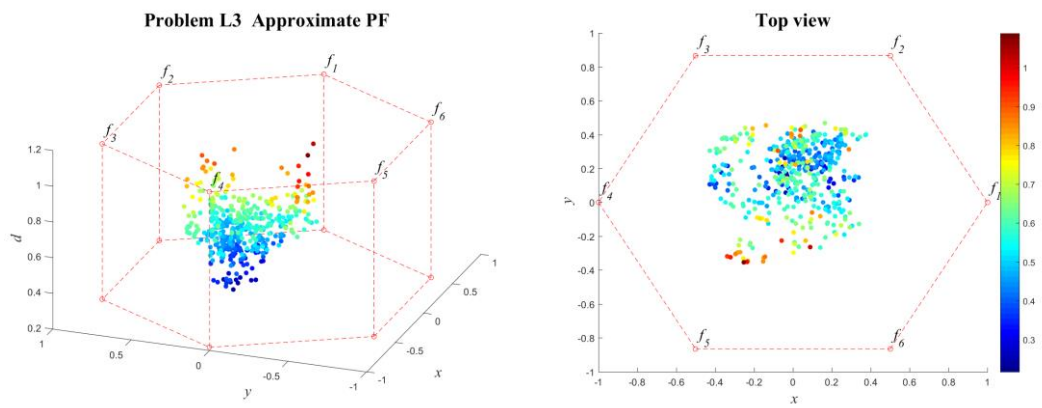
ภาพที่ ข-87 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา L3 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-88 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา L3 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-89 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา L3 (3D-RadVis)

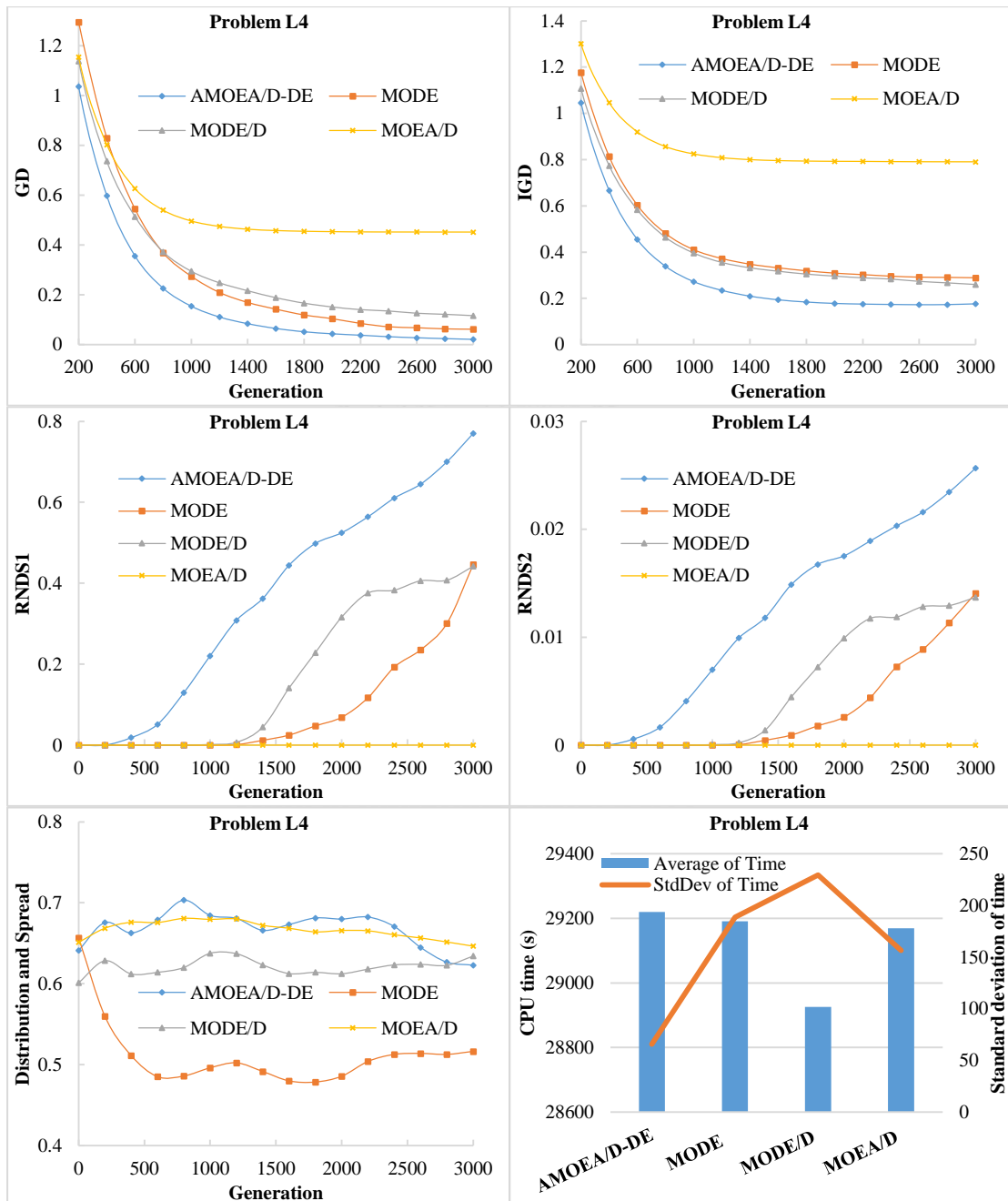


ภาพที่ ข-90 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา L3 (3D-RadVis)



16. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L4

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-91 และตารางที่ ข-16 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-91 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L4

ตารางที่ ข-16 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา L4

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01827 (0.00780) ¹	0.06041 (0.05522) ¹	0.11093 (0.12831) ¹	0.45206 (0.09118) ²
IGD	0.17955 (0.00267) ¹	0.28772 (0.01391) ¹	0.25315 (0.07601) ¹	0.79036 (0.23132) ²
Distribution & Spread	0.61930 (0.01815) ²	0.52018 (0.05637) ¹	0.64571 (0.02541) ²	0.64127 (0.05228) ²
RNDS1	0.84008 (0.05087) ¹	0.44612 (0.40527) ^{1,2}	0.44175 (0.38317) ^{1,2}	0.00000 (0.00000) ²
RNDS2	0.02786 (0.00205) ¹	0.01681 (0.01527) ^{1,2}	0.01445 (0.01252) ^{1,2}	0.00000 (0.00000) ²
CPU time (s)	29219.948 (65.545) ¹	29190.661 (188.606) ¹	28925.906 (229.296) ¹	29168.776 (156.315) ¹

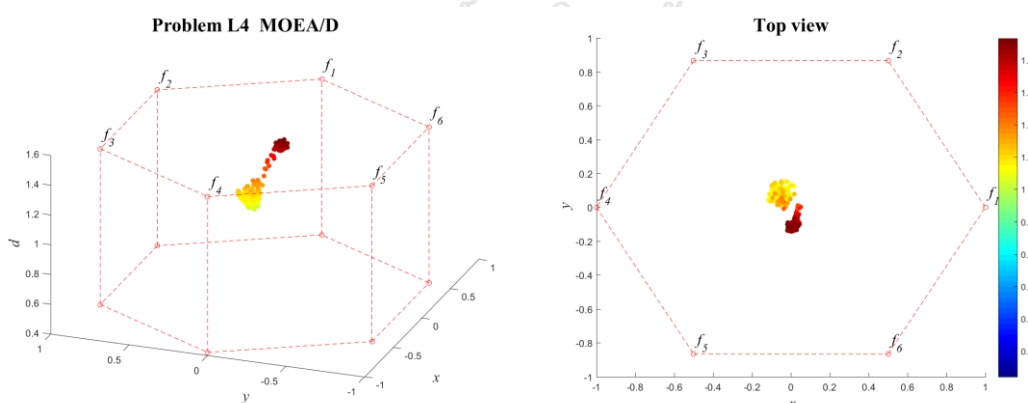
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-16 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย จะเห็นว่า MODE มีความหลากหลายที่ดีที่สุด สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดที่สุดอย่างชัดเจน ส่วน MODE และ MODE/D ใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

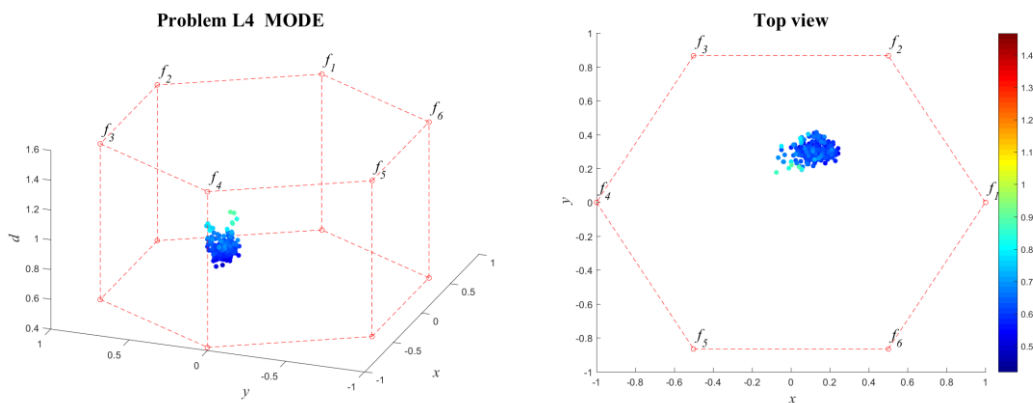
จากตารางที่ ข-16 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ AMOEAD-DE, MOEA/D และ MODE/D ตามลำดับ
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

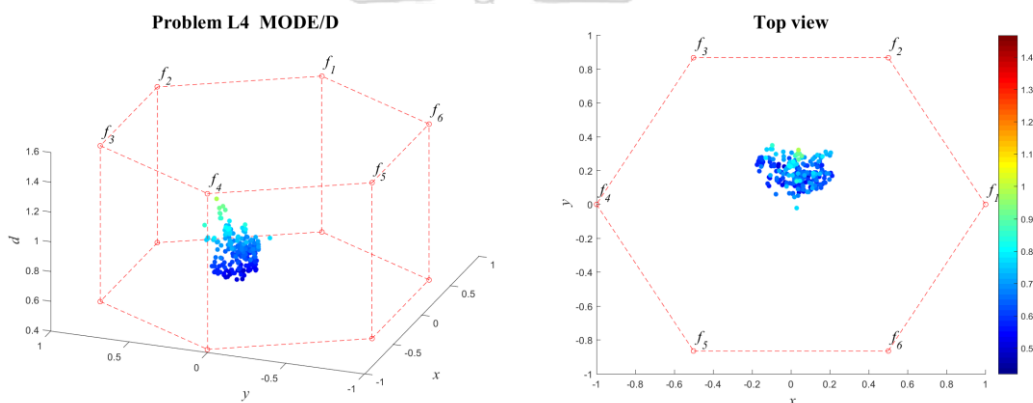
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-92 ถึง ข-96



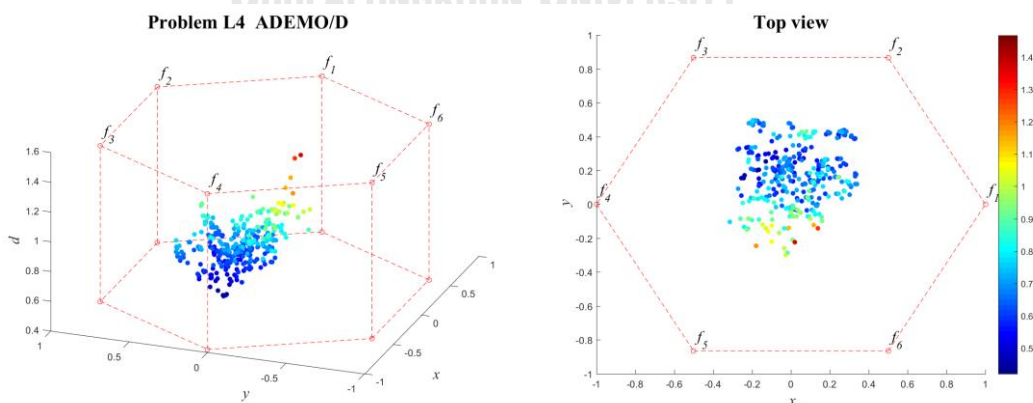
ภาพที่ ข-92 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา L4 (3D-RadVis)



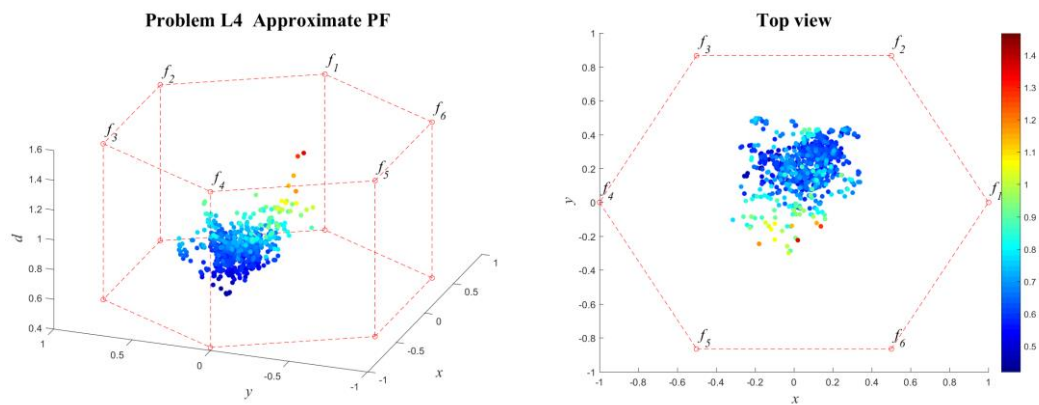
ภาพที่ ข-93 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา L4 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-94 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา L4 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-95 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEA/D-DE ปัญหา L4 (3D-RadVis)

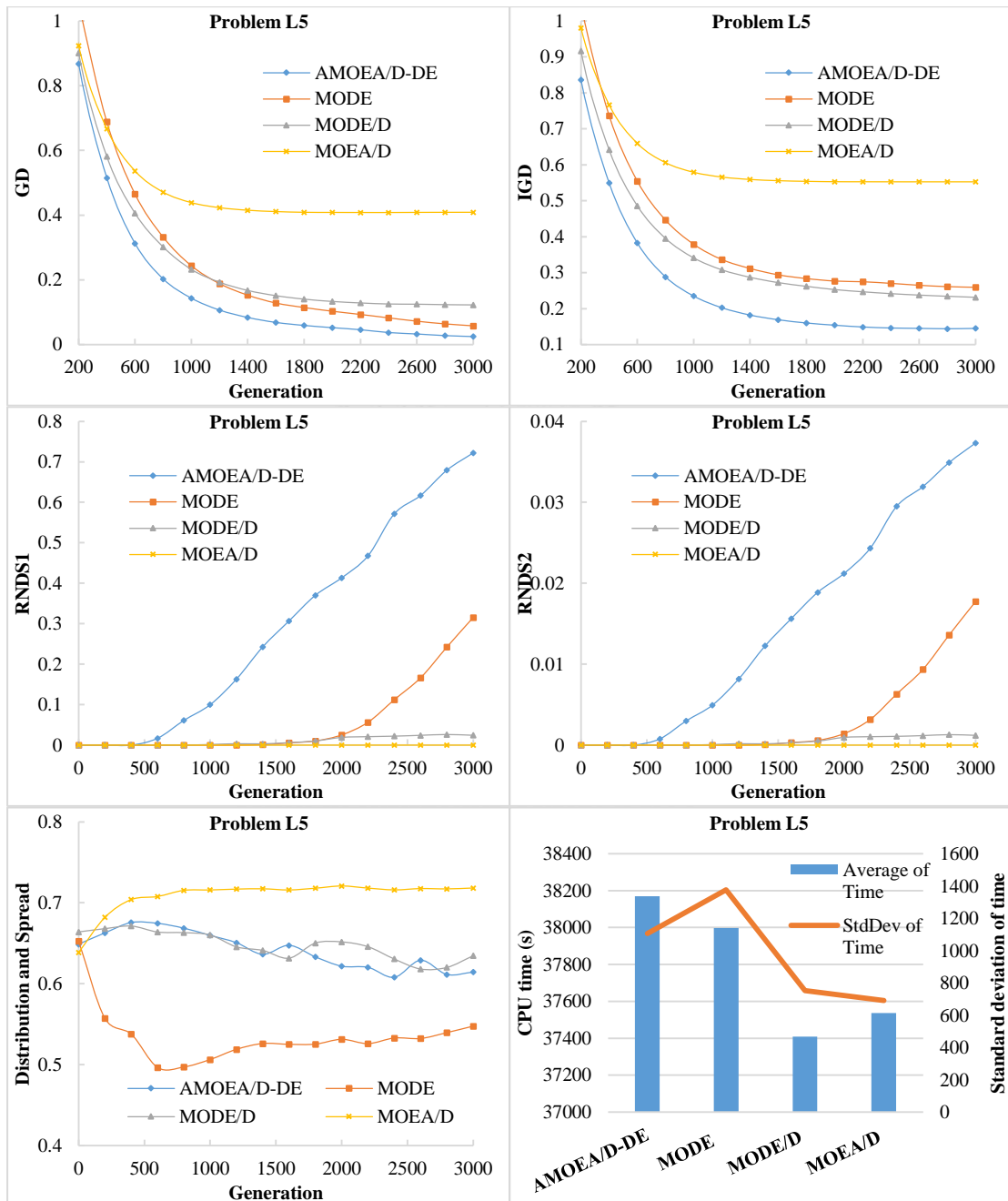


ภาพที่ ข-96 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา L4 (3D-RadVis)



17. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L5

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-97 และตารางที่ ข-17 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-97 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L5

ตารางที่ ข-17 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา L5

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.02192 (0.01223) ¹	0.05215 (0.04341) ¹	0.12194 (0.03547) ²	0.40892 (0.04464) ³
IGD	0.14616 (0.00824) ¹	0.25747 (0.01241) ²	0.22867 (0.02410) ²	0.55253 (0.06526) ³
Distribution & Spread	0.61733 (0.00583) ^{1,2}	0.55566 (0.03721) ¹	0.64902 (0.09338) ^{1,2}	0.71938 (0.06265) ²
RNDS1	0.76475 (0.09516) ¹	0.38847 (0.48228) ^{1,2}	0.02241 (0.01941) ²	0.00000 (0.00000) ²
RNDS2	0.03973 (0.00586) ¹	0.02184 (0.02711) ^{1,2}	0.00113 (0.00098) ²	0.00000 (0.00000) ²
CPU time (s)	38170.042 (1106.590) ¹	37996.802 (1376.961) ¹	37409.370 (752.173) ¹	37537.464 (691.065) ¹

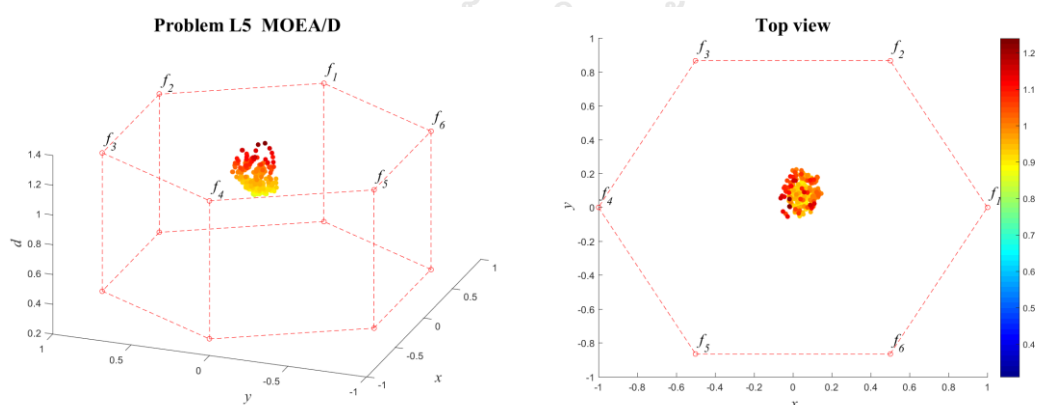
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-17 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย จะเห็นว่า MODE มีความหลากหลายที่ดีที่สุด สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบจำกัดที่สุดอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

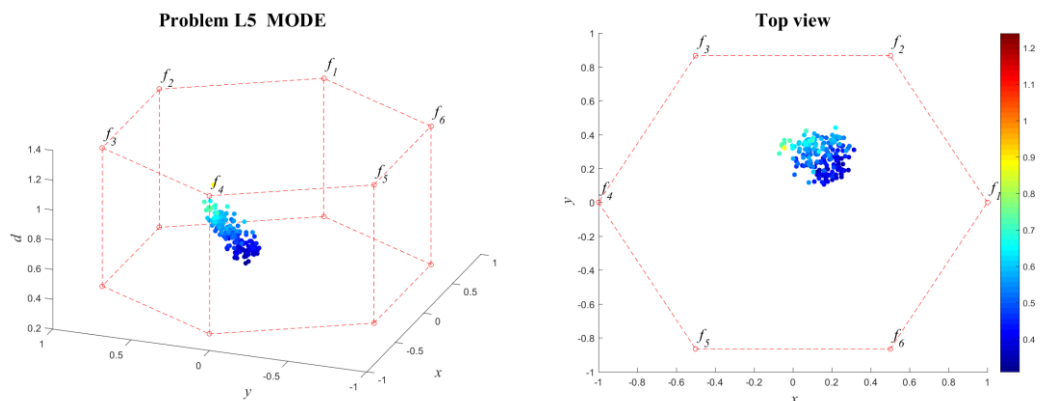
จากตารางที่ ข-17 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ที่ดีที่สุดตามหลักสถิติ รองลงมาคือ MODE/D, MODE และ MOEA/D
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEAD-DE มีค่าเฉลี่ย RNDS1 และ RNDS2 ที่ดีที่สุด
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEAD-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

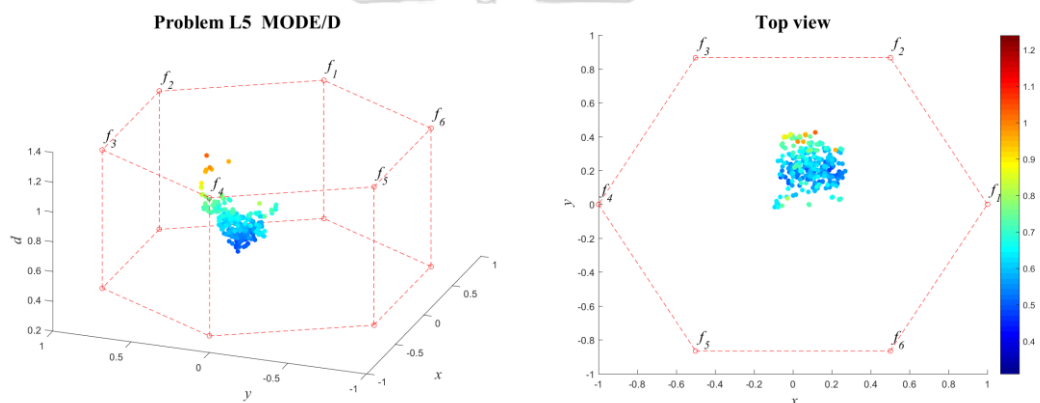
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหาการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-98 ถึง ข-102



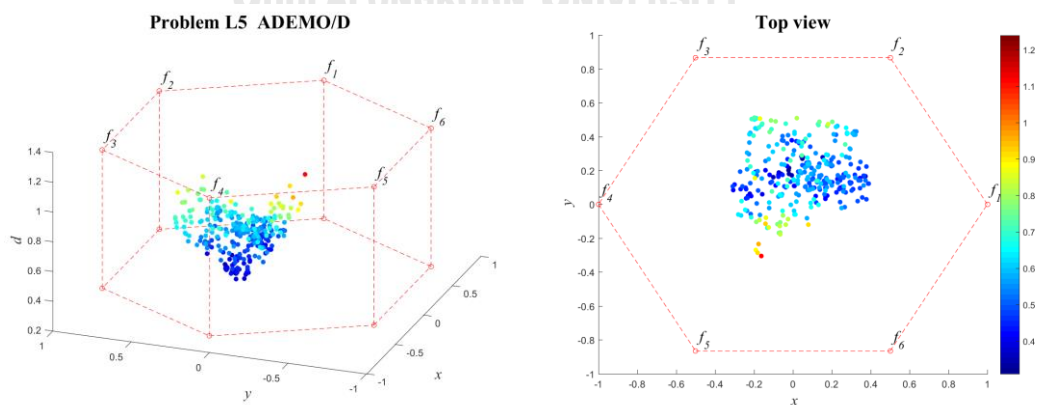
ภาพที่ ข-98 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา L5 (3D-RadVis)



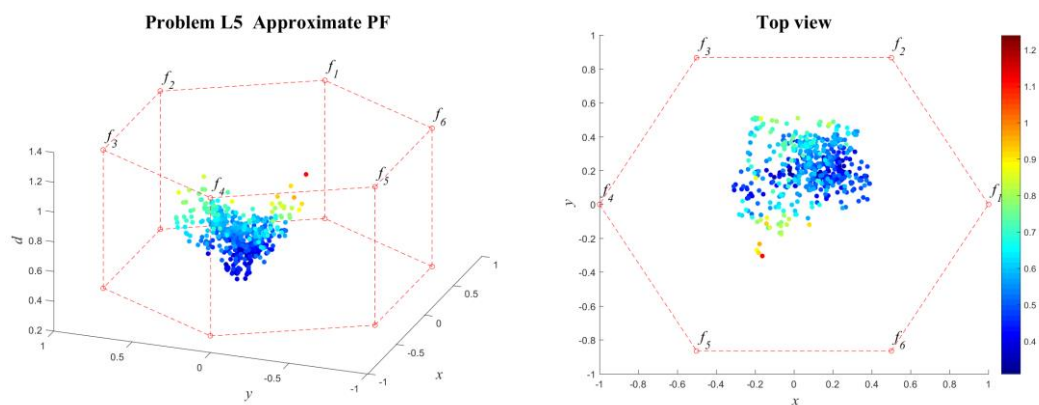
ภาพที่ ข-99 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา L5 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-100 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา L5 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-101 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAD-DE ปัญหา L5 (3D-RadVis)

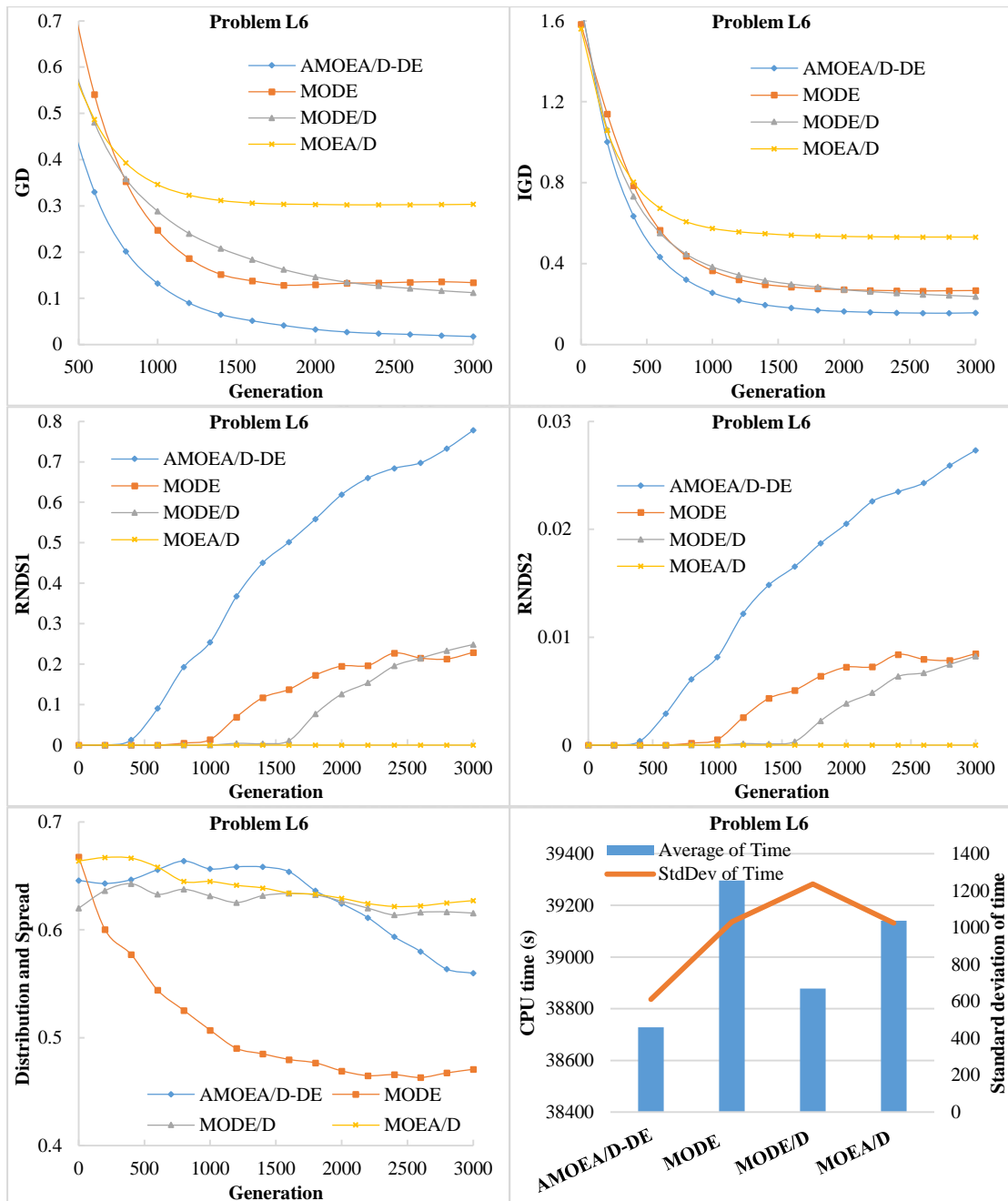


ภาพที่ ข-102 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา L5 (3D-RadVis)



18. ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L6

แสดงวิวัฒนาการของค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ดังภาพที่ ข-103 และตารางที่ ข-18 ตามลำดับ



ภาพที่ ข-103 วิวัฒนาการของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ปัญหา L6

ตารางที่ ข-18 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ปัญหา L6

Metrics	AMOEAD-DE	MODE	MODE/D	MOEA/D
GD	0.01549 (0.00805) ¹	0.13206 (0.10824) ¹	0.10820 (0.09230) ¹	0.30409 (0.02263) ²
IGD	0.15919 (0.00532) ¹	0.26825 (0.06315) ²	0.23303 (0.04366) ^{1,2}	0.53137 (0.05003) ³
Distribution & Spread	0.56486 (0.04299) ^{1,2}	0.47656 (0.06274) ¹	0.61166 (0.02139) ²	0.63098 (0.07889) ²
RNDS1	0.82303 (0.07288) ¹	0.24561 (0.21324) ²	0.26387 (0.40572) ²	0.00000 (0.00000) ²
RNDS2	0.02873 (0.00085) ¹	0.00908 (0.00788) ²	0.00899 (0.01390) ²	0.00000 (0.00000) ²
CPU time (s)	38728.380 (611.565) ¹	39296.656 (1031.302) ¹	38877.620 (1236.215) ¹	39141.250 (1023.600) ¹

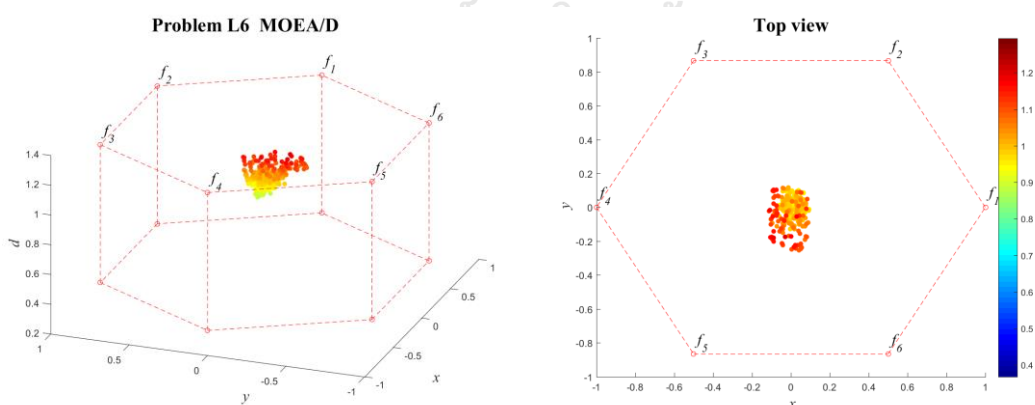
หมายเหตุ: Mean(Std. Dev.)^{Group}, **อักษรตัวหนา** หมายถึง ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะที่ดีที่สุด ตามหลักสถิติ (แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์) และ Group คือ กลุ่มของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะ (เลขกลุ่มเดียวกัน คือ ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)

จากภาพที่ ข-18 จะเห็นได้ว่า AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายในด้านของจำนวนคำตอบที่ลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงที่เร็วและดีกว่าอัลกอริทึมอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD ตามลำดับ ส่วนด้านของความหลากหลายในเรื่องของการกระจายตัวของคำตอบที่สม่ำเสมอและแพร่กระจาย จะเห็นว่า MODE มีความหลากหลายที่ดีที่สุด สามารถดูได้จากกราฟ Distribution and Spread สุดท้ายด้านปริมาณคำตอบ จะเห็นว่า AMOEAD-DE เกิดสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำดีที่สุดและดีขึ้นเป็นลำดับ เช่นเดียวกับการลู่เข้าของคำตอบ โดยสรุป AMOEAD-DE มีการลู่เข้าของคำตอบและอัตราการเกิดสัดส่วนของคำตอบที่ดี เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ

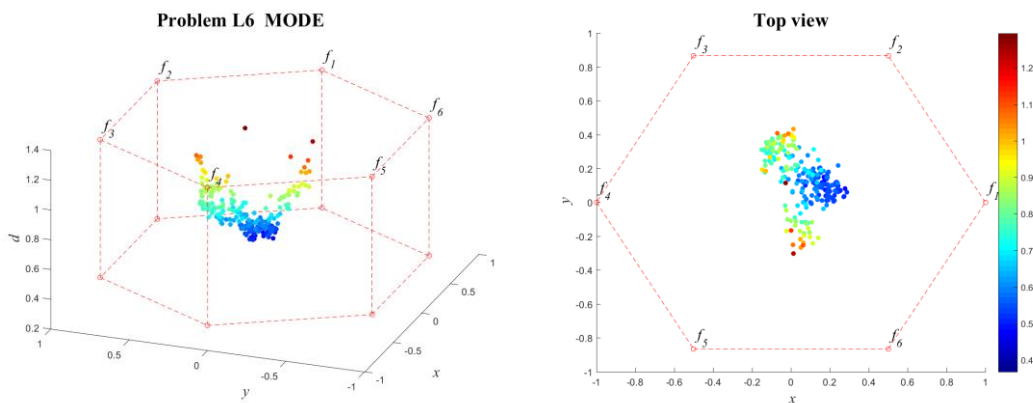
จากตารางที่ ข-18 สามารถสรุปผลของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 3000 รอบ ทั้ง 5 ด้าน ได้ดังนี้

1. ด้านการลู่เข้าของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด GD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
2. ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE/D มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด IGD ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
3. ด้านปริมาณคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด RNDS1 และ RNDS2 ดีที่สุดตามหลักสถิติ
4. ด้านความหลากหลายของคำตอบ พบว่า AMOEA/D-DE และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด Distribution and Spread ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดย MODE มีค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด
5. ด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม พบว่า AMOEA/D-DE, MODE/D, MOEA/D และ MODE มีค่าเฉลี่ยตัวชี้วัด CPU time ไม่แตกต่างกันที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

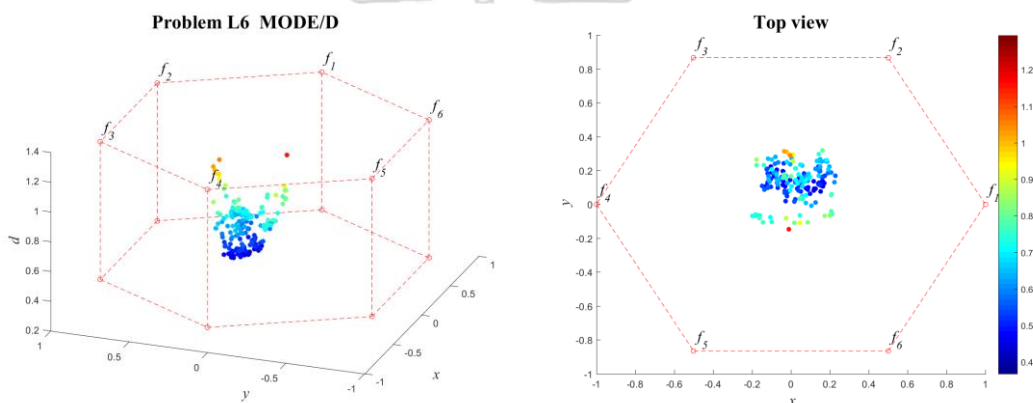
แสดงภาพคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของแต่ละอัลกอริทึม จากการแก้ปัญหการจัดลำดับผลิตภัณฑ์ 6 วัตถุประสงค์ จำนวน 3 รอบทำซ้ำ ในรูปแบบของกราฟ 3D-RadVis ดังภาพที่ ข-104 ถึง ข-108



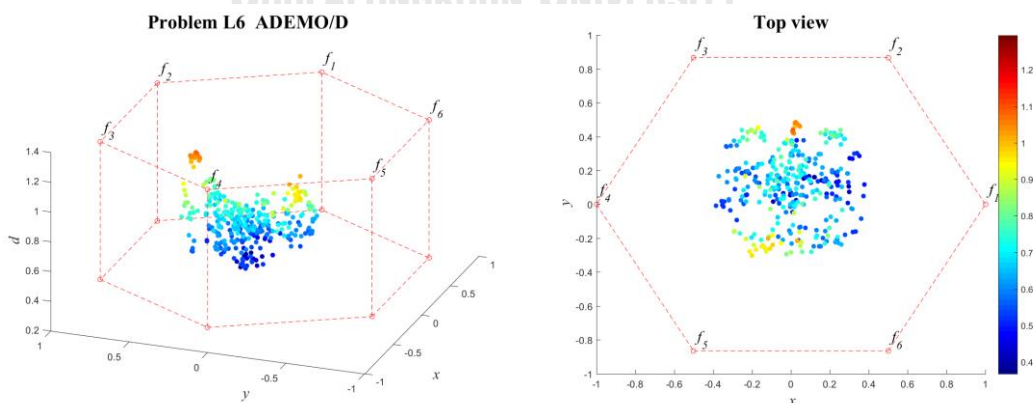
ภาพที่ ข-104 คำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 ของ MOEA/D ปัญหา L6 (3D-RadVis)



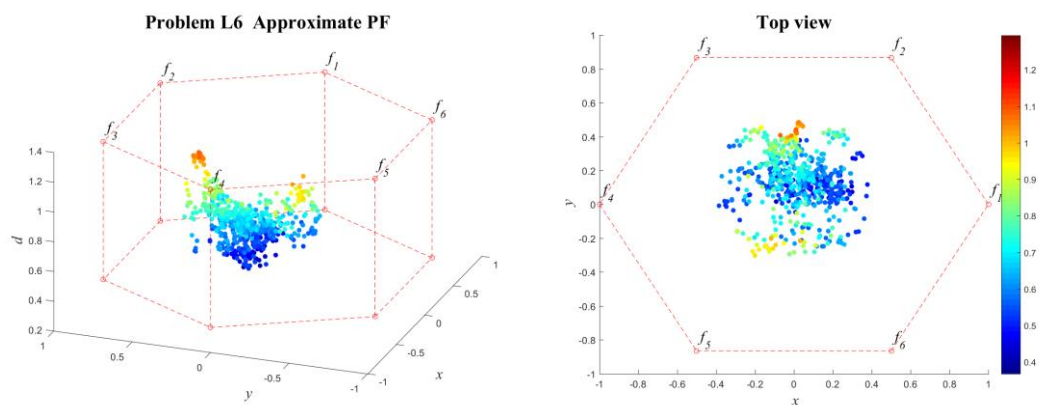
ภาพที่ ข-105 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE ปัญหา L6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-106 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ MODE/D ปัญหา L6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-107 คำตอบพرونเทียร์ที่ 1 ของ AMOEAVD-DE ปัญหา L6 (3D-RadVis)



ภาพที่ ข-108 คำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ (Approximate PF) ปัญหา L6 (3D-RadVis)



ภาคผนวก ค

การสร้างกราฟสามมิติสำหรับปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์

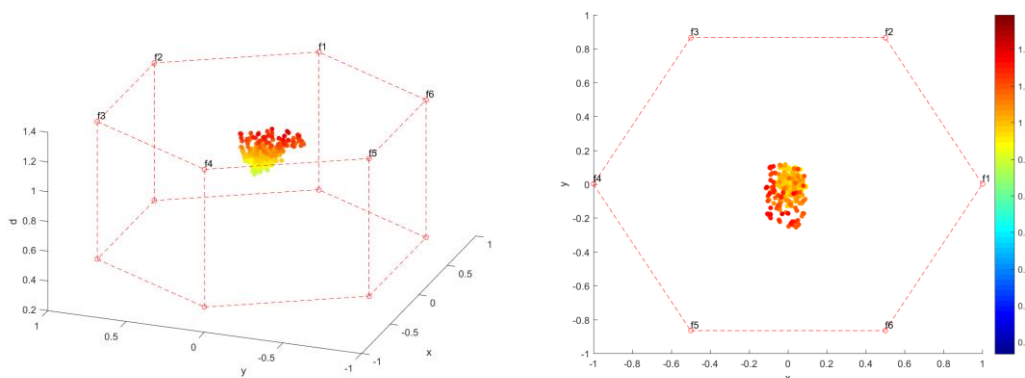
ในบทนี้ นำเสนอขั้นตอนและวิธีการสร้างกราฟ 3 มิติสำหรับปัญหาที่มีมากกว่า 3 วัตถุประสงค์ หรือเรียกว่า กราฟ 3D-RadVis ซึ่ง Ibrahim, Rahnamayan, Martin, and Deb (2016) ได้พัฒนามาจากพื้นฐานแนวคิดของกราฟ RadVis (Hoffman, Grinstein, Marx, Grosse, & Stanley, 1997) มาแสดงเป็นรูปร่าง 3 มิติ เพื่อให้เห็นรูปร่างการกระจายตัวและการลู่ออกของคำตอบของปัญหาที่มี M มิติ โดย 3D-RadVis จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ การกำหนดระยะห่างของคำตอบกับบรรณาบอ้างอิง และการแปลงจุดพิกัดคำตอบ M มิติ ลงบนระนาบ xy

1. รูปแบบของกราฟ 3D-RadVis

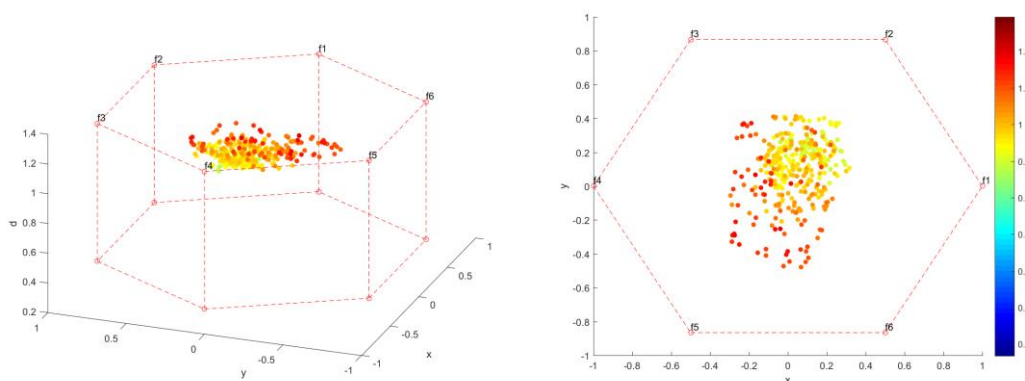
การสร้างกราฟสามมิติของ 3D-RadVis จำเป็นต้องแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ เพื่อให้กราฟมีรูปร่างอยู่ในสัดส่วนเดียวกัน สามารถเห็นการกระจายและการลู่ออกของคำตอบได้อย่างชัดเจน โดยในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

- 1) กรณีแต่ละวัตถุประสงค์มีค่าที่ใช้หน่วยเดียวกัน และต้องการให้กราฟของแต่ละอัลกอริทึมมีขนาด xy ในหน่วยเดียวกัน
- 2) กรณีแต่ละวัตถุประสงค์มีค่าที่ใช้หน่วยเดียวกัน และต้องการให้กราฟของแต่ละอัลกอริทึมมีขนาดสุดขอบ xy
- 3) กรณีแต่ละวัตถุประสงค์มีค่าที่ใช้หน่วยต่างกัน และต้องการให้กราฟของแต่ละอัลกอริทึมมีขนาด xy ในหน่วยเดียวกัน
- 4) กรณีแต่ละวัตถุประสงค์มีค่าที่ใช้หน่วยต่างกัน และต้องการให้กราฟของแต่ละอัลกอริทึมมีขนาดสุดขอบ xy

แสดงตัวอย่างกรณีกราฟของแต่ละอัลกอริทึมมีขนาด xy ในหน่วยเดียวกัน และกรณีกราฟของแต่ละอัลกอริทึมมีขนาดสุดขอบ xy ดังภาพที่ ค-1 และ ค-2 ตามลำดับ



ภาพที่ ค-1 กราฟกรณีทีแต่ละอัลกอริทึมมีขนาด xy ในหน่วยเดียวกัน

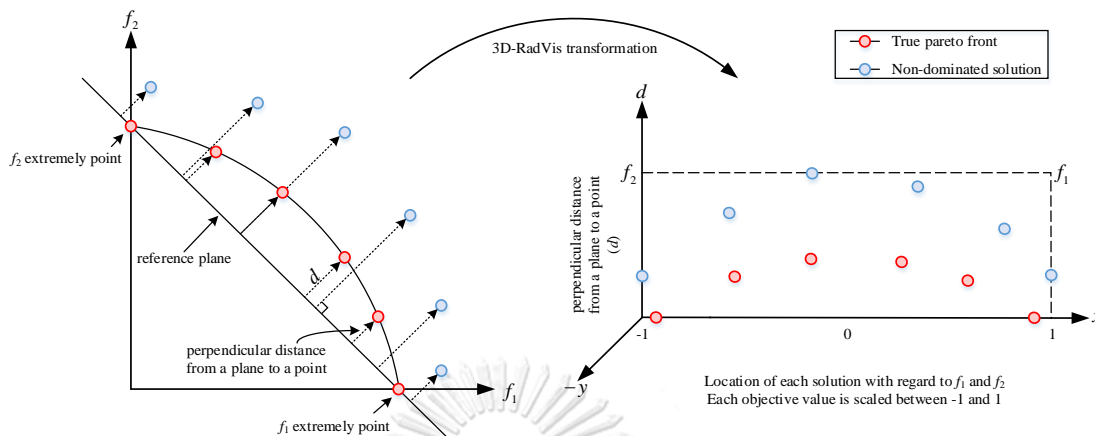


ภาพที่ ค-2 กราฟกรณีทีแต่ละอัลกอริทึมมีขนาดสุดขอบ xy

จากภาพที่ ค-1 ขนาดบนแกน xy จะเป็นขนาดเดียวกันหมดในแต่ละอัลกอริทึมที่เปรียบเทียบกัน แต่ภาพที่ ค-2 จะทำการนอร์มัลไลซ์จุดคำตอบของแต่ละอัลกอริทึมด้วยค่า \max/\min ของอัลกอริทึมนั้น ๆ เอง เพื่อให้จุดคำตอบกระจายเต็มพื้นที่ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากภาพข้างต้นที่เป็นคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ชุดเดียวกัน แต่อยู่บนขนาดของ xy ที่แตกต่างกัน

การสร้างแบบภาพที่ ค-1 จะให้ขนาดการกระจายของคำตอบจริง ในการเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ จึงสามารถเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมจากการมองภาพได้ ส่วนภาพที่ ค-2 จะให้ขนาดภาพที่ชัดเจนเหมาะกับการมองรูปแบบการกระจายตัวของคำตอบในแต่ละอัลกอริทึม ไม่เหมาะในการนำไปเปรียบเทียบ

2. ขั้นตอนการสร้างกราฟ 3D-RadVis



ภาพที่ ค-3 3D-RadVis transformation in 2 dimensions

จากภาพที่ ค-3 เป็นการแปลงพิกัดคำตอบของกราฟ 2 มิติ แบบทั่วไป ให้อยู่ในรูปพิกัดคำตอบสำหรับกราฟ 3D-RadVis

ข้อมูลนำเข้า

- P** คือ เซตของคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึมประกอบด้วย $\{P_1, \dots, P_R\}$ โดยที่ R คือจำนวนอัลกอริทึม และ $P_r = (F^1, \dots, F^{N_r})^T$
- F^i** คือ คำตอบที่ i โดยที่ $F^i = (f_1^i, \dots, f_M^i)$
- N_r** คือ จำนวนคำตอบทั้งหมดของอัลกอริทึมที่ r
- M** คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ข้อมูลนำออก

- u_i** คือ จุดพิกัดบนกราฟ 3 มิติ ของคำตอบที่ i โดยที่ $u_i = (x_i, y_i, d_i)$

ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลและคำนวณระยะห่างของจุดคำตอบกับระนาบอ้างอิง

- 1) กรณีแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าคนละหน่วยกัน (ต่างสเกล) ให้ทำการหาค่า max/min ของแต่ละวัตถุประสงค์จากคำตอบที่ได้จากทุกอัลกอริทึม ($P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_R$) หากเป็นกรณีอื่น ข้ามไปข้อ 3
- 2) ทำการนอร์มัลไลซ์ด้วยค่า max/min จากข้อ 1
- 3) กำหนด extremely point ของแต่ละวัตถุประสงค์ จะได้ $Z = (z_1, \dots, z_M)^T$, $z_i = (z_{i1}, \dots, z_{iM})$
- 4) คำนวณขนาดของ normal vector จาก $n = \text{norm}(Z)$ หรือ $n = \max_{1 \leq i \leq M} \sqrt{\sum_{j=1}^M (z_{ij})^2}$
- 5) คำนวณค่าคงที่จาก $c = n \times \max(Z)$
- 6) จะได้สมการเส้นตรงบนระนาบผ่านจุด extremely point ทั้งหมด (ระนาบอ้างอิง) ดังนี้

$$n \sum_{j=1}^M f_j = n f_1 + n f_2 + \dots + n f_M = c$$

- 7) คำนวณระยะห่างที่สั้นที่สุดระหว่างจุดคำตอบใด ๆ กับเส้นตรงบนระนาบผ่านจุด extremely point ดังสมการต่อไปนี้

$$d_i = \frac{|(n \sum_{j=1}^M f_j^i) - c|}{\|n\|}$$

$$i \in N$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY
 $\|n\| = \sqrt{M \times n^2}$

ขั้นตอนการแปลงจุดพิกัด M แกน ลงบนระนาบ xy

- 1) กรณีต้องการให้แต่ละกราฟเป็นหน่วยเดียวกัน (Based on same scale) ให้ข้ามขั้นนี้ไป แต่หากต้องการให้กราฟแต่ละรูปมีความกว้างของฐาน xy สดุดขอบ (จาก $xy = -1$ ถึง $xy = 1$) ให้ทำการนอร์มัลไลซ์ค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละอัลกอริทึมด้วยค่า max/min ของแต่ละอัลกอริทึมเอง

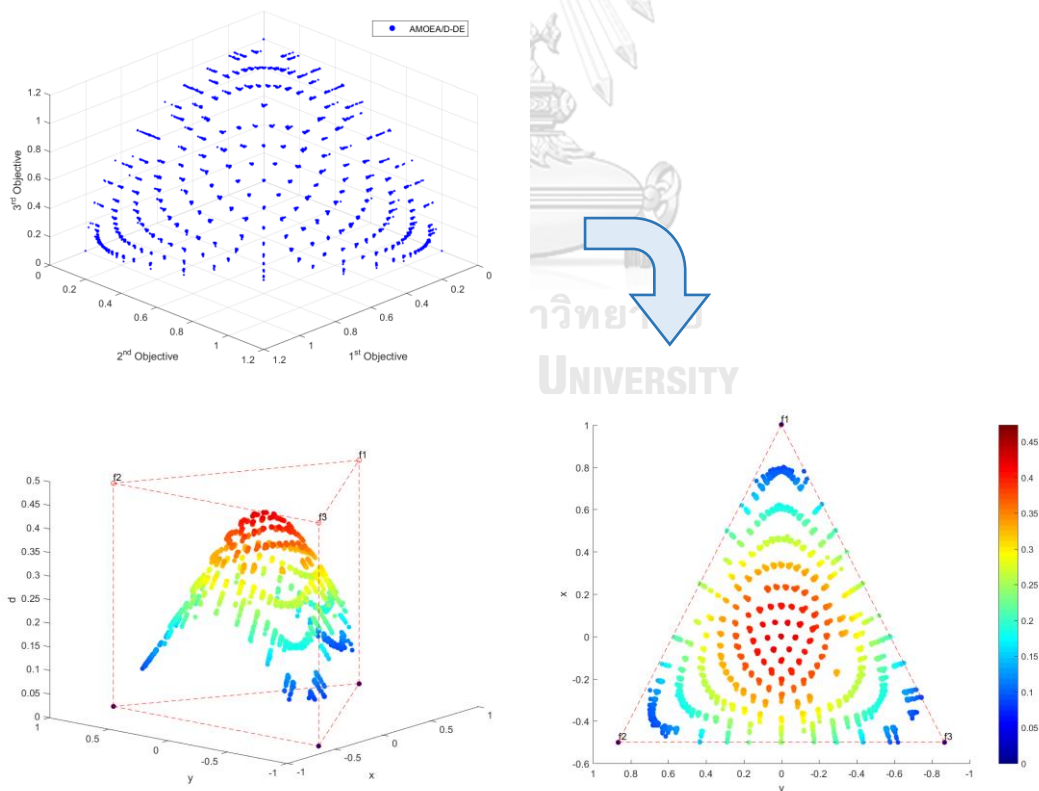
2) ทำการแปลงค่าวัตถุประสงค์ M มิติ ให้อยู่ในรูป 2 มิติ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^M f_j^i \cos \theta_j}{\sum_{j=1}^M f_j^i} \quad i \in N$$

$$y_i = \frac{\sum_{j=1}^M f_j^i \sin \theta_j}{\sum_{j=1}^M f_j^i} \quad i \in N$$

โดยขนาดมุมของ θ_j โดยที่ $j = 1, 2, \dots, M$ จะเท่ากับ $\frac{2\pi}{M} \cdot (b + j - 1)$ โดยที่ $b \in R$

แสดงการกระจายของคำตอบในปัญหามาตรฐาน 3 วัตถุประสงค์ ในรูปแบบปกติ และ 3D-RadVis ดังภาพที่ ค-4



ภาพที่ ค-4 3D-RadVis transformation in 3 dimensions

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายตรัยรัตน์ เกิดโภคทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมจากโรงเรียนสาริตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ฝ่ายมัธยม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

