

การแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมาทิวัดอุปสงค์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

SOLVING MANY-OBJECTIVE COCKPIT CREW PAIRING PROBLEM OF LOW-COST  
AIRLINE



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

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคา ประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์
โดย	น.ส.ณิชา กฤษณพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมาอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

----- คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์จรัสพันธ์ เงามะเสถียรวงศ์)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมาอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก)

----- กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นระเกณท์ พุ่มชูศรี)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย วิจิรวณิช)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณิชา กฤษณพันธ์ : การแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบ  
 มากวัตถุประสงค์. ( SOLVING MANY-OBJECTIVE COCKPIT CREW PAIRING  
 PROBLEM OF LOW-COST AIRLINE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ปารเมศ ชูติมา  
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ จัดเป็น  
 ปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ และเป็นปัญหาประเภทเอ็นพี-ฮาร์ด งานวิจัยนี้เสนออัลกอริทึมที่  
 พัฒนาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้แก่วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึด  
 หลักการจำแนก (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D*)  
 วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ *III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III)* และวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลาย  
 วัตถุประสงค์ (*A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE*) โดยพิจารณา  
 วัตถุประสงค์จำนวน 5 วัตถุประสงค์ พร้อมกันดังนี้ เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด ปริมาณ  
 ภาระงานให้เท่าเทียมกัน เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุด ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด  
 และจำนวนคัปบินน้อยที่สุด

ผลการวิจัยพบว่า *MOEA/D* มีสมรรถนะด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ (*GD*) ด้านการลู่อู่  
 เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (*IGD*) ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ  
 เทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (*RNDS I*) ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูก  
 ครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (*RNDS II*) และด้านเวลาในการดำเนินงาน (*CPU Time*)  
 ที่ดีกว่า *NSGA-III* และ *MODE* ในปัญหาขนาดเล็กและกลาง แต่ *MOEA/D* มีสมรรถนะ  
 ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้  
 (*RNDS I*) พอกับ *NSGA-III* ในปัญหาขนาดใหญ่ โดยรวม *MOEA/D* มีสมรรถนะที่ดีกว่า  
*NSGA-III* และ *MODE* ในทุกๆ ด้าน ทั้งปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิติ

.....

ปี 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

การศึกษา

.....

# # 6070189121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Cockpit Crew Pairing Problem, Many-objective

Nicha Krisanaphan : SOLVING MANY-OBJECTIVE COCKPIT CREW PAIRING PROBLEM OF LOW-COST AIRLINE. Advisor: Prof. Parames Chutima, Ph.D.

*Many-objective cockpit crew pairing problem of low-cost airline is classified as many- objective optimization problems (MaOPs) and non-deterministic polynomial hard (NP-Hard). The purpose of research is to compare the efficiency of two algorithms as follows multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D) and non-dominated sorting genetic algorithm III (NSGA-III). The objectives considered in this research are minimizing idle time, balancing workload, minimizing repeat flight leg, minimizing the difference of nautical mile between each flight code, and minimizing number of pairs of cockpit crews.*

*The experiments show that MOEA/D outperforms NSGA-III and MODE in terms of GD, IGD, RNDS I, RNDS II, and CPU Time for small and medium size problems conversely, MOEA/D is equivalent to NSGA-III in term of RNDSI for large problem size. Overall, MOEA/D has better performance than NSGA-III and MODE in every algorithm performance measurement for small, medium, and large size problems.*

Field of Study:	Industrial Engineering	Student's Signature
		.....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature
		.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะอันเป็นแนวทางเพื่อการปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายตรัยรัตน์ เกิดโภคทรัพย์ และนางสาวกนกพร อารยิกานนท์ รุ่นพี่ผู้คอยสอนงาน ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง และบุคคลรอบข้างทุกคน ผู้เป็นที่รัก ผู้คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนเสมอมา



ธิดา กฤษณพันธ์ุ์

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ลักษณะปัญหาของงานวิจัย.....	6
1.4.1 คำนิยามที่เกี่ยวข้อง.....	6
1.4.2 ข้อจำกัดของปัญหา.....	8
1.4.3 ลักษณะปัญหาปัจจุบัน.....	12
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	19
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2.....	20
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20



2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสายการบิน .....	20
2.1.2 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินแบบหลายวัตถุประสงค์ .....	21
2.1.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ .....	21
2.1.4 การแก้ปัญหการจับคู่เที่ยวบินแบบหลายวัตถุประสงค์ (Objective Function) ....	23
2.1.5 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ .....	26
2.1.6 การวัดสมรรถนะอัลกอริทึม .....	28
2.1.6.1 ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics).....	29
2.1.6.2 ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence-Diversity Metrics) .....	30
2.1.6.3 ตัวชี้วัดด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics) .....	30
2.1.6.4 ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics).....	31
2.1.6.5 ตัวชี้วัดด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม.....	32
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	32
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการปฏิบัติงานของพนักงานสายการบิน.....	33
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมที่ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย .....	41
2.2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเมตาฮีริสติก Metaheuristics.....	41
2.2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D).....	43
2.2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรับรอง (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III).....	44
2.2.2.4 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE) .....	44

บทที่3.....	50
วิธีการดำเนินงานของโปรแกรม OPL.....	50
3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	50
3.2 การนำเข้าข้อมูลของปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน.....	52
3.3 การเขียนรหัสโปรแกรมโอพีแอล.....	53
3.4 การประมวลผลการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินด้วยโปรแกรมโอพีแอล.....	56
บทที่4.....	60
วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก.....	60
(A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D).....	60
4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D ในการแก้ปัญหา.....	61
4.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D.....	64
4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา.....	65
4.3.1 การสร้างค่าน้ำหนักและคำนวณระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนัก.....	65
4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	67
4.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	69
4.3.4 การพัฒนาคำตอบ.....	70
4.3.5 การหาค่าที่ดีที่สุด.....	73
4.3.6 การหยุดอัลกอริทึม.....	74
4.4 การเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึม.....	74
บทที่5.....	76
วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III.....	76
(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III).....	76
5.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-III ในการแก้ปัญหา.....	76

5.2	แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III .....	79
5.3	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา .....	80
5.3.1	สร้างจุดอ้างอิง (Reference point) .....	80
5.3.2	การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	81
5.3.3	การพัฒนาคำตอบ .....	81
5.3.4	คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งสตริงรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก .....	85
5.3.5	จัดเก็บค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกำหนดค่าเป้าหมายของ .....	86
5.3.6	นอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด ....	86
5.3.7	คำนวณหาระยะตั้งฉากระหว่างกลุ่มคำตอบกับจุดอ้างอิงทุกจุด.....	87
5.3.8	เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist).....	97
5.3.9	การหยุดอัลกอริทึม.....	97
5.4	การเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึม.....	98
บทที่ 6	.....	99
	วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์.....	99
	(Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE) .....	99
6.1	ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE ในการแก้ปัญหา .....	100
6.2	แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE.....	102
6.3	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MODE ในการแก้ปัญหา.....	103
6.3.1	การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	103
6.3.2	การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	104
6.3.3	การพัฒนาคำตอบ .....	105
6.3.4	การหาค่าที่ดีที่สุด.....	110
6.3.5	การหยุดการดำเนินงานของอัลกอริทึม .....	112

6.4 การเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึม.....	112
บทที่ 7.....	114
การกำหนดค่าพารามิเตอร์ .....	114
7.1 การทดสอบค่าพารามิเตอร์ .....	114
7.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์.....	115
7.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	116
7.3.1 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา S2 ของ MOEA/D .....	117
7.3.2 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา S2 ของ NSGAIII .....	121
7.3.3 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา S2 ของ MODE .....	125
7.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์.....	129
จากกการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ด้วยโปรแกรม Minitab 17 เพื่อพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึมนั้นๆ แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 95 .....	132
บทที่ 8.....	133
การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม .....	133
8.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม.....	133
8.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม.....	134
8.2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาเล็ก.....	134
8.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหากลาง .....	135
8.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาใหญ่ .....	137
8.3 สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม .....	138
บทที่ 9.....	141
9.1 บทสรุป.....	141
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	142

ภาคผนวก.....	143
บรรณานุกรม .....	150
ประวัติผู้เขียน.....	154



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในการวิจัย.....	6
ตารางที่ 2 ตารางเงื่อนไขเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินและเวลาพักผ่อน .....	9
ตารางที่ 3 ตารางช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุด.....	10
ตารางที่ 4 Hard Constraints และ Soft Constraints.....	11
ตารางที่ 5 Hard Constraints และ Soft Constraints (ต่อ) .....	12
ตารางที่ 6 ข้อมูลนำเข้า .....	26
ตารางที่ 7 ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน .....	26
ตารางที่ 8 รหัสการบินที่มีคู่เที่ยวบินที่เป็นไปได้.....	27
ตารางที่ 9 การคำนวณหาการปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน .....	27
ตารางที่ 10สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
ตารางที่ 11สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ).....	47
ตารางที่ 12สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ).....	48
ตารางที่ 13สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ).....	49
ตารางที่ 14 ข้อมูลนำเข้าท่าอากาศยานพิษณุโลก .....	53
ตารางที่ 15 ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีซีเอ็น (5 component and 2 degree without center and axial points).....	65
ตารางที่ 16 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักที่ประชากร 15 ตัว .....	66
ตารางที่ 17 เซตสตรงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย .....	67
ตารางที่ 18 สตริงคำตอบเริ่มต้น.....	67
ตารางที่ 19 สตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ).....	68
ตารางที่ 20 ถอดรหัสสตริงคำตอบเริ่มต้น.....	68

ตารางที่ 21	ถอดรหัสสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ) .....	69
ตารางที่ 22	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น .....	69
ตารางที่ 23	สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ .....	70
ตารางที่ 24	สตริงคำตอบรุ่นลูก .....	70
ตารางที่ 25	สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 .....	71
ตารางที่ 26	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก.....	71
ตารางที่ 27	ค่าวัตถุประสงค์สูงสุด ( $ffkmax$ ) และต่ำสุด ( $ffkmin$ ) .....	72
ตารางที่ 28	ค่าเป้าหมาย ( $zk *$ ).....	72
ตารางที่ 29	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังทำการนอร์มัลไลซ์.....	72
ตารางที่ 30	ค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงคำตอบรุ่นลูก .....	73
ตารางที่ 31	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังจบเจเนอเรชันที่ 1 .....	73
ตารางที่ 32	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังจบเจเนอเรชันที่ 1 (ต่อ) .....	74
ตารางที่ 33	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1 .....	74
ตารางที่ 34	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1 (ต่อ).....	75
ตารางที่ 35	ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (5 component and 2 degree without center and axial points).....	80
ตารางที่ 36	สตริงคำตอบเริ่มต้น.....	81
ตารางที่ 37	สตริงคำตอบที่ถูกนำไปโครสโอเวอร์ .....	82
ตารางที่ 38	สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ .....	82
ตารางที่ 39	สตริงคำตอบรุ่นลูก .....	83
ตารางที่ 40	สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 .....	83
ตารางที่ 41	สตริงคำตอบที่ถูกนำไปมิวเตชัน .....	83
ตารางที่ 42	สตริงคำตอบที่ถูกนำไปมิวเตชัน (ต่อ).....	84

ตารางที่ 43 ตำแหน่งสตริงคำตอบที่ถูกนำไปมิวเตชัน .....	84
ตารางที่ 44 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก.....	84
ตารางที่ 45 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก (ต่อ).....	85
ตารางที่ 46 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก .....	85
ตารางที่ 47 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก (ต่อ) .....	86
ตารางที่ 48 ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด .....	86
ตารางที่ 49 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ถูกนอร์มัลไลซ์.....	86
ตารางที่ 50 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ถูกนอร์มัลไลซ์ (ต่อ) .....	87
ตารางที่ 51 ค่าเวกเตอร์อ้างอิง.....	87
ตารางที่ 52 ค่าเวกเตอร์อ้างอิง (ต่อ) .....	88
ตารางที่ 53 ค่า $dj, 1(x)$ .....	88
ตารางที่ 54 ค่า $dj, 1(x)(\lambda_j/\lambda_j)$ .....	89
ตารางที่ 55 ค่า $dj, 1(x)$ (ต่อ) .....	90
ตารางที่ 56 ค่า $dj, 1(x)$ (ต่อ) .....	91
ตารางที่ 57 ค่า $dj, 1(x)$ (ต่อ) .....	92
ตารางที่ 58 ค่า $dj, 1(x)$ (ต่อ) .....	93
ตารางที่ 59 $fi(x) - dj, 1(x)(\lambda_j/\lambda_j)$ .....	93
ตารางที่ 60 $fi(x) - dj, 1(x)(\lambda_j/\lambda_j)$ (ต่อ).....	94
ตารางที่ 61 $fi(x) - dj, 1(x)(\lambda_j/\lambda_j)$ (ต่อ).....	95
ตารางที่ 62 ค่า $dj, 2(x)$ .....	96
ตารางที่ 63 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด.....	97
ตารางที่ 64 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1 .....	98
ตารางที่ 65 ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้น .....	103



ตารางที่ 66	ถอดรหัส (Decoding) สตริงคำตอบเริ่มต้น.....	104
ตารางที่ 67	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น .....	104
ตารางที่ 68	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ) .....	105
ตารางที่ 69	ค่าสัม $r_1, r_2$ และ $r_3$ ของสตริงแต่ละเป้าหมายในเจเนอเรชันที่ 1.....	105
ตารางที่ 70	ค่าสัม $r_1, r_2$ และ $r_3$ ของสตริงแต่ละเป้าหมายในเจเนอเรชันที่ 1 (ต่อ).....	106
ตารางที่ 71	ค่ารหัสสตริงกลายเป็นฟีในเจเนอเรชันที่ 1.....	106
ตารางที่ 72	ค่ารหัสสตริงกลายเป็นฟีในเจเนอเรชันที่ 1 (ต่อ).....	107
ตารางที่ 73	ค่าสัมของการครอบโอเวอร์ในเจเนอเรชันที่ 1 .....	107
ตารางที่ 74	ค่ารหัสของสตริงทดลองในเจเนอเรชันที่ 1 .....	108
ตารางที่ 75	สตริงคำตอบทดลองในเจเนอเรชันที่ 1.....	109
ตารางที่ 76	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง .....	109
ตารางที่ 77	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง (ต่อ) .....	110
ตารางที่ 78	ค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ.....	110
ตารางที่ 79	ค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ (ต่อ).....	111
ตารางที่ 80	ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2 .....	111
ตารางที่ 81	ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2 (ต่อ) .....	112
ตารางที่ 82	สตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2 .....	112
ตารางที่ 83	ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1 .....	113
ตารางที่ 84	พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมในงานวิจัย.....	115
ตารางที่ 85	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	116
ตารางที่ 86	ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา S2 .....	117
ตารางที่ 87	ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ NSGAIII ปัญหา S2.....	121
ตารางที่ 88	ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา S2 .....	125

ตารางที่ 89 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S1, S2, S3 และ S4 .....	129
ตารางที่ 90 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S1, S2, S3 และ S4 (ต่อ) .....	130
ตารางที่ 91 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M1, M2, M3 และ M4..	130
ตารางที่ 92 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M1, M2, M3 และ M4 (ต่อ) .....	131
ตารางที่ 93 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L1 และ L4.....	131
ตารางที่ 94 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L1 และ L4 (ต่อ).....	132
ตารางที่ 95 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	132
ตารางที่ 96 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ภาพรวมปัญหา ขนาดเล็ก.....	135
ตารางที่ 97 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ภาพรวมปัญหา ขนาดกลาง .....	136
ตารางที่ 98 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ภาพรวมปัญหา ขนาดใหญ่.....	138
ตารางที่ 99 สรุปผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังการดำเนินงาน 2000 รอบ .....	139
ตารางที่ 100 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละอัลกอริทึมหลังการดำเนินงาน 2000 รอบ.....	140
ตารางที่ 101 ข้อมูลนำเข้า .....	143

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปภาพที่ 1 แผนผังการไหลของวิธีการดำเนินงานจัดตารางปฏิบัติงานนักบิน.....	12
รูปภาพที่ 2 ข้อมูลสนามบินปลายทางของเครื่องบิน โบอิ้ง 737-800.....	13
รูปภาพที่ 3 รายละเอียดเที่ยวบิน.....	14
รูปภาพที่ 4 ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน.....	15
รูปภาพที่ 5 รูปแบบเที่ยวบิน .....	15
รูปภาพที่ 6 วิธีการในการตัดสินใจเลือกจับคู่เที่ยวบิน .....	16
รูปภาพที่ 7 หมายเลขรูปแบบเที่ยวบิน .....	16
รูปภาพที่ 8 เที่ยวบินที่ไม่มีคู่.....	17
รูปภาพที่ 9 ช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่สูงสุด .....	17
รูปภาพที่ 10 ระยะทางการบินสะสม.....	18
รูปภาพที่ 11 ช่วงเวลาพักผ่อน.....	18
รูปภาพที่ 12 Pareto Optimal Solution (Goldberg,1989).....	22
รูปภาพที่ 13 Tchebycheff Approach .....	23
รูปภาพที่ 14 รหัสไฟล์รูปแบบ Sets .....	54
รูปภาพที่ 15 รหัสไฟล์รูปแบบ Parameters .....	54
รูปภาพที่ 16 รหัสไฟล์รูปแบบ Pre-processing .....	54
รูปภาพที่ 17 รหัสไฟล์รูปแบบ Decision Variables.....	55
รูปภาพที่ 18 รหัสไฟล์รูปแบบ Objective Functions.....	55
รูปภาพที่ 19 รหัสไฟล์รูปแบบ Constraints .....	55
รูปภาพที่ 20 รหัสไฟล์รูปแบบ Post-processing .....	56
รูปภาพที่ 21 รหัสไฟล์ข้อมูล (Data File) .....	56

รูปภาพที่ 22 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 1 วัน.....	56
รูปภาพที่ 23 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 2 วัน.....	57
รูปภาพที่ 24 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 3 วัน.....	58
รูปภาพที่ 25 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 4 วัน.....	58
รูปภาพที่ 26 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D.....	64
รูปภาพที่ 27 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1.....	71
รูปภาพที่ 28 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III.....	79
รูปภาพที่ 29 ขั้นตอนการทำงานของ MODE.....	102
รูปภาพที่ 30 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนค่ารหัสของสตริงที่ 1.....	108
รูปภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (MOEA/D).....	118
รูปภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D).....	118
รูปภาพที่ 33 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D).....	119
รูปภาพที่ 34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด Spread ปัญหา S2 (MOEA/D).....	119
รูปภาพที่ 35 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D).....	120
รูปภาพที่ 36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา S2 (MOEA/D).....	120
รูปภาพที่ 37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา S2 (MOEA/D).....	121
รูปภาพที่ 38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (NSGAIII).....	122
รูปภาพที่ 39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (NSGAIII).....	122
รูปภาพที่ 40 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D).....	123
รูปภาพที่ 41 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด Spread ปัญหา S2 (NSGAIII).....	123
รูปภาพที่ 42 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา S2 (NSGAIII).....	124
รูปภาพที่ 43 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา S2 (NSGAIII).....	124
รูปภาพที่ 44 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (MODE).....	126

รูปภาพที่ 45 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (MODE)..... 126

รูปภาพที่ 46 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MODE)..... 127

รูปภาพที่ 47 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด Spread ปัญหา S2 (MODE) ..... 127

รูปภาพที่ 48 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา S2 (MODE) ..... 128

รูปภาพที่ 49 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา S2 (MODE) ..... 128

รูปภาพที่ 50 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก.. 134

รูปภาพที่ 51 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง  
..... 136

รูปภาพที่ 52 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่ 137



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการบินเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดใหญ่ และต้นทุนสูง การลดต้นทุนจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเพิ่มโอกาสในการแข่งขัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสายการบินราคาประหยัด (Low Cost Airline) มีการแข่งขันด้านราคาที่สูง มีการตัดราคาจากสายการบินอื่น แม้รายได้จากค่าโดยสารและน้ำหนักส่วนเกินเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณการขนส่งที่เพิ่มขึ้นแต่ก็ประสบกับปัญหาขาดทุนอย่างต่อเนื่อง

ปัญหาการจัดตารางการดำเนินงานของนักบิน (Crew Scheduling) ประกอบด้วยปัญหา 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน (Crew Pairing) และส่วนที่สองเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการมอบหมายงานให้แก่นักบิน (Crew Rostering) ซึ่งสายการบินราคาประหยัดกรณีศึกษา คือ บริษัท สายการบินนกแอร์ จำกัด (มหาชน) นั้น ไม่ได้ถูกจัดตารางการดำเนินงานของนักบินด้วยโปรแกรมใด ๆ ทั้งสิ้น ด้วยเหตุผลที่ว่าสายการบินดังกล่าวเป็นสายการบินราคาประหยัด ผู้บริหารไม่ชอบที่จะเพิ่มต้นทุนเนื่องจากค่าใช้จ่ายลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ที่ราคาสูง ประกอบกับยังมีจำนวนเครื่องบิน เที่ยวบิน และนักบิน ที่ยังไม่มากนัก จึงยังสามารถจัดตารางการดำเนินงานด้วยพนักงานวางแผนได้ บริษัท สายการบินนกแอร์ จำกัด (มหาชน) ได้พัฒนาโปรแกรมอย่างง่ายด้วยโปรแกรม Excel เพื่อใช้ในการจัดตารางการดำเนินงาน นอกจากนี้การจัดตารางการดำเนินงานอาศัยประสบการณ์ของพนักงานวางแผนเป็นหลัก โดยยังไม่มีเครื่องมือที่ช่วยในการจัดตารางการดำเนินงานของนักบิน

อย่างไรก็ตามตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา สายการบินกรณีศึกษามีจำนวนผู้โดยสารที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีการเพิ่มสูงจำนวนเครื่องบินเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสาร ส่งผลให้มีจำนวนเที่ยวบินที่เพิ่มสูงขึ้น และเนื่องจากปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นนี้ ทำให้พนักงานวางแผนจัดตารางการดำเนินงานได้ตามเที่ยวบินที่มีอยู่เท่านั้น แต่ไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ภาระงานที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่เท่าเทียม ทำให้ต้องจ้างนักบินเพิ่มจากสายการบินอื่น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านการจัดตารางเพิ่มสูงขึ้นมาก

สำหรับปัญหาการจัดตารางการปฏิบัติงาน หากสามารถจัดการให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยลดค่าใช้จ่าย ทั้งนี้จะต้องไม่ขัดกับข้อบังคับ ระเบียบทางการบินของรัฐ สำนักงานการบินพล

เรือนแห่งประเทศไทย องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) และกฎของสายการบิน ก็จะทำให้สายการบินสามารถบริการได้ทุกเที่ยวบินตามที่มีการเปิดจำหน่ายบัตรโดยสาร มีการเพิ่มเส้นทางการบินที่เพิ่มขึ้นอย่างครอบคลุมทุกภูมิภาค นักบินแต่ละคนมีภาระงานเท่าเทียมกัน อย่างไรก็ตามก็ประสบปัญหาหนึ่งที่สายการบินไม่สามารถให้บริการเที่ยวบินได้ตามแผน เพราะมีจำนวนนักบินไม่เพียงพอ เนื่องจากชั่วโมงบินเกินกำหนด เวลาพักผ่อนไม่เพียงพอ ทำให้นักบินไม่พร้อมต่อการปฏิบัติหน้าที่ ปัญหาเหล่านี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจริงและทำให้สายการบินกรณีศึกษาขาดความน่าเชื่อถือ ส่งผลให้ผู้โดยสารซึ่งเป็นลูกค้าปัจจุบันหันไปใช้บริการสายการบินอื่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน ซึ่งเป็นส่วนแรกในปัญหาการจัดตารางการดำเนินงานของนักบิน

ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินแบบมากวัตถุประสงค์ถูกจัดเป็นปัญหาประเภทเอ็นพี-ฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard หรือ NP-Hard) เนื่องจากมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ หากใช้สมการเชิงคณิตศาสตร์มาแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนาน และมีจำนวนคำตอบที่มาก ดังนั้นจึงมีการนำวิธีทางเมตาฮีวิริสติกเข้ามาช่วยแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problems: MOPs) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับได้ในเวลาที่สั้นลง ตัวอย่างเช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms: GA) เป็นวิธีการเมตาฮีวิริสติกที่นิยมนำมาใช้แก้ปัญหาการจัดลำดับการผลิต เพราะเป็นวิธีการที่ให้คำตอบใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ไม่มาก

ปัจจุบันปัญหาที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมการบินรวมถึงปัญหาการจับคู่เที่ยวบินมีจำนวนวัตถุประสงค์มากกว่า 3 วัตถุประสงค์ ซึ่งอาจจะขัดแย้งกันแต่ต้องพิจารณาพร้อมกัน เรียกปัญหานี้ว่าปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) เนื่องจากเป็นปัญหาที่มีมิติของแกนเวกเตอร์มาก หรือมีจำนวนวัตถุประสงค์ที่มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) ลดลง และแก้ปัญหา MaOPs ได้ไม่ดีเท่าที่ควร (He & Yen, 2016; Teodorovic & Lucic, 1998)

วิธีการ MOEAs ส่วนใหญ่ จะใช้การพิจารณาคำตอบโดยรวม ด้วยการจัดอันดับของคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำหรือเรียกว่าวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-based Approach) วิธีการนี้มี

ความซับซ้อน ใช้เวลามาก และยากที่จะเกิดสมมูลของความหลากหลายรวมถึงการลู่เข้าของคำตอบ (Hui & Qingfu, 2006) เนื่องจากการมีวัตถุประสงค์ที่มาก ทำให้เกิดการกระจุกตัวของคำตอบที่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (1<sup>st</sup> frontier) ส่งผลให้ทิศทางของการพัฒนาคำตอบติดอยู่ในคำตอบที่ดีเฉพาะกลุ่ม (Local Optima)

การแก้ปัญหา MaOPs อาจทำได้โดยการลดจำนวนวัตถุประสงค์ลง ด้วยการรวมวัตถุประสงค์ที่ไม่ขัดแย้งกันไว้เป็นวัตถุประสงค์เดียว (Brockhoff & Zitzler, 2009) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้กับหลายปัญหาในทางปฏิบัติ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MaOEAs) จึงถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งหนึ่งในอัลกอริทึมที่โดดเด่นของ MaOEAs คือ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition : MOEA/D) ถูกพัฒนาโดย Qingfu and Hui (2007) วิธีการดำเนินงานของ MOEA/D คือการที่จะทำการจำแนกปัญหา MaOP ออกเป็นปัญหาย่อย และทำการแก้ปัญหาย่อยไปพร้อมกัน ซึ่งแต่ละปัญหาย่อยนั้นจะได้คำตอบที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution: MODE) ซึ่งมีหลักการในการแก้ปัญหาคือสร้างเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อให้ได้เวกเตอร์ทดลองแล้วเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย และเลือกคำตอบจากวิธีการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) (Storn & Price, 1996)

เนื่องจากการแก้ปัญหา MaOPs นอกจากจะให้คำตอบที่มีจำนวนมากและไม่รู้ขอบเขตที่ชัดเจน อีกทั้งยังต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ วิธีการแก้ปัญหาเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสูงของ MaOEAs จึงเป็นอัลกอริทึมทางเลือก เพราะอัลกอริทึมนี้สามารถค้นหากลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto optimal solutions) ได้ในเจเนอเรชันเดียว และไม่เกิดการกระจุกตัวของคำตอบ เนื่องจากการค้นหาคำตอบแต่ละปัญหาย่อย ทำให้มีการกำหนดทิศทางและขอบเขตของคำตอบในแต่ละปัญหาย่อยที่ชัดเจน อีกทั้งมีความซับซ้อนและใช้เวลาน้อยกว่าอัลกอริทึมอื่น เช่น วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) รวมถึง



ยังให้คำตอบที่หลากหลาย ซึ่งอัลกอริทึมนี้จะให้คำตอบที่ดีและแตกต่างกับอัลกอริทึมอื่นอย่างชัดเจน เมื่อมีวัตถุประสงค์ตั้งแต่ 4 ถึง 15 วัตถุประสงค์ (Qingfu & Hui, 2007)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE) โดยมีวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดจำนวน 5 วัตถุประสงค์ ดังนี้ 1) เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด (Minimizing idle time) 2) ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียม (Balance workload) 3) ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด (Minimizing the difference of nautical mile between each flight code) 4) เส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุด (Minimizing repeat flight leg) 5) จำนวนคู่นักบินน้อยที่สุด (Minimizing number of pair of cockpit crews) ทั้งนี้การจับคู่เที่ยวบินแบบมากวัตถุประสงค์จะต้องอยู่ภายใต้ข้อบังคับ ระเบียบทางการบินของรัฐ สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) และกฎของสายการบิน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมที่ช่วยแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ระหว่างวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการจัดตารางการปฏิบัติงานนักบิน เฉพาะปัญหาการจับคู่เที่ยวบินสำหรับเครื่องบินประเภทเดียว คือ โบอิง 737-800 เครื่องบินจำนวน 21 ลำ เส้นทางการบินภายในประเทศ มีฐานการบิน 1 ฐาน โดยฐานที่เป็นจุดเริ่มต้น คือ สนามบินดอนเมือง และมี

สนามบินปลายทาง 14 แห่ง พิจารณาเฉพาะเที่ยวบินที่มีการเปิดบริการทั้งขาไปและกลับ จำนวนสูงสุด 6 เที่ยวบิน (3 คู่เที่ยวบิน) เวลาดำเนินการระหว่างเที่ยวบิน 30 นาที

2. อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับแก้ปัญหา: วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)

3. การหาคำตอบของปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัด มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ก. เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด (Minimizing idle time)
- ข. ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน (Balance workload)
- ค. ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด (Minimizing the difference of nautical mile between each flight code)
- ง. เส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุด (Minimizing repeat flight leg)
- จ. จำนวนคู่นักบินน้อยที่สุด (Minimizing number of pair of cockpit crews)

4. การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ใช้ตัวชี้วัด 5 ประเภท ดังนี้

- ก. การลู่เข้าของคำตอบ (Generational Distance: GD)
- ข. การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance: IGD)
- ค. การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread)
- ง. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I: RNDSI)
- จ. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II: RNDII)
- ฉ. เวลาในการดำเนินงาน (Computational Time: CPU Time)

5.งานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานการทดลองดัดแปลงจาก Mansouri (2005) ในการทดสอบแบ่งปัญหาออกเป็น 3ประเภท ดังนี้

- ก. ปัญหาขนาดเล็กประกอบด้วย Set 1, 2, 3 และ 4
- ข. ปัญหาขนาดกลางประกอบด้วย Set 5, 6, 7 และ 8
- ค. ปัญหาขนาดใหญ่ประกอบด้วย Set 9 และ 10

ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของปัญหาที่ทำการศึกษาในการวิจัย

ปัญหาการทดลอง			ความยาวสตริง(คู่เที่ยวบิน)
Small	Set1	S1	10
	Set2	S2	20
	Set3	S3	30
	Set4	S4	40
Medium	Set5	S5	50
	Set6	S6	60
	Set7	S7	70
	Set8	S8	76
Large	Set9	S9	100
	Set10	S10	141

#### 1.4 ลักษณะปัญหาของงานวิจัย

##### 1.4.1 คำนิยามที่เกี่ยวข้อง

นักบินผู้ควบคุมอากาศยาน (Pilot – in – command) หมายความว่า นักบินที่ได้รับมอบหมายจากผู้ได้รับใบรับรองผู้ดำเนินการอากาศ ให้ปฏิบัติหน้าที่เป็นผู้ควบคุมอากาศยานในการปฏิบัติการบินเพื่อความปลอดภัย โดยต้องได้รับมอบหมายให้ปฏิบัติหน้าที่ได้ทั้งก่อนหรือระหว่างปฏิบัติการบินก็ได้

นักบินผู้ช่วย (Co - Pilot) หมายความว่า นักบินที่ได้รับมอบหมายจากผู้ได้รับใบรับรองผู้ดำเนินการอากาศ โดยให้ปฏิบัติหน้าที่ตำแหน่งนักบินในกรณีของเครื่องบิน เว้นแต่นักบินที่ปฏิบัติการบินตามความมุ่งหมายเพื่อรับการสอนให้ปฏิบัติการบิน

ชั่วโมงบิน (Flight Time/ Block Time) หมายความว่า เวลาตั้งแต่อากาศยานเริ่มเคลื่อนที่จากหลุมจอดของสนามบินต้นทาง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อการวิ่งขึ้นจนกระทั่งอากาศยานสิ้นสุดการเดินทาง ณ หลุมจอดของสนามบินปลายทางและเครื่องยนต์ทุกเครื่องดับหรือใบพัดทุกใบหยุด

ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน (Flight Duty Period ; FDP) หมายความว่า เวลาซึ่งลูกเรือเริ่มปฏิบัติหน้าที่ โดยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินของเที่ยวบินหนึ่งหรือการบินต่อเนื่องให้เริ่มนับตั้งแต่เวลา 1 ชั่วโมงก่อนตารางการวิ่งขึ้น (Scheduled Departure Time) และหยุดนับจนถึง 30 นาที ภายหลังจากการร่อนลงครั้งสุดท้าย ทั้งนี้ ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินดังกล่าว ให้หมายรวมถึงการฝึกอบรมในเครื่องช่วยฝึกบิน (Full Flight Simulator; FFS), การย้ายที่เพื่อไปปฏิบัติหน้าที่การบิน โดยการย้ายที่ดังกล่าวไม่นับเป็นจำนวนเที่ยว (Sector)

ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่ (Duty Period) หมายความว่า ช่วงเวลาต่อเนื่องที่ลูกเรือปฏิบัติหน้าที่การบินหรือเป็นผู้โดยสาร รวมถึงการปฏิบัติหน้าที่เป็นช่วงที่มีเวลาพักผ่อนระหว่างช่วงน้อยกว่า 8 ชั่วโมง การย้ายที่ การปฏิบัติหน้าที่ภาคพื้น การตรวจร่างกายตามวาระของผู้ประจำหน้าที่ ตลอดจนการฝึกอบรมภาคพื้นและการเรียนการสอนในเครื่องช่วยฝึกบิน และการรอ ตามที่ผู้ดำเนินการอากาศกำหนด เว้นแต่เป็นการรอ ณ ที่พัก หรือสถานที่พักผ่อนที่เหมาะสมไม่ให้นับเป็นช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่

ช่วงเวลาพักผ่อน (Rest Period) หมายความว่า ช่วงเวลาที่ลูกเรือพ้นจากการปฏิบัติหน้าที่ที่ได้รับมอบหมายจากผู้ดำเนินการเดินอากาศ ซึ่งถ้าเป็นกรณีปฏิบัติหน้าที่การบิน ช่วงเวลาพักผ่อนให้เริ่มนับตั้งแต่เวลา 30 นาทีหลังจากเวลา on-block และหยุดนับจนถึงเวลา 1 ชั่วโมงก่อนตารางการวิ่งขึ้น

เที่ยว (Sector) หมายความว่า จำนวนครั้ง เริ่มนับตั้งแต่อากาศยานเคลื่อนที่ภายใต้กำลังขับเคลื่อนของอากาศยานเองไปจนหยุดหลังลงจอด ณ หลุมจอด

คู่เที่ยวบิน (Pairing) หมายความว่า เส้นทางที่มีฐานเดียวกัน ทำการบินไปยังจุดหมายปลายทางนับเป็นการบิน 1 เที่ยวบิน และเส้นทางที่ทำการบินกลับมายังจุดเริ่มต้น นับเป็นการบิน 1 เที่ยวบิน โดย 1 เที่ยวบิน และ 1 เที่ยวบิน นับเป็น 1 คู่เที่ยวบิน

รูปแบบเที่ยวบิน (Flight Pattern) หมายความว่า การจัดสรรคู่เที่ยวบินต่อเนื่องกันสำหรับตารางการปฏิบัติงานของพนักงานการบินในรอบวันนั้นๆ ซึ่งเป็นการนำตารางคู่เที่ยวบินมาพิจารณารูปแบบเที่ยวบินให้พนักงานการบินดำเนินงานตามเวลาต่อเนื่องได้อย่างเหมาะสมภายใต้ข้อจำกัด เช่น ข้อจำกัดเรื่องเวลาปฏิบัติหน้าที่ (Flight Duty Period Limitation) เป็นต้น

เวลาระหว่างเที่ยวบิน (Sit Time) หมายความว่า ช่วงเวลาระหว่างการบินต่อเนื่องให้เริ่มนับตั้งแต่เวลา 15 นาที ภายหลังจากการร่อนลงของเที่ยวบินแรก และนับต่ออีก 15 นาที ก่อนตารางการวิ่งขึ้นของเที่ยวบินถัดไป

รหัสการบิน (Code) หมายความว่า รหัสที่ประกอบไปด้วยคู่เที่ยวบินที่ถูกจัดสรร จำนวน 1-3 คู่เที่ยวบิน

ตารางคู่เที่ยวบิน (Flight Rotation Plan) หมายความว่า ตารางที่ได้จัดสรรคู่เที่ยวบินสำหรับเครื่องบินแต่ละลำ โดยมีเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดต่อเนื่องกันของแต่ละวันที่ทำการบินในระยะเวลา 1 เดือน

#### 1.4.2 ข้อจำกัดของปัญหา

ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ซึ่งประกอบด้วยเที่ยวบินและนักบินที่มีจำนวนมาก การที่จับคู่เที่ยวบินและมอบหมายงานให้แก่ักบินแต่ละคนนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงจำนวนชั่วโมงบินสะสมรายวัน รายสัปดาห์ และรายเดือน ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน ช่วงเวลาพักผ่อน วันหยุด วันฝึกอบรมทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติทางอากาศ จำนวนนักบินตามช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน จะต้องเป็นไปตามประกาศสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย โดยมีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับการจับคู่เที่ยวบินที่อากาศยานทำการบินไปและกลับที่ฐานเดียวกัน ซึ่งแต่ละคู่เที่ยวบินจะมีทั้งระยะเวลาการบินและระยะทางการบินที่แตกต่างกัน จะถูกใช้ในการประกอบการพิจารณามอบหมายงานให้แก่ักบินแต่ละคนโดยจะต้องตรงตามวัตถุประสงค์

ทั้งนี้จะต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดที่ได้กำหนดไว้ ผู้วิจัยจึงใช้วิธีฮิวริสติกเพื่อหาคำตอบเริ่มต้นของปัญหาและใช้วิธีทางเมตาฮิวริสติกเพื่อพัฒนาคำตอบเริ่มต้นและลดระยะเวลาค้นหาคำตอบ

ของปัญหา ซึ่งในการวางแผนการจับคู่เที่ยวบินโดยทั่วไปจะพิจารณาตามกฎและข้อบังคับ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ช่วงเวลาพักผ่อน (Rest time between tasks) เป็นข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับช่วงเวลา โดยจะทำการพิจารณา เป็นวัน เวลา จำนวนชั่วโมงที่นักบินปฏิบัติงานของเที่ยวบินก่อนหน้า เพื่อคำนวณหาเวลาที่เหมาะสมในการเริ่มต้นปฏิบัติหน้าที่ในเที่ยวบินถัดไป ทั้งนี้จะต้องสอดคล้องกับช่วงเวลาพักผ่อน ตามที่สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทยได้ประกาศไว้ตามตารางเงื่อนไขเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินและเวลาพักผ่อน แสดงตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ตารางเงื่อนไขเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินและเวลาพักผ่อน

เวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน	ช่วงเวลาพักผ่อน
< 8 ชั่วโมง	≥ 8 ชั่วโมง
8 – 10 ชั่วโมง	≥ 10 ชั่วโมง
10 – 12 ชั่วโมง	≥ 12 ชั่วโมง
12 – 14 ชั่วโมง	≥ 14 ชั่วโมง
14 – 16 ชั่วโมง	≥ 16 ชั่วโมง
16 – 20 ชั่วโมง	≥ 24 ชั่วโมง

- ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินไม่เกิน 8 ชั่วโมง ต้องมีช่วงเวลาพักผ่อนต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 8 ชั่วโมง จึงสามารถให้ปฏิบัติหน้าที่การบินต่อไปได้

- ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินมากกว่า 8 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 10 ชั่วโมง ต้องมีช่วงเวลาพักผ่อนต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 10 ชั่วโมง จึงสามารถให้ปฏิบัติหน้าที่การบินต่อไปได้

- ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินมากกว่า 10 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 12 ชั่วโมง ต้องมีช่วงเวลาพักผ่อนต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง จึงสามารถให้ปฏิบัติหน้าที่การบินต่อไปได้

- ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินมากกว่า 12 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 14 ชั่วโมง ต้องมีช่วงเวลาพักผ่อนต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 14 ชั่วโมง จึงสามารถให้ปฏิบัติหน้าที่การบินต่อไปได้

- ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินมากกว่า 14 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 16 ชั่วโมง ต้องมีช่วงเวลาพักผ่อนต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง จึงสามารถให้ปฏิบัติหน้าที่การบินต่อไปได้

- ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินมากกว่า 16 ชั่วโมง แต่ไม่เกิน 20 ชั่วโมง ต้องมีช่วงเวลาดักผ่อนต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จึงสามารถให้ปฏิบัติหน้าที่การบินต่อไปได้

2. ชั่วโมงการบินสะสม (Accumulated values) เป็นข้อจำกัดของสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย โดยรูปแบบเที่ยวบินของสายการบินกรณีศึกษา จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดนี้ ตามที่สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย ได้ประกาศไว้ ดังนี้

- ภายในทุกๆ 7 วันต่อเนื่องกัน ลูกเรือหรือนักบิน จะมีชั่วโมงบินได้ไม่เกิน 34 ชั่วโมง
- ภายในทุกๆ 28 วันต่อเนื่องกัน ลูกเรือหรือนักบิน จะมีชั่วโมงบินได้ไม่เกิน 110 ชั่วโมง
- ภายในทุกๆ 365 วันต่อเนื่องกัน ลูกเรือหรือนักบิน จะมีชั่วโมงบินได้ไม่เกิน 1000 ชั่วโมง

3. ช่วงเวลาในการปฏิบัติหน้าที่การบินและชั่วโมงบิน เป็นข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุด (ชั่วโมง) ที่สามารถปฏิบัติได้ในแต่ละเที่ยวบินต่อ 1 วัน ทั้งนี้จะมีความแตกต่างกันขึ้นกับเวลาท้องถิ่น ณ จุดเริ่มต้น โดยรูปแบบเที่ยวบินของสายการบินกรณีศึกษา จะต้องสอดคล้องกับข้อจำกัดนี้ภายใต้ประกาศสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย แสดงตามตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 3 ตารางช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุด

ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุด (ชั่วโมง)							
เวลาท้องถิ่น ณ จุดเริ่มต้น	เที่ยว						
	1	2	3	4	5	6	7 หรือ มากกว่า
05.00 – 05.59	13	13	12	12	12	11	11
06.00 – 12.59	13.30	13.30	13	12	12	12	11
13.00 – 14.59	13	13	12	12	12	11	11
15.00 – 04.59	12	12	11	11	11	10	10

บางเส้นทางการบินมีจำนวนชั่วโมงบินที่เท่ากัน หรืออาจมีระยะทางแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการคิดค่าใช้จ่ายสำหรับนักบิน จะพิจารณาจากระยะทางการบินเป็นหลัก ส่วน

จำนวนชั่วโมงบินจะนำมาใช้ในการพิจารณาในข้อจำกัดตามที่สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย ได้ประกาศไว้

4. กฎที่กำหนดขึ้น (Artificial Rules) เป็นกฎที่พิจารณานอกเหนือจากกฎหมาย ข้อบังคับ ระเบียบทางการบินของรัฐ สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (ICAO) กฎของสายการบิน แต่เป็นกฎที่พิจารณาถึงคุณภาพของการจัดการ การดำเนินงาน เป็นข้อตกลงที่นักบินได้ทำสัญญากับสายการบินไว้ ซึ่งอ้างอิงหลักจากประสบการณ์ของพนักงานวางแผน โดยจะเป็นข้อจำกัดเพิ่มเติมที่สายการบินได้กำหนดขึ้น มีดังนี้

1. การแก้ปัญหาเหตุการณ์ที่ไม่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้น (Robustness of the solution) เช่น แผนสำรองเพื่อป้องกันการล่าช้าหรือเหตุที่ทำให้มีการหยุดชะงักระหว่าง การปฏิบัติงาน (Plan a Buffer of Delay) อย่างไรก็ตาม การวางแผนการจัดการปฏิบัติงานของ นักบินนี้ ท่ามกลางเหตุการณ์ต่างๆนี้ จะต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น

2. วิธีการสำหรับการสนับสนุนงาน (Support for Solution Methods) เป็น ข้อตกลงที่ทางสายการบินทำขึ้น โดยได้กำหนดขอบเขตช่วงเวลาระหว่างเปลี่ยนเที่ยวบิน อย่าง น้อย 30 นาที สำหรับเที่ยวบินที่ใช้เครื่องบินเดิมที่ทำการบินภายในประเทศ และมีการเพิ่มเส้นทาง การบินที่เป็นแหล่งท่องเที่ยว

ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินนี้ หากพิจารณาข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาจะสามารถแบ่ง ข้อจำกัดได้เป็น Hard Constraints และ Soft Constraints ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Hard Constraints และ Soft Constraints

Hard Constraints	Soft Constraints
1. ข้อจำกัดด้านจำนวนชั่วโมงบินสะสมราย สัปดาห์ของนักบิน	1. ข้อตกลงของสายการบินที่เป็นวิธีการสำหรับ การสนับสนุนงาน (Support for Solution Methods) โดยเพิ่มเส้นทางการบินที่เป็นแหล่ง ท่องเที่ยวในช่วงวันหยุดติดต่อกัน

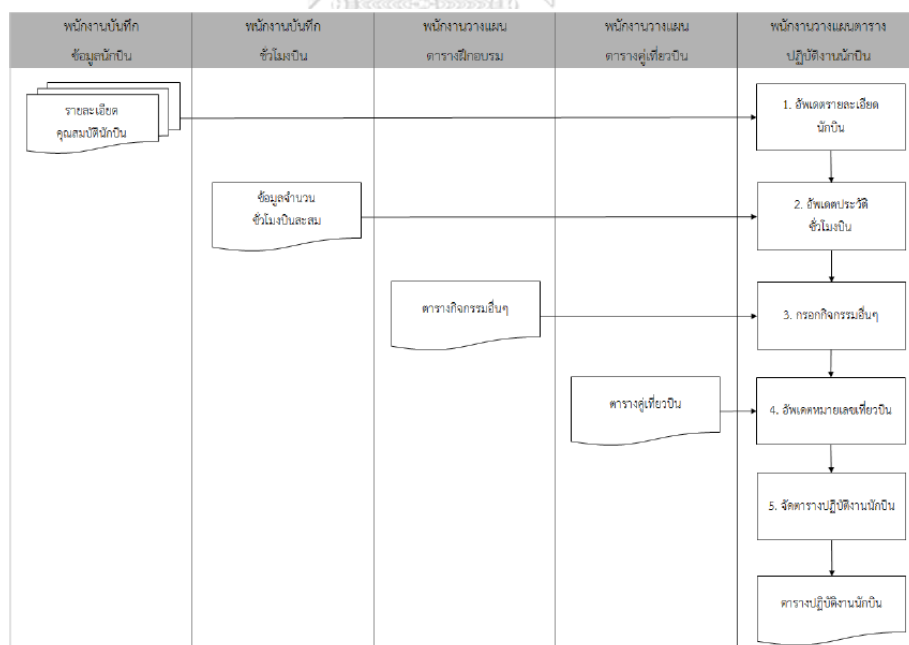


ตารางที่ 5 Hard Constraints และ Soft Constraints (ต่อ)

2. ข้อจำกัดด้านเวลาพักผ่อนตามประกาศของสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย	2. ข้อตกลงช่วงเวลาระหว่างเปลี่ยนเที่ยวบินอย่างน้อย 30 นาที สำหรับเที่ยวบินที่ใช้เครื่องบินเดิมที่ทำการบินภายในประเทศ
3. ข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุด (ชั่วโมง) ที่สามารถปฏิบัติได้ในแต่ละเที่ยวบินต่อ 1 วัน	3. ข้อจำกัดคู่เที่ยวบิน ต้องไม่มีเที่ยวบินขาเดียว คือมีแค่ขาไปหรือขากลับ แต่ต้องมีทั้งขาไปและขากลับ

### 1.4.3 ลักษณะปัญหาปัจจุบัน

การจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดกรณีศึกษาเป็นขั้นตอนแรกในการจัดตารางการปฏิบัติงานของนักบิน ซึ่งสายการบินกรณีศึกษามีขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูล การจับคู่เที่ยวบิน และการจัดสรรคู่เที่ยวบินให้นักบินรวมถึงการตรวจสอบความถูกต้อง ปัจจุบันวิธีการจัดตารางการปฏิบัติงานของนักบินสามารถสรุปเป็นแผนผังการไหลของวิธีการดำเนินงาน ดังรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1 แผนผังการไหลของวิธีการดำเนินงานจัดตารางปฏิบัติงานนักบิน

ขั้นตอนที่ 1 การจัดเตรียมข้อมูล พนักงานวางแผนจะทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง สำหรับการจับคู่เที่ยวบินจากหน่วยงานอื่นๆ มาเตรียมไว้แล้วอัปเดตข้อมูลในตารางข้อมูล สนามบินปลายทางของเครื่องบินโบอิง 737-800 ซึ่งประกอบด้วย ประเภทเครื่องบิน ชื่อย่อ สนามบินปลายทาง (IATA) ชื่อเต็มสนามบินปลายทาง ภูมิภาค จำนวนไมล์ทะเล ดังรูปภาพที่ 2

No	Destination-Airport		Region	Mile
	IATA	City		
1	CEI	Chiang Rai	North	420
2	CNX	Chiang Mai	North	353
3	NNT	Nan	North	310
4	UTH	Udon Thani	NorthEast	280
5	UBP	Ubon Ratchathani	NorthEast	300
6	SNO	Sakon Nakhon	NorthEast	326
7	BFV	Buriram	NorthEast	199
8	PHS	Phitsanulok	North	200
9	NST	Nakhon Sri Thammarat	South	374
10	URT	Surat Thani	South	345
11	HDY	Hat Yai	South	482
12	TST	Trang	South	448
13	HKT	Phuket	South	430
14	KBV	Krabi	South	417

รูปภาพที่ 2 ข้อมูลสนามบินปลายทางของเครื่องบิน โบอิง 737-800

นอกจากตารางข้อมูลสนามบินปลายทางของเครื่องบิน โบอิง 737-800 แล้ว พนักงานวางแผน จะต้องทำการกรอกข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. อัปเดตรายละเอียดเที่ยวบิน พนักงานวางแผนจะทำการอัปเดตหมายเลขเที่ยวบินโดย ยึดรหัสจาก IATA ซึ่งขึ้นต้นด้วย DD ตามด้วยหมายเลขอีก 4 หลัก โดยที่เลขหลักแรกทางด้านซ้าย หมายถึงภูมิภาคที่ทำการบิน ประกอบด้วยเลข 8 คือภาคเหนือ 9 คือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และ 7 คือภาคใต้ เลขหลักต่อมา หมายถึงลำดับจังหวัดในแต่ละภูมิภาค และสองหลักสุดท้าย หมายถึงลำดับที่ทำการบินโดยเรียงตามลำดับเวลาที่เข้าที่สุด ซึ่งจะทำให้ทราบถึงรายละเอียด เกี่ยวกับหมายเลขเที่ยวบินได้เพียงคร่าวๆ เนื่องจากเลขสองหลักสุดท้ายจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เช่น DD8714 หมายถึงภาคเหนือ จังหวัดเชียงราย เป็นต้น ทั้งนี้ในแต่ละหมายเลขเที่ยวบิน (Flight No.) จะประกอบด้วยสนามบินต้นทาง (From) สนามบินปลายทาง (To) เวลาที่เครื่องบิน ทำการบินออกจากสนามบินต้นทาง (Departure) เวลาที่เครื่องบินทำการบิน (Block Hour) เวลาที่เครื่องบินทำการบินถึงสนามบินปลายทาง (Arrival) ระยะทางที่เครื่องบินทำการบิน (Nautical Mile) ดังรูปภาพที่ 3

Flight No.	From	To	Departure	Block Hour	Arrival	Nautical Mile
DD8714	DMK	CEI	7:20	1:20	8:40	420
DD8718	DMK	CEI	13:20	1:20	14:40	420
DD8722	DMK	CEI	16:55	1:20	18:15	420
DD8715	CEI	DMK	9:20	1:15	10:35	420
DD8719	CEI	DMK	15:10	1:15	16:25	420
DD8723	CEI	DMK	18:45	1:20	20:05	420

### รูปภาพที่ 3 รายละเอียดเที่ยวบิน

2. อัปเดตช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน พนักงานวางแผนจะทำการอัปเดตเวลาที่เริ่มปฏิบัติหน้าที่การบิน โดยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินของเที่ยวบินหนึ่งหรือการบินต่อเนื่องให้เริ่มนับตั้งแต่เวลา 1 ชั่วโมงก่อนตารางการวิ่งขึ้น (Scheduled Departure Time) หรือ Brief Time และหยุดนับจนถึง 30 นาที หรือ Debrief Time ภายหลังจากการร่อนลงครั้งสุดท้าย เช่น หากต้องการจะทำการจับคู่เที่ยวบิน 4 เที่ยวบิน ให้พิจารณาเพิ่มเวลา 1 ชั่วโมงก่อนตารางการวิ่งขึ้น เพิ่มเวลา 30 นาทีระหว่างเที่ยวบิน (Sit Time) ที่ 1-2-3-4 (15 นาทีปล่อยคนเข้าและ 15 นาทีปล่อยคนออก) และเพิ่ม 30 นาทีภายหลังจากการร่อนลงครั้งที่ 4 กรณีที่มีเที่ยวบินแรกเป็นเที่ยวบินขาไป คือ DD8718 เวลาที่เริ่มในการปฏิบัติหน้าที่ คือเวลา 12:20 น. ซึ่งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนตารางการวิ่งขึ้น (13:20 น.) และเนื่องจากเที่ยวบินนี้จะทำการบินถึงสถานีปลายทางที่เวลา 14:40 น. และใช้เวลาในการปล่อยคนออกจากเครื่องบิน ลำเลียงสัมภาระออก อีกอย่างน้อย 15 นาที เที่ยวบินนี้จึงจบงานที่เวลา 14:55 น. เที่ยวบินขากลับที่ดีที่สุดในกรณีนี้คือ DD8719 เนื่องจากไม่มีเวลารว่างระหว่างเที่ยวบิน (No Idle time) ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเพิ่มเวลาจอดที่หลุมจอด ซึ่งเวลาที่เริ่มในการปฏิบัติหน้าที่ คือเวลา 14:55 น. และใช้เวลาในการปล่อยคนเข้า เก็บสัมภาระ (Sit time) อีกอย่างน้อย 15 นาที ก่อนตารางการวิ่งขึ้น (15:10 น.) และเนื่องจากเที่ยวบินนี้จะทำการบินถึงสถานีปลายทางที่เวลา 16:25 น. และใช้เวลาในการปล่อยคน ลำเลียงสัมภาระออก อีกอย่างน้อย 15 นาที เที่ยวบินนี้จึงจบงานที่เวลา 16:40 น. เนื่องจากเที่ยวบิน DD8719 ไม่ใช่เที่ยวบินสุดท้าย จึงเพิ่มเวลาปฏิบัติงานหลังจากเครื่องบินถึงสนามบินปลายทางเพียง 15 นาที ในทางกลับกัน หากเป็นเที่ยวบินสุดท้าย จะต้องเพิ่มเวลาปฏิบัติงานหลังจากเครื่องบินถึงสนามบินปลายทางเป็น 30 นาที ซึ่งจะจบงานที่เวลา 16:55 น. ดังรูปภาพที่ 4

1									
Don Mueang (DMK) to Chiang Rai (CEI)									
Flight No.	From	To	Duty Start Before		Departure	Block Hou	Arrival	Sit	End
DD8714	DMK	CEI	6:20	1:00	7:20	1:20	8:40	0:15	8:55
DD8718	DMK	CEI	12:20	1:00	13:20	1:20	14:40	0:15	14:55
DD8722	DMK	CEI	15:55	1:00	16:55	1:20	18:15	0:15	18:30

2									
Chiang Rai (CEI) to Don Mueang (DMK)									
Flight No.	From	To	Duty Start Before		Departure	Block Hou	Arrival	After	End
DD8715	CEI	DMK	9:05	0:15	9:20	1:15	10:35	0:15	10:50
DD8719	CEI	DMK	14:55	0:15	15:10	1:15	16:25	0:15	16:40
DD8723	CEI	DMK	18:30	0:15	18:45	1:20	20:05	0:15	20:20

รูปภาพที่ 4 ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน

3. อัปเดตรูปแบบเที่ยวบิน พนักงานวางแผนจะทำการอัปเดตรูปแบบเที่ยวบิน ซึ่งแต่ละวันในสัปดาห์จะมีรูปแบบเที่ยวบินที่เปิดให้บริการแตกต่างกัน ดังรูปภาพที่ 5

**Bangkok (Don Mueang) To Chiang Rai**

Flight detail	Wed 29 Aug	Thu 30 Aug	Fri 31 Aug	Sat 1 Sep	Sun 2 Sep	Mon 3 Sep	Tue 4 Sep
07:20 → 08:40 1hr 20min   DD8714	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
13:20 → 14:40 1hr 20min   DD8718	✕		✕		✕	✕	
16:55 → 18:15 1hr 20min   DD8722	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕

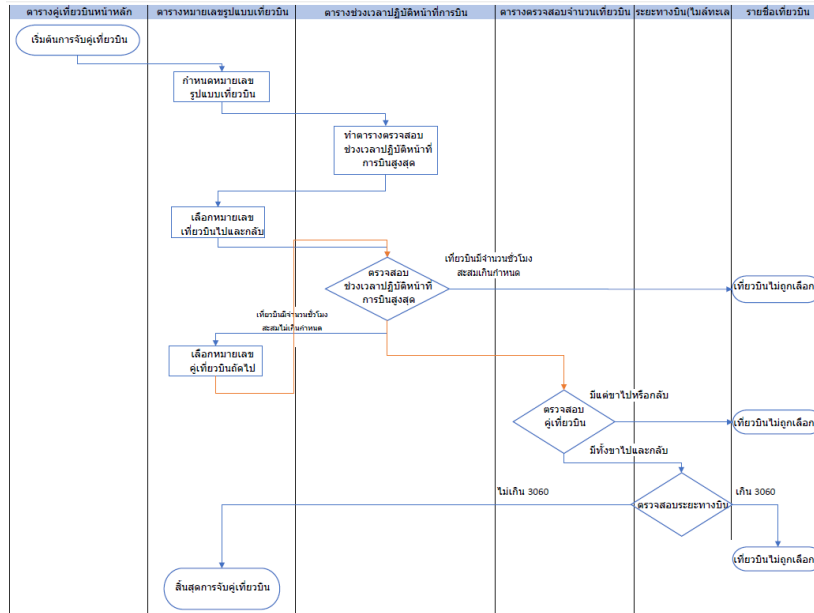
**Chiang Rai To Bangkok (Don Mueang)**

Flight detail	Wed 29 Aug	Thu 30 Aug	Fri 31 Aug	Sat 1 Sep	Sun 2 Sep	Mon 3 Sep	Tue 4 Sep
09:20 → 10:35 1hr 15min   DD8715	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕
15:10 → 16:25 1hr 15min   DD8719	✕		✕		✕	✕	
18:45 → 20:05 1hr 20min   DD8723	✕	✕	✕	✕	✕	✕	✕

รูปภาพที่ 5 รูปแบบเที่ยวบิน

ขั้นตอนที่ 2 การจับคู่เที่ยวบิน การดำเนินการจับคู่เที่ยวบินเข้าสู่แผนแต่ละวันของสัปดาห์ จะต้องทำการพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลาสูงสุดในการปฏิบัติหน้าที่การบิน โดยสามารถดำเนินการจับคู่เที่ยวบินได้ตามผังขั้นตอนการจับคู่เที่ยวบิน ดังรูปภาพที่ 6 แสดงถึงวิธีการในการตัดสินใจเลือกจับคู่เที่ยวบินในแต่ละวันซึ่งมีรูปแบบที่แตกต่างกันภายในหนึ่งสัปดาห์ โดยทุก

เที่ยวบินที่ทำการจับคู่จะต้องมีความเป็นไปได้ทั้งทางด้านช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่และสนามบิน  
ปลายทางที่ปฏิบัติงาน



รูปภาพที่ 6 วิธีการในการตัดสินใจเลือกจับคู่เที่ยวบิน

1.กำหนดหมายเลขรูปแบบเที่ยวบิน การดำเนินการจับคู่เที่ยวบินจะต้องใส่รายละเอียด  
เที่ยวบินที่มีทั้งหมดก่อน จึงค่อยกำหนดหมายเลขรูปแบบเที่ยวบินที่จะต้องจัดสรรจริงในแต่ละวัน  
ของสัปดาห์ ดังรูปภาพที่ 7

Code	Duty Start	Duty End	Duty Hours	COUNT	Flight No. (1)	Destination (1)	Block Hours (1)	Neutral Miles (1)	Flight No. (2)	Destination (2)	Block Hours (2)	Neutral Miles (2)	Flight No. (3)	Destination (3)	Block Hours (3)	Neutral Miles (3)	Flight No. (4)	Destination (4)	Block Hours (4)	Neutral Miles (4)		
O1	19:30	19:30	0:00	1	2 008719	DMK-CNX	1:00	420	420008719	DMK-CNX	1:00	420	420	420008719	DMK-CNX	1:00	420	420	420008719	DMK-CNX	1:00	420
O2	19:20	19:40	0:20	2	2 008826	DMK-CNX	1:10	353	353008826	DMK-CNX	1:10	353	353	353008826	DMK-CNX	1:10	353	353	353008826	DMK-CNX	1:10	353
O3	8:05	12:25	4:20	2	2 008806	DMK-CNX	1:10	353	353008807	DMK-CNX	1:10	353	353	353008807	DMK-CNX	1:10	353	353	353008807	DMK-CNX	1:10	353
O5	18:40	19:45	1:05	4	4 008818	DMK-CNX	1:10	353	353008818	DMK-CNX	1:10	353	353	353008818	DMK-CNX	1:10	353	353	353008818	DMK-CNX	1:10	353
O6	18:25	22:45	4:20	2	2 008824	DMK-CNX	1:10	353	353008825	DMK-CNX	1:10	353	353	353008825	DMK-CNX	1:10	353	353	353008825	DMK-CNX	1:10	353
O48	9:00	9:00	0:00	2	2 007202	DMK-HKT	1:15	481	481007203	HKT-DMK	1:15	481	481	481007203	HKT-DMK	1:15	481	481	481007203	HKT-DMK	1:15	481
O49	8:30	20:20	11:50	8	8 007206	DMK-HKT	1:15	481	481007207	HKT-DMK	1:15	481	481	481007208	DMK-HKT	1:15	481	481	481007209	HKT-DMK	1:15	481
O41	22:20	22:40	0:20	1	1 002229	DMK-HKT	1:25	481	481002230	DMK-CNX	1:25	481	481	481002231	DMK-HKT	1:25	481	481	481002232	DMK-HKT	1:25	481
O48	18:25	22:20	3:55	4	4 007212	DMK-HKT	1:25	481	481007213	HKT-DMK	1:25	481	481	481007214	DMK-HKT	1:25	481	481	481007215	HKT-DMK	1:25	481
O48	18:18	21:18	3:00	2	2 007218	DMK-HKT	1:15	481	481007219	HKT-DMK	1:15	481	481	481007220	DMK-HKT	1:15	481	481	481007221	HKT-DMK	1:15	481
O50	18:55	23:45	4:50	2	2 007246	DMK-HKT	1:30	481	481007247	HKT-DMK	1:30	481	481	481007248	DMK-HKT	1:30	481	481	481007249	HKT-DMK	1:30	481
O54	22:25	22:25	0:00	2	2 007598	DMK-HKT	1:10	420	420007599	HKT-DMK	1:10	420	420	420007600	DMK-HKT	1:10	420	420	420007601	HKT-DMK	1:10	420
O59	9:30	19:35	8:05	4	4 007930	DMK-BKK	1:15	411	411007931	HKT-DMK	1:15	411	411	411007932	DMK-BKK	1:15	411	411	411007933	HKT-DMK	1:15	411
O64	18:50	17:25	4:45	2	2 007596	DMK-HKT	1:10	420	420007597	HKT-DMK	1:10	420	420	420007598	DMK-HKT	1:10	420	420	420007600	DMK-HKT	1:10	420
O51	16:40	21:20	4:40	2	2 008826	DMK-NNT	1:20	338	338008827	NNT-DMK	1:20	338	338	338008828	DMK-NNT	1:20	338	338	338008829	NNT-DMK	1:20	338
O52	9:00	9:00	0:00	2	2 007864	DMK-NNT	1:15	374	374007865	DMK-NNT	1:15	374	374	374007866	DMK-NNT	1:15	374	374	374007867	DMK-NNT	1:15	374
O53	9:05	17:15	8:10	4	4 007808	DMK-NNT	1:15	374	374007809	NNT-DMK	1:15	374	374	374007810	DMK-NNT	1:15	374	374	374007811	NNT-DMK	1:15	374
O56	18:40	21:20	2:40	4	4 007870	DMK-NNT	1:10	374	374007871	NNT-DMK	1:10	374	374	374007872	DMK-NNT	1:10	374	374	374007873	NNT-DMK	1:10	374
O58	18:05	21:05	3:00	2	2 008826	DMK-NNT	1:10	338	338008827	NNT-DMK	1:10	338	338	338008828	DMK-NNT	1:10	338	338	338008829	NNT-DMK	1:10	338
O59	18:00	19:25	1:25	2	2 007814	DMK-NNT	1:10	374	374007815	NNT-DMK	1:10	374	374	374007816	DMK-NNT	1:10	374	374	374007817	NNT-DMK	1:10	374
O59	18:00	19:25	1:25	2	2 008406	DMK-PMU	1:00	200	200008407	PMU-DMK	1:00	200	200	200008408	DMK-PMU	1:00	200	200	200008409	PMU-DMK	1:00	200
O61	17:50	21:00	3:40	2	2 008414	DMK-PMU	0:50	200	200008415	PMU-DMK	0:50	200	200	200008416	DMK-PMU	0:50	200	200	200008417	PMU-DMK	0:50	200
O62	7:05	11:05	4:00	2	2 008402	DMK-PMU	1:10	328	328008403	PMU-DMK	1:10	328	328	328008404	DMK-PMU	1:10	328	328	328008405	PMU-DMK	1:10	328
O23	5:30	11:05	5:35	4	4 003512	DMK-URP	1:05	300	300003513	URP-DMK	1:05	300	300	300003514	DMK-URP	1:05	300	300	300003515	URP-DMK	1:05	300
O24	22:20	22:20	0:00	2	2 009318	DMK-URP	1:05	300	300009319	URP-DMK	1:05	300	300	300009320	DMK-URP	1:05	300	300	300009321	URP-DMK	1:05	300
O36	18:40	18:40	0:00	2	2 009314	DMK-URP	1:05	300	300009315	URP-DMK	1:05	300	300	300009316	DMK-URP	1:05	300	300	300009317	URP-DMK	1:05	300
O21	18:15	22:40	4:25	2	2 009318	DMK-URP	1:05	300	300009319	URP-DMK	1:05	300	300	300009320	DMK-URP	1:05	300	300	300009321	URP-DMK	1:05	300
O40	5:10	9:30	4:20	2	2 007208	DMK-URT	1:10	345	345007209	URT-DMK	1:10	345	345	345007210	DMK-URT	1:10	345	345	345007211	URT-DMK	1:10	345
O41	11:50	12:10	0:20	1	1 002211	DMK-URT	1:10	345	345002212	DMK-URT	1:10	345	345	345002213	DMK-URT	1:10	345	345	345002214	DMK-URT	1:10	345
O44	11:50	19:50	8:00	4	4 007212	DMK-URT	1:10	345	345007213	URT-DMK	1:10	345	345	345007214	DMK-URT	1:10	345	345	345007215	URT-DMK	1:10	345
O45	9:00	12:20	3:20	4	4 009202	DMK-UTH	1:05	280	280009203	UTH-DMK	1:05	280	280	280009204	DMK-UTH	1:05	280	280	280009205	UTH-DMK	1:05	280
O56	9:00	18:05	4:50	2	2 009202	DMK-UTH	1:05	280	280009203	UTH-DMK	1:05	280	280	280009204	DMK-UTH	1:05	280	280	280009205	UTH-DMK	1:05	280
O57	13:05	18:45	5:40	4	4 009120	DMK-UTH	1:05	280	280009121	UTH-DMK	1:05	280	280	280009122	DMK-UTH	1:05	280	280	280009123	UTH-DMK	1:05	280
O58	15:10	22:20	7:10	4	4 009124	DMK-UTH	1:05	280	280009125	UTH-DMK	1:05	280	280	280009126	DMK-UTH	1:05	280	280	280009127	UTH-DMK	1:05	280
O59	15:10	22:20	7:10	4	4 009124	DMK-UTH	1:05	280	280009125	UTH-DMK	1:05	280	280	280009126	DMK-UTH	1:05	280	280	280009127	UTH-DMK	1:05	280
O25	17:00	11:05	4:05	2	2 009216	DMK-UTH	1:05	280	280009217	UTH-DMK	1:05	280	280	280009218	DMK-UTH	1:05	280	280	280009219	UTH-DMK	1:05	280

รูปภาพที่ 7 หมายเลขรูปแบบเที่ยวบิน

2.ตรวจสอบเที่ยวบินที่ไม่มีคู่ไปหรือกลับ เที่ยวบินทั้งหมดที่ได้จัดสรรมาจะต้องมีทั้งขาไป  
และขากลับ นั่นคือไม่มีเที่ยวบินเที่ยวเดียว เพราะนอกจากจะจะต้องเสียค่าใช้จ่ายจากการทำการ

บิน แล้วยังต้องเสียค่าใช้จ่าย จากการเช่าหุลุมจอดตั้งนั้นเที่ยวบินที่มีแต่ขาไปเที่ยวเดียวหรือขา  
กลับเที่ยวเดียวจะไม่ถูกลีอก ดังรูปภาพที่ 8

Code	Flight No.[1]	Flight No.[2]	Flight No.[3]	Flight No.[4]	Flight No.[5]	Flight No.[6]	Idle Time	Total Nautical Miles
O9	DD8326	DD8327					0:00	706
O8	DD8324	DD8325					0:00	706
O7	DD8324	DD8325					0:00	706
O6	DD8324	DD8325					0:00	706
O56	DD7914	DD7915	DD9410	DD9411			0:00	1486
O55	DD7910	DD7911	DD7808	DD7809	DD7506	DD7507	0:00	2012
O54	DD7506	DD7507					0:00	860
O53	DD7504	DD7505	DD9324	DD9325	DD7520		0:00	1890
O52	DD7502	DD7501	DD7108	DD7109	DD8826		0:00	2162
O51	DD7502	DD7501	DD7108	DD7109	DD8318	DD8319	0:00	2177
O50	DD7116	DD7117					0:00	964
O5	DD8318	DD8319	DD8326	DD8327			0:00	1412
O49	DD7114	DD7115					0:00	964
O48	DD7112	DD7113	DD9318	DD9319			0:00	1564
O47	DD7108	DD7109	DD8318	DD8319	DD8326	DD8327	0:00	2023
O46	DD7104	DD7105	DD7108	DD7109	DD8318	DD8319	0:00	2281
O45	DD7102	DD7103					0:00	964
O44	DD7212	DD7213	DD7914	DD7915	DD9410	DD9411	0:00	1850
O43	DD7212	DD7213	DD9214	DD9215	DD9318	DD9319	0:00	1550
O42	DD7210	DD7211	DD8312				0:00	1043
O41	DD7208	DD7209	DD7503	DD7108	DD7109		0:00	2032
O40	DD7208	DD7209	DD9310				0:00	990
O39	DD7814	DD7815	DD8414				0:00	1358
O38	DD7814	DD7815	DD8324	DD8325			0:00	1454
O37	DD7814	DD7815	DD8324	DD8325			0:00	1454
O36	DD7810	DD7811	DD9216	DD9217			0:00	1308
O35	DD7810	DD7811	DD9216	DD9217	DD9410	DD9411	0:00	1634
O34	DD7810	DD7811	DD9216	DD9217	DD8326	DD8327	0:00	1661

รูปภาพที่ 8 เที่ยวบินที่ไม่มีคู่

3. ตรวจสอบช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่สูงสุด การดำเนินการจับคู่เที่ยวบินจะต้องพิจารณา  
ถึงช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่สูงสุดโดยดูจากจำนวนเที่ยวบินทั้งหมดที่ได้ทำการบินในรอบดังกล่าว  
และตรวจสอบว่าเที่ยวบินแรกกว่าเริ่มต้นที่ช่วงเวลาใด โดยอิงจากเวลาท้องถิ่นของสนามบินที่เริ่มต้น  
ทำการบินนั้น เช่น code O23 มีจำนวนเที่ยวบินสูงสุด คือ 6 เที่ยวบิน โดยเที่ยวบินแรกเริ่มทำการ  
บินที่ช่วงเวลา 05:00-05:59 น. ดังนั้นจำนวนชั่วโมงปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุดจะต้องไม่เกิน 11  
ชั่วโมง ดังรูปภาพที่ 9

Code	Duty (Start)	Duty (End)	Duty Hours (Hrs.)	Flight No.[1]	Destination[1]	Block Hours [1]	Nautical Miles [1]	Flight No.[2]	Destination[2]	Block Hours [2]	Nautical Miles [2]
O21	16:25	23:50	7:25	DD9216	DMK-UTH	1:05	280	DD9217	UTH-DMK	1:00	280
O22	17:00	21:05	4:05	DD9216	DMK-UTH	1:05	280	DD9217	UTH-DMK	1:00	280
O23	5:10	17:00	11:50	DD9312	DMK-UBP	1:05	300	DD9313	UBP-DMK	1:05	300

Maximum Flight Duty Period (Hour)							
Local time at origin	Sector						
	1	2	3	4	5	6	7 up
05.00 – 05.59	13	13	12	12	12	11	11
06.00 – 12.59	13.3	13.3	13	12	12	12	11
13.00 – 14.59	13	13	12	12	12	11	11
15.00 – 04.59	12	12	11	11	11	10	10

Flight No.[3]	Destination[3]	Block Hours [3]	Nautical Miles [3]
DD9410	DMK-SNO	1:10	326
DD7104	DMK-HDY	1:25	482
Flight No.[4]	Destination[4]	Block Hours [4]	Nautical Miles [4]
DD9411	SNO-DMK	1:10	326
DD7105	HDY-DMK	1:25	482
Flight No.[5]	Destination[5]	Block Hours [5]	Nautical Miles [5]
DD7108	DMK-HDY	1:25	482
Flight No.[6]	Destination[6]	Block Hours [6]	Nautical Miles [6]
DD7109	HDY-DMK	1:25	482

รูปภาพที่ 9 ช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่สูงสุด

4. ตรวจสอบระยะเวลาทางการบินสะสม คู่เที่ยวบินทั้งหมดที่ได้จับคู่มาในแต่ละวันทำการ จะต้องมียุทธศาสตร์ทางการบิน ไม่เกิน 3060 ไมล์ทะเล ดังรูปภาพที่ 10

Code	Duty (Start)	Duty (End)	Flight No.(1)	Flight No.(2)	Flight No.(3)	Flight No.(4)	Flight No.(5)	Flight No.(6)	Total Nautical Miles
O21	16:25	23:50	DD9216	DD9217	DD9410	DD9411			1212
O22	17:00	21:05	DD9216	DD9217					560
O23	5:10	17:00	DD9312	DD9313	DD7104	DD7105	DD7108	DD7109	2528
O24	12:20	18:05	DD9316	DD9317	DD7216				945
O25	14:35	20:30	DD9324	DD9325	DD7520				1030
O26	14:40	20:35	DD9324	DD9325	DD7520				1030
O27	18:15	22:20	DD9318	DD9319					600
O28	7:05	13:15	DD9402	DD9403	DD7504				1082
O29	8:15	18:45	DD9402	DD9403	DD9210	DD9211	DD9324	DD9325	1792
O30	12:50	23:40	DD8406	DD8407	DD8318	DD8319	DD8326	DD8327	1812
O31	17:50	21:30	DD8414	DD8415					400
O32	5:00	9:25	DD7804	DD7805					748
O33	9:05	16:45	DD7808	DD7809	DD7506	DD7507			1608
O34	13:00	23:50	DD7810	DD7811	DD9216	DD9217	DD8326	DD8327	2014
O35	13:00	23:50	DD7810	DD7811	DD9216	DD9217	DD9410	DD9411	1960
O36	13:40	21:05	DD7810	DD7811	DD9216	DD9217			1308
O37	15:00	22:40	DD7814	DD7815	DD8324	DD8325			1454
O38	15:05	22:45	DD7814	DD7815	DD8324	DD8325			1454
O39	15:05	20:45	DD7814	DD7815	DD8414				948
O40	5:10	11:05	DD7208	DD7209	DD9310				990
O41	5:10	17:00	DD7208	DD7209	DD7502	DD7503	DD7108	DD7109	2514
O42	8:20	14:20	DD7210	DD7211	DD8312				1043
O43	11:50	22:20	DD7212	DD7213	DD9214	DD9215	DD9318	DD9319	1850
O44	11:50	23:10	DD7212	DD7213	DD9214	DD9215	DD9410	DD9411	2176

รูปภาพที่ 10 ระยะเวลาทางการบินสะสม

5. ตรวจสอบช่วงเวลาพักผ่อน และชั่วโมงบินสะสม การดำเนินการจับคู่เที่ยวบินของวันถัดไปในสัปดาห์ จะต้องพิจารณาถึงช่วงเวลาพักผ่อน โดยดูจากช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่ เช่น วันจันทร์ เลือก code O2 ทำการบินในช่วงเวลา 15:55-20:35 น. ช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่ทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง 40 นาที ดังนั้นจะต้องพักผ่อน (Rest) อย่างน้อย 8 ชั่วโมง ทำให้เวลาที่เริ่มปฏิบัติหน้าที่ในเที่ยวบินถัดไปในวันอังคาร คือ 4:35 น. วันอังคาร เลือก code O32 ทำการบินในช่วงเวลา 5:00-9:25 น. ช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่ทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง 25 นาที ดังนั้นจะต้องพักผ่อน (Rest) อย่างน้อย 8 ชั่วโมง ทำให้เวลาที่เริ่มปฏิบัติหน้าที่ในเที่ยวบินถัดไปคือ 17:25 น. วันพุธ เลือก code O27 ทำการบินในช่วงเวลา 18:15-22:20 น. ช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่ทั้งสิ้น 4 ชั่วโมง 5 นาที ดังนั้นจะต้องพักผ่อน (Rest) อย่างน้อย 8 ชั่วโมง ทำให้เวลาที่เริ่มปฏิบัติหน้าที่ในเที่ยวบินถัดไปคือ 6:20 น. ทำเช่นเดียวกันนี้จนถึงวันอาทิตย์ ทั้งนี้ภายในทุกๆ 7 วันต่อเนื่องกัน นักบินจะมีชั่วโมงบินได้ไม่เกิน 34 ชั่วโมง ดังรูปภาพที่ 11

Day	Code	DT(Start)	DT(End)	DH(Hrs.)	Sector1		Sector2		Sector3		Sector4		Sector5		Sector6		Rest	Next
					Flight No	Dest	Flight No	Dest	Flight No	Dest	Flight No	Dest	Flight No	Dest	Flight No	Dest		
Mon	O2	15:55	20:35	4:40	DD8722	DMK-CEI	DD8723	CEI-DMK									8:00	4:35
Tue	O32	5:00	9:25	4:25	DD7804	DMK-NST	DD7805	NST-DMK									8:00	17:25
Wed	O27	18:15	22:20	4:05	DD9318	DMK-UBP	DD9319	UBP-DMK									8:00	6:20

รูปภาพที่ 11 ช่วงเวลาพักผ่อน

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ 8 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎี แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาวิธีการฮิวริสติกและสร้างคำตอบเริ่มต้น
4. ศึกษาวิธีการและพัฒนาเมตาฮิวริสติกที่เหมาะสม
5. ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB
6. สร้างอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม MATLAB
7. ประเมินค่าแต่ละอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา
8. วิเคราะห์ สรุปผลและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีดังนี้

1. สามารถลดความยุ่งยากและระยะเวลาในการแก้ปัญหาคารับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวิทูประสงค์
2. เป็นแนวทางเพื่อช่วยในการตัดสินใจสำหรับการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัด



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยในส่วนของทฤษฎีประกอบด้วยลักษณะทั่วไปของสายการบิน ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินแบบหลายวัตถุประสงค์ การวัดสมรรถนะอัลกอริทึม และส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจับคู่เที่ยวบิน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมที่ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 ลักษณะทั่วไปของสายการบิน

บริษัท สายการบินนกแอร์ จำกัด (มหาชน) ภายใต้การดูแลสังกัดกระทรวงคมนาคมเป็นบริษัทให้บริการขนส่งทางอากาศภายในประเทศ และต่างประเทศ จัดเป็นสายการบินราคาประหยัด ในลักษณะการดำเนินการจุดต่อจุดโดยไม่มีบริการเชื่อมต่อ (Point-to-Point) บริษัทเป็นผู้ให้บริการเที่ยวบินที่ครอบคลุมทุกภูมิภาคภาคในประเทศไทย โดยในปัจจุบันได้ให้บริการจากฐานปฏิบัติการหลักที่ทำอากาศยานนานาชาติดอนเมือง โดยมุ่งเน้นให้บริการเที่ยวบินทั้งในเส้นทางที่มีความต้องการทางการบินหนาแน่นอย่างสายการบินหลัก และเส้นทางการบินที่มีความต้องการการบินไม่มากนักอย่างเส้นทางสายการบินรอง เพื่อให้สอดคล้องกับกลยุทธ์การแข่งขันของบริษัทว่าด้วยการให้บริการเส้นทางการบินที่ครอบคลุมมากที่สุดในประเทศไทยอย่างไรก็ตาม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นมา สายการบินได้เผชิญวิกฤติขาดทุนสะสม มีการยกเลิกเที่ยวบิน การดำเนินการเที่ยวบินที่ล่าช้า เนื่องจากบริษัทมีต้นทุนค่าการบริหารสูงจากค่าใช้จ่ายด้านพนักงาน การบริหารงานการปฏิบัติหน้าที่ของนักบิน ทั้งนี้การดำเนินงานของบริษัทได้แบ่งออกเป็นหลายส่วนงาน

สำหรับของเขตของการดำเนินการวิจัยนี้จะพิจารณาปัญหาการจัดตารางปฏิบัติการของพนักงานสายการบิน โดยพิจารณาเฉพาะปัญหาการจับคู่เที่ยวบินที่ทำการบินภายในประเทศ โดยเครื่องบินประเภทเดียว คือ โบอิง 737-800 จำนวน 21 ลำ เส้นทางการบินภายในประเทศ ซึ่งมีฐานปฏิบัติการหลัก 1 ฐานที่เป็นจุดเริ่มต้น คือ ทำอากาศยานนานาชาติดอนเมือง และมีฐานปฏิบัติการที่เป็นสนามบินปลายทางอีก 14 แห่ง

### 2.1.2 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินแบบหลายวัตถุประสงค์

การแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ให้มีประสิทธิภาพดีพร้อมกันในทุก ๆ ด้านนั้นทำได้ยาก เนื่องจากแต่ละวัตถุประสงค์อาจมีความขัดแย้งกันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทำให้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ไม่สามารถบอกได้ว่าคำตอบใดเป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Konak, Coit, & Smith, 2006)

### 2.1.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์

เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์จะใช้เทคนิคการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal Set) ซึ่งเป็นวิธีการในการค้นหาคำตอบที่อยู่ในขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด (Feasible Region) ของปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยมีหลายวิธี เช่น วิธีคำนวณค่าแบบเวกเตอร์ (Vector Evolution Approach) วิธีการรวมฟังก์ชันโดยอาศัยการให้น้ำหนัก (Weighted Sum Approach) วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach) และวิธีเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เป็นต้น

งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) และวิธีเทบปีเชฟฟ์ ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบด้วยวิธีการให้น้ำหนักของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเป็นทางเลือก โดยคำตอบที่ได้จากทั้งสองวิธีนี้จะอยู่ในรูปของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด และจะไม่ถูกรอบงำจากคำตอบอื่น (Non-Dominated Solution) แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าคำตอบใดดีกว่ากัน (Chutima & Kampirom, 2014) ซึ่งกลุ่มคำตอบที่ดีมีคุณสมบัติดังนี้

1. กลุ่มคำตอบที่ดีควรอยู่ภายในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงหรือเป็นสมาชิกของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
2. กลุ่มคำตอบที่ดีควรมีคำตอบที่หลากหลาย และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

(Uniform Distribution)

3. กลุ่มคำตอบที่ดีต้องสามารถค้นหาคำตอบที่อยู่ปลายสุดของกลุ่มคำตอบในขอบเขตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมดได้

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่มีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยหาค่าวัตถุประสงค์ทุกตัวที่น้อยที่สุด และพิจารณาพร้อมกันทั้งหมด ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1. วิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Pareto-Based Approach) ดังสมการที่ 2.1

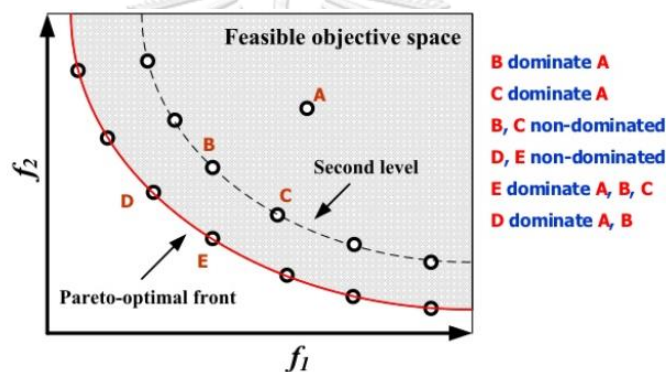
$$\text{minimize} : \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_k(\bar{x})\} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือ เวกเตอร์ตัวแปรตัดสินใจ (สตริงคำตอบ) โดยที่

$f_k(x)$  คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่  $k$  ของเวกเตอร์  $\bar{x}$

กรณีหาค่าคำตอบที่น้อยที่สุด เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ  $\bar{x}$  จะหาค่าตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ  $y$  ก็ต่อเมื่อ  $f_k(x) \leq f_k(y)$  ทุกค่า และ  $f_i(x) < f_i(y)$  อย่างน้อย 1 ค่า โดยที่  $k = 1, 2, \dots, Obj$

กรณีหาค่าคำตอบที่มากที่สุด เวกเตอร์ของตัวแปรตัดสินใจ  $\bar{x}$  จะหาค่าตอบที่ดีกว่าตัวแปรตัดสินใจ  $y$  ก็ต่อเมื่อ  $f_k(x) \geq f_k(y)$  ทุกค่า และ  $f_i(x) > f_i(y)$  อย่างน้อย 1 ค่า โดยที่  $k = 1, 2, \dots, Obj$



รูปภาพที่ 12 Pareto Optimal Solution (Goldberg, 1989)

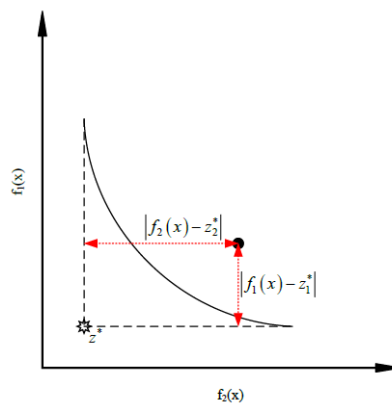
จากรูปภาพที่ 12 เป็นกราฟแสดงกลุ่มคำตอบของฟังก์ชันที่มี 2 วัตถุประสงค์ โดยแต่ละจุดคือคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ จะเห็นได้ว่าจุด D และ E อยู่ในกลุ่มคำตอบเดียวกัน และเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Pareto Optimal Frontier) ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าจุดใดเป็นคำตอบที่ดีกว่ากัน (Non-Dominated Set) แต่สามารถระบุได้ว่ากลุ่มคำตอบของฟรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> frontier) ดีกว่ากลุ่มคำตอบของฟรอนเทียร์ที่ 2 (2<sup>nd</sup> frontier) ทุกจุด (Chutima & Chimklai, 2012)

2. วิธีเทบิเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) ดังสมการที่ 2.2

$$\text{minimize } g^{te}(\bar{x}_j | \bar{\lambda}_j, z^*) = \max_{1 \leq k \leq obj} \{\lambda_{jk} | f_k(\bar{x}_j) - z_k^*\} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $g^{te}(\bar{x}_j)$  คือ ผลต่างมากที่สุดระหว่างค่าวัตถุประสงค์ของสตริง  $j$  กับค่าเป้าหมายของเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก  $\bar{\lambda}_j$  ของปัญหาอยู่ที่  $j$

- $z_k^*$  คือ ค่าเวกเตอร์เป้าหมาย โดยที่  $z_k^* = \{z_1^*, z_2^*, \dots, z_{obj}^*\}$   
 กรณีหาค่าของคำตอบที่น้อยที่สุด  $z_k^* = \min\{f_k(\bar{x})\}$   
 กรณีหาค่าของคำตอบที่มากที่สุด  $z_k^* = \max\{f_k(\bar{x})\}$
- $\bar{\lambda}_j$  คือ เวกเตอร์ค่าน้ำหนักของปัญหาย่อยที่  $j$  โดยที่  $\bar{\lambda}_j = \{\lambda_{j1}, \lambda_{j2}, \dots, \lambda_{jobj}\}$
- Obj คือ จำนวนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด



รูปภาพที่ 13 Tchebycheff Approach

จากรูปภาพที่ 13 เป็นกราฟแสดงทิศทางการค้นหาคำตอบของฟังก์ชันที่มี 2 วัตถุประสงค์ โดยแต่ละจุดคือคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้จะเลื่อนเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ละแกนด้วยผลต่างของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เทียบกับค่าเป้าหมาย เมื่อได้ค่าผลต่างที่มากที่สุดของคำตอบนั้น แล้ว จะทำการแทนที่คำตอบที่มีผลต่างที่น้อยที่สุดเพื่อหาคำตอบที่ดีต่อไป

#### 2.1.4 การแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินแบบหลายวัตถุประสงค์ (Objective Function)

งานวิจัยฉบับนี้ พิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 5 วัตถุประสงค์ โดยให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากันหมด ดังนี้

##### (1) เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด (Minimizing idle time)

ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน (Flight Duty Period ; FDP) มีผลอย่างมากต่อเวลาและต้นทุนในการจับคู่เที่ยวบิน เพราะถ้าหากเวลาว่างระหว่างเที่ยวบินนาน ก็จะทำให้เกิดความล่าช้าในเที่ยวบินถัดไป นอกจากนั้นส่งผลให้ต้องเสียค่าเช่าหุ้ลมจอดเครื่องบินสูงขึ้นและทางสายการบินเองอาจจะต้องชดเชยในกรณีที่เที่ยวบินล่าช้า (Deveci & Demirel, 2018) แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.3

$$f_1(x) = \sum_{r=1}^R \sum_{q=q+1}^Q DS_{qr} X_{qr} - \sum_{r=1}^R \sum_{r=1}^Q DE_{qr} X_{qr} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $f_1(x)$  คือ เวลาว่างระหว่างเที่ยวบิน

$DS_{qr}$  คือ เวลาเริ่มต้นการปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  ที่เที่ยวที่  $q$

$DE_{qr}$  คือ เวลาสิ้นสุดการปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  ที่เที่ยวที่  $q$

$$\text{เมื่อ } X_{qr} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้าทำการบินวันที่ } r \text{ ที่เที่ยวที่ } q \\ 0, & \text{ถ้าทำการบินวันที่ } r \text{ ที่เที่ยวที่ } q \end{cases} ; X \in \{0,1\}$$

(2) ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน (Balance workload)

การจับคู่เที่ยวบินอย่างเท่าเทียมกัน คิดจากค่าเฉลี่ยผลรวมของค่าผลต่างค่าเฉลี่ยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินแต่ละรหัสเที่ยวบินกับค่าเฉลี่ยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินที่คาดหวัง (Chutima & Arayikanon, 2017) แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5

$$f_2(x) = \frac{1}{P} \sum_{r=1}^R T_r \quad (2.4)$$

$$T_r = \left(1 - \frac{1}{\sum_{q=1}^Q FDP_{qr} X_{qr}}\right) ; \forall r \in R \quad (2.5)$$

เมื่อ  $T_r$  คือ ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินของแต่ละวัน

$P$  คือ จำนวนรหัสเที่ยวบินที่ได้จากการจับคู่ทั้งหมดที่เป็นไปได้

$FDP_{qr}$  คือ ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  ที่เที่ยวที่  $q$

$$\text{เมื่อ } X_{qr} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้าทำการบินวันที่ } r \text{ ที่เที่ยวที่ } q \\ 0, & \text{ถ้าทำการบินวันที่ } r \text{ ที่เที่ยวที่ } q \end{cases} ; X \in \{0,1\}$$

(3) เส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุด (Minimizing repeat flight leg)

เส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุดเป็นการพิจารณาถึงการกระจายรูปแบบเที่ยวบิน (Distribution of flight pattern) โดยจัดสรรรูปแบบเที่ยวบินให้แต่ละคนมีจำนวนใกล้เคียงกันให้มากที่สุด เนื่องจากการสำรวจการปฏิบัติงานของนักบินพบว่าบางคนต้องการบินเส้นทางที่แตกต่างกันตามที่ต้องการบ้าง การที่นักวางแผนจะจัดตารางให้รองรับความต้องการของนักบินทุกคนนั้นเป็นไปได้ยาก จึงทำการเสนอให้จัดรูปแบบเที่ยวบินแก่นักบินมีจำนวนซ้ำในแต่ละสัปดาห์ให้

น้อยที่สุด ไม่ให้เกิดการบินรูปแบบเที่ยวบินซ้ำมากเกินไป ทั้งนี้ ทางสายการบินมองถึงว่าการบินในเส้นทางแต่ละภูมิภาคของทุกคนเท่าเทียมกันก่อให้เกิดการทำงานที่มีทักษะได้หลากหลาย (Chutima & Arayikanon, 2017) แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.6

$$f_3(x) = \sum_{q=1}^Q \sum_{z=1}^Z \sum_{y=1}^Y V_{yz} X_{qr} \quad ; \forall r \in R \quad (2.6)$$

$$\text{เมื่อ } V_{yz} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้าเลือกเที่ยวบิน } Z \text{ สนามบิน } y \\ 0, & \text{ถ้าไม่เลือกเที่ยวบิน } Z \text{ สนามบิน } y \end{cases} \quad ; V \in \{0,1\}$$

(4) ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด (Minimizing the difference of nautical mile between each flight code)

การจับคู่เที่ยวบินอย่างเท่าเทียมกัน คิดจากค่าเฉลี่ยผลรวมของผลต่างค่าเฉลี่ยระยะทางการบินแต่ละรหัสกับค่าเฉลี่ยระยะทางการบินที่คาดหวัง แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8

$$f_4(x) = \frac{1}{P} \sum_{r=1}^R S_r \quad (2.7)$$

$$S_r = \left(1 - \frac{1}{\sum_{q=1}^Q U_{qr} X_{qr}}\right) \quad ; \forall r \in R \quad (2.8)$$

เมื่อ  $S_r$  คือ ค่าเฉลี่ยระยะทางการบินของแต่ละวัน

$P$  คือ จำนวนรหัสเที่ยวบินที่ได้จากการจับคู่ทั้งหมดที่เป็นไปได้

$U_{qr}$  คือ ระยะทางการปฏิบัติหน้าที่การบินวันที่  $r$  ที่เที่ยวที่  $q$

$$\text{เมื่อ } X_{qr} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้าทำการบินวันที่ } r \text{ ที่เที่ยวที่ } q \\ 0, & \text{ถ้าทำการบินวันที่ } r \text{ ที่เที่ยวที่ } q \end{cases} \quad ; X \in \{0,1\}$$

(5) จำนวนคู่พนักงานน้อยที่สุด (Minimizing number of pair of cockpit crews)

จำนวนคู่พนักงานน้อยที่สุดเป็นการพิจารณาหลังจากการจับคู่เที่ยวบินครบสัปดาห์ (7 วัน) เพื่อที่จะได้วางแผนจัดสรรคู่พนักงานได้เหมาะสม แสดงสูตรคำนวณดังสมการที่ 2.9 และสมการที่

2.10

$$f_5(x) = Nw \quad (2.9)$$

$$Nw = \text{roundup}\left(\frac{Nr}{7}, 0\right) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $Nw$  คือ จำนวนคู่ที่นั่งที่ทำการบิน

$Nr$  คือ จำนวนวันซึ่งจับคู่เที่ยวบินได้

### 2.1.5 การคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ข้อมูลตัวอย่างขนาดเล็ก สำหรับการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ใน 1 วัน เป็น ตารางข้อมูลของเครื่องบินโบอิง 737-800 ซึ่งประกอบด้วย หมายเลขเที่ยวบิน ชื่อสนามบินปลายทาง (IATA) เวลาที่เครื่องออกจากสนามบินต้นทางเวลาที่เครื่องใช้ทำการบิน เวลาที่เครื่องที่เครื่องถึงสนามบินปลายทาง จำนวนไมล์ทะเล โดยมีจุดเริ่มต้น คือ สนามบินดอนเมือง และมีสนามบินปลายทาง คือ สนามบินเชียงใหม่ แสดงดังตารางที่ 5 ตารางที่ 6 ข้อมูลนำเข้า

Flight No.	From	To	Departure	Block Hour	Arrival	Nautical Mile
DD8714	DMK	CEI	7:20	1:20	8:40	420
DD8718	DMK	CEI	13:20	1:20	14:40	420
DD8722	DMK	CEI	16:55	1:20	18:15	420
DD8715	CEI	DMK	9:20	1:15	10:35	420
DD8719	CEI	DMK	15:10	1:15	16:25	420
DD8723	CEI	DMK	18:45	1:20	20:05	420

(1) เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด

ก่อนการพิจารณาเวลาว่างระหว่างเที่ยวบิน จะต้องมีการกำหนดช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินเวลาช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน (Flight Duty Period ; FDP) คือเวลาซึ่งลูกเรือเริ่มปฏิบัติหน้าที่ โดยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินของเที่ยวบินหนึ่งหรือการบินต่อเนื่องให้เริ่มนับตั้งแต่เวลา 1 ชั่วโมงก่อนเที่ยวบินแรกวิ่งขึ้น และหยุดนับจนถึง 30 นาที ภายหลังจากการร่อนลงครั้งสุดท้าย และเพิ่มเวลา 30 นาทีระหว่างเที่ยวบิน (Sit Time) ที่ 1-2-3-4 (15 นาทีปล่อยคนเข้าและ15 นาทีปล่อยคนออก) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 7 ช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน

1											2										
Don Mueang (DMK) to Chiang Rai (CEI)											Chiang Rai (CEI) to Don Mueang (DMK)										
Flight No.	From	To	Duty Start Before	Departure	Block Hou	Arrival	Sit	End	Flight No.	From	To	Duty Start Before	Departure	Block Hou	Arrival	After	End				
DD8714	DMK	CEI	6:20	1:00	7:20	1:20	8:40	0:15	8:55	DD8715	CEI	DMK	9:05	0:15	9:20	1:15	10:35	0:15	10:50		
DD8718	DMK	CEI	12:20	1:00	13:20	1:20	14:40	0:15	14:55	DD8719	CEI	DMK	14:55	0:15	15:10	1:15	16:25	0:15	16:40		
DD8722	DMK	CEI	15:55	1:00	16:55	1:20	18:15	0:15	18:30	DD8723	CEI	DMK	18:30	0:15	18:45	1:20	20:05	0:15	20:20		
3											4										
Don Mueang (DMK) to Chiang Rai (CEI)											Chiang Rai (CEI) to Don Mueang (DMK)										
Flight No.	From	To	Duty Start Before	Departure	Block Hou	Arrival	Sit	End	Flight No.	From	To	Duty Start Before	Departure	Block Hou	Arrival	After	End				
DD8714	DMK	CEI	7:05	0:15	7:20	1:20	8:40	0:15	8:55	DD8715	CEI	DMK	9:05	0:15	9:20	1:15	10:35	0:30	11:05		
DD8718	DMK	CEI	13:05	0:15	13:20	1:20	14:40	0:15	14:55	DD8719	CEI	DMK	14:55	0:15	15:10	1:15	16:25	0:30	16:55		
DD8722	DMK	CEI	16:40	0:15	16:55	1:20	18:15	0:15	18:30	DD8723	CEI	DMK	18:30	0:15	18:45	1:20	20:05	0:30	20:35		

จากตารางนำมาวิเคราะห์การจับคู่เที่ยวบินที่เป็นไปได้โดยอยู่ภายใต้ข้อจำกัดตามที่สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย จะพบว่า มีรหัสการบินที่มีคู่เที่ยวบินที่เป็นไปได้ ที่เมื่อจับคู่แล้วจะมีเวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด คือ 0 นาที ได้แก่ รหัส O1 ประกอบด้วยเที่ยวบิน DD8718, DD8719, DD8722, และ DD8723 โดยเริ่มปฏิบัติหน้าที่การบินที่เวลา 12:20 น. และสิ้นสุดปฏิบัติหน้าที่การบินที่เวลา 20:35 น. คิดเป็นช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่ 8 ชั่วโมง 15 นาที และมีระยะทางการบินทั้งสิ้น 1680 ไมล์ทะเล และรหัส O2 ประกอบด้วยเที่ยวบิน DD8722, และ DD8723 โดยเริ่มปฏิบัติหน้าที่การบินที่เวลา 15:55 น. และสิ้นสุดปฏิบัติหน้าที่การบินที่เวลา 20:35 น. คิดเป็นช่วงเวลาการปฏิบัติหน้าที่ 4 ชั่วโมง 40 นาที และมีระยะทางการบินทั้งสิ้น 1680 ไมล์ทะเล แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 8 รหัสการบินที่มีคู่เที่ยวบินที่เป็นไปได้

Code	Duty (Start)	Duty (End)	Duty Hours (Hrs.)	Flight No.(1)	Destination(1)	Flight No.(2)	Destination(2)	Flight No.(3)	Destination(3)	Flight No.(4)	Destination(4)	Total Nautical Miles
O2	15:55	20:35	4:40	DD8722	DMK-CEI	DD8723	CEI-DMK					840
O1	12:20	20:35	8:15	DD8718	DMK-CEI	DD8719	CEI-DMK	DD8722	DMK-CEI	DD8723	CEI-DMK	1680

### (2) ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียม (Balance workload)

การจับคู่เที่ยวบินอย่างเท่าเทียมกัน คิดจากค่าเฉลี่ยผลรวมของค่าผลต่างช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินแต่ละรหัสกับช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบินเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.99720418 แสดงดังตารางที่ 8

### ตารางที่ 9 การคำนวณหาการปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน

Code	Duty (Star	Duty (End	DH(Hrs.)	Min	Flight No. (Flight No. (Flight No. (Flight No. (Total BloclTotal Nauta*	abs(a-a*)/a*						
O2	15:55	20:35	4:40	280	DD8722	DD8723			2:40	840	18083.33	0.99642857
O1	12:20	20:35	8:15	495	DD8718	DD8719	DD8722	DD8723	5:15	1680	31968.75	0.9979798
												<b>f2 = 0.99720418</b>

### (3) ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด

การจับคู่เที่ยวบินอย่างเท่าเทียมกัน คิดจากค่าเฉลี่ยผลรวมของค่าผลต่างระยะทางการบินแต่ละรหัสกับระยะทางการบินเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.997097 แสดงดังตารางที่ 9

### ตารางที่ 9 การคำนวณหาระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด

Code	Duty (Star	Duty (End	DH(Hrs.)	Min	Flight No. (Flight No. (Flight No. (Flight No. (Total BloclTotal Nauta*	abs(a-a*)/a*						
O2	15:55	20:35	4:40	280	DD8722	DD8723			2:40	840	54250	0.996129
O1	12:20	20:35	8:15	495	DD8718	DD8719	DD8722	DD8723	5:15	1680	108500	0.998065
												<b>f4 = 0.997097</b>



## (4) เส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุด (Minimizing repeat flight leg)

เส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุดเป็นการพิจารณาถึงการจัดสรรรูปแบบเที่ยวบินให้แต่ละคนมีจำนวนใกล้เคียงกันให้มากที่สุด จากการจับคู่เที่ยวบินในตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่ารหัส 01 มีคู่เที่ยวบินปลายทางที่ซ้ำกัน 1 คู่เที่ยวบิน ซึ่งมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 0.25 แสดงดังตารางที่ 10 ตารางที่ 10 การคำนวณหาเส้นทางการบินซ้ำน้อยที่สุด

DMK-CEI	DMK-CNX	DMK-NNT	DMK-UTH	DMK-UBP	DMK-SNO	DMK-BFV	DMK-PHS	DMK-NST	DMK-URT	DMK-HDY	DMK-TST	DMK-HKT	DMK-KBV	countrep
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<b>f3 =</b>														<b>0.25</b>

## (5) จำนวนคู่นักบินน้อยที่สุด (Minimizing number of pair of cockpit crews)

จำนวนคู่นักบินน้อยที่สุดคำนวณหลังจากการจับคู่เที่ยวบิน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1

## 2.1.6 การวัดสมรรถนะอัลกอริทึม

เนื่องจากปัญหาการจับคู่เที่ยวบินเป็นปัญหาเอ็นพี-ฮาร์ด (NP-Hard) ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนต่อการแก้ไขปัญหา จึงทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่าอัลกอริทึมใดให้คำตอบได้ดีที่สุด การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจึงจะต้องอาศัยวิธีการพิจารณาจากการนำกลุ่มคำตอบพารอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> Frontier หรือ Pareto Optimal Frontier) ของแต่ละอัลกอริทึมมาหา กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด หรือเรียกว่ากลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Frontier) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างอัลกอริทึมทั้งหมดที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา

กลุ่มคำตอบที่มีความเหมาะสมที่สุดควรเป็นกลุ่มคำตอบที่มีจำนวนคำตอบมากเพียงพอ และมีคำตอบที่เป็นกลุ่มคำตอบที่แท้จริง หรือมีความใกล้เคียงที่สุด โดย Jiang, Ong, Zhang และ Feng (2014) ได้ทำการแบ่งตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ 1.การลู่เข้าของคำตอบ (Generational Distance: GD) 2.การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance: IGD) 3.การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread) 4.อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I) 5.อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II) 6. เวลาในการดำเนินงาน (Computational Time)

### 2.1.6.1 ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics)

การวัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่เข้าของคำตอบ (Convergence Metrics) เป็นการเปรียบเทียบระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม (Obtain Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) แสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$GD(S_j, S^*) = \frac{1}{|S_j|} \sum_{x \in S_j} \min\{d_{xy} | y \in S^*\} \quad (2.11)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left( \frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $GD_j$  คือ Generational Distance ของอัลกอริทึม  $j$

$S_j$  คือ กลุ่มคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> frontier) ซึ่งได้จากอัลกอริทึม  $j$

$S^*$  คือ กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

$|S_j|$  คือ จำนวนคำตอบของกลุ่มคำตอบพรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> frontier) ซึ่งได้จากอัลกอริทึม  $j$

$|S^*|$  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  $j$  ลู่อู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง

### 2.1.6.2 ตัวชี้วัดด้านการลู่อู่และความหลากหลายของคำตอบ (Convergence-Diversity Metrics)

การวัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่และความหลากหลายของคำตอบ (Convergence-Diversity Metrics) เป็นการเปรียบเทียบระยะห่างที่น้อยที่สุดของกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม (Obtain Pareto Optimal Solution) กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (True-Pareto Optimal Solution) แต่ละค่า แสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ 2.13

$$IGD(S^*, S_j) = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y \in S^*} \min\{d_{xy} | x \in S^*\} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $IGD_j$  คือ Inverted Generational Distance ของอัลกอริทึม  $j$

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านการลู่อู่และความหลากหลายของคำตอบของอัลกอริทึม  $j$  มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม  $j$  ลู่อู่สู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริงและมีความหลากหลายของคำตอบมาก แต่อย่างไรก็ตามตัวชี้วัดนี้ไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าอัลกอริทึมมีสมรรถนะด้านการลู่อู่หรือด้านความหลากหลายของคำตอบดีกว่ากัน จึงต้องพิจารณาร่วมกับตัวชี้วัดด้านการลู่อู่ (GD) และตัวชี้วัดด้านความหลากหลาย ( $\Delta^*$ )

### 2.1.6.3 ตัวชี้วัดด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics)

การวัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านปริมาณคำตอบ (Capacity Metrics) เป็นการพิจารณาสัดส่วนของคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำ (Ratio of Non-Dominated Solution) โดยเปรียบเทียบจำนวนของคำตอบบนฟรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> Frontier Solution) ซึ่งได้จากอัลกอริทึมที่  $j$  ว่ามีจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำจากคำตอบของอัลกอริทึมอื่นเท่าใด โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่ การเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม (Self-comparison) และการเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Pareto-optimum comparison) ดังนี้

(1) การเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม (Self-comparison)

การเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบที่แท้จริงที่อยู่ในกลุ่มคำตอบ

บนฟรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> Frontier Solution) แสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ 2.14

$$R_{NDS1}(S_j) = \frac{|S_j - \{x \in S_j | \exists y \in S^* : y < x\}|}{|S_j|} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $y < x$  คือ คำตอบที่หาได้ ( $x$ ) ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบที่แท้จริง ( $y$ )

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านปริมาณคำตอบ การเปรียบเทียบสัดส่วนภายในอัลกอริทึมของอัลกอริทึม  $j$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบบนพรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> Frontier Solution) ของอัลกอริทึม  $j$  โดยส่วนใหญ่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด

(2) การเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Pareto-optimum comparison)

การเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Pareto-optimum comparison) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนคำตอบบนพรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> Frontier Solution) ที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง แสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ 2.15

$$R_{NDS2}(S_j) = \frac{|S_j - \{x \in S_j | \exists y \in S^* : y < x\}|}{|S^*|} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $y < x$  คือ คำตอบที่หาได้ ( $x$ ) ไม่ถูกรอบงำโดยคำตอบที่แท้จริง ( $y$ )

ถ้าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมด้านปริมาณคำตอบ การเปรียบเทียบกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงของอัลกอริทึม  $j$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ากลุ่มคำตอบบนพรอนเทียร์ที่ 1 (1<sup>st</sup> Frontier Solution) ของอัลกอริทึม  $j$  โดยส่วนใหญ่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด

#### 2.1.6.4 ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics)

ตัวชี้วัดด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics) โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะแบ่งออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของคำตอบที่หาได้ (Distribution Measures) ซึ่งเป็นการวัดผลต่างระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบ โดยยิ่งค่าผลต่างมีน้อย แสดงว่าคำตอบมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมาก และด้านความกว้างของการแพร่กระจายของคำตอบที่หาได้ (Spread Indicates) เป็นการวัดระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบปลายสุดของคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่หาได้ เพื่อประเมินว่ากลุ่มคำตอบที่หาได้ มีคำตอบที่ครอบคลุมดีหรือไม่ โดยยิ่งมีค่าระยะห่างที่น้อย แสดงว่าคำตอบมีการแพร่กระจายดี แสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ 2.16 และ 2.17

$$\Delta^*(S_j, S^*) = \frac{\sum_{c=1}^C d(E_c) + \sum_{i=1}^{|S_j|} |d(x_i) - \bar{d}|}{\sum_{c=1}^C d(E_c) + |S_j| \bar{d}} \quad (2.16)$$

$$d(x_i) = \min_{y \in S_j} \sqrt{\sum_{k=1}^K \left( \frac{f_k(x_i) - f_k(x_y)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $d(x_i)$  คือ ระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบตำแหน่งที่  $i$  กับคำตอบตำแหน่ง  $y$   
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 แสดงว่ากลุ่มคำตอบของอัลกอริทึม  $j$  มีความหลากหลายทั้งด้านการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

#### 2.1.6.5 ตัวชี้วัดด้านเวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม

เวลาการดำเนินงานของอัลกอริทึม คือ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของแต่ละอัลกอริทึม โดยจะสามารถเปรียบเทียบเวลาได้เมื่อจำนวนคำตอบที่ทำการพัฒนา (Number of function evaluations) ของแต่ละอัลกอริทึมมีจำนวนเท่ากัน อัลกอริทึมที่ดีจะใช้เวลาค้นหาคำตอบน้อย (จำนวนคำตอบที่ทำการพัฒนาทั้งหมดของแต่ละอัลกอริทึม เท่ากับ จำนวนประชากรของแต่ละอัลกอริทึม คูณกับ จำนวนเจเนอเรชันในการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึม)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการปฏิบัติงานของพนักงานสายการบิน

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมที่ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

2.2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเมตาฮีริสติก (Metaheuristics)

2.2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D)

2.2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรบกวน (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III)

## 2.2.2.4 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)

### 2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการปฏิบัติงานของพนักงานสายการบิน

ในปัจจุบันการดำเนินงานของอุตสาหกรรมสายการบินมีปัญหาที่หลากหลาย เนื่องจากมีหน่วยงานหลายฝ่ายที่เกี่ยวข้องและเพื่อที่จะทำงานร่วมกันการจัดตารางการดำเนินงานจึงมีความจำเป็นต่อการวางแผนการทำงานของสายการบิน (Qi, Yang, & Yu, 2003) ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดตารางในอุตสาหกรรมการบินที่เกี่ยวข้องกับหลายหน่วยงาน ซึ่งแบ่งปัญหาออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. Aircraft Scheduling ในส่วนนี้เป็นการจัดตารางการเลือกใช้ประเภทเครื่องบินที่จะทำการบินในแต่ละช่วงเวลาให้กับเที่ยวบินต่างๆ การเลือกประเภทเครื่องบินให้เหมาะสมในการทำการบินนั้นจะส่งผลถึง กำไร ต้นทุนต่างๆ ทั้งที่เป็นค่าใช้จ่ายทางตรง ได้แก่ ค่าใช้จ่ายการดำเนินงาน ค่าน้ำมัน ค่าจ้างพนักงาน และค่าใช้จ่ายทางอ้อม ได้แก่ ค่าธรรมเนียมในการขึ้น-ลงอากาศยาน (Landing Fees) อย่างไรก็ตามการพิจารณาดังกล่าวจะต้องอยู่ภายใต้กฎ ระเบียบ ข้อบังคับที่กำหนดโดยสำนักงานบริหารการบินแห่งชาติ (Federal Aviation Administration-FAA) และสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย (The Civil Aviation Authority of Thailand-CAAT) ตัวอย่างข้อจำกัด เช่น การที่จะต้องพิจารณาในเรื่องของการเชื่อมต่อเส้นทางการบิน ความสามารถของเครื่องบินชนิดต่างๆ และการบำรุงรักษาเครื่องบิน นอกจากนี้แล้วการจัดตารางเครื่องบินมีความเกี่ยวข้องกับการจัดตารางฝูงบิน (Fleet assignment) เนื่องจากปัญหานี้จะต้องพิจารณาถึงปริมาณที่นิ่งผู้โดยสารตามความต้องการของลูกค้าที่อาจลดลงหรือเพิ่มขึ้น ซึ่งความแตกต่างระหว่างปริมาณที่นิ่งผู้โดยสารและปริมาณที่นิ่งตามความต้องการของลูกค้ามีความไม่แน่นอน เพราะบางสายการบินมีจำนวนที่นิ่งจำกัด หากจัดสรรเครื่องบินที่มีขนาดใหญ่ก็จะสามารถรองรับผู้โดยสารได้มาก แต่ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายทางตรงจำนวนมาก ในทางกลับกันหากจัดสรรเครื่องบินที่มีขนาดเล็กก็จะสามารถรองรับผู้โดยสารได้น้อย ก็จะเสียโอกาสในการแข่งขัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางฝูงบินมีการหาวิธีการเพื่อประมาณค่าใช้จ่ายให้ได้ต่ำที่สุดและแม่นยำที่สุด เนื่องจากการเลือกใช้เครื่องบินแต่ละประเภทนั้นมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน เช่น เครื่องบินจะต้องมีเวลาจอดภาคพื้น (Ground Time) เป็นระยะเวลาหนึ่ง ไม่สามารถที่จะทำการ

บินเข้าหรือขาออกได้ทันที ทั้งนี้เป็นการดำเนินการเพื่อลดต้นทุนหรือเพิ่มกำไรในแต่ละเที่ยวบินของสายการบิน (Cadarso & Marín, 2013) ได้ศึกษาและพัฒนาการออกแบบตารางงาน การจัดตารางฝูงบิน และผู้โดยสาร เพื่อให้ลดค่าใช้จ่ายและเพื่อลดความขัดแย้งในการพิจารณาประกอบการตัดสินใจ ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองความน่าจะเป็นของตัวแปรในกระบวนการเฟ้นสุ่มที่เกิดจากความต้องการของลูกค้าแบบรายวันซึ่งเป็นข้อมูลที่ไม่แน่นอนและมีแนวโน้มไม่คงที่ ทำให้ยากต่อการพยากรณ์ จากการวิจัยพบว่าแบบจำลองดังกล่าวช่วยให้การยกเลิกเที่ยวบินของผู้โดยสารแต่ละคนลดลง (Allung Blegur, Bakhtiar, & Aman, 2014) ได้ศึกษาวิธีการหากำไรสูงสุดสำหรับทุกเที่ยวบิน ซึ่งพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดเกี่ยวกับระยะทางวิ่ง (Runway) โดยมีวัตถุประสงค์ให้มีการจัดตารางฝูงบินให้เหมาะสมกับเที่ยวบินมากที่สุด ทั้งนี้ต้องมีค่าใช้จ่ายและจำนวนเครื่องบินที่ใช้ทำการบินน้อย นอกจากนี้ยังได้มีการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นตรง ปัจจัยที่นำมาพิจารณาเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย ประกอบด้วยจำนวนที่นั่งผู้โดยสาร น้ำหนักเครื่องสำหรับลงจอด (Landing Weights) จำนวนพนักงานที่ปฏิบัติหน้าที่การบิน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และราคาน้ำมัน ผลจากการแก้ปัญหาแบบจำลองเชิงเส้นตรงนี้ พบว่าทำให้ค่าใช้จ่ายรายวันลดลง และสามารถวางแผนให้ได้มีจำนวนเครื่องบินที่ต้องจอดค้างคืนที่ลานบินน้อย นอกจากนี้ยังช่วยให้ตัดสินใจทำงานบำรุงรักษาเฉพาะที่จำเป็นในตอนกลางคืนได้อีกด้วย

การจัดตารางการบำรุงรักษาเครื่องบิน (Aircraft Maintenance Routing) เป็นอีกงานหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับการจัดตารางที่เกี่ยวกับเครื่องบิน เนื่องจากการจัดตารางการซ่อมบำรุงเป็นการมอบหมายงานให้พนักงานซ่อมบำรุงรักษาและตรวจสอบสภาพเครื่องบินในแต่ละประเภทของฝูงบินที่จะต้องทำการบิน ซึ่งการตรวจสอบเครื่องบินแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามกฎของสำนักงานบริหารการบินแห่งชาติ (Federal Aviation Administration-FAA) ได้แก่ A-check, B-check, C-check และ D-check ซึ่งแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันที่ขอบเขตของงาน ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบแต่ละครั้ง อย่างไรก็ตามการบำรุงรักษาเครื่องบินให้มีความพร้อมที่จะทำการบินโดยให้มีเหตุขัดข้องที่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานบินน้อยที่สุดมีความสำคัญมากที่สุด

2. Crew scheduling เป็นการจัดตารางปฏิบัติงานของพนักงานสายการบิน แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การจับคู่เที่ยวบิน (Crew pairing) และการมอบหมายงานให้กับพนักงาน (Crew rostering) การจับคู่เที่ยวบินนั้นจะต้องคำนึงถึงลำดับเที่ยวบิน ซึ่งแต่ละเที่ยวบินที่ใช้เครื่องบินลำเดียวกันจะรวมกันเป็นคู่เที่ยวบิน โดยได้กำหนดให้เครื่องบินที่บินไปและกลับมานั้นอิง

จากฐานเดียวกัน ทั้งนี้การจัดคู่เที่ยวบินนั้นจะต้องเหมาะสมต่อลูกเรือแต่ละคน ต้องไม่ขัดกับข้อจำกัดด้านเวลาพัก เวลาปฏิบัติงาน ชั่วโมงปฏิบัติหน้าที่การบินสูงสุด อย่างไรก็ตามแต่ละคู่เที่ยวบินจะมีจำนวนชั่วโมงบิน เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของเที่ยวบินที่แตกต่างกัน (Hoffman & Padberg, 1993) นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี Branch and cut สำหรับแก้ปัญหาที่เป็นแบบจำลองเซตพาร์ทิชันนิ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าจ้างนักบิน (Teodorovic & Lucic, 1998) ได้ทำการศึกษารายการการจัดตารางปฏิบัติงานโดยมอบหมายงานให้นักบินลงในแผนตารางเที่ยวบินแบบรายเดือน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับดุลภาระงานและรายได้ ทั้งนี้ต้องพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดหลายข้อ ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาที่ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการจัดตารางแบบ Day by Day เป็นวิธีการฮิวริสติกที่จะทำให้หาคำตอบที่เป็นไปได้เพื่อใช้เป็นคำตอบเริ่มต้นที่พัฒนาต่อไปในขั้นตอนต่อไป และขั้นตอน Fuzzy Logic เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อพัฒนาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์และหลายข้อจำกัด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับสายการบินขนาดเล็กและขนาดกลาง จากการศึกษาพบว่าอัลกอริทึมดังกล่าวใช้เวลาในการประมวลผลไม่มาก และสามารถปรับเปลี่ยนข้อจำกัดได้ (Lucic & Teodorovic, 1999) ได้ทำการศึกษารายการการจัดตารางปฏิบัติงานโดยมอบหมายงานให้นักบินลงในแผนตารางเที่ยวบินแบบรายเดือน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับดุลภาระงานและรายได้ ทั้งนี้ต้องพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดหลายข้อ ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาที่ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการจัดตารางแบบ Pilot by Pilot เป็นวิธีการฮิวริสติกที่จะทำให้หาคำตอบที่เป็นไปได้เพื่อใช้เป็นคำตอบเริ่มต้นที่พัฒนาต่อไปในขั้นตอนต่อไป และขั้นตอน Simulated Annealing เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติกเพื่อพัฒนาคำตอบที่มีหลายวัตถุประสงค์และหลายข้อจำกัด โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกับสายการบินขนาดเล็กและขนาดกลาง จากการศึกษาพบว่าอัลกอริทึมดังกล่าวใช้เวลาในการประมวลผลไม่มาก (Yan, Tung, & Tu, 2002) ได้ศึกษารายการการจัดตารางปฏิบัติงานนักบินสำหรับสายการบินไต้หวัน (Taiwan Airline) ที่มีสนามบินเป็นฐานอยู่เพียงแห่งเดียวและมีเครื่องบินหลายประเภท มีจุดประสงค์ลดต้นทุนเกี่ยวกับการจ้างนักบินและวางแผนคู่นักบินได้อย่างเหมาะสม โดยได้มีการพัฒนาเครือข่ายการจัดตารางเวลา 2 รูปแบบ เพื่อสร้างการจับคู่นักบินที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองเซตพาร์ทิชันนิ่งเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ (Kohl, 2004) ได้เสนอระบบ Carmen crew rostering เพื่อแก้ปัญหาแบบจำลองเซตพาร์ทิชันนิ่ง โดยมีการพิจารณาหลายข้อจำกัด (Barnhart & Cohn, 2004) เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นทางด้านศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ของการสร้างแบบจำลองและการแก้ปัญหา โดย



ยกตัวอย่างของผลกระทบที่เกี่ยวข้องและเทคนิคการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองเซตพาร์ทิชันนิ่งสำหรับปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน (Crew-pairing) และปัญหาการจัดตารางปฏิบัติงานของพนักงาน (Bidline หรือ Rostering) ซึ่งได้สร้างตัวแปรตัดสินใจเกี่ยวกับการลดต้นทุนในการจัดสรรคนักบิน (Liu, Chen, Chou, et al., 2010) ได้ศึกษาการจับคู่เที่ยวบินในสายการบินภายในประเทศ มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยเสนอรูปแบบการแก้ปัญหาคือมีการกำหนดแบบจำลองในชั้น Formula Stage ที่ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และกำหนดการทำงานในชั้น Solution Stage ที่มีรูปแบบการทำงานแตกต่างกัน โดยผู้วิจัยได้เสนอเจเนติกอัลกอริทึมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective genetic algorithm: MMGA) ในการหาคำตอบสำหรับการจัดเส้นทางการบินและจับคู่เที่ยวบิน นอกจากนี้ได้เสนอวิธีการฮีริสติกพาเรโต (Heuristic Pareto algorithm) ในการจัดอันดับความสำคัญของชุดคำตอบเพื่อเลือกวิธีการทำงานที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด (Dück, Ionescu, Kliever, & Suhl, 2012) ได้ทำการศึกษาการหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดตารางการปฏิบัติงานของพนักงานต้อนรับบนเครื่องบิน และสิ่งอำนวยความสะดวกที่สนามบิน เมื่อเกิดความล่าช้าของจราจรทางการบิน จะส่งผลให้การจัดตารางล่าช้าตามไปด้วย ผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองสโตแคสติก(Stochastic model) คอลัมน์เจเนอเรชัน (Column Generation) และไดนามิกโปรแกรมมิ่ง (Dynamic Programming) ในการแก้ไขปัญหา จากนั้นทำการประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองด้วยแบบจำลองการจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) (Reisi-Nafchi & Moslehi, 2013) ได้เสนอ 2 อัลกอริทึม เพื่อพัฒนาแบบจำลองปัญหาแบบเซตพาร์ทิชันนิ่งและคอลัมน์เจเนอเรชันที่เป็นการแก้ปัญหาขนาดใหญ่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายจากการทำการวางแผนคู่เที่ยวบิน ได้แก่ Shortest path with resource constraint in the revised flight network (SPRCF) และ Shortest path with resource constraint in the revised duty period network (SPRCD) ด้วยหลักการ Shortest path ผลการวิจัยพบว่าวิธีการนี้ใช้เวลาเฉลี่ยนน้อยกว่าวิธีการอื่นๆ ในการแก้ปัญหา

3. Disruptive Management เป็นแผนที่รองรับปัญหาที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานรายวัน เช่น สภาพอากาศ เครื่องมืออุปกรณ์ และการลาป่วยของพนักงาน สายการบินจำเป็นต้องมีแผนรองรับดังกล่าวเพื่อช่วยจัดการและควบคุมสถานการณ์หรือเหตุการณ์อันไม่พึงประสงค์ให้กลับมาเป็นปกติ (AhmadBeygi, Cohn, & Weir, 2009) ได้ศึกษาถึงปัญหาหลักที่ผู้โดยสารด้วยเครื่องบิน

ต้องประสบเป็นประจำ คือปัญหาความล่าช้าของสายการบินที่เกิดจากสภาพอากาศ ปัญหาด้านเทคนิค และปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลให้แผนงานต้องหยุดชะงักลง ไม่เป็นไปตามแผนงานที่ได้วางไว้ก่อนล่วงหน้า

4. Combination of Airlie Scheduling เป็นตารางงานที่ประกอบด้วยแผนการลงจอด เครื่องบิน แผนการฝึกอบรมนักบิน ปัญหาการควบคุมการบินขึ้น ปัญหาการขนส่งกระเป๋า ผู้โดยสาร เป็นต้น Beasley et al. (2000) ได้ศึกษาปัญหาในการจัดตารางการลงจอดของเครื่องบิน โดยได้เสนอ Mixed-integer Zero-one Formulation และ Linear Programming-based Tree Search ในการแก้ปัญหาการจัดตารางสำหรับลานจอดเดี่ยวและหลายลานจอด Habel (2013) ได้ศึกษาวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาการจัดตารางการฝึกอบรมนักบิน โดยใช้ระบบการสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System) ซึ่งมุ่งเน้นการลดค่าใช้จ่ายด้านการจ้างพนักงาน มาช่วยในการแก้ปัญหาการจัดตารางนี้ประกอบด้วยการจัดตารางฝูงบิน การจัดตารางกำลังพนักงานต้อนรับ พนักงานการบิน พนักงานบำรุงรักษา การจัดตารางการโหลดสินค้าสัมภาระ การจัดตารางเที่ยวบิน ซึ่งการจัดตารางดังกล่าวนี้จะมีปัญหาที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับปริมาณความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลง ฉะนั้นการพยากรณ์จำนวนนักบินก็จะไม่แน่นอน การกำหนดวันเวลาในการฝึกอบรม และวันลาพักร้อนก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผู้วิจัยได้นำเสนอ Promising Solution ในการจัดตารางโดยใช้ข้อมูลจริงและเพื่อให้ได้คำตอบในเวลาอันสั้น นอกจากนี้ยังได้เสนอ Column Generation และ Dynamic Programming มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นเมื่อมีการปรับเปลี่ยนสมมติฐานให้เพิ่มขึ้นหรือลดลง

ปัญหาการจัดตารางปฏิบัติงานของพนักงานสายการบิน เป็นปัญหาที่มีนักวิจัยได้ให้ความสนใจมาหลายปี จากการศึกษางานวิจัยพบว่ามีคำแนะนำปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการต่างๆ ทั้งทางด้านการใช้การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหา เช่น การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบเซตคาฟเวอร์จิง (Stojkovi, Soumis, Desrosiers, & Marius M. Solomon d, 2002) และ (AhmadBeygi et al., 2009) รวมทั้งได้ใช้เทคนิคต่างๆ ในการแก้ปัญหา อย่างเช่น branch and bound, branch and cut, Lagrangian lower bound , partially integrated approach, column generation, 0-1 multicommodity flow และอีกด้านหนึ่งคือวิธีการแก้ปัญหาโดยขั้นตอนวิธีทางฮิวริสติก เช่น scatter search heuristic, tabu search, simulated

annealing, particle swarm optimization (genetic algorithm) ทั้งนี้ได้รวบรวมงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การแก้ปัญหาการจัดตารางการปฏิบัติงานของพนักงานสายการบิน ดังต่อไปนี้

(Stojkovi et al., 2002) ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางนักบิน โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อจับคู่เที่ยวบินที่ทำให้ช่วงเวลาตั้งแต่ออกจากฐานจนกระทั่งกลับฐานมีค่าน้อยที่สุด สำหรับการจัดตารางการบินใหม่เมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิดภายในสายการบิน โดยคำนึงถึงข้อจำกัดเกี่ยวกับเวลาที่จุดเริ่มต้น จุดสิ้นสุด และระหว่างการบิน และได้ทำการแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปแบบจำลองการไหลของโหนดภัณฑ์ (network flow) จากการศึกษาพบว่าเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เริ่มต้นมาหาผลลัพธ์ด้วยวิธีการซิมเพล็กซ์ เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นแบบโพลิโนเมียลตามขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบจำลองการไหลของโหนดภัณฑ์มาแปลงเป็นรูปแบบคู่ควบแล้ว เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มในลักษณะเส้นตรงตามขนาดของปัญหา

(Yan et al., 2002) ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางนักบิน โดยได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทคนิคคอลัมน์เจเนอเรชัน และโครงข่ายการจัดตารางงาน มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายการจ้างนักบินในการวางแผนการจับคู่เที่ยวบินที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินได้วันเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษการจัดตารางภายใน 1 สัปดาห์ จำนวน 444 เที่ยวบิน เครื่องบินจำนวน 7 รุ่น ใช้เวลาในการคำนวณ 10 วินาที ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายและลดเวลาการแก้ปัญหาได้ดีกว่าเทคนิคคอลัมน์เจเนอเรชันแบบเดิม

(AhmadBeygi et al., 2009) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน โดยเสนอเทคนิคคอลัมน์เจเนอเรชันในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาย่อยในรูปแบบกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม (integer programming) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาคู่เที่ยวบินที่มีผลรวมเวลาน้อยที่สุด โดยมีตัวแปรที่บอกว่าเที่ยวบินนั้นควรอยู่ตำแหน่งใดของคู่เที่ยวบิน (marker variables) กับตัวแปรที่บอกความต่อเนื่องของเที่ยวบิน (connection variables) มาช่วยในการสร้างแบบจำลองงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลของสายการบินหนึ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษานักบินจำนวน 143 เที่ยวบิน ใช้เวลาในการคำนวณตั้งแต่ 194 วินาที จนถึง 252 วินาที ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดเวลาการแก้ปัญหาได้ดีกว่าเทคนิคคอลัมน์เจเนอเรชันแบบเดิม

(Liu, Chen, & Chou, 2010) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินหลายวัตถุประสงค์สำหรับสายการบินภายในประเทศเส้นทางการบินระยะสั้นโดยเสนอเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการจับคู่ งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลของสายการบินหนึ่งในประเทศไต้หวันเป็นกรณีศึกษา ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ได้แก่ ขนาดประชากร จำนวนเจเนอเรชัน อัตราการครอสโอเวอร์ อัตราการมิวเตชัน 100, 10000, 0.95 และ 0.03 ตามลำดับ โดยอัลกอริทึมสามารถหยุดการทำงานได้อย่างรวดเร็วเมื่อเจอคำตอบทั้งหมดโดยปราศจากการละเมิด ผลการศึกษาพบว่าสามารถแก้ปัญหาโดยลดค่าใช้จ่ายและใช้เวลาการแก้ปัญหาได้ดีกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

(Ionescu & Kliewer, 2011) ได้ศึกษาปัญหาการจัดตารางนักบินโดยได้เสนอแบบจำลองสโตแคสติก มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดตารางให้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามสถานการณ์โดยยังคงต้นทุนที่ต่ำ งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินหนึ่งในทวีปยุโรปเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาการจัดตารางรายวัน จำนวน 396-427 เที่ยวบิน ใช้เวลาในการคำนวณ 15 นาที ผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดตารางนักบินได้แม้จะเพิ่มมีการข้อจำกัด

(Reisi-Nafchi & Moslehi, 2013) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินโดยได้เสนออัลกอริทึมเส้นทางการสั้นที่สุดด้วยข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่ปรับเปลี่ยนด้วยเครือข่ายเที่ยวบินและอัลกอริทึมเส้นทางการสั้นที่สุดด้วยข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่ปรับเปลี่ยนด้วยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจับคู่เที่ยวบิน งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินสองสายการบินในประเทศอิหร่านเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาการจัดตารางรายวัน ใช้เวลาในการคำนวณ 0.47-8.50 วินาที สำหรับขนาด 26-42 เที่ยวบิน และ 13.01-1370.30 วินาที สำหรับขนาด 110-632 เที่ยวบิน ผลการศึกษาพบว่าสามารถจับคู่เที่ยวบินได้หลายเที่ยวบินโดยใช้เวลาการคำนวณไม่มาก

(Elhabashy, Elwany, & Abouelseoud, 2014) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินโดยได้เสนอวิธีเชิงพันธุกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจับคู่เที่ยวบิน งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินท้องถิ่นในประเทศอียิปต์เป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาการจัดตารางรายวันในหนึ่งสัปดาห์ มีเที่ยวบินที่จับคู่ทั้งสิ้น 342 คู่เที่ยวบิน ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดต้นทุนได้ถึง 15.8%

(Erdoğan, Haouari, Matoglu, & Özener, 2017) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่โดยได้เสนอวิธีฮิวริสติก มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจับคู่เที่ยวบิน งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินแห่งหนึ่งในทวีปอเมริกาเหนือเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาการจัดตารางรายวัน จำนวน 27000 เที่ยวบิน ใช้เวลาในการคำนวณที่สั้น ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดเวลาในการค้นหาคำตอบการจับคู่เที่ยวบิน

(Deveci & Demirel, 2018) ได้ทำการศึกษางานวิจัยในหัวข้อการแก้ปัญหาการจัดตารางปฏิบัติงานนักบินของสายการบินราคาประหยัดโดยใช้วิธีเมตาฮิวริสติก มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1.หาค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด 2.ปรับคุณภาพงานนักบินให้เท่าเทียมกัน 3.การจัดงานของตำแหน่งอาวุโส 4.กระจายรูปแบบเที่ยวบินให้เท่าเทียมกัน โดยได้เสนออัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบและเปรียบเทียบกันได้แก่ MOEA/D, HBMO และ MOEA/D-HBMO ผลจากการทดลองพบว่า MOEA/D-HBMO มีประสิทธิภาพดีที่สุดทั้งในปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

(Iijima & Nishi, 2016) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่โดยได้เสนอวิธีคอลัมน์เจเนอเรชันและวิธี Backtracking Heuristic มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับสมดุลเวลางาน งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินแห่งหนึ่งในทวีปอเมริกาเหนือเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาการจัดตารางรายวัน จำนวน 27000 เที่ยวบิน ใช้เวลาในการคำนวณที่สั้น ผลการศึกษาพบว่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสั้นกว่าวิธี Greedy Heuristic และวิธี Branch and Bound

(Deveci & Demirel, 2018) ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่โดยได้เสนออัลกอริทึมแบบวิวัฒนาการ โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมหลายตัวแปร (Genetic Algorithm Variants) และวิธีการลอกแบบร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรมด้วยวิธีการปีนเขา (Memetic Algorithm hybridizing GA with hill climbing) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายการจับคู่เที่ยวบิน งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากสายการบินตุรกีเป็นกรณีศึกษา โดยทำการศึกษาการจัดตารางรายวัน จำนวน 714 เที่ยวบิน ผลการศึกษาพบว่าวิธีการลอกแบบร่วมกับวิธีเชิงพันธุกรรมด้วยวิธีการปีนเขา (Memetic Algorithm hybridizing GA with hill climbing) เป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

## 2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมที่ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

### 2.2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเมตาฮีวิริสติก Metaheuristics

วิธีการเมตาฮีวิริสติกเป็นวิธีการที่ออกแบบมาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด สำหรับปัญหาที่ต้องการหาค่าที่ดีที่สุดที่มีความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้ไขปัญหา วิธีการนี้มักถูกใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบโดยใช้เลขสุ่มเพื่อให้เกิดการค้นหาพื้นที่วงกว้างของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) แม้ว่าคำตอบที่เกิดขึ้นจากวิธีการนี้ไม่สามารถรับประกันได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเหมือนวิธีการอื่นๆ แต่วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ถูกนิยมมาพัฒนาเพื่อใช้ในการลดระยะเวลาการค้นหาคำตอบ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ จึงถูกจัดเป็นปัญหาประเภทเอ็นพี-ฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard หรือ NP-Hard) การค้นหาคำตอบของปัญหาจึงต้องใช้ระยะเวลานาน และมีคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมาก หากต้องการค้นหาคำตอบในกรณีของปัญหาที่ไม่มีข้อจำกัด คำตอบที่เป็นไปได้ของงานจำนวน 10 งาน จะมีจำนวน  $10!$  ซึ่งเท่ากับ 362880 คำตอบ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่นาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการเมตาฮีวิริสติกเข้ามาช่วยแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization Problems: MOPs) เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมและเป็นที่ยอมรับได้ในเวลาที่สั้นลง จากการทบทวนพบว่าม้งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

(Blum & Roli, 2003) ได้ศึกษาสมรรถนะของวิธีการเมตาฮีวิริสติก จากการศึกษาพบว่า เป็นวิธีการค้นหาคำตอบจากชุดคำตอบที่เป็นไปได้ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความเป็นระเบียบแบบแผนในการค้นหาคำตอบ มีค่าของคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุด และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นาน Yagiura และ Ibaraki (2004) ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการจัดสรรงาน และได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาจำนวน 3 วิธี คือ Variable depth search algorithms (VDS), Tabu search with ejection chains (TSEC) และ Path relinking with ejection chains (PREC) จากการศึกษพบว่าทั้ง 3 วิธี ให้คำตอบที่สามารถใช้เป็นตารางมาตรฐานสำหรับจัดสรรงาน Iori, M. (2004) ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการจัดตารางสำหรับงานตัด (Cutting) และงานบรรจุ (Packing) และเส้นทางยานพาหนะ (Routing) ผู้วิจัยได้เสนอวิธีการแบบวิธีแม่นยำตรง (Exact Method) และวิธีการเมตาฮีวิริสติกสำหรับการแก้ปัญหาที่มีชุดคำตอบที่แน่นอน (Combinatorial Optimization: CO) จากการศึกษพบว่าคำตอบที่ได้เป็น

คำตอบที่น่าพอใจ Baghel, Agrawal และ Silakari (2012) ได้ศึกษาทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเมตาฮิวริสติก เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่มีวัตถุประสงค์เดียวหรือหลายวัตถุประสงค์ ตัวอย่างปัญหามีหลายด้าน เช่น การออกแบบด้านวิศวกรรม การบริการด้านเกษตรกรรม ระบบการผลิตในอุตสาหกรรม การบริหารทรัพยากรในด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น Jarraya และ Bouri (2012) ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาแบบวัตถุประสงค์เดียวและหลายวัตถุประสงค์ ทั้งที่เป็นปัญหาที่เป็นสมการเชิงเส้นตรง และสมการรูปแบบอื่น เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยในด้านต่างๆ เช่น ด้านนวัตกรรมและเทคโนโลยี ด้านการแพทย์ ด้านเศรษฐศาสตร์ ด้านการเงิน เป็นต้น ผู้วิจัยได้เสนอวิธีเมตาฮิวริสติกต่างๆ เช่น วิธีการเลียนแบบการอบอ่อน (Simulated Annealing), วิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm), วิธีการค้นหาต้องห้าม (Tabu Search), วิธีการค้นหาที่ดีที่สุดด้วยฝูงอนุภาค (Particle Swarm) และวิธีการอาณานิคมมด (Ant Colony) เป็นต้น จากผลการศึกษาพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้หาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ Gognaa และ Tayal (2012) ได้ศึกษาวิธีการเมตาฮิวริสติกในการจัดการปัญหาแบบ NP-Hard พบว่าสิ่งที่เป็นข้อได้เปรียบของวิธีนี้ในการหาคำตอบที่ดี ได้แก่ 1) ประโยชน์การใช้งานโดยทั่วไป เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามรูปแบบของปัญหา 2) ใช้เวลาการคำนวณที่เหมาะสม 3) คำตอบที่ค้นหาได้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ (Global Optimum) และเป็นที่ยอมรับได้แม้ว่าไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด Malik และ Tayal (2014) ได้ศึกษาวิธีการเมตาฮิวริสติก และพบว่าวิธีการนี้เป็นวิธีสำหรับการค้นหาคำตอบระดับสูงที่สามารถสร้างขั้นตอนอย่างง่าย มีการลู่เข้าคำตอบที่ดี ใช้เวลาในการประมวลผลน้อย และเป็นวิธีที่มีการปรับเปลี่ยนลักษณะกระบวนการทางคณิตศาสตร์ และวิธีการทดลองเพื่อหาผลของคำตอบที่น้อยที่สุดหรือมากที่สุด

Gisele L. et al. (2010) ได้กล่าวถึงการออกแบบการทดลองในงานวิจัยหัวข้อ Tuning Genetic Programming parameters with factorial designs ว่าเนื่องจากจุดประสงค์หลักของการออกแบบการทดลองคือการเอาจำนวนข้อมูลสูงสุดที่เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัยและมีอิทธิพลต่อผลของระบบที่มีจำนวนทดลองน้อยที่สุด การวิเคราะห์การทดลองอย่างเหมาะสมจะช่วยแยกผลกระทบที่มาจากปัจจัยต่างๆ อาจส่งผลต่อสมรรถนะของอัลกอริทึม นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดว่าปัจจัยเหล่านั้นมีนัยสำคัญหรือข้อมูลที่ได้มีค่าที่แตกต่างกันในรูปแบบของการสุ่มซึ่งอาจมีสาเหตุจากข้อผิดพลาดจากการจัดเก็บข้อมูลและพารามิเตอร์ที่ไม่สามารถควบคุมได้

การพิจารณาถึงปัจจัยตอบสนองที่มีผลจากการทดลองนั้น โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาหลายระดับ ปัจจัยซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการทำการทดลองขนาดใหญ่เป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรที่มีอยู่ ดังนั้นการลดจำนวนปัจจัยและการพิจารณาเฉพาะระดับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งในงานวิจัยเสนอรูปแบบการทดลอง  $2^k$  factorial โดยที่  $k$  คือระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยจะเลือกทำการทดลองเฉพาะระดับปัจจัยที่มีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด

เนื่องจากปัญหาในงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน ใช้เวลาดำเนินการคำตอบนาน และถูกจัดเป็นปัญหาประเภท NP-Hard เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสูญเสียทรัพยากรด้านเวลา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การทดลอง  $2^k$  factorial โดยจะเลือกทำการทดลองเพียงเฉพาะระดับปัจจัยที่มีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดโดยอ้างอิงจากหลักการของงานวิจัยนี้ และอ้างอิงระดับปัจจัยตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอัลกอริทึมที่ทำการศึกษา ได้แก่ MOEA/D, NSGA-III และ MODE ซึ่งจะแสดงในบทที่ 7 หัวข้อการกำหนดค่าพารามิเตอร์

#### 2.2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D)

(Qingfu & Hui, 2007) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่าง MOEA/D ซึ่งเป็นการแยกปัญหาที่ต้องการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์เป็นตัวเลขสเกลาร์ (Scalar) ของแต่ละปัญหาย่อย และ MOGLS (Multi-Objective Genetic Local Search) เป็นวิธีการที่เน้นการประเมินแบบค่าถ่วงน้ำหนักและเทบิเซฟ ผลการศึกษาพบว่าวิธี MOEA/D ดีกว่าวิธี MOGLS เนื่องจากวิธี MOEA/D ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบของปัญหาที่ซับซ้อนได้น้อยกว่าวิธี MOGLS

(Ishibuchi, Tsukamoto, Hitotsuyanagi, & Nojima, 2008) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างวิธี EMO (Evolutionary Multi -Objective Optimization) และวิธี NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) จากการศึกษาพบว่าวิธี EMO เป็นวิธีที่ให้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี NSGA-II เมื่อใช้แก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ (Many-Objective)

(Li, Li, Tang, & Yao, 2015) ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วิธีการเชิงวิวัฒนาการสำหรับปัญหาหลายวัตถุประสงค์ จากการศึกษาพบว่าโดยทั่วไปงานวิจัยนิยมใช้วิธี MOEAs (Multi-Objective Evolutionary Algorithms) ซึ่งอ้างอิงวิธี MaOPs (Many-Objective



Optimization Problem) ทั้งนี้ได้แบ่งอัลกอริทึม MaOEAs (Many-Objective Evolutionary Algorithms) 7 ประเภท ได้แก่ relaxed dominance based, diversity-based, aggregation-based, indicator-based, reference set based, preference-based, และ dimensionality reduction ซึ่งในแต่ละประเภทได้ทำการแก้ปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ และลดเวลาในการคำนวณ

### 2.2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III)

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

### 2.2.2.4 วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)

Price, Storn, and Lampinen (2006) ได้นำเสนอ Differential Evolution โดยการสุ่มเวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector) จากนั้นสุ่มเลือกเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจุดพิกัดเวกเตอร์ด้วยผลต่างของเวกเตอร์สุ่มสองเวกเตอร์ จะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ เมื่อทำการกลายพันธุ์จนครบจำนวนประชากรแล้ว จะทำการแลกเปลี่ยนค่าพิกัด (Recombination) ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมายและเวกเตอร์กลายพันธุ์ เวกเตอร์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนค่าพิกัดแล้ว จะถูกเรียกว่าเวกเตอร์ทดลอง (Trial vector) หลังจบกระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) แล้วให้นำเวกเตอร์ทดลองเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมาย ถ้าให้ค่าที่ต่ำกว่าจะถูกแทนที่เป็นเวกเตอร์เป้าหมายรุ่นต่อไป

ภายหลังจากที่ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย จะสามารถสรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ตามตารางที่ 11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัญหาการจัดตารางนักบินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ 1.ปัญหาการจัดคู่เที่ยวบิน (Crew Pairing) 2.ปัญหาการมอบหมายงานให้แก่นักบิน (Crew Rostering) ซึ่งมีวัตถุประสงค์และอัลกอริทึมที่นำเสนอที่แตกต่างกันไป โดยงานวิจัยที่จะทำการศึกษานั้นจะทำการศึกษาการแก้ปัญหาการจัดคู่เที่ยวบินแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยจะแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือ ส่วนมากจะทำการศึกษาปัญหาการจัดคู่เที่ยวบินเพียงวัตถุประสงค์เดียว ซึ่งงานวิจัยของ Liu, Chen, Chou, และ Ho (2010) มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้มากที่สุดคือ จะทำการศึกษาการจัดคู่เที่ยวบินภายในประเทศ โดยใช้วิธีทางพันธุกรรมแบบหลายวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ (Deveci & Demirel, 2018) มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้คือ จะทำการศึกษาการจัดตารางปฏิบัติงานนักบินภายในประเทศ โดยใช้วิธีทางพันธุกรรมแบบมากวัตถุประสงค์ ทั้งนี้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ศึกษามาส่วนมากมีวัตถุประสงค์มุ่งเรื่องการลดค่าใช้จ่ายเป็นหลัก แต่ในงานวิจัยของ (Deveci & Demirel, 2018) นอกจากการลดค่าใช้จ่ายแล้ว ยังทำการปรับดุลภาระงานนักบินให้เท่าเทียมกัน อีกทั้งยังพิจารณาการจัดงานของตำแหน่งอาวุโสและการกระจายรูปแบบเที่ยวบินให้เท่าเทียมกันร่วมด้วย

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยใหม่แบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งได้ประยุกต์บางวัตถุประสงค์ของ Ariyikanon & Chutima (2017) และได้เพิ่มวัตถุประสงค์ที่คาดว่าจะเป็นที่ประโยชน์ต่อการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมการบิน ดังนั้นสายการบินอาจจะนำเอาเพียงบางวัตถุประสงค์ หรือทุกวัตถุประสงค์ที่ต้องการไป ประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับสถานการณ์

ดังนั้นการเปรียบเทียบผลการศึกษาเพื่อที่จะพิสูจน์ว่างานวิจัยนี้ดีกว่างานวิจัยอื่นที่ผ่านมา หรือให้ค่าที่ดีที่สุดนั้น ไม่สามารถทำได้ด้วยการเปรียบเทียบแต่ละค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต่อค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา แต่จะสามารถเปรียบเทียบค่าที่ดีที่สุด ในอัลกอริทึมด้วยเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพารето (Pareto Ranking Approach) ซึ่งจะแสดงในบทที่ 4 - บทที่ 6

ตารางที่ 10สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชื่อผู้วิจัย	วัตถุประสงค์	เครื่องมือที่ใช้	ผลการวิจัย
Stojkovi, Soumis, Desrosiers, M และ Solomon (2002)	จับคู่เที่ยวบินที่ทำให้ ช่วงเวลาตั้งแต่ออก จากฐานจนกระทั่ง กลับฐานมีค่าน้อย ที่สุด	แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ในรูป แบบจำลองการไหล ของโมคัมพันธ์	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ จะเพิ่มในลักษณะ เส้นตรงตามขนาดของ ปัญหา
Yan และ Chang (2002)	ลดค่าใช้จ่ายการจ้าง นักบินในการวางแผนการจับคู่ เที่ยวบินที่เหมาะสม	แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์เทคนิค คอลัมน์เจเนอเรชัน และโครงข่ายการจัด ตารางงาน	ลดค่าใช้จ่ายและลด เวลาการแก้ปัญหาได้ ดีกว่าเทคนิคคอลัมน์เจ เนอเรชันแบบเดิม
AhmadBeygi, Cohn และ M. (2009)	หาคู่เที่ยวบินที่มี ผลรวมเวลาน้อย ที่สุด	เทคนิคคอลัมน์เจเนอ เรชันในการสร้าง แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์	ลดเวลาการแก้ปัญหาได้ ดีกว่าเทคนิคคอลัมน์เจ เนอเรชันแบบเดิม
Liu, Chen, Chou, และ Ho (2010)	ลดค่าใช้จ่ายทั้งหมด ในการจับคู่เที่ยวบิน	เทคนิควิธีเชิง พันธุกรรม (Genetic Algorithms)	ลดค่าใช้จ่ายและใช้เวลา การแก้ปัญหาได้ดีกว่า การใช้แบบจำลองทาง คณิตศาสตร์
Ionescu และ Kliwer (2011)	เพิ่มความยืดหยุ่นใน การจัดตารางให้ สามารถปรับเปลี่ยน ได้ตามสถานการณ์ โดยยังคงต้นทุนที่ต่ำ	แบบจำลองสโต- แคสติก	สามารถเพิ่มความ ยืดหยุ่นในการจัดตาราง นักบินได้แม้จะเพิ่มมีการ ข้อจำกัด

ตารางที่ 11 สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

Reisi-Nafchi และ Moslehi (2013)	ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจับคู่เที่ยวบิน	อัลกอริทึมเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่ปรับเปลี่ยนด้วยเครือข่ายเที่ยวบินและอัลกอริทึมเส้นทางที่สั้นที่สุดด้วยข้อจำกัดด้านทรัพยากรที่ปรับเปลี่ยนด้วยช่วงเวลาปฏิบัติหน้าที่การบิน	สามารถจับคู่เที่ยวบินได้หลายเที่ยวบินโดยใช้เวลาการคำนวณไม่มาก
Elhabashy, Elwany, และ Abouelseoud (2014)	ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจับคู่เที่ยวบิน	วิธีเชิงพันธุกรรม	สามารถลดต้นทุนได้ถึง 15.8%
Erdogan, Haouari, Matoglu และ Ozener (2015)	ลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจับคู่เที่ยวบิน	วิธีฮิวริสติก	ลดเวลาในการค้นหาคำตอบการจับคู่เที่ยวบิน
Iijima และ Nishi (2016)	ปรับสมดุลเวลางาน	วิธีคอลัมน์เจเนอเรชันและวิธี Backtracking Heuristic	เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบสั้นกว่าวิธี Greedy Heuristic และวิธี Branch and Bound

ตารางที่ 12สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

<p>Ariyikanon และ Chutima (2017)</p>	<p>1.ลดค่าใช้จ่าย 2.ปรับดุลภาระงาน นักบินให้เท่าเทียม กัน 3.การจัดงานของ ตำแหน่งอาวุโส 4. กระจายรูปแบบ เที่ยวบินให้เท่าเทียม กัน</p>	<p>วิธีการเชิงวิวัฒนาการ แบบหลาย วัตถุประสงค์โดยยึด หลักการจำแนก (MOEA/D) อัลกอริทึมผสมพันธุ์ ผึ้ง (HBMO) อัลกอริทึมผสม ระหว่างวิธีการเชิง วิวัฒนาการแบบ หลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการ จำแนกและ อัลกอริทึมผสมพันธุ์ ผึ้ง (MOEA/D- HBMO)</p>	<p>อัลกอริทึมผสมระหว่าง วิธีการเชิงวิวัฒนาการ แบบหลายวัตถุประสงค์ โดยยึดหลักการจำแนก และอัลกอริทึมผสมพันธุ์ ผึ้ง (MOEA/D-HBMO)มี ประสิทธิภาพดีที่สุดใน ปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่</p>
<p>Deveci และ Demirel (2018)</p>	<p>ลดค่าใช้จ่ายการ จับคู่เที่ยวบิน</p>	<p>วิธีเชิงพันธุกรรม หลายตัวแปร (Genetic Algorithm Variants) และวิธีการ ลอกแบบร่วมกับวิธี เชิงพันธุกรรมด้วย วิธีการปีนเขา (Memetic Algorithm hybridizing GA with hill climbing)</p>	<p>วิธีการลอกแบบร่วมกับ วิธีเชิงพันธุกรรมด้วย วิธีการไต่เขา (Memetic Algorithm hybridizing GA with hill climbing) เป็นอัลกอริทึมที่มี ประสิทธิภาพดีกว่า</p>

ตารางที่ 13สรุปข้อมูลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(ต่อ)

งานวิจัยนี้	<p>1.เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด</p> <p>2.ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียม</p> <p>3.เส้นทางการบินข้าน้อยที่สุด</p> <p>4.ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด</p> <p>5.จำนวนคูปองบินน้อยที่สุด</p>	<p>วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (MOEA/D) วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)</p>	
-------------	---	--	--

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานของโปรแกรม OPL

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ด้วยการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการข้อจำกัดและการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยใช้โปรแกรมโอพีแอล (Optimization Programming Language: OPL)

เนื่องจากโปรแกรมโอพีแอลซึ่งเป็นลิขสิทธิ์ของบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยหาผลเฉลยสำหรับกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming: LP) แต่จากปัญหาในงานวิจัยนี้มีลักษณะปัญหาแบบ Travelling Salesman Problem (TSP) จัดเป็นปัญหาคำหนดการไม่เชิงเส้น (Non-Linear Programming: NLP) และเป็นปัญหาเอ็น-พี ฮาร์ด (NP-Hard) ซึ่งสามารถค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ถึง  $1.83514066E+62$  รูปแบบ คำนวนได้จากวิธี Network Optimization ดังนั้นผู้วิจัยจึงยกตัวอย่างการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียวและข้อจำกัดรายวันเพียงข้อจำกัดเดียว เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการค้นหาคำตอบที่ใช้เวลายาวนานและหลีกเลี่ยงข้อจำกัดดังกล่าวของโปรแกรม ดังนั้นการที่จะแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ได้นั้นจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติก ซึ่งจะแสดงการคำนวณในบทต่อไป

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาผลเฉลยสำหรับปัญหาขนาดเล็กถึงใหญ่ในโปรแกรมโอพีแอลจะเริ่มจากการสร้างไฟล์รูปแบบ (Model File) และไฟล์ข้อมูล (Data File) ไฟล์รูปแบบเป็นไฟล์ที่อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และข้อจำกัด ซึ่งจะมีการกำหนดดัชนี ตัวแปรนำเข้าหรือพารามิเตอร์ และตัวแปรตัดสินใจ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงได้ดังนี้

##### 1. กำหนดดัชนี (Index)

$R = \{ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \}$  คือ เซตของวัน (Set of Days)

$N = \{ 1, 2, \dots, n \}$  คือ เซตของจำนวนเที่ยวบิน (Set of Flights Number)

โดยที่  $n =$  จำนวนเที่ยวบินทั้งหมด

## 2. กำหนดตัวแปรนำเข้าหรือพารามิเตอร์ (Parameter)

$F = \{f_i   i \in N\}$	คือ เซตของเที่ยวบิน (Set of Flights)
$P_0 = \{p_{ab}   a, b \in F\}$	คือ เซตของคู่เที่ยวบิน (Set of Flight Pairings)
$p_{start}$	คือ คู่เที่ยวบินเริ่มต้น (Starting Dummy node)
$p_{end}$	คือ คู่เที่ยวบินสิ้นสุด (Ending Dummy node)
$P = P_0 \cup \{p_{start}, p_{end}\}$	คือ เซตของคู่เที่ยวบินทั้งหมด (Set of All Flight Pairings)
$A = \{a_{ij}   i, j \in P\}$	คือ เซตของเส้นทางงาน (Set of Arcs)
$d_s = 0.5$	คือ ช่วงเวลาระหว่างการบินต่อเนื่อง (Sit Time)
$t_a^d$	คือ เวลาที่เครื่องบินทำการบินออกจากสนามบินต้นทาง (Departure Time of Flight)
$t_a^a$	คือ เวลาที่เครื่องบินทำการบินถึงสนามบินปลายทาง (Arrival Time of Flight)
$I_{ab} = t_b^d - t_a^a + d_s$	คือ เวลาว่างานของคู่เที่ยวบิน (Idle Time of Flight Pairing)
$I_{ab,cd} = t_c^d - t_b^a + d_s$	คือ เวลาว่างานระหว่างคู่เที่ยวบิน (Idle Time Between Flight Pairings)
$I_{ab,cd}^* = I_{ab} + I_{ab,cd}$	คือ เวลาว่างานของเส้นทางงาน (Idle Time of Arcs)
$D_{ab,cd}$	คือ ระยะเวลาของเส้นทางงาน (Duration of Arcs) โดยที่
$D_{ab,cd} = \begin{cases} d_B = 1; ab \in p_{start} \\ d_D = 0.5; cd \in p_{end} \\ t_c^d - t_a^a; \text{กรณีอื่น} \end{cases}$	

## 3. ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

$x_a^r \in \{0, 1\}$  ;  $\forall a \in A, \forall r \in R$  คือ การเลือกเส้นทางงาน โดยที่

$$x_a^r = \begin{cases} 1; \text{ใช้เส้นทาง } a \in A \text{ ในวันที่ } r \in R \\ 0; \text{กรณีอื่น} \end{cases}$$

$t_{start}^r$  ;  $\forall r \in R$  คือ เวลาในการเริ่มงานในวันที่ r

$t_{end}^r$  ;  $\forall r \in R$  คือ เวลาสิ้นสุดงานในวันที่ r



4. กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด (Minimizing idle time) คำนวณดังสมการที่ 3.1

$$T = \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} I_a^* x_a^r \quad (3.1)$$

5. สมการข้อจำกัด (Constraint)

ข้อจำกัดของปัญหาการจับคู่เที่ยวบินได้ให้ความสำคัญกับช่วงเวลาในการปฏิบัติหน้าที่การบินและชั่วโมงบิน ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับช่วงเวลาที่สามารถปฏิบัติหน้าที่ได้ในแต่ละเที่ยวบินต่อ 1 คู่เที่ยวบิน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการรวมเวลาดังกล่าวในสมการข้อจำกัด ดังสมการที่ 3-2 ถึงสมการที่ 3-8

$$1) \sum_{a \in A} D_a x_a^r \geq 10 \quad ; \forall r \in R \quad (3.2)$$

$$2) \sum_{(i,j) \in A: i \in \{p_{start}\}} x_{ij}^r = 1 \quad ; \forall r \in R \quad (3.3)$$

$$3) \sum_{(i,j) \in A: j \in \{p_{end}\}} x_{ij}^r = 1 \quad ; \forall r \in R \quad (3.4)$$

$$4) \sum_{j \in P_0: (i,j) \in A} x_{ij}^r = \sum_{j \in P_0: (j,i) \in A} x_{ji}^r \quad ; \forall i \in P, \forall r \in R \quad (3.5)$$

$$5) \sum_{ab,cd \in A: ab \in \{p_{start}\}} t_c^d x_{ij}^r = t_{start}^r + d_B \quad ; \forall r \in R \quad (3.6)$$

$$6) \sum_{ab,cd \in A: cd \in \{p_{end}\}} t_b^a x_{ij}^r = t_{end}^r - d_D \quad ; \forall r \in R \quad (3.7)$$

$$7) 24 - t_{end}^r + t_{start}^r \geq \sum_{a \in A} D_a x_a^{r-1} \quad ; \forall r \in R \setminus \{1\} \quad (3.8)$$

### 3.2 การนำเข้าข้อมูลของปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน

เนื่องจากปัญหาการดำเนินงานจับคู่เที่ยวบินนี้เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ผู้วิจัยจึงดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ แต่จะคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียงวัตถุประสงค์เดียวและข้อจำกัดรายวันเพียงข้อจำกัดเดียวเพื่อให้เห็นภาพและเข้าใจปัญหาได้ง่ายขึ้น โดยไฟล์ข้อมูลนำเข้า (Data File) แสดงดังภาพผนวก และตัวอย่างข้อมูลนำเข้าแสดงเฉพาะท่าอากาศยานพิษณุโลก ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 14 ข้อมูลนำเข้าท่าอากาศยานพิษณุโลก

Code1	CodeNo1	CodeNo2	Type	Note	Flight No.	From	To	Mile	Departure	FT	Arrival
H	8	1	Go	H1	DD8400	DMK	PHS	200	6.50	1.83	8.33
H	8	2	Go	H2	DD8404	DMK	PHS	200	10.67	1.00	11.67
H	8	3	Go	H3	DD8406	DMK	PHS	200	13.83	1.00	14.83
H	8	4	Go	H4	DD8414	DMK	PHS	200	17.91	1.83	19.74
H	8	5	Go	H5	DD8414	DMK	PHS	200	18.17	1.83	20.00
H	8	6	Go	H6	DD8414	DMK	PHS	200	18.83	1.83	20.67
H	8	7	Go	H7	DD8414	DMK	PHS	200	19.41	1.83	21.24
H	8	8	Return	H8	DD8401	PHS	DMK	200	8.91	0.83	9.74
H	8	9	Return	H9	DD8405	PHS	DMK	200	12.25	1.00	13.25
H	8	10	Return	H10	DD8407	PHS	DMK	200	15.33	1.17	16.50
H	8	11	Return	H11	DD8415	PHS	DMK	200	20.25	0.83	21.08
H	8	12	Return	H12	DD8415	PHS	DMK	200	20.50	0.83	21.33
H	8	13	Return	H13	SIM8401	PHS	DMK	200	21.17	0.83	22.00
H	8	14	Return	H14	DD8415	PHS	DMK	200	21.83	0.83	22.66

### 3.3 การเขียนรหัสโปรแกรมไอพีแอล

การเขียนรหัสโปรแกรมไอพีแอลจะเริ่มทำได้ก็ต่อเมื่อสามารถสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้ครบทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์และสมการข้อจำกัดแล้ว ซึ่งรหัสโปรแกรมไอพีแอลประกอบด้วย 2 ไฟล์ ได้แก่รหัสไฟล์รูปแบบ (Model File) และรหัสไฟล์ข้อมูล (Data File) โดยรหัสไฟล์รูปแบบ (Model File) แบ่งได้เป็น 7 ส่วน ได้แก่ 1.Sets 2.Parameters 3.Pre-processing 4. Decision Variables 5. Objective function 6. Constraints 7.Post-processing แสดงดังรูปภาพที่ 14-20 และรหัสไฟล์ข้อมูล (Data File) แสดงดังรูปภาพที่ 21

```

*****
* Sets
*****/

// Set of Days (day index 7-day)
{int} R = ... ;

// Set of Flights
tuple flight {
    string ID ;
    string FROM ;
    string TO ;
    float DEPARTURE ;
    float ARRIVAL ;
}

{flight} Flights = ... ;

// Set of Duty (Pairings)
tuple duty {
    flight GO ;
    flight RETURN ;
    float STARTTIME ; // start time of duty
    float ENDTIME ; // end time of duty
}

// Set of Arc
tuple arc {
    key duty FROMDUTY ;
    key duty TODUTY ;
}

```

รูปภาพที่ 14 รหัสไฟล์รูปแบบ Sets

```

*****
* Parameters
*****/

// Brief Time (min)
float BT = 60 ;

// Sit Time (min)
float ST = 30 ;

// DebriefTime (min)
float DBT = 30 ;

```

รูปภาพที่ 15 รหัสไฟล์รูปแบบ Parameters

```

*****
* Pre-processing
*****/
// Set of Duty Nodes
{duty} Dutys =
    {<i,j,i.DEPARTURE,j.ARRIVAL>|i,j in Flights:i.TO!="DMK"&&i.TO=j.FROM&&i.ARRIVAL+ST<=j.DEPARTURE} ;
// Dummy Duty node
{duty} Dummy =
    {<<"SOURCE", "DUMMY", "DUMMY", 0, 0>, <"SOURCE", "DUMMY", "DUMMY", 0, 0>}
    union
    {<<"SINK", "DUMMY", "DUMMY", 1500, 1500>, <"SINK", "DUMMY", "DUMMY", 1500, 1500>, 1500, 1500>} ;
// Set of Nodes
{duty} Nodes = Dutys union Dummy ;
// Duration of Nodes[i]
float Idle_Node[i in Nodes] ;
execute InitializeDurationNode {
    for (var i in Nodes) {
        if (i.GO.ID=="SOURCE") Idle_Node[i]=0;
        else if (i.RETURN.ID=="SINK") Idle_Node[i]=0;
        else Idle_Node[i]=(i.RETURN.DEPARTURE-i.GO.ARRIVAL)-ST;
    }
}
// Set of Arcs
{arc} Arcs = {<i,j>|i,j in Nodes :i!=j && (i.ENDTIME)+ST<=(j.STARTTIME)}; /*/ union Arc_Start union Arc_End;
// Idle of Arc[a]
float Idle_Arc[a in Arcs] ;
execute InitializeIdle {
    for (var a in Arcs) {
        if (a.FROMDUTY.GO.ID=="SOURCE") Idle_Arc[a]=0 ;
        else if (a.TODUTY.RETURN.ID=="SINK") Idle_Arc[a]=Idle_Node[a.FROMDUTY];
        else
            Idle_Arc[a] = Idle_Node[a.FROMDUTY] //idle in first duty
                + (a.TODUTY.STARTTIME-a.FROMDUTY.ENDTIME)-ST ; //idle between duty
    }
}
}

```

รูปภาพที่ 16 รหัสไฟล์รูปแบบ Pre-processing

```


/*****
* Decision Variable
*****/

// Daily Duty Selection
dvar boolean    x[r in R][a in Arcs] ;

// Daily Start Time
dvar float+    Start[r in R] ;
dvar float+    End[r in R] ;

```

### รูปภาพที่ 17 รหัสไฟล์รูปแบบ Decision Variables



```


/*****
* Objective Function
*****/

// Minimizing Idle Time
dexpr float TotalIdle
=    sum(r in R)sum(a in Arcs)Idle_Arc[a]*x[r][a] ;

minimize TotalIdle ;

```

### รูปภาพที่ 18 รหัสไฟล์รูปแบบ Objective Functions



```

/*****
* Constraints
*****/
subject to {
  MinDuration: // min duration = 12 hour
  forall(r in R)
    sum(<i,j> in Arcs)Duration[<i,j>]*x[r][<i,j>]>=12*60 ;
  SourceDegree: // valid
  forall(r in R)
    sum(i in Nodes: i.GO.ID!="SOURCE")
      x[r][<<<"SOURCE", "DUMMY", "DUMMY", 0,0>>,<"SOURCE", "DUMMY", "DUMMY", 0,0>>,i>]=1;
  SinkDegree: // valid
  forall(r in R)
    sum(i in Nodes: i.RETURN.ID!="SINK")
      x[r][<i,<<"SINK", "DUMMY", "DUMMY", 1500,1500>>,<"SINK", "DUMMY", "DUMMY", 1500,1500>>,1500,1500>>]=1;
  Balance: // valid
  forall(r in R)
    forall(i in Nodes: i not in Dummy)
      sum(j in Nodes: <i,j> in Arcs)x[r][<i,j>]
        - sum(j in Nodes: <j,i> in Arcs)x[r][<j,i>]
          == 0 ;
  StartTime: // includes BT
  forall(r in R)
    sum(a in Arcs: a.FROMDUTY.GO.ID=="SOURCE")
      a.TODUTY.STARTTIME*x[r][a] == Start[r] + BT ;
  EndTime: // includes DBT
  forall(r in R)
    sum(a in Arcs: a.TODUTY.RETURN.ID=="SINK")
      a.FROMDUTY.ENDTIME*x[r][a] == End[r] - DBT ;
  MinStartTime: // minimum Resttime >= Total workhour of previous day
  forall(r in R: r!=1)
    (1440-End[r-1]+Start[r]) >= sum(a in Arcs)Duration[a]*x[r-1][a] ;
}

```

### รูปภาพที่ 19 รหัสไฟล์รูปแบบ Constraints

```

/*****
* Post-processing
*****/
float DailyIdle[r in R] = sum(a in Arcs) Idle_Arc[a]*x[r][a] ;
float DailyWorkMin[r in R] = sum(a in Arcs) Duration[a]*x[r][a] ;
float TotalWorkMin = sum(r in R) DailyWorkMin[r] ;
execute {
  writeln(" ")
  writeln("Total Work Time : ",TotalWorkMin," min (", (TotalWorkMin-(TotalWorkMin%60))/60," hr ",TotalWorkMin%60," min)")
  writeln("Total Idle Time : ",TotalIdle," min")
  writeln(" ")
}
string str_1[a in Arcs] ;
string str_2[a in Arcs] ;
string str_3[a in Arcs] ;
string str_4[a in Arcs] ;
execute {
  for(var a in Arcs){
    if (a.FROMDUTY.GO.DEPARTURE%60<10) str_1[a] = "0"+a.FROMDUTY.GO.DEPARTURE%60 ;
    else str_1[a] = a.FROMDUTY.GO.DEPARTURE%60 ;
    if (a.FROMDUTY.GO.ARRIVAL%60<10) str_2[a] = "0"+a.FROMDUTY.GO.ARRIVAL%60 ;
    else str_2[a] = a.FROMDUTY.GO.ARRIVAL%60 ;
    if (a.FROMDUTY.RETURN.DEPARTURE%60<10) str_3[a] = "0"+a.FROMDUTY.RETURN.DEPARTURE%60 ;
    else str_3[a] = a.FROMDUTY.RETURN.DEPARTURE%60 ;
    if (a.FROMDUTY.RETURN.ARRIVAL%60<10) str_4[a] = "0"+a.FROMDUTY.RETURN.ARRIVAL%60 ;
    else str_4[a] = a.FROMDUTY.RETURN.ARRIVAL%60 ;
  }
}

```

### รูปภาพที่ 20 รหัสไฟล์รูปแบบ Post-processing

```

*****
* Inputs
*****/
SheetConnection sheet_input("Data_Air.xlsx");

// Sets
R = {1};

// Parameters
Flights from SheetRead(sheet_input,"Sheet1!A2:E283") ;

```

### รูปภาพที่ 21 รหัสไฟล์ข้อมูล (Data File)

## 3.4 การประมวลผลการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินด้วยโปรแกรมไอพีแอล

ผลการทดลองของการดำเนินงานแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินด้วยวิธีสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมไอพีแอลในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ประกอบด้วยปัญหาขนาดใหญ่ จำนวน 1 วัน 2 วัน 3 วัน และ 4 วัน แสดงดังรูปภาพที่ 22-25

```

// solution (optimal) with objective 0

Total Work Time : 1115 min (18 hr 35 min)
Total Idle Time : 0 min

Day 1
DD9312[6:10-7:15] => DD9313[7:45-8:50]
DD7210[9:20-10:30] => DD7211[11:00-12:10]
WE 273[12:40-14:10] => DD7505[14:40-16:00]
DD8318[16:30-17:40] => SIM8302[18:10-19:25]
DD7116[19:55-21:25] => DD7117[21:55-23:15]

Work Hour : 1115 min (18 hr 35 min)
Idle Time : 0 min
Total (root+branch&cut) = 7.83 sec. (9766.18 ticks)

```

### รูปภาพที่ 22 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 1 วัน

ผลการจับคู่เที่ยวบินปัญหาขนาดใหญ่ จำนวน 1 วันด้วยโปรแกรมโอพีแอล พบว่าการจับคู่เที่ยวบินทั้งหมดที่เป็นไปได้ใช้เวลาปฏิบัติหน้าที่การบินทั้งสิ้น 1115 นาที (18 ชั่วโมง 35 นาที) และมีเวลาว่างระหว่างเที่ยวบินเท่ากับ 0 นาที โดยโปรแกรมโอพีแอลใช้เวลาการดำเนินงาน 7.83 วินาที

```
// solution (optimal) with objective 0
```

```
Total Work Time : 1610 min (26 hr 50 min)
```

```
Total Idle Time : 0 min
```

```
Day 1
```

```
DD9312[6:10-7:15] => DD9313[7:45-8:50]
```

```
DD7210[9:20-10:30] => DD7211[11:00-12:10]
```

```
WE 273[12:40-14:10] => DD7505[14:40-16:00]
```

```
DD8318[16:30-17:40] => SIM8302[18:10-19:25]
```

```
Work Hour : 885 min (14 hr 45 min)
```

```
Idle Time : 0 min
```

```
Day 2
```

```
WE 273[12:40-14:10] => DD7505[14:40-16:00]
```

```
DD8318[16:30-17:40] => SIM8302[18:10-19:25]
```

```
DD7116[19:55-21:25] => DD7117[21:55-23:15]
```

```
Work Hour : 725 min (12 hr 5 min)
```

```
Idle Time : 0 min
```

```
Total (root+branch&cut) = 68.73 sec. (164471.82 ticks)
```

รูปภาพที่ 23 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 2 วัน

ผลการจับคู่เที่ยวบินปัญหาขนาดใหญ่ จำนวน 2 วันด้วยโปรแกรมโอพีแอล พบว่าการจับคู่เที่ยวบินทั้งหมดที่เป็นไปได้ใช้เวลาปฏิบัติหน้าที่การบินทั้งสิ้น 1610 นาที (26 ชั่วโมง 50 นาที) และมีเวลาว่างระหว่างเที่ยวบินเท่ากับ 0 นาที โดยโปรแกรมโอพีแอลใช้เวลาการดำเนินงาน 68.73 วินาที

```
// solution (optimal) with objective 5
```

```
Total Work Time : 2215 min (36 hr 55 min)
Total Idle Time : 5 min
```

```
Day 1
```

```
WE 269[8:20-9:45] => WE 270[10:15-11:40]
DD8824[12:10-13:45] => DD8825[14:15-15:50]
WE 263[16:20-17:45] => SIM7103[18:15-19:40]
```

```
Work Hour : 770 min (12 hr 50 min)
Idle Time : 0 min
```

```
Day 2
```

```
WE 160[10:35-11:50] => DD8313[12:20-13:30]
WE 265[14:00-15:25] => WE 266[15:55-17:20]
DD8414[17:55-19:45] => DD8415[20:15-21:05]
```

```
Work Hour : 720 min (12 hr 0 min)
Idle Time : 5 min
```

```
Day 3
```

```
WE 273[12:40-14:10] => DD7505[14:40-16:00]
DD8318[16:30-17:40] => SIM8302[18:10-19:25]
DD7116[19:55-21:25] => DD7117[21:55-23:15]
```

```
Work Hour : 725 min (12 hr 5 min)
Idle Time : 0 min
```

```
Total (root+branch&cut) = 73.94 sec. (46159.10 ticks)
```

รูปภาพที่ 24 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 3 วัน

ผลการจับคู่เที่ยวบินปัญหาขนาดใหญ่ จำนวน 3 วันด้วยโปรแกรมไอพีแอล พบว่าการจับคู่เที่ยวบินทั้งหมดที่เป็นไปได้ใช้เวลาปฏิบัติหน้าที่การบินทั้งสิ้น 2215 นาที (36 ชั่วโมง 55 นาที) และมีเวลารว่างระหว่างเที่ยวบินเท่ากับ 5 นาที โดยโปรแกรมไอพีแอลใช้เวลาการดำเนินงาน 73.94 วินาที

Warning: MIP starts not constructed because of out-of-memory status.

Root node processing (before b&c):

Real time = 102.92 sec. (79684.25 ticks)

Parallel b&c, 8 threads:

Real time = 48.81 sec. (78762.49 ticks)

Sync time (average) = 37.26 sec.

Wait time (average) = 0.00 sec.

Total (root+branch&cut) = 151.73 sec. (158446.74 ticks)

รูปภาพที่ 25 ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินขนาดใหญ่ จำนวน 4 วัน

ผลการจับคู่เที่ยวบินปัญหาขนาดใหญ่ จำนวน 4 วันด้วยโปรแกรมไอพีแอล พบว่าไม่สามารถค้นหาคำตอบการจับคู่เที่ยวบินทั้งหมดที่เป็นไปได้ โดยโปรแกรมไอพีแอลใช้เวลาการดำเนินงาน 151.73 วินาที จึงหยุดการทำงาน (out of memory status) บนเครื่องคอมพิวเตอร์

Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @ 1.80 GHz 1.99 GHz Ram 8 GB Window10 64-bit operating system, x64-based processor

ในการศึกษางานวิจัยการจับคู่เที่ยวบินโดยส่วนใหญ่จะเป็นการปรับปรุงการจับคู่เที่ยวบินในปัจจุบันให้ดีขึ้นและมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ท่ามกลางสภาพปัญหาที่มีข้อจำกัดหลากหลายทั้งทางด้านกฎการบินระหว่างประเทศและนโยบายบริษัท เนื่องจากปัญหาการจับคู่เที่ยวบินเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ มีความยุ่งยากซับซ้อนและใช้เวลานานในการแก้ปัญหา ซึ่งสามารถค้นหาคำตอบที่เป็นไปได้ถึง  $1.83514066E+62$  รูปแบบ คำนวณได้จากวิธี Network Optimization นอกจากนี้งานวิจัยได้ทำการศึกษาการจับคู่เที่ยวบินแบบมากวัตถุประสงค์ ซึ่งจัดเป็นปัญหากำหนดการไม่เชิงเส้น (Non-Linear Programming: NLP) และเป็นปัญหาเอ็น-พี ฮาร์ด (NP-Hard) ไม่สามารถใช้โปรแกรมโอพีแอลช่วยหาคำตอบได้ ดังนั้นการที่จะแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ได้นั้นจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมเมตาฮีวิริสติก ซึ่งจะแสดงการคำนวณในบทต่อไป



## บทที่ 4

### วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก

(A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะเสนออัลกอริทึมที่ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบในการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบิน ได้แก่ วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) และวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE) ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณ

วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก (A Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition: MOEA/D) มีหลักการในการเพิ่มจำนวนคำตอบที่ดีที่อยู่บนเส้นพารето (Pareto front) ซึ่งจะนำไปสู่การหาคำตอบที่ดีสำหรับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้ในเวลาอันสั้น ทั้งนี้มีแนวคิดที่จะแก้ปัญหาด้วยการวิวัฒนาการคำตอบที่มีไปพร้อมกันในทุกวัตถุประสงค์ โดยเริ่มจากความสัมพันธ์ของสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ซึ่งใช้ระยะห่างระหว่างผลรวมค่าสัมประสิทธิ์ของเวกเตอร์  $\lambda_j$  ด้วยวิธีระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidian) ในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นตัวเลือกสตริงคำตอบที่จะนำมาผสมเพื่อพัฒนาคำตอบ คำตอบในประชากร (Population) แต่ละตัวใช้การครอสโอเวอร์ (Crossover) ของวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อพัฒนาคำตอบ (Population) โดยจะให้คำตอบรุ่นลูก (Offspring) ที่มีความคล้ายคลึงกับคำตอบรุ่นเดิม (Parent) ที่เป็นค่าที่ดี ทำให้เกิดการพัฒนาทุกๆ สตริงคำตอบ (Qingfu & Hui, 2007) และทำการประเมินคำตอบที่ดีด้วยการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) แล้วคำนวณค่าเทบปีเชฟฟ์ (Tchebycheff Approach) เพื่อเลือกคำตอบที่ดีมาแทนที่ในแต่ละจุดตั้งต้น จากนั้นจะนำสตริงรุ่นลูกที่ดีที่สุดหลังจากการเทียบค่าเทบปีเชฟฟ์แล้วทำการจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ในแต่ละเจเนอเรชันด้วยวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-Dominated Sorting)

#### 4.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MOEA/D ในการแก้ปัญหา

ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D ในการหาคำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเริ่มต้น การพัฒนา และการหยุดอัลกอริทึม มีดังต่อไปนี้

##### การนำเข้าข้อมูล

$N$  คือ จำนวนประชากรหรือจำนวนปัญหาย่อย (Subproblem) โดยที่  $j = 1, 2, \dots, N$

$T$  คือ จำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยที่  $t = 1, 2, \dots, T$

$N_b$  คือ จำนวนสตริงข้างเคียงหรือปัญหาย่อยข้างเคียง (Number of weight vectors in the neighborhood)

$NR$  คือ จำนวนการแทนที่สูงสุดของคำตอบรุ่นลูกในแต่ละตัว (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. สร้างค่าน้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร ( $N$ )  $\times$  จำนวนวัตถุประสงค์ (Obj)

2. คำนวณระยะห่างระหว่างจุดพิกัดของเวกเตอร์น้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  ทั้งหมด (Euclidean distances) ดังสมการที่ 4.1 และจัดเก็บสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อยที่  $i$  ลงในเซต  $B(i)$

$$d_{jl} = \sqrt{\sum_{k=1}^{Obj} (\lambda_{jk} - \lambda_{lk})^2} \quad ; \forall j \in N, \forall l \in N \quad (4.1)$$

เมื่อ  $d_{ji}$  คือระยะห่างระหว่างจุด (Euclidean distances) ของค่าน้ำหนักสตริงที่  $j$  กับสตริงที่  $i$  โดยที่  $j = 1, 2, \dots, N$  และ  $i = 1, 2, \dots, N$

3. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นตามจำนวนประชากร โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเทียวบิณทั้งหมด (nc) จากนั้นกำหนด  $t$  และ  $i$  เท่ากับ 1

4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น จากนั้นกำหนดให้ค่าเป้าหมาย

$$z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k \bar{x}_i\} \text{ โดยที่ } k = 1, 2, \dots, \text{Obj}$$

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนา

1. สุ่มเลือกสองสตริงจากสตริงข้างเคียง (Neighborhood) ซึ่งเป็นสตริงที่มีระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักน้อยเมื่อเทียบกับสตริงที่  $i$  โดยจำนวนของสตริงข้างเคียงจะถูกกำหนดไว้ตั้งแต่เริ่มต้น

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

3. แลกเปลี่ยนส่วนย่อยของสตริงพ่อแม่

4. ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยพิจารณาค่าตำแหน่งเลขซ้ำและทำการสลับเปลี่ยนตำแหน่งนั้นจนมีครบทุกหมายเลข

5. ประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

6. รวบรวมค่าวัตถุประสงค์สูงสุด ( $ff_k^{max}$ ) และต่ำสุด ( $ff_k^{min}$ ) หลังจากที่ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งสตริงคำตอบพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกแล้ว โดยงานวิจัยนี้ได้มีการป้องกันส่วนหารเท่ากับ 0 ซึ่งจะให้คำตอบที่เป็นไปไม่ได้ โดยการบวกค่าคงที่ 0.0005 ให้กับค่า  $ff_k^{max}$

7. เปรียบเทียบค่าเป้าหมาย ( $z_k^*$ ) เมื่อได้ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยกำหนดให้

$$z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k \bar{x}_i\}$$

8. นอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อย สตริงคำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมาย

9. เปรียบเทียบสตริงคำตอบรุ่นลูกด้วยวิธีการเทบปีเซฟฟ์ ซึ่งจะใช้ค่าน้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  ของแต่ละปัญหาย่อย

10. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยว่ามีค่าน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุดหรือไม่ ( $n_r < NR$ ) ถ้าจำนวนการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนการแทนที่สูงสุด ( $n_r \geq NR$ ) ให้หยุดการประเมิน

11. คำนวณค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิม  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N)$  และสตริงรุ่นลูก  $g(y|\lambda_1, z^N)$  ที่ค่า  
น้ำหนักเดียวกัน

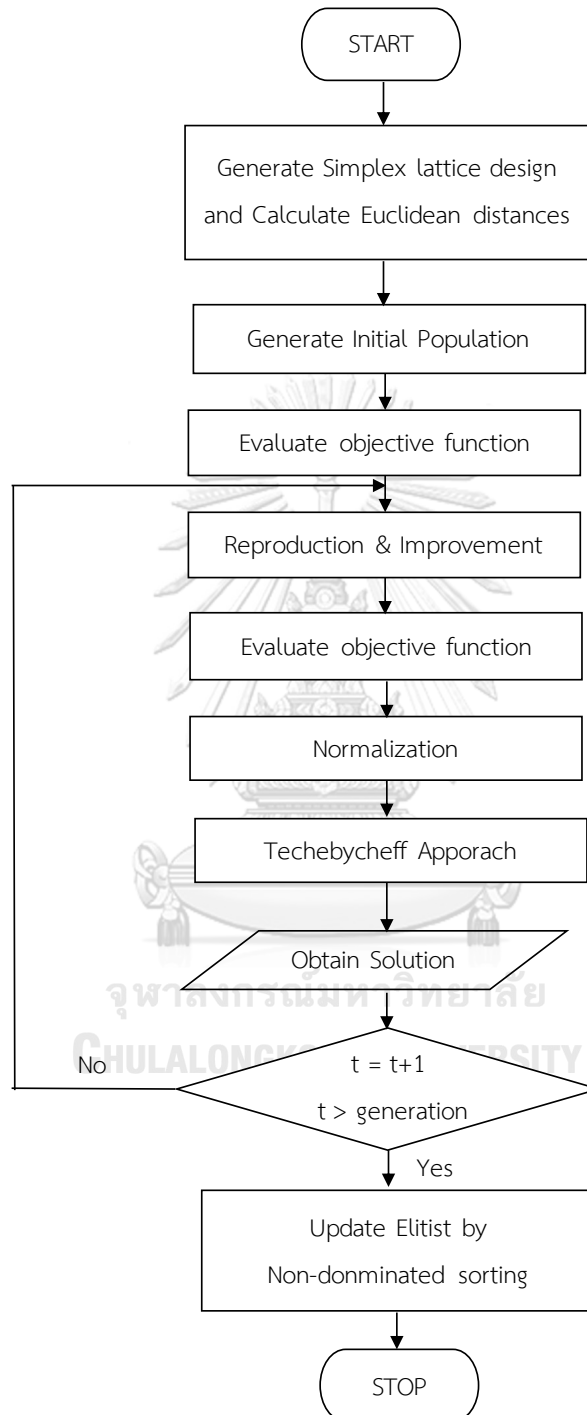
12. เปรียบเทียบค่าเทบปีเซฟฟ์ที่มากที่สุดของสตริงเดิม  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N)$  กับสตริงรุ่นลูก  
 $g(y|\lambda_1, z^N)$  โดยถ้าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมน้อยกว่าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงรุ่นลูก  
 $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N) < g(y|\lambda_1, z^N)$  จะแทนที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิม  
เท่ากับค่าสตริงรุ่นลูก แต่ถ้าค่าเทบปีเซฟฟ์ของสตริงเดิมมากกว่าหรือเท่ากับค่าเทบปีเซฟฟ์ของ  
สตริงรุ่นลูก  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N) \geq g(y|\lambda_1, z^N)$  จะเปรียบเทียบค่าต่อมา

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาอัลกอริทึมตามจำนวนเงื่อนไขสูงสุดที่กำหนด



#### 4.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D



รูปภาพที่ 26 ขั้นตอนการทำงานของ MOEA/D

#### 4.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์โดยยึดหลักการจำแนก มีดังนี้

- |                         |    |            |
|-------------------------|----|------------|
| 1. จำนวนประชากรเริ่มต้น | 15 | สตริงคำตอบ |
| 2. จำนวนสตริงข้างเคียง  | 4  | สตริงคำตอบ |
| 3. จำนวนการแทนที่สูงสุด | 1  | สตริงคำตอบ |

##### 4.3.1 การสร้างค่าน้ำหนักและกำหนดระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนัก

การสร้างตารางค่าน้ำหนักด้วยวิธีการซิมเพล็กซ์แลตทิซไดไนน์ ให้สร้างตารางค่าน้ำหนักขนาดเท่ากับ  $N \times Obj$  แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 15 ซิมเพล็กซ์แลตทิซไดไนน์ (5 component and 2 degree without center and axial points)

Subproblem (i)	Weight of objectives function $k (\lambda_{ik})$				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0.5	0.5
2	0	1	0	0	0
3	0.5	0.5	0	0	0
4	1	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0
6	0	0.5	0.5	0	0
7	0	0	0	0	1
8	0	0.5	0	0	0.5
9	0.5	0	0	0	0.5
10	0	0.5	0	0.5	0
11	0	0	0.5	0.5	0
12	0	0	0.5	0	0.5
13	0.5	0	0	0.5	0
14	0	0	0	1	0
15	0.5	0	0.5	0	0

การคำนวณค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนัก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-1 และแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 14

ตารางที่ 16 ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักที่ประชากร 15 ตัว

Fro mTo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0.00	1.22	1.00	1.22	1.22	1.00	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.00
2	1.22	0.00	0.71	1.41	1.41	0.71	1.41	0.71	1.22	0.71	1.22	1.22	1.22	1.41	1.22
3	1.00	0.71	0.00	0.71	1.22	0.71	1.22	0.71	0.71	0.71	1.00	1.00	0.71	1.22	0.71
4	1.22	1.41	0.71	0.00	1.41	1.22	1.41	1.22	0.71	1.22	1.22	1.22	0.71	1.41	0.71
5	1.22	1.41	1.22	1.41	0.00	0.71	1.41	1.22	1.22	1.22	0.71	0.71	1.22	1.41	0.71
6	1.00	0.71	0.71	1.22	0.71	0.00	1.22	0.71	1.00	0.71	0.71	0.71	1.00	1.22	0.71
7	0.71	1.41	1.22	1.41	1.41	1.22	0.00	0.71	0.71	1.22	1.22	0.71	1.22	1.41	1.22
8	0.71	0.71	0.71	1.22	1.22	0.71	0.71	0.00	0.71	0.71	1.00	0.71	1.00	1.22	1.00
9	0.71	1.22	0.71	0.71	1.22	1.00	0.71	0.71	0.00	1.00	1.00	0.71	0.71	1.22	0.71
10	0.71	0.71	0.71	1.22	1.22	0.71	1.22	0.71	1.00	0.00	0.71	1.00	0.71	0.71	1.00
11	0.71	1.22	1.00	1.22	0.71	0.71	1.22	1.00	1.00	0.71	0.00	0.71	0.71	0.71	0.71
12	0.71	1.22	1.00	1.22	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	1.00	0.71	0.00	1.00	1.22	0.71
13	0.71	1.22	0.71	0.71	1.22	1.00	1.22	1.00	0.71	0.71	0.71	1.00	0.00	0.71	0.71
14	0.71	1.41	1.22	1.41	1.41	1.22	1.41	1.22	1.22	0.71	0.71	1.22	0.71	0.00	1.22
15	1.00	1.22	0.71	0.71	0.71	0.71	1.22	1.00	0.71	1.00	0.71	0.71	0.71	1.22	0.00

เมื่อได้ค่าระยะห่างระหว่างจุดของค่าน้ำหนักแล้ว ให้ทำการกำหนดสตรึงข้างเคียง โดยเรียงค่าระยะห่างของค่าน้ำหนักจากน้อยไปมากและตัดให้เหลือเท่ากับจำนวนสตรึงข้างเคียงที่กำหนดไว้ข้างต้น จะได้สตรึงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 17 เซตสตริงข้างเคียงของแต่ละปัญหาย่อย

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

#### 4.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มเลือกแบบอิสระ โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรที่ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเที่ยวบินทั้งหมด แสดงตัวอย่างสตริงจากการสุ่มดังตารางที่ 16-17

ตารางที่ 18 สตริงคำตอบเริ่มต้น

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



ตารางที่ 19 สตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

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

ตารางที่ 20 ถอดรหัสสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Subproblem	Flight Sequence									
1	1	A6	A10	A8	A1	A3	A11	A9	A13	A5	A16
2	2	A11	A8	A10	A9	A1	A5	A13	A6	A1	A16
3	3	A11	A8	A10	A9	A1	A5	A13	A6	A3	A16
4	4	A5	A13	A10	A1	A3	A11	A9	A8	A16	A6
5	5	A3	A8	A10	A11	A1	A5	A13	A6	A9	A16
6	6	A11	A10	A8	A1	A3	A5	A13	A6	A9	A16
7	7	A11	A10	A8	A1	A3	A5	A13	A6	A9	A16
8	8	A11	A10	A8	A1	A3	A5	A13	A6	A9	A16
9	9	A11	A10	A8	A1	A3	A5	A13	A6	A9	A16
10	10	A5	A10	A13	A1	A6	A8	A9	A3	A11	A16
11	11	A5	A10	A13	A1	A11	A8	A3	A6	A9	A16
12	12	A3	A5	A13	A1	A11	A8	A13	A6	A9	A16
13	13	A5	A6	A16	A1	A11	A8	A9	A10	A3	A13

ตารางที่ 21 ถอดรหัสสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

14	14	A5	A11	A16	A1	A6	A8	A9	A10	A3	A13
15	15	A5	A10	A3	A1	A11	A8	A13	A6	A9	A16

#### 4.3.3 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทที่ 2 แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงในตัวอย่างดังตารางที่ 18

ตารางที่ 22 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	String	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
1	1	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
2	2	3.4433	0.0232	0.0238	2	1
3	3	3.4433	0.0232	0.0238	2	1
4	4	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
5	5	3.4433	0.0232	0.0238	2	1
6	6	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
7	7	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
8	8	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
9	9	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
10	10	1.5233	0.0444	0.0476	0	2
11	11	3.8533	0.0232	0.0238	1	1
12	12	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
13	13	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
14	14	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
15	15	1.2033	0.0443	0.0476	1	2

#### 4.3.4 การพัฒนาคำตอบ

การพัฒนาคำตอบจะพัฒนาไปที่ละปัญหาย่อย (Subproblem) โดยแต่ละปัญหาย่อยที่  $i$  ประกอบไปด้วยสตริงที่  $i$  และเซตของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อยที่  $i$  ดังนั้นแต่ละเจเนอเรชันจะเกิดกระบวนการพัฒนาคำตอบเท่ากับจำนวนประชากร (จำนวนปัญหาย่อย) โดยตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 แสดงดังต่อไปนี้

1. สุ่มเลือกสตริงข้างเคียง ซึ่งประกอบไปด้วยสตริงที่ 1 7 8 และ 9 จะได้สตริงรุ่นพ่อแม่เพื่อทำการพัฒนา โดยตัวอย่างนี้สุ่มได้สตริงที่ 1 และ 7
2. คrossover (การนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงซึ่งกันและกัน) เพื่อให้เกิดสตริงรุ่นใหม่หรือสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการ crossover แบบพาเซียดแมพ crossover 1 ตำแหน่ง (One-Point Partially-mapped crossover: PMX) โดยทำการสุ่ม 1 ตำแหน่งในสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) เพื่อกำหนดจุดที่ crossover ซึ่งสุ่มได้ตำแหน่งที่ 6 โดยส่วนของสตริงที่อยู่หลังจากตำแหน่งที่ 6 จะถูกสลับกับส่วนของสตริงที่อยู่หลังของอีกสตริงคำตอบ (Mapping section) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 23 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่

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

3. แลกเปลี่ยนส่วนย่อยของสตริงพ่อแม่ที่อยู่หลังตำแหน่งที่ 6 จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกมา 2 สตริงคำตอบ

ตารางที่ 24 สตริงคำตอบรุ่นลูก

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

4. ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยพิจารณาดำแหน่งเลขซ้ำและทำการสลับเปลี่ยนตำแหน่งนั้นจนมีครบทุกหมายเลข เช่น String 1.1 มีตัวเลขซ้ำคือ 6 และไม่มีตัวเลข 5 ส่วน String 1.2 มีตัวเลขซ้ำคือ 5 และไม่มีตัวเลข 6

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

รูปภาพที่ 27 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

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

รูปภาพที่ 27 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 (ต่อ)

ตารางที่ 25 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1

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

##### 5. ประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

ตารางที่ 26 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นลูก

Offspring	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
1	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
2	1.2033	0.0443	0.0476	1	2

6. รวบรวมค่าวัตถุประสงค์สูงสุด ( $ff_k^{max}$ ) และต่ำสุด ( $ff_k^{min}$ ) หลังจากที่ได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทั้งสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และสตริงคำตอบรุ่นลูกแล้ว โดยงานวิจัยนี้ได้มีการป้องกันส่วนหารเท่ากับ 0 ซึ่งจะให้คำตอบที่เป็นไปไม่ได้ โดยการบวกค่าคงที่ 0.0005 ให้กับค่า  $ff_k^{max}$

ตารางที่ 27 ค่าวัตถุประสงค์สูงสุด ( $ff_k^{max}$ ) และต่ำสุด ( $ff_k^{min}$ )

Max/min	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
$ff_k^{max}$	3.8538	0.0456	0.0481	2.0005	2.0005
$ff_k^{min}$	0.8638	0.0237	0.0243	0.0005	1.0005

7.เปรียบเทียบค่าเป้าหมาย ( $z_k^*$ ) เมื่อได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยกำหนดให้  $z_k^* = \min(f_i(x))$

ตารางที่ 28 ค่าเป้าหมาย ( $Z_k^*$ )

Target	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
$Z_k^*$	0.8638	0.0237	0.0243	0.0005	1.0005

8.นอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อย สตริงคำตอบรุ่นลูก และค่าเป้าหมาย

ตารางที่ 29 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังทำการนอร์มัลไลซ์

String	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
1	0	0.993700937	0.995815749	0	0.99990001
7	0.862847396	0.001328756	0	0.999950002	0
8	0.86284	0.001328756	0	0.999950002	0
9	0.8628	0.001328756	0	0.999950002	0
Offspring1	0	0.993700937	0.995815749	0	0.99990001
Offspring2	0.1137	0.960171146	0.995640194	0.499975001	0.99990001

9.เปรียบเทียบสตริงคำตอบรุ่นลูกด้วยวิธีการเทปปีเซฟฟ์ ซึ่งจะใช้ค่าน้ำหนัก  $\lambda_{jk}$  ของแต่ละปัญหาย่อย โดยตัวอย่างนี้จะแสดงเพียงปัญหาย่อยที่ 1

ตารางที่ 30 ค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงคำตอบรุ่นลูก

Offspring	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)	$g(y \lambda_1, z^N)$
1	0	0	0	0	0.49995	0.49995
2	0	0	0	0	0.9999	0.9999

จากตารางจะพบว่าสตริงที่ 1 ให้ค่า  $g(y|\lambda_1, z^N)$  ที่ต่ำที่สุดในสตริงคำตอบรุ่นลูกแรก จึงตัดสตริงที่ 2 ออกแล้วเลือกสตริงที่ 1 มาทำขั้นตอนต่อไป

#### 4.3.5 การหาค่าที่ดีที่สุด

ขั้นตอนนี้จะใช้วิธีการเทบปีเซฟฟีในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละค่าน้ำหนัก โดยจะมีการประเมินที่ละสตริงข้างเคียงของปัญหาย่อยเท่านั้น โดยมีลำดับการประเมินดังนี้

1. ตรวจสอบเงื่อนไขจำนวนการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยว่ามีค่าน้อยกว่าจำนวนการแทนที่สูงสุดหรือไม่ ( $n_r < NR$ ) ถ้าจำนวนการแทนที่สตริงคำตอบรุ่นลูกในปัญหาย่อยมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนการแทนที่สูงสุด ( $n_r \geq NR$ ) ให้หยุดการประเมิน

2. คำนวณค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงเดิม  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N)$  และสตริงรุ่นลูก  $g(y|\lambda_1, z^N)$  ที่ค่าน้ำหนักเดียวกัน

3. เปรียบเทียบค่าเทบปีเซฟฟีที่มากที่สุดของสตริงเดิม  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N)$  กับสตริงรุ่นลูก  $g(y|\lambda_1, z^N)$  โดยถ้าค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงเดิมน้อยกว่าค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงรุ่นลูก  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N) < g(y|\lambda_1, z^N)$  จะแทนที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงเดิมเท่ากับค่าสตริงรุ่นลูก แต่ถ้าค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงเดิมมากกว่าหรือเท่ากับค่าเทบปีเซฟฟีของสตริงรุ่นลูก  $g(\bar{x}_j|\lambda_1, z^N) \geq g(y|\lambda_1, z^N)$  จะเปรียบเทียบค่าต่อมา

ตารางที่ 31 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังจบเงื่อนไขที่ 1

Subproblem	String	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
1	1	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
2	2	3.4433	0.0232	0.0238	2	1
3	1.3	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
4	4	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
5	5	3.4433	0.0232	0.0238	2	1
6	6	1.7867	0.0232	0.0238	2	1

ตารางที่ 32 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบหลังจบเงื่อนไขที่ 1 (ต่อ)

7	1.5	3.8533	0.0232	0.0238	1	1
8	8	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
9	1.7	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
10	10	1.5233	0.0444	0.0476	0	2
11	1.8	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
12	1.9	1.5233	0.0444	0.0476	0	2
13	13	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
14	1.10	1.7867	0.0232	0.0238	2	1
15	1.11	1.2033	0.0443	0.0476	1	2

#### 4.3.6 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาคำตอบ เมื่อครบจำนวนเงื่อนไขตามที่กำหนด

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบผลการวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นไม่สามารถทำได้ดังเหตุผลที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 แต่จะสามารถทำการเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึมได้ ด้วยเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) เนื่องจากโดยปกติคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นคำตอบที่อยู่บนฟรอนเทียร์ที่ 1 ดังนั้นจึงทำการพิจารณาคำตอบที่อยู่บนฟรอนเทียร์ถัดไป เพื่อที่จะหาคำตอบค่าอื่นมาใช้ในการเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม ดังนี้

ตารางที่ 33 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1

Subproblem	String	f1(y)	f2(y)	f3(y)	f4(y)	f5(y)
1	1	0.92717	0.12244	0.12857	1	3
2	2	12.1562	0.13334	0.14001	3	2
3	3	10.335	0.15348	0.16116	1	3
4	4	12.0707	0.03226	0.03387	1	3
5	5	10.4492	0.0761	0.07991	3	2

ตารางที่ 34 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1 (ต่อ)

6	6	2.82798	0.16874	0.17718	3	2
7	1.2	1.52756	0.06747	0.07085	2	2
8	8	1.57665	0.04036	0.04238	3	2
9	9	8.54767	0.085	0.08925	1	3
10	1.4	9.8659	0.02735	0.02872	1	3
11	11	0.11768	0.02423	0.02544	3	2
12	12	4.68298	0.05841	0.06133	1	3
13	1.6	0.67625	0.13528	0.14205	1	3
14	1.8	3.9598	0.076	0.0798	3	2
15	15	12.2464	0.11643	0.12225	2	3

ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บนฟรอนเทียร์ที่ 1 ดีกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1





## บทที่ 5

### วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III

#### (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III)

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณ

วิธีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III) มีเป้าหมายในการแก้ปัญหาหลายวัตถุประสงค์ด้วยการใช้จุดอ้างอิง (Reference point) เพื่อสร้างเป็นเส้นอ้างอิง (Reference line) และค้นหากลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากน้อยสุดที่ใกล้กับเส้นอ้างอิง เพื่อนำไปเป็นคำตอบที่ดีต่อไป โดยจะมีหลักการคล้ายกับ NSGA-II ในขั้นตอนการสร้างประชากร และการคัดเลือกประชากรจากการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) แต่จะมีความแตกต่างกันระหว่าง NSGA-II และ NSGA-III ในขั้นตอนการจัดเก็บและพัฒนาคำตอบ ซึ่ง NSGA-II จะใช้วิธีการ Crowding distance แต่ NSGA-III ใช้จุดอ้างอิงเพื่อกำหนดขอบเขต (Niche preservation) ของกลุ่มคำตอบ โดยเลือกจากระยะห่างตั้งฉากที่สั้นที่สุดระหว่างเส้นอ้างอิงและจุดของกลุ่มคำตอบ

#### 5.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ NSGA-III ในการแก้ปัญหา

ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III ในการหาคำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเริ่มต้น การพัฒนา และการหยุดอัลกอริทึม มีดังต่อไปนี้

##### การนำเข้าข้อมูล

$N$  คือ จำนวนประชากรหรือจำนวนปัญหาย่อย (Subproblem) โดยที่  $j = 1, 2, \dots, N$

$T$  คือ จำนวนเจเนอเรชันสูงสุดในการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยที่  $t = 1, 2, \dots, T$

$P_m$  คือ ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน (Mutation Rate)

$P_c$  คือ ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (Crossover Rate)

### ขั้นตอนที่1 การเริ่มต้น

1. สร้างจุดอ้างอิง (Reference point) โดยใช้ซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex lattice design) เป็นเมทริกซ์ขนาดเท่ากับจำนวนประชากร ( $N$ ) x จำนวนวัตถุประสงค์ (Obj)
2. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของแต่ละประชากร ( $x_i$ ) โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระให้มีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเที่ยวบินทั้งหมด

### ขั้นตอนที่2 การพัฒนา

1. พัฒนาสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring:  $Q_i$ ) ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยครอสโอเวอร์ (Crossover) และมิวเตชัน (Mutation) ของสตริงรุ่นพ่อแม่ (Parent:  $P_i$ )
2. รวบรวมสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก ( $R_i = P_i \cup Q_i$ )
3. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งสตริงรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก ( $R_i = P_i \cup Q_i$ )
4. จัดเก็บค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกำหนดค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ โดยกำหนดค่าเป้าหมาย  $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k(x_i)\}$  โดยที่  $k = 1, 2, \dots, \text{Obj}$
5. นอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด
6. คำนวณหาระยะตั้งฉากระหว่างกลุ่มคำตอบกับจุดอ้างอิงทุกจุด โดยจะเลือกกลุ่มคำตอบที่ดีจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากกับเส้นอ้างอิงที่สั้นที่สุด กรณีที่จุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่ซ้ำกับเส้นอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดลำดับถัดไป  $d_{j,2}(x)$  โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.1 ถึง 5.2

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

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

โดย  $\lambda_j$

คือ ค่าเวกเตอร์ของจุดอ้างอิงที่  $j$

$\bar{f}_i(x)$

คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลดขนาด

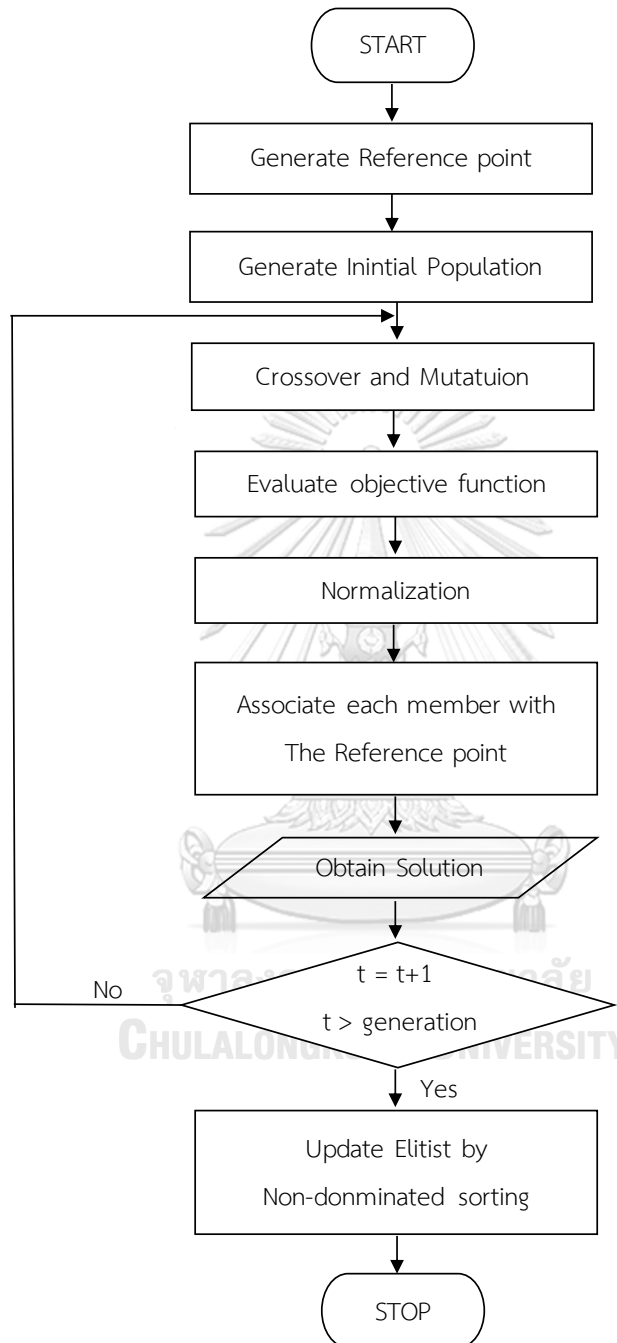
$\bar{f}_i(x)^T$	คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลดค่าโดยมี การเปลี่ยนแถวเป็นหลัก (Transpose)
$\ \lambda_j\ $	คือ ขนาดของเวกเตอร์อ้างอิง $j$
$d_{j,1}(x)$	คือ ระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้นกับ $u$ ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ ถูกลดค่าโดย $x$ ที่จุดอ้างอิง $j$ โดยที่ $u$ คือ จุดฉายของฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่ถูกลดค่าโดย $x$ บน และ $L$ คือ เวกเตอร์จาก จุดเริ่มต้นที่ลากผ่านจุดอ้างอิง $j$
$d_{j,2}(x)$	คือ ระยะตั้งฉากของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $x$ ที่ถูกลดค่าโดย $x$ ณ จุดอ้างอิง $j$

7. เก็บคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist) ด้วยวิธีการเลือกคำตอบที่ไม่ถูกข่มโดยคำตอบอื่น (Non-dominated Sorting) ของประชากรรุ่นปัจจุบันทั้งหมด เพื่อนำไปเป็นประชากรรุ่นถัดไป

ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาอัลกอริทึมตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด

## 5.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III



รูปภาพที่ 28 ขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III

### 5.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III มีดังนี้

- |   |     |            |
|---|-----|------------|
| 1. จำนวนประชากรเริ่มต้น                       | 15  | สตริงคำตอบ |
| 2. ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน ( $P_m$ )    | 0.1 |            |
| 3. ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ ( $P_c$ ) | 0.9 |            |

#### 5.3.1 สร้างจุดอ้างอิง (Reference point)

การสร้างตารางค่าอ้างอิงด้วยวิธีการซิมเพล็กซ์แลตทิซไดโอดิโตน ให้สร้างตารางค่าน้ำหนักขนาดเท่ากับ  $N \times Obj$  แสดงดังตารางที่ 29 ตารางที่ 35 ซิมเพล็กซ์แลตทิซไดโอดิโตน (5 component and 2 degree without center and axial points)

lamda (j)	obj 1	obj 2	obj 3	obj 4	obj 5	$ \lambda $
1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.6	0.63
2	0	0	1	0	0	1.00
3	0	0	0	1	0	1.00
4	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1	0.63
5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.63
6	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.63
7	0	1	0	0	0	1.00
8	0	0	0	0	1	1.00
9	1	0	0	0	0	1.00
10	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1	0.63

จากตาราง  $\lambda_i = (\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{ik})^T$  คือเวกเตอร์จุดอ้างอิงของปัญหาย่อยที่  $i$  และ  $\lambda_{ik}$  คือเวกเตอร์จุดอ้างอิงของประสงค์ที่  $k$  ของปัญหาย่อยที่  $i$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, obj, \lambda_{ik}$

$\geq 0$  และ  $\sum_{i=1}^m \lambda_{ik} = 1$  ตัวอย่างเช่น เวกเตอร์จุดอ้างอิงของปัญหาย่อยที่ 1 ซึ่งมีจำนวนวัตถุประสงค์ทั้งหมด 5 วัตถุประสงค์ ( $k = 5$ ) ดังนั้น  $\lambda_{1k} = (\lambda_{11}, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{15})^T = (0, 0, 0, 0.5, 0.5)^T$

### 5.3.2 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นจะใช้วิธีสุ่มเลือกแบบอิสระ โดยสุ่มเท่ากับจำนวนประชากรที่ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเที่ยวบินทั้งหมด แสดงตัวอย่างสตริงจากการสุ่มดังตารางที่ 36

ตารางที่ 36 สตริงคำตอบเริ่มต้น

Subproblem	string	Priority									
1	1	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7
2	2	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8
3	3	8	9	2	3	6	7	4	1	5	10
4	4	4	2	1	6	8	3	9	7	5	10
5	5	10	4	1	9	2	3	8	7	5	6
6	6	10	9	2	6	3	7	4	1	5	8
7	7	9	1	6	7	3	10	4	2	5	8
8	8	10	2	9	7	8	3	5	4	6	1
9	9	1	3	9	7	4	5	6	10	2	8
10	10	10	8	3	5	4	1	2	9	7	6

### 5.3.3 การพัฒนาคำตอบ

พัฒนาสตริงคำตอบรุ่นลูก (Offspring: Q) ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยการครอสโอเวอร์ (Crossover) และมิวเตชัน (Mutation) ของสตริงรุ่นพ่อแม่ (Parent: P) การพัฒนาคำตอบจะพัฒนาไปที่ละปัญหาย่อย (Subproblem) โดยแต่ละปัญหาย่อยที่  $i$  ประกอบไปด้วยสตริงที่  $i$  และเซตของสตริงข้างเคียงในปัญหาย่อยที่  $i$  ดังนั้นแต่ละเจเนอเรชันจะเกิดกระบวนการพัฒนาคำตอบเท่ากับจำนวนประชากร (จำนวนปัญหาย่อย) โดยตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบในเจเนอเรชันที่ 1 ปัญหาย่อยที่ 1 แสดงดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าความน่าจะเป็น  $P_c = 0.9$  ซึ่งจะทำให้ได้สตริงคำตอบที่ถูกนำไปครอสโอเวอร์จำนวน  $0.9 \times 10 = 9$  ตัว
2. สุ่มค่า  $r$  ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด โดยเลือกครอสโอเวอร์เฉพาะสตริงคำตอบที่มีค่า  $r$  น้อยกว่า  $P_c$  แสดงดังตารางที่ 31

ตารางที่ 37 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปครอสโอเวอร์

string	Priority										$r_i$	$r_i < 0.9$
1	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7	0.1419	Selected
2	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8	0.7041	Selected
3	8	9	2	3	6	7	4	1	5	10	0.1307	Selected
4	4	2	1	6	8	3	9	7	5	10	0.4173	Selected
5	10	4	1	9	2	3	8	7	5	6	0.9274	-
6	10	9	2	6	3	7	4	1	5	8	0.7786	Selected
7	9	1	6	7	3	10	4	2	5	8	0.0258	Selected
8	10	2	9	7	8	3	5	4	6	1	0.3179	Selected
9	1	3	9	7	4	5	6	10	2	8	0.7984	Selected
10	10	8	3	5	4	1	2	9	7	6	0.1577	Selected

3. ครอสโอเวอร์ (การนำสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่มาแลกเปลี่ยนบางส่วนของสตริงซึ่งกันและกัน) เพื่อให้เกิดสตริงรุ่นใหม่หรือสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบพาเซี่ยลแมพครอสโอเวอร์ 1 ตำแหน่ง (One-Point Partially-mapped crossover: PMX) โดยทำการสุ่ม 1 ตำแหน่งในสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent) เพื่อกำหนดจุดที่ครอสโอเวอร์ ซึ่งสุ่มได้ตำแหน่งที่ 6 โดยส่วนของสตริงที่อยู่หลังจากตำแหน่งที่ 6 จะถูกสลับกับส่วนของสตริงที่อยู่หลังของอีกสตริงคำตอบ (Mapping section) ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 38 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่

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

4. แลกเปลี่ยนส่วนย่อยของสตริงพ่อแม่ที่อยู่หลังตำแหน่งที่ 6 จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกมา 2 สตริงคำตอบ

ตารางที่ 39 สตริงคำตอบรุ่นลูก

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

5. ปรับปรุงสตริงคำตอบรุ่นลูก โดยพิจารณาดำแหน่งเลขซ้ำและทำการสลับเปลี่ยนตำแหน่งนั้นจนมีครบทุกหมายเลข จะได้สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1

ตารางที่ 40 สตริงคำตอบรุ่นลูกในเจเนอเรชันที่ 1

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

6. กำหนดค่าความน่าจะเป็นมิวเตชัน  $P_m=0.1$  จะได้สตริงคำตอบทั้งหมด  $0.1 \times 10 = 1$  ตัว ซึ่งการมิวเตชันเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนตำแหน่งภายในสตริงคำตอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียคำตอบที่ไม่อาจเรียกคืน ในบางครั้งคำตอบที่ผ่านการดำเนินงานต่างๆ อาจเข้าไปติดอยู่ในคำตอบเฉพาะที่ ทำให้การเปลี่ยนรูปที่เหมาะสมด้วยการมิวเตชันช่วยให้คำตอบสามารถหลุดออกมาได้คำตอบที่ดี โดยในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีมิวเตชันแบบ Reciprocal Exchange Mutation ซึ่งเป็นการสลับตำแหน่งตัวเลข 2 ตัวภายในสตริงคำตอบ โดยการพิจารณาว่าสตริงคำตอบใดจะถูกนำมามิวเตชันขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชัน

7. สุ่มค่า  $r$  ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมด มิวเตชันเมื่อสตริงคำตอบมีค่า  $r$  น้อยกว่า  $P_m$  แสดงดังตารางที่ 41

ตารางที่ 41 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปมิวเตชัน

string	Priority										$r_i$	$r_i < 0.1$
1	5	4	10	1	8	6	7	3	2	9	0.0079	Selected
2	9	2	5	3	10	1	8	6	4	7	0.3548	-
3	8	9	2	3	6	7	4	1	5	10	0.1286	-
4	4	2	1	6	9	3	8	7	5	10	0.9506	-



ตารางที่ 42 สตริงคำตอบที่ถูกนำไปมิวเตชัน (ต่อ)

5	10	4	1	9	2	3	8	7	5	6	0.4674	-
6	10	6	2	9	3	7	4	1	5	8	0.8739	-
7	9	1	6	7	3	10	4	2	5	8	0.2002	-
8	7	2	9	10	8	3	5	4	6	1	0.4882	-
9	1	3	9	7	10	5	6	4	2	8	0.8839	-
10	5	8	3	10	4	1	2	9	7	6	0.6867	-

8. สุ่มสตริงคำตอบ 2 ตำแหน่งที่ถูกเลือกมิวเตชัน เพื่อทำการสลับตำแหน่งตัวเลข แสดงดัง  
ตารางที่ 43

ตารางที่ 43 ตำแหน่งสตริงคำตอบที่ถูกนำไปมิวเตชัน

String 1	5	4	10	1	8	6	7	3	2	9
Offspring1	5	1	10	4	8	6	7	3	2	9

9. รวบรวมสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก ( $R_t = P_t \cup Q_t$ ) แสดงดังตารางที่ 44

ตารางที่ 44 สตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก

Rt	string	Priority									
Pt	1	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7
	2	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8
	3	8	9	2	3	6	7	4	1	5	10
	4	4	2	1	6	8	3	9	7	5	10
	5	10	4	1	9	2	3	8	7	5	6
	6	10	9	2	6	3	7	4	1	5	8
	7	9	1	6	7	3	10	4	2	5	8
	8	10	2	9	7	8	3	5	4	6	1
	9	1	3	9	7	4	5	6	10	2	8
	10	10	8	3	5	4	1	2	9	7	6

ตารางที่ 45 สตริงคำตอบบรุ่มพ่อแม่และรุ่มลูก (ต่อ)

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

## 5.3.4 คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งสตริงบรุ่มพ่อแม่และรุ่มลูก

( $R_t = P_t \mathbf{U} Q_t$ ) แสดงดังตารางที่ 46

ตารางที่ 46 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบบรุ่มพ่อแม่และรุ่มลูก

String	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
1	3.4533	0.0443	0.0476	2	2
2	1.7867	0.0444	0.0476	1	2
3	3.7767	0.0455	0.0476	0	2
4	3.7767	0.0444	0.0476	0	2
5	1.4567	0.0449	0.0476	1	2
6	1.4567	0.0444	0.0476	1	2
7	3.6067	0.0231	0.0238	1	1
8	3.5200	0.0231	0.0238	1	1
9	3.2767	0.0231	0.0238	1	1
10	1.8600	0.0232	0.0238	1	1
11	0.8633	0.0454	0.0476	0	2

ตารางที่ 47 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูก (ต่อ)

12	2.6967	0.0444	0.0476	1	2
13	3.1133	0.0452	0.0476	1	2
14	1.6000	0.0450	0.0476	1	2
15	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
16	0.9400	0.0444	0.0476	1	2
17	3.1133	0.0454	0.0476	1	2
18	5.7833	0.0453	0.0476	2	2
19	1.7867	0.0454	0.0476	1	2
20	0.8633	0.0454	0.0476	0	2

5.3.5 จัดเก็บค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และกำหนดค่าเป้าหมายของ  
วัตถุประสงค์ โดยกำหนดค่าเป้าหมาย  $z_k^* = \min_{1 \leq i \leq N} \{f_k \bar{x}_i\}$  โดยที่  $k = 1, 2, \dots, \text{Obj}$

แสดงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังตารางที่ 48

ตารางที่ 48 ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด

ff	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
$ff_{\min}(z_k^*)$	0.8633	0.0231	0.0238	0	1
$ff_{\max}$	5.7833	0.0455	0.0476	2	2

5.3.6 นอร์มัลไลซ์ (Normalization) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทั้งหมด  
แสดงดังตารางที่ 49

ตารางที่ 49 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ถูกลำดับนอร์มัลไลซ์

String	$\bar{f}_1$	$\bar{f}_2$	$\bar{f}_3$	$\bar{f}_4$	$\bar{f}_5$
1	0.5263	0.9283	0.9791	0.9997	0.9995
2	0.1876	0.9296	0.9791	0.4998	0.9995
3	0.5920	0.9781	0.9794	0	0.9995
4	0.5920	0.9325	0.9791	0	0.9995

ตารางที่ 50 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบที่ถูกลบทิ้ง (ต่อ)

5	0.1205	0.9547	0.9793	0.4998	0.9995
6	0.1205	0.9311	0.9791	0.4998	0.9995
7	0.5575	0	0	0.4998	0
8	0.5399	0.0002	0	0.4998	0
9	0.4904	0.0003	0	0.4998	0
10	0.2025	0.0039	0	0.4998	0
11	0	0.9731	0.9794	0	0.9995
12	0.3725	0.9286	0.9791	0.4998	0.9995
13	0.4572	0.9649	0.9793	0.4998	0.9995
14	0.1497	0.9589	0.9793	0.4998	0.9995
15	0	0.9609	0.9793	0	0.9995
16	0.0155	0.9297	0.9791	0.4998	0.9995
17	0.4572	0.9766	0.9794	0.4998	0.9995
18	0.9998	0.9698	0.9793	0.9995	0.9995
19	0.1876	0.9723	0.9794	0.4998	0.9995
20	0	0.9730	0.9794	0	0.9995

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.7 คำนวณหาระยะตั้งฉากระหว่างกลุ่มคำตอบกับจุดอ้างอิงทุกจุด

โดยจะเลือกกลุ่มคำตอบที่ดีจากกลุ่มคำตอบที่มีระยะตั้งฉากกับเส้นอ้างอิงที่สั้นที่สุด กรณีที่จุดอ้างอิงมีกลุ่มคำตอบที่ซ้ำกับเส้นอ้างอิงอื่น ให้เลือกระยะตั้งฉากที่สั้นที่สุดลำดับถัดไป

1.หาขนาดเวกเตอร์อ้างอิง แสดงดังตารางที่ 51

ตารางที่ 51 ค่าเวกเตอร์อ้างอิง

$\lambda_j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_1$	0.1	0	0	0.1	0.1	0.6	0	0	1	0.1
$f_2$	0.1	0	0	0.6	0.1	0.1	1	0	0	0.1
$f_3$	0.1	1	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.6

ตารางที่ 52 ค่าเวกเตอร์อ้างอิง (ต่อ)

$f_4$	0.6	0	1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.1
$f_5$	0.6	0	0	0.1	0.6	0.1	0	1	0	0.1
$ \lambda_j $	0.63	1	1	0.63	0.63	0.63	1	1	1	0.63

2. คำนวณ  $d_{j,1}(x) = \|\bar{f}_i(x)^T \lambda_j\| / \|\lambda_j\|$  แสดงดังตารางที่ 53

ตารางที่ 53 ค่า  $d_{j,1}(x)$

$x \backslash \lambda$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$
1	1.06	0.95	0.68	0.02	1.00	1.37	1.00	1.38	0.72	1.02
2	1.06	0.95	0.80	0.19	1.00	1.37	1.00	1.38	0.84	1.02
3	0.47	0.00	0.46	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.47
4	0.71	0.98	0.69	0.00	1.00	1.39	1.00	1.40	0.71	0.69
5	0.71	0.95	0.74	0.09	1.00	1.37	1.00	1.38	0.77	0.67
6	0.47	0.00	0.49	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.47
7	0.24	0.00	0.35	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.24
8	0.47	0.00	0.17	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.47
9	0.71	0.98	0.69	0.00	1.00	1.40	1.00	1.40	0.71	0.69
10	0.94	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.91
11	0.24	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.91
12	0.24	0.00	0.25	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.24
13	0.24	0.00	0.23	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.24
14	0.24	0.00	0.10	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.24
15	0.24	0.00	0.24	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.24
16	0.71	0.98	0.69	0.00	1.00	1.40	1.00	1.40	0.71	0.69
17	0.94	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.91
18	0.24	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.91
19	0.24	0.00	0.25	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.24
20	0.24	0.00	0.23	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.24

3. คำนวณ  $d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)$  แสดงดังตารางที่ 54-58

ตารางที่ 54 ค่า  $d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)$

$x/\lambda$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$
1	0.00	0.00	0.48	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00
	0.00	0.95	0.48	0.00	0.00	0.97	0.00	0.97	0.00	0.72
	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72
	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.97	0.51	0.00
2	0.00	0.00	0.57	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00
	0.00	0.95	0.57	0.00	0.00	0.97	0.00	0.97	0.00	0.72
	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72
	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.97	0.59	0.00
3	0.00	0.00	0.32	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
4	0.00	0.00	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
	0.00	0.98	0.49	0.00	0.00	0.99	0.00	0.99	0.00	0.49
	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.99	0.50	0.00

ตารางที่ 55 ค่า  $d_{j,1}(x)$  (ต่อ)

5	0.71	0.95	0.03	-0.91	1.00	1.37	1.00	1.38	0.07	0.67
	0.71	-0.05	0.03	0.09	1.00	0.67	1.00	0.67	0.77	-0.04
	0.71	0.95	0.74	0.09	0.00	0.67	1.00	1.38	0.77	0.67
	0.00	0.95	0.74	0.09	1.00	1.37	1.00	1.38	0.77	-0.04
	0.00	0.95	0.74	0.09	1.00	1.37	0.00	0.67	0.07	0.67
6	0.47	0.00	-0.22	-0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.22	0.47
	0.47	-1.00	-0.22	0.69	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.49	-0.23
	0.47	0.00	0.49	0.69	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.49	0.47
	-0.24	0.00	0.49	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	-0.23
	-0.24	0.00	0.49	0.69	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.22	0.47
7	0.24	0.00	-0.35	-0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.36	0.24
	0.24	-1.00	-0.35	0.50	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.35	-0.47
	0.24	0.00	0.35	0.50	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.35	0.24
	-0.47	0.00	0.35	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	-0.47
	-0.47	0.00	0.35	0.50	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.36	0.24
8	0.47	0.00	-0.54	-0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.54	0.47
	0.47	-1.00	-0.54	0.24	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.17	-0.24
	0.47	0.00	0.17	0.24	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.17	0.47
	-0.24	0.00	0.17	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	-0.24
	-0.24	0.00	0.17	0.24	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.54	0.47
9	0.71	0.98	-0.01	-1.00	1.00	1.40	1.00	1.40	0.00	0.69
	0.71	-0.02	-0.01	0.00	1.00	0.69	1.00	0.69	0.71	-0.01
	0.71	0.98	0.69	0.00	0.00	0.69	1.00	1.40	0.71	0.69
	0.00	0.98	0.69	0.00	1.00	1.40	1.00	1.40	0.71	-0.01
	0.00	0.98	0.69	0.00	1.00	1.40	0.00	0.69	0.00	0.69

ตารางที่ 56 ค่า  $d_{j,1}(x)$  (ต่อ)

10	0.94	0.95	0.10	-0.81	1.00	1.38	1.00	1.38	0.13	0.91
	0.94	-0.05	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.94	0.95	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	0.24	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.20
	0.24	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	0.00	0.67	0.13	0.91
11	0.24	0.95	0.10	-0.81	1.00	1.38	1.00	1.38	0.13	0.91
	0.24	-0.05	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.24	0.95	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	-0.47	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.20
	-0.47	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	0.00	0.67	0.13	0.91
12	0.24	0.00	-0.45	-0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.45	0.24
	0.24	-1.00	-0.45	0.36	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.25	-0.47
	0.24	0.00	0.25	0.36	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.25	0.24
	-0.47	0.00	0.25	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	-0.47
	-0.47	0.00	0.25	0.36	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.45	0.24
13	0.24	0.00	-0.48	-0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.48	0.24
	0.24	-1.00	-0.48	0.33	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.23	-0.47
	0.24	0.00	0.23	0.33	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.23	0.24
	-0.47	0.00	0.23	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	-0.47
	-0.47	0.00	0.23	0.33	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.48	0.24
14	0.24	0.00	-0.61	-0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.61	0.24
	0.24	-1.00	-0.61	0.13	0.00	-0.70	0.00	-0.70	0.09	-0.47
	0.24	0.00	0.10	0.13	-1.00	-0.70	0.00	0.00	0.09	0.24
	-0.47	0.00	0.10	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	-0.47
	-0.47	0.00	0.10	0.13	0.00	0.00	-1.00	-0.70	-0.61	0.24



ตารางที่ 57 ค่า  $d_{j,1}(x)$  (ต่อ)

15	0.24	0.00	-0.46	-0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.46	0.24
	0.24	-1.00	-0.46	0.35	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.24	-0.47
	0.24	0.00	0.24	0.35	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.24	0.24
	-0.47	0.00	0.24	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	-0.47
	-0.47	0.00	0.24	0.35	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.46	0.24
16	0.71	0.98	-0.01	-1.00	1.00	1.40	1.00	1.40	0.00	0.69
	0.71	-0.02	-0.01	0.00	1.00	0.69	1.00	0.69	0.71	-0.01
	0.71	0.98	0.69	0.00	0.00	0.69	1.00	1.40	0.71	0.69
	0.00	0.98	0.69	0.00	1.00	1.40	1.00	1.40	0.71	-0.01
	0.00	0.98	0.69	0.00	1.00	1.40	0.00	0.69	0.00	0.69
17	0.94	0.95	0.10	-0.81	1.00	1.38	1.00	1.38	0.13	0.91
	0.94	-0.05	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.94	0.95	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	0.24	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.20
	0.24	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	0.00	0.67	0.13	0.91
18	0.24	0.95	0.10	-0.81	1.00	1.38	1.00	1.38	0.13	0.91
	0.24	-0.05	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.24	0.95	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	-0.47	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	1.00	1.38	0.84	0.20
	-0.47	0.95	0.81	0.19	1.00	1.38	0.00	0.67	0.13	0.91
19	0.24	0.00	-0.45	-0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.45	0.24
	0.24	-1.00	-0.45	0.36	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.25	-0.47
	0.24	0.00	0.25	0.36	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.25	0.24
	-0.47	0.00	0.25	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	-0.47
	-0.47	0.00	0.25	0.36	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.45	0.24

ตารางที่ 58 ค่า  $d_{j,1}(x)$  (ต่อ)

20	0.24	0.00	-0.48	-0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.48	0.24
	0.24	-1.00	-0.48	0.33	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.23	-0.47
	0.24	0.00	0.23	0.33	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.23	0.24
	-0.47	0.00	0.23	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	-0.47
	-0.47	0.00	0.23	0.33	0.00	0.00	-1.00	-0.71	-0.48	0.24

4. คำนวณ  $\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)$  แสดงดังตารางที่ 59-61

ตารางที่ 59  $\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)$

$x/\lambda$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$
1	-0.01	-0.68	0.37	0.02	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	0.28	-0.11
	0.00	0.45	0.48	0.00	0.00	0.97	0.00	0.97	0.00	0.72
	0.00	-0.62	0.00	0.00	1.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
	-0.04	0.00	-0.58	-1.00	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	-0.11	0.30
	0.75	-0.29	-0.84	-0.07	0.00	-0.01	0.58	0.41	0.15	-0.65
2	-0.01	-0.68	0.46	0.19	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	0.36	-0.11
	0.00	0.45	0.57	0.00	0.00	0.97	0.00	0.97	0.00	0.72
	0.00	-0.62	0.00	0.00	1.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
	-0.04	0.00	-0.58	-1.00	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	-0.11	0.30
	0.75	-0.29	-0.84	-0.07	0.00	-0.01	0.58	0.41	0.24	-0.65
3	-0.01	-0.68	0.22	0.65	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	0.09	-0.11
	0.00	-0.50	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
	0.00	-0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	-0.46	0.00	-0.58	-1.00	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	-0.11	-0.09
	0.33	-0.29	-0.84	-0.07	0.00	-0.01	-0.42	-0.56	-0.03	-0.65
4	-0.01	-0.68	0.38	0.00	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	0.27	-0.11
	0.00	0.48	0.49	0.00	0.00	0.99	0.00	0.99	0.00	0.49
	0.00	-0.62	0.00	0.00	1.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
	-0.29	0.00	-0.58	-1.00	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	-0.11	0.07
	0.50	-0.29	-0.84	-0.07	0.00	-0.01	0.58	0.43	0.14	-0.65
5	0.70	0.27	-0.08	-0.91	0.94	1.31	0.77	1.24	-0.16	0.56
	0.71	-0.55	0.03	0.09	1.00	0.67	1.00	0.67	0.77	-0.04
	0.71	0.32	0.74	0.09	0.00	0.67	1.00	1.38	0.77	0.67
	-0.79	0.95	0.15	-0.91	0.19	0.65	0.90	0.92	0.66	-0.46
	0.00	0.66	-0.10	0.03	1.00	1.36	-0.42	0.11	-0.29	0.02

ตารางที่ 60  $\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)$  (ต่อ)

6	0.46	-0.68	-0.32	-0.31	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.45	0.37
	0.47	-1.50	-0.22	0.69	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.49	-0.23
	0.47	-0.62	0.49	0.69	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.49	0.47
	-1.03	0.00	-0.09	-0.31	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.38	-0.65
	-0.24	-0.29	-0.34	0.63	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.57	-0.17
7	0.23	-0.68	-0.46	-0.50	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.59	0.13
	0.24	-1.50	-0.35	0.50	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.35	-0.47
	0.24	-0.62	0.35	0.50	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.35	0.24
	-1.27	0.00	-0.23	-0.50	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.24	-0.89
	-0.47	-0.29	-0.48	0.43	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.71	-0.41
8	0.46	-0.68	-0.64	-0.76	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.77	0.37
	0.47	-1.50	-0.54	0.24	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.17	-0.24
	0.47	-0.62	0.17	0.24	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.17	0.47
	-1.03	0.00	-0.41	-0.76	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.06	-0.66
	-0.24	-0.29	-0.66	0.18	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.89	-0.18
9	0.70	0.30	-0.12	-1.00	0.94	1.34	0.77	1.26	-0.23	0.59
	0.71	-0.52	-0.01	0.00	1.00	0.69	1.00	0.69	0.71	-0.01
	0.71	0.36	0.69	0.00	0.00	0.69	1.00	1.40	0.71	0.69
	-0.79	0.98	0.11	-1.00	0.19	0.67	0.90	0.95	0.60	-0.43
	0.00	0.70	-0.14	-0.07	1.00	1.39	-0.42	0.14	-0.36	0.05
10	0.93	0.27	-0.01	-0.81	0.94	1.32	0.77	1.24	-0.10	0.80
	0.94	-0.55	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.94	0.33	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	-0.56	0.95	0.22	-0.81	0.19	0.65	0.90	0.93	0.73	-0.22
	0.24	0.66	-0.03	0.12	1.00	1.37	-0.42	0.11	-0.22	0.26
11	0.23	0.27	-0.01	-0.81	0.94	1.32	0.77	1.24	-0.10	0.80
	0.24	-0.55	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.24	0.33	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	-1.27	0.95	0.22	-0.81	0.19	0.65	0.90	0.93	0.73	-0.22
	-0.47	0.66	-0.03	0.12	1.00	1.37	-0.42	0.11	-0.22	0.26
12	0.23	-0.68	-0.56	-0.64	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.68	0.13
	0.24	-1.50	-0.45	0.36	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.25	-0.47
	0.24	-0.62	0.25	0.36	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.25	0.24
	-1.27	0.00	-0.33	-0.64	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.14	-0.89
	-0.47	-0.29	-0.58	0.29	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.81	-0.41
13	0.23	-0.68	-0.58	-0.67	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.71	0.13
	0.24	-1.50	-0.48	0.33	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.23	-0.47
	0.24	-0.62	0.23	0.33	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.23	0.24
	-1.27	0.00	-0.35	-0.67	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.12	-0.89
	-0.47	-0.29	-0.61	0.26	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.83	-0.41

ตารางที่ 61  $\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)$  (ต่อ)

14	0.23	-0.68	-0.72	-0.87	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.84	0.13
	0.24	-1.50	-0.61	0.13	0.00	-0.70	0.00	-0.70	0.09	-0.47
	0.24	-0.62	0.10	0.13	-1.00	-0.70	0.00	0.00	0.09	0.24
	-1.27	0.00	-0.49	-0.87	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	-0.02	-0.89
	-0.47	-0.28	-0.74	0.07	0.00	-0.01	-1.42	-1.26	-0.97	-0.41
15	0.23	-0.68	-0.57	-0.65	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.69	0.13
	0.24	-1.50	-0.46	0.35	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.24	-0.47
	0.24	-0.62	0.24	0.35	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.24	0.24
	-1.27	0.00	-0.34	-0.65	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.13	-0.89
	-0.47	-0.29	-0.59	0.28	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.82	-0.41
16	0.70	0.30	-0.12	-1.00	0.94	1.34	0.77	1.26	-0.23	0.59
	0.71	-0.52	-0.01	0.00	1.00	0.69	1.00	0.69	0.71	-0.01
	0.71	0.36	0.69	0.00	0.00	0.69	1.00	1.40	0.71	0.69
	-0.79	0.98	0.11	-1.00	0.19	0.67	0.90	0.95	0.60	-0.43
	0.00	0.70	-0.14	-0.07	1.00	1.39	-0.42	0.14	-0.36	0.05
17	0.93	0.27	-0.01	-0.81	0.94	1.32	0.77	1.24	-0.10	0.80
	0.94	-0.55	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.94	0.33	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	-0.56	0.95	0.22	-0.81	0.19	0.65	0.90	0.93	0.73	-0.22
	0.24	0.66	-0.03	0.12	1.00	1.37	-0.42	0.11	-0.22	0.26
18	0.23	0.27	-0.01	-0.81	0.94	1.32	0.77	1.24	-0.10	0.80
	0.24	-0.55	0.10	0.19	1.00	0.67	1.00	0.67	0.84	0.20
	0.24	0.33	0.81	0.19	0.00	0.67	1.00	1.38	0.84	0.91
	-1.27	0.95	0.22	-0.81	0.19	0.65	0.90	0.93	0.73	-0.22
	-0.47	0.66	-0.03	0.12	1.00	1.37	-0.42	0.11	-0.22	0.26
19	0.23	-0.68	-0.56	-0.64	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.68	0.13
	0.24	-1.50	-0.45	0.36	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.25	-0.47
	0.24	-0.62	0.25	0.36	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.25	0.24
	-1.27	0.00	-0.33	-0.64	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.14	-0.89
	-0.47	-0.29	-0.58	0.29	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.81	-0.41
20	0.23	-0.68	-0.58	-0.67	-0.05	-0.06	-0.23	-0.14	-0.71	0.13
	0.24	-1.50	-0.48	0.33	0.00	-0.71	0.00	-0.71	0.23	-0.47
	0.24	-0.62	0.23	0.33	-1.00	-0.71	0.00	0.00	0.23	0.24
	-1.27	0.00	-0.35	-0.67	-0.81	-0.73	-0.10	-0.45	0.12	-0.89
	-0.47	-0.29	-0.61	0.26	0.00	-0.01	-1.42	-1.27	-0.83	-0.41

5.คำนวณ  $d_{j,2}(x) = \|\bar{f}_i(x) - d_{j,1}(x)(\lambda_j/\|\lambda_j\|)\|$  แสดงดังตารางที่ 62

ตารางที่ 62 ค่า  $d_{j,2}(x)$

$x/\lambda$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\lambda_{10}$
1	0.7513	1.0647	1.1881	1.0023	<u>1.2837</u>	1.5553	0.6303	1.1588	0.3348	1.0222
2	0.7513	<u>1.0646*</u>	1.2544	1.0196	1.2837	1.5552	0.6303	1.1587	0.4478	1.0221
3	<u>0.5685*</u>	1.0884	1.0919	1.1931	0.8104*	0.7306*	0.4938*	0.7336*	0.1492*	0.7406*
4	0.5799	1.0777	1.1934	<u>1.0021*</u>	1.2838	1.5743	0.6303	1.1769	0.3248	0.8203
5	1.4549	1.3466	0.7619	1.2896	1.7043	2.2097	1.8901	2.1762	1.3206	0.9888
6	1.3316	1.7810	<u>0.7206*</u>	1.2415	1.2871	1.2359	1.4458	1.5238	1.0738	0.9335
7	1.4089	1.7841	0.8664	1.0894	1.2871	1.2382	<u>1.4458</u>	1.5260	1.0750	1.1213
8	1.3316	1.7845	1.1577	1.1386	1.2871	1.2385	1.4458	1.5262	1.2025	<u>0.9339</u>
9	1.4549	1.3915	0.7272	1.4157	1.7046	2.2628	1.8901	2.2261	1.2390	1.0095
10	1.7366	1.3527	0.8421	1.1853	1.7043	2.2171	1.8901	2.1832	1.4145	1.2761
11	1.4089	1.3527	0.8421	1.1853	1.7043	2.2171	1.8901	2.1832	1.4145	1.2761
12	1.4089	1.7834	1.0160	1.0799	1.2871	1.2376	1.4458	1.5255	<u>1.1289</u>	1.1210
13	1.4089	1.7832	1.0547	1.0907	1.2871	1.2375	1.4458	<u>1.5253</u>	1.1474	1.1209
14	1.4089	1.7776	1.2942	1.2409	1.2871	<u>1.2334</u>	1.4458	1.5215	1.2914	1.1180
15	1.4089	1.7834	1.0302	1.0834	1.2871	1.2376	1.4458	1.5254	1.1355	1.1210
16	1.4549	1.3915	0.7272	1.4157	1.7046	2.2628	1.8901	2.2261	1.2390	1.0095
17	1.7366	1.3527	0.8421	1.1853	1.7043	2.2171	1.8901	2.1832	1.4145	1.2761
18	1.4089	1.3527	0.8421	1.1853	1.7043	2.2171	1.8901	2.1832	1.4145	1.2761
19	1.4089	1.7834	1.0160	1.0799	1.2871	1.2376	1.4458	1.5255	1.1289	1.1210
20	1.4089	1.7832	1.0547	1.0907	1.2871	1.2375	1.4458	1.5253	1.1474	1.1209

จากตาราง พบว่ามีสตริงคำตอบที่ดีที่เป็นคำตอบต่อหลายจุดอ้างอิง เช่น สตริงคำตอบที่ 3 มีระยะห่างตั้งฉากที่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง  $\lambda_1, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}$  ดังนั้นจึงเลือกให้สตริง

คำตอบที่ 3 เทียบกับจุดอ้างอิง  $\lambda_1$  และเลือกสตริงคำตอบอื่นๆที่มีระยะห่างตั้งฉากที่สั้นที่สุดลำดับถัดไปเทียบกับจุดอ้างอิงที่เหลือ

### 5.3.8 เก็บสตริงคำตอบที่ดีที่สุด (Elitist)

ด้วยวิธีการเลือกคำตอบที่ไม่ถูกข่มโดยคำตอบอื่น (Non-dominated Sorting) ของประชากรรุ่นปัจจุบันทั้งหมด เพื่อนำไปเป็นประชากรรุ่นถัดไป แสดงดังตารางที่ 63

ตารางที่ 63 สตริงคำตอบที่ดีที่สุด

Ref	string	Priority										$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
1	3	8	9	2	3	6	7	4	1	5	10	3.7767	0.0455	0.0476	0	2
2	2	9	2	5	3	10	1	7	6	4	8	1.7867	0.0444	0.0476	1	2
3	6	10	9	2	6	3	7	4	1	5	8	1.4567	0.0444	0.0476	1	2
4	4	4	2	1	6	8	3	9	7	5	10	3.7767	0.0444	0.0476	0	2
5	1	5	4	10	1	8	6	9	3	2	7	3.4533	0.0443	0.0476	2	2
6	14	4	2	1	6	9	3	8	7	5	10	1.6	0.045	0.0476	1	2
7	7	9	1	6	7	3	10	4	2	5	8	3.6067	0.0231	0.0238	1	1
8	13	8	9	2	3	6	7	4	1	5	10	3.1133	0.0452	0.0476	1	2
9	12	9	2	5	3	10	1	8	6	4	7	2.6967	0.0444	0.0476	1	2
10	8	10	2	9	7	8	3	5	4	6	1	3.52	0.0231	0.0238	1	1

### 5.3.9 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการพัฒนาอัลกอริทึมตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด

#### 5.4 การเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบผลการวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นไม่สามารถทำได้ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แต่จะสามารถทำการเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึมได้ ด้วยเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) เนื่องจากโดยปกติคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นคำตอบที่อยู่บนฟรอนเทียร์ที่ 1 ดังนั้นจึงทำการพิจารณาคำตอบที่อยู่บนฟรอนเทียร์ถัดไป เพื่อที่จะหาคำตอบค่าอื่นมาใช้ในการเปรียบเทียบภายในอัลกอริทึม ดังนี้

ตารางที่ 64 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1

Ref	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
1	4.044179	0.079249	0.081349	1	3
2	2.110278	0.012175	0.012175	2	3
3	5.028763	0.094515	0.096615	2	3
4	3.301454	0.045422	0.045422	1	3
5	6.646353	0.097704	0.099804	3	3
6	6.06926	0.084513	0.084513	2	3
7	8.339992	0.108971	0.111071	2	2
8	6.394336	0.103826	0.103826	2	3
9	10.13771	0.13502	0.13712	2	3
10	7.381435	0.138432	0.138432	2	2

ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บนฟรอนเทียร์ที่ 1 ดีกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากฟรอนเทียร์ที่ 1

## บทที่ 6

### วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์

#### (Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE)

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงานของวิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Differential Evolution Algorithm: MODE) พร้อมทั้งแสดงตัวอย่างการคำนวณ

วิธีการเชิงวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์มีหลักการแก้ปัญหาโดยใช้ประชากรเป็นพื้นฐาน (Population-based Optimizer) ซึ่งคล้ายกับวิธีการเชิงวิวัฒนาการทั่วไปที่พัฒนาคำตอบด้วยการใช้ประชากรของเจเนอเรชันสุดท้าย กระบวนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) จะใช้เลขจำนวนจริงในการพัฒนาคำตอบหรือกำหนดทิศทางของเวกเตอร์ โดยเรียกส่วนประกอบของเวกเตอร์ว่า จุดพิกัด และจำนวนพิกัดในแต่ละเวกเตอร์ว่า ขนาดของเวกเตอร์ (Alatas, Akin, & Karci, 2008) โดยงานวิจัยนี้พัฒนาคำตอบด้วยการกลายพันธุ์คลาสสิกแบบใช้ผลต่าง (Classical DE) หรือที่เรียกว่า “DE/rand/1”

MODE เริ่มต้นการทำงานด้วยการสุ่มเวกเตอร์เป้าหมาย (Target Vector) ชุดแรกเท่ากับจำนวนประชากร (N) เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และจุดเริ่มต้นของเวกเตอร์ จากนั้นจะสุ่มเลือกเวกเตอร์เป้าหมายมาทำการกลายพันธุ์ (Mutation) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจุดพิกัดเวกเตอร์ด้วยผลต่างของเวกเตอร์ โดยมีหลายวิธีกลายพันธุ์ เช่น DE/rand/1, DE/best/1, DE/rand-to-best/1, DE/best/2 และ DE/rand/2 และจะได้เวกเตอร์กลายพันธุ์ (Mutant Vector) หลังจากสิ้นสุดการกลายพันธุ์จนครบจำนวนประชากร จะทำการแลกเปลี่ยนค่าพิกัด (Recombination) ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมายและเวกเตอร์กลายพันธุ์ด้วยอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover Rate: CR) ซึ่งจะเรียกว่า เวกเตอร์ทดลอง (Trial Vector) โดยจะนำเวกเตอร์ที่จบขั้นตอนการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่าง (DE Operator) ไปคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อเปรียบเทียบกับเวกเตอร์เป้าหมายด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในการคัดเลือกคำตอบที่ดีมาเป็นเวกเตอร์เป้าหมายของเจเนอเรชันถัดไป



## 6.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของ MODE ในการแก้ปัญหา

ขั้นตอนการทำงานของ MODE ในการหาคำตอบของปัญหาหลายวัตถุประสงค์ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเริ่มต้น การพัฒนา และการหยุดอัลกอริทึม มีดังต่อไปนี้

### การนำเข้าข้อมูล

$N$  คือ จำนวนประชากร (Population) โดยที่  $j=1,2,\dots,N$

$T$  คือ จำนวนเจเนอเรชัน (Generation) โดยที่  $t=1,2,\dots,T$

$F$  คือ ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง (Scaling Factor)

$CR$  คือ อัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate)

### ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้น

1. สร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น (สตริงเป้าหมาย) โดยวิธีสุ่มเลือกอิสระ กำหนดให้ความยาวสตริงเท่ากับจำนวนเที่ยวบิน ( $nc$ )
2. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงเป้าหมาย
3. เข้ารหัส (Encode) สตริงเป้าหมาย มีค่า  $[0,1]$  โดยกำหนดให้ค่า  $x_{j,n}$  ของลำดับเที่ยวบินที่ 1 สตริง  $j$  มีค่าน้อยที่สุดและลำดับสุดท้ายมีค่ามากที่สุด ตัวอย่างเช่น ลำดับเที่ยวบิน จะได้ว่า  $x_{j,1} = 0.5$ ,  $x_{j,2} = 0.5$ ,  $x_{j,3} = 0.5$ ,  $x_{j,4} = 0.5$  และ  $x_{j,5} = 0.5$

### ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนา

1. สุ่มค่า  $r_1, r_2$  และ  $r_3$  โดยมีค่าอยู่ในช่วงเท่ากับ 1 ถึง  $N$  และ  $r_1 \neq r_2 \neq r_3$  พัฒนาสตริงเป้าหมาย (เวกเตอร์เป้าหมาย) ด้วยวิธีกลายพันธุ์คลาสสิกแบบใช้ผลต่าง (Classical Differential Evolution: DE/rand/1) ดังสมการที่
2. ครอสโอเวอร์ระหว่างเวกเตอร์เป้าหมาย ( $\bar{x}_j$ ) และเวกเตอร์กลายพันธุ์ ( $\bar{v}_j$ ) ด้วยวิธียูนิฟอร์ม (Uniform Crossover) โดยที่โอกาสเกิดการแลกเปลี่ยนค่าในแต่ละตำแหน่งที่  $n$  บนสตริง  $j$  เท่ากับอัตราการครอสโอเวอร์ (Crossover rate:  $CR$ ) และทำการสุ่มค่าในช่วง 1 ถึง  $nc$  ทั้งหมด  $N$  ตัว นำเวกเตอร์กลายพันธุ์ในตำแหน่งที่สุ่มค่าไปแทนที่

เวกเตอร์เป้าหมายเวกเตอร์เป้าหมาย เวกเตอร์ที่ได้จากการครอสโอเวอร์ เรียกว่า

เวกเตอร์ทดลอง (Trial vector:  $\bar{u}_j$ ) แสดงดังสมการที่ 6.1

$$u_{i,n} = \begin{cases} v_{i,n} & \text{if } rand_{i,n} \leq CR \text{ or } rand_{i,n} = n \\ x_{i,n} & \text{otherwise} \end{cases}; \forall i \in N, \forall n \in nc \quad (6.1)$$

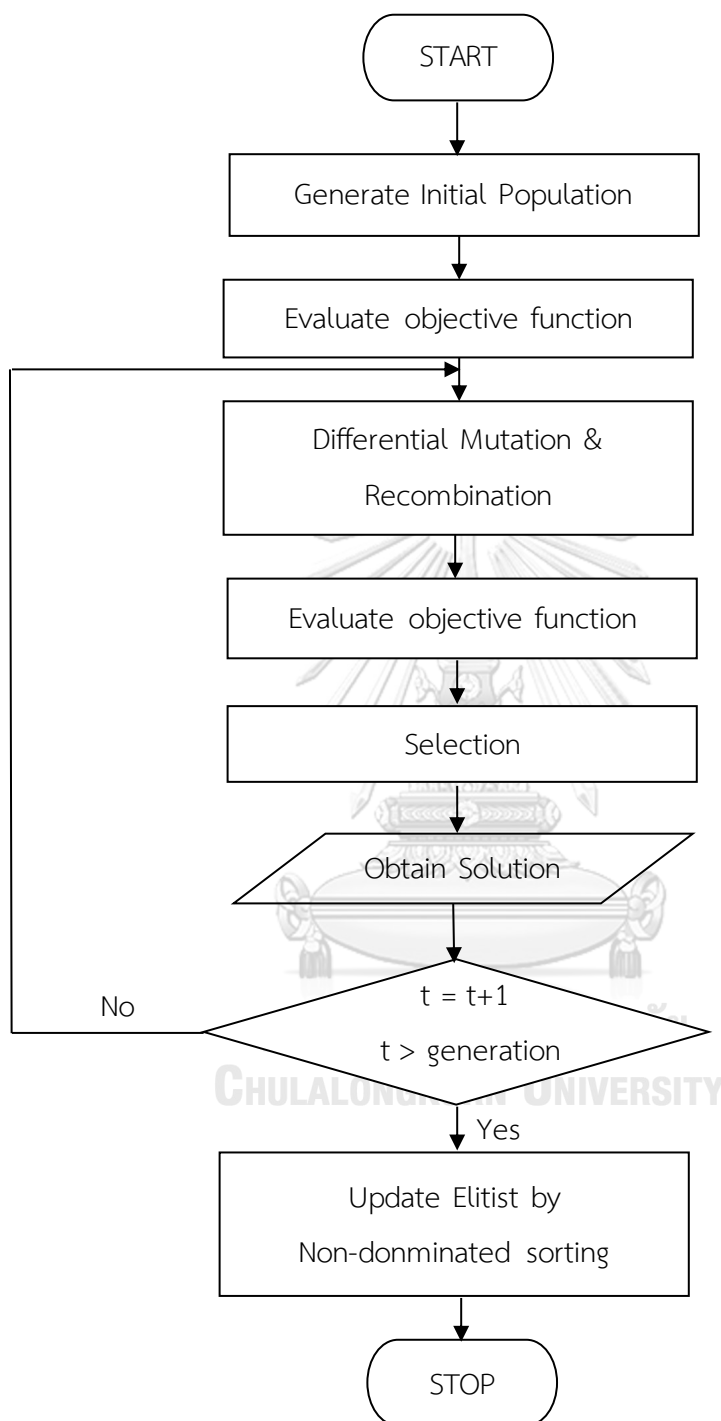
เมื่อ  $u_{i,n}$  คือจุดพิกัดของเวกเตอร์ทดลองหรือค่าเข้ารหัสสตริงทดลองตำแหน่งตามลำดับ (Priority) ที่  $n$  บนสตริง  $i$

3. ถอดรหัส (Decode) เวกเตอร์ทดลอง โดยเรียงค่า  $u_{j,n}$  บนสตริง  $j$  จากน้อยไปมาก จะได้สตริงทดลองออกมาทั้งหมด  $N$  สตริง
4. คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงทดลอง
5. ประเมินค่าวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด (Non-dominating Sorting) โดยการคัดเลือก  $N$  สตริงคำตอบที่ดีที่สุดจากเซต  $P_t \cup Q_t$  เพื่อเป็นสตริงคำตอบปัจจุบันของเซต  $P_{t+1}$  ( $P_t$  คือเซตของประชากรหรือกลุ่มสตริงคำตอบในปัจจุบันซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $N$  ที่เจเนอเรชัน  $t$  และ  $Q_t$  คือกลุ่มสตริงคำตอบใหม่ซึ่งได้จากการกลายพันธุ์ของสตริงคำตอบในเซต  $P_t$ )

### ขั้นตอนที่ 3 การหยุดอัลกอริทึม

หยุดการปรับปรุงคำตอบตามจำนวนเจเนอเรชันสูงสุดที่กำหนด

## 6.2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ MODE



รูปภาพที่ 29 ขั้นตอนการทำงานของ MODE

### 6.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ MODE ในการแก้ปัญหา

ค่าพารามิเตอร์ของตัวอย่างการประยุกต์ใช้วิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ มีดังนี้

- |                           |     |            |
|---------------------------|-----|------------|
| 1. จำนวนประชากรเริ่มต้น   | 15  | สตริงคำตอบ |
| 2. ค่าปัจจัยการขยายผลต่าง | 2.0 |            |
| 3. อัตราการครอสโอเวอร์    | 0.7 |            |

#### 6.3.1 การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้น

การสร้างสตริงคำตอบเริ่มต้นของวิธีการวิวัฒนาการโดยใช้ผลต่างแบบหลายวัตถุประสงค์ จะใช้วิธีการสุ่มค่าช่วง 0 ถึง 1 โดยสุ่มเป็นจำนวนเท่ากับประชากร (N) ซึ่งมีความยาวสตริงเท่ากับจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (nc) แสดงตัวอย่างค่ารหัสจากการสุ่มดังตารางที่ 65

ตารางที่ 65 ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.743	0.605	0.592	0.825	0.829	0.872	0.661	0.580	0.759	0.808
2	0.716	0.353	0.726	0.840	0.790	0.680	0.587	0.439	0.736	1.000
3	0.413	0.891	0.742	0.573	0.782	0.723	0.695	0.642	0.730	0.477
4	0.701	0.488	0.652	0.746	0.864	0.840	0.683	0.580	0.716	0.867
5	0.426	0.888	0.779	0.524	0.823	0.703	0.669	0.579	0.718	0.358
6	0.708	0.873	0.773	0.559	0.743	0.649	0.739	0.726	0.698	0.523
7	0.665	0.646	0.658	0.811	0.644	0.740	0.627	0.467	0.800	0.867
8	0.522	0.359	0.652	0.670	0.648	0.721	0.537	0.827	0.786	0.667
9	0.676	0.590	0.683	0.334	0.691	0.618	0.622	0.614	0.745	0.000
10	0.332	0.654	0.546	0.889	0.885	0.865	0.611	0.616	0.757	0.925
11	0.546	0.353	0.726	0.574	0.731	0.680	0.485	0.701	0.763	0.429
12	0.708	0.827	0.683	0.698	0.691	0.718	0.692	0.614	0.763	0.573
13	0.212	0.359	0.652	0.594	0.637	0.677	0.658	0.827	0.792	0.985
14	0.609	0.218	0.708	0.588	0.829	0.663	0.502	0.893	0.683	0.477
15	0.332	0.654	0.592	0.825	0.802	0.704	0.592	0.685	0.759	0.808

ทำการถอดรหัส (Decoding) เมื่อได้ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้นให้อยู่ในรูปของค่า  
ความสำคัญ (Priority) โดยเรียงจากน้อยไปมาก แสดงผลลัพธ์การถอดรหัสดังตารางที่ 66

ตารางที่ 66 ถอดรหัส (Decoding) สตริงคำตอบเริ่มต้น

String	Priority										Sequence									
	1	5	3	2	8	9	10	4	1	6	7	A5	A3	A11	A8	A9	A10	A13	A1	A6
2	5	1	6	9	8	4	3	2	7	10	A5	A1	A6	A9	A8	A13	A3	A11	A16	A10
3	1	10	8	3	9	6	5	4	7	2	A1	A10	A8	A3	A9	A6	A5	A13	A16	A11
4	5	1	3	7	9	8	4	2	6	10	A5	A1	A3	A16	A9	A8	A13	A11	A6	A10
5	2	10	8	3	9	6	5	4	7	1	A11	A10	A8	A3	A9	A6	A5	A13	A16	A1
6	5	10	9	2	8	3	7	6	4	1	A5	A10	A9	A11	A8	A3	A16	A6	A13	A1
7	6	4	5	9	3	7	2	1	8	10	A6	A13	A5	A9	A3	A16	A11	A1	A8	A10
8	2	1	5	7	4	8	3	10	9	6	A11	A1	A5	A16	A13	A8	A3	A10	A9	A6
9	7	3	8	2	9	5	6	4	10	1	A16	A3	A8	A11	A9	A5	A6	A13	A10	A1
10	1	5	2	9	8	7	3	4	6	10	A1	A5	A11	A9	A8	A16	A3	A13	A6	A10
11	4	1	8	5	9	6	3	7	10	2	A13	A1	A8	A5	A9	A6	A3	A16	A10	A11
12	7	10	3	6	4	8	5	2	9	1	A16	A10	A3	A6	A13	A8	A5	A11	A9	A1
13	1	2	5	3	4	7	6	9	8	10	A1	A11	A5	A3	A13	A16	A6	A9	A8	A10
14	5	1	8	4	9	6	3	10	7	2	A5	A1	A8	A13	A9	A6	A3	A10	A16	A11
15	1	4	3	10	8	6	2	5	7	9	A1	A13	A3	A10	A8	A6	A11	A5	A16	A9

### 6.3.2 การประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

การคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริง สามารถคำนวณได้จากสมการฟังก์ชัน  
วัตถุประสงค์ในบทที่ 2 แสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตารางที่ 67

ตารางที่ 67 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น

String	$f_1(\bar{x})$	$f_2(\bar{x})$	$f_3(\bar{x})$	$f_4(\bar{x})$	$f_5(\bar{x})$
1	1.5233	0.0443	0.0476	0	2
2	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
3	2.1033	0.0231	0.0238	2	1
4	1.2033	0.0442	0.0476	1	2
5	1.4433	0.0231	0.0238	2	1
6	1.5100	0.0232	0.0238	1	1
7	0.9400	0.0442	0.0476	1	2

ตารางที่ 68 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบเริ่มต้น (ต่อ)

8	1.5900	0.0231	0.0238	1	1
9	1.8667	0.0231	0.0238	1	1
10	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
11	1.5467	0.0231	0.0238	2	1
12	1.4433	0.0231	0.0238	2	1
13	0.9400	0.0442	0.0476	1	2
14	1.5233	0.0231	0.0238	2	1
15	1.6000	0.0442	0.0476	1	2

### 6.3.3 การพัฒนาคำตอบ

ขั้นตอนนี้จะใช้ผลต่างของค่ารหัสระหว่างสตริงคำตอบที่มีค่าความสำคัญเท่ากันในการหาทิศทางคำตอบที่ดี โดยงานวิจัยนี้จะแสดงตัวอย่างเฉพาะเจาะจงเลขชี้กำลังที่ 1 ดังต่อไปนี้

1. ทำการสุ่มค่าจำนวนเต็ม  $r_1, r_2$  และ  $r_3$  โดยที่  $r_1 \neq r_2 \neq r_3$  ในช่วงระหว่าง 1 ถึงจำนวนประชากร ( $[1, N]$ ) ให้สตริงหลักหรือที่เรียกว่าสตริงเป้าหมาย (เลขชี้กำลังที่ 1 สตริงเป้าหมาย คือ สตริงคำตอบเริ่มต้น) แสดงตัวอย่างค่าสุ่มดังตารางที่ 69

ตารางที่ 69 ค่าสุ่ม  $r_1, r_2$  และ  $r_3$  ของสตริงแต่ละเป้าหมายในเลขชี้กำลังที่ 1

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

ตารางที่ 70 ค่าสมาชิก  $r_1, r_2$  และ  $r_3$  ของสตริงแต่ละเป้าหมายในเจเนอเรชันที่ 1 (ต่อ)

10	5	3	14
11	14	14	11
12	15	3	12
13	7	9	4
14	12	7	9
15	15	9	4

2. ทำการพัฒนาค่ารหัสสตริงเป้าหมายด้วยวิธีการกลายพันธุ์คลาสสิกแบบใช้ผลต่าง (Classical Differential Evolution) จะได้ค่ารหัสสตริงกลายพันธุ์โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6.2 ถึง 6.3 แสดงตัวอย่างการคำนวณและผลสตริงกลายพันธุ์ดังตารางที่ 71

$$v_{1,1} = x_{8,1} + F(x_{2,1} - x_{6,1}) = 0.522 + 2(0.716 - 0.708) = 0.537 \quad (6.2)$$

$$v_{1,2} = x_{8,2} + F(x_{2,2} - x_{6,2}) = 0.359 + 2(0.353 - 0.873) = -0.687 \quad (6.3)$$

ตารางที่ 71 ค่ารหัสสตริงกลายพันธุ์ในเจเนอเรชันที่ 1

Mutant String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.537	-0.687	0.339	0.665	0.670	0.730	0.436	0.210	0.573	0.641
2	0.697	0.590	0.551	0.871	0.801	0.922	0.517	0.310	0.726	1.096
3	0.711	0.815	0.649	0.460	0.693	0.628	0.596	0.537	0.635	0.178
4	0.492	0.660	0.423	0.556	0.499	0.686	0.467	0.324	0.483	0.736
5	0.401	0.837	0.734	0.494	0.775	0.662	0.630	0.545	0.676	0.337
6	0.652	0.782	0.726	0.508	0.721	0.587	0.666	0.654	0.670	0.477
7	0.441	0.415	0.432	0.512	0.413	0.547	0.435	0.292	0.629	0.723
8	0.242	0.015	0.730	0.449	0.418	0.519	0.263	0.667	0.610	0.444
9	0.575	0.493	0.641	0.250	0.744	0.520	0.524	1.041	0.640	-0.069
10	0.555	0.519	0.546	0.889	0.885	0.865	0.611	0.616	0.757	0.925
11	0.460	0.033	0.640	0.498	0.719	0.648	0.375	0.676	0.764	0.296
12	0.540	0.741	0.518	0.541	0.530	0.466	0.532	0.412	0.643	0.348
13	0.194	0.910	0.696	0.543	0.582	0.619	0.602	0.714	0.724	0.900

ตารางที่ 72 ค่ารหัสสตริงกลายพันธุ์ในเจเนอเรชันที่ 1 (ต่อ)

14	0.462	0.448	0.579	0.436	0.570	0.525	0.568	0.796	0.549	0.305
15	0.313	0.616	0.719	0.481	0.755	0.663	0.557	0.645	0.687	0.381

## 3. ทำการครอสโอเวอร์ด้วยวิธียูนีฟอร์ม (Uniform Crossover) ระหว่างค่ารหัสสตริง

เป้าหมายและค่ารหัสของสตริงกลายพันธุ์ ซึ่งจะได้ค่ารหัสสตริงทดลอง ซึ่งมีวิธีดังต่อไปนี้

- ก. ทำการสุ่มค่า  $R_2^n$  ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่  $n = 1, 2, \dots, n_c$  ถ้า  $R_2^n \leq CR$  แล้วจะแทนที่ค่าเป้าหมาย ( $x_{j,n}$ ) ด้วยค่ารหัสของสตริงกลายพันธุ์ ( $v_{j,n}$ ) โดยที่  $j = 1, 2, \dots, N$  แสดงค่าสุ่มและตัวอย่างการแลกเปลี่ยนค่ารหัสของสตริงที่ 1 ดังตารางที่ 73 และรูปภาพที่ 30

ตารางที่ 73 ค่าสุ่มของการครอสโอเวอร์ในเจเนอเรชันที่ 1

String	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1	0.15	0.37	0.12	0.04	0.54	0.78	0.82	0.97	0.99	0.46
2	0.14	0.53	0.71	0.65	0.47	0.72	0.02	0.56	0.45	0.03
3	0.08	0.01	0.72	0.76	0.60	0.58	0.38	0.15	0.78	0.76
4	0.17	0.89	0.97	0.03	0.63	0.62	0.16	0.71	0.87	0.35
5	0.84	0.92	0.49	0.15	0.05	0.97	0.26	0.88	0.51	0.86
6	0.45	0.53	0.78	0.76	0.06	0.89	0.58	0.76	0.58	0.83
7	0.89	0.43	0.56	0.77	0.25	0.32	0.70	0.26	0.48	0.63
8	0.18	0.24	0.56	0.69	0.71	0.87	0.57	0.20	0.81	0.37
9	0.30	0.26	0.54	0.16	0.58	0.04	0.63	0.75	0.55	0.10
10	0.66	0.15	0.16	0.91	0.96	0.20	0.33	0.41	0.80	0.32
11	0.48	0.54	0.42	0.56	0.36	0.34	0.93	0.70	0.75	0.64
12	0.09	0.97	0.42	0.50	0.45	0.78	0.65	0.24	0.86	0.21
13	0.84	0.39	0.76	0.64	0.86	0.80	0.13	0.23	0.68	0.83
14	0.31	0.04	0.11	0.49	0.88	0.26	0.95	0.72	0.57	0.37
15	0.47	0.77	0.55	0.70	0.05	0.88	0.45	0.33	0.21	0.47



					$R6 > CR$	$R7 > CR$	$R8 > CR$	$R9 > CR$		
x	0.743	0.605	0.592	0.825	0.829	0.872	0.661	0.580	0.759	0.808
u	0.537	-0.687	0.339	0.665	0.670	0.872	0.661	0.580	0.759	0.641
v	0.537	-0.687	0.339	0.665	0.670	0.730	0.436	0.210	0.573	0.641
	$R1 \leq CR$	$R2 \leq CR$	$R3 \leq CR$	$R4 \leq CR$	$R5 \leq CR$					$R10 \leq CR$

รูปภาพที่ 30 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนค่ารหัสของสตริงที่ 1

เมื่อทำการตรวจสอบโอเวอร์แล้วจะได้สตริงคำตอบทดลองแสดงดังตารางที่ 74

ตารางที่ 74 ค่ารหัสของสตริงทดลองในเจเนอเรชั่นที่ 1

Trial String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.537	-0.687	0.339	0.665	0.67	0.872	0.661	0.58	0.759	0.641
2	0.6973	0.59	0.726	0.871	0.801	0.68	0.517	0.31	0.726	1.096
3	0.711	0.815	0.742	0.573	0.693	0.628	0.596	0.537	0.73	0.477
4	0.4924	0.488	0.652	0.556	0.499	0.686	0.467	0.58	0.716	0.736
5	0.4255	0.888	0.734	0.494	0.775	0.703	0.63	0.579	0.676	0.358
6	0.6524	0.782	0.773	0.559	0.721	0.649	0.666	0.726	0.67	0.523
7	0.6645	0.415	0.432	0.811	0.413	0.547	0.627	0.292	0.629	0.723
8	0.2415	0.015	0.73	0.449	0.648	0.721	0.263	0.667	0.786	0.444
9	0.5749	0.493	0.641	0.25	0.744	0.52	0.524	0.614	0.64	-0.069
10	0.5553	0.519	0.546	0.889	0.885	0.865	0.611	0.616	0.757	0.925
11	0.4601	0.033	0.64	0.498	0.719	0.648	0.485	0.701	0.763	0.296
12	0.5403	0.827	0.518	0.541	0.53	0.718	0.532	0.412	0.763	0.348
13	0.212	0.91	0.652	0.543	0.637	0.677	0.602	0.714	0.724	0.985
14	0.4618	0.448	0.579	0.436	0.829	0.525	0.502	0.893	0.549	0.305
15	0.3129	0.654	0.719	0.825	0.755	0.704	0.557	0.645	0.687	0.381

4. ทำการถอดรหัสของสตริงทดลองให้อยู่รูปแบบของค่าความสำคัญ โดยเรียงค่ารหัสจากน้อยไปมาก แสดงผลการถอดรหัสดังตารางที่ 75

ตารางที่ 75 สตริงคำตอบทดลองในเงื่อนไขที่ 1

Trial String	Priority										Sequence									
	1	6	10	3	2	4	8	7	9	5	1	A6	A10	A3	A11	A13	A8	A16	A9	A5
2	8	1	5	9	3	6	7	4	2	10	A8	A1	A5	A9	A3	A6	A16	A13	A11	A10
3	3	8	7	2	9	5	6	10	4	1	A3	A8	A16	A11	A9	A5	A6	A10	A13	A1
4	2	6	4	8	7	1	5	9	3	10	A11	A6	A13	A8	A16	A1	A5	A9	A3	A10
5	4	10	2	5	1	7	8	6	3	9	A13	A10	A11	A5	A1	A16	A8	A6	A3	A9
6	8	1	2	7	4	6	9	3	5	10	A8	A1	A11	A16	A13	A6	A9	A3	A5	A10
7	10	7	6	2	1	4	3	8	5	9	A10	A16	A6	A11	A1	A13	A3	A8	A5	A9
8	6	10	7	1	2	3	9	4	5	8	A6	A10	A16	A1	A11	A3	A9	A13	A5	A8
9	9	5	4	8	1	3	6	7	2	10	A9	A5	A13	A8	A1	A3	A6	A16	A11	A10
10	10	6	9	2	3	4	8	7	5	1	A10	A6	A9	A11	A3	A13	A8	A16	A5	A1
11	4	1	3	9	5	7	6	8	2	10	A13	A1	A3	A9	A5	A16	A6	A8	A11	A10
12	4	8	7	3	5	2	9	10	6	1	A13	A8	A16	A3	A5	A11	A9	A10	A6	A1
13	10	2	5	8	4	6	9	1	3	7	A10	A11	A5	A8	A13	A6	A9	A1	A3	A16
14	10	2	5	9	1	7	8	3	4	6	A10	A11	A5	A9	A1	A16	A8	A3	A13	A6
15	2	10	3	8	7	6	4	1	5	9	A11	A10	A3	A8	A16	A6	A13	A1	A5	A9

## 5. ทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง แสดงค่าฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง ดังตารางที่ 76

ตารางที่ 76 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง

Trial String	$f_1(\bar{u})$	$f_2(\bar{u})$	$f_3(\bar{u})$	$f_4(\bar{u})$	$f_5(\bar{u})$
1	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
2	3.5967	0.0231	0.0238	1	1
3	0.9400	0.0443	0.0476	1	2
4	0.8633	0.0452	0.0476	0	2
5	1.4567	0.0454	0.0476	1	2
6	2.9467	0.0232	0.0238	2	1
7	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
8	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
9	3.2033	0.0443	0.0476	1	2
10	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
11	1.5233	0.0445	0.0476	0	2
12	1.2033	0.0453	0.0476	1	2
13	1.4567	0.0444	0.0476	1	2

ตารางที่ 77 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบทดลอง (ต่อ)

14	3.9567	0.0451	0.0476	2	2
15	1.6000	0.0444	0.0476	1	2

### 6.3.4 การหาค่าที่ดีที่สุด

ทำการเปรียบเทียบสตริงคำตอบรวม ได้แก่ สตริงคำตอบเป้าหมายและสตริงคำตอบทดลอง ( $P_t \cup Q_t$ ) ด้วยวิธีการเชิงกลุ่มที่ดีที่สุดในการกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness) ของแต่ละสตริงคำตอบ โดยยิ่งค่าความแข็งแรงน้อย สตริงคำตอบจะยิ่งดี จะได้ค่าความแข็งแรงดังตารางที่ 78

ตารางที่ 78 ค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ

String	f1	f2	f3	f4	f5
1	1.5233	0.0443	0.0476	0	2
2	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
3	2.1033	0.0231	0.0238	2	1
4	1.2033	0.0442	0.0476	1	2
5	1.4433	0.0231	0.0238	2	1
6	1.5100	0.0232	0.0238	1	1
7	0.9400	0.0442	0.0476	1	2
8	1.5900	0.0231	0.0238	1	1
9	1.8667	0.0231	0.0238	1	1
10	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
11	1.5467	0.0231	0.0238	2	1
12	1.4433	0.0231	0.0238	2	1
13	0.9400	0.0442	0.0476	1	2
14	1.5233	0.0231	0.0238	2	1
15	1.6000	0.0442	0.0476	1	2
1.1	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
1.2	3.5967	0.0231	0.0238	1	1

ตารางที่ 79 ค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบ (ต่อ)

1.3	0.9400	0.0443	0.0476	1	2
1.4	0.8633	0.0452	0.0476	0	2
1.5	1.4567	0.0454	0.0476	1	2
1.6	2.9467	0.0232	0.0238	2	1
1.7	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
1.8	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
1.9	3.2033	0.0443	0.0476	1	2
1.10	0.8633	0.0451	0.0476	0	2
1.11	1.5233	0.0445	0.0476	0	2
1.12	1.2033	0.0453	0.0476	1	2
1.13	1.4567	0.0444	0.0476	1	2
1.14	3.9567	0.0451	0.0476	2	2
1.15	1.6000	0.0444	0.0476	1	2

เมื่อได้ค่าความแข็งแรงของสตริงทั้งหมดแล้ว จะคัดเลือกสตริงที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มาเท่ากับจำนวนประชากรเริ่มต้น (N) โดยที่ถ้าจำนวนสตริงที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีมากกว่าจำนวนประชากร ให้เลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแออัด (Crowding Distance) มากเป็นอันดับถัดไป แต่ถ้าจำนวนสตริงที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มีน้อยกว่าจำนวนประชากร ให้เลือกสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงมากเป็นลำดับถัดไป มาเพิ่มจนครบจำนวน ค่ารหัสและสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2 ดังตารางที่ 80-82

ตารางที่ 80 ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชันที่ 2

String	Priority									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	0.413	0.891	0.742	0.573	0.782	0.723	0.695	0.642	0.730	0.477
12	0.708	0.827	0.683	0.698	0.691	0.718	0.692	0.614	0.763	0.573
5	0.426	0.888	0.779	0.524	0.823	0.703	0.669	0.579	0.718	0.358
6	0.708	0.873	0.773	0.559	0.743	0.649	0.739	0.726	0.698	0.523
1.1	0.537	-0.687	0.339	0.664	0.670	0.871	0.660	0.580	0.759	0.640
2	0.716	0.353	0.726	0.840	0.790	0.680	0.587	0.439	0.736	1.000
4	0.701	0.488	0.652	0.746	0.864	0.840	0.683	0.580	0.716	0.867
14	0.609	0.218	0.708	0.588	0.829	0.663	0.502	0.893	0.683	0.477

ตารางที่ 81 ค่ารหัสของสตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชั่นที่ 2 (ต่อ)

15	0.332	0.654	0.592	0.825	0.802	0.704	0.592	0.685	0.759	0.808
7	0.665	0.646	0.658	0.811	0.644	0.740	0.627	0.467	0.800	0.867
8	0.522	0.359	0.652	0.670	0.648	0.721	0.537	0.827	0.786	0.667
9	0.676	0.590	0.683	0.334	0.691	0.618	0.622	0.614	0.745	0.000
1.2	0.697	0.590	0.725	0.870	0.800	0.680	0.516	0.309	0.726	1.095
1.6	0.652	0.782	0.772	0.558	0.721	0.649	0.665	0.725	0.670	0.522
13	0.212	0.359	0.652	0.594	0.637	0.677	0.658	0.827	0.792	0.985

ตารางที่ 82 สตริงคำตอบเริ่มต้นของเจเนอเรชั่นที่ 2

String	Priority										Sequence									
	1	10	8	3	9	6	5	4	7	2	A1	A10	A8	A3	A9	A6	A5	A13	A16	A11
3	1	10	8	3	9	6	5	4	7	2	A1	A10	A8	A3	A9	A6	A5	A13	A16	A11
12	7	10	3	6	4	8	5	2	9	1	A16	A10	A3	A6	A13	A8	A5	A11	A9	A1
5	2	10	8	3	9	6	5	4	7	1	A11	A10	A8	A3	A9	A6	A5	A13	A16	A1
6	5	10	9	2	8	3	7	6	4	1	A5	A10	A9	A11	A8	A3	A16	A6	A13	A1
1.1	6	10	3	2	4	8	7	9	5	1	A6	A10	A3	A11	A13	A8	A16	A9	A5	A1
2	5	1	6	9	8	4	3	2	7	10	A5	A1	A6	A9	A8	A13	A3	A11	A16	A10
4	5	1	3	7	9	8	4	2	6	10	A5	A1	A3	A16	A9	A8	A13	A11	A6	A10
14	5	1	8	4	9	6	3	10	7	2	A5	A1	A8	A13	A9	A6	A3	A10	A16	A11
15	1	4	3	10	8	6	2	5	7	9	A1	A13	A3	A10	A8	A6	A11	A5	A16	A9
7	6	4	5	9	3	7	2	1	8	10	A6	A13	A5	A9	A3	A16	A11	A1	A8	A10
8	2	1	5	7	4	8	3	10	9	6	A11	A1	A5	A16	A13	A8	A3	A10	A9	A6
9	7	3	8	2	9	5	6	4	10	1	A16	A3	A8	A11	A9	A5	A6	A13	A10	A1
1.2	8	1	5	9	3	6	7	4	2	10	A8	A1	A5	A9	A3	A6	A16	A13	A11	A10
1.6	8	1	2	7	4	6	9	3	5	10	A8	A1	A11	A16	A13	A6	A9	A3	A5	A10
13	1	2	5	3	4	7	6	9	8	10	A1	A11	A5	A3	A13	A16	A6	A9	A8	A10

### 6.3.5 การหยุดการดำเนินงานของอัลกอริทึม

หยุดการดำเนินงานเมื่อครบจำนวนเจเนอเรชั่นที่กำหนด

## 6.4 การเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึม

การเปรียบเทียบผลการวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นไม่สามารถทำได้ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แต่จะสามารถทำการเปรียบเทียบผลการวิจัยภายในอัลกอริทึมได้ ด้วยเทคนิคการกำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเชิงกลุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นการจัดอันดับของคำตอบแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) เนื่องจากโดยปกติคำตอบที่ดีที่สุดจะเป็นคำตอบที่อยู่บนฟรอนเทียร์ที่ 1 ดังนั้นจึงทำ

การพิจารณาคำตอบที่อยู่บนพรอนเทียร์ถัดไป เพื่อที่จะหาคำตอบค่าอื่นมาใช้ในการเปรียบเทียบ  
ภายในอัลกอริทึมดังนี้

ตารางที่ 83 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากพรอนเทียร์ที่ 1

String	f1	f2	f3	f4	f5
1	1.714691	0.097284	0.101106	1	3
2	1.687002	0.471617	0.259389	1	3
3	1.00193	0.69044	0.379742	3	2
4	1.480488	1.118624	0.615243	2	3
5	1.142616	0.930974	0.512036	3	2
6	0.986199	1.061781	0.58398	2	2
7	0.853434	0.275466	0.151506	2	3
8	1.434367	0.594147	0.326781	2	2
9	1.304132	0.354129	0.194771	2	2
10	1.129387	0.407248	0.223987	1	3
11	1.36625	0.485407	0.266974	3	2
12	0.859369	0.445311	0.244921	3	2
13	1.274379	1.142458	0.628352	2	3
14	1.276943	0.562187	0.309203	3	2
15	0.877357	0.822299	0.452264	2	3

ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์บนพรอนเทียร์ที่ 1 ดีกว่าค่า  
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบถัดไปจากพรอนเทียร์ที่ 1

## บทที่ 7

### การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างวิธีการทดสอบพารามิเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาการจับคู่ที่ยาวบินมากวัตถุประสงค์ของแต่ละอัลกอริทึม โดยใช้ตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม เรียงตามลำดับความสำคัญ ได้แก่ Generational Distance, Inverted Generational Distance, Spread, RNDS1 และ RNDS2

#### 7.1 การทดสอบค่าพารามิเตอร์

งานวิจัยนี้มีหลายข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การทดสอบค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึมให้เหมาะสมกับปัญหาจึงมีความจำเป็นเพื่อให้อัลกอริทึมมีประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยจะทำการทดสอบพารามิเตอร์ของแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึมด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) แบบ General Full Factorial Design โดยแบ่งการทดลองตามจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละอัลกอริทึม ดังนี้ 1) จำนวน 2 พารามิเตอร์ (ได้แก่ MOEA/D NSGAIII และ MODE) แสดงพารามิเตอร์ทั้งหมดของแต่ละอัลกอริทึม (Gisele L. et al.,2010)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์จำนวนประชากร (N) และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการดำเนินงานของแต่ละอัลกอริทึม ซึ่งเป็นค่าที่ถูกรับอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น และถูกปรับใช้ให้เหมาะสมกับวิธีการในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 84 พารามิเตอร์ของอัลกอริทึมในงานวิจัย

Algorithm	Parameter	Value	Reference
MOEA/D	N	131	Based on SLD
	Nb	Experiment	
	NR		
NSGAIII	N	131	Based on LSD
	Pc	Experiment	
	Pm		
MODE	N	131	Based on LSD
	F	Experiment	
	CR		

หมายเหตุ: SLD คือ Simplex Lattice Design

## 7.2 ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับแต่ละอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม Minitab 17 มีดังนี้

1. สร้างตารางการทดลองแบบ General Full Factorial Design โดยกำหนดจำนวนปัจจัยเป็นจำนวนพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่ใช้ทดสอบ ปัจจัยละ 2 ระดับ และกำหนดจำนวนทำซ้ำเท่ากับ 3 รอบ
2. ดำเนินงานอัลกอริทึมตามค่าพารามิเตอร์ที่จำใช้ทำการทดสอบ
3. นำค่าตัวชี้วัดทั้ง 5 ตัวซึ่งได้จากโปรแกรม 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 (  $p\text{-value} < \alpha$  โดยที่  $\alpha = 0.05$  ) จะตัดสินใจยอมรับพารามิเตอร์ที่มีปัจจัยกระทบร่วมชุดนั้นทั้งหมด โดยเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด
- ข. หากปัจจัยร่วมของค่าตัวแปรตอบสนองไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (  $p\text{-value} \geq \alpha$  โดยที่  $\alpha = 0.05$  ) จะตัดสินใจไม่ยอมรับพารามิเตอร์ที่มีปัจจัยกระทบร่วมชุดนั้น และพิจารณาต่อกับปัจจัยหลัก (Main Effect) ในแบบเดียวกัน
- ค. หากทั้งปัจจัยร่วมและปัจจัยหลักของค่าตัวแปรตอบสนองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ให้ทำการพิจารณาค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ถัดไปจนกว่าจะยอมรับ หากไม่มีค่าที่สามารถยอมรับได้ ให้เลือกปัจจัยร่วมที่ใช้เวลาในการดำเนินงาน อัลกอริทึมที่น้อยที่สุด

#### 5. กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

### 7.3 ตัวอย่างการทดสอบค่าพารามิเตอร์และวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยนำเสนอผลการทดสอบ DOE และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งจะแสดงเฉพาะปัญหา S2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของแต่ละอัลกอริทึมดังตารางที่ 85 ตารางที่ 85 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

Algorithm	Parameter (Factor)	Level Factor	
MOEA/D	Nb	10	20
	NR	2	5
NSGAIII	Pc	0.6	0.9
	Pm	0.1	0.4
MODE	F	0.5	1
	CR	0.7	0.9

ทำการคำนวณค่าตัวชี้วัดและนำมาเป็นค่าตัวแปรตอบสนองการทดสอบ เมื่อทดลองค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดกับอัลกอริทึมเรียบร้อยแล้ว แสดงตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

7.3.1 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา S2 ของ MOEA/D  
 ดังแสดงตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา S2 ดังตารางที่ 86

ตารางที่ 86 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MOEA/D ปัญหา S2

Level	Factor	Replicate	Parameter	Time	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
10	2	1	1	1446.45	0.0950	0.0467	1.0497	0.1333	0.0674
20	2	1	2	1552.52	0.0922	0.0786	1.0082	0.1587	0.0562
10	5	1	3	1541.19	0.0543	0.0474	0.9989	0.0260	0.0112
20	5	1	4	1576.78	0.0115	0.0808	1.0048	0.2895	0.0618
10	2	2	1	1445.72	0.0510	0.0342	1.0210	0.0290	0.0112
20	2	2	2	1564.13	0.0471	0.1078	1.0146	0.0139	0.0056
10	5	2	3	1609.66	0.0012	0.0324	1.0629	0.7627	0.5056
20	5	2	4	1633.80	0.0243	0.0773	0.9892	0.0833	0.0225
10	2	3	1	1552.22	0.0405	0.0481	1.0543	0.1404	0.0449
20	2	3	2	1476.14	0.0192	0.0451	1.0323	0.2459	0.0843
10	5	3	3	1547.58	0.0108	0.0292	1.0327	0.3056	0.1236
20	5	3	4	1604.89	0.1242	0.0981	1.0023	0.0238	0.0056

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัดที่มีลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน ซึ่งจะทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance (GD), Inverted Generational Distance (IGD), Spread, RNDS1 และ RNDS2 ตามลำดับ แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังนี้

**MOEA/D: GD versus Nb, NR**

Backward Elimination of Terms

 $\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.000360	0.000360	0.21	0.658
NR	1	0.001173	0.001173	0.69	0.431
Nb*NR	1	0.001234	0.001234	0.72	0.419
Error	8	0.013617	0.001702		
Total	11	0.016383			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0412567	16.89%	0.00%	0.00%

**รูปภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (MOEA/D)**

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance (GD) ของ MOEA/D พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ Inverted Generational Distance (IGD) เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance (IGD) ดังนี้

**MOEA/D: IGD versus Nb, NR**

Backward Elimination of Terms

 $\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.005192	0.005192	16.48	0.004
NR	1	0.000002	0.000002	0.01	0.940
Nb*NR	1	0.000168	0.000168	0.53	0.487
Error	8	0.002520	0.000315		
Total	11	0.007882			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0177498	68.02%	56.03%	28.05%

**รูปภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D)**

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance (IGD) ของ MOEA/D พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมกันที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่มีผลกระทบต่อค่า IGD แต่มีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัย ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้ด้วยการทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย Nb เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลลัพธ์จากโปรแกรมดังนี้

### Comparisons for IGD

#### MOEA/D: Fisher Pairwise Comparisons: Response = IGD, Term = Nb

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb	N	Mean	Grouping
20	6	0.0812807	A
10	6	0.0396783	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 33 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยหลักพบว่า ที่ระดับปัจจัย 10 และ 20 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย Nb = 10 เป็นระดับปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Spread ดังนี้

### MOEA/D: Spread versus Nb, NR

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.002354	0.002354	5.97	0.040
NR	1	0.000664	0.000664	1.68	0.230
Nb*NR	1	0.000067	0.000067	0.17	0.692
Error	8	0.003152	0.000394		
Total	11	0.006237			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0198503	49.46%	30.51%	0.00%

รูปภาพที่ 34 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด Spread ปัญหา S2 (MOEA/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Spread ของ MOEA/D พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมกันที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่มีผลกระทบต่อค่า Spread แต่มีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัย ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้ด้วยการทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย Nb เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลลัพธ์จากโปรแกรมดังนี้

### Comparisons for Spread

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

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Nb	N	Mean	Grouping
10	6	1.03658	A
20	6	1.00857	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 35 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยหลักพบว่า ที่ระดับปัจจัย 10 และ 20 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย Nb = 20 เป็นระดับปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS1 ดังนี้

### MOEA/D: RNDS1 versus Nb, NR

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.02821	0.02821	0.64	0.446
NR	1	0.04937	0.04937	1.13	0.320
Nb*NR	1	0.05515	0.05515	1.26	0.295
Error	8	0.35076	0.04385		
Total	11	0.48348			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.209393	27.45%	0.24%	0.00%

รูปภาพที่ 36 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา S2 (MOEA/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS1 ของ MOEA/D พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ RNDS2 เพื่อหา

ปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS2 ดังนี้

#### MOEA/D: RNDS2 versus Nb, NR

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Nb	1	0.02324	0.02324	1.32	0.284
NR	1	0.01769	0.01769	1.01	0.345
Nb*NR	1	0.02736	0.02736	1.56	0.248
Error	8	0.14077	0.01760		
Total	11	0.20906			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.132649	32.67%	7.42%	0.00%

รูปภาพที่ 37 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา S2 (MOEA/D)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS2 ของ MOEA/D พบว่าไม่มีปัจจัยร่วม และไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ

#### 7.3.2 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา S2 ของ NSGAIII

แสดงตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ NSGAIII ปัญหา S2 ดังตารางที่ 87

ตารางที่ 87 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ NSGAIII ปัญหา S2

Level	Factor	Replicate	Parameter	Time	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
0.6	0.1	1	1	1514.17	0.116070	0.131230	0.85702	0.187500	0.122450
0.9	0.1	1	2	1729.98	0.050796	0.101590	1.01470	0.097561	0.081633
0.6	0.4	1	3	1331.28	0.236110	0.236190	1.07960	0.025641	0.022222
0.9	0.4	1	4	1385.81	0.017315	0.106320	1.02470	0.304350	0.155560
0.6	0.1	2	1	1676.81	0.030668	0.194130	1.00900	0.470590	0.163270
0.9	0.1	2	2	1726.22	0.006641	0.120550	0.98474	0.608700	0.285710
0.6	0.4	2	3	1300.86	0.062831	0.233930	1.05530	0.166670	0.111110
0.9	0.4	2	4	1359.89	0.123510	0.106910	1.02240	0.290320	0.200000
0.6	0.1	3	1	1677.48	0.062087	0.081391	0.97480	0.146340	0.122450
0.9	0.1	3	2	1777.11	0.061289	0.094063	1.06320	0.215690	0.224490
0.6	0.4	3	3	1307.84	0.096244	0.122230	1.04350	0.285710	0.177780
0.9	0.4	3	4	1350.50	0.031461	0.051282	0.94189	0.517240	0.333330

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าไปโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัดที่มีลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน ซึ่งจะทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance (GD), Inverted Generational Distance (IGD), Spread, RNDS1 และ RNDS2 ตามลำดับ แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังนี้

#### NSGAIII: GD versus Pc, Pm

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pc	1	0.000282	0.000282	0.08	0.781
Pm	1	0.008164	0.008164	2.39	0.161
Pc*Pm	1	0.007611	0.007611	2.23	0.174
Error	8	0.027339	0.003417		
Total	11	0.043396			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0584584	37.00%	13.38%	0.00%

รูปภาพที่ 38 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (NSGAIII)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance (GD) ของ NSGAIII พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ Inverted Generational Distance (IGD) เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance (IGD) ดังนี้

#### NSGAIII: IGD versus Pc, Pm

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pc	1	0.000555	0.000555	0.21	0.662
Pm	1	0.014587	0.014587	5.43	0.048
Pc*Pm	1	0.001417	0.001417	0.53	0.488
Error	8	0.021502	0.002688		
Total	11	0.038061			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0518430	43.51%	22.32%	0.00%

รูปภาพที่ 39 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (NSGAIII)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance (IGD) ของ NSGAIII พบว่า ไม่มีปัจจัยร่วมกันที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่มีผลกระทบต่อค่า IGD แต่มีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัย ที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้ด้วยการทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย Pm เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลลัพธ์จากโปรแกรมดังนี้

### Comparisons for IGD

#### NSGAIII: Fisher Pairwise Comparisons: Response = IGD, Term = Pm

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

Pm	N	Mean	Grouping
0.1	6	0.166517	A
0.4	6	0.096786	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 40 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MOEA/D)

จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยหลักพบว่า ที่ระดับปัจจัย 0.1 และ 0.4 อยู่ในกลุ่มที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย Pm = 0.4 เป็นระดับปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Spread

### NSGAIII: Spread versus Pc, Pm

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pc	1	0.000768	0.000768	0.23	0.647
Pm	1	0.000088	0.000088	0.03	0.876
Pc*Pm	1	0.012933	0.012933	3.81	0.087
Error	8	0.027171	0.003396		
Total	11	0.040959			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0582780	33.66%	8.79%	0.00%

รูปภาพที่ 41 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด Spread ปัญหา S2 (NSGAIII)



จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Spread ของ NSGAIII พบว่าไม่มีปัจจัยร่วม และไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ RNDS1 เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS1 ดังนี้

#### NSGAIII: RNDS1 versus Pc, Pm

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pc	1	0.10233	0.10233	4.86	0.059
Pm	1	0.04705	0.04705	2.23	0.173
Pc*Pm	1	0.02478	0.02478	1.18	0.310
Error	8	0.16844	0.02106		
Total	11	0.34261			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.145105	50.83%	32.40%	0.00%

รูปภาพที่ 42 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา S2 (NSGAIII)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS1 ของ NSGAIII พบว่าไม่มีปัจจัยร่วม และไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ RNDS2 เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS2 ดังนี้

#### NSGAIII: RNDS2 versus Pc, Pm

Backward Elimination of Terms

$\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Pc	1	0.006336	0.006336	1.17	0.312
Pm	1	0.026268	0.026268	4.84	0.059
Pc*Pm	1	0.005686	0.005686	1.05	0.336
Error	8	0.043463	0.005433		
Total	11	0.081753			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0737078	46.84%	26.90%	0.00%

รูปภาพที่ 43 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา S2 (NSGAIII)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS2 ของ NSGAIII พบว่าไม่มีปัจจัยร่วม และไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ

### 7.3.3 ตัวอย่างการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลอง ปัญหา S2 ของ MODE

แสดงตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา S2 ดังตารางที่ 88

ตารางที่ 88 ตัวอย่างค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ของ MODE ปัญหา S2

F	CR	Replicate	Parameter	Time	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
0.5	0.7	1	1	1840.62	0.00928	0.02046	1.1421	0.17692	0.10748
1	0.7	1	2	1875.03	0.01826	0.01982	1.1341	0.4	0.18692
0.5	0.9	1	3	1933.95	0.02679	0.03125	1.1705	0.1374	0.08411
1	0.9	1	4	1931.28	0.00559	0.02046	1.1533	0.40206	0.18224
0.5	0.7	2	1	1903	0.03580	0.02521	1.2151	0.09434	0.04672
1	0.7	2	2	1917.96	0.02592	0.01798	1.093	0.04838	0.02803
0.5	0.9	2	3	1962.82	0.03308	0.02701	1.2111	0.07633	0.04672
1	0.9	2	4	1953.21	0.01828	0.02243	1.1198	0.06106	0.03738
0.5	0.7	3	1	1918.56	0.04334	0.02139	1.1183	0.04580	0.02803
1	0.7	3	2	1933.17	0.02750	0.04082	1.1944	0.05454	0.02803
0.5	0.9	3	3	1935.37	0.03682	0.01446	1.1684	0.16031	0.09813
1	0.9	3	4	1952.20	0.00462	0.03056	1.0011	0.23529	0.13084

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นำผลลัพธ์ตัวชี้วัดเข้าโปรแกรม Minitab 17 เพื่อทำการทดสอบสมมติฐาน โดยเริ่มจากตัวชี้วัดที่มีลำดับความสำคัญสูงสุดก่อน ซึ่งจะทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance (GD), Inverted Generational Distance (IGD), Spread, RNDS1 และ RNDS2 ตามลำดับ แสดงผลการทดสอบสมมติฐานดังนี้

**MODE: GD versus F, CR****Backward Elimination of Terms**

$\alpha$  to remove = 0.05

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

**Factor Information**

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

**Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
F	1	0.000601	0.000601	5.62	0.045
CR	1	0.000102	0.000102	0.95	0.358
F*CR	1	0.000221	0.000221	2.06	0.189
Error	8	0.000856	0.000107		
Total	11	0.001780			

**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0103459	51.89%	33.85%	0.00%

รูปภาพที่ 44 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (MODE) จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Generational Distance (GD) ของ MODE พบว่า 'ไม่มีปัจจัยร่วมกันที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่มีผลกระทบต่อค่า GD แต่มีปัจจัยหลักเพียง 1 ปัจจัย ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ข) ของขั้นตอนการทดสอบ ทำให้สามารถสรุปผลได้ด้วยการทำ Comparisons test เฉพาะปัจจัย F เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลลัพธ์จากโปรแกรมดังนี้

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

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

F	N	Mean	Grouping
0.5	6	0.0308546	A
1.0	6	0.0166979	B

Means that do not share a letter are significantly different.

รูปภาพที่ 45 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด GD ปัญหา S2 (MODE) จากการเปรียบเทียบค่าปัจจัยหลักพบว่า ที่ระดับปัจจัย 0.5 และ 1.0 อยู่ในกลุ่มที่แตกต่างกัน โดย F=1.0 เป็นระดับปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Inverted Generational Distance (IGD) ดังนี้

**MODE: IGD versus F, CR**

Backward Elimination of Terms

 $\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
F	1	0.000013	0.000013	0.18	0.679
CR	1	0.000000	0.000000	0.00	0.987
F*CR	1	0.000010	0.000010	0.14	0.715
Error	8	0.000544	0.000068		
Total	11	0.000567			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0082488	3.94%	0.00%	0.00%

รูปภาพที่ 46 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด IGD ปัญหา S2 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด IGD ของ MODE พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ Spread เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Spread ดังนี้

**MODE: Spread versus F, CR**

Backward Elimination of Terms

 $\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
F	1	0.009064	0.009064	2.99	0.122
CR	1	0.000442	0.000442	0.15	0.713
F*CR	1	0.004100	0.004100	1.35	0.278
Error	8	0.024242	0.003030		
Total	11	0.037847			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0550476	35.95%	11.93%	0.00%

รูปภาพที่ 47 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด Spread ปัญหา S2 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด Spread ของ MODE พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ RNDS1 เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS1 ดังนี้

**MODE: RNDS1 versus F, CR**

Backward Elimination of Terms

 $\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
F	1	0.021696	0.021696	1.14	0.316
CR	1	0.005312	0.005312	0.28	0.611
F*CR	1	0.001599	0.001599	0.08	0.779
Error	8	0.151707	0.018963		
Total	11	0.180313			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.137708	15.86%	0.00%	0.00%

## รูปภาพที่ 48 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด RNDS1 ปัญหา S2 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS1 ของ MODE พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์ตัวชี้วัดถัดไป ซึ่งคือ RNDS2 เพื่อหาปัจจัยหลักที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุด แสดงผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS2 ดังนี้

**General Linear Model: RNDS2 versus F, CR**

Backward Elimination of Terms

 $\alpha$  to remove = 0.05

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

Factor Information

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

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
F	1	0.002768	0.002768	0.68	0.433
CR	1	0.001981	0.001981	0.49	0.505
F*CR	1	0.000307	0.000307	0.08	0.790
Error	8	0.032478	0.004060		
Total	11	0.037535			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0637164	13.47%	0.00%	0.00%

## รูปภาพที่ 49 ผลการทำ Comparisons test ของตัวชี้วัด RNDS2 ปัญหา S2 (MODE)

จากผลการทดสอบสมมติฐานของตัวชี้วัด RNDS2 ของ MODE พบว่าไม่มีปัจจัยร่วมและไม่มีปัจจัยหลักที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ค่าความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงกับกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ

#### 7.4 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์

ผลสรุปการทดสอบค่าตัวแปรตอบสนองของแต่ละปัญหาในรูปแบบของตาราง แสดงสัญลักษณ์ ดังนี้

เมื่อ  คือ แต่ละระดับปัจจัยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

- คือ ไม่มีการวิเคราะห์ปัจจัยนั้นๆ เนื่องจากได้ผลการวิเคราะห์แล้ว

ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นๆ ที่ได้จากการสรุปผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนองนั้นๆ (ระดับปัจจัยของปัจจัยหลักมีนัยสำคัญ)

ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นๆ ที่ได้จากการสรุปผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนองนั้นๆ (ระดับปัจจัยของปัจจัยร่วมมีนัยสำคัญ)

ตัวเลข คือ ค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยนั้นๆ ถูกนำมาประเมินใหม่ เนื่องจากเกิดปัจจัยร่วมของตัวแปรตอบสนองอื่นๆ โดยที่ค่าพารามิเตอร์เดิมจะถูกนำมาพิจารณาในการหาค่าระดับปัจจัยของปัจจัยร่วมใหม่

ตัวเลข<sup>A</sup> คือ ค่าพารามิเตอร์ ซึ่งได้จากการสรุปผลการวิเคราะห์ของปัจจัยร่วมกลุ่มที่ A ของตัวแปรตอบสนองนั้นๆ

แสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนองของแต่ละปัญหา ดังตารางที่ 89 ถึง 66 (หากเป็น  ทั้งหมดให้เลือกค่าพารามิเตอร์ตามกรณีข้อ 4(ค) ของขั้นตอนการทดสอบ)

ตารางที่ 89 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S1, S2, S3 และ S4

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
S1	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x

ตารางที่ 90 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา S1, S2, S3 และ S4 (ต่อ)

S2	MOEA/D	Nb	x	40	20	-	-
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	0.4	-	-	-
	MODE	F	1	-	-	-	-
		CR	x	x	x	x	x
S3	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	0.9	-	-	-
		Pm	x	0.1	-	-	-
	MODE	F	4	1	-	-	-
		CR	x	0.9	-	-	-
S4	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		NR	x	x	2	-	-
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	0.6
		Pm	x	x	x	x	0.1
	MODE	F	4	1	-	-	-
		CR	0.9	0.9	-	-	-

ตารางที่ 91 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M1, M2, M3 และ M4

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
M1	MOEA/D	Nb	10	-	-	-	-
		NR	5	-	-	-	-
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	4	1	-	-	-
		CR	0.9	0.9	-	-	-

ตารางที่ 92 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา M1, M2, M3 และ M4 (ต่อ)

M2	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		NR	x	2	-	-	-
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	4	1	-	-	-
		CR	0.9	0.9	-	-	-
M3	MOEA/D	Nb	10	-	-	-	-
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	4	1	-	-	-
		CR	0.9	0.9	-	-	-
M4	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	4	1	-	-	-
		CR	x	0.9	-	-	-

ตารางที่ 93 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L1 และ L4

Problem	Algorithm	Parameter	GD	IGD	Spread	RNDS1	RNDS2
L1	MOEA/D	Nb	x	10	-	-	-
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	1	-	-	-	-
		CR	0.9	-	-	-	-



ตารางที่ 94 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าตัวแปรตอบสนอง ปัญหา L1 และ L4 (ต่อ)

L2	MOEA/D	Nb	x	x	x	x	x
		NR	x	x	x	x	x
	NSGAIII	Pc	x	x	x	x	x
		Pm	x	x	x	x	x
	MODE	F	x	x	x	x	x
		CR	x	x	x	x	x

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตัวแปรตอบสนอง (ตัวชี้วัด) ด้วยโปรแกรม Minitab 17 เพื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึม นั้นๆ แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 95

ตารางที่ 95 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

Flight	Pair of flight	Problem Size	Set	MOEA/D		NSGAIII		MODE	
				Nb	NR	Pc	Pm	F	CR
20	10	Small	S1	10	5	0.9	0.4	1	0.9
40	20		S2	10	5	0.6	0.1	1	0.9
60	30		S3	20	2	0.9	0.1	1	0.9
80	40		S4	10	2	0.6	0.1	1	0.9
100	50	Medium	M1	10	5	0.6	0.1	1	0.9
120	60		M2	10	2	0.6	0.1	1	0.9
140	70		M3	10	2	0.6	0.4	1	0.9
152	76		M4	10	2	0.9	0.1	1	0.9
200	100	Large	L1	10	2	0.9	0.1	1	0.9
282	141		L2	10	2	0.6	0.4	1	0.9

## บทที่ 8

### การเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

ในบทนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมด้วยค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง โดยมีอัลกอริทึมที่นำมาเปรียบเทียบทั้งหมด 3 อัลกอริทึม ได้แก่ MOEA/D NSGAIII และ MODE ซึ่งนำมาใช้แก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินมากวัตถุประสงค์ จำนวนทั้งสิ้น 10 ปัญหา โดยแบ่งเป็นปัญหขนาดเล็ก ปัญหขนาดกลาง อย่างละ 4 ปัญหา และปัญหขนาดใหญ 2 ปัญหา โดยใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม

#### 8.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม

การดำเนินการของแต่ละอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินมากวัตถุประสงค์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการแก้ปัญหาทั้ง 10 ปัญหาด้วยวิธีการของแต่ละอัลกอริทึม โดยกำหนดจำนวนทำซ้ำ 3 รอบ และจำนวนเงื่อนไขในการพัฒนาคำตอบ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละอัลกอริทึม จำนวน 2000 รอบ
2. เมื่อได้คำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว ให้นำคำตอบทั้งหมดมากำหนดค่าความแข็งแรงด้วยวิธีเรียงกลุ่มที่ดีที่สุด (Non-dominated Sorting) และคัดเลือกเฉพาะคำตอบที่ดีที่สุด (ค่าความแข็งแรง เท่ากับ 1) มาเป็นกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Approximated True-Pareto Frontier)
3. คำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะของแต่ละอัลกอริทึม ด้วยคำตอบที่หาได้ของแต่ละอัลกอริทึมกับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
4. เมื่อได้ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะในแต่ละด้านของแต่ละอัลกอริทึมแล้ว ให้นำตัวชี้วัดในด้านเดียวกันมาเปรียบเทียบทางสถิติ โดยงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 4 อัลกอริทึม จึงใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิธีฟิชเชอร์แพร์ไวส์ (Fisher pairwise comparisons test) ในการทดสอบความแตกต่างของค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้โปรแกรม MATLAB R2019a ในการแก้ปัญหาด้วยอัลกอริทึม MOEA/D NSGA3 และ MODE บนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @

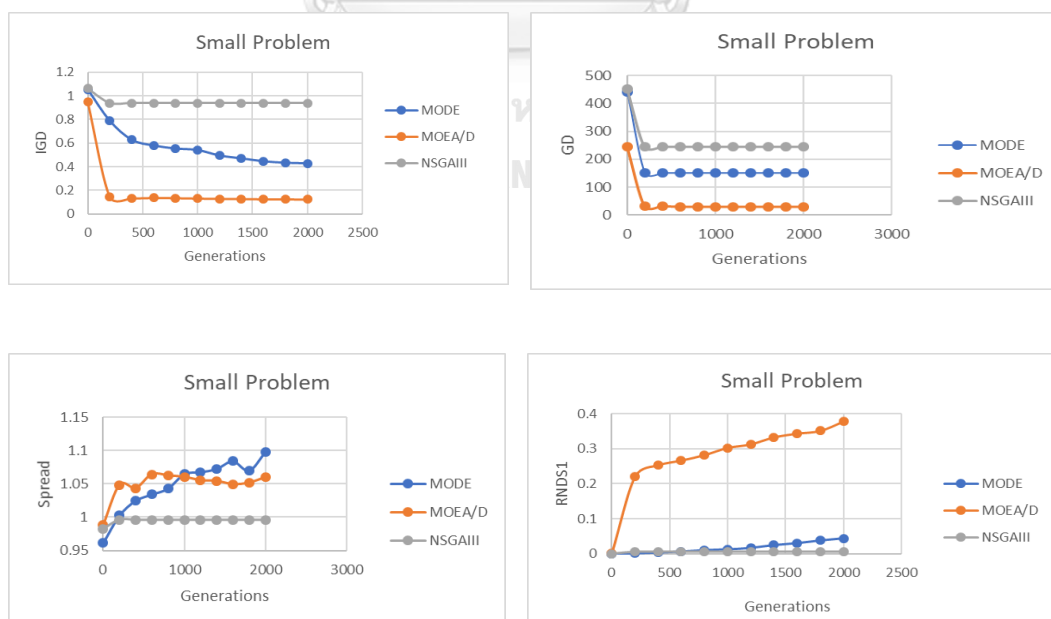
1.80 GHz 1.99 GHz Ram 8 GB Window10 64-bit operating system, x64-based processor

## 8.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม

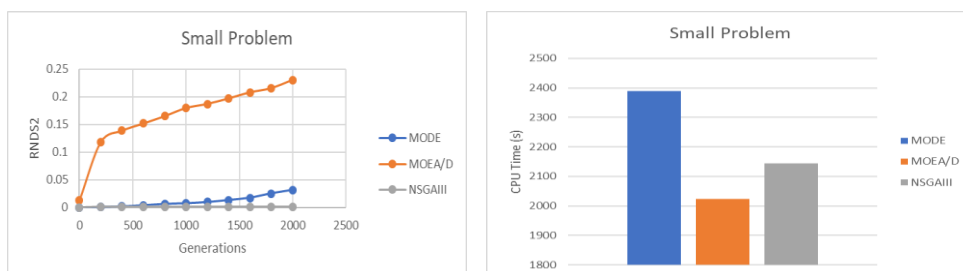
การเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมจากผลการดำเนินงานในการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินแบบมากวัตถุประสงค์ ปัญหา S1 ถึง L2 ด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม 6 ตัว ดังนี้ 1. การลู่เข้าของคำตอบ (Generational Distance: GD) 2. การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance: IGD) 3. การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread) 4. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I) 5. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II) 6. เวลาในการดำเนินงาน (Computational Time)

### 8.2.1 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาเล็ก

ผลการเปรียบเทียบนี้จะแสดงให้เห็นทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ดังภาพที่ 50 และตารางที่ 96 ตามลำดับ



รูปภาพที่ 50 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก



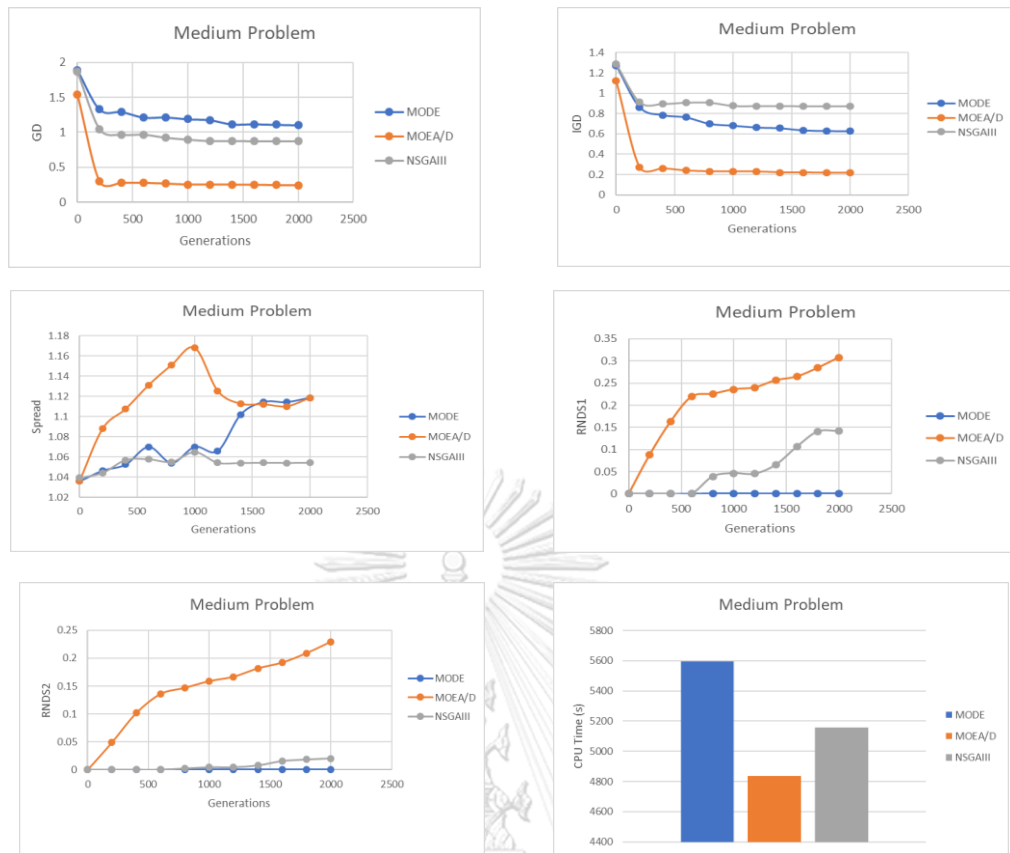
รูปภาพที่ 50 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดเล็ก (ต่อ)  
ตารางที่ 96 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ภาพรวมปัญหา  
ขนาดเล็ก

Problem	Metrics	MOEA/D	NSGAIII	MODE
Small	GD	0.104534	0.427209	0.371693
	IGD	0.205033	0.949965	0.582938
	Spread	1.048873	<b>0.994734</b>	1.047567
	RNSD1	0.276605	0.004941	0.016852
	RNSD2	0.163975	0.000748	0.010504
	CPU Time(s)	2023.11	2143.335	2388.469

จากรูปภาพที่ 50 และตารางที่ 67 จะเห็นได้ว่า MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายของคำตอบที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD แต่ NSGAIII จะดีกว่าในด้านการกระจายตัวของคำตอบ ส่วนด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ และอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ MOEA/D ให้ค่าที่ดีกว่า นอกจากนี้ MOEA/D ยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เร็วที่สุด

### 8.2.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหากลาง

ผลการเปรียบเทียบนี้จะแสดงให้เห็นทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ดังภาพที่ 51 และตารางที่ 97 ตามลำดับ



รูปภาพที่ 51 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง

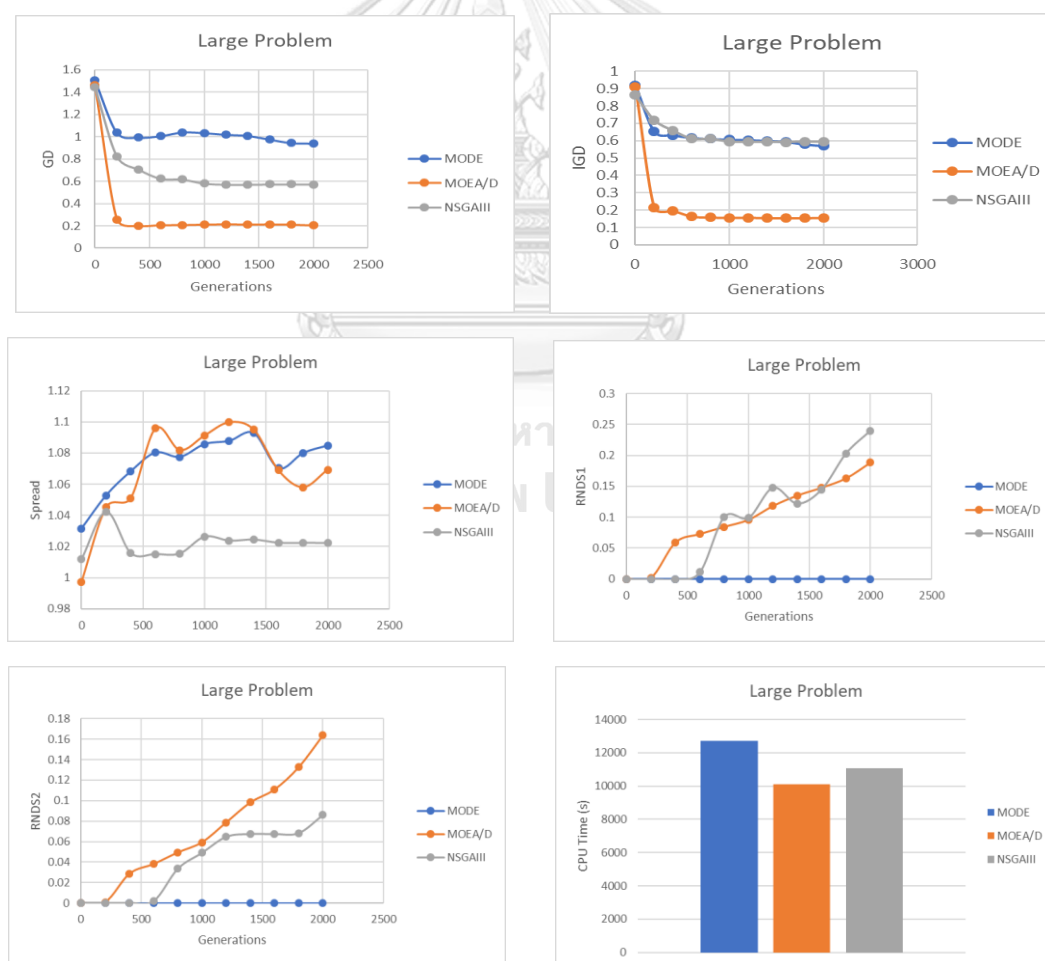
ตารางที่ 97 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ภาพรวมปัญหาขนาดกลาง

Problem	Metrics	MOEA/D	NSGAIII	MODE
Medium	GD	0.377282	1.005173	1.250192
	IGD	0.314134	0.923187	0.752495
	Spread	1.114635	1.053514	1.076764
	RNSD1	0.207796	0.053192	0.000428
	RNSD2	0.142793	0.006611	0.000269
	CPU Time(s)	4836.551	5157.804	5594.339

จากภาพที่ 51 และตารางที่ 97 จะเห็นได้ว่า MOEA/D มีการลู่เข้าของค่าตอบและความหลากหลายของคำตอบที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD แต่ NSGAIII จะดีกว่าในด้านการกระจายตัวของคำตอบ ส่วนอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ และอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ MOEA/D ให้ค่าที่ดีกว่า นอกจากนี้ MOEA/D ยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เร็วที่สุด

### 8.2.3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาใหญ่

ผลการเปรียบเทียบนี้จะแสดงให้เห็นทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมในแต่ละเจนเนอเรชันและค่าเฉลี่ยผลลัพธ์ตัวชี้วัดสมรรถนะหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ดังภาพที่ 52 และตารางที่ 98 ตามลำดับ



รูปภาพที่ 52 ทิศทางของค่าเฉลี่ยแต่ละตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึม ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่

ตารางที่ 98 ค่าตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ภาพรวมปัญหาขนาดใหญ่

Problem	Metrics	MOEA/D	NSGAIII	MODE
Large	GD	0.327	0.697	1.046
	IGD	0.234	0.638	0.635
	Spread	1.069	1.022	1.074
	RNSD1	0.097	0.097	0.000
	RNSD2	0.069	0.040	0.000
	CPU Time(s)	10097	11069	12731

จากภาพที่ 52 และตารางที่ 98 จะเห็นได้ว่า MOEA/D มีการลู่เข้าของคำตอบและความหลากหลายของคำตอบที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE อย่างชัดเจน สามารถดูได้จากกราฟ GD และ IGD แต่ NSGAIII จะดีกว่าในด้านการกระจายตัวของคำตอบ ส่วนด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ MOEA/D และ NSGAIII ให้ค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดที่ไม่แตกต่างกัน ในด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ MOEA/D ให้ค่าที่ดีกว่า นอกจากนี้ MOEA/D ยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เร็วที่สุด

### 8.3 สรุปผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึม

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะทั้ง 3 อัลกอริทึม ได้แก่ MOEA/D NSGAIII และ MODE ที่นำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินแบบมากวัตถุประสงค์ของสายการบินราคาประหยัด ทั้ง 10 ปัญหา พบว่า MOEA/D มีสมรรถนะด้านการลู่เข้าของคำตอบ (GD) ด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNSD I) ด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (RNSD II) และด้านเวลาในการดำเนินงาน (CPU Time) ที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE ในปัญหาขนาดเล็กและกลาง แต่ MOEA/D มีสมรรถนะด้านอัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (RNSD I) พอกับ NSGAIII ในปัญหาขนาดใหญ่ ดังนั้น MOEA/D มีสมรรถนะที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE ในทุกๆ ด้าน ทั้งปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

แสดงค่าเฉลี่ยตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังจบการดำเนินงาน 2000 รอบ ของทั้ง 10 ปัญหาและสรุปผลเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมแบบภาพรวม ดังตารางที่ 99

ตารางที่ 99 สรุปผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดสมรรถนะอัลกอริทึมหลังการดำเนินงาน 2000 รอบ

Algorithm	Parameter Set									
	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4	L1	L2
Generational Distance (GD)										
MOEA/D	0	0.122	0.101	0.193	0.352	0.568	0.205	0.384	0.291	0.362
NSGAIII	0.24	0.185	0.432	0.855	1.005	0.635	1.307	1.074	0.963	0.43
MODE	0.29	0.082	0.393	0.723	1.188	1.311	1.177	1.325	1.022	1.07
Inverted Generational Distance (IGD)										
MOEA/D	0.26	0.167	0.169	0.227	0.23	0.553	0.184	0.289	0.219	0.249
NSGAIII	0.76	0.248	1.46	1.332	0.805	1.103	0.934	0.851	0.761	0.515
MODE	0.67	0.094	0.597	0.974	0.484	1.111	0.716	0.698	0.619	0.652
Spread										
MOEA/D	NaN	1.035	1.087	1.024	1.157	1.051	1.127	1.123	1.112	1.025
NSGAIII	NaN	0.968	1.004	1.012	1.009	1.024	1.064	1.116	1.020	1.024
MODE	NaN	1.048	1.054	1.041	1.108	1.027	1.11	1.062	1.100	1.048
RNDS1										
MOEA/D	0.33	0.243	0.271	0.261	0.263	0.24	0.229	0.098	0.145	0.049
NSGAIII	0	0.02	0	0	0	0.099	0.057	0.057	0.068	0.126
MODE	0	0.067	0	0	0	0	0.002	0	0.000	0
RNDS2										
MOEA/D	0.28	0.089	0.115	0.175	0.181	0.177	0.123	0.09	0.095	0.043
NSGAIII	0	0.003	0	0	0	0.006	0.017	0.004	0.016	0.064
MODE	0	0.042	0	0	0	0	0.001	0	0.000	0
CPU Time										
MOEA/D	894	1490	2593	3115	4033	4150	5706	5457	9205	10990
NSGAIII	996	1650	2694	3234	4475	4490	6145	5522	11022	11116
MODE	1124	1895	2823	3711	4603	5191	6183	6400	13935	11527



นอกจากนี้โดยภาพรวม MOEA/D ยังให้คำตอบที่เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE ในปัญหาขนาดเล็ก แต่สำหรับปัญหขนาดกลาง NSGAIII และ MODE ให้คำตอบที่เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่า MOEA/D ในบางวัตถุประสงค์ ส่วนในปัญหาขนาดใหญ่ MOEA/D และ NSGAIII ให้คำตอบที่เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีพอกันและดีกว่า MODE

สรุปผลการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละอัลกอริทึมหลังการดำเนินงาน 2000 รอบดังตารางที่ 100

ตารางที่ 100 สรุปผลการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละอัลกอริทึมหลังการดำเนินงาน 2000 รอบ

Problem	Objective									
	S1	S2	S3	S4	M1	M2	M3	M4	L1	L2
<b>Idle Time</b>										
Optimal Solution	0.988904	2.760321	3.071379	4.592944	1.916693	9.33175	14.21426	14.74201	17.6888	24.90741
MOEA/D	<b>0.988904</b>	<b>2.760321</b>	<b>3.071379</b>	4.817512	<b>1.916693</b>	12.6732	17.03387	17.03487	<b>17.6888</b>	<b>24.90741</b>
NSGAIII	1.394671	4.460067	5.060139	7.878834	11.23197	15.5831	17.48564	18.7015	24.68663	33.81356
MODE	1.473004	3.179533	3.52199	<b>4.592944</b>	7.060105	<b>9.33175</b>	<b>14.21426</b>	<b>14.74201</b>	21.13728	37.67415
<b>Workload Balance</b>										
Optimal Solution	0.02297	0.053569	0.076922	0.096465	0.125329	0.144992	0.163436	0.180697	0.235164	0.312609
MOEA/D	<b>0.02297</b>	0.057667	<b>0.076922</b>	<b>0.096465</b>	<b>0.125329</b>	<b>0.144992</b>	<b>0.163436</b>	0.180794	0.258557	0.352232
NSGAIII	0.032682	0.054689	0.091598	0.116968	0.134226	0.151668	0.167087	<b>0.180697</b>	<b>0.235164</b>	<b>0.312609</b>
MODE	0.030945	<b>0.053569</b>	0.085316	0.110746	0.138881	0.165481	0.186201	0.21149	0.285207	0.39633
<b>Repeat flight leg</b>										
Optimal Solution	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
MOEA/D	1	1	1	<b>0</b>	0	1	1	1	0	0
NSGAIII	1	1	1	1	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0
MODE	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1
<b>Difference of nautical mile</b>										
Optimal Solution	0.023806	0.05573	0.079761	0.099943	0.130058	0.150084	0.168803	0.186864	0.244143	0.323672
MOEA/D	<b>0.023806</b>	0.060445	<b>0.079761</b>	<b>0.099943</b>	<b>0.130058</b>	<b>0.150084</b>	<b>0.168803</b>	<b>0.186864</b>	0.267482	0.363538
NSGAIII	0.034514	0.056727	0.09522	0.12158	0.139478	0.15759	0.173439	0.18739	<b>0.244143</b>	<b>0.323672</b>
MODE	0.029494	<b>0.05573</b>	0.088812	0.115126	0.144194	0.171656	0.192842	0.219252	0.295587	0.40979
<b>No.of crew pairing</b>										
Optimal Solution	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15
MOEA/D	<b>1</b>	3	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	7	8	11	<b>15</b>
NSGAIII	1	2	4	5	6	6	7	8	<b>10</b>	16
MODE	1	2	4	5	6	7	8	9	12	17

## บทที่ 9

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยบทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 9.1 บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาวิธีการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ ที่มีความยุ่งยาก สลับซับซ้อน และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ยาวนาน จึงถูกจัดเป็นปัญหาประเภทเอ็นพีฮาร์ด (Non-deterministic Polynomial Hard: NP-Hard) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอวิธีการทางฮิวริสติก (Heuristic) เมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristic) มาแก้ปัญหา เพื่อให้ได้คำตอบที่ยอมรับได้และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่สั้นลง โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ทั้งสิ้นจำนวน 5 วัตถุประสงค์ ได้แก่ เวลาว่างระหว่างเที่ยวบินน้อยที่สุด ปรับดุลภาระงานให้เท่าเทียมกัน เส้นทางการบินสั้นน้อยที่สุด ระยะทางการบินแตกต่างกันน้อยที่สุด จำนวนคูนักบินน้อยที่สุด ดังนั้นปัญหานี้จึงจัดเป็นปัญหาแบบมากวัตถุประสงค์ (Many-Objective Optimization Problems: MaOPs) ส่งผลให้วิธีการเชิงวิวัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ (A Multi-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) มีประสิทธิภาพลดลงในการแก้ปัญหาและค้นหาคำตอบ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MOEAs) ลดลง ดังนั้นจึงนำวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบมากวัตถุประสงค์ (A Many-Objective Evolutionary Algorithms: MaOEAs) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาประเภทนี้ โดยมีแนวคิดในการแบ่งปัญหาหลักออกเป็นปัญหาย่อยๆ หลายปัญหา ด้วยการถ่วงค่าน้ำหนักให้แต่ละวัตถุประสงค์ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการดำเนินงานค้นหาคำตอบสั้นลง

จากการนำ MOEA/D NSGAIII และ MODE มาใช้ในการแก้ปัญหาการจับคู่เที่ยวบินของสายการบินราคาประหยัดแบบมากวัตถุประสงค์ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะอัลกอริทึมทั้ง 6 ด้าน ได้แก่ 1. การลู่เข้าของคำตอบ (Generational Distance: GD) 2. การลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance: IGD) 3. การกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่หาได้ (Spread) 4. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่อัลกอริทึมหาได้ (Ratio of Non-Dominated Solution I) 5. อัตราส่วนของจำนวนคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำเทียบกับจำนวนคำตอบที่แท้จริง (Ratio of Non-Dominated Solution II) 6. เวลาในการดำเนินงาน

(Computational Time) พบว่า MOEA/D มีสมรรถนะที่ดีกว่า NSGAIII และ MODE ในทุกๆ ด้าน ทั้งปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่

## 9.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะมีการพิจารณาเลือกวัตถุประสงค์ให้เหมาะกับแต่ละสายการบิน
2. ข้อกำหนด เงื่อนไขหรือสมมติฐานยังไม่ครอบคลุมปัญหาทั้งหมดที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมการบินในปัจจุบัน จึงอาจจะต้องมีการนำปัญหาด้านนโยบายในแต่ละบริษัทสายการบินมาพิจารณาร่วมด้วย
3. ในแต่ละปัญหาและแต่ละอัลกอริทึม ควรทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสม เพื่อให้ได้คำตอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด
4. ในการทดสอบพารามิเตอร์ ควรทดสอบจำนวนทำซ้ำอย่างเหมาะสม เพื่อลดความผิดพลาด
5. เนื่องจากอัลกอริทึมที่ใช้ในการวิจัย เป็นอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาจำนวนมาก วัตถุประสงค์ ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าอัลกอริทึมใดดีกว่ากัน
6. งานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยในลักษณะ Travelling Salesman Problem (TSP) ซึ่ง MOEA/D ให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ NSGAIII และ MODE ดังนั้นจึงควรนำ MODE ไปทดลองแก้ปัญหามาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นที่ใช้ในปัจจุบัน
7. เนื่องจากผลการวิจัย พบว่า NSGAIII ให้คำตอบที่ดีในด้านการกระจายตัวของคำตอบ (Spread) และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบไม่นานถัดจาก MOEA/D ดังนั้นจึงควรนำ NSGAIII ไปทดลองปรับปรุงพัฒนาเป็นอัลกอริทึมใหม่ต่อไป

## ภาคผนวก

ตารางที่ 101 ข้อมูลนำเข้า

Code1	CodeNo1	CodeNo2	Type	Note	Flight No.	From	To	Mile	Departure	FT	Arrival
A	1	1	Go	A1	DD8714	DMK	CEI	420	7.33	1.33	8.67
A	1	2	Go	A2	WE 130	DMK	CEI	420	8.58	1.41	9.99
A	1	3	Go	A3	WE 130	DMK	CEI	420	8.75	1.50	10.25
A	1	4	Go	A4	WE 132	DMK	CEI	420	11.08	1.33	12.41
A	1	5	Go	A5	DD8718	DMK	CEI	420	13.33	1.33	14.67
A	1	6	Go	A6	WE 134	DMK	CEI	420	15.08	1.33	16.41
A	1	7	Go	A7	DD8722	DMK	CEI	420	16.91	1.33	18.24
A	1	8	Go	A8	WE 136	DMK	CEI	420	18.75	1.41	20.16
A	1	9	Go	A9	WE 136	DMK	CEI	420	19.08	1.5	20.58
A	1	10	Return	A10	DD8715	CEI	DMK	420	9.33	1.25	10.58
A	1	11	Return	A11	WE 131	CEI	DMK	420	10.58	1.33	11.91
A	1	12	Return	A12	WE 131	CEI	DMK	420	10.83	1.41	12.24
A	1	13	Return	A13	WE 133	CEI	DMK	420	12.91	1.33	14.24
A	1	14	Return	A14	DD8719	CEI	DMK	420	15.17	1.25	16.42
A	1	15	Return	A15	WE 135	CEI	DMK	420	17.17	1.33	18.50
A	1	16	Return	A16	DD8723	CEI	DMK	420	18.75	1.33	20.08
A	1	17	Return	A17	WE 137	CEI	DMK	420	20.67	1.33	22.00
A	1	18	Return	A18	WE 137	CEI	DMK	420	21.33	1.33	22.66
B	2	1	Go	B1	DD8302	DMK	CNX	353	7.00	1.17	8.17
B	2	2	Go	B2	WE 168	DMK	CNX	353	7.10	1.25	8.35
B	2	3	Go	B3	WE 168	DMK	CNX	353	7.20	1.33	8.53
B	2	4	Go	B4	DD8306	DMK	CNX	353	9.08	1.2	10.25
B	2	5	Go	B5	WE 160	DMK	CNX	353	10.33	1.25	11.58
B	2	6	Go	B6	WE 160	DMK	CNX	353	10.58	1.25	11.83
B	2	7	Go	B7	DD8308	DMK	CNX	353	11.17	1.17	12.34
B	2	8	Go	B8	DD8312	DMK	CNX	353	12.67	1.17	13.83
B	2	9	Go	B9	DD8316	DMK	CNX	353	14.41	1.17	15.58
B	2	10	Go	B10	WE 164	DMK	CNX	353	15.67	1.25	16.92
B	2	11	Go	B11	DD8318	DMK	CNX	353	16.50	1.17	17.67
B	2	12	Go	B12	DD8318	DMK	CNX	353	17.00	1.17	18.17
B	2	13	Go	B13	DD8324	DMK	CNX	353	19.00	1.17	20.17
B	2	14	Go	B14	DD8324	DMK	CNX	353	19.33	1.17	20.50
B	2	15	Go	B15	DD8324	DMK	CNX	353	19.41	1.17	20.58
B	2	16	Go	B16	WE 166	DMK	CNX	353	19.83	1.25	21.08
B	2	17	Go	B17	WE 166	DMK	CNX	353	19.91	1.25	21.16
B	2	18	Go	B18	DD8326	DMK	CNX	353	20.25	1.17	21.42
B	2	19	Go	B19	DD8326	DMK	CNX	353	20.33	1.17	21.50
B	2	20	Go	B20	DD8326	DMK	CNX	353	20.50	1.17	21.67

B	2	21	Go	B21	WE 176	DMK	CNX	353	21.10	1.25	22.35
B	2	22	Go	B22	WE 176	DMK	CNX	353	21.20	1.17	22.37
B	2	23	Return	B23	WE 177	CNX	DMK	353	8.67	1.25	9.92
B	2	24	Return	B24	WE 177	CNX	DMK	353	8.91	1.33	10.24
B	2	25	Return	B25	DD8303	CNX	DMK	353	9.17	1.00	10.17
B	2	26	Return	B26	DD8307	CNX	DMK	353	10.75	1.17	11.92
B	2	27	Return	B27	WE 161	CNX	DMK	353	12.17	1.25	13.42
B	2	28	Return	B28	DD8313	CNX	DMK	353	12.33	1.17	13.50
B	2	29	Return	B29	WE 169	CNX	DMK	353	12.91	1.25	14.16
B	2	30	Return	B30	WE 169	CNX	DMK	353	14.41	1.25	15.66
B	2	31	Return	B31	DD8317	CNX	DMK	353	16.17	1.17	17.34
B	2	32	Return	B32	SIM8301	CNX	DMK	353	17.50	1.25	18.75
B	2	33	Return	B33	SIM8302	CNX	DMK	353	18.17	1.25	19.42
B	2	34	Return	B34	DD8319	CNX	DMK	353	18.67	1.17	19.84
B	2	35	Return	B35	DD8309	CNX	DMK	353	20.75	1.25	22.00
B	2	36	Return	B36	DD8325	CNX	DMK	353	21.08	1.08	22.16
B	2	37	Return	B37	DD8325	CNX	DMK	353	21.17	1.17	22.34
B	2	38	Return	B38	DD8325	CNX	DMK	353	21.58	1.17	22.75
B	2	39	Return	B39	SIM8303	CNX	DMK	353	21.83	1.25	23.08
B	2	40	Return	B40	SIM8304	CNX	DMK	353	22.00	1.08	23.08
B	2	41	Return	B41	DD8327	CNX	DMK	353	22.08	1.08	23.16
B	2	42	Return	B42	DD8327	CNX	DMK	353	22.17	1.17	23.34
B	2	43	Return	B43	SIM8305	CNX	DMK	353	22.91	1.25	24.16
B	2	44	Return	B44	DD8327	CNX	DMK	353	23.00	1.17	24.17
C	3	1	Go	C1	DD8818	DMK	NNT	310	8.75	1.17	9.92
C	3	2	Go	C2	DD8818	DMK	NNT	310	9.00	1.17	10.17
C	3	3	Go	C3	DD8824	DMK	NNT	310	12.17	1.58	13.75
C	3	4	Go	C4	DD8826	DMK	NNT	338	17.00	1.33	18.33
C	3	5	Go	C5	DD8826	DMK	NNT	338	17.30	1.17	18.47
C	3	6	Go	C6	DD8826	DMK	NNT	338	17.91	1.33	19.24
C	3	7	Return	C7	DD8819	NNT	DMK	338	10.58	1.17	11.75
C	3	8	Return	C8	DD8819	NNT	DMK	338	10.83	1.17	12.00
C	3	9	Return	C9	DD8825	NNT	DMK	310	14.25	1.58	15.83
C	3	10	Return	C10	DD8827	NNT	DMK	338	18.83	1.33	20.16
C	3	11	Return	C11	DD8827	NNT	DMK	338	19.00	1.33	20.33
C	3	12	Return	C12	DD8827	NNT	DMK	338	19.91	1.33	21.24
D	4	1	Go	D1	DD9200	DMK	UTH	280	6.00	1.08	7.08
D	4	2	Go	D2	WE 002	DMK	UTH	280	7.58	1.08	8.66
D	4	3	Go	D3	WE 002	DMK	UTH	280	7.76	1.17	8.93
D	4	4	Go	D4	DD9202	DMK	UTH	280	10.00	1.08	11.08
D	4	5	Go	D5	WE 004	DMK	UTH	280	10.33	1.08	11.41
D	4	6	Go	D6	WE 004	DMK	UTH	280	11.17	1.17	12.34

D	4	7	Go	D7	DD9210	DMK	UTH	280	12.58	1.08	13.66
D	4	8	Go	D8	WE 006	DMK	UTH	280	14.67	1.08	15.75
D	4	9	Go	D9	WE 006	DMK	UTH	280	14.75	1.08	15.83
D	4	10	Go	D10	DD9214	DMK	UTH	280	15.41	1.17	16.58
D	4	11	Go	D11	DD9214	DMK	UTH	280	16.17	1.08	17.25
D	4	12	Go	D12	DD9216	DMK	UTH	280	17.41	1.08	18.49
D	4	13	Go	D13	WE 008	DMK	UTH	280	17.67	1.08	18.75
D	4	14	Go	D14	WE 008	DMK	UTH	280	17.75	1.08	18.83
D	4	15	Go	D15	DD9216	DMK	UTH	280	18.00	1.08	19.08
D	4	16	Return	D16	DD9201	UTH	DMK	280	7.58	1.00	8.58
D	4	17	Return	D17	WE 003	UTH	DMK	280	9.17	1.08	10.25
D	4	18	Return	D18	WE 003	UTH	DMK	280	9.58	1.08	10.66
D	4	19	Return	D19	DD9203	UTH	DMK	280	11.67	1.00	12.67
D	4	20	Return	D20	WE 005	UTH	DMK	280	12.07	1.08	13.15
D	4	21	Return	D21	WE 005	UTH	DMK	280	12.91	1.08	13.99
D	4	22	Return	D22	DD9211	UTH	DMK	280	14.25	1.00	15.25
D	4	23	Return	D23	WE 007	UTH	DMK	280	16.33	1.08	17.41
D	4	24	Return	D24	WE 007	UTH	DMK	280	16.41	1.08	17.49
D	4	25	Return	D25	DD9215	UTH	DMK	280	17.08	1.08	18.16
D	4	26	Return	D26	DD9215	UTH	DMK	280	17.75	1.00	18.75
D	4	27	Return	D27	SIM9201	UTH	DMK	280	19.08	1.00	20.08
D	4	28	Return	D28	SIM9202	UTH	DMK	280	19.25	1.00	20.25
D	4	29	Return	D29	DD9217	UTH	DMK	280	19.33	1.00	20.33
D	4	30	Return	D30	DD9217	UTH	DMK	280	19.58	1.00	20.58
E	5	1	Go	E1	DD9312	DMK	UBP	300	6.17	1.08	7.25
E	5	2	Go	E2	WE 020	DMK	UBP	300	7.08	1.08	8.16
E	5	3	Go	E3	WE 020	DMK	UBP	300	7.33	1.08	8.41
E	5	4	Go	E4	DD9310	DMK	UBP	300	9.50	1.08	10.58
E	5	5	Go	E5	WE 024	DMK	UBP	300	11.75	1.08	12.83
E	5	6	Go	E6	WE 024	DMK	UBP	300	12.50	1.08	13.58
E	5	7	Go	E7	DD9316	DMK	UBP	300	13.33	1.08	14.41
E	5	8	Go	E8	DD9324	DMK	UBP	300	15.50	1.00	16.50
E	5	9	Go	E9	DD9324	DMK	UBP	300	15.58	1.08	16.66
E	5	10	Go	E10	DD9324	DMK	UBP	300	15.67	1.08	16.75
E	5	11	Go	E11	WE 028	DMK	UBP	300	17.83	1.08	18.91
E	5	12	Go	E12	WE 028	DMK	UBP	300	18.00	1.08	19.08
E	5	13	Go	E13	DD9318	DMK	UBP	300	19.25	1.08	20.33
E	5	14	Return	E14	DD9313	UBP	DMK	300	7.75	1.08	8.83
E	5	15	Return	E15	WE 021	UBP	DMK	300	8.67	1.08	9.75
E	5	16	Return	E16	DD9313	UBP	DMK	300	9.00	1.00	10.00
E	5	17	Return	E17	DD9311	UBP	DMK	300	11.17	1.00	12.17
E	5	18	Return	E18	WE 025	UBP	DMK	300	13.41	1.00	14.41

E	5	19	Return	E19	WE 025	UBP	DMK	300	14.08	1.08	15.16
E	5	20	Return	E20	DD9317	UBP	DMK	300	14.91	1.00	15.91
E	5	21	Return	E21	SIM9301	UBP	DMK	300	17.00	1.00	18.00
E	5	22	Return	E22	SIM9302	UBP	DMK	300	17.25	1.00	18.25
E	5	23	Return	E23	SIM9303	UBP	DMK	300	17.33	1.00	18.33
E	5	24	Return	E24	DD9325	UBP	DMK	300	19.58	1.00	20.58
E	5	25	Return	E25	WE 029	UBP	DMK	300	19.67	1.08	20.75
E	5	26	Return	E26	DD9319	UBP	DMK	300	20.91	1.00	21.91
F	6	1	Go	F1	DD9402	DMK	SNO	326	8.08	1.17	9.25
F	6	2	Go	F2	DD9402	DMK	SNO	326	9.25	1.17	10.42
F	6	3	Go	F3	DD9406	DMK	SNO	326	12.75	1.17	13.92
F	6	4	Go	F4	DD9410	DMK	SNO	326	18.83	1.00	19.83
F	6	5	Go	F5	DD9410	DMK	SNO	326	19.83	1.17	21.00
F	6	6	Go	F6	DD9410	DMK	SNO	326	20.50	1.17	21.67
F	6	7	Return	F7	DD9403	SNO	DMK	326	9.75	1.17	10.92
F	6	8	Return	F8	DD9403	SNO	DMK	326	11.00	1.17	12.17
F	6	9	Return	F9	DD9407	SNO	DMK	326	14.50	1.17	15.67
F	6	10	Return	F10	DD9411	SNO	DMK	326	20.33	1.17	21.50
F	6	11	Return	F11	DD9411	SNO	DMK	326	21.50	1.17	22.67
F	6	12	Return	F12	DD9411	SNO	DMK	326	22.25	1.17	23.42
G	7	1	Go	G1	DD9602	DMK	BFV	199	5.91	1.08	6.99
G	7	2	Go	G2	DD9602	DMK	BFV	199	6.08	1.25	7.33
G	7	3	Go	G3	DD9608	DMK	BFV	199	14.33	1.08	15.41
G	7	4	Go	G4	DD9606	DMK	BFV	199	14.58	1.17	15.75
G	7	5	Go	G5	DD9608	DMK	BFV	199	17.41	1.25	18.66
G	7	6	Go	G6	DD9608	DMK	BFV	199	17.58	0.91	18.49
G	7	7	Return	G7	DD9603	BFV	DMK	199	7.58	1.08	8.66
G	7	8	Return	G8	DD9608	BFV	DMK	199	7.83	0.91	8.74
G	7	9	Return	G9	DD9609	BFV	DMK	199	15.91	1.08	16.99
G	7	10	Return	G10	DD9607	BFV	DMK	199	16.25	1.17	17.42
G	7	11	Return	G11	SIM9601	BFV	DMK	199	19.33	1.17	20.50
G	7	12	Return	G12	SIM9602	BFV	DMK	199	19.00	0.91	19.91
H	8	1	Go	H1	DD8400	DMK	PHS	200	6.50	1.83	8.33
H	8	2	Go	H2	DD8404	DMK	PHS	200	10.67	1.00	11.67
H	8	3	Go	H3	DD8406	DMK	PHS	200	13.83	1.00	14.83
H	8	4	Go	H4	DD8414	DMK	PHS	200	17.91	1.83	19.74
H	8	5	Go	H5	DD8414	DMK	PHS	200	18.17	1.83	20.00
H	8	6	Go	H6	DD8414	DMK	PHS	200	18.83	1.83	20.67
H	8	7	Go	H7	DD8414	DMK	PHS	200	19.41	1.83	21.24
H	8	8	Return	H8	DD8401	PHS	DMK	200	8.91	0.83	9.74
H	8	9	Return	H9	DD8405	PHS	DMK	200	12.25	1.00	13.25
H	8	10	Return	H10	DD8407	PHS	DMK	200	15.33	1.17	16.50

H	8	11	Return	H11	DD8415	PHS	DMK	200	20.25	0.83	21.08
H	8	12	Return	H12	DD8415	PHS	DMK	200	20.50	0.83	21.33
H	8	13	Return	H13	SIM8401	PHS	DMK	200	21.17	0.83	22.00
H	8	14	Return	H14	DD8415	PHS	DMK	200	21.83	0.83	22.66
I	9	1	Go	I1	DD7804	DMK	NST	374	6.00	1.25	7.25
I	9	2	Go	I2	DD7808	DMK	NST	374	10.08	1.25	11.33
I	9	3	Go	I3	DD7808	DMK	NST	374	10.25	1.17	11.42
I	9	4	Go	I4	DD7810	DMK	NST	374	14.00	1.25	15.25
I	9	5	Go	I5	DD7810	DMK	NST	374	14.67	1.17	15.84
I	9	6	Go	I6	DD7814	DMK	NST	374	16.00	1.17	17.17
I	9	7	Go	I7	DD7814	DMK	NST	374	16.08	1.17	17.25
I	9	8	Return	I8	DD7805	NST	DMK	374	7.75	1.17	8.92
I	9	9	Return	I9	SIM7801	NST	DMK	374	11.91	1.25	13.16
I	9	10	Return	I10	DD7809	NST	DMK	374	12.08	1.25	13.33
I	9	11	Return	I11	DD7811	NST	DMK	374	15.75	1.17	16.92
I	9	12	Return	I12	DD7811	NST	DMK	374	16.41	1.17	17.58
I	9	13	Return	I13	SIM7802	NST	DMK	374	17.67	1.25	18.92
I	9	14	Return	I14	DD7815	NST	DMK	374	17.83	1.17	19.00
J	10	1	Go	J1	DD7208	DMK	URT	345	6.17	1.17	7.34
J	10	2	Go	J2	WE 251	DMK	URT	345	8.17	1.25	9.42
J	10	3	Go	J3	WE 251	DMK	URT	345	8.41	1.25	9.66
J	10	4	Go	J4	DD7210	DMK	URT	345	9.33	1.17	10.50
J	10	5	Go	J5	DD7212	DMK	URT	345	12.83	1.17	14.00
J	10	6	Go	J6	DD7216	DMK	URT	345	16.41	1.17	17.58
J	10	7	Go	J7	WE 257	DMK	URT	345	17.75	1.25	19.00
J	10	8	Return	J8	DD7209	URT	DMK	345	7.91	1.17	9.08
J	10	9	Return	J9	WE 252	URT	DMK	345	10.00	1.33	11.33
J	10	10	Return	J10	WE 252	URT	DMK	345	10.17	1.17	11.34
J	10	11	Return	J11	DD7211	URT	DMK	345	11.00	1.17	12.17
J	10	12	Return	J12	DD7213	URT	DMK	345	14.50	1.17	15.67
J	10	13	Return	J13	DD7217	URT	DMK	345	18.17	1.17	19.34
J	10	14	Return	J14	WE 258	URT	DMK	345	19.50	1.17	20.67
K	11	1	Go	K1	DD7102	DMK	HDY	482	6.00	1.41	7.41
K	11	2	Go	K2	WE 259	DMK	HDY	482	6.17	1.50	7.67
K	11	3	Go	K3	WE 259	DMK	HDY	482	6.25	1.50	7.75
K	11	4	Go	K4	WE 269	DMK	HDY	482	8.33	1.41	9.74
K	11	5	Go	K5	WE 269	DMK	HDY	482	8.41	1.41	9.82
K	11	6	Go	K6	DD7104	DMK	HDY	482	9.33	1.41	10.74
K	11	7	Go	K7	DD7108	DMK	HDY	482	13.17	1.41	14.58
K	11	8	Go	K8	WE 261	DMK	HDY	482	11.5	1.41	12.91
K	11	9	Go	K9	WE 265	DMK	HDY	482	14	1.41	15.41
K	11	10	Go	K10	WE 265	DMK	HDY	482	14.08	1.41	15.49



K	11	11	Go	K11	DD7112	DMK	HDY	482	15.41	1.41	16.82
K	11	12	Go	K12	WE 263	DMK	HDY	482	16.33	1.41	17.74
K	11	13	Go	K13	WE 263	DMK	HDY	482	16.83	1.41	18.24
K	11	14	Go	K14	DD7114	DMK	HDY	482	17.25	1.58	18.83
K	11	15	Go	K15	WE 267	DMK	HDY	482	18.58	1.41	19.99
K	11	16	Go	K16	WE 267	DMK	HDY	482	18.83	1.41	20.24
K	11	17	Go	K17	DD7116	DMK	HDY	482	19.91	1.50	21.41
K	11	18	Return	K18	SIM7101	HDY	DMK	482	7.91	1.41	9.32
K	11	19	Return	K19	SIM7102	HDY	DMK	482	8.17	1.41	9.58
K	11	20	Return	K20	DD7103	HDY	DMK	482	8.25	1.41	9.66
K	11	21	Return	K21	WE 270	HDY	DMK	482	10.25	1.41	11.66
K	11	22	Return	K22	WE 270	HDY	DMK	482	10.33	1.41	11.74
K	11	23	Return	K23	DD7105	HDY	DMK	482	11.25	1.41	12.66
K	11	24	Return	K24	WE 262	HDY	DMK	482	15.17	1.41	16.58
K	11	25	Return	K25	DD7109	HDY	DMK	482	13.41	1.41	14.82
K	11	26	Return	K26	WE 266	HDY	DMK	482	15.91	1.41	17.32
K	11	27	Return	K27	WE 266	HDY	DMK	482	16.08	1.41	17.49
K	11	28	Return	K28	DD7113	HDY	DMK	482	17.33	1.41	18.74
K	11	29	Return	K29	SIM7103	HDY	DMK	482	18.25	1.41	19.66
K	11	30	Return	K30	WE 264	HDY	DMK	482	18.83	1.41	20.24
K	11	31	Return	K31	WE 264	HDY	DMK	482	19.33	1.41	20.74
K	11	32	Return	K32	SIM7104	HDY	DMK	482	20.50	1.41	21.91
K	11	33	Return	K33	WE 268	HDY	DMK	482	20.83	1.41	22.24
K	11	34	Return	K34	DD7117	HDY	DMK	482	21.91	1.33	23.24
L	12	1	Go	L1	DD7406	DMK	TST	448	9.91	1.33	11.24
L	12	2	Go	L2	DD7400	DMK	TST	448	10.08	1.58	11.66
L	12	3	Go	L3	DD7400	DMK	TST	448	10.15	1.41	11.56
L	12	4	Go	L4	DD7400	DMK	TST	448	10.33	1.41	11.74
L	12	5	Go	L5	DD7410	DMK	TST	448	16.00	1.33	17.33
L	12	6	Go	L6	DD7410	DMK	TST	448	17.08	1.41	18.49
L	12	7	Return	L7	DD7401	TST	DMK	448	11.83	1.33	13.16
L	12	8	Return	L8	SIM7401	TST	DMK	448	12.25	1.33	13.58
L	12	9	Return	L9	DD7407	TST	DMK	448	12.08	1.33	13.41
L	12	10	Return	L10	DD7401	TST	DMK	448	12.41	1.41	13.82
L	12	11	Return	L11	DD7411	TST	DMK	448	18.08	1.33	19.41
L	12	12	Return	L12	DD7411	TST	DMK	448	19.00	1.41	20.41
M	13	1	Go	M1	WE 285	DMK	HKT	430	8.83	1.33	10.16
M	13	2	Go	M2	WE 285	DMK	HKT	430	9.17	1.33	10.50
M	13	3	Go	M3	DD7502	DMK	HKT	430	9.50	1.33	10.83
M	13	4	Go	M4	WE 281	DMK	HKT	430	10.25	1.33	11.58
M	13	5	Go	M5	WE 281	DMK	HKT	430	10.50	1.33	11.83
M	13	6	Go	M6	WE 273	DMK	HKT	430	11.33	1.41	12.74

M	13	7	Go	M7	DD7504	DMK	HKT	430	11.41	1.33	12.74
M	13	8	Go	M8	DD7504	DMK	HKT	430	11.91	1.33	13.24
M	13	9	Go	M9	WE 273	DMK	HKT	430	12.67	1.50	14.17
M	13	10	Go	M10	DD7506	DMK	HKT	430	13.58	1.33	14.91
M	13	11	Go	M11	DD7512	DMK	HKT	430	10.25	1.50	11.75
M	13	12	Go	M12	DD7514	DMK	HKT	430	15.08	1.33	16.41
M	13	13	Go	M13	WE 275	DMK	HKT	430	10.41	1.33	11.74
M	13	14	Go	M14	WE 275	DMK	HKT	430	15.58	1.33	16.91
M	13	15	Go	M15	WE 283	DMK	HKT	430	17.41	1.33	18.74
M	13	16	Return	M16	DD7501	HKT	DMK	430	10.75	1.41	12.16
M	13	17	Return	M17	SIM7501	HKT	DMK	430	11.08	1.33	12.41
M	13	18	Return	M18	DD7521	HKT	DMK	430	11.33	1.33	12.66
M	13	19	Return	M19	SIM7502	HKT	DMK	430	12.17	1.33	13.50
M	13	20	Return	M20	SIM7503	HKT	DMK	430	12.33	1.33	13.66
M	13	21	Return	M21	WE 282	HKT	DMK	430	13.33	1.41	14.74
M	13	22	Return	M22	WE 282	HKT	DMK	430	13.25	1.41	14.66
M	13	23	Return	M23	DD7513	HKT	DMK	430	13.83	1.41	15.24
M	13	24	Return	M24	DD7505	HKT	DMK	430	14.67	1.33	16.00
M	13	25	Return	M25	DD7505	HKT	DMK	430	15.41	1.33	16.74
M	13	26	Return	M26	WE 274	HKT	DMK	430	12.33	1.50	13.83
M	13	27	Return	M27	DD7507	HKT	DMK	430	16.91	0.83	17.74
M	13	28	Return	M28	DD7515	HKT	DMK	430	12.25	1.33	13.58
M	13	29	Return	M29	WE 276	HKT	DMK	430	17.41	1.41	18.82
M	13	30	Return	M30	WE 284	HKT	DMK	430	19.33	1.33	20.66
N	14	1	Go	N1	DD7910	DMK	KBV	417	6.50	1.25	7.75
N	14	2	Go	N2	SIM1	KBV	DMK	417	10	1.25	11.25
N	14	3	Go	N3	WE 245	DMK	KBV	417	13.41	1.33	14.74
N	14	4	Go	N4	WE 253	DMK	KBV	417	13.58	1.33	14.91
N	14	5	Go	N5	DD7914	DMK	KBV	417	16.17	1.33	17.50
N	14	6	Return	N6	DD7911	KBV	DMK	417	8.25	1.33	9.58
N	14	7	Return	N7	SIM2	KBV	DMK	417	12	1.33	13.33
N	14	8	Return	N8	WE 246	KBV	DMK	417	15.25	3.00	18.25
N	14	9	Return	N9	WE 254	KBV	DMK	417	15.41	1.33	16.74
N	14	10	Return	N10	DD7915	KBV	DMK	417	18.00	1.33	19.33

## บรรณานุกรม

- AhmadBeygi, S., Cohn, A., & Weir, M. (2009). An integer programming approach to generating airline crew pairings. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1284-1298. doi:10.1016/j.cor.2008.02.001
- Allung Blegur, F. M., Bakhtiar, T., & Aman, A. (2014). Scenarios for Fleet Assignment: A Case Study at Lion Air. *IOSR Journal of Mathematics*, 10(5), 64-68. doi:10.9790/5728-10516468
- Barnhart, C., & Cohn, A. (2004). Airline Schedule Planning: Accomplishments and Opportunities. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(1), 3-22. doi:10.1287/msom.1030.0018
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268-308. doi:10.1145/937503.937505
- Cadarso, L., & Marín, Á. (2013). Robust passenger oriented timetable and fleet assignment integration in airline planning. *Journal of Air Transport Management*, 26, 44-49. doi:10.1016/j.jairtraman.2012.10.004
- Chutima, P., & Arayikanon, K. (2017). *SOLVING COCKPIT CREW SCHEDULING PROBLEM OF A LOW COST AIRLINE USING MET AHEURISTIC*. (Master), Chulalongkorn Chulalongkorn (3287537783)
- 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., & Kampirom, N. (2014). *Coincidence Algorithm for Combinatorial Optimisation and Its Applications*. Paper presented at the EECON-28.
- Deveci, M., & Demirel, N. Ç. (2018). Evolutionary algorithms for solving the airline crew pairing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 115, 389-406. doi:10.1016/j.cie.2017.11.022
- Dück, V., Ionescu, L., Kliewer, N., & Suhl, L. (2012). Increasing stability of crew and aircraft schedules. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 47-61.

doi:10.1016/j.trc.2011.02.009

Elhabashy, A., Elwany, M. H., & Abouelseoud, Y. (2014). Solving The Airline Crew Pairing Problem Using Genetic Algorithms. *Research Gate*.

Erdoğan, G., Haouari, M., Matoglu, M. Ö., & Özener, O. Ö. (2017). Solving a large-scale crew pairing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 66(10), 1742-1754. doi:10.1057/jors.2015.2

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, K. L., & Padberg, M. (1993). Solving Airline Crew Scheduling Problems by Branch-and-Cut. *JSTOR*, 39(6), 657-682.

Iijima, Y., & Nishi, T. (2016). *Column Generation Heuristics to Airline Crew Scheduling Problem for Fair Working Time*. Paper presented at the 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics • SMC 2016.

Ionescu, L., & Kliewer, N. (2011). Increasing Flexibility of Airline Crew Schedules. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 1019-1028. doi:10.1016/j.sbspro.2011.08.111

Ishibuchi, H., Tsukamoto, N., Hitotsuyanagi, Y., & Nojima, Y. (2008). *Effectiveness of Scalability Improvement Attempts on the Performance of NSGA-II for Many-Objective Problems*. Paper presented at the GECCO '08 Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation.

Kohl, N. (2004). Airline Crew Rostering: Problem Types, Modeling, and Optimization. *Annals of Operations Research*, 127, 223-257.

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.ress.2005.11.018

Li, B., Li, J., Tang, K., & Yao, X. (2015). Many-Objective Evolutionary Algorithms. *ACM Computing Surveys*, 48(1), 1-35. doi:10.1145/2792984

Liu, T.-K., Chen, C.-H., & Chou, J.-H. (2010). Optimization of short-haul aircraft schedule recovery problems using a hybrid multiobjective genetic algorithm. *Expert Systems*

- with Applications*, 37(3), 2307-2315. doi:10.1016/j.eswa.2009.07.068
- Liu, T.-K., Chen, C.-H., Chou, T.-Y., Ho, W.-H., Chen, S.-H., & Chou, J.-H. (2010). Multiobjective Optimization Genetic Algorithms for Domestic Airline Crew Pairing Problems.
- Lucic, P., & Teodorovic, D. (1999). Simulated annealing for the multi-objective aircrew rostering problem. *PRAGAMON*, 19-45.
- Qi, X., Yang, J., & Yu, G. (2003). Scheduling Problem in the Airline Industry. In.
- Qingfu, Z., & Hui, L. (2007). MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11(6), 712-731. doi:10.1109/tevc.2007.892759
- Reisi-Nafchi, M., & Moslehi, G. (2013). Cockpit Crew Pairing Problem in Airline Scheduling: Shortest Path with Resources Constraints Approach. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 24, 259-268.
- Stojkovi, G., Soumis, F., Desrosiers, J., & Marius M. Solomon d. (2002). An optimization model for a real-time flight scheduling problem. *Transportation Research Part A* 36, 779-788.
- Storn, R., & Price, K. (1996). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359.
- Teodorovic, D., & Lucic, P. (1998). A fuzzy set theory approach to the aircrew rostering problem. *ELSEVIER*, 261-271.
- Yan, S., Tung, T.-T., & Tu, Y.-P. (2002). Optimal construction of airline individual crew pairings. *Computers & Operations Research*, 341-363.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวณิชา กฤษณพันธ์ุ์
วัน เดือน ปี เกิด	24 มกราคม 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาคณิตศาสตร์) มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ.2560
ผลงานตีพิมพ์	ณิชา กฤษณพันธ์ุ์ และศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์. 2560. การศึกษาอัตรา ค่าจ้างของช่าง อ่างอิงมาตรฐานองค์การแรงงานระหว่างประเทศ เฉพาะ กรณีบริษัท พรีเมียม เทคโนโลยี เซอร์วิส จำกัด ที่ปฏิบัติงานในคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. การประชุมวิชาการระดับปริญญาตรี ด้านคณิตศาสตร์ประยุกต์ ครั้งที่ 6 (UAMC2017): 76-77