

Chulalongkorn University

Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2021

การพัฒนาอีวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน

วรกร เขาวงษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Industrial Engineering Commons](#), and the [Operational Research Commons](#)

Recommended Citation

เขาวงษ์, วรกร, "การพัฒนาอีวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน" (2021). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 5546.

<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/5546>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การพัฒนาอีวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Development of heuristics for the Airport Gate Assignment Problem



Mr. Worakorn Khaowong

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 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้า หลุมจอดอากาศยาน
โดย	นายวรกร เขาวงษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นระเกณต์ พุ่มชูศรี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเวช ช่างสง่าเวช)	

วรกร เขาวงษ์ : การพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอด
อากาศยาน . (A Development of heuristics for the Airport Gate Assignment
Problem) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์

หลุมจอดอากาศยาน ถือเป็นหนึ่งในทรัพยากรสำคัญที่กำหนดความสามารถในการ
รองรับเที่ยวบินของท่าอากาศยาน โดยจำนวนหลุมจอดอากาศยานส่วนใหญ่นั้น มักถูกกำหนดจาก
โครงสร้างของท่าอากาศยานเอง ซึ่งจะมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละท่าอากาศยาน การ
วางแผนจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอย่าง
ยิ่งในสนามบินที่มีการจราจรหนาแน่น เช่น สนามบินสุวรรณภูมิ ผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองปัญหา
การจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) แบบหลายวัตถุประสงค์ ผ่านแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ แล้วทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูก
ครอบงำ III (NSGA-III) ซึ่งในวิธีการดังกล่าว ผู้วิจัยได้สอดแทรกเงื่อนไขและข้อจำกัดต่าง ๆ ที่มักถูก
ละเลย เช่น ความเข้ากันได้ของอากาศยานและหลุมจอดอากาศยาน ตลอดจนการแบ่งกิจกรรมของ
เที่ยวบินให้สอดคล้องกับแนวทางปฏิบัติงานจริงของการท่าอากาศยาน ผู้วิจัยพบว่า ประสิทธิภาพ
ของฮิวริสติกส์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเป็นที่น่าสนใจ โดยฮิวริสติกส์ดังกล่าวสามารถค้นหาคำตอบที่มี
คุณภาพดีเทียบเท่ากับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจาก CPLEX ในปัญหา AGAP แบบวัตถุประสงค์เดียว
เพียงขนาดเล็กได้ทั้ง 15 ปัญหา นอกจากนี้ ฮิวริสติกส์ที่ถูกพัฒนาขึ้นยังสามารถค้นหาคำตอบของ
ปัญหา AGAP ทั้งแบบวัตถุประสงค์เดียว และหลายวัตถุประสงค์ที่มีขนาดใหญ่ได้ ในขณะที่ CPLEX
ไม่สามารถหาแม้คำตอบตั้งต้นได้ เนื่องจากประสบปัญหาความจำไม่เพียงพอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270242421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: Airport Gate Assignment Problem Multi-objective Scheduling
Problem Non-dominated Sorting Genetic Algorithm

Worakorn Khaowong : A Development of heuristics for the Airport Gate Assignment Problem. Advisor: Asst. Prof. Pisit Jarumaneeroj, Ph.D.

Aircraft stands – or airport gates – are one of main resources that practically cap the capacity of an airport – since the number of airport gates is generally limited and heavily dependent on airport infrastructure that may vary from one to another airport. Effective gate assignment is therefore important, especially for congested airports, like the Suvarnabhumi Airport. To properly address these issues, a mathematical model for the multi-objective airport gate assignment problem (AGAP) is herein developed and solved by a non-dominated sorting genetic algorithm III (NSGA-III), taking into consideration practical constraints that are often neglected - *e.g.* the compatibility of aircrafts and airport gates, as well as the division of activities for long ground-time flights. Our computational results indicate that the proposed heuristic is comparatively efficient as it could match the optimal solutions provided by CPLEX in all of 15 small single-objective instances. Moreover, the proposed heuristics could also provide solutions to larger single- and multi-objective instances, while CPLEX typically terminates with run-out-of-memory errors in all cases.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบความรู้ ตลอดจนคำแนะนำอันมีค่า และความช่วยเหลือต่าง ๆ ตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ นางสาววรรดา วุฒิเจริญกิจ นายธารินทร์ โชติวณิช นายวิษณะ ศรีตระกูล นายอาทิตย์ โคตรแสนลี นางสาวชญาณี ประครองว่าที่ ร.ต. พิพัฒน์ พิมพะนิตย์ นายปวรศ เวชวรรณกิจกุล ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ทั้งการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมไปถึงความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และแรงสนับสนุนอันดีทั้งทางตรงและทางอ้อมให้กับข้าพเจ้าตลอดมา

วรกร เขาวงษ์



สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1 ภาพรวมและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2	8
2.1 ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Airport Gate Assignment Problem: AGAP).....	8
2.2 ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (Vehicle Routing Problem : VRP).....	11
2.3 วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III).....	14
2.3.1 ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III.....	14
2.3.1.1 ขั้นตอนการเริ่มต้น.....	14

2.3.1.2 ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ	16
2.3.1.3 ขั้นตอนการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม	24
2.3.2 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III	24
2.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)	25
2.4.1 หลักการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์.....	25
2.4.2 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ	27
2.4.3 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม.....	28
2.4.3.1 ตัวชี้วัดด้านการรู้เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต.....	28
2.4.3.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการรู้เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Convergence and Diversity Metrics)	29
2.4.3.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics/Spread).....	30
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
2.5.1 วิธีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรองรับเหตุการณ์ไม่คาดคิดในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Robust Gate Assignment problem).....	32
2.5.2 การประยุกต์ใช้ VRP กับปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีแบบหลายวัน (The Multiple-Day Music Rehearsal Problems).....	36
2.5.3 การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	39
2.6 สรุป	40
บทที่ 3	44
3.1 ลักษณะของปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน	44
3.1.1 ประเด็นปัญหา.....	44
3.1.2 การกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหา	45
3.2 สมมติฐานและข้อจำกัดของปัญหา	46

3.3 การออกแบบตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP).....	47
3.4 การพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP)	57
3.4.1 การกำหนดพารามิเตอร์ของวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรบกวน III (NSGA-III)	57
3.4.2 การออกแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสของชุดคำตอบ (Encoding and Decoding). 58	
3.4.3 ข้อมูลนำเข้าของปัญหา AGAP.....	60
3.4.3.1 ข้อมูลเที่ยวบินตามตาราง (Schedule plan).....	60
3.4.3.2 ข้อมูลเที่ยวบินจริง.....	60
3.4.3.3 ข้อมูลหลุมจอดอากาศยาน	61
3.4.3.4 ระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยาน	62
3.4.3.5 ระยะทางระหว่างจุดรับส่ง (Point) กับหลุมจอดอากาศยาน.....	63
3.4.4 กระบวนการจัดเตรียมข้อมูลของปัญหา AGAP (Data Processing)	65
3.4.4.1 การแบ่งกิจกรรมของเที่ยวบิน	65
3.4.4.2 การแบ่งประเภทหลุมจอดอากาศยาน.....	67
3.4.4.3 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	67
3.4.4.4 การสร้างสมการสำหรับคำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected Conflict time (พารามิเตอร์สำหรับวัตถุประสงค์ Robust)	68
3.4.5 กระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์.....	71
3.4.5.1 การสร้างจุดอ้างอิง (Reference point).....	71
3.4.5.2 การสร้างผลคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution).....	72
3.4.5.3 การถอดรหัสสตริงคำตอบ (Decoding).....	75
3.4.5.4 การพัฒนาสตริงคำตอบ (Improvement)	76
3.4.5.5 การนอร์มัลไลเซชัน (Normalization).....	80

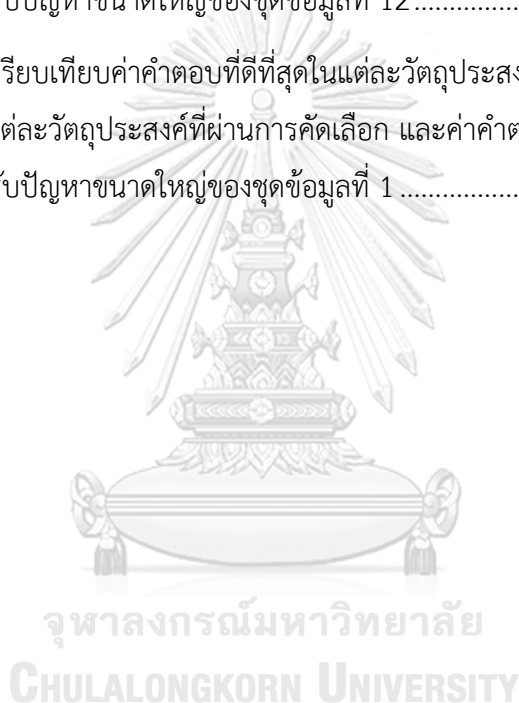
3.4.5.6 การจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting).....	81
3.4.5.7 การหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุด	84
3.4.5.8 การคัดเลือกคำตอบ (Selection).....	87
3.4.5.9 การเก็บชุดคำตอบที่ดี (Elite)	91
3.4.5.10 ภาพรวมการทำงานของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหา AGAP	92
บทที่ 4.....	96
4.1 Instance Generation.....	96
4.1.1 การจำลองข้อมูลนำเข้าด้านเที่ยวบิน.....	97
4.1.2 การจำลองข้อมูลนำเข้าด้านหลุมจอดอากาศยาน	98
4.2 โปรแกรมและอุปกรณ์คำนวณ.....	100
4.3 ผลการทดสอบด้วยวิธีแบบวัตถุประสงค์เดียว	100
4.4 ผลการทดสอบด้วยวิธีแบบหลายวัตถุประสงค์.....	109
4.4.1 ปัญหาขนาดเล็ก.....	110
4.4.2 ปัญหาขนาดกลาง.....	114
4.4.3 ปัญหาขนาดใหญ่	118
4.5 การคัดเลือกกลุ่มคำตอบจากขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต	122
บทที่ 5	131
5.1 บทสรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	131
5.2 ข้อเสนอแนะ	134
บรรณานุกรม.....	137
ประวัติผู้เขียน.....	140

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างโครงสร้างโครโมโซมแบบไบนารี.....	16
ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างโครงสร้างโครโมโซมแบบการวางสลับเปลี่ยนลำดับ.....	16
ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างโครงสร้างโครโมโซมแบบการใช้ค่าของตัวแปร	16
ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ได้จากการ Fitted PDFs	35
ตารางที่ 2-5 สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงชีวภาพกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม	40
ตารางที่ 2-6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน	41
ตารางที่ 3-1 ตัวอย่างสตริงคำตอบสำหรับเที่ยวบินจำนวน 13 เที่ยวบินกับ 9 หลุมจอดอากาศยาน	59
ตารางที่ 3-2 ตัวอย่างตารางการเข้าจอดของเที่ยวบิน 13 เที่ยวบินกับ 9 หลุมจอดอากาศยาน	59
ตารางที่ 3-3 ตัวอย่างการแบ่งเที่ยวบินเป็นกิจกรรมย่อยเมื่อเที่ยวบินมี Ground time สูง (มากกว่า 4 ชั่วโมง)	65
ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างการกำหนดกิจกรรมเมื่อเที่ยวบินมี Ground time ต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 ชั่วโมง)	66
ตารางที่ 3-5 ตัวอย่างการกำหนดกิจกรรมเมื่อเที่ยวบินมีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight)	66
ตารางที่ 3-6 หลักเกณฑ์ในการแปลงขนาดอากาศยาน	67
ตารางที่ 3-7 พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Shifted Log-normal Distribution.....	69
ตารางที่ 3-8 ตัวอย่างเวกเตอร์จุดอ้างอิงที่ได้จากวิธีการหาจำนวนจุดอ้างอิง	72
ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงข้อมูลนำเข้า หรือพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่.....	96
ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหาขนาดเล็ก	101
ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดเล็ก.....	110
ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดกลาง	114

ตารางที่ 4-5 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดใหญ่.....	118
ตารางที่ 4-6 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้จำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุดเป็นเกณฑ์	124
ตารางที่ 4-7 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้สองวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์	126
ตารางที่ 4-8 ตารางเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ของชุดข้อมูลที่ 12	127
ตารางที่ 4-9 ตารางเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ของชุดข้อมูลที่ 1	128



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1-1 จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2015 - 2020 (ท่าอากาศยานไทย, 2021b)	2
รูปที่ 1-2 จำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2015 - 2020 (ท่าอากาศยานไทย, 2021c).....	2
รูปที่ 1-3 การคาดการณ์จำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2020 - 2025 กรณีการฟื้นตัวปกติ (สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, 2021)	4
รูปที่ 1-4 การคาดการณ์จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2020 - 2025 กรณีการฟื้นตัวปกติ (สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, 2021)	4
รูปที่ 2-1 การจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP).....	12
รูปที่ 2-2 การสร้างจุดอ้างอิง 15 จุด บนระนาบที่นอโมลโลซ์ เมื่อ $M = 3$ และ $p = 4$ (Deb & Jain, 2013)	15
รูปที่ 2-3 การแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ Uniform.....	17
รูปที่ 2-4 การกำหนดจุดตัดของการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ PMX.....	17
รูปที่ 2-5 โครโมโซมลูกที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนยีนที่อยู่ในช่วงการตัดของโครโมโซมพ่อแม่	18
รูปที่ 2-6 การปรับปรุงโครโมโซมรุ่นลูกเพื่อให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้	18
รูปที่ 2-7 ผลการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ PMX.....	19
รูปที่ 2-8 ตัวอย่างการกลายพันธุ์ของโครโมโซมแบบไบนารี	19
รูปที่ 2-9 ตัวอย่างการกลายพันธุ์แบบสลับตำแหน่ง.....	20
รูปที่ 2-10 การหาระยะทางตั้งฉากระหว่างเส้นอ้างอิงกับจุดคำตอบ (Yuan et al., 2014).....	22
รูปที่ 2-11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III	24
รูปที่ 2-12 แผนภาพแสดงลำดับเหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตแบบ 2 วัตถุประสงค์ (Goldberg, 1989).....	26
รูปที่ 2-13 ตัวอย่างการจัดเที่ยวบินที่เป็นไปได้ และมีเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Gate Separation) ที่เพียงพอ (Kim, 2013).....	33

รูปที่ 2-14 ตัวอย่างเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Gate Separation) (Kim, 2013)	33
รูปที่ 2-15 ตัวอย่างการกระจายตัวของ Departure delay ของ Northwest Airlines at Detroit Metropolitan Airport (Kim, 2013)	34
รูปที่ 2-16 ตัวอย่างการกระจายตัวของ Arrival delay ของ Northwest Airlines at Detroit Metropolitan Airport (Kim, 2013)	35
รูปที่ 2-17 ตัวอย่างการ Fitted Exponential curve (Kim, 2013).....	36
รูปที่ 2-18 ตัวอย่างการซัอมเพลง 14 บทเพลงใน 2 วัน, 5 นักดนตรี (เกิดการร่อช่องจะเป็นสีเทา) (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021).....	37
รูปที่ 2-19 ตารางการซัอมใน 1 วัน (เกิดการร่อช่องจะเป็นสีเทา) (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021).....	37
รูปที่ 2-20 ตารางการซัอมใน 1 วันที่ถูกปรับเปลี่ยนให้มีเวลารอน้อยที่สุด (เกิดการร่อช่องจะเป็นสีเทา) (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021).....	37
รูปที่ 2-21 ตัวอย่างการซัอม 2 วัน, 9 บทเพลง, 3 นักดนตรี ที่ถูกทำให้เข้าใจด้วยรูปแบบ CVRP (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021).....	38
รูปที่ 3-1 ตัวอย่างข้อมูลเที่ยวบินตามตาราง (ท่าอากาศยานไทย, 2021a).....	60
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างข้อมูลเที่ยวบินจริง (ท่าอากาศยานไทย, 2021a).....	61
รูปที่ 3-3 แผนผังหลุมจอดอากาศยานของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (ท่าอากาศยานไทย, 2021a)...	62
รูปที่ 3-4 ตัวอย่างการวัดระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยาน (GoogleEarthPro, 2021).....	63
รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการวัดระยะทางระหว่างจุด Point กับหลุมจอดอากาศยาน (GoogleEarthPro, 2021).....	64
รูปที่ 3-6 ตำแหน่งของจุด Point แต่ละจุดที่ผู้วิจัยได้สมมติขึ้นมา (GoogleEarthPro, 2021).....	64
รูปที่ 3-7 การกระจายตัวของข้อมูล Departure delay และการ Fitted PDF.....	69
รูปที่ 3-8 การกระจายตัวของข้อมูล Arrival delay และการ Fitted PDF	70
รูปที่ 3-9 นำคำตอบที่ได้จากการอินทิเกรตมา Plot กราฟ และ Fitted Exponential curve	71
รูปที่ 3-10 Pseudo Code สำหรับโมดูลการสร้างผลคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution).....	74
รูปที่ 3-11 Pseudo Code สำหรับโมดูลการถอดรหัสสตริงคำตอบ (Decoding).....	76

รูปที่ 3-12 Pseudo Code สำหรับโมดูลการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover).....	78
รูปที่ 3-13 Pseudo Code สำหรับโมดูลการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation)	80
รูปที่ 3-14 Pseudo Code สำหรับโมดูลการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization)	81
รูปที่ 3-15 Pseudo Code สำหรับโมดูลการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting)	84
รูปที่ 3-16 Pseudo Code สำหรับโมดูลการหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุด	87
รูปที่ 3-17 Pseudo Code สำหรับโมดูลการคัดเลือกคำตอบ (Selection).....	90
รูปที่ 3-18 Pseudo Code สำหรับโมดูลการเก็บชุดคำตอบที่ดี (Elite)	91
รูปที่ 3-19 แผนภาพแสดงกระบวนการทำงานภาพรวมของฮิวริสติกส์.....	94
รูปที่ 3-20 Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานภาพรวมของฮิวริสติกส์	95
รูปที่ 4-1 กราฟแสดงลำดับการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดเล็ก.....	107
รูปที่ 4-2 กราฟแสดงลำดับการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหขนาดกลาง	108
รูปที่ 4-3 กราฟแสดงลำดับการหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหขนาดใหญ่	109
รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหขนาดเล็ก.....	112
รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหขนาดกลาง	116
รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหขนาดใหญ่	120
รูปที่ 4-7 แผนภาพแสดงจำนวนกลุ่มคำตอบในแต่ละขั้นตอนการคัดเลือก.....	125

บทที่ 1

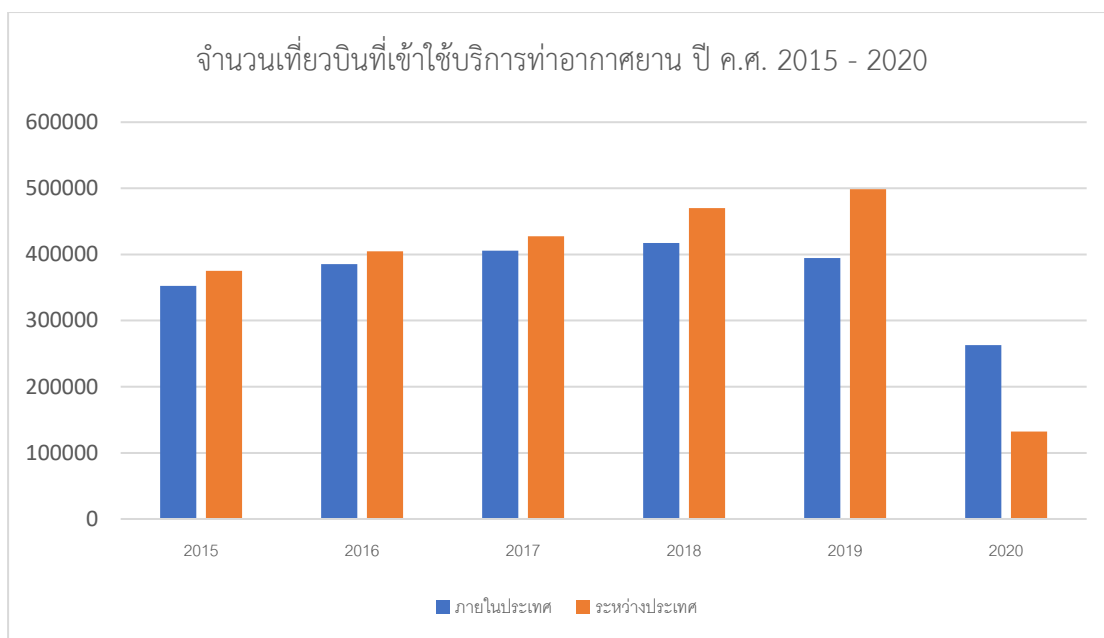
บทนำ

1.1 ภาพรวมและความสำคัญของปัญหา

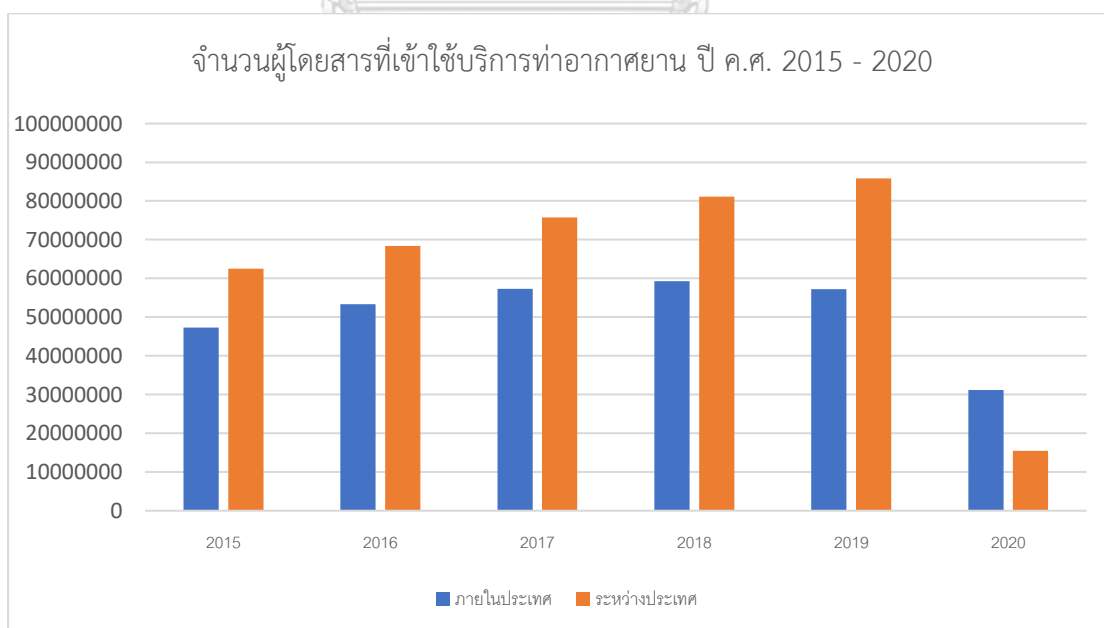
ปัจจุบันการเดินทางทางอากาศโดยอากาศยาน ถือเป็นหนึ่งในรูปแบบการเดินทางที่เป็นที่นิยมสำหรับการเดินทางระยะไกลถึงแม้จะเป็นรูปแบบการเดินทางที่สามารถถูกก่อกวน (Interruption) ได้ค่อนข้างง่ายซึ่งอาจส่งผลให้การเดินทางด้วยอากาศยานต้องหยุดชะงัก ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากปัจจัยด้านสภาพอากาศหรือปัจจัยอื่น ๆ แต่เมื่อเทียบกับรูปแบบการเดินทางประเภทอื่น การเดินทางด้วยอากาศยานถือเป็นการเดินทางที่ปลอดภัยและใช้เวลาในการเดินทางที่สั้นกว่าการเดินทางประเภทอื่น อีกทั้งยังมีผู้ให้บริการที่หลากหลาย จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินทางไม่สูงมากนัก ดังจะเห็นได้จากการเติบโตของอุตสาหกรรมการบินทั่วโลกก่อนเกิดการระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ หรือที่รู้จักกันในชื่อ SARS-CoV-2 ณ เมืองอู่ฮั่น เมืองหลวงของมณฑลหูเป่ย์ สาธารณรัฐประชาชนจีน ในช่วงปลายปี ค.ศ. 2019

สำหรับประเทศไทย การเดินทางโดยอากาศยานมีแนวโน้มการเจริญเติบโตที่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1-1 และรูปที่ 1-2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที่ยวบินรวมภายในประเทศ เที่ยวบินระหว่างประเทศ ตลอดจนจำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ทั้ง 6 แห่ง ที่บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) กำกับดูแลระหว่างปี ค.ศ. 2015 - ค.ศ. 2020 ทั้งนี้จากข้อมูลจะพบว่าจำนวนเที่ยวบินรวม และจำนวนผู้โดยสารที่เข้ามาใช้บริการท่าอากาศยานภายในประเทศตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 ถึง ปี ค.ศ. 2019 เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5.3 และ 6.9 ต่อปี ตามลำดับ (ท่าอากาศยานไทย, 2021b) อย่างไรก็ตาม ภายหลังจากการเริ่มต้นระบาดของโรค COVID-19 ในช่วงปลายปี ค.ศ. 2019 ที่ผ่านมา ก็ส่งผลทำให้อุตสาหกรรมการบินในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลก (รวมถึงประเทศไทย) ได้รับผลกระทบอย่างหนัก เนื่องจากเชื้อ SARS-CoV-2 นั้นได้แพร่กระจายอย่างรวดเร็วทำให้มีจำนวนผู้ติดเชื้อสูงขึ้นเป็นทวีคูณ หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยจำเป็นต้องทำการประกาศระงับเที่ยวบินขาเข้าจากต่างประเทศเพื่อควบคุมสถานการณ์ไม่ให้เกิดการแพร่กระจายของเชื้อ SARS-CoV-2 นอกจากนี้ เที่ยวบินระหว่างประเทศจำนวนมากยังถูกยกเลิก หรือถูกเลื่อนไปอย่างไม่มีกำหนด ส่งผลทำให้จำนวนเที่ยวบินรวมและจำนวนผู้โดยสารรวมในท่าอากาศยานต่าง ๆ ทั่วโลก ลดลงอย่างมาก โดยในประเทศไทย จำนวนเที่ยวบินที่เข้ามาใช้บริการท่าอากาศยานในปี ค.ศ. 2020 ได้ลดลงจาก 893,522 เที่ยวบินในปี ค.ศ. 2019 เหลือเพียง 395,148 เที่ยวบิน

หรือคิดเป็นการลดลงกว่า 55.78% สำหรับจำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยานในปี ค.ศ. 2020 ก็ลดลงจาก 143,018,131 คนในปี ค.ศ. 2019 เหลือเพียง 46,637,754 คน ซึ่งเป็นการลดลงกว่า 67.39% ภายในช่วงเวลาเพียง 1 ปีเท่านั้น (ท่าอากาศยานไทย, 2021c)



รูปที่ 1-1 จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2015 - 2020 (ท่าอากาศยานไทย, 2021b)

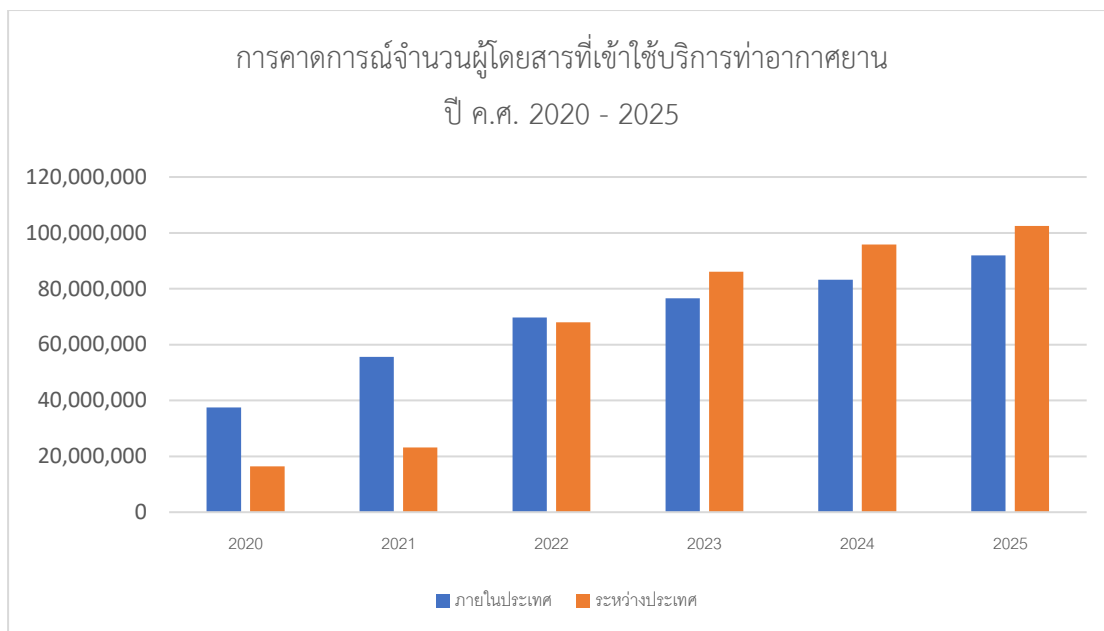


รูปที่ 1-2 จำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2015 - 2020 (ท่าอากาศยานไทย, 2021c)

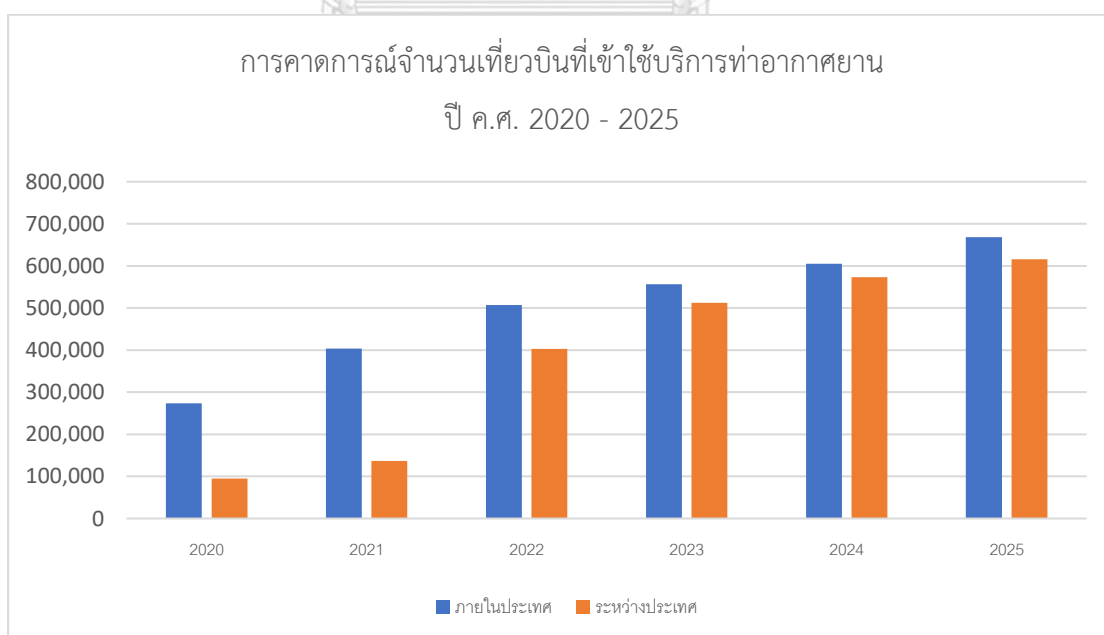
อย่างไรก็ดี จากการคาดการณ์ของสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย (กพท.) อุตสาหกรรมการบินจะเริ่มกลับมาฟื้นตัวภายหลังการสิ้นสุดการระบาดของโรค COVID-19 โดยจำนวนเที่ยวบินและจำนวนผู้โดยสารในท่าอากาศยานต่าง ๆ จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในแต่ละปี และอาจเพิ่มสูงกว่าจำนวนเที่ยวบินในช่วงปี ค.ศ. 2019 ที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 1-3 และรูปที่ 1-4

จากเหตุการณ์ข้างต้นจะเห็นได้ว่า อุตสาหกรรมการบิน ถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความเปราะบางเป็นอย่างมาก และด้วยจำนวนเที่ยวบินและจำนวนผู้โดยสารที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตจะส่งผลให้เกิดความต้องการใช้งานท่าอากาศยานที่เพิ่มสูงขึ้น และมีผลต่อความต้องการใช้งานทรัพยากรต่าง ๆ ภายในท่าอากาศยานโดยตรง อาทิเช่น ทางวิ่ง (Runway) ทางขับ (Taxiway) และหลุมจอดอากาศยาน (Gate) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด และหากเราใช้งานทรัพยากรเหล่านี้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ อาจสามารถสร้างผลกระทบบางอย่างที่ไม่จำเป็นขึ้นในระบบ ไม่ว่าจะเป็นระยะเวลาในการรอของอากาศยานที่ต้องจอดต่อคิวบนทางขับเพื่อรอนำเครื่องออกจากท่าอากาศยาน การเกิดมลภาวะทางอากาศ (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) อันเนื่องมาจากการจอดต่อคิวเพื่อรอนำเครื่องออกจากท่าอากาศยานบนทางขับ การนำรถโดยสารไปรับ-ส่งผู้โดยสารระหว่างตัวอาคารผู้โดยสารกับอากาศยานที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานระยะไกล และการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยานด้วยรถลากจูงอากาศยาน (Push-back truck) ตลอดจนการทับซ้อนกันของเวลา (Conflict time) ระหว่างเที่ยวบินที่ถูกกำหนดให้เข้าจอดต่อกันบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน อันเนื่องมาจากการเดินทางทางอากาศที่สามารถถูกก่อกวนได้ง่าย ประกอบกับจำนวนเที่ยวบินและจำนวนผู้โดยสารที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของโอกาสในการเกิดความไม่แน่นอนหรือเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดที่อาจทำให้เที่ยวบินหรืออากาศยานที่ใช้บริการท่าอากาศยานอยู่ก่อนหน้าหรือที่กำลังจะเข้าใช้บริการได้รับความล่าช้า (Delay) และส่งผลให้ท่าอากาศยานกลายเป็นคอขวด (Bottle neck) ในระบบการขนส่งและการเดินทางทางอากาศได้ สุดท้ายแล้วท่าอากาศยานก็จะเป็นผู้เสียประโยชน์จากผลกระทบดังกล่าว (ไม่ว่าจะเป็นด้านภาพลักษณ์ตลอดจนความพึงพอใจของผู้โดยสารที่มีต่อท่าอากาศยาน) การหาแนวทางเพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้นจึงเป็นหนทางที่น่าจะมีประสิทธิภาพในการช่วยสร้างภาพลักษณ์ ความเชื่อมั่น และความพึงพอใจให้กับท่าอากาศยาน ในขณะที่การแก้ไขปัญหาโดยการขยายพื้นที่ หรือการเพิ่มจำนวนทรัพยากรเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มสูงมากขึ้นนั้น ก็มีความจำเป็นหากแต่ต้องใช้เวลาในการดำเนินการที่ยาวนาน รวมถึงต้องใช้งบลงทุนที่สูง (ทั้งในส่วนของอากาศยานและท่าอากาศยาน) การใช้งานทรัพยากรเหล่านี้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงเป็นสิ่งสำคัญและควรดำเนินการเป็นอันดับแรก โดยงานวิจัยฉบับนี้จะ

มุ่งเน้นไปที่การใช้ประโยชน์ของหลุมจอดอากาศยานภายในท่าอากาศยาน ซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และถือเป็นหนึ่งในข้อจำกัดความสามารถในการรองรับจำนวนเที่ยวบินของท่าอากาศยานที่สำคัญประการหนึ่ง



รูปที่ 1-3 การคาดการณ์จำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2020 - 2025 กรณีการฟื้นตัวปกติ (สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, 2021)



รูปที่ 1-4 การคาดการณ์จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน ปี ค.ศ. 2020 - 2025 กรณีการฟื้นตัวปกติ (สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, 2021)

ปัญหาในการบริหารจัดการการใช้งานทรัพยากรหลุมจอดอากาศยานให้มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการขาดแคลนทรัพยากรมักถูกกล่าวถึงในวรรณกรรม ภายใต้ชื่อ ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Airport Gate Assignment Problem : AGAP) โดยงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยต้องการออกแบบวิธีการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยานโดยสอดคล้องกับเงื่อนไขและข้อจำกัดต่าง ๆ เพื่อสะท้อนคุณลักษณะที่สำคัญของการจัดสรรที่มักถูกละเลย เช่น ขนาดของหลุมจอดอากาศยานที่เหมาะสมกับขนาดของอากาศยาน และระยะเวลาขั้นต่ำที่ต้องมีระหว่างคู่เที่ยวบิน ตลอดจนการกำหนดและการแบ่งกิจกรรมโดยพิจารณาจากระยะเวลาของเที่ยวบินที่แตกต่างกันออกไปตามประเภทของเที่ยวบิน ควบคู่ไปกับการอาศัยการวางแผนการใช้งานหลุมจอดอากาศยานอย่างมีประสิทธิภาพ อันจะนำไปสู่การลดผลกระทบที่ไม่จำเป็นที่เกิดขึ้นภายในท่าอากาศยาน ผู้วิจัยมีความคาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะสามารถช่วยเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดต่าง ๆ เพื่อรองรับกับอุตสาหกรรมการบินที่จะกลับมาฟื้นตัวและเติบโตขึ้นในอนาคตได้ไม่มากนัก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ออกแบบวิธีการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยาน เพื่อหาคำตอบ (Solution) ที่ให้ค่าคำตอบ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์) ที่เหมาะสมที่สุดตามหลักผลประโยชน์โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- จัดสรรกิจกรรมของเที่ยวบินประเภทกิจกรรมขาเข้า(Arrival), กิจกรรมขาออก(Departure) และกิจกรรมปกติ(Normal) เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล (Remote Aircraft Stand) น้อยที่สุด
- จัดสรรกิจกรรมของเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานโดยมีปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากการขนส่งผู้โดยสารด้วยรถบัส (Buses) ระหว่างอาคารผู้โดยสารกับหลุมจอดอากาศยาน และจากการเคลื่อนย้ายอากาศยานด้วยรถลากจูงอากาศยาน (Push-back truck) ระหว่างหลุมจอดอากาศยานน้อยที่สุด
- จัดสรรกิจกรรมของเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานโดยมีจำนวนของเวลาที่คาดการณ์การจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- ข้อมูลที่ผู้วิจัยนำมาใช้ทดลองสำหรับการหาคำตอบจะเป็นข้อมูลเที่ยวบินจริงที่เข้าใช้บริการที่ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
- ประเภทของเที่ยวบินที่นำมาพิจารณาจะพิจารณาเพียง 3 ประเภทเท่านั้น ได้แก่ เที่ยวบินภายในประเทศ (Domestic Flight) เที่ยวบินระหว่างประเทศ (International Flight) และเที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight)
- ประเภทของหลุมจอดอากาศยานที่นำมาพิจารณามี 2 ประเภท ได้แก่ หลุมจอดอากาศยานประเภทประตูอาคาร (Contact Gate Aircraft Stand) จำนวน 51 หลุมจอด และหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล (Remote Aircraft Stand) สำหรับรองรับผู้โดยสารจำนวน 58 หลุมจอด
- ข้อมูลที่นำมาคำนวณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของรถบัสที่ใช้ในท่าอากาศยานอ้างอิงจากข้อมูลของรถบัสที่องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก) ใช้ ส่วนการคำนวณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของรถลากจูงอากาศยาน (Push-back truck) ถูกอ้างอิงจากข้อมูลของรถบรรทุกขนาดหนัก (18 ล้อ)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP)
- ฮิวริสติกส์ (Heuristic) สำหรับแก้ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ขนาดใหญ่ภายในระยะเวลาที่จำกัด
- ลดจำนวนเที่ยวบินเข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และโอกาสเกิด Conflict time ในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถนำตัวแบบทางคณิตศาสตร์ไปปรับใช้กับท่าอากาศยานอื่น ๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นท่าอากาศยานในประเทศไทย หรือท่าอากาศยานต่างประเทศ
- สามารถจัดตารางสำหรับการเข้าจอดของอากาศยานที่หลุมจอดอากาศยานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- สามารถลดเวลาในการจัดตารางสำหรับการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ หรือเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Airport Gate Assignment Problem: AGAP) ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ (Vehicle Routing Problem : VRP) ทฤษฎีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรองรับเหตุการณ์ไม่คาดคิดในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Robust Gate Assignment problem) การประยุกต์ใช้ปัญหา VRP กับปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรี (the Multiple-Day Music Rehearsal Problems) และการคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้าง ออกแบบ และคำนวณ สำหรับกิจกรรมหรือขั้นตอนต่าง ๆ ภายในปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP)

2.1 ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Airport Gate Assignment Problem: AGAP)

การจัดการทรัพยากรต่าง ๆ ภายในท่าอากาศยานเพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพถือเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยในต่างประเทศหลายคนเล็งเห็น และให้ความสำคัญมาเป็นเวลานานแล้ว ส่วนหนึ่งเป็นผลจากตัวท่าอากาศยานเองซึ่งเป็นทรัพย์สินที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง และมีงานที่ต้องดำเนินการภายในที่ค่อนข้างมาก การจัดการทรัพยากรในส่วนงานต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพจึงถือเป็นสิ่งสำคัญ โดยทรัพยากรที่มีความสำคัญหลัก ๆ ในท่าอากาศยาน ได้แก่ ทางขึ้นลงเครื่องบิน (Runway) ทางขับ (Taxiway) และหลุมจอดอากาศยาน (Gate) แต่สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นศึกษาไปที่การจัดการหลุมจอดอากาศยาน (Gate) รวมไปถึงผลต่าง ๆ ที่เกิดจากการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน ยกตัวอย่างเช่น Tang and Wang (2013) ที่ศึกษาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานในมุมมองของสายการบิน เพราะโดยปกติแล้วการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานจะถูกดำเนินการโดยเจ้าหน้าที่จากท่าอากาศยานเท่านั้น นอกจากนี้ภายในงานวิจัยยังมีการแสดงตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวแปรตัดสินใจเป็นแบบ Integer Programming (IP) และเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปแบบของเครือข่ายการไหล (Flow network) โดยมีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานดังนี้ สมการเงื่อนไขการ

ควบคุมการไหลของตัวแปร (Flow balance) สมการเงื่อนไขที่กำหนดไม่ให้จัดสรรเที่ยวบินที่มีเวลาทับซ้อนกันเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน และสมการเงื่อนไขที่กำหนดให้ทุกเที่ยวบินถูกจัดสรรได้เพียง 1 ครั้ง และเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอดเท่านั้น

ต่อมา Daş et al. (2020) ศึกษาวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่าง ๆ ที่เคยทำมาเกี่ยวกับการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน โดยสามารถแบ่งออกได้ 3 ด้าน คือ ด้านผู้โดยสาร ด้านท่าอากาศยานและสายการบิน และด้านความสามารถในการรองรับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด (Robustness) พร้อมทั้งนำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปแบบของเครือข่ายการไหล (Flow network) โดยมีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานดังนี้ สมการเงื่อนไขการควบคุมการไหลของตัวแปร (Flow balance) สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้เที่ยวบินมีการออกจากจุดเริ่มต้นสมมติ (Starting dummy node) และกลับเข้าจุดจบสมมติ (Ending dummy node) สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้เที่ยวบินถูกจัดสรรเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอด และสมการเงื่อนไขที่กำหนดไม่ให้เที่ยวบินที่มีเวลาทับซ้อนกันถูกจัดสรรเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ซึ่งอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear)

สำหรับ Yu et al. (2017a) ได้ศึกษาการแบ่งเที่ยวบินออกเป็นกิจกรรมย่อย (Arrival, Parking and Departure) เพื่อนำไปพัฒนาร่วมกับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ พร้อมทั้งนำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ โดยมีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานดังนี้ สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้กิจกรรมประเภท Arrival และ Departure ถูกจัดสรรให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอด สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้กิจกรรมประเภท Parking ถูกจัดสรรให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานแบบปกติหรือแบบพื้นที่จอดรอ (Parking apron) และสมการเงื่อนไขที่ควบคุมไม่ให้มีเวลาทับซ้อนกันบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ซึ่งอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) นอกจากนี้ภายในงานวิจัยยังมีการพัฒนาฮิวริสติกส์ Adaptive large neighborhood search มาช่วยในการแก้ปัญหาด้านเวลาของการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาเมื่อมีจำนวนกิจกรรมและหลุมจอดอากาศยานที่สูง

ต่อมา Yu et al. (2017b) ได้ทำการศึกษาปัญหาเพิ่มเติมในส่วนของการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานใหม่ (Gate reassignment) ที่พิจารณาพร้อมกับปัญหาการจัดตารางทางขับ (Taxi Scheduling Problem: TSP) พร้อมทั้งนำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีสมการเงื่อนไขเกี่ยวกับปัญหาการจัดตารางทางขับ (TSP) นอกจากนี้ Yu et al. (2016) ทำการศึกษาการหาคำตอบโดยใช้ฮิวริสติกส์สำหรับวัตถุประสงค์ Minimize Expected Conflict time ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการรองรับเหตุการณ์ไม่คาดคิดในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Robust Gate

Assignment problem) พร้อมนำเสนอรูปแบบสมการของวัตถุประสงค์ดังกล่าวตลอดจนตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปแบบของเครือข่ายการไหล (Flow network) โดยมีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานดังนี้ สมการเงื่อนไขการควบคุมการไหลของตัวแปร (Flow balance) สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้เที่ยวบินเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอด และสมการเงื่อนไขที่ควบคุมไม่ให้มีเวลาทับซ้อนกันบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ซึ่งอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear)

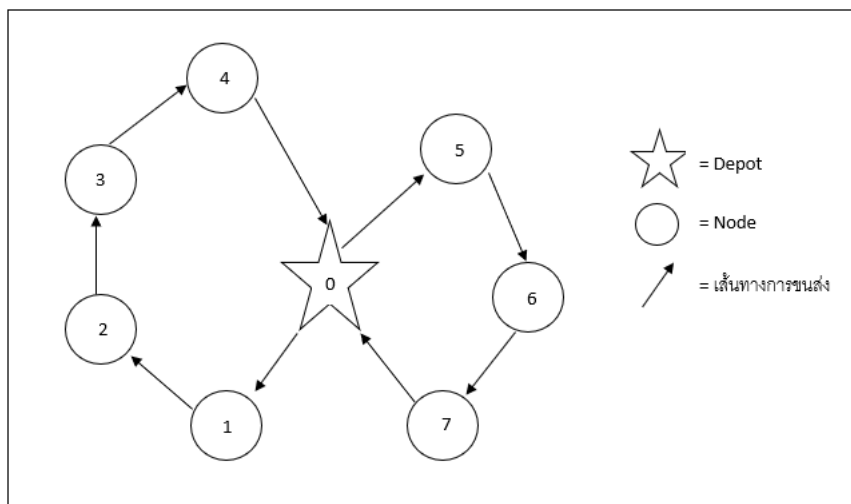
ในส่วนของ Ding et al. (2003) ได้ศึกษาถึงปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานทั่วไป และตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานดังนี้ สมการเงื่อนไขที่กำหนดไม่ให้จัดสรรเที่ยวบินที่มีเวลาทับซ้อนกันเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ซึ่งอยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) และสมการเงื่อนไขที่กำหนดให้ทุกเที่ยวบินถูกจัดสรรได้เพียง 1 ครั้ง และเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอดเท่านั้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยจะเน้นไปที่การใช้ฮิวริสติกส์ในการหาคำตอบของปัญหาขนาดต่าง ๆ โดยได้ทำการพัฒนาฮิวริสติกส์ 3 ตัวสำหรับใช้ในการหาคำตอบ ได้แก่ Simulated Annealing (SA), Interval Exchange Tabu Search (ITS) และ A Hybrid Simulated Annealing with Tabu Search Approach (Hybrid SA with TS) จากนั้นจึงนำคำตอบ และเวลาในการคำนวณของแต่ละฮิวริสติกส์ที่มีขนาดปัญหาเดียวกันมาเปรียบเทียบกัน ถัดมา Feuser and Müller (2019) ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดความแออัดบนภาคพื้นดินโดยจะมุ่งเน้นไปที่การจัดการในขั้นตอนเมื่ออากาศยานจะทำการออกเพื่อให้เหลือเวลารอคิวออกของอากาศยานให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พร้อมด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีสมการเงื่อนไขเกี่ยวข้องกับเวลารอคิว ยกตัวอย่างเช่น สมการเงื่อนไขที่เกี่ยวกับการคำนวณหาเวลารอคิวในแต่ละเที่ยวบิน และสมการเงื่อนไขที่เกี่ยวกับการคำนวณหาเวลาขึ้นบิน (Takeoff time) ของเที่ยวบินโดยประมาณ และสุดท้าย Pternea and Haghani (2019) มีความสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับการจัดสรรเที่ยวบินให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานใหม่ (Gate Reassignment Problem : GRAP) พร้อมด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีสมการเงื่อนไขดังนี้ สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้แต่ละเที่ยวบินถูกจัดสรรเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอด สมการเงื่อนไขที่กำหนดให้ทุกหลุมจอดอากาศยานต้องมีเที่ยวบินเข้าจอดอย่างน้อย 1 เที่ยวบิน และสมการเงื่อนไขสำหรับป้องกันไม่ให้อากาศยานขนาดใหญ่ 2 ลำ เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานใกล้เคียง (ติดกัน) ในเวลาเดียวกัน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยในปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ส่วนใหญ่ ถึงแม้จะมีการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับงานวิจัยของตนเอง (โดยมีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานเท่านั้น) แต่งานวิจัยส่วนใหญ่เหล่านั้นกลับมุ่งเน้นในการ

พัฒนาฮิวริสติกส์เพื่อนำมาใช้งานแทน เนื่องจากปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ถือเป็นปัญหาที่มีความยากและซับซ้อนสูง (NP-Hard) การใช้วิธีแม่นยำตรง (Exact method) ด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์กับปัญหาขนาดใหญ่อาจใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาฮิวริสติกส์เพื่อนำมาใช้ในการหาคำตอบ เนื่องจากใช้เวลาน้อยกว่า แต่อาจได้คำตอบที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าคำตอบที่ได้จากวิธีแม่นยำตรง (Exact method)

2.2 ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (Vehicle Routing Problem : VRP)

ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP) หรือปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถ คือ ปัญหาที่ผู้ขนส่งต้องออกแบบการขนส่งสินค้าให้ผู้รับบริการ โดยปัญหาที่ท้าทาย คือ หากผู้รับบริการมีจำนวนมาก ผู้ขนส่งจะต้องคำนวณหาคำตอบว่าจะใช้พาหนะขนส่งจำนวนเท่าไรและควรจัดลำดับการขนส่งอย่างไร รวมถึงเส้นทางขนส่งแต่ละเส้นทางประกอบด้วยผู้รับบริการรายใดบ้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดต้นทุนการขนส่งต่ำที่สุดและสามารถให้บริการครบทั้งหมดภายใต้ข้อจำกัดบางประการ ซึ่งปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหาที่สนใจ นอกจากนี้ปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถถือเป็นปัญหาที่ได้รับการขยายออกมาจากปัญหาพนักงานขาย (Traveling Salesman Problem: TSP) กล่าวคือ ปัญหาพนักงานขาย (TSP) เป็นปัญหาที่มีเส้นทางขนส่งเพียง 1 เส้นทาง หรือมีพนักงานขายเพียง 1 คน ที่ต้องเดินทางไปยังเมืองต่าง ๆ ทั้งหมด N เมือง โดยมีเงื่อนไขว่าต้องเดินทางผ่านทุกเมืองและต้องเดินทางกลับมาที่จุดเริ่มต้น (เมืองแรกที่เริ่มออกเดินทาง) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ การหาระยะทางรวมของการเดินทางสั้นที่สุด แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นมีเส้นทางขนส่งจำนวน M เส้นทาง (มากกว่า 1 เส้นทาง) หรือมีพนักงานขายจำนวน M คน (มากกว่า 1 คน) โดยให้พนักงานขายเริ่มออกเดินทางจากจุดเดียวกัน พร้อมกับเพิ่มรายละเอียดข้อกำหนดต่าง ๆ เข้าไป เช่น กรอบเวลาของการเดินทางรับ-ส่งสินค้าในแต่ละเมือง หรือข้อจำกัดด้านปริมาณความจุของพาหนะขนส่งสินค้า จากปัญหาพนักงานขายหลายคนก็จะกลายเป็นปัญหาที่เรียกว่าปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้กรอบเวลาที่จำกัด (Vehicle Routing Problem with Time Windows : VRPTW) และปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งภายใต้ความสามารถในการบรรทุก (Capacitated Vehicle Routing Problem : CVRP) โดยตัวอย่างการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 การจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP)

นอกจากนี้ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP) เป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย การนำตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งมาประยุกต์และปรับใช้กับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) อาจสามารถทำให้ผู้ที่สนใจศึกษารวมถึงตัวผู้วิจัยเองสามารถเข้าใจและมองเห็นภาพการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานได้ง่ายขึ้น ประกอบกับเมื่อพิจารณาที่ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งโดยมุ่งเน้นไปที่สมการและอสมการเงื่อนไขพื้นฐานต่าง ๆ ผู้วิจัยกลับพบว่าสมการและอสมการเงื่อนไขบางเงื่อนไขมีความสอดคล้องกับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ในรูปแบบของเครือข่ายการไหล (Flow network) ของงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา เพื่อใช้ในการสร้างตัวแปรตัดสินใจสำหรับการระบุว่าเที่ยวบินใดที่จะทำการเข้าจอดก่อนและหลังเที่ยวบินใดบนหลุมจอดอากาศยานใด ๆ ด้วยเหตุนี้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (สมการและอสมการเงื่อนไขที่มีความสอดคล้อง) จึงมีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์และปรับใช้กับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ภายในงานวิจัยฉบับนี้ สำหรับสมการและอสมการเงื่อนไขที่มีความสอดคล้องสามารถแสดงได้ดังนี้

เซต และพารามิเตอร์ (Sets and Parameters)

N คือ จำนวนจุดทั้งหมด (1 = คลังสินค้า)

K คือ จำนวนรถทั้งหมด

C_k คือ ความจุของรถ k

D_{ij} คือ ระยะทางจากจุด i ไปยังจุด j

Q_i คือ ปริมาณความต้องการที่จุด i

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

X_{ijk} $\left\{ \begin{array}{l} \text{เป็น 1 ; เมื่อเส้นทางจากจุด } i \text{ ไป } j \text{ ถูกเลือกโดยรถ } k \\ \text{เป็น 0 ; กรณีอื่น ๆ} \end{array} \right.$

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K D_{ij} X_{ijk} \quad (2-1)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad j = 2, \dots, N ; i \neq j \quad (2-2)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1 \quad i = 2, \dots, N ; i \neq j \quad (2-3)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ipk} - \sum_{j=1}^N X_{pjk} = 0 \quad p = 1, \dots, N ; k = 1, \dots, K \quad (2-4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Q_i X_{ijk} \leq C_k \quad k = 1, \dots, K \quad (2-5)$$

$$\sum_{j=2}^N X_{1jk} \leq 1 \quad k = 1, \dots, K \quad (2-6)$$

$$\sum_{i=2}^N X_{ilk} \leq 1 \quad k = 1, \dots, K \quad (2-7)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (2-8)$$

จากสมการข้อกำหนดเงื่อนไขสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมการที่ (2-1) คือ สมการวัตถุประสงค์มุ่งเน้นให้ได้ระยะทางสั้นที่สุด

สมการที่ (2-2) คือ การกำหนดให้จุด j รับการเข้าของจุด i ได้เพียง 1 ครั้ง

สมการที่ (2-3) คือ การกำหนดให้จุด i ไปยังจุด j ได้เพียง 1 ครั้ง

สมการที่ (2-4) คือ เมื่อวิ่งเข้าจุดใด ๆ แล้วต้องวิ่งออกจากจุดนั้น ๆ (Flow balance)

สมการที่ (2-5) คือ การกำหนดไม่ให้บรรทุกเกินความจุ

สมการที่ (2-6) คือ การกำหนดให้รถ k วิ่งออกจากคลังสินค้าได้เพียง 1 ครั้ง

สมการที่ (2-7) คือ การกำหนดให้รถ k วิ่งเข้าจากคลังสินค้าได้เพียง 1 ครั้ง

สมการที่ (2-8) คือ การกำหนดขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจ X

2.3 วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบจำ III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III: NSGA-III)

Deb and Jain (2013) ได้นำเสนอวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบจำ III (NSGA-III) ซึ่งเป็นวิธีการที่มีเป้าหมายในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์โดยใช้หลักการทางพันธุกรรมเข้ามาช่วยในการพัฒนาคำตอบ จากนั้นจึงนำคำตอบ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์) ที่ได้มาเปรียบเทียบกับทั้งหมดตามหลักการการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ และตามหลักการการจัดลำดับแบบไม่ถูกรอบจำเพื่อหาผลคำตอบ (Solution) ที่มีค่าความแข็งแรงสูง หรือให้คำตอบที่ดี (คำตอบที่ไม่ถูกรอบจำจากคำตอบใด) ทั้งนี้ ลักษณะหรือขั้นตอนการทำงานของวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบจำ III สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอน ต่าง ๆ โดยสรุปได้ดังนี้ ขั้นตอนการสร้างจุดอ้างอิง (Reference Point) ขั้นตอนการสร้างกลุ่มประชากรเริ่มต้น ขั้นตอนการสร้างกลุ่มประชากรรุ่นลูกโดยการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover) และวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) ขั้นตอนการคัดเลือกกลุ่มคำตอบ (โดยการค้นหากลุ่มคำตอบที่มีระยะทางตั้งฉากกับเส้นอ้างอิงสั้นที่สุด) และขั้นตอนการจัดเก็บกลุ่มคำตอบที่ดี

2.3.1 ขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกรอบจำ III

เราสามารถแบ่งกระบวนการขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม NSGA-III หลัก ๆ ได้ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการเริ่มต้น ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ และขั้นตอนการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม โดยแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

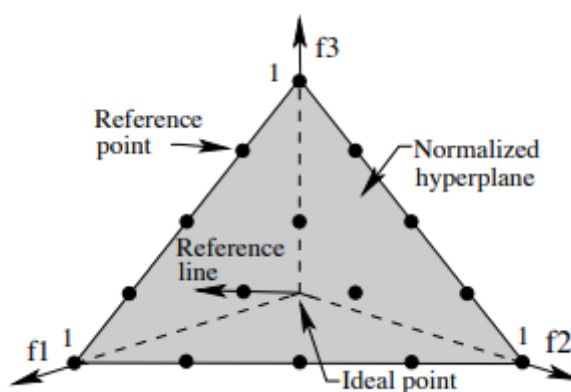
2.3.1.1 ขั้นตอนการเริ่มต้น

- 1) การสร้างจุดอ้างอิง (Reference point) ที่มีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ โดยมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ค่าศูนย์ในทุกะนาบวัตถุประสงค์ สามารถสร้างได้จากหลายวิธีไม่ว่าจะเป็น การสร้างจุดอ้างอิงด้วยวิธีซิมเพล็กซ์แลตทิซดีไซน์ (Simplex Lattice Design) โดยจะเป็นการสร้างจุดอ้างอิงที่มีขนาดเมทริกซ์เท่ากับ จำนวนประชากรเริ่มต้น (N) \times จำนวนวัตถุประสงค์ (M) หรือการสร้างจุดอ้างอิงด้วยวิธีการของ Das and Dennis (1998) ซึ่งเป็นวิธีการสร้างจุดอ้างอิงด้วยการหาจำนวนจุดอ้างอิง (H) ตามสมการที่ (2-9) แล้วนำจำนวนจุดอ้างอิงไปสร้างจุดอ้างอิงบนระนาบที่นอร์มอลไลซ์ (Normalized hyper-plane) ดังรูปที่ 2-2

$$H = \frac{(M + p - 1)!}{d!(M - 1)!} \quad (2-9)$$

โดยที่ M คือ จำนวนวัตถุประสงค์

p คือ จำนวนจุดอ้างอิงที่อยากให้มีในแต่ละแกนวัตถุประสงค์



รูปที่ 2-2 การสร้างจุดอ้างอิง 15 จุด บนระนาบที่นอร์มอลไลซ์ เมื่อ $M = 3$ และ $p = 4$
(Deb & Jain, 2013)

ทั้งนี้ แต่ละวิธีในการหาจุดอ้างอิงจะมีความแตกต่างกันในส่วนของจำนวนจุดอ้างอิงที่เกิดขึ้นแต่ไม่ว่าจะสร้างด้วยวิธีการสร้างจุดอ้างอิงแบบใดก็ตาม ล้วนแต่ทำให้จุดอ้างอิงที่สร้างขึ้นมานั้นมีจุดตัดแกนเพียง 1 จุดในแต่ละแกนวัตถุประสงค์เท่านั้น

นอกเหนือจากการสร้างจุดอ้างอิงสิ่งที่สำคัญลำดับถัดมาคือการสร้างชุดคำตอบหรือสตริงคำตอบเริ่มต้นนั้น คือ การสร้างแนวคิดหรือวิธีในการแปลงข้อมูลเพื่อการเข้ารหัส (Encoding) และการถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ของปัญหาที่เราสนใจให้อยู่ในรูปแบบของยีนและโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญตัวหนึ่งต่อคุณภาพของคำตอบที่จะได้ โดยทั่วไปแล้วการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซมเราอาจจะใช้โครงสร้าง 3 ลักษณะ คือ

- โครงสร้างแบบไบนารี (Binary Encoding) : ลักษณะโครงสร้างแบบไบนารีจะมีค่าของยีนบนโครโมโซมเป็น 0 หรือ 1 ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่างโครงสร้างโครโมโซมแบบไบนารี

โครโมโซมที่1	0	1	1	0	0	1	1	0
โครโมโซมที่2	1	0	0	1	1	0	0	1

- โครงสร้างแบบการวางสลับเปลี่ยนลำดับ (Permutation Encoding) : ค่าทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะเป็นค่าของจำนวนนับที่ใช้แทนตำแหน่งหรือลำดับ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างโครงสร้างโครโมโซมแบบการวางสลับเปลี่ยนลำดับ

โครโมโซมที่1	7	8	6	3	5	1	2	4
โครโมโซมที่2	1	2	3	4	5	6	7	8

- โครงสร้างแบบการใช้ค่าของตัวแปร (Value Encoding) : ค่าทุกตำแหน่งของยีนในโครโมโซมจะมีค่าบางค่าที่สามารถเชื่อมโยงไปยังปัญหาได้ เช่น ตัวอักษร จำนวนจริง หรืออื่น ๆ ซึ่งลักษณะของโครโมโซมนี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ตัวอย่างโครงสร้างโครโมโซมแบบการใช้ค่าของตัวแปร

โครโมโซมที่1	2.1	1.8	4.5	9.6	2.6	3.2	8.7	7.5
โครโมโซมที่2	a	o	i	r	e	j	u	m

- 2) การสร้างชุดคำตอบหรือสตริงคำตอบเริ่มต้น (P_t) อันดับแรกเราจะต้องสร้างชุดคำตอบที่ถูกต้องตามเงื่อนไขหรือข้อกำหนดต่าง ๆ (Feasible solution) ให้อยู่ในรูปแบบของโครโมโซม โดยเงื่อนไขหรือข้อกำหนดจะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหาที่เราสนใจ จากนั้นทำการสร้างชุดคำตอบให้ได้จำนวนเท่ากับขนาดของประชากรที่ได้กำหนดไว้ (Population size: N)
- 3) สร้างเซตว่างสำหรับเก็บชุดคำตอบที่ดี ($E_0 = \emptyset$)

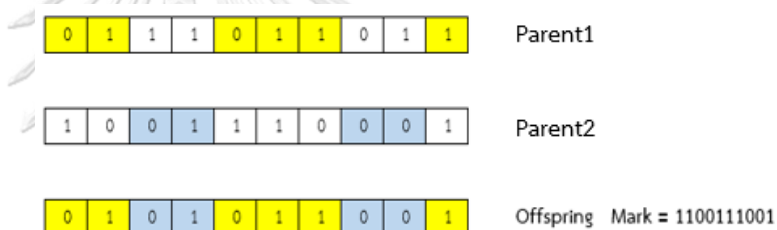
2.3.1.2 ขั้นตอนการพัฒนาคำตอบ

- 1) สร้างเซตว่างสำหรับจัดเก็บชุดคำตอบที่ผ่านการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ ($S_t = \emptyset$)
- 2) ทำการพัฒนาและปรับปรุงชุดคำตอบด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม โดยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover) และวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) ของชุดคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent: P_t)

เพื่อให้ได้ชุดคำตอบรุ่นลูก (Offspring: Q_t) จะมีจำนวนชุดคำตอบเท่ากับขนาดของประชากรที่ได้กำหนดไว้ (Population size: N)

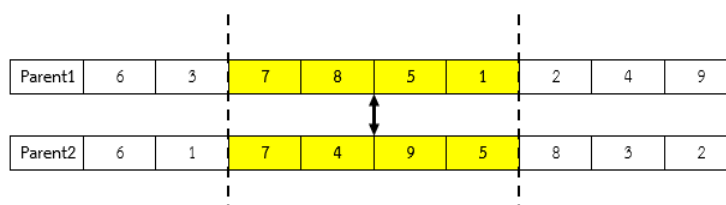
2.1 การพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover) เป็นกระบวนการที่ดำเนินการร่วมกันของ 2 โครโมโซม คือ โครโมโซมพ่อ (Parent1) และโครโมโซมแม่ (Parent2) เพื่อทำการถ่ายทอดลักษณะหรือค่าของยีนให้กับโครโมโซมใหม่ (โครโมโซมลูก) สำหรับวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์มีหลากหลายวิธี ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการยกตัวอย่างดังต่อไปนี้

ก. การแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ Uniform เป็นวิธีการที่ไม่กำหนดจำนวนจุดตัดที่ใช้ตัดต่อโครโมโซมพ่อและแม่ แต่จะทำการสุ่มหน้าตา (Mask) จากนั้นอาศัยหน้าตาที่สุ่มขึ้นในการเลือกแต่ละค่าบนตำแหน่งยีนสำหรับโครโมโซมรุ่นลูก ดังรูปที่ 2-3



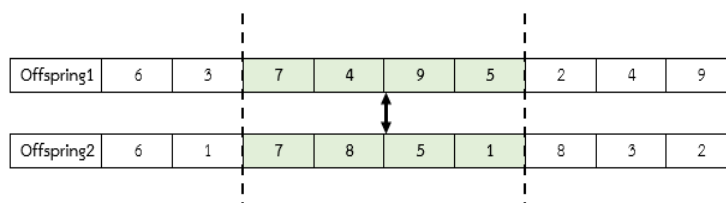
รูปที่ 2-3 การแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ Uniform

ข. การแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ Partial Mapped Crossover (PMX) เป็นวิธีการแลกเปลี่ยนโดยการสุ่มเลือกจุดตัดมา 2 จุด (แทนจุดตัดด้วยสัญลักษณ์ “|”) ซึ่งการตัดในโครโมโซมพ่อและแม่ต้องมีจุดตัดที่ตรงกัน ตามรูปที่ 2-4



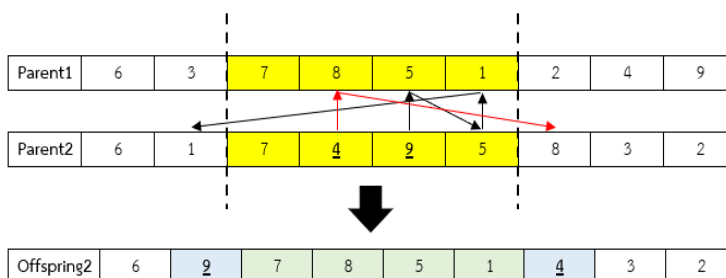
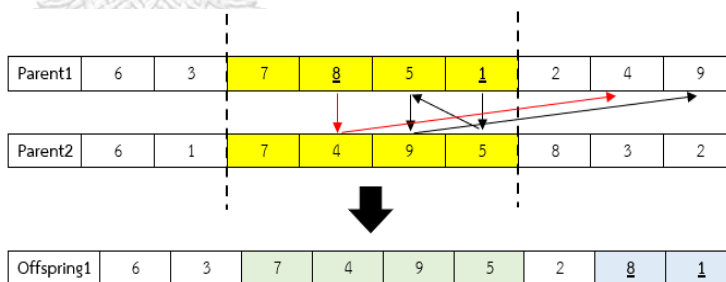
รูปที่ 2-4 การกำหนดจุดตัดของการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ PMX

จากนั้นทำการแลกเปลี่ยนค่าของยีนในช่วงการตัดของโครโมโซม พ่อ (Parent1) และโครโมโซมแม่ (Parent2) จะทำให้ได้โครโมโซมรุ่นลูก ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 โครโมโซมลูกที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนยีนที่อยู่ในช่วงการตัดของโครโมโซมพ่อแม่

ต่อมาทำการปรับปรุงโครโมโซมรุ่นลูกเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นไปได้ เนื่องจากการแลกเปลี่ยนยีนอาจทำให้ค่าของยีนนอกช่วงการตัดซ้ำกับค่าของยีนในช่วงการตัดได้ โดยเราจะพิจารณาว่าขาดตัวเลขใดในแต่ละโครโมโซมรุ่นลูก เช่น Offspring1 ไม่มีเลข 1 และ 8 ส่วน Offspring2 ไม่มีเลข 4 และ 9 จากนั้นทำการพิจารณาตัวเลขดังกล่าวในช่วงการตัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 การปรับปรุงโครโมโซมรุ่นลูกเพื่อให้เป็นคำตอบที่เป็นไปได้

ผลจากการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ Partial Mapped Crossover (PMX) ของโครโมโซมพ่อ (Parent1) และโครโมโซมแม่ (Parent2) ส่งผลให้ได้ผลเป็นโครโมโซมรุ่นลูก (Offspring1 และ Offspring2) ตามรูปที่ 2-7

Parent1	6	3	7	8	5	1	2	4	9
Parent2	6	1	7	4	9	5	8	3	2

Offspring1	6	3	7	4	9	5	2	8	1
Offspring2	6	9	7	8	5	1	4	3	2

รูปที่ 2-7 ผลการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์แบบ PMX

2.2 การพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการเชิงพันธุกรรมที่จะสร้างสมาชิกรุ่นลูก ซึ่งการกลายพันธุ์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดลักษณะใหม่ ๆ และทำให้เกิดวิวัฒนาการ โดยจะมีค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation Probability) เป็นตัวกำหนดโอกาสที่จะเกิดการกลายพันธุ์ขึ้น โดยตัวอย่างวิธีการกลายพันธุ์มีดังนี้

ก. การกลายพันธุ์ของโครโมโซมแบบไบนารี (Binary Mutation)

ขั้นตอนการกลายพันธุ์จะเริ่มจากการสุ่มตำแหน่งที่ต้องการจะกลายพันธุ์ และเมื่อได้ตำแหน่งกลายพันธุ์แล้วจะทำการเปลี่ยนแปลงค่า ณ ตำแหน่งที่สุ่มจาก 1 เป็น 0 หรือจาก 0 เป็น 1 ดังรูปที่ 2-8

0	1	1	1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	1	0	1	1	1	0	1

รูปที่ 2-8 ตัวอย่างการกลายพันธุ์ของโครโมโซมแบบไบนารี

ข. การกลายพันธุ์แบบสลับตำแหน่ง (Reciprocal Exchange Mutation) เป็นวิธีการสลับตำแหน่งที่ทำการเปลี่ยนแปลงยีน 2 ยีน โดยเริ่มจากการสุ่มเลือกโครโมโซมในรุ่นพ่อแม่ 1 ตัวขึ้นมาเป็นโครโมโซมต้นแบบ เมื่อได้โครโมโซมตัวต้นแบบแล้ว จึงทำการสุ่ม

ตำแหน่งจำนวน 2 ตำแหน่ง แล้วทำการสลับค่าของทั้ง 2 ตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม ดังรูปที่ 2-9

Parent1	1	10	6	8	7	2	4	9	3	5
Offspring1	1	10	6	8	3	2	4	9	7	5

รูปที่ 2-9 ตัวอย่างการกลายพันธุ์แบบสลับตำแหน่ง

- 3) นำชุดคำตอบรุ่นพ่อแม่ (P_t) มารวมเข้ากับชุดคำตอบรุ่นลูก (Q_t) จากนั้นเมื่อนำมารวมกันแล้วชุดคำตอบทั้งหมดที่ได้จะถูกเรียกว่า R_t โดยมีจำนวนชุดคำตอบเท่ากับ $2N$ ($R_t = P_t \cup Q_t$)
- 4) ทำการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของชุดคำตอบทั้งหมด (R_t) และทำการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำโดยการแบ่งออกเป็นฟรอนเทียร์ระดับต่าง ๆ $F_t = \{ F_1, F_2, \dots \}$ จากนั้นทำการจัดเก็บทุกคำตอบของฟรอนเทียร์แต่ละระดับเอาไว้ภายในเซต S_t โดยเริ่มจากฟรอนเทียร์ระดับ 1 (F_1) ไปจนกระทั่งจำนวนชุดคำตอบใน S_t จะมีจำนวนเท่ากับ N หรือมีจำนวนชุดคำตอบมากกว่า N เป็นครั้งแรก โดยเราจะเรียกฟรอนเทียร์ระดับสุดท้ายภายในเซต S_t ว่าเป็นฟรอนเทียร์ระดับ l (F_l) เพราะฉะนั้นชุดคำตอบใดที่มีระดับฟรอนเทียร์ตั้งแต่ $l+1$ เป็นต้นไปจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ทั้งนี้ F_1 เป็นฟรอนเทียร์ของชุดคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลย
- 5) ทำการเลือกชุดคำตอบเพื่อนำไปเป็นพ่อแม่และเกิดการพัฒนาต่อในเจนเนอเรชันถัดไป (P_{t+1}) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ถ้าจำนวนชุดคำตอบในเซต S_t มีจำนวนเท่ากับ N ($|S_t| = N$) ชุดคำตอบใหม่ที่จะนำไปเป็นชุดคำตอบพ่อแม่ในเจนเนอเรชันถัดไป คือ S_t ($P_{t+1} = S_t$) จากนั้นดำเนินการตามข้อที่ 6

กรณีที่ 2 ถ้าจำนวนชุดคำตอบในเซต S_t มีจำนวนมากกว่า N ($|S_t| > N$) ให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

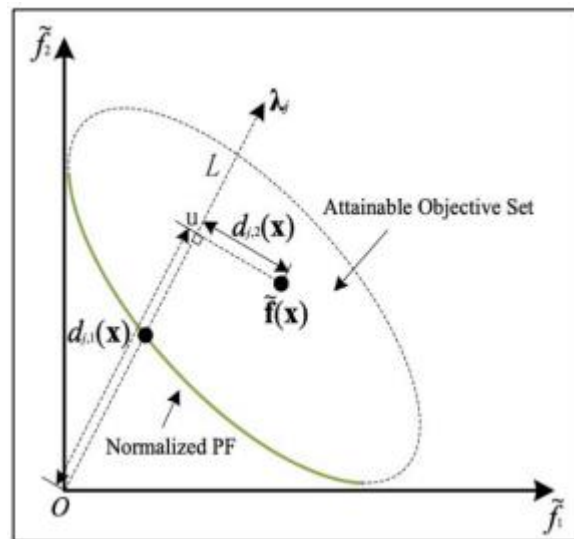
- I. ทำการนำชุดคำตอบทุกตัวตั้งแต่ฟรอนเทียร์ระดับ 1 ถึง $l-1$ (F_1, \dots, F_{l-1}) เข้าไปเก็บในเซต P_{t+1} ก่อน ($P_{t+1} = \bigcup_{i=1}^{l-1} f_i$)
- II. จำนวนชุดคำตอบที่ยังขาดอยู่ ($N - |P_{t+1}|$) จะถูกทำการเลือกมาจาก F_l

- III. ทำการจัดเก็บค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยการนำค่าแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของทุกชุดคำตอบ (R_t) มาเปรียบเทียบกับ จากนั้นทำการกำหนดค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ (z_i^*) ในกรณีการหาค่าที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ $z_i^* = \min \{f_i(x)\}$ หรือการหาค่าที่เหมาะสมที่มากที่สุดในแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ $z_i^* = \max \{f_i(x)\}$ จากนั้นทำการ Normalization ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทุกชุดคำตอบ โดยใช้สมการที่ (2-10) (ตรัยรัตน์ เกิดโภคทรัพย์, 2560)

$$\text{Normalized } f_i = \bar{f}_i = \frac{f_i - z_i^*}{(f_{i(\max)} + 0.0005) - z_i^*} \quad (2-10)$$

เมื่อ f_i คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ของประชากรปัจจุบัน
 $f_{i(\max)}$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ i ที่มีค่ามากที่สุดในรอบปัจจุบัน
 z_i^* คือ ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ที่ i

- IV. ดำเนินการหาความสัมพันธ์แต่ละกลุ่มคำตอบเทียบกับจุดอ้างอิง (Associate Reference Point) โดยจะเป็นการนำกลุ่มคำตอบ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการ Normalization) ของชุดคำตอบทั้งหมดไปดำเนินการหาความสัมพันธ์เทียบกับจุดอ้างอิงทุกจุดบนระนาบวัตถุประสงค์ (Hyperplane) ซึ่งการหาความสัมพันธ์นี้ คือ การคำนวณหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุดระหว่างกลุ่มคำตอบหรือจุดคำตอบ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการ Normalization) กับ เส้นอ้างอิง (Reference line) ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการสร้างเส้นอ้างอิงโดยลากเส้นจากจุดเริ่มต้น (Origin Point) ผ่านไปยังจุดอ้างอิงจนกระทั่งถึงตำแหน่งที่ทำให้เกิดมุมตั้งฉากกับกลุ่มคำตอบหรือจุดคำตอบ ($d_{j,1}(x)$) จากนั้นจึงทำการคำนวณหาระยะทางตั้งฉากจากเส้นอ้างอิงไปยังจุดคำตอบ ($d_{j,2}(x)$) ต่อไป ดังรูปที่ 2-10 ส่วนสมการสำหรับคำนวณระยะทางตั้งฉากจะถูกแสดงอยู่ในสมการที่ (2-11) และสมการที่ (2-12)



รูปที่ 2-10 การหาระยะทางตั้งฉากระหว่างเส้นอ้างอิงกับจุดคำตอบ (Yuan et al., 2014)

$$d_{j,1}(x) = \|f(x)^T \times \lambda_j\| / \|\lambda_j\| \quad (2-11)$$

$$d_{j,2}(x) = \|f(x) - d_{j,1}(x) \times (\lambda_j / \|\lambda_j\|)\| \quad (2-12)$$

เมื่อ $d_{j,1}(x)$ คือ ระยะทางจากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่เกิดมุมตั้งฉากกับจุดคำตอบ

$d_{j,2}(x)$ คือ ระยะทางตั้งฉากระหว่างเส้นอ้างอิงกับจุดคำตอบ

λ_j คือ จุดอ้างอิงที่ j

$f(x)^T$ คือ การ Transpose ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

$\| \|$ คือ ขนาดของเวกเตอร์

$f(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

- V. ให้ทำการนับจำนวนกลุ่มคำตอบที่มีความสัมพันธ์กับแต่ละจุดอ้างอิง (ρ_r)
- VI. ทำการพิจารณาเลือกจุดอ้างอิงที่มีค่า ρ_r น้อยที่สุด แต่หากมีหลายจุดอ้างอิงที่มีค่า ρ_r เท่ากัน ให้ทำการสุ่มเลือกจุดอ้างอิง
- VII. ถ้าหาก $\rho_r = 0$ (กลุ่มคำตอบของแต่ละชุดคำตอบที่อยู่ใน F_1 ถึง F_{l-1} ไม่มีกลุ่มคำตอบใดที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r) โดยสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

กรณีที่1 ไม่ทำการพิจารณาจุดอ้างอิง r ในเจนเนอร์เรชันนี้ เนื่องจากหากพิจารณาที่กลุ่มคำตอบใน F_l แล้ว ไม่มีกลุ่มคำตอบใดใน F_l เลยที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r

กรณีที่2 ถ้าหากใน F_l มีเพียง 1 กลุ่มคำตอบ ที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r ให้ทำการเพิ่มกลุ่มคำตอบนั้นเข้าไปใน P_{t+1} แล้วเพิ่มค่าหนึ่งหน่วยให้กับ ρ_r

กรณีที่3 ถ้าหากใน F_l มีมากกว่า 1 กลุ่มคำตอบ ที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r ให้ทำการเลือกคำตอบที่มีระยะทางตั้งฉากสั้นที่สุดแล้วเพิ่มกลุ่มคำตอบนั้นเข้าไปใน P_{t+1} แล้วเพิ่มค่าหนึ่งหน่วยให้กับ ρ_r

VIII. ถ้าหาก $\rho_r > 0$ (กลุ่มคำตอบของแต่ละชุดคำตอบที่อยู่ใน F_1 ถึง F_{l-1} มีกลุ่มคำตอบที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r อย่างน้อยหนึ่งกลุ่มคำตอบ) ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

กรณีที่1 ถ้าหากใน F_l มีเพียง 1 กลุ่มคำตอบ มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r ให้ทำการเพิ่มกลุ่มคำตอบนั้นเข้าไปใน P_{t+1} แล้วเพิ่มค่าหนึ่งหน่วยให้กับ ρ_r

กรณีที่2 ถ้าหากใน F_l มีมากกว่า 1 กลุ่มคำตอบ ที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r ให้ทำการสุ่มเลือกคำตอบแล้วเพิ่มกลุ่มคำตอบนั้นเข้าไปใน P_{t+1} แล้วเพิ่มค่าหนึ่งหน่วยให้กับ ρ_r

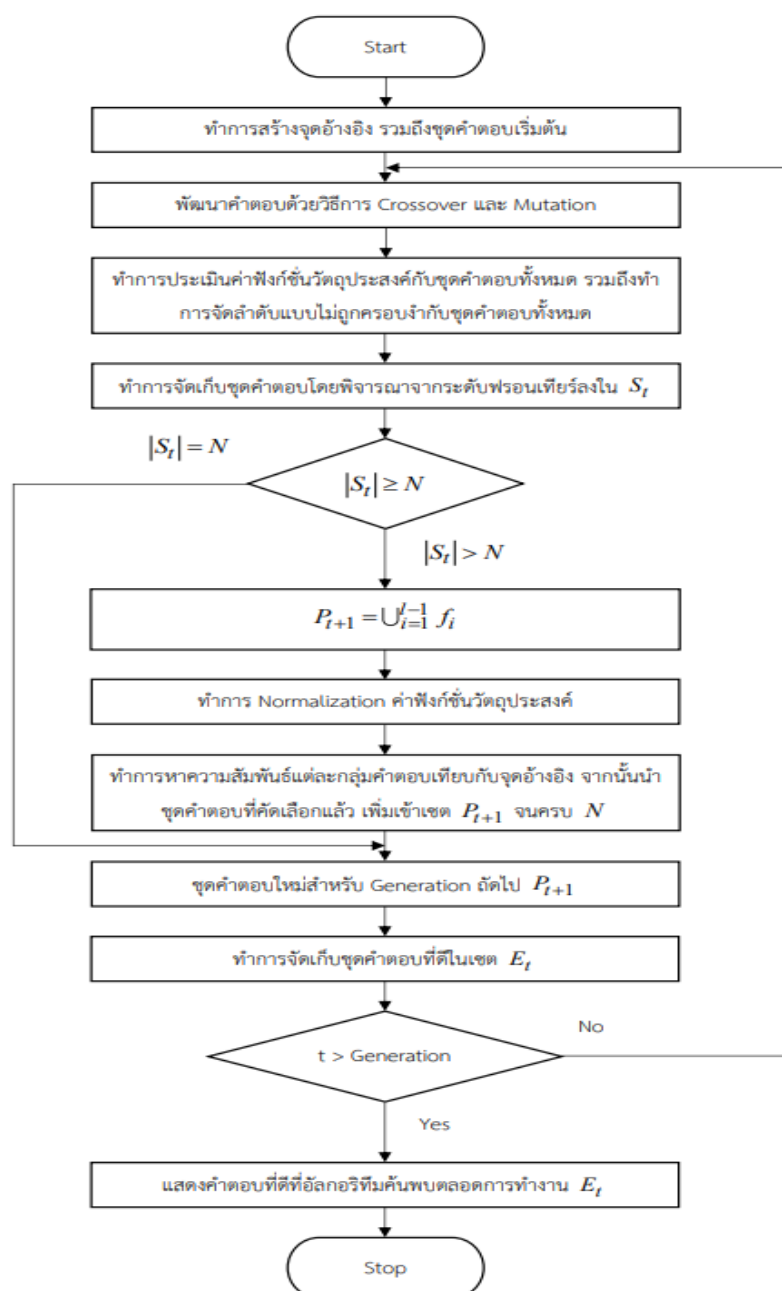
IX. ดำเนินการในขั้นตอนที่ VI ถึง VIII ซ้ำจนกระทั่งได้จำนวนชุดคำตอบภายในเซต P_{t+1} เท่ากับ N เพื่อเป็นชุดคำตอบรุ่นใหม่สำหรับเจนเนอร์เรชันถัดไป จากนั้นจึงดำเนินการขั้นตอนต่อไป

- 6) ทำการอัปเดตชุดคำตอบที่ดี (Elite) โดยการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่อยู่ในเซต E_t กับค่าคำตอบภายในเซต P_{t+1} ที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงเดียวกัน โดยทำการเลือกชุดคำตอบที่มีระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุดเริ่มต้น (Ideal Point) กับกลุ่มคำตอบเข้าไปในเซตของกลุ่มคำตอบที่ดีใหม่ โดย $E_{t+1}(j) = \min_{1 \leq i \leq |\pi_j|} d(\pi_{i,j})$ เมื่อ $d(\pi_{i,j})$ คือ ระยะห่างระหว่างจุดเริ่มต้น (Ideal Point) และกลุ่มคำตอบ i ที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง r_j ต่อมาให้ทำการเพิ่มเจนเนอร์เรชัน โดย $t = t + 1$ แล้วจากนั้นกลับไปดำเนินการในขั้นตอนที่ 1 ของการพัฒนาคำตอบต่อไป

2.3.1.3 ขั้นตอนการหยุดการทำงานของอัลกอริทึม

เมื่อทำการพัฒนาคำตอบจนครบตามจำนวนเจนเนอเรชันที่ได้กำหนดไว้ อัลกอริทึมจะหยุดการทำงานและแสดงคำตอบที่อัลกอริทึมค้นพบตลอดการทำงาน จากนั้นคำตอบที่ค้นพบจะถูกนำไปประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมต่อไป

2.3.2 แผนผังขั้นตอนการทำงานของวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III



รูปที่ 2-11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ NSGA-III

2.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization)

ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ คือ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ขึ้นไป ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัตถุประสงค์ทั้งหมดไปพร้อม ๆ กัน โดยวัตถุประสงค์เหล่านี้มักมีความขัดแย้งบางอย่างต่อกัน ส่งผลให้ เมื่อมีวัตถุประสงค์หนึ่งมีค่าคำตอบที่ดีที่สุดอาจทำให้ค่าคำตอบของอีกวัตถุประสงค์ไม่ใช่ค่าคำตอบที่ดีที่สุดด้วยเหตุนี้ จึงเป็นไปได้ที่จะหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดให้กับทุกวัตถุประสงค์ที่สนใจไปพร้อม ๆ กัน การหาค่าคำตอบที่ดีที่สุดจึงอยู่ในรูปแบบของการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะเป็นการให้ค่าที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้สำหรับทุกวัตถุประสงค์ในเวลาเดียวกัน โดยจะถูกเรียกว่า ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto-optimal solution)

2.4.1 หลักการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าคำตอบที่ไม่มีค่าคำตอบใดให้ค่าที่ดีกว่าเมื่อนำมาเทียบกับในแต่ละวัตถุประสงค์ (ไม่ถูกครอบงำ) ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ต้องการหาค่าที่น้อยที่สุดของทุกวัตถุประสงค์ (Minimization) สำหรับปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์ สามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ (2-13)

$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\} \quad (2-13)$$

เมื่อ k คือ จำนวนวัตถุประสงค์ที่สนใจ

x คือ เวกเตอร์คำตอบของปัญหาการหาค่าที่น้อยที่สุดที่พิจารณา

$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ โดยมีจำนวนตัวแปรตัดสินใจเท่ากับ n

$f_i(x)$ คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ $i = \{1, 2, \dots, k\}$

โดยส่วนสำคัญที่จะทำให้ได้ค่าน้อยที่สุดของทุกวัตถุประสงค์นั้น คือการหาคำตอบ (solution) x^* ที่สามารถทำให้ค่าแต่ละวัตถุประสงค์ $f_i(x)$ มีค่าน้อยที่สุดไปพร้อม ๆ กันได้ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-14)

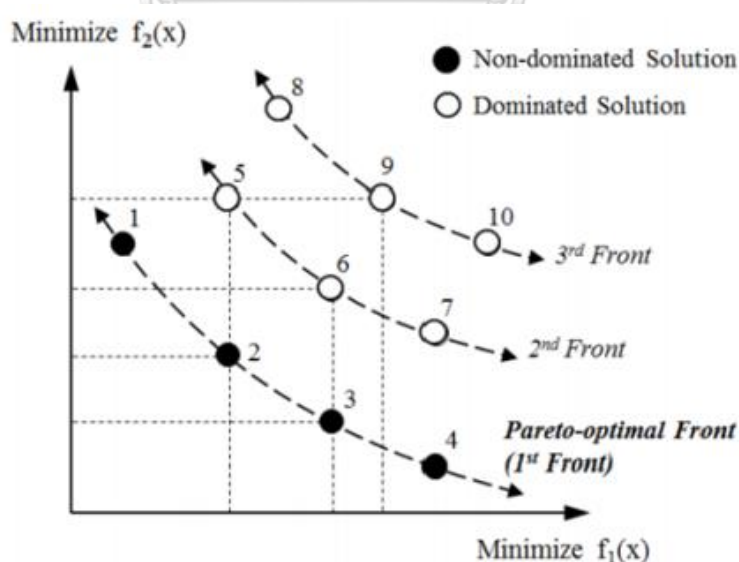
$$\text{Minimize } f(x) = \{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*)\} \quad (2-14)$$

สำหรับการที่จะระบุว่าคำตอบ (solution) x ใด ๆ จะให้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด หรือน้อยที่สุดในทุกวัตถุประสงค์ตามสมการที่ (2-13) ได้นั้น จะต้องทำการตรวจสอบก่อนว่าคำตอบ (solution) x ครอบงำหรือให้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าคำตอบ (solution) y ใด ๆ หรือไม่ โดยสามารถตรวจสอบได้จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

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

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

ถ้าหากคำตอบ (solution) x^* ไม่ถูกครอบงำโดยคำตอบอื่น ๆ และเป็นคำตอบที่ให้ค่าดีเท่า ๆ กัน เราจะเรียกว่า คำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal) และเมื่อนำคำตอบที่ดีที่สุดทุกคำตอบมา รวมกัน จะเรียกสมาชิกคำตอบที่ดีที่สุดทุกตัวว่า เซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Pareto Optimal set) โดยเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดนี้จะเป็นตัวกำหนดพื้นที่ขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด หรือ ขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier) ซึ่งขอบเขตนี้จะถูกสร้างมาจากสมาชิกแต่ละตัวในเซตกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด โดยมีลักษณะเป็นเส้นโค้งที่ลากผ่านจุดคำตอบ (สมาชิกแต่ละตัว) ที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตบนระนาบวัตถุประสงค์ ซึ่งจุดคำตอบที่อยู่บนเส้นนี้ทั้งหมดจะข่มจุดคำตอบที่เหลือ ดังแสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 แผนภาพแสดงลำดับเหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตแบบ 2 วัตถุประสงค์ (Goldberg, 1989)

รูปที่ 2-12 แสดงถึงจุดคำตอบต่าง ๆ บนระนาบวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ 2 วัตถุประสงค์ โดยจุดคำตอบที่ 1 ถึง 4 เป็นคำตอบที่ไม่มีการครอบงำซึ่งกันและกัน และไม่ถูกครอบงำจากจุดคำตอบใด ๆ ดังนั้นจุดคำตอบที่ 1 ถึง 4 จึงถูกจัดให้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต โดยจะตั้งอยู่บนขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Front ที่1)

2.4.2 การกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับคำตอบด้วยการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ

การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) หรือตัวชี้วัดคุณภาพคำตอบ คือ การพิจารณารวมถึงการประเมินด้านคุณภาพของคำตอบที่ได้รับมา โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ทราบว่าแต่ละคำตอบที่รับมานั้นเป็นคำตอบที่ดีหรือแย่เพียงใดเมื่อนำไปเทียบกับคำตอบอื่น ๆ ซึ่งค่าความแข็งแรงนี้จะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาจัดเก็บคำตอบที่ดีที่สุดจากการค้นหาคำตอบ เพื่อนำไปคัดเลือกคำตอบที่จะมาเป็นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป ในแต่ละรอบการดำเนินการค้นหาคำตอบ (Generation) โดยภายในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการกำหนดค่าความแข็งแรงแบบ การจัดอันดับแบบพาเรโต (Pareto Ranking Approach) ซึ่งจะเป็นการจัดอันดับภายใต้หลักการการครอบงำเชิงพาเรโต และความแข็งแรงของแต่ละคำตอบจะถูกกำหนดด้วยอันดับที่ได้รับ ทั้งนี้ การจัดอันดับภายใต้หลักการการครอบงำเชิงพาเรโตที่ใช้ คือ การจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting) หรือวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก (Goldberg's Ranking)

การจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ หรือวิธีการจัดอันดับของโกลด์เบิร์ก จะทำการพิจารณาที่กราฟค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของคำตอบทั้งหมด โดยคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใด ๆ เลย หรือคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต ที่อยู่บนขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier) อันดับที่1 (Front ที่1) จะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มคำตอบอันดับที่ 1 จากนั้นให้ตัดคำตอบอันดับที่ 1 ออก แล้วทำการพิจารณาคำตอบที่เหลืออยู่ หากคำตอบใดไม่ถูกครอบงำจากคำตอบใดเลยจะถูกจัดเป็นกลุ่มคำตอบอันดับที่ 2 โดยจะทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะครบทุกคำตอบ และสุดท้ายจะกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับคำตอบตามหมายเลขอันดับกลุ่ม (Front) ที่คำตอบนั้นอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2-12 ทั้งนี้ วิธีการหาความแข็งแรงที่ได้กล่าวมาไม่ได้ถูกประเมินจากค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบโดยตรง หากแต่เป็นการประเมินจากอันดับ จึงอาจเรียกความแข็งแรงนี้ได้ว่า “ความแข็งแรงไม่แท้จริง” (Dummy Fitness)

2.4.3 การวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม

การที่เราจะทราบได้ว่าคำตอบที่ได้มาจากการใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์ หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้มาจากการใช้อัลกอริทึม ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุดหรือเหมาะสมได้ ก็ต่อเมื่อผ่านการวัดสมรรถนะของคำตอบว่ามีความใกล้เคียงกับขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Optimal) หรือขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดโดยประมาณ (ซึ่งสามารถหาได้จากกลุ่มคำตอบที่อยู่บน Front ที่ 1 บนวิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกรบกวนในกรณีที่ไม่สามารถหากรุ่นคำตอบที่ดีที่สุดที่แท้จริงได้) เสียก่อน โดยการวัดสมรรถนะคำตอบเหล่านี้เราสามารถแบ่งตัวชี้วัดออกเป็นด้านต่าง ๆ เช่น การวัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Convergence) และการวัดการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง (Spread Measure) สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวชี้วัดทั้งหมด 3 ตัวชี้วัด เพื่อทำการประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมดังนี้

2.4.3.1 ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

ตัวชี้วัดด้านการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต เป็นการประมาณระยะห่าง (Generational Distance: GD) ของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมสามารถหามาได้ (Pareto Front) กับคำตอบที่แท้จริง (True Pareto Front) อย่างไรก็ตาม หากค่าระยะห่าง GD ที่หาออกมาได้นั้นมีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่าทุกจุดคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้จะอยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงทั้งหมด (Coello & Cortés, 2005) ดังนั้นค่า GD จึงเป็นค่าที่บ่งบอกว่าคำตอบที่อัลกอริทึมหามาได้นั้นอยู่ห่างจากกลุ่มคำตอบที่แท้จริงมากน้อยเพียงใด โดยวิธีการคำนวณค่าของตัวชี้วัด GD สำหรับปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์นี้ เราสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-15) และสมการที่ (2-16)

$$GD(S_j, S^*) = \frac{1}{|S_j|} \sum_{j=1}^{|S_j|} \min\{d_{xy} \mid y \in S^*\} \quad (2-15)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{k=1}^k \left(\frac{f_k(x) - f_k(y)}{f_k^{max} - f_k^{min}} \right)^2} \quad (2-16)$$

เมื่อ GD คือ ระยะห่างของคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมสามารถหามาได้กับคำตอบที่แท้จริง

S_j คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่ 1) ที่อัลกอริทึม j หาได้

- S^* คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Front)
- $|S_j|$ คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
- $|S^*|$ คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง
- d_{xy} คือ ระยะทางยูคลิเดียนที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้ กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
- x คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม หาได้ โดย $x \in S_j$
- y คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง $y \in S^*$
- $f_i(x)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุด x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
- $f_i(y)$ คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่แท้จริงตัวที่ y
- f_i^{\max} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่มากที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม
- f_i^{\min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่น้อยที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

2.4.3.2 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ

(Convergence and Diversity Metrics)

ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ เป็นการหาค่าระยะห่างจากคำตอบที่อยู่ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริงไปยังกลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำหรือกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมสามารถหาได้ (Inverted Generational Distance: IGD) โดยหากค่า IGD มีค่าน้อยนั้นหมายความว่ากลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมสามารถหามาได้อยู่ใกล้กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริงค่อนข้างมาก และเกือบจะครอบคลุมขอบเขตทั้งหมดบนกลุ่มคำตอบที่แท้จริง สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าของตัวชี้วัด IGD ของปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์นี้ เราสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-17) และสมการที่ (2-18)

$$IGD(S^*, S_j) = \frac{\sum_{y=1}^{|S^*|} \min\{d_{xy} \mid x \in S_j\}}{|S^*|} \quad (2-17)$$

$$d_{xy} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(y)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \right)^2} \quad (2-18)$$

เมื่อ	IGD	คือ ระยะห่างระหว่างคำตอบที่แท้จริงกับคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
	S^*	คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง (True Pareto Front)
	S_j	คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
	$ S^* $	คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่แท้จริง
	$ S_j $	คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
	d_{xy}	คือ ระยะทางยูคลิเดียนที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้ กับกลุ่มคำตอบที่แท้จริง
	x	คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึมหาได้ โดย $x \in S_j$
	y	คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่แท้จริง $y \in S^*$
	$f_i(x)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุด x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้
	$f_i(y)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่แท้จริงตัวที่ y
	f_i^{\max}	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่มากที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม
	f_i^{\min}	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่น้อยที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

2.4.3.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics/Spread)

สำหรับตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบนี้ มีไว้เพื่อทำการประเมินการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึมหามาได้ (Spread) ซึ่งจะพิจารณาจากระยะทางเฉลี่ยระหว่างคำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกัน ทั้งนี้ ค่า Spread ที่ต่ำที่สุดที่เกิดขึ้นได้ คือ 0 และถือเป็นค่าที่ดีที่สุดอีกด้วย โดยหาก Spread มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่หามาได้ มีคำตอบปลายสุดทั้งสองข้าง (Extreme Solution) อยู่บนตำแหน่งเดียวกันกับ

คำตอบปลายสุดของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง หรือมีขอบเขตครอบคลุมขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริง รวมถึงมีระยะห่างระหว่างคู่คำตอบที่อยู่ต่อเนื่องกันเท่ากันในทุก ๆ คู่ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของคำตอบในรูปแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) อย่างไรก็ดี หาก Spread มีค่าสูงกว่า 1 นั้นอาจหมายความว่ากลุ่มคำตอบมีการกระจายตัวที่แย่ โดยวิธีการคำนวณค่าการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบสำหรับปัญหาที่มีจำนวน k วัตถุประสงค์นี้ เราสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-19) และสมการที่ (2-20)

$$Spread_j = \frac{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + \sum_{x=1}^{|S_j|} |d_x - \bar{d}|}{\sum_{m=1}^k d(e_m, S_j) + |S_j| \bar{d}} \quad (2-19)$$

$$d(e_m, S_j) = \min_{s \in S_j} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(e_m) - f_i(s)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2-20)$$

$$d_x = \min_{x_2 \in S_j, x_2 \neq x} \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f_i(x) - f_i(x_2)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right)^2} \quad (2-21)$$

เมื่อ	S_j	คือ กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
	$ S_j $	คือ จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึม j หาได้
	d_x	คือ ระยะห่างยูคลิเดียนที่น้อยที่สุดระหว่างคำตอบในตำแหน่งที่ x กับคำตอบในตำแหน่งที่ x_2
	x	คือ สมาชิกคำตอบของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุด (Front ที่1) ที่อัลกอริทึมหาได้ โดย $x \in S_j$
	\bar{d}	คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทาง d_x
	e_m	คือ กลุ่มคำตอบที่อยู่ปลายสุดในแต่ละวัตถุประสงค์ $m \in k$ ของคำตอบที่แท้จริง
	$d(e_m, S_j)$	คือ ระยะระหว่างคำตอบที่ตำแหน่ง e_m กับกลุ่มคำตอบที่ตำแหน่ง S_j
	$f_i(x)$	คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ของคำตอบที่เหมาะสมที่สุด x ซึ่งอยู่ในกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้

f_i^{\max} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่มากที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

f_i^{\min} คือ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $i \in k$ ที่น้อยที่สุด ในกลุ่มคำตอบที่แท้จริง และกลุ่มคำตอบที่ได้จากอัลกอริทึม

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 วิธีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรองรับเหตุการณ์ไม่คาดคิดในการจัดสรร

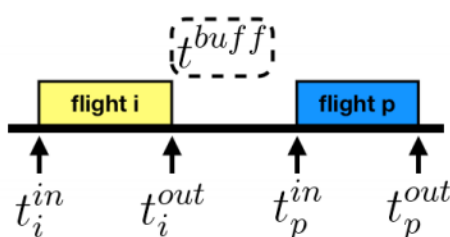
เที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (Robust Gate Assignment problem)

Kim and Feron (2013) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) โดยได้มุ่งเน้นไปที่ 3 วัตถุประสงค์ ได้แก่ Minimize Passenger Transit Time, Minimize Aircraft Taxi Time และ Maximize the Robustness of Gate Assignment หรือการ Minimize Expected Conflict Time ซึ่งในแต่ละวัตถุประสงค์นั้นจะแสดงตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีเพียงสมการเงื่อนไขพื้นฐานดังนี้ สมการเงื่อนไขที่กำหนดไม่ให้อัลกอริทึมจัดสรรเที่ยวบินที่มีเวลาทับซ้อนกันเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน รวมถึงการกำหนดให้เที่ยวบินที่จะทำการเข้าจอดต่อกันต้องมีเวลาระหว่างเที่ยวบินห่างกันไม่น้อยกว่า buffer time (เวลาน้อยที่สุดที่ต้องมีระหว่างคู่เที่ยวบิน) ซึ่งอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (Linear) และสมการเงื่อนไขที่กำหนดให้ทุกเที่ยวบินถูกจัดสรรเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานได้เพียง 1 หลุมจอดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงไม่ได้มุ่งเน้นในการหาคำตอบด้วยวิธีแม่นยำตรง (Exact method) เนื่องจากปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) นั้นยากต่อการหาคำตอบด้วยวิธีแม่นยำตรง (Exact method) ดังนั้น Kim and Feron (2013) จึงสนใจศึกษาการปรับใช้ฮิวริสติกส์ (Heuristics) ไม่ว่าจะเป็นการใช้ Tabu Search (TS) หรือ Genetic Algorithm (GA) มาช่วยในการหาคำตอบของปัญหาแทนวิธีแม่นยำตรง นอกจากนี้ยังมีการอธิบายเกี่ยวกับแนวคิดรวมไปถึงวิธีการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานดังนี้

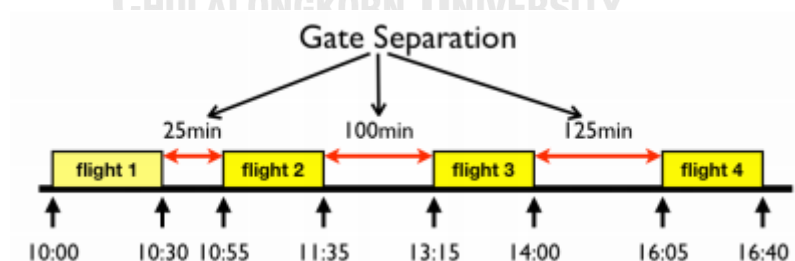
Robust Gate Assignment

บ่อยครั้งที่เหตุการณ์ไม่คาดคิด เช่น สภาพอากาศเลวร้าย หรือแม้แต่วินิจฉัยบางอย่างเกิดขึ้นผิดพลาดขึ้นจนส่งผลให้เที่ยวบินนั้นต้องเกิดการล่าช้าในการลงจอด ซึ่งผลจากการล่าช้านี้ยังส่งผลต่อเนื่องไปยังเครือข่ายการเดินทาง (Traffic network) หรืออาจส่งผลต่อเที่ยวบินที่เข้าจอดต่อบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น เที่ยวบินหมายเลข DL0812 บินมาจาก West Palm

Beach, FL ไปยัง Atlanta, GA และเมื่อถึง Atlanta, GA เครื่องบินลำเดิมนี้อาจถูกเปลี่ยนหมายเลขเที่ยวบินเป็น DL1490 และออกจาก Atlanta, GA ไปยัง Minneapolis, MN โดยหากเที่ยวบินหมายเลข DL0812 บินมาถึง Atlanta, GA ล่าช้า เที่ยวบินหมายเลข DL1490 ก็จะต้องทำการออกบินช้าด้วย หรือถ้าหากเที่ยวบินหมายเลข DL0812 เกิดการออกล่าช้า เที่ยวบินหมายเลข DL0812 ก็ยังคงต้องครอบครองหลุมจอดอากาศยานอยู่ ซึ่งจะทำให้เที่ยวบินอื่นที่ถูกจัดสรรให้เข้าหลุมจอดอากาศยานต่อจากเที่ยวบินหมายเลข DL0812 ต้องเกิดการล่าช้าไปด้วยเนื่องจากไม่สามารถเข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานได้ ด้วยเหตุนี้ Robustness จึงกลายมาเป็นปัญหาสำคัญของปัญหา AGAP เนื่องจากการที่เที่ยวบินจะเกิดการล่าช้าขึ้นนั้นมีความไม่แน่นอนสูง และยากต่อการคาดการณ์ให้แม่นยำ buffer time หรือเวลาน้อยที่สุดที่ต้องมีระหว่างคู่เที่ยวบิน จึงถูกนำมาใช้เพื่อรองรับกับความล่าช้าที่อาจเกิดขึ้นดังรูปที่ 2-13 และสำหรับตัวอย่างของเวลาระหว่างคู่เที่ยวบินจะถูกแสดงดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-13 ตัวอย่างการจัดเที่ยวบินที่เป็นไปได้ และมีเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Gate Separation) ที่เพียงพอ (Kim, 2013)



รูปที่ 2-14 ตัวอย่างเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Gate Separation) (Kim, 2013)

การหาคำนวนหา Expected Conflict time

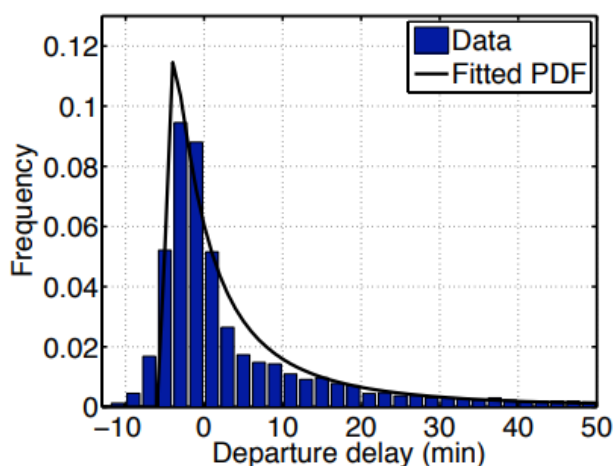
ขั้นแรกทำการนำข้อมูลเที่ยวบินมาทำการหาความล่าช้าของการออก (Departure delay) กับความล่าช้าของการมาถึง (Arrival delay) โดย Departure delay สามารถคำนวณได้จากการนำ

เวลาออกจริงของเที่ยวบินลบกับเวลาออกตามตารางบินของเที่ยวบินตามสมการที่ (2-22) (ถ้าติดลบ แปลว่า เที่ยวบินนั้นมีการออกก่อนเวลา แต่ถ้าเป็นบวก แปลว่า เที่ยวบินนั้นออกล่าช้า) ส่วน Arrival delay สามารถคำนวณได้จากการนำเวลาเข้าจริงของเที่ยวบินลบกับเวลาเข้าตามตารางของเที่ยวบิน ดังสมการที่ (2-23) (ถ้าติดลบ แปลว่า เที่ยวบินมีการมาถึงก่อนเวลา แต่ถ้าเป็นบวก แปลว่า เที่ยวบินมาถึงล่าช้า)

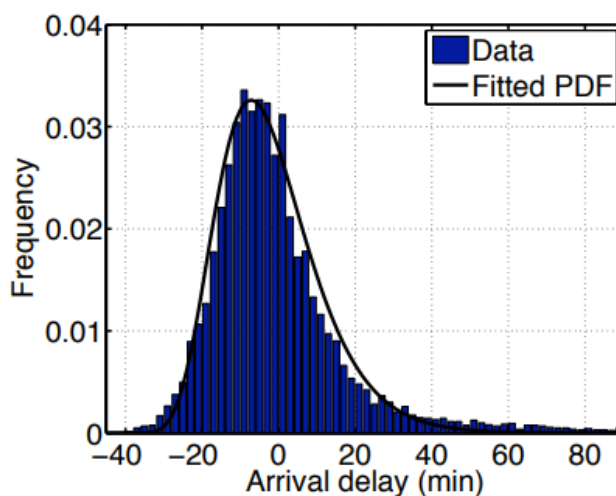
$$\text{Departure delay} = \text{Act}_d - \text{Sch}_d \quad (2-22)$$

$$\text{Arrival delay} = \text{Act}_a - \text{Sch}_a \quad (2-23)$$

จากนั้นให้นำเอา Departure delay กับ Arrival delay ของทุกเที่ยวบินที่คำนวณได้ นำมาหาข้อมูลทางสถิติ ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ย (average), ค่ามัธยฐาน (median), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviations) และนำไป Plot กราฟ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าข้อมูลของ Departure delay กับ Arrival delay เบี่ยงเบนไปทางซ้ายหรือขวา โดยตัวอย่างการกระจายตัวของ Departure delay กับ Arrival delay จะแสดงในรูปที่ 2-15 และรูปที่ 2-16 ตามลำดับ



รูปที่ 2-15 ตัวอย่างการกระจายตัวของ Departure delay ของ Northwest Airlines at Detroit Metropolitan Airport (Kim, 2013)



รูปที่ 2-16 ตัวอย่างการกระจายตัวของ Arrival delay ของ Northwest Airlines at Detroit Metropolitan Airport (Kim, 2013)

ต่อมาทำการนำเอา The probability density function (PDF) of shifted Log-normal distribution ตามสมการที่ (2-24) มาใช้กับข้อมูลของ Departure delay และ Arrival delay เพื่อหาพารามิเตอร์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า C ดังตารางที่ 2-4

$$f_X(X; \mu, \sigma, c) = \frac{1}{(X - c)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(X - c) - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \forall X > c \quad (2-24)$$

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ได้จากการ Fitted PDFs

	μ	σ	c
Departure Delay	1.802	1.242	-5.275
Arrival Delay	3.812	0.2814	-49

สุดท้ายนี้ให้นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตารางที่ 2-4 มาใช้ในการอินทิเกรต (Integrated) ในสมการที่ (2-25) และทำการแทนค่า S โดยเปลี่ยนค่าไปเรื่อย ๆ ก็จะได้คำตอบเป็น Expected conflict time ตามค่า S ที่แทนเข้าไปออกมา

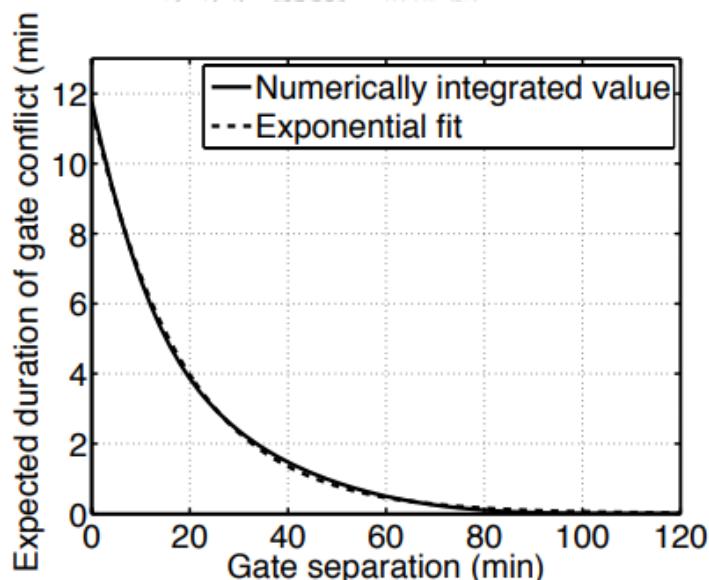
$$\int_0^{\infty} \int_{y+s}^{\infty} (x-y-s) f_d(x|\mu_d, \sigma_d) f_a(y|\mu_a, \sigma_a) dx dy \quad (2-25)$$

โดยที่ x คือ departure time with probability density function : $f_d(x|\mu_d, \sigma_d)$

y คือ arrival time with probability density function : $f_a(y|\mu_a, \sigma_a)$

s คือ เวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Gate separation หรือ Separation time)

เนื่องจากในการใช้งานจริงการอินทิเกรตโดยตรงเป็นวิธีการที่เป็นไปได้ยากต่อการปรับใช้กับวิธีการหาคำตอบแบบแม่นยำตรง (Exact method) รวมถึงยังใช้เวลาในการคำนวณที่นาน จึงมีอีกหนึ่งวิธี คือ การนำคำตอบที่ได้จากการอินทิเกรต รวมถึงค่า s ไป Plot เป็นกราฟ จากนั้นให้ทำการ Fitted Exponential curve ตามรูปที่ 2-17 ซึ่งจะได้สมการเส้นโค้งออกมาในรูปแบบ $a \times b^s$ โดยเราสามารถใส่สมการ $a \times b^s$ ในการหาค่า Expected conflict time แทนการอินทิเกรตได้



รูปที่ 2-17 ตัวอย่างการ Fitted Exponential curve (Kim, 2013)

2.5.2 การประยุกต์ใช้ VRP กับปัญหาการจัดตารางการซ้อมดนตรีแบบหลายวัน (The Multiple-Day Music Rehearsal Problems)

Jarumaneeroj and Sakulsom (2021) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจัดตารางการซ้อมของนักดนตรีวงออเคสตราโดยจะเป็นการจัดลำดับบทเพลงที่ใช้ซ้อม เนื่องจากบทเพลงบางเพลงนั้นจะมี

การใช้เครื่องดนตรีที่ไม่เหมือนกันและอาจมีการซ้อมต่อเนื่องหลายวัน ดังแสดงในรูปที่ 2-18 ซึ่งการจัดตารางการซ้อมที่ดีและมีประสิทธิภาพนั้นจะทำให้ในบางวันที่มีการซ้อมนักดนตรีบางคนอาจไม่ต้องมาเข้าร่วมการซ้อม หรือนักดนตรีบางคนที่มีการซ้อมก็จะต้องไม่เสียเวลาในการรอซ้อมนานหรือเกิดการรอน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2-19 และรูปที่ 2-20

Day	Day 1							Day 2						
Music Piece	7	9	6	1	13	8	2	3	4	12	10	5	11	14
Player 1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
Player 2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
Player 3	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Player 4	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
Player 5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Duration	3	4	4	1	2	2	4	4	3	1	4	2	3	3

รูปที่ 2-18 ตัวอย่างการซ้อมเพลง 14 บทเพลงใน 2 วัน, 5 นักดนตรี (เกิดการรอซ้อมจะเป็นสีเทา)
(Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021)

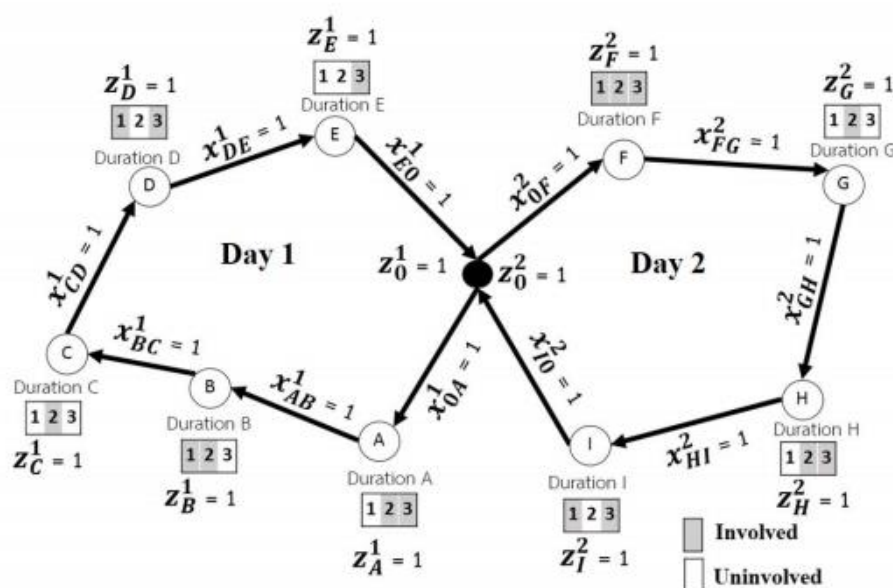
Music Piece	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Player 1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
Player 2	0	0	1	1	0	1	1	1	0
Player 3	1	0	1	1	1	1	1	0	1
Player 4	1	1	1	0	1	1	1	0	1
Player 5	0	1	1	0	0	1	0	0	1
Duration	2	3	2	1	4	5	3	4	3

รูปที่ 2-19 ตารางการซ้อมใน 1 วัน (เกิดการรอซ้อมจะเป็นสีเทา) (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021)

Music Piece	8	4	1	7	6	3	9	2	5
Player 1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
Player 2	1	1	0	1	1	1	0	0	0
Player 3	0	1	1	1	1	1	1	0	1
Player 4	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Player 5	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Duration	4	1	2	3	5	2	3	3	4

รูปที่ 2-20 ตารางการซ้อมใน 1 วันที่ถูกปรับเปลี่ยนให้มีเวลารอน้อยที่สุด (เกิดการรอซ้อมจะเป็นสีเทา) (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021)

โดยงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยการประยุกต์ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งแบบมีปริมาณความจุที่จำกัด (CVRP) กับปัญหาการซ้อมดนตรีแบบหลายวัน (Multiple-Day Music Rehearsal Problem: MMRP) โดยตัวอย่างของการใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการจัดตารางการซ้อมดนตรีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-21 นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังทำการแบ่งตัวแบบทางคณิตศาสตร์ออกเป็นตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้คำนึงถึงเวลาติดตั้งอุปกรณ์เครื่องดนตรีเมื่อมีการเปลี่ยนเพลงซ้อม (MMRP-0) กับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงเวลาติดตั้งอุปกรณ์เครื่องดนตรีเมื่อมีการเปลี่ยนเพลงซ้อม (MMRP-1)



รูปที่ 2-21 ตัวอย่างการซ้อม 2 วัน, 9 บทเพลง, 3 นักดนตรี ที่ถูกทำให้เข้าใจด้วยรูปแบบ CVRP (Jarumaneeroj & Sakulsom, 2021)

หากเราพิจารณารูปแบบของปัญหาการซ้อมดนตรีแบบหลายวัน (MMRP) กับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) เราจะพบว่าทั้ง 2 ปัญหานี้มีความคล้ายคลึงกัน (เป็นปัญหาการจัดตารางงาน) และเมื่อเราพิจารณาที่ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้โดยมุ่งเน้นไปที่สมการและอสมการเงื่อนไขต่าง ๆ ผู้วิจัยพบว่าสมการและอสมการเงื่อนไขบางเงื่อนไขนั้นสามารถนำมาประยุกต์และปรับใช้กับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานได้ง่ายกว่า ยกตัวอย่างเช่น สมการเงื่อนไขที่ช่วยกำจัดการวนซ้ำย่อย ซึ่งเทียบได้กับ Sub-tour elimination constraints ในปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP) ซึ่งมีรูปแบบสมการที่ซับซ้อนส่งผลให้ผู้วิจัยไม่สามารถนำมาประยุกต์หรือปรับใช้ได้

2.5.3 การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, มหาวิทยาลัยนเรศวร และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (2016) นำเสนอวิธีการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธี TOP-DOWN เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบ “บนลงล่าง” หรือหมายถึง การประเมินจากภาพรวม โดยประมาณค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงจากปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกใช้ไป สามารถคำนวณหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามสมการที่ (2-26)

$$GHG\ Emission = Fuel\ Quantity \times Net\ Calorific\ Value\ (NCV) \times Emission\ Factor\ (EF) \quad (2-26)$$

โดย $GHG\ Emission =$ ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO_2 (kg)

$Fuel\ Quantity =$ ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่จำหน่ายต่อปีหรือข้อมูลกิจกรรม
(Activity Data)

$NCV =$ Net Calorific Value (TJ)

$EF =$ Emission Factor ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเชื้อเพลิง
ฟอสซิล (kg CO_2 / TJ)

โดยขั้นตอนการคำนวณสามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 : ต้องทราบข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ
- ขั้นตอนที่ 2 : นำข้อมูลปริมาณการใช้เชื้อเพลิงมาแปลงหาปริมาณเชื้อเพลิงชีวภาพกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมตามตารางที่ 2-5
- ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเชื้อเพลิงทุกประเภท

ตารางที่ 2-5 สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงชีวภาพกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม

ชนิดเชื้อเพลิง		สัดส่วนการผสมเชื้อเพลิงชีวภาพกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (ร้อยละ)	
		เอทานอล	น้ำมันเบนซิน
เบนซิน	เบนซิน 95/91	0	100
	แก๊สโซฮอล์ 95/91 E10	10	90
	แก๊สโซฮอล์ E20	20	80
	แก๊สโซฮอล์ E85	85	15
ชนิดเชื้อเพลิง		ไบโอดีเซล	น้ำมันดีเซล
ดีเซล		5	95

2.6 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่ง (VRP) ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุประสงค์และแนวทางการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา รวมไปถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานสำหรับวัตถุประสงค์ที่ผู้วิจัยสนใจภายในงานวิจัยฉบับนี้ การพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยได้มีการนำตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งเข้ามาประยุกต์ร่วมกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน เนื่องจากปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งเป็นที่รู้จักและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย การนำปัญหาการจัดเส้นทางพาหนะขนส่งมาประยุกต์ใช้จะสามารถทำให้ผู้ที่สนใจปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานรวมถึงตัวผู้วิจัยเองสามารถเข้าใจและมองเห็นภาพการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้ผู้วิจัยสามารถสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยสำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานที่ผ่านมา พบว่าเราสามารถแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็น 5 ด้านหลัก ๆ ได้แก่ ด้านท่าอากาศยาน (Airport) ด้านสายการบิน (Airline) ด้านการรองรับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด (Robustness) ด้านผู้โดยสาร (Passenger) และด้านสิ่งแวดล้อม (Environment) ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน

Authors	Year	Project name	Classification for Objective				
			Airport	Airline	Robustness	Passenger	Environment
Ding et al.	2003	The Airport Gate Assignment Problem	X			X	
Lim and Wang	2005	Robust Airport Gate Assignment			X		
Tang and Wang	2013	Airport gate assignments for airline-specific gates		X		X	
Kim	2013	Airport Control Through Intelligent gate assignment	X		X	X	
Kim and Feron	2013	Numerical Analysis of Gate Conflict Duration and Passenger Transit Time in Airport.			X	X	
Yu et al.	2016	MIP-based heuristic for solving robust gate assignment problem	X		X	X	
Yu et al.	2017	An adaptive large neighborhood search heuristic for solving a robust gate assignment problem	X		X	X	
Yu et al.	2017	A heuristic approach for solving an integrated gate reassignment and taxi scheduling problem	X	X	X		

ตารางที่ 2-6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (ต่อ)

Authors	Year	Project name	Classification for Objective				
			Airport	Airline	Robustness	Passenger	Environment
Feuser and Müller	2019	Optimization of the waiting and makespan in aircraft departure: A real time non-iterative sequencing model	X	X			
Pternea and Haghani	2019	An aircraft-to-gate reassignment framework for dealing with schedule	X	X		X	
Cai et al.	2019	A Bi-Objective Constrained Robust Gate Assignment Problem: Formulation, Instances and Algorithm			X	X	
Daş et al.	2020	A review on airport gate assignment problem: Single versus multi-objective approaches	X	X	X	X	
This thesis	2020	A Development of heuristics for the Airport Gate Assignment Problem	X		X		X

จากการพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 2-6 ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา มา จะพบว่า งานวิจัยเรื่องปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ที่ผ่านมานั้น งานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่วัตถุประสงค์ด้านผู้โดยสาร (Passenger) ยกตัวอย่างเช่น การจัดสรรเที่ยวบินเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานโดยให้มีระยะทางการเดินขึ้นอากาศยานของผู้โดยสารสั้นที่สุด และมีการ

มุ่งเน้นไปที่วัตถุประสงค์ด้านอื่น ๆ รองลงมา แต่กลับไม่พบงานวิจัยใดที่มีวัตถุประสงค์เกี่ยวกับด้านสิ่งแวดล้อมเลย ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นช่องว่างดังกล่าวประกอบกับมีความสนใจในด้านการรักษาสิ่งแวดล้อม รวมถึงมีความต้องการวัตถุประสงค์ที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่ผ่านมา จึงทำให้ผู้วิจัยให้ความสนใจในวัตถุประสงค์ด้านสิ่งแวดล้อมโดยจะเกี่ยวข้องกับมลภาวะทางอากาศ (การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดจากการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานโดยตรง (การที่ต้องนำรถบัสโดยสารไปรับ-ส่งผู้โดยสารระหว่างตัวอาคารผู้โดยสารกับอากาศยานที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานระยะไกล และการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยานด้วยรถลากจูงอากาศยาน (Push-back truck)) ถัดมาสำหรับวัตถุประสงค์ด้านท่าอากาศยาน (Airport) ที่ผู้วิจัยสนใจถึงแม้จะถูกจัดอยู่ในด้านท่าอากาศยาน แต่จริง ๆ แล้วก็สามารถสื่อถึงด้านผู้โดยสารควบคู่ไปด้วยได้ กล่าวคือ ผู้วิจัยสนใจการจัดสรรกิจกรรมของเที่ยวบินให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด แปลว่าจะมีอากาศยานถูกจัดสรรเข้าหลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคารมากที่สุด ซึ่งจะแสดงถึงภาพลักษณ์ความสามารถในการจัดการหลุมจอดอากาศยานของท่าอากาศยาน และยังส่งผลถึงความพึงพอใจและความสะดวกของผู้โดยสารในการขึ้น-ลงอากาศยานอีกด้วย นอกจากนี้วัตถุประสงค์ด้านการรองรับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด (Robust) ยังถือเป็นด้านที่สำคัญต่อท่าอากาศยานทั้งในปัจจุบันและอนาคต เนื่องจากการเดินทางทางอากาศด้วยอากาศยานสามารถถูกก่อวินได้ง่าย ประกอบกับจำนวนเที่ยวบินและจำนวนผู้โดยสารที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยานที่สูงในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นในอนาคตส่งผลให้เกิดความต้องการใช้ท่าอากาศยานที่เพิ่มสูงขึ้น โอกาสในการเกิดความไม่แน่นอนหรือเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ความสามารถในการรับมือกับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดจึงถือเป็นเรื่องที่สำคัญและจำเป็น ดังนั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจวัตถุประสงค์ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านท่าอากาศยาน (Airport) ด้านสิ่งแวดล้อม (Environment) และด้านการรองรับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด (Robust)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยของปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ซึ่งประกอบด้วย การหาข้อมูล สมมติฐานและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบ การออกแบบเบื้องต้นด้วยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และกระบวนการพัฒนาฮิวริสติกส์ (Heuristic) สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน

3.1 ลักษณะของปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน

3.1.1 ประเด็นปัญหา

ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) เป็นปัญหาการจัดสรรอากาศยานหรือเที่ยวบินที่จะมาเข้ารับบริการที่ท่าอากาศยานให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานใดอากาศยานหนึ่ง โดยทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับปัญหาดังกล่าวโดยตรง คือ หลุมจอดอากาศยาน (Gate) ซึ่งถือเป็นทรัพยากรที่สำคัญและมีจำนวนอยู่อย่างจำกัด ทั้งนี้จำนวนหลุมจอดอากาศยาน (Gate) ยังเป็นหนึ่งในข้อจำกัดความสามารถของการรองรับอากาศยานที่จะเข้ารับบริการที่ท่าอากาศยานในแต่ละวัน อีกทั้งปัญหาดังกล่าวยังมีความไม่แน่นอนของเที่ยวบินในแต่ละวัน กล่าวคือ ในแต่ละวันจะมีจำนวนเที่ยวบินของแต่ละสายการบิน รวมถึงเวลาของอากาศยานที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยานที่แตกต่างกันออกไป ประกอบกับในบางวันเที่ยวบินของแต่ละสายการบินอาจมีเวลาเข้าใช้บริการท่าอากาศยานที่ตรงกันหรือใกล้เคียงกัน (ทำให้ในบางครั้งเที่ยวบินใดเที่ยวบินหนึ่งอาจต้องถูกเลือกให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคารอื่น หรือหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลแทน) นอกจากนี้การจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานยังมีหลักปฏิบัติหรือข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ต้องพิจารณาหรือคำนึงถึงเพื่อความปลอดภัย ได้แก่ ขนาดของอากาศยานกับขนาดหลุมจอดอากาศยาน เวลาขั้นต่ำที่ต้องมีระหว่างคู่เที่ยวบิน และประเภทเที่ยวบินกับประเภทหลุมจอดอากาศยานที่สามารถเข้าจอดได้ ดังนั้นการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานได้อย่างถูกต้องควรคู่ไปกับการใช้ทรัพยากรได้อย่างเต็มประสิทธิภาพสอดคล้องตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้จึงถือเป็นสิ่งสำคัญ ปัจจุบัน งานบริหารหลุมจอดอากาศยาน ส่วนบริการเขตการบิน ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งในบริษัทท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) มีหน้าที่รับผิดชอบในส่วนของการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน ยังคงใช้มนุษย์ในการปฏิบัติงานด้านการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานอยู่และ

เป็นการจัดสรรเพียงเพื่อให้ทุกเที่ยวบินที่จะเข้ารับบริการสามารถเข้ารับบริการที่ท่าอากาศยานได้ทั้งหมดเท่านั้น โดยการปฏิบัติงานจะมีพนักงานเพียง 4 คนต่อ 1 กะเวลาทำงาน และ 1 กะเวลาทำงาน จะมีเวลาทำงาน 12 ชั่วโมง ด้วยเหตุนี้ การที่มีหลักปฏิบัติหรือข้อกำหนดต่าง ๆ และความไม่แน่นอนของจำนวนเที่ยวบินที่ต้องพิจารณาในแต่ละวัน รวมถึงการใช้มนุษย์ในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานที่เกิดจากมนุษย์ (Human error) หรือเกิดการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพในแง่ของวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ ตลอดจนใช้เวลาในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานที่ยาวนานขึ้นได้ เมื่อทำการพิจารณาปัญหาดังกล่าวแล้ว ผู้วิจัยคาดว่าหากเราสามารถเปลี่ยนการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานจากมนุษย์มาเป็นระบบสนับสนุนการปฏิบัติงานในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานแทน ก็จะสามารถลดเวลาในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานลง รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ และอาจป้องกันข้อผิดพลาดในการจัดสรรที่เกิดจากมนุษย์ได้อีกด้วย

3.1.2 การกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหา

เนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ซึ่งเป็นการบริหารจัดการทรัพยากรในกรอบเวลาที่จำกัด (ปัญหาการจัดตารางงาน (Scheduling Problem)) และเป็นหนึ่งในปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ปัญหาดังกล่าวจึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มปัญหาเอ็นพีแบบยาก (Np-hard) การใช้วิธีการแบบแม่นยำตรงเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวอาจจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่ยาวนาน และอาจไม่สามารถหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) ภายใต้งานทรัพยากรที่มีอยู่และภายในเวลาที่จำกัดได้ นอกจากนี้การเดินทางทางอากาศ หรือตัวท่าอากาศยานยังสามารถถูกก่อกวน (Interruption) ได้ค่อนข้างง่ายจึงอาจส่งผลทำให้กำหนดการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากปัจจัยด้านสภาพอากาศ หรือปัจจัยอื่นที่ทำให้การเดินทางด้วยอากาศยานต้องหยุดชะงัก ด้วยเหตุนี้การจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานได้อย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อเหตุการณ์เหล่านี้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจนำ Metaheuristic ซึ่งมีความสามารถในการหาคำตอบที่ดีภายใต้กรอบระยะเวลาที่สั้นเข้ามาช่วยในการหาผลคำตอบของปัญหาดังกล่าว โดยผู้วิจัยได้นำเอาทฤษฎีเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) มาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการกับปัญหาย่อยในงานวิจัยฉบับนี้

3.2 สมมติฐานและข้อจำกัดของปัญหา

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ และฮิวริสติกส์อยู่บนสมมติฐาน และข้อจำกัดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลที่ใช้จอดสำหรับการขนส่งสินค้า (Cargo) และเที่ยวบินประเภทขนส่งสินค้า (Cargo) จะไม่ถูกนำมาพิจารณา
- เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมขาเข้า (Arrival) กิจกรรมขาออก (Departure) และกิจกรรมปกติ (Normal) สามารถถูกจัดสรรให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคาร หรือหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลก็ได้
- กิจกรรมย่อยที่เป็นกิจกรรมจอดรอ (Parking) จะถูกจัดสรรให้จอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลเท่านั้น
- เที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight) ที่ถูกกำหนดเป็นกิจกรรม Switching Domestic หรือ Switching International จะถูกจัดสรรให้เข้าจอดได้เพียงหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลที่สามารถรองรับการเข้าจอดได้ทั้งเที่ยวบินภายในประเทศ และเที่ยวบินระหว่างประเทศเท่านั้น
- จุดรับส่ง หรือ Point ภายในงานวิจัยฉบับนี้จะประกอบไปด้วยจุดปล่อยรถโดยสาร (รถบัส) และจุดรองรับผู้โดยสารขาเข้าที่รถบัสนำมาส่งยังตัวอาคารท่าอากาศยาน โดยจะมีทั้งสิ้น 3 จุด ได้แก่ จุดรับส่งที่ 1 (Point1) เป็นจุดปล่อยรถบัสเพื่อไปส่งผู้โดยสารขาออก หรือปล่อยรถบัสเพื่อไปรับผู้โดยสารขาเข้ายังหลุมจอดอากาศยานระยะไกลต่าง ๆ จุดรับส่งที่ 2 (Point2) เป็นจุดรองรับผู้โดยสารขาเข้าของเที่ยวบินภายในประเทศที่รถบัสจะเดินทางมาส่ง และจุดรับส่งที่ 3 (Point3) เป็นจุดรองรับผู้โดยสารขาเข้าของเที่ยวบินระหว่างประเทศที่รถบัสจะเดินทางมาส่ง
- อัตราสิ้นเปลืองที่นำมาคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรถลากจูงอากาศยาน (Push-back truck) จะอ้างอิงจากอัตราสิ้นเปลืองของรถบรรทุกขนาดหนัก (18 ล้อ) ส่วนอัตราสิ้นเปลืองของรถบัสที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารผู้โดยสารกับหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลจะอ้างอิงจากอัตราสิ้นเปลืองของรถโดยสารประจำทางของขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก)

- รถบรรทุกขนส่งผู้โดยสารระหว่างอาคารผู้โดยสารกับหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล และรถลากจูงอากาศยาน (Push-back truck) ที่ใช้ในท่าอากาศยาน จะถูกกำหนดให้ยังคงใช้เชื้อเพลิงประเภทน้ำมันดีเซล
- การออกแบบการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยานภายในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยไม่ได้มีการออกแบบให้มีการแก้ไขตารางการเข้าจอดของอากาศยานใหม่ (Reassignment) สำหรับการรองรับกับกรณีเมื่อเที่ยวบินหรือท่าอากาศยานได้รับการรบกวน (Interruption) จนไม่สามารถดำเนินการตามตารางเข้าจอดที่จัดเอาไว้ได้

3.3 การออกแบบตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP)

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ เป็นตัวแบบชนิด Integer Linear Programing (ILP) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายปัญหาการจัดเส้นทางรถ (Vehicle Routing Problem) และมีการนำหลักการและแนวคิดในเรื่องของการแบ่งกิจกรรมย่อยเที่ยวบินของ Yu et al. (2017a) มาพัฒนาร่วมด้วย โดยกิจกรรมย่อยของเที่ยวบินภายในงานวิจัยฉบับนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 5 กิจกรรมหลัก ๆ ได้แก่ กิจกรรมขาเข้า (Arrival) กิจกรรมจอดรอ (Parking) กิจกรรมขาออก (Departure) กิจกรรมปกติ (Normal) และกิจกรรมการเปลี่ยน (Switching) ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้จะถูกกำหนดให้มีเลขกิจกรรม (i) เท่ากับ 1 2 3 4 และ 5 ตามลำดับ (วิธีการกำหนดและการแบ่งเที่ยวบินออกเป็นกิจกรรมโดยละเอียดจะถูกอธิบายในหัวข้อที่ 3.4.4.1) สำหรับตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เซต และพารามิเตอร์ (Sets and Parameter)

- $i = 1$ คือ การบ่งบอกว่าเที่ยวบิน j ที่จะนำมาพิจารณานั้น จะต้องเป็นเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Arrival
- $i = 2$ คือ การบ่งบอกว่าเที่ยวบิน j ที่จะนำมาพิจารณานั้น จะต้องเป็นเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Parking
- $i = 3$ คือ การบ่งบอกว่าเที่ยวบิน j ที่จะนำมาพิจารณานั้น จะต้องเป็นเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Departure
- $i = 4$ คือ การบ่งบอกว่าเที่ยวบิน j ที่จะนำมาพิจารณานั้น จะต้องเป็นเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal

- $i=5$ คือ การบ่งบอกว่าเที่ยวบิน j ที่จะนำมาพิจารณานั้น จะต้องเป็นเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Switching
- $a \times b$ คือ พารามิเตอร์สำหรับใช้คำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดการขัดแย้ง หรือ Expected Conflict Time
- $Carbon_{pk}$ คือ พารามิเตอร์ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากการวิ่งไปรับ-ส่งผู้โดยสารระหว่างจุด p (Point) กับหลุมจอดอากาศยาน k
- $Carbontow_{kg}$ คือ พารามิเตอร์ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยาน k กับหลุมจอดอากาศยาน g
- Seq เซตจำนวนเที่ยวบินมากที่สุดที่คาดว่าจะจอดในหลุมจอดอากาศยานของท่าอากาศยาน
- $Point$ เซตจุดออกรถบัส และจุดส่งผู้โดยสารภายในประเทศและระหว่างประเทศ
- AAC_{\emptyset} เซตประเภทกิจกรรมของเที่ยวบิน โดยที่รวมจุดสมมติ (Depot)
- AAC เซตประเภทกิจกรรมของเที่ยวบิน โดยที่ไม่รวมจุดสมมติ (Depot)
- AF_{\emptyset} เซตจำนวนเที่ยวบิน โดยที่รวมจุดสมมติ (Depot)
- AF เซตจำนวนเที่ยวบิน โดยที่ไม่รวมจุดสมมติ (Depot)
- AG เซตของหลุมจอดอากาศยานทั้งหมด
- $GCRD$ เซตของหลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคาร และหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลที่เที่ยวบินภายในประเทศสามารถเข้าจอดได้
- $GCRI$ เซตของหลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคาร และหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลที่เที่ยวบินระหว่างประเทศสามารถเข้าจอดได้
- G_3 เซตของหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลที่สามารถจอดได้ทั้งเที่ยวบินภายในประเทศและระหว่างประเทศ
- GR เซตของหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลทั้งหมด
- ADN_1 เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Arrival และ Departure ตลอดจนเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal ของเที่ยวบินภายในประเทศ
- ADN_2 เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Arrival และ Departure ตลอดจนเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal ของเที่ยวบินระหว่างประเทศ

- AN_1 เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Arrival และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal ของเที่ยวบินภายในประเทศ
- AN_2 เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Arrival และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal ของเที่ยวบินระหว่างประเทศ
- DN_1 เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Departure และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal ของเที่ยวบินภายในประเทศ
- DN_2 เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Departure และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Normal ของเที่ยวบินระหว่างประเทศ
- S เซตของเที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight) ทั้งที่มีเที่ยวบินขาเข้าเป็นแบบภายในประเทศ (Switching Domestic) และเที่ยวบินขาเข้าเป็นแบบระหว่างประเทศ (Switching International)
- SD เซตของเที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight) ที่มีเที่ยวบินขาเข้าเป็นแบบภายในประเทศ (Switching Domestic)
- SI เซตของเที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight) ที่มีเที่ยวบินขาเข้าเป็นแบบระหว่างประเทศ (Switching International)
- PS เซตของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Parking ของเที่ยวบินภายในประเทศ และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภท Switching ทั้งที่มีเที่ยวบินขาเข้าเป็นแบบภายในประเทศ และเที่ยวบินขาเข้าเป็นแบบระหว่างประเทศ
- P_2 เซตของกิจกรรมประเภท Parking ของเที่ยวบินระหว่างประเทศ
- M ค่าจำนวนมาก
- $buffer$ เวลารั้งระหว่างเที่ยวบินตามที่สนามบินกำหนด
- $sizeflight_{ij}$ ขนาดอากาศยานของกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j
- $sizegate_k$ ขนาดของหลุมจอดอากาศยานลำดับที่ k
- $atime_{ij}$ เวลาเข้าของกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j
- $dtime_{ij}$ เวลาออกของกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

ตัวแปรตัดสินใจในตัวแทนทางคณิตศาสตร์นี้ประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจที่บ่งบอกที่อยู่ของเที่ยวบิน ตัวแปรตัดสินใจสำหรับเรียงลำดับเที่ยวบินบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ตัวแปรตัดสินใจที่ช่วยกำจัดการวนซ้ำย่อย (Sub-tour elimination) ตัวแปรตัดสินใจที่บ่งบอกที่อยู่ของเที่ยวบินและลำดับบนหลุมจอดอากาศยานนั้น ๆ และตัวแปรตัดสินใจสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของเที่ยวบินเดียวกันที่ถูกจัดสรรให้เข้าจอดต่างหลุมจอดอากาศยานกัน

ตัวแปรตัดสินใจที่บ่งบอกที่อยู่ของเที่ยวบิน

$$X_{ij}^k \in \{0, 1\}$$

โดย X_{ij}^k $\left\{ \begin{array}{l} \text{มีค่าเป็น } 1 ; \text{ ถ้ากิจกรรม } i \text{ ของเที่ยวบิน } j \text{ ถูกจัดสรรเข้าหลุมจอด} \\ \text{อากาศยาน } k \\ \text{มีค่าเป็น } 0 ; \text{ ในกรณีอื่น ๆ} \end{array} \right.$

ตัวแปรตัดสินใจสำหรับเรียงลำดับเที่ยวบินบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน

$$Y_{ijul}^k \in \{0, 1\}$$

โดย Y_{ijul}^k $\left\{ \begin{array}{l} \text{มีค่าเป็น } 1 ; \text{ ถ้ากิจกรรม } i \text{ ของเที่ยวบิน } j \text{ ถูกจัดสรรให้อยู่ก่อน} \\ \text{หน้ากิจกรรม } u \text{ ของเที่ยวบิน } l \text{ บนหลุมจอด} \\ \text{อากาศยาน } k \\ \text{มีค่าเป็น } 0 ; \text{ ในกรณีอื่น ๆ} \end{array} \right.$

ตัวแปรตัดสินใจที่ช่วยกำจัดการวนซ้ำย่อย (Sub-tour elimination)

n_{ij}^k คือ ตัวแปรนับลำดับ (Counter variable) สำหรับกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ที่ถูกจัดสรรเข้าหลุมจอดอากาศยาน k

ตัวแปรตัดสินใจที่บ่งบอกที่อยู่ของเที่ยวบินและลำดับบนหลุมจอดอากาศยานนั้น

$$Z_{ija}^k \in \{0, 1\}$$

โดย Z_{ija}^k $\left\{ \begin{array}{l} \text{มีค่าเป็น } 1 ; \text{ ถ้ากิจกรรม } i \text{ ของเที่ยวบิน } j \text{ เป็นลำดับ } a \text{ บนหลุม} \\ \text{จอดอากาศยาน } k \\ \text{มีค่าเป็น } 0 ; \text{ ในกรณีอื่น ๆ} \end{array} \right.$

ตัวแปรตัดสินใจสำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ของเที่ยวบินเดียวกันที่ถูกจัดสรรให้อยู่ต่างหลุมจอดอากาศยาน

$$S_{iji+1j}^{kg} \in \{0, 1\}$$

โดย S_{iji+1j}^{kg} {
 มีค่าเป็น 1 ; เมื่อกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ถูกจัดสรรให้เข้าหลุมจอดอากาศยาน k และกิจกรรม $i+1$ ของเที่ยวบิน j ถูกจัดสรรให้เข้าหลุมจอดอากาศยาน g (จัดสรรให้อยู่คนละหลุมจอดอากาศยาน)
 มีค่าเป็น 0 ; ในกรณีอื่น ๆ

คำอธิบายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

Objective ที่ 1: สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่มุ่งเน้นการลดใช้หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลให้น้อยที่สุด โดยจะทำการนับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมขาเข้า (Arrival) กิจกรรมขาออก (Departure) และกิจกรรมปกติ (Normal) ที่ถูกจัดสรรให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลเท่านั้น โดยกิจกรรมขาเข้า กิจกรรมขาออก และกิจกรรมปกติจะถูกกำหนดให้มีเลขกิจกรรมเท่ากับ 1 3 และ 4 ตามลำดับ

$$\text{Minimize Objective1: } Z_1 = \gamma_1 \times \sum_{i \in \{1,3,4\}} \sum_{j \in ADN_1 \cup ADN_2} \sum_{k \in GR} X_{ij}^k$$

Objective ที่ 2: สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่มุ่งเน้นคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการขนส่งผู้โดยสารโดยสารโดยรถบัส (Bus) และรถลากจูงอากาศยาน (Push-back Truck) ให้มีค่าน้อยที่สุด มีองค์ประกอบ 4 ส่วน ได้แก่

- การใช้รถบัสเพื่อไปส่งผู้โดยสารขาออก ระหว่างจุดรับส่ง 1 (Point1: $p=1$) กับหลุมจอดอากาศยานระยะไกลใด ๆ โดยจะทำการพิจารณาแค่กิจกรรมย่อยของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมขาออก กิจกรรมปกติ และกิจกรรมเปลี่ยน ซึ่งมีเลขกิจกรรมเท่ากับ 3 4 และ 5 ตามลำดับ

$$\left(\sum_{p=1} \sum_{i \in \{3,4,5\}} \sum_{j \in DN_1 \cup DN_2} \sum_{k \in GR} Carbon_{pk} \times X_{ij}^k \right)$$

- การใช้รถบัสเพื่อไปรับผู้โดยสารขาเข้าที่เป็นเที่ยวบินภายในประเทศ โดยจะทำการนำผู้โดยสารขาเข้ามาส่งยังจุดรับส่ง 2 (Point2: $p=2$) โดยจะทำการพิจารณาแค่กิจกรรมย่อย

ของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมขาเข้า กิจกรรมปกติ และกิจกรรมกรเปลี่ยน ซึ่งมีเลขกิจกรรม

เท่ากับ 1 4 และ 5 ตามลำดับ $(\sum_{p=2} \sum_{i \in \{1,4,5\}} \sum_{j \in AN_1 \cup SD} \sum_{k \in G3} Carbon_{pk} \times X_{ij}^k)$

- การใช้รถบัสนำผู้โดยสารขาเข้าที่เป็นเที่ยวบินระหว่างประเทศ โดยจะทำการนำผู้โดยสารขาเข้ามาส่งยังจุดรับส่ง 3 (Point 3: p=3) โดยจะทำการพิจารณาแค่กิจกรรมย่อยของเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมขาเข้า กิจกรรมปกติ และกิจกรรมกรเปลี่ยน ซึ่งมีเลขกิจกรรม

เท่ากับ 1 4 และ 5 ตามลำดับ $(\sum_{p=3} \sum_{i \in \{1,4,5\}} \sum_{j \in AN_2 \cup SI} \sum_{k \in GR} Carbon_{pk} \times X_{ij}^k)$

- การใช้รถลากจูงอากาศยาน (Push-back Truck) ในการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุม

จอดอากาศยาน $(\sum_{i \in AAC} \sum_{j \in AF} \sum_{k, g \in AG} Carbontow_{kg} \times S_{iji+1j}^{kg})$

$$\begin{aligned} \text{Minimize Objective2: } Z_2 = & \gamma_2 \times ((\sum_{p=1} \sum_{i \in \{3,4,5\}} \sum_{j \in DN_1 \cup DN_2 \cup S} \sum_{k \in GR} Carbon_{pk} \times X_{ij}^k) \\ & + (\sum_{p=2} \sum_{i \in \{1,4,5\}} \sum_{j \in AN_1 \cup SD} \sum_{k \in G3} Carbon_{pk} \times X_{ij}^k) \\ & + (\sum_{p=3} \sum_{i \in \{1,4,5\}} \sum_{j \in AN_2 \cup SI} \sum_{k \in GR} Carbon_{pk} \times X_{ij}^k) \\ & + (\sum_{i \in AAC} \sum_{j \in AF} \sum_{k, g \in AG} Carbontow_{kg} \times S_{iji+1j}^{kg})) \end{aligned}$$

Objective ที่ 3: สมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่มุ่งเน้นคำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected Conflict time (minute) ซึ่งเกิดขึ้นจากการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานทั้งหมดให้มีค่าน้อยที่สุด มีองค์ประกอบ 2 ส่วน ได้แก่

- การคำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้ง เมื่อเที่ยวบินที่เข้าจอดต่อกันในแต่ละหลุมจอดอากาศยานเป็นกิจกรรมย่อยใด ๆ (AAC) รวมถึงเป็นเที่ยวบินใด ๆ (AF) ก็ได้ เพียงแต่เที่ยวบินของเที่ยวบินที่เข้าจอดติดกันจะต้องไม่เป็นเที่ยวบินเดียวกัน

$(\sum_{i, u \in AAC} \sum_{j, l \in AF: j \neq l} \sum_{k \in AG} (a \times b^{(atime_{ul} - dtime_{ij})} \times Y_{ijul}^k)$

- การคำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้ง เมื่อเที่ยวบินที่เข้าจอดต่อกันในหลุมจอดอากาศยานใด ๆ มีกิจกรรมขาเข้าเป็นกิจกรรมย่อยของเที่ยวบินที่เข้าจอดก่อน

และมีกิจกรรมขาออกเป็นกิจกรรมย่อยของเที่ยวบินที่เข้าจอดต่อ และเที่ยวบินที่เข้าจอด

ติดกันต้องเป็นเที่ยวบินเดียวกัน $(\sum_{i=1} \sum_{u=3} \sum_{j,l \in AF: j=l} \sum_{k \in AG} (a \times b^{(atime_{ul}-dtime_{ij})} \times Y_{ijul}^k))$

$$\text{Minimize Objective3: } Z_3 = \gamma_3 \times ((\sum_{i,u \in AAC} \sum_{j,l \in AF: j \neq l} \sum_{k \in AG} (a \times b^{(atime_{ul}-dtime_{ij})} \times Y_{ijul}^k)) + (\sum_{i=1} \sum_{u=3} \sum_{j,l \in AF: j=l} \sum_{k \in AG} (a \times b^{(atime_{ul}-dtime_{ij})} \times Y_{ijul}^k)))$$

สมการและอสมการเงื่อนไข (Constraints)

$$\text{Minimize Objective } Z_{All} (Z_1, Z_2, Z_3) \quad (3-1)$$

Subject to

$$\sum_{i \in AAC \emptyset} \sum_{j \in AF \emptyset} \sum_{k \in GCRD} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall u \in \{1, 3, 4\}, \forall l \in ADN_1 \quad (3-2)$$

$$\sum_{i \in AAC \emptyset} \sum_{j \in AF \emptyset} \sum_{k \in GCRI} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall u \in \{1, 3, 4\}, \forall l \in ADN_2 \quad (3-3)$$

$$\sum_{i \in AAC \emptyset} \sum_{j \in AF \emptyset} \sum_{k \in G_3} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall u \in \{2, 5\}, \forall l \in PS \quad (3-4)$$

$$\sum_{i \in AAC \emptyset} \sum_{j \in AF \emptyset} \sum_{k \in GR} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall u \in \{2\}, \forall l \in P_2 \quad (3-5)$$

$$\sum_{u \in AAC \emptyset} \sum_{l \in AF \emptyset} \sum_{k \in GCRD} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall i \in \{1, 3, 4\}, \forall j \in ADN_1 \quad (3-6)$$

$$\sum_{u \in AAC \emptyset} \sum_{l \in AF \emptyset} \sum_{k \in GCRI} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall i \in \{1, 3, 4\}, \forall j \in ADN_2 \quad (3-7)$$

$$\sum_{u \in AAC \emptyset} \sum_{l \in AF \emptyset} \sum_{k \in G_3} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall i \in \{2, 5\}, \forall j \in PS \quad (3-8)$$

$$\sum_{u \in AAC \emptyset} \sum_{l \in AF \emptyset} \sum_{k \in GR} Y_{ijul}^k = 1 \quad \forall i \in \{2\}, \forall j \in P_2 \quad (3-9)$$

$$\sum_{i \in AAC \emptyset} \sum_{j \in AF \emptyset} Y_{ijpq}^k = \sum_{u \in AAC \emptyset} \sum_{l \in AF \emptyset} Y_{pqu}^k \quad \forall p \in AAC \emptyset, \forall q \in AF \emptyset, \forall k \in AG \quad (3-10)$$

$$\sum_{i=0} \sum_{j=\emptyset} \sum_{u \in AAC} \sum_{l \in AF} Y_{ijul}^k \leq 1 \quad \forall k \in AG \quad (3-11)$$

$$\sum_{i \in AAC} \sum_{l \in AF} \sum_{u=0} \sum_{l=\emptyset} Y_{ijul}^k \leq 1 \quad \forall k \in AG \quad (3-12)$$

$$Y_{ijij}^k = 0 \quad \forall i \in AAC \emptyset, \forall j \in AF \emptyset, \forall k \in AG \quad (3-13)$$

$$\sum_{i \in AAC} \sum_{j \in AF} Y_{ijul}^k = X_{ul}^k \quad \forall u \in AAC, \forall l \in AF, \forall k \in AG \quad (3-14)$$

$$\sum_{u \in AAC} \sum_{l \in AF} Y_{ijul}^k = X_{ij}^k \quad \forall i \in AAC, \forall j \in AF, \forall k \in AG \quad (3-15)$$

$$r_{ij}^k \geq Y_{pqij}^k - M(1 - Y_{pqij}^k) \quad \forall p=0, \forall q=\emptyset, \forall i \in AAC, \forall j \in AF, \forall k \in AG \quad (3-16)$$

$$r_{ul}^k \geq r_{ij}^k + Y_{ijul}^k - M(1 - Y_{ijul}^k) \quad \forall i, u \in AAC, \forall j, l \in AF, \forall k \in AG \quad (3-17)$$

$$(atime_{ul} - dtime_{ij})Y_{ijul}^k \geq 0 - M(1 - Y_{ijul}^k) \quad \forall i=0, \forall j=\emptyset, \forall u \in AAC, \forall l \in AF, \forall k \in AG \quad (3-18)$$

$$(atime_{i+1j} - dtime_{ij})Y_{iji+1j}^k \geq 0 - M(1 - Y_{iji+1j}^k) \quad \forall i = \{1, 2\}, \forall j = AF, \forall k \in GR \quad (3-19)$$

$$(atime_{ul} - dtime_{ij})Y_{ijul}^k \geq buffer - M(1 - Y_{ijul}^k) \quad \forall i, u \in AAC, \forall j, l \in AF, \forall k \in AG \quad (3-20)$$

$$\sum_{i \in AAC} \sum_{j \in AF} Z_{ija}^k \leq 1 \quad \forall a \in Seq, \forall k \in AG \quad (3-21)$$

$$\sum_{a \in Seq} \sum_{k \in AG} Z_{ija}^k = 1 \quad \forall i \in AAC, \forall j \in AF \quad (3-22)$$

$$\sum_{a \in Seq} a \times Z_{ija}^k = r_{ij}^k \quad \forall i \in AAC, \forall j \in AF, \forall k \in AG \quad (3-23)$$

$$(sizegate_k - sizeflight_{ij})X_{ij}^k \geq 0 \quad \forall i \in AAC, \forall j \in AF, \forall k \in AG \quad (3-24)$$

$$S_{iji+1j}^{kg} \geq X_{ij}^k + X_{i+1j}^g - 1 \quad \forall i \in \{1, 2\}, \forall j \in AF, \forall k, g \in AG : k \neq g \quad (3-25)$$

$$(2 \times S_{iji+1j}^k) \leq X_{ij}^k + X_{i+1j}^g \quad \forall i \in \{1, 2\}, \forall j \in AF, \forall k, g \in AG : k \neq g \quad (3-26)$$

สมการและอสมการข้อกำหนดการจัดสรรเที่ยวบิน

จากตัวแบบทางคณิตศาสตร์ข้างต้น ข้อจำกัดที่ (3-2)-(3-5) กำหนดให้กิจกรรม i ของเที่ยวบิน j อยู่ก่อนหน้ากิจกรรม u ของเที่ยวบิน l ได้เพียง 1 ครั้ง ในทำนองเดียวกัน สมการเงื่อนไขที่ (3-6)-(3-9) กำหนดให้กิจกรรม u ของเที่ยวบิน l สามารถถูกจัดสรรอยู่ต่อจากกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ได้เพียง 1 ครั้ง ส่วนสมการเงื่อนไขที่ (3-10) เป็นสมการควบคุมการไหลของตัวแปร (Flow balance) โดยมีสมการเงื่อนไขที่ (3-11) ช่วยกำหนดให้หลุมจอดอากาศยาน k สามารถรองรับกิจกรรม u ของเที่ยวบิน l ที่ออกจาก Depot ได้เพียง 1 ครั้ง ในทำนองเดียวกัน อสมการเงื่อนไขที่ (3-12) ช่วยกำหนดให้หลุมจอดอากาศยาน k สามารถรองรับกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ที่เข้า Depot ได้เพียง 1 ครั้ง นอกจากนี้ สมการเงื่อนไขที่ (3-13) ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการวนซ้ำที่ตำแหน่งใดๆ (Self-Loop)

สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k และตัวแปรตัดสินใจ Y_{ijul}^k

การเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k และตัวแปรตัดสินใจ Y_{ijul}^k จะเป็นไปตามสมการเงื่อนไขที่ (3-14) จนถึง (3-15) โดยจะเป็นการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k มีกิจกรรมเที่ยวบิน และหลุมจอดอากาศยาน เป็นไปตามตัวแปรตัดสินใจ Y_{ijul}^k โดยสมการเงื่อนไขที่ (3-14) จะเป็นการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k มีกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j และหลุมจอดอากาศยาน k เหมือนกับกิจกรรม u ของเที่ยวบิน l และหลุมจอดอากาศยาน k ตามตัวแปรตัดสินใจ Y_{ijul}^k ส่วนสมการเงื่อนไขที่ (3-15) จะเป็นการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k มีกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j และหลุมจอดอากาศยาน k เหมือนกับกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j และหลุมจอดอากาศยาน k ตามตัวแปรตัดสินใจ Y_{ijul}^k

อสมการสำหรับกำจัดทัวร์ย่อย

อสมการเงื่อนไขที่ (3-16) จนถึง (3-17) เป็นอสมการเงื่อนไขของตัวแปรตัดสินใจ x_{ij}^k สำหรับการนับลำดับการเข้าจอดของเที่ยวบินในแต่ละหลุมจอดอากาศยาน อีกทั้งยังเป็นอสมการที่ช่วยกำจัดการวนซ้ำย่อย ซึ่งเทียบได้กับ Sub-tour elimination constraints ในปัญหาการจัดเส้นทางรถ (Vehicle Routing Problem) โดยอสมการเงื่อนไขที่ (3-16) จะเป็นการนับลำดับการเข้าจอดระหว่าง Depot กับเที่ยวบิน เมื่อกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ถูกจัดสรรให้เข้าจอดต่อจาก Depot บนหลุมจอดอากาศยาน k ส่วนอสมการเงื่อนไขที่ (3-17) จะเป็นการนับลำดับการเข้าจอดระหว่างเที่ยวบิน เมื่อกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ถูกจัดสรรให้เข้าจอดก่อนกิจกรรม u ของเที่ยวบิน l บนหลุมจอดอากาศยาน k

อสมการสำหรับข้อจำกัดเงื่อนไขด้านเวลา

อสมการเงื่อนไขที่ (3-18) กำหนดให้ช่วงเวลาระหว่าง Depot กับกิจกรรม u ของเที่ยวบิน l ที่ต่อจาก Depot บนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันต้องมามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ในขณะที่อสมการเงื่อนไขที่ (3-19) กำหนดให้ช่วงเวลาระหว่างเที่ยวบินเดียวกันในช่วงกิจกรรมที่ 1 และ 2 กับ กิจกรรมที่ 2 และ 3 บนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันต้องมามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ส่วนอสมการเงื่อนไขที่ (3-20) กำหนดให้ช่วงเวลาระหว่างเที่ยวบินที่ถูกจัดสรรต่อกันบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันต้องมากกว่าหรือเท่ากับเวลาขั้นต่ำที่ต้องมีระหว่างคู่เที่ยวบิน (buffer time)

สมการและอสมการของตัวแปรตัดสินใจ Z_{ija}^k และความสัมพันธ์กับตัวแปรตัดสินใจ r_{ij}^k

อสมการเงื่อนไขที่ (3-21) กำหนดให้ลำดับการเข้าจอด a บนหลุมจอดอากาศยาน k ใด ๆ ของตัวแปรตัดสินใจ Z_{ija}^k อาจมีหรือไม่มีกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ใด ๆ ที่มีลำดับการเข้าจอด a บนหลุมจอดอากาศยาน k ดังกล่าวก็ได้ ในขณะที่สมการเงื่อนไขที่ (3-22) กำหนดให้กิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ใด ๆ ของตัวแปรตัดสินใจ Z_{ija}^k ต้องมีลำดับการเข้าจอด a และมีหลุมจอดอากาศยาน k ทุกครั้ง ส่วนสมการเงื่อนไขที่ (3-23) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ Z_{ija}^k มีกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j และหลุมจอดอากาศยาน k เหมือนกับกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j และหลุมจอดอากาศยาน k ตามตัวแปรตัดสินใจ r_{ij}^k และลำดับการเข้าจอด a ในตัวแปรตัดสินใจ Z_{ija}^k จะต้องถูกเลือกให้มีค่าเท่ากับตัวแปรตัดสินใจ r_{ij}^k

อสมการสำหรับข้อจำกัดด้านขนาดหลุมจอดอากาศยานกับขนาดอากาศยาน

อสมการเงื่อนไขที่ (3-24) ช่วยกำหนดขอบเขตขนาดอากาศยานให้พอเหมาะกับความจุหลุมจอดอากาศยาน โดยกำหนดให้ผลต่างระหว่างขนาดหลุมจอดอากาศยาน k กับขนาดอากาศยานของกิจกรรม i ของเที่ยวบิน j ใด ๆ ที่ถูกจัดสรรเข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยาน k จะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 0 (หลุมจอดอากาศยานต้องมีขนาดที่เท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดอากาศยาน)

อสมการสำหรับการทำให้ตัวแปรตัดสินใจ s_{iji+1j}^{kg} มีค่า

อสมการเงื่อนไขที่ (3-25)-(3-26) เป็นข้อกำหนดเชิงตรรกะ ที่กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ s_{iji+1j}^{kg} มีค่าเป็น 1 เมื่อกิจกรรมย่อยที่ต่อเนื่องกัน (กิจกรรมขาเข้าคู่กับกิจกรรมจอดรอ หรือกิจกรรมจอดรอคู่กับกิจกรรมขาออก) ของเที่ยวบินเดียวกันถูกจัดสรรให้เข้าจอดต่างหลุมจอดอากาศยานกัน โดยอสมการเงื่อนไขที่ (3-25) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ s_{iji+1j}^{kg} มีค่าเป็น 1 เมื่อตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k มีกิจกรรมย่อยที่ต่อเนื่องกันซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกันถูกจัดสรรให้อยู่คนละหลุมจอดอากาศยานกัน ในขณะที่อสมการเงื่อนไขที่ (3-26) กำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจ s_{iji+1j}^{kg} มีค่าเป็น 0 เมื่อตัวแปรตัดสินใจ X_{ij}^k ไม่มีกิจกรรมย่อยที่ต่อเนื่องกันของเที่ยวบินเดียวกันถูกจัดสรรให้อยู่คนละหลุมจอดอากาศยานกัน

3.4 การพัฒนาฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP)

3.4.1 การกำหนดพารามิเตอร์ของวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III)

อย่างที่ทราบกันดีว่างานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้อัลกอริทึม NSGA-III เป็นอัลกอริทึมหลักในการแก้ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในงานวิจัยฉบับนี้ ถูกกำหนดขึ้นโดยผู้วิจัยและจากงานวิจัยที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามผู้วิจัยกลับไม่พบปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานที่ใช้งานอัลกอริทึม NSGA-III เลย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พารามิเตอร์บางตัวจากหมวดหมู่ปัญหาที่มีความใกล้เคียงกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน นั่นคือ ปัญหาด้านการจัดตาราง (Scheduling Problem) ที่มีการใช้งานอัลกอริทึม NSGA-III ทั้งนี้ สำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้งานอัลกอริทึม NSGA-III ภายในงานวิจัยฉบับนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

- จำนวนประชากร (Population size: N)

จำนวนประชากรหรือขนาดของประชากร เป็นการกำหนดจำนวนชุดข้อมูล (Solution) หรือจำนวนสตริงคำตอบ ตั้งแต่การสร้างคำตอบเริ่มต้น ไปจนถึงจำนวนชุดข้อมูลที่เลือกเก็บในแต่ละรอบการค้นห โดยงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีจำนวนประชากรเท่ากับ 10 20 และ 40 ประชากรสำหรับปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ

- ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover rate: P_c)

การแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ เป็นการแลกเปลี่ยนค่าบางส่วนระหว่าง 2 ชุดคำตอบ เพื่อสร้างชุดคำตอบรุ่นใหม่ (Offspring) ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการหาคำตอบและผลลัพธ์ที่ได้ของอัลกอริทึม ด้วยเหตุนี้ค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์จะช่วยให้คำตอบที่ได้มีความหลากหลายและมีโอกาสในการพบเจอคำตอบที่ดีขึ้น โดยในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ เท่ากับ 1.0 โดยอ้างอิงจาก Yuan et al. (2015)

- ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation rate: P_m)

การกลายพันธุ์ เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนค่าบางตำแหน่งภายในชุดคำตอบเดียวกัน เนื่องจาก ในบางครั้งการพัฒนาคำตอบอาจทำให้คำตอบที่ได้ยังคงติดอยู่ในหลุมคำตอบเฉพาะที่ (Local solution) ซึ่งการกลายพันธุ์นี้จะช่วยให้คำตอบนั้นหลุดออกจากการติดหลุมได้ ส่งผลทำให้พบ

กับคำตอบที่ดีขึ้นได้ โดยในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดความน่าจะเป็นสำหรับการกลายพันธุ์เท่ากับ 0.5

- จำนวนรอบการทำงาน (Generation)

จำนวนรอบการทำงาน เป็นจำนวนรอบการทำงานของอัลกอริทึม ซึ่งส่งผลต่อโอกาสในการพบคำตอบที่ดีขึ้น และยังเป็นตัวกำหนดเวลาในการทำงานของอัลกอริทึมอีกด้วย เนื่องจากอัลกอริทึมจะหยุดการทำงานเมื่อค้นหาคำตอบครบตามจำนวนรอบการทำงาน ทั้งนี้ การกำหนดรอบการทำงานที่น้อยเกินไปก็อาจเป็นการลดโอกาสในการพบเจอคำตอบที่ดีขึ้น แต่หากกำหนดรอบการทำงานที่มากเกินไปก็อาจจะไม่สอดคล้องกับข้อจำกัดด้านเวลาที่มีเมื่อนำไปใช้งานจริง ดังนั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนรอบการทำงาน เท่ากับ 1,000 รอบ ซึ่งสอดคล้องกับการอ้างอิงจาก Yuan et al. (2015)

3.4.2 การออกแบบการเข้ารหัสและถอดรหัสของชุดคำตอบ (Encoding and Decoding)

อัลกอริทึม NSGA-III เป็นอัลกอริทึมที่อ้างอิงมาจากรูปแบบการถ่ายทอดทางพันธุกรรม ซึ่งจะมีโครโมโซมและยีนเข้ามาเกี่ยวข้องโดยตรง ดังนั้น การใช้งานอัลกอริทึมประเภทเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) จำเป็นที่จะต้องสร้างคำตอบโดยจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบของยีนและโครโมโซม (การเข้ารหัส) เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการทางพันธุกรรมในการพัฒนาคำตอบ จากนั้นจึงทำการถอดรหัสค่าของยีนบนโครโมโซมเพื่อแปลงออกมาเป็นค่าคำตอบที่เราต้องการต่อไป ซึ่งการออกแบบการเข้ารหัสถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อคุณภาพของคำตอบที่จะได้รับ ทั้งนี้ ภายในงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นการนำกิจกรรมของเที่ยวบินมาจัดสรรเข้าหลุมจอดอากาศยาน แต่เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการทำความเข้าใจ ผู้วิจัยจึงขอใช้คำว่าเที่ยวบินแทนการใช้คำว่ากิจกรรมของเที่ยวบิน

การเข้ารหัส (Encoding)

ในงานวิจัยฉบับนี้ การเข้ารหัสจะเป็นกระบวนการของการออกแบบการจัดเก็บผลคำตอบ (Solution) ของการจัดสรรเที่ยวบินเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานให้อยู่ในรูปแบบที่มีความสอดคล้องกับโครโมโซม ซึ่งเปรียบเสมือนการเข้ารหัสทางพันธุกรรม (Genetic) โดยผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการเข้ารหัสให้อยู่ในรูปแบบของสตริงคำตอบ ซึ่ง 1 สตริงคำตอบ หรือโครโมโซมจะมีขนาดหรือความยาว (จำนวนคอลัมน์) เท่ากับจำนวนเที่ยวบินหรือกิจกรรมของเที่ยวบินที่พิจารณาและมีจำนวนแถวเพียง 1 แถวเท่านั้น ทั้งนี้ ค่าของยีนหรือตัวเลขที่ปรากฏอยู่บนโครโมโซมนั้นจะเป็นเลขของหลุมจอดอากาศยานที่แต่ละเที่ยวบินถูกจัดสรรให้เข้าจอด โดยตัวเลขบนโครโมโซมเหล่านี้สามารถเป็นตัว

3.4.3 ข้อมูลนำเข้าของปัญหา AGAP

3.4.3.1 ข้อมูลเที่ยวบินตามตาราง (Schedule plan)

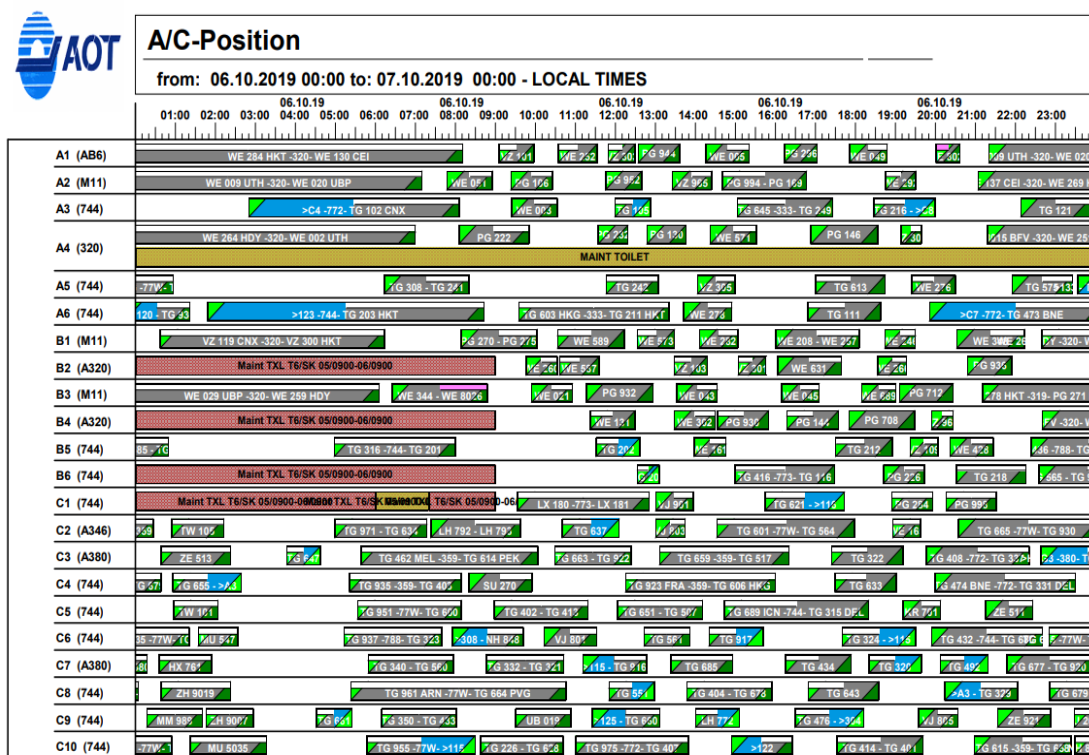
ข้อมูลเที่ยวบินตามตาราง คือ ข้อมูลเวลาเข้า-ออกของเที่ยวบินที่คาดการณ์ว่าจะมาถึงและคาดการณ์ว่าจะออกจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ โดยข้อมูลในส่วนนี้จะเป็นข้อมูลที่แต่ละสายการบินทำการส่งให้กับ งานบริหารหลุมจอดอากาศยาน ส่วนบริการเขตการบิน ฝ่ายปฏิบัติการเขตการบิน ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งในบริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) เพื่อจัดทำแผนการจัดสรรหลุมจอดอากาศยานให้กับเที่ยวบินที่จะเข้าใช้บริการท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Gate Schedule) ในแต่ละวัน โดยในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการขอข้อมูลเที่ยวบินตามตารางจากทางบริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) มาเป็นข้อมูลในการทดสอบจำนวน 15 วัน สำหรับตัวอย่างข้อมูลเที่ยวบินตามตารางสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 3-1

Arrival	Origin	Via	SBT	TIFA	A/C	ABT	No	Reg	RMV	Depart.	Des	Via	SOBT	TIFD	A/C	ACBT
TG 103	CNX		11:25/06	11:18/06	772	11:18/06	05	HSTJN	19R	TG 654	ICN		12:45/06	12:50/06	772	12:50/06
TG 103	CNX		11:25/07	11:13/07	772	11:13/07	05	HSTJN	19R	TG 974	DME		14:00/07	14:07/07	772	14:07/07
TG 103	CNX		11:25/08	11:22/08	772	11:22/08	05	HSTJU	01L	TG 654	ICN		12:45/08	12:46/08	772	12:46/08
TG 103	CNX		11:25/09	11:21/09	772	11:21/09	05	HSTJS	01L	TG 654	ICN		12:45/09	12:47/09	772	12:47/09
TG 103	CNX		11:25/10	11:30/10	772	11:30/10	05	HSTJU	01L	TG 974	DME		14:00/10	14:05/10	772	14:05/10
TG 103	CNX		11:25/11	11:27/11	77W	11:27/11	05	HSTKL	19R	TG 916	LHR		12:40/11	12:39/11	77W	12:39/11

รูปที่ 3-1 ตัวอย่างข้อมูลเที่ยวบินตามตาราง (ท่าอากาศยานไทย, 2021a)

3.4.3.2 ข้อมูลเที่ยวบินจริง

ข้อมูลเที่ยวบินจริง คือ ข้อมูลเวลาเข้า-ออกของเที่ยวบินที่มาถึงและออกจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิจริง โดยเวลาเข้า-ออกจริงอาจคลาดเคลื่อนไปจากเวลาเข้า-ออกตามตารางได้ เนื่องจากปัจจัยด้านต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเดินทางทางอากาศ สำหรับข้อมูลเที่ยวบินจริงนี้ ทางผู้วิจัยได้ดำเนินการขอข้อมูลจากทางบริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) โดยตัวอย่างข้อมูลเที่ยวบินจริงในรูปแบบของ Gantt Chart สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 3-2



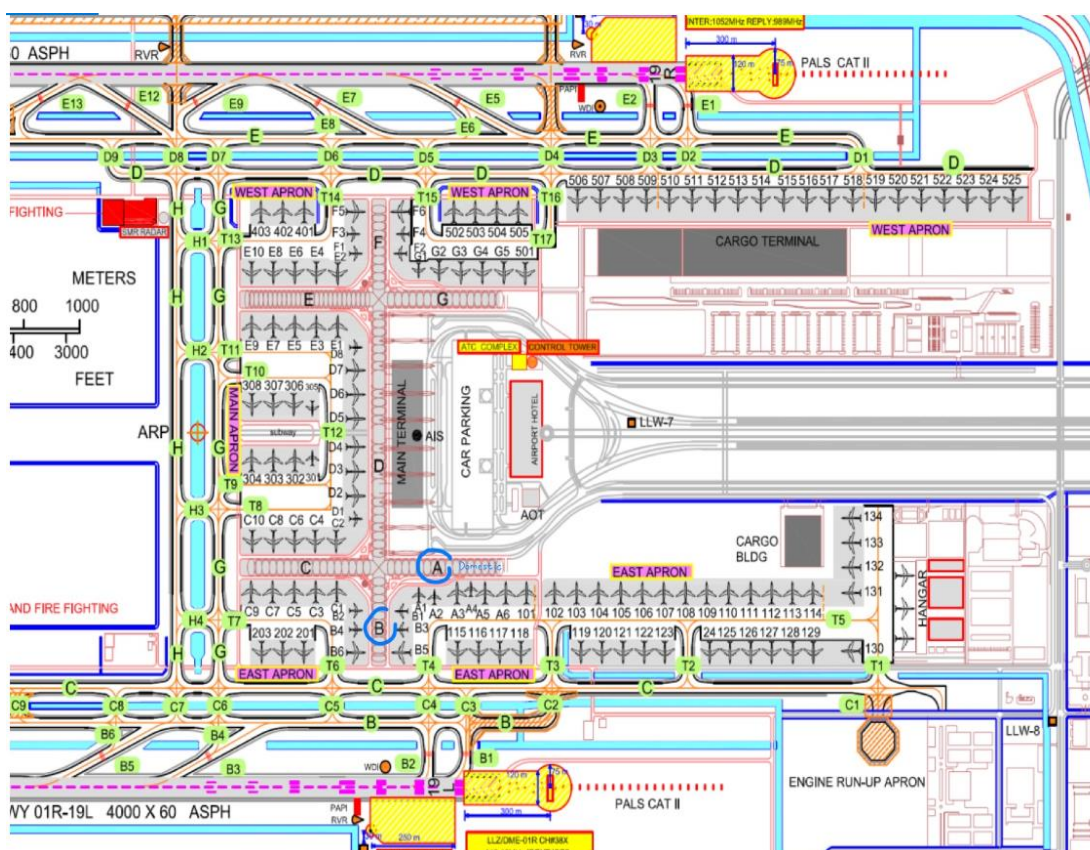
รูปที่ 3-2 ตัวอย่างข้อมูลเที่ยวบินจริง (ท่าอากาศยานไทย, 2021a)

3.4.3.3 ข้อมูลหลุมจอดอากาศยาน

ปัจจุบันท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ มีจำนวนหลุมจอดอากาศยานที่ใช้จำนวนรวมทั้งหมด 124 หลุมจอด ดังแสดงในรูปที่ 3-2 โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. หลุมจอดอากาศยานประเภทประตูอาคาร (Contact Gate) คือ หลุมจอดอากาศยานที่อยู่ติดกับตัวอาคารผู้โดยสาร มีจำนวนทั้งหมด 51 หลุมจอด ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นท่าเทียบ (Concourse) A-G โดยท่าเทียบ A กับ B จะเป็นท่าเทียบสำหรับเที่ยวบินภายในประเทศ มีจำนวน 12 หลุมจอด ส่วนท่าเทียบ C-G จะเป็นท่าเทียบสำหรับเที่ยวบินระหว่างประเทศ มีจำนวน 39 หลุมจอด
2. หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล (Remote Gate) คือ หลุมจอดอากาศยานที่ไม่ได้อยู่ติดกับตัวอาคารผู้โดยสาร ต้องนั่งรถขนส่งผู้โดยสารไปเท่านั้น ไม่สามารถเดินเท้าไปเองได้ ซึ่งจะมีจำนวนทั้งหมด 73 หลุมจอด โดยสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภท ได้แก่ หลุมจอดอากาศยานสำหรับซ่อมบำรุง จำนวน 5 หลุมจอด, หลุมจอดอากาศยานสำหรับขนถ่ายสินค้า จำนวน 10 หลุมจอด และหลุมจอดอากาศยานสำหรับรองรับผู้โดยสาร จำนวน 58 หลุมจอด

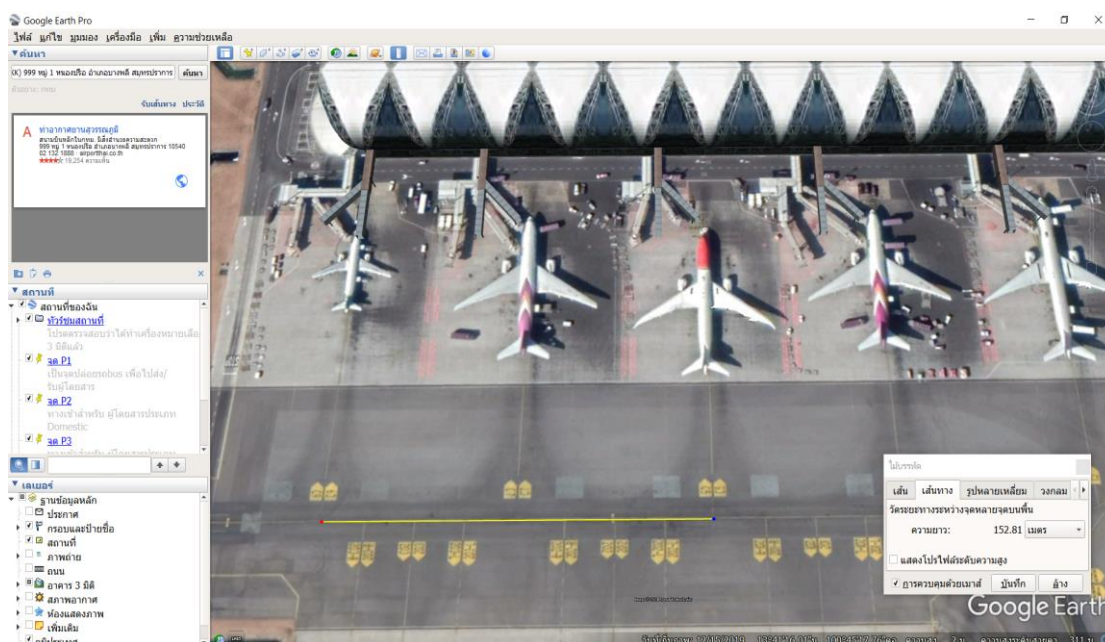
สำหรับหลุมจอดอากาศยานระยะใกล้ที่ผู้วิจัยนำมาพิจารณาจะเป็นหลุมจอดอากาศยานที่ใช้สำหรับรองรับผู้โดยสารเพียงเท่านั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ หลุมจอดอากาศยานที่สามารถรองรับเที่ยวบินภายในประเทศหรือเที่ยวบินระหว่างประเทศก็ได้ จำนวน 40 หลุมจอด และหลุมจอดอากาศยานที่รองรับได้แต่เที่ยวบินระหว่างประเทศเท่านั้นจำนวน 18 หลุมจอด สำหรับแผนผังหลุมจอดอากาศยานของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 แผนผังหลุมจอดอากาศยานของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (ท่าอากาศยานไทย, 2021a)

3.4.3.4 ระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยาน

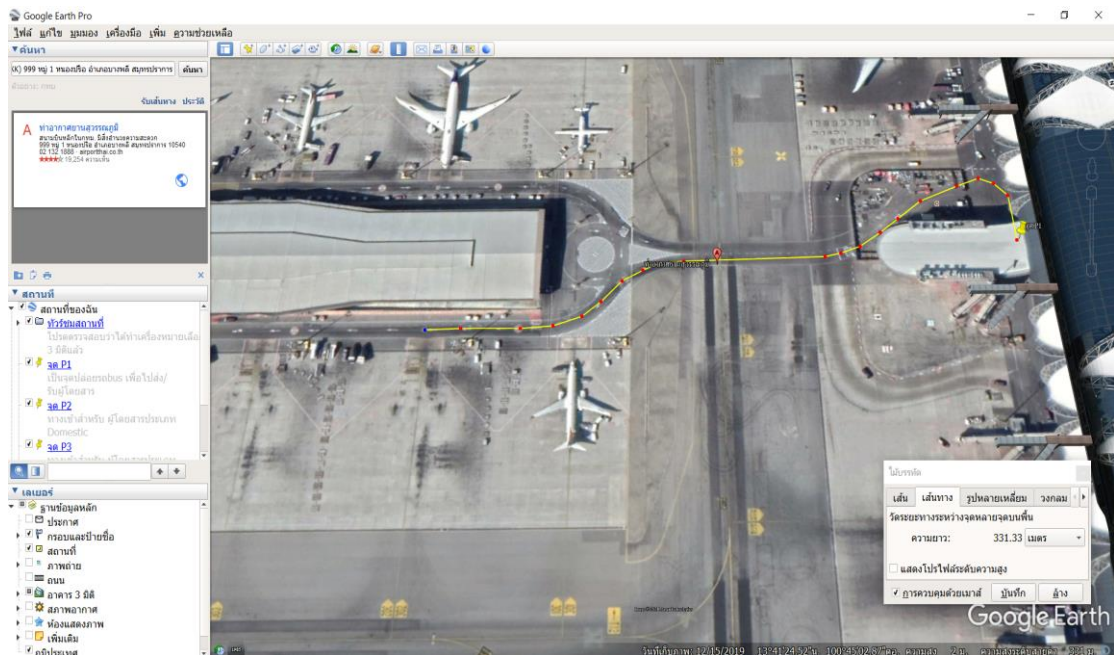
ระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยาน คือ ระยะห่างระหว่างหลุมจอดอากาศยาน ไม่ว่าจะเป็นหลุมจอดอากาศยานประเภทเดียวกันหรือหลุมจอดอากาศยานต่างประเภทกัน โดยในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวัดระยะทางจริงระหว่างหลุมจอดอากาศยานด้วยโปรแกรม Google Earth Pro และใช้หลักเกณฑ์การวัดระยะทางจากเส้นนำทางบนพื้นจราจรของอากาศยาน สำหรับตัวอย่างการวัดระยะทางจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3-4



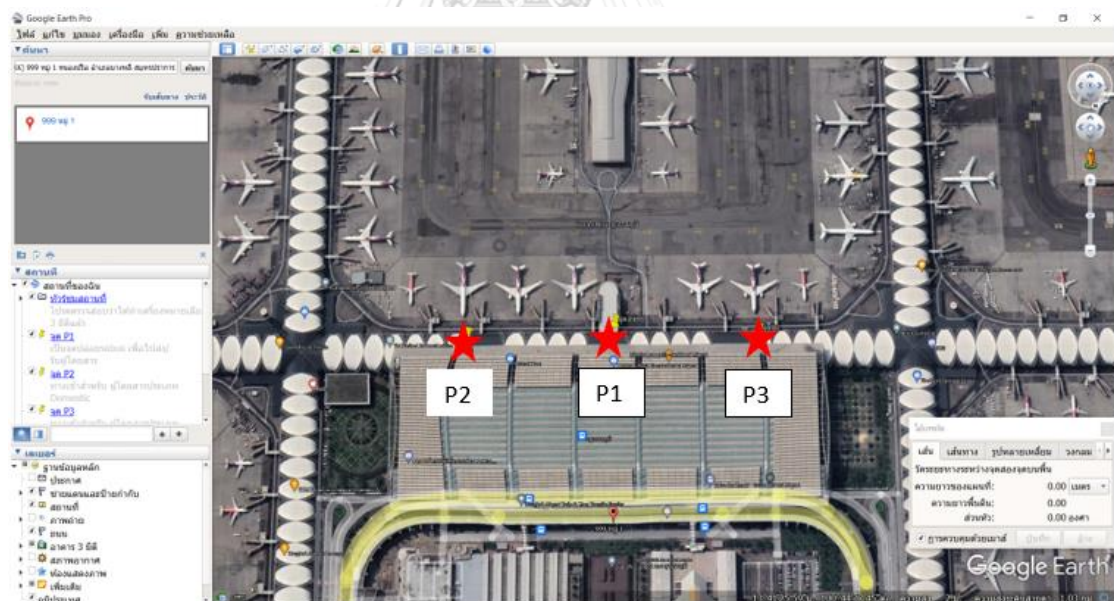
รูปที่ 3-4 ตัวอย่างการวัดระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยาน (GoogleEarthPro, 2021)

3.4.3.5 ระยะทางระหว่างจุดรับส่ง (Point) กับหลุมจอดอากาศยาน

ระยะทางระหว่างจุดรับส่งกับหลุมจอดอากาศยาน คือ ระยะห่างระหว่างจุดรับส่งกับหลุมจอดอากาศยาน โดยจุดรับส่งเป็นจุดสำหรับการปล่อยรถบัสเพื่อไปส่งผู้โดยสารขาออกและจุดสำหรับรองรับผู้โดยสารขาเข้าที่รถบัสนำมาส่งยังตัวอาคาร เนื่องจากเที่ยวบินบางเที่ยวบินจะถูกจัดสรรให้เข้าจอดที่หลุมจอดอากาศยานระยะไกล จึงจำเป็นต้องใช้รถบัสในการขนส่งผู้โดยสารไปมาระหว่างหลุมจอดอากาศยานกับตัวอาคารผู้โดยสาร ในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดจุดรับส่งขึ้นมาทั้งหมด 3 จุด ซึ่งแต่ละจุดสามารถอธิบายได้ดังนี้ จุดรับส่งที่ 1 (Point1) คือ จุดปล่อยรถบัสเพื่อออกไปส่งผู้โดยสารขาออก หรือปล่อยรถบัสเพื่อออกไปรับผู้โดยสารขาเข้ายังหลุมจอดอากาศยานระยะไกลใด ๆ จุดรับส่งที่ 2 (Point2) คือ จุดรองรับผู้โดยสารขาเข้าของเที่ยวบินภายในประเทศที่รถบัสนำมาส่ง และจุดรับส่งที่ 3 (Point3) คือ จุดรองรับผู้โดยสารขาเข้าของเที่ยวบินระหว่างประเทศที่รถบัสนำมาส่ง สำหรับตัวอย่างการวัดระยะทางระหว่างจุดรับส่งกับหลุมจอดอากาศยาน (ระยะทางจริง) และตำแหน่งของจุดรับส่งที่ผู้วิจัยสมมติขึ้นมาจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6 ตามลำดับ



รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการวัดระยะทางระหว่างจุด Point กับหลุมจอดอากาศยาน (GoogleEarthPro, 2021)



รูปที่ 3-6 ตำแหน่งของจุด Point แต่ละจุดที่ผู้วิจัยได้สมมติขึ้นมา (GoogleEarthPro, 2021)

3.4.4 กระบวนการจัดเตรียมข้อมูลของปัญหา AGAP (Data Processing)

3.4.4.1 การแบ่งกิจกรรมของเที่ยวบิน

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้นำแนวคิดการแบ่งเที่ยวบินออกเป็นกิจกรรมย่อย (Sub-activity) ของ Yu et al. (2017a) มาปรับใช้ และเพิ่มประเภทของกิจกรรมเพิ่มเติม เพื่อให้สอดคล้องกับข้อปฏิบัติของทางท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ โดยผู้วิจัยได้ทำการตั้งหลักเกณฑ์การแบ่งกิจกรรมย่อย (Sub-activity) รวมไปถึงการระบุประเภทเที่ยวบิน ดังนี้

กรณีเที่ยวบินเป็นเที่ยวบินภายในประเทศ (Domestic Flight) จะกำหนดให้มีเลข 1 ตามหลังชื่อกิจกรรมย่อย แต่ถ้าเป็นเที่ยวบินระหว่างประเทศ (International Flight) จะกำหนดให้มีเลข 2 ตามหลังชื่อกิจกรรมย่อย โดยเที่ยวบินที่มีเวลาจอดเข้ารับการบริการภาคพื้น (Ground time) สูง (มากกว่า 4 ชั่วโมง) และมีประเภทเที่ยวบินเป็นเที่ยวบินภายในประเทศ (Domestic Flight) หรือเที่ยวบินระหว่างประเทศ (International Flight) จะถูกแบ่งออกเป็น กิจกรรมขาเข้า (Arrival) กิจกรรมจอดรอ (Parking) และกิจกรรมขาออก (Departure) ตามลำดับ โดยกิจกรรมขาเข้า (Arrival) นั้นจะมีระยะเวลาของกิจกรรม 60 นาที กิจกรรมขาออก (Departure) จะมีระยะเวลาของกิจกรรม 75 นาที สำหรับเหตุผลที่ใช้ 60 นาที และ 75 นาที เนื่องจากการปฏิบัติงานจริงเจ้าหน้าที่ จะใช้เวลาประมาณ 60 นาที ในการทำงานเมื่ออากาศยานเข้าจอด เช่น การเคลื่อนย้ายผู้โดยสารลงเครื่อง การขนถ่ายสัมภาระลงเครื่อง การทำความสะอาดภายในห้องโดยสาร และจะใช้เวลาประมาณ 75 นาที ในการทำงานก่อนอากาศยานจะทำการออกบิน เช่น การตรวจเช็คสภาพอากาศยาน การโหลดอาหารและเครื่องดื่มขึ้นเครื่อง การโหลดสัมภาระขึ้นเครื่อง ส่วนระยะเวลาที่เหลือจะถูกจัดสรรให้กับส่วนของกิจกรรมการจอดรอ (Parking) ยกตัวอย่างเช่น เที่ยวบิน TG556 เป็นเที่ยวบินระหว่างประเทศ และทำการเข้าจอดเมื่อเวลา 15.30 น. จนถึง 21.30 น. จะสามารถแบ่งออกเป็นกิจกรรมย่อยได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ตัวอย่างการแบ่งเที่ยวบินเป็นกิจกรรมย่อยเมื่อเที่ยวบินมี Ground time สูง (มากกว่า 4 ชั่วโมง)

เที่ยวบิน	ขนาดเครื่องบิน	ประเภทกิจกรรม	เวลาเข้า	เวลาออก
TG556	5	A2	15.30	16.30
TG556	5	P2	16.30	20.15
TG556	5	D2	20.15	21.30

ส่วนเที่ยวบินที่มีเวลาจอดเข้ารับบริการภาคพื้น (Ground time) ต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 ชั่วโมง) และมีประเภทเที่ยวบินเป็นเที่ยวบินภายในประเทศ (Domestic Flight) หรือเที่ยวบินระหว่างประเทศ (International Flight) จะไม่มีการแบ่งเป็นกิจกรรมย่อย แต่จะทำการกำหนดให้เที่ยวบินนั้นเป็น กิจกรรมปกติ (Normal) ยกตัวอย่างเช่น เที่ยวบิน TG911 เป็นเที่ยวบินภายในประเทศ และทำการเข้าจอดเมื่อเวลา 16.00 น. จนถึง 17.30 น. จะถูกกำหนดดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างการกำหนดกิจกรรมเมื่อเที่ยวบินมี Ground time ต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 ชั่วโมง)

เที่ยวบิน	ขนาดเครื่องบิน	ประเภทกิจกรรม	เวลาเข้า	เวลาออก
TG911	6	N1	16.00	17.30

สำหรับเที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight) จะไม่ทำการสนใจเวลาจอดเข้ารับบริการภาคพื้น (Ground time) ว่าสูงหรือต่ำ แต่จะพิจารณาที่เที่ยวบินขาเข้าว่าเป็นเที่ยวบินภายในประเทศ (Domestic Flight) หรือเที่ยวบินระหว่างประเทศ (International Flight) โดยถ้าเที่ยวบินขาเข้าเป็นเที่ยวบินภายในประเทศ (Domestic Flight) จะทำการกำหนดให้เที่ยวบินนี้เป็น กิจกรรมการเปลี่ยนที่เที่ยวบินขาเข้าเป็นภายในประเทศ (Switching Domestic) แต่ถ้าเที่ยวบินขาเข้าเป็นเที่ยวบินระหว่างประเทศ (International Flight) จะทำการกำหนดให้เที่ยวบินนี้เป็น กิจกรรมการเปลี่ยนที่เที่ยวบินขาเข้าเป็นระหว่างประเทศ (Switching International) ยกตัวอย่างเช่น เที่ยวบิน TG888 เป็นเที่ยวบินที่มีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก โดยมีเที่ยวบินขาเข้าเป็นเที่ยวบินภายในประเทศ และทำการเข้าจอดเมื่อเวลา 05.45 น. จนถึง 12.50 น. จะถูกกำหนดดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ตัวอย่างการกำหนดกิจกรรมเมื่อเที่ยวบินมีการเปลี่ยนประเภทระหว่างขาเข้า-ขาออก (Switching Flight)

เที่ยวบิน	ขนาดเครื่องบิน	ประเภทกิจกรรม	เวลาเข้า	เวลาออก
TG888	6	SD	05.45	12.50

การแบ่งเที่ยวบินออกเป็นกิจกรรมย่อยแบบนี้จะทำให้การจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานมีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการแปลงขนาดของอากาศยานต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบของ ICAO Code โดยใช้ระยะความยาวระหว่างปลายปีกของอากาศยานเป็น

ตัวกำหนด เพื่อนำขนาดของอากาศยานไปพิจารณาร่วมกับขนาดของหลุมจอดอากาศยานในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานต่อไป ซึ่งสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 หลักเกณฑ์ในการแปลงขนาดอากาศยาน

Wingspan (meter)	ICAO CODE	CODE Use
ความยาวของปีก (Wing Span) น้อยกว่า 15 เมตร	A	1
ความยาวของปีก (Wing Span) 15-24 เมตร แต่ไม่รวม 24 เมตร	B	2
ความยาวของปีก (Wing Span) 24-36 เมตร แต่ไม่รวม 36 เมตร	C	3
ความยาวของปีก (Wing Span) 36-52 เมตร แต่ไม่รวม 52 เมตร	D	4
ความยาวของปีก (Wing Span) 52-65 เมตร แต่ไม่รวม 65 เมตร	E	5
ความยาวของปีก (Wing Span) 65-80 เมตร แต่ไม่รวม 80 เมตร	F	6

3.4.4.2 การแบ่งประเภทหลุมจอดอากาศยาน

จากข้อมูลหลุมจอดอากาศยานที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.3 หลุมจอดอากาศยานที่ผู้วิจัยพิจารณาจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ หลุมจอดอากาศยานประชิดอาคารสำหรับรองรับเที่ยวบินภายในประเทศ หลุมจอดอากาศยานประชิดอาคารสำหรับรองรับเที่ยวบินระหว่างประเทศ หลุมจอดอากาศยานระยะไกลสำหรับรองรับเที่ยวบินภายในประเทศหรือเที่ยวบินระหว่างประเทศ และหลุมจอดอากาศยานระยะไกลสำหรับรองรับเที่ยวบินระหว่างประเทศ และเพื่อความสะดวกในการนำไปดำเนินการในขั้นตอนต่าง ๆ ทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดประเภทหลุมจอดอากาศยานที่จะพิจารณาเหล่านี้เป็น G1, G2, G3 และ G4 ตามลำดับ

3.4.4.3 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

ในการหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผู้วิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การหาปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ผู้วิจัยจะทำการหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ด้วยการเทียบบัญชีไตรยางศ์ (โดยการนำเอาอัตราสิ้นเปลืองของพาหนะใด ๆ มาเทียบกับระยะทางจริงที่วัดได้จากโปรแกรม Google Earth) สำหรับรถบัสที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร ผู้วิจัยได้เลือกใช้อัตราสิ้นเปลืองของรถโดยสารประจำทาง (ขสมก) ซึ่งอยู่ที่ 3.5 กิโลเมตรต่อลิตร โดยอ้างอิงจาก Bus&Truck (2019) มาเทียบกับระยะทางระหว่างจุดรับส่ง (Point) กับหลุมจอดอากาศยานเพื่อหาปริมาณเชื้อเพลิง (น้ำมันดีเซล) ที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร ส่วนรถลากจูงอากาศยานจะใช้อัตราสิ้นเปลืองของรถบรรทุกหนัก (18 ล้อ) โดยอ้างอิงจาก ทศพล นภสวัสต์ (2556) ซึ่งมีอัตราสิ้นเปลือง

อยู่ที่ 0.34 ลิตรต่อกิโลเมตร หรือประมาณ 2.94 กิโลเมตรต่อลิตร โดยจะถูกนำมาเทียบกับระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยานเพื่อหาปริมาณเชื้อเพลิง (น้ำมันดีเซล) ที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายอากาศยาน

ขั้นตอนที่ 2 : การหาปริมาณเชื้อเพลิงชีวภาพกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ผู้วิจัยจะนำปริมาณเชื้อเพลิงที่ได้ไปคูณกับ 0.95 เนื่องจาก ในน้ำมันดีเซลนั้นจะมีส่วนผสมเชื้อเพลิงชีวภาพ (ไบโอดีเซล) อยู่ 5% และมีเชื้อเพลิงปิโตรเลียมผสมอยู่ 95% โดยเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นจะไม่มี การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทางผู้วิจัยจึงไม่นำมาคิด

ขั้นตอนที่ 3 : การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อได้ปริมาณเชื้อเพลิงปิโตรเลียมออกมาแล้ว ผู้วิจัยจะนำไปคำนวณหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการที่ (3-27) สำหรับน้ำมันดีเซลจะมีค่า NCV อยู่ที่ 36.42 MJ/Unit และมีค่า EF อยู่ที่ 74,100 kg CO_2 /TJ

$$GHG\ Emission = Fuel\ Quantity \times Net\ Calorific\ Value\ (NCV) \times Emission\ Factor\ (EF) \quad (3-27)$$

โดย $GHG\ Emission$ = ปริมาณการปล่อยก๊าซ CO_2 (kg)

$Fuel\ Quantity$ = ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่จำหน่ายต่อปีหรือข้อมูลกิจกรรม (Activity Data)

NCV = Net Calorific Value (TJ)

EF = Emission Factor ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของเชื้อเพลิง ฟอสซิล (kg CO_2 / TJ)

3.4.4.4 การสร้างสมการสำหรับคำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected Conflict time (พารามิเตอร์สำหรับวัตถุประสงค์ Robust)

สำหรับขั้นแรกผู้วิจัยได้เลือกนำข้อมูลของวันที่ 7 ตุลาคม ปี พ.ศ. 2562 เพียงวันเดียว มาทำการหาความล่าช้าของการออก (Departure delay) กับความล่าช้าของการมาถึง (Arrival delay) เนื่องจากข้อมูลเที่ยวบินจริงที่ผู้วิจัยได้รับมีเพียงข้อมูลของวันที่ 7 ถึง 11 ตุลาคม ปี พ.ศ. 2562 ซึ่งไฟล์ข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รับมาเหล่านี้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ PDF ที่มีการแสดงข้อมูลการเข้าจอดจริงของอากาศยานแบบแผนภูมิแกนต์ (Gantt chart) ซึ่งยากต่อการนำข้อมูลมาใช้งานต่อ ประกอบกับระยะเวลาในการดำเนินงานที่จำกัดของผู้วิจัย ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องเลือกใช้งานข้อมูลเที่ยวบินจริงเพียง 1 วัน โดยเลือกวันที่มีจำนวนเที่ยวบินเข้ามาใช้บริการท่าอากาศยานมากที่สุด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้งานข้อมูลเที่ยวบินจริงของวันที่ 7 ตุลาคม ปี พ.ศ. 2562 ซึ่งมีเที่ยวบินเข้าใช้บริการท่า

อากาศยานทั้งหมด 509 เที่ยวบิน โดยในส่วนของ Departure delay สามารถคำนวณได้จาก การนำเวลาออกจริงของเที่ยวบินลบกับเวลาออกตามตารางบินของเที่ยวบิน ส่วน Arrival delay สามารถคำนวณได้จาก การนำเวลาเข้าจริงของเที่ยวบินลบกับเวลาเข้าตามตารางของเที่ยวบิน ตามสมการที่ (3-28) และ (3-29) ตามลำดับ

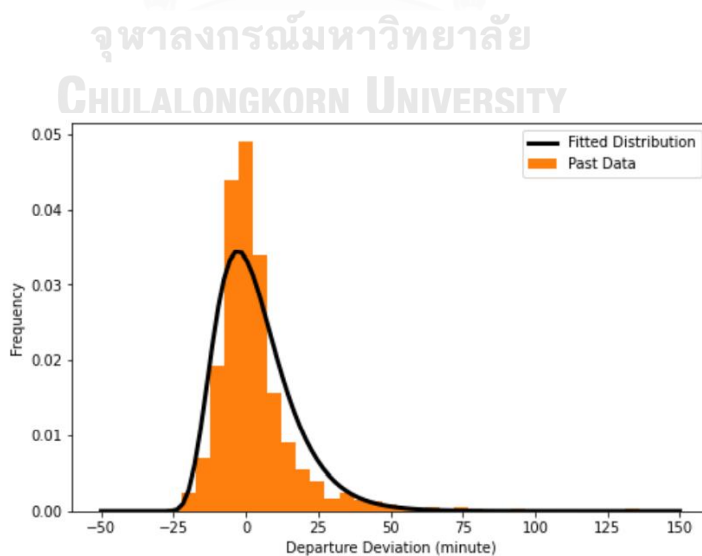
$$\text{Departure delay} = \text{Act}_d - \text{Sch}_d \quad (3-28)$$

$$\text{Arrival delay} = \text{Act}_a - \text{Sch}_a \quad (3-29)$$

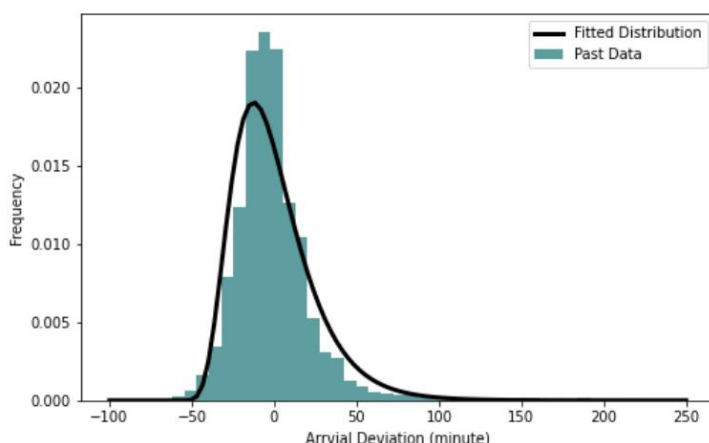
จากนั้นให้นำเอา Departure delay กับ Arrival delay ของทุกเที่ยวบินที่คำนวณได้ มา Plot กราฟ ตามรูปที่ 3-7 และรูปที่ 3-8 แล้วทำการ Shifted Log-normal Distribution (The probability density function (PDF) of shifted Log-normal distribution) เพื่อหาพารามิเตอร์ การหาค่าเฉลี่ย (average), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviations) และค่า C (Location parameter) ตามที่แสดงในตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Shifted Log-normal Distribution

	μ	σ	c
Departure	1.54919	0.3474	-34.1209
Arrival	1.77153	0.3809	-63.6399



รูปที่ 3-7 การกระจายตัวของข้อมูล Departure delay และการ Fitted PDF



รูปที่ 3-8 การกระจายตัวของข้อมูล Arrival delay และการ Fitted PDF

ต่อมาผู้วิจัยจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากตารางที่ 3-7 มาใช้ในการอินทิเกรต โดยใช้สมการที่ (3-30) ซึ่งผู้วิจัยจะทำการแทนค่า s ลงไป โดยเริ่มจาก 0 แล้วปรับเปลี่ยนทีละ 0.5 จนถึง 100 จะทำให้ได้คำตอบมา 200 จุด จากนั้นนำคำตอบ 200 จุดที่ได้มาไป Plot เป็นกราฟ โดยให้แกนตั้ง (แกน Y) เป็นค่า s ส่วนแกนนอน (แกน X) เป็นค่าคำตอบที่ได้มา ถัดมาผู้วิจัยจะทำการ Fitted Exponential Curve ตามรูปที่ 3-9 เพื่อหาสมการเส้นโค้ง ซึ่งจะอยู่ในรูปของ $a \times b^s$ สุดท้ายผู้วิจัยจะนำสมการ $a \times b^s$ ไปใช้หา Expected conflict time แทนการอินทิเกรต

$$\int_0^{\infty} \int_{y+s}^{\infty} (x - y - s) f_d(x | \mu_d, \sigma_d) f_a(y | \mu_a, \sigma_a) dx dy \quad (3-30)$$

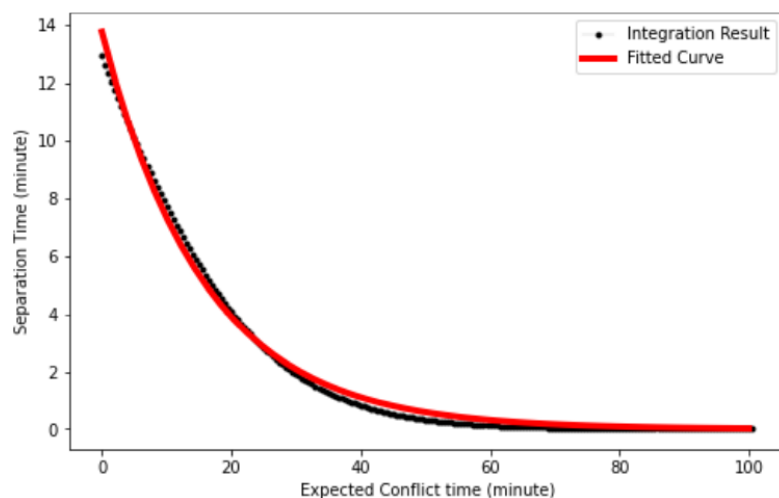
โดยที่ x คือ departure time with probability density function : $f_d(x | \mu_d, \sigma_d)$

y คือ arrival time with probability density function : $f_a(y | \mu_a, \sigma_a)$

s คือ เวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Gate separation หรือ Separation time)

สมการเส้นโค้งที่หาได้นั้นจะถูกแสดงอยู่ในสมการที่ (3-31) และผู้วิจัยจะนำไปใช้ในการคำนวณหาจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected Conflict time (minute) ต่อไป

$$\text{Expected Conflict time} = 13.76902869 \times 0.93891258^{\text{separation time}} \quad (3-31)$$



รูปที่ 3-9 นำคำตอบที่ได้จากการอินทิเกรตมา Plot กราฟ และ Fitted Exponential curve

3.4.5 กระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการนำฮิวริสติกส์ NSGA-III ไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) และเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ ผู้วิจัยจะกล่าวถึงโมดูล (Module) หรือไฟล์ชุดการทำงานย่อย จำนวน 9 โมดูล ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำงานของฮิวริสติกส์ โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.4.5.1 การสร้างจุดอ้างอิง (Reference point)

สำหรับโมดูลการสร้างจุดอ้างอิง หรือ **REFERENCEPOINT** ภายในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ทำการสร้างจุดอ้างอิงด้วยวิธีของ Das and Dennis (1998) และกำหนดให้ตัวแปร M กับ p ให้มีค่าเท่ากับ 3 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำว่าค่าของ p ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจำนวนวัตถุประสงค์ (M) ซึ่งวิธีการสร้างที่ผู้วิจัยเลือกนี้เป็นวิธีการสร้างจุดอ้างอิงด้วยการหาจำนวนจุดอ้างอิง (H) และนำจำนวนจุดอ้างอิงไปสร้างจุดอ้างอิงบนระนาบที่นอร์มอลไลซ์ (Normalized hyper-plane) โดยมีลักษณะเป็นเวกเตอร์หลายมิติ และมีจุดตัดแกนเพียง 1 จุดในแต่ละแกนวัตถุประสงค์เท่านั้น สำหรับการหาจำนวนจุดอ้างอิงจะใช้สูตรตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1.1 นอกจากนี้ จุดอ้างอิงที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีของ Das and Dennis (1998) เมื่อกำหนดให้ $M = 3$ และ $p = 4$ จะถูกแสดงในตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ตัวอย่างเวกเตอร์จุดอ้างอิงที่ได้จากวิธีการหาจำนวนจุดอ้างอิง

	f_1	f_2	f_3
1	0	0	1
2	0	0.25	0.75
3	0	0.5	0.5
4	0	0.75	0.25
5	0	1	0
6	0.25	0	0.75
7	0.25	0.25	0.5
8	0.25	0.5	0.25
9	0.25	0.75	0
10	0.5	0	0.5
11	0.5	0.25	0.25
12	0.5	0.5	0
13	0.75	0	0.25
14	0.75	0.25	0
15	1	0	0

3.4.5.2 การสร้างผลคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution)

สำหรับโมเดลการสร้างผลคำตอบเริ่มต้น หรือ **Initial-Solution** นี้ ถือเป็นการสร้างผลคำตอบหรือสตริงคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution) ของอัลกอริทึม โดยจะเป็นการจัดสรรเที่ยวบินหรือกิจกรรมของเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานด้วยวิธีการสุ่มหลุมจอดอากาศยานที่แต่ละเที่ยวบินสามารถเข้าจอดได้ให้กับแต่ละเที่ยวบิน ซึ่งในการจัดสรรหลุมจอดอากาศยานให้กับแต่ละเที่ยวบินนั้น ต้องคำนึงถึงข้อบังคับหรือข้อจำกัดต่าง ๆ จากทางท่าอากาศยานด้วยไม่ว่าจะเป็น ขนาดของเที่ยวบินกับขนาดของหลุมจอดอากาศยาน ประเภทของเที่ยวบินกับประเภทของหลุมจอดอากาศยานที่เที่ยวบินสามารถเข้าจอดได้ อีกทั้งการพิจารณาเงื่อนไขด้านเวลาของเที่ยวบินที่กำลังจะจัดสรรให้เข้าจอดกับเที่ยวบินที่ถูกจัดสรรให้เข้าจอดอยู่ก่อนแล้วบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความขัดแย้งด้านเวลาบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน (Conflict time) สุดท้ายเมื่อเราได้หลุมจอดอากาศยานสำหรับเที่ยวบินที่กำลังจะจัดสรร เราก็นำมาจัดเก็บตามรูปแบบการเข้ารหัสที่ได้

ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 ต่อไป สำหรับพารามิเตอร์หรือข้อมูลที่ถูกรวบรวมเข้ามาใช้งานในโมดูลนี้ ประกอบไปด้วย จำนวนเที่ยวบิน จำนวนหลุมจอดอากาศยาน ข้อมูลต่าง ๆ ของแต่ละเที่ยวบิน (ขนาดของเที่ยวบิน ประเภทของเที่ยวบิน เวลาเข้า-ออกของเที่ยวบิน) และข้อมูลต่าง ๆ ของแต่ละหลุมจอดอากาศยาน (ขนาดของหลุมจอดอากาศยาน ประเภทของหลุมจอดอากาศยาน) โดยจำนวนสตริงคำตอบเริ่มต้นจะถูกสร้างให้มีจำนวนเท่ากับจำนวนประชากร (Population size)

ทั้งนี้ ขั้นตอนการสร้างผลคำตอบเริ่มต้น จะมีการสร้างเซต **String** สำหรับใช้เก็บสตริงคำตอบของการจัดสรรหลุมจอดอากาศยานให้กับแต่ละเที่ยวบินตามรูปแบบการเข้ารหัสที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 และการสร้างเซต **AvailG** สำหรับใช้เก็บข้อมูลเที่ยวบินว่าแต่ละเที่ยวบินสามารถเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานใดได้บ้าง จากนั้นเราจะเริ่มต้นกระบวนการด้วยการค้นหาว่าเที่ยวบินแต่ละเที่ยวบินสามารถเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานใดได้บ้างโดยจะพิจารณาทีละเที่ยวบินกับทีละหลุมจอดอากาศยานและจะพิจารณาเพียงสองเงื่อนไขเท่านั้น คือ ด้านขนาดของหลุมจอดอากาศยานกับขนาดของเที่ยวบินและประเภทกิจกรรมของเที่ยวบินกับประเภทของหลุมจอดอากาศยานที่เที่ยวบินสามารถเข้าจอดได้ ซึ่งหลุมจอดอากาศยานใดที่เที่ยวบินสามารถเข้าจอดได้จะถูกรวบรวมไปจัดเก็บในเซต **AvailG**

เมื่อเราได้ข้อมูลว่าแต่ละเที่ยวบินสามารถเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานใดได้บ้างแล้ว เราจะเริ่มทำการนำเที่ยวบินแรกมาพิจารณาเงื่อนไขด้านเวลากับแต่ละหลุมจอดอากาศยานที่สามารถเข้าจอดได้ว่าเที่ยวบินที่กำลังจะจัดสรรให้เข้าจอดนี้มีเวลาทับซ้อนกับเที่ยวบินที่ถูกจัดสรรให้เข้าจอดอยู่ก่อนแล้วบนหลุมจอดอากาศยานหรือไม่ ซึ่งหากเที่ยวบินที่กำลังจะจัดสรรนี้มีเวลาทับซ้อนกับเที่ยวบินที่จอดอยู่ก่อนแล้วบนหลุมจอดอากาศยานใด ให้ทำการตัดหลุมจอดอากาศยานนั้นออกจากการพิจารณา ต่อมาเมื่อได้หลุมจอดอากาศยานที่สามารถเข้าจอดได้โดยไม่มีการทับซ้อนกันของเวลาแล้ว ให้เราสุ่มเลือกหลุมจอดอากาศยานให้กับเที่ยวบินที่กำลังจะจัดสรรได้เลยพร้อมทั้งนำหลุมจอดอากาศยานที่สุ่มได้ไปจัดเก็บไว้ในเซต **String** ซึ่งเป็นการจัดเก็บตามรูปแบบการเข้ารหัสที่ได้ออกแบบไว้ แต่ถ้าหากไม่มีหลุมจอดอากาศยานใดเลยที่เที่ยวบินสามารถเข้าจอดได้ให้เราทำการใส่ค่า 0 ลงในเซต **String** แทน จากนั้นให้เรากลับไปพิจารณาเที่ยวบินที่จะจัดสรรถัดมาพร้อมทั้งเริ่มกระบวนการตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นใหม่จนกว่าเราจะพิจารณาเที่ยวบินครบทุกเที่ยวบิน

สุดท้ายนี้เมื่อเราพิจารณาเที่ยวบินครบทุกเที่ยวบินแล้วให้เราทำการตรวจสอบเซต **String** ว่ายังมีเที่ยวบินใดที่ยังไม่มีหลุมจอดอากาศยานอยู่หรือไม่ (ตรวจสอบดูว่ามีคอลัมน์ใดของเซต **String** ที่มีค่าเป็น 0 หรือไม่) ถ้าหากยังมีเที่ยวบินที่ไม่มีหลุมจอดอากาศยานอยู่ (มีบางคอลัมน์ของเซต **String**

มีค่าเป็น 0) ให้เราเริ่มต้นกระบวนการจัดสรรหลุมจอดอากาศยานให้กับเที่ยวบินใหม่ทั้งหมดตั้งแต่แรก แต่ถ้าหากทุกเที่ยวบินถูกจัดสรรเข้าหลุมจอดอากาศยานครบหมดแล้ว (ไม่มีคอลัมน์ใดของเซต *String* มีค่าเป็น 0) จะถือเป็นการสิ้นสุด 1 รอบของการจัดสรรหลุมจอดอากาศยานให้กับเที่ยวบิน (ซึ่งเราจะได้สตริงคำตอบมาจำนวน 1 สตริงคำตอบ)

อย่างไรก็ดีเราจะดำเนินการตามขั้นตอนการจัดสรรหลุมจอดอากาศยานให้กับเที่ยวบินข้างต้น เข้าไปเรื่อย ๆ จนกว่าเราจะได้เซต *String* ครบตามจำนวน Population size จากนั้นจึงจะหยุดการทำงานและนำเซต *String* ทั้งหมดไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป สำหรับขั้นตอนการสร้างผลคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution) โดยสรุปแบบ Pseudo Code สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-10

Pseudocode for Initial Solution

```

1: Function Initial-Solution (population size, parameter)
2: Generate set AvailG
3: for each  $p \in \text{population size}$ 
4:   for each  $i \in \text{Number of flight}$ 
5:     for each  $j \in \text{Number of gate}$ 
6:       Check the flight that flight  $i$  can park in gate  $j$  with only 2 conditions?
7:       if flight  $i$  can park in gate  $j$  then
8:         Update gate  $j$  in row  $i$  of AvailG
9:       End if
10:    End for
11:  End for
12: Generate set String
13: while some column in Stringp has zero value
14:   Define ActualAvailG = AvailG
15:   for each  $i \in \text{Number of flight}$ 
16:     for each  $j \in \text{Number of gate}$  in row  $i$  of set ActualAvailG
17:       Check the flight that flight  $i$  can park in gate  $j$  with time condition?
18:       if flight  $i$  can park in gate  $j$  then
19:         Skip to check next gate
20:       elseif flight  $i$  cannot park in gate  $j$  then
21:         Delete gate  $j$  from row  $i$  of set ActualAvailG
22:       End if
23:     End for
24:   Check set AvailG that how many available gates in row  $i$  of set ActualAvailG
25:   if have no gate then
26:     Put 0 in column  $i$  of set Stringp
27:   elseif Amount of gate  $\geq 1$  then
28:     Random gate and update gate in column  $i$  of set Stringp
29:   End if
30: End for
31:   Check every column of set Stringp that have any column 0 value
32: End while
33: End for
34: Return String

```

รูปที่ 3-10 Pseudo Code สำหรับโมดูลการสร้างผลคำตอบเริ่มต้น (Initial Solution)

3.4.5.3 การถอดรหัสสตริงคำตอบ (Decoding)

สำหรับโมดูลการถอดรหัสสตริงคำตอบ หรือ **DECODING** นี่จะเป็นการนำสตริงคำตอบตามรูปแบบการเข้ารหัสที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 มาทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ตามที่ผู้วิจัยได้ตั้งเอาไว้ ทั้งนี้ หากเป็นรอบการทำงานครั้งแรก (Generation ที่1) เซต **string** จากโมดูล **Initial-Solution** และเซต **pop_child** จากโมดูล **MUTATION** จะถูกนำเข้ามาในโมดูลนี้ สำหรับการเรียกใช้ข้อมูลผลคำตอบหรือสตริงคำตอบ (Solution) ของแต่ละสตริงคำตอบ แต่หากเป็นรอบการทำงานอื่น ๆ เราจะใช้เซต **NEWPOP** จากโมดูล **SLECTION** แทนเซต **string**

โดยขั้นตอนการถอดรหัสสตริงคำตอบนี้จะมีการสร้างเซต **Schedule** สำหรับจัดเก็บผลคำตอบในรูปแบบของตารางการเข้าจอดของเที่ยวบิน และการสร้างเซต **ObjValue** สำหรับใช้เก็บค่าคำตอบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงคำตอบ จากนั้นเราจะเริ่มต้นกระบวนการด้วยการนำสตริงคำตอบตัวแรกจากเซตที่เรานำเข้าในโมดูลซึ่งมีรูปแบบการเข้ารหัสตามที่ได้ออกแบบไว้มาแปลงรูปแบบการจัดเก็บใหม่ให้อยู่ในรูปแบบตารางการเข้าจอดของเที่ยวบินตามตารางที่ 3-2 ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.2 รวมถึงจัดเรียงเที่ยวบินในแต่ละหลุมจอดอากาศยานใหม่โดยพิจารณาจากเวลาเข้าของเที่ยวบินหากเที่ยวบินใดมีเวลาเข้าเร็วที่สุดจะถูกนำไปอยู่ข้างหน้าสุดและเที่ยวบินที่มีเวลาเข้าช้ารองลงมาก็จะถูกนำไปไว้ในลำดับถัดไป สุดท้ายเมื่อจัดเรียงเที่ยวบินในแต่ละหลุมจอดอากาศยานเสร็จก็จะนำข้อมูลไปจัดเก็บในเซต **Schedule** ถัดมาให้เซต **Schedule** เข้าไปคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 แล้วนำค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่คำนวณได้มาเก็บไว้ภายในเซต **ObjValue** เมื่อเราหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของสตริงคำตอบตัวแรกได้แล้ว ให้เราทำการเปลี่ยนไปพิจารณาสตริงคำตอบตัวถัดไปแทนแล้วเริ่มดำเนินการตามขั้นที่ได้กล่าวไปข้างต้นใหม่ เราจะดำเนินการเช่นนี้ไปเรื่อยจนกว่าเราจะทำการหาค่าวัตถุประสงค์ครบทุกสตริงคำตอบ จากนั้นจึงจะหยุดการทำงานและนำเซต **ObjValue** ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป ทั้งนี้เราสามารถแสดงขั้นตอนการถอดรหัสสตริงคำตอบ (Decoding) โดยสรุปแบบ Pseudo Code ได้ดังรูปที่ 3-11

Pseudocode for Decoding

```

1: Function DECODING (String, NEWPOP, pop_child)
2: Generate set ObjValue
3: for each  $p \in \text{String or NEWPOP} \cup \text{pop\_child}$ 
4:   Generate set Schedule
5:   Transfer solution  $p$  to new flight's schedule
6:   Arrange flight's arrival time of solution  $p$  in each gate
7:   Update new flight's schedule of solution  $p$  to Schedule
8:   Calculate objective function 1 by using data from Schedule
9:   Calculate objective function 2 by using data from Schedule
10:  Calculate objective function 3 by using data from Schedule
11:  Update objective function value 1 to 3 in set ObjValuep
12: End for
13: Return ObjValue

```

รูปที่ 3-11 Pseudo Code สำหรับโมดูลการถอดรหัสสตริงคำตอบ (Decoding)

3.4.5.4 การพัฒนาสตริงคำตอบ (Improvement)

สำหรับโมดูลการพัฒนาสตริงคำตอบภายในฮิวริสติกส์นี้จะเป็นการนำเอาสตริงคำตอบรุ่นพ่อและแม่มาทำการพัฒนาเพื่อหาสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ให้ค่าคำตอบ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์) ที่ดีขึ้น โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 โมดูลย่อย คือ

- การพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover)

โมดูลการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ หรือ **CROSSOVER** นี้ เป็นกระบวนการการพัฒนาคำตอบที่ดำเนินการร่วมกันของ 2 สตริงคำตอบหรือโครโมโซม (โครโมโซมพ่อและแม่) เพื่อทำการถ่ายทอดลักษณะหรือค่าของยีนให้กับโครโมโซมใหม่ (โครโมโซมลูก) โดยจะมีค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover Probability: P_c) เป็นตัวกำหนดโอกาสที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ขึ้น ทั้งนี้สตริงคำตอบที่เราจะนำมาเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่เพื่อนำไปพัฒนาคำตอบต่อ หากเป็นรอบการทำงานครั้งแรก (Generation ที่1) เราจะนำสตริงคำตอบจากเซต *string* ที่ได้จากโมดูล *Initial-Solution* แต่ถ้าหากเป็นรอบการทำงานอื่น ๆ เราจะนำสตริงคำตอบจากเซต *NEWPOP* จากโมดูล *SELECTION* ของรอบการทำงานก่อนหน้า (ที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วว่ามีค่าคำตอบที่ดี)

สำหรับโมดูล **CROSSOVER** นี้ จะมีการสร้างเซต *availcross* (ขนาด 1 แถวและจำนวนคอลัมน์เท่ากับจำนวนเที่ยวบินที่เราพิจารณา) ที่มีค่าเป็น 1 ทั้งเซต เพื่อสำหรับเก็บตำแหน่งของยีน

จากโครโมโซมพ่อและแม่ว่าตำแหน่งยีนใดบ้างที่สามารถสลับค่าของยีนได้ (ยีน คือ ลำดับเบสของยีน เช่น ยีนตัวที่ 1 จะหมายถึงเบสของยีนที่ 1 และเมื่อเรานำยีนมาเรียงต่อกันเท่ากับจำนวนเบสของยีนที่เราพิจารณาจะถูกเรียกว่าโครโมโซม) พร้อมทั้งสร้างเซต *PR* สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่ไม่ได้ถูกเลือกไปเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่ รวมถึงเซต *Parent* สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่ถูกเลือกไปเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่ แล้วตามด้วยการสร้างเซต *pop_child* สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบใหม่ (รุ่นลูก) ที่ได้จากการสลับค่าของยีนระหว่างโครโมโซมพ่อและแม่

สำหรับโมดูลนี้เราจะเริ่มต้นด้วยการเลือกสตริงคำตอบที่จะนำไปเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่ด้วยวิธีการสุ่มค่าที่อยู่ในช่วงระหว่าง $[0,1]$ ให้กับทุกสตริงคำตอบ แล้วทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่มน้อยกว่าค่า P_c โดยจำนวนสตริงคำตอบที่ถูกเลือกนำไปเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่จะมีจำนวนเท่ากับ $P_c \times \text{Population size}$ สำหรับสตริงคำตอบใดที่ไม่ได้ถูกเลือกไปเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่จะถูกนำมาเก็บไว้ในเซตว่าง *PR* ส่วนสตริงคำตอบที่ถูกเลือกจะถูกนำมาเก็บไว้ในเซต *Parent* เมื่อเราได้สตริงคำตอบพ่อและแม่แล้วให้เราทำการสุ่มจับคู่สตริงคำตอบ จากนั้นให้นำสตริงคำตอบคู่แรกมาพิจารณาทีละตำแหน่งของยีนว่าถ้าหากสลับค่าของยีน (สลับหลุมจอดอากาศยาน) มีสตริงคำตอบใดเกิดการทับซ้อนกันของเวลาหรือไม่ โดยหากสตริงคำตอบใดสตริงคำตอบหนึ่งหรือทั้ง 2 สตริงคำตอบมีการทับซ้อนกันของเวลาเกิดขึ้น เราจะกำหนดให้เซต *availcross* ที่ตำแหน่งยีนเดียวกันมีค่าเป็น 0 และเมื่อทำการตรวจสอบครบทุกตำแหน่งของยีนแล้วให้เรามาพิจารณาเซต *availcross* ว่ามีจำนวนกี่ตำแหน่งยีนและตำแหน่งยีนใดบ้างที่สามารถสลับค่าของยีนได้ จากนั้นเราจะทำการสุ่มเลือกจำนวนครั้งสำหรับการสลับค่าของยีนจากจำนวนตำแหน่งยีนที่สามารถสลับค่าของยีนได้ และสุ่มเลือกตำแหน่งยีนที่จะทำการสลับค่าของยีนตามจำนวนครั้งที่สุ่มมา สุดท้ายเมื่อทำการสลับค่าของยีนเสร็จแล้วเราจะนำสตริงคำตอบที่ได้ไปจัดเก็บไว้ในเซต *pop_child* ต่อไป

จากนั้นเราจะทำการเปลี่ยนเป็นสตริงคำตอบพ่อและแม่คู่ถัดไป และทำการเริ่มการพิจารณาทีละตำแหน่งของยีนใหม่ตามวิธีการที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยเราจะทำแบบไปเรื่อย ๆ จนกว่าเราจะทำการ Crossover สตริงคำตอบครบทุกคู่ โดยเมื่อเราทำการ Crossover ครบทุกคู่แล้วให้นำสตริงคำตอบในเซต *PR* มาจัดเก็บต่อท้ายในเซต *pop_child* จากนั้นจึงจะหยุดการทำงานและนำเซต *pop_child* ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป ทั้งนี้เราสามารถแสดงขั้นตอนการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover) โดยสรุปแบบ Pseudo Code ได้ดังรูปที่ 3-12

Pseudocode for Crossover

```

1: Function CROSSOVER (String, NEWPOP, Pc)
2: Generate set pop_child, set PR and set Parent
3: Random number value [0,1] for solution in set String or NEWPOP
4: Select solution that have random value less than Pc (Amount of solution selected = Pc x Population size)
5: Update solution didn't selected to set PR
6: Update solution was selected to set Parent
7: Random match solution in set Parent
8: for each  $p=1: (\|Parent\| / 2)$ 
9:   Generate set availcross
10:  for each  $i=1: column\ of\ solution$ 
11:    Check time condition when exchange gene value (gate) between pair of solution  $p$ 
12:    if conflict time then
13:      Define column  $i$  of set availcross equal 0
14:    elseif not conflict time then
15:      Skip to check next pair of column
16:    End if
17:  End for
18:  Check set availcross that how many and what position it can exchange (value=1)
19:  Random time for exchange follow by amount of position that can exchange
20:  for each  $j=1: Amount\ of\ time$ 
21:    Random position for exchange
22:    Exchange gene value (gate)
23:  End for
24:  Update new solution (Offspring) in set pop_child
25: End for
26: Combine set PR and set pop_child together
27: Return pop_child

```

รูปที่ 3-12 Pseudo Code สำหรับโมดูลการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนสายพันธุ์ (Crossover)

■ การพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation)

โมดูลการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ หรือ **MUTATION** นี้ เป็นกระบวนการที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้เกิดลักษณะใหม่ ๆ และทำให้เกิดวิวัฒนาการ โดยจะมีค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (Mutation Probability: P_m) เป็นตัวกำหนดโอกาสที่จะเกิดการกลายพันธุ์ขึ้น ทั้งนี้สตริงคำตอบที่เราจะนำมาพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ คือ สตริงคำตอบที่ได้จากโมดูล

CROSSOVER หรือจากเซต *pop_child* นั้นเอง นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่ถูกนำเข้ามาใช้ในโมดูลนี้เพิ่มเติม ได้แก่ Amountofrandpoint

สำหรับโมดูล **MUTATION** นี้ จะเริ่มต้นการทำงานโดยการเลือกสตริงคำตอบที่จะนำไปพัฒนาด้วยวิธีการสุ่มค่าที่อยู่ในช่วงระหว่าง $[0,1]$ ให้กับทุกสตริงคำตอบในเซต *pop_child* แล้วทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีค่าสุ่มน้อยกว่าค่า P_m โดยจำนวนสตริงคำตอบที่จะถูกเลือกนำไปพัฒนาจะมีจำนวนเท่ากับ $P_m \times \text{Population size}$ จากนั้นเราจะทำการนำสตริงคำตอบที่ถูกเลือกตัวแรกมาสุ่มเลือกตำแหน่งคอลัมน์ (เทียวบิณ) แล้วพิจารณาว่าตำแหน่งคอลัมน์นี้มีหลุมจอตอากาศยานใดบ้างที่สามารถเข้าจอดได้โดยไม่มีการทับซ้อนกันของเวลาและเมื่อเราทราบแล้วว่าหลุมจอตอากาศยานใดบ้างที่สามารถเข้าจอดได้ ให้เราทำการสุ่มเลือกหลุมจอตอากาศยานใหม่ให้กับคอลัมน์นั้น จากนั้นทำการเลือกตำแหน่งคอลัมน์ (เทียวบิณ) ใหม่และทำตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปข้างต้นซ้ำจนกว่าจะครบจำนวนครั้งในการสุ่มเลือกตำแหน่งคอลัมน์ ทั้งนี้ จำนวนครั้งในการสุ่มเลือกตำแหน่งคอลัมน์จะมาจากพารามิเตอร์ที่ชื่อว่า Amountofrandpoint ซึ่งจะถูกตั้งค่าไว้เพื่อเป็นตัวกำหนดจำนวนคอลัมน์ (เทียวบิณ) ที่จะกลายพันธุ์ โดยเราสามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้ในช่วงระหว่าง $[1, \text{จำนวนเทียวบิณ}]$

หลังจากที่เราทำการกลายพันธุ์ครบตามจำนวนครั้งที่กำหนดแล้วให้จัดเก็บสตริงคำตอบไว้ในเซต *pop_child* ตามเดิม โดยจัดเก็บแทนที่สตริงคำตอบเดิมที่ได้เลือกออกมา จากนั้นให้นำสตริงคำตอบที่ถูกเลือกตัวถัดมาเริ่มดำเนินการด้วยวิธีที่ได้กล่าวไปข้างต้นใหม่ และจะดำเนินการแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าสตริงคำตอบที่ถูกเลือกเพื่อนำไปพัฒนาจะถูกพัฒนาครบทุกสตริงคำตอบ จากนั้นจึงจะหยุดการทำงานและนำเซต *pop_child* ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป สำหรับขั้นตอนการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) โดยสรุปแบบ Pseudo Code สามารถแสดงได้รูปที่

Pseudocode for Mutation

```

1: Function MUTATION (pop_child, Amountofrandpoint, Pm)
2: Random number value [0,1] for solution in set pop_child
3: Select solution that have random value less than Pm (Amount of solution selected = Pm x Population size)
4: for each  $p \in \text{solution was selected}$ 
5:   for each  $i = 1: \text{Amountofrandpoint}$ 
6:     Random column's position (flight) from solution  $p$ 
7:     Find available gates by checking time condition
8:     Random only one available gate for this position
9:     Update new gate in column's position of solution  $p$ 
10:   End for
11:   Update new solution  $p$  in set pop_child (replace the old solution  $p$ )
12: End for
13: Return pop_child

```

รูปที่ 3-13 Pseudo Code สำหรับโมดูลการพัฒนาคำตอบด้วยวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation)

3.4.5.5 การนอร์มัลไลเซชัน (Normalization)

โมดูลการนอร์มัลไลเซชัน หรือ **Normalization** เป็นโมดูลที่นำเอาค่าแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงคำตอบมาทำการปรับให้ค่าแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันคือระหว่าง [0,1] เนื่องจากค่าของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้นจะมีความแตกต่างกันในด้านปริมาณค่อนข้างมาก ทั้งนี้เซต *ObjValue* จากโมดูล *DECODING* จะถูกนำเข้ามาในโมดูลนี้สำหรับการเรียกใช้ข้อมูลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงคำตอบ

สำหรับโมดูลการนอร์มัลไลเซชันในขั้นแรกเราจะทำการสร้างเซต **MAXMIN** สำหรับจัดเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สูงสุด ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุด และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป้าหมาย (z_k^*) ของแต่ละวัตถุประสงค์ ในที่นี้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป้าหมายจะมีค่าเท่ากับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต่ำที่สุดเนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายในการพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมที่มีค่าน้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ไปพร้อม ๆ กัน ต่อมาทำการสร้างเซต **NORMALIZEOBJ** สำหรับจัดเก็บค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลเซชันของแต่ละสตริงคำตอบ จากนั้นเราจะทำการพิจารณาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ละวัตถุประสงค์ในทุกสตริงคำตอบว่าค่าใดเป็นค่าที่มากที่สุดและค่าใดเป็นค่าที่น้อยที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ โดยเมื่อเราทราบแล้วให้นำค่าไปจัดเก็บในเซต **MAXMIN** พร้อมทั้งทำการกำหนดค่าวัตถุประสงค์เป้าหมายตามที่ได้กล่าวไว้ลงไปในเซตด้วยเช่นกัน เมื่อเราได้

เซตดังกล่าว (*MAXMIN*) ที่มีค่าครบแล้วให้เราเริ่มทำการนอร์มัลไลเซชันค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทีละวัตถุประสงค์และทีละสตริงคำตอบโดยใช้สมการนอร์มัลไลเซชันตามสมการที่ (2-10) ในหัวข้อ 2.3.1.2 ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลจากเซต *MAXMIN* มาร่วมคำนวณตามสมการด้วย โดยเราจะเริ่มต้นนอร์มัลไลเซชันค่าวัตถุประสงค์ที่ 1 ของสตริงคำตอบตัวแรกก่อน จากนั้นเมื่อเราทำการนอร์มัลไลเซชันค่าวัตถุประสงค์ที่ 1 ของสตริงคำตอบตัวแรกเสร็จแล้วให้นำไปจัดเก็บในเซต *NORMALIZEOBJ* และทำการนอร์มัลไลเซชันค่าวัตถุประสงค์ตัวถัดไปของสตริงคำตอบตัวแรกต่อ และทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะทำการนอร์มัลไลเซชันค่าวัตถุประสงค์ครบทุกวัตถุประสงค์ในสตริงคำตอบตัวแรก แล้วจึงค่อยทำการเปลี่ยนไปเริ่มนอร์มัลไลเซชันค่าวัตถุประสงค์ที่ 1 ในสตริงคำตอบตัวถัดไปแทน โดยเราจะทำแบบนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะทำการนอร์มัลไลเซชันค่าวัตถุประสงค์ครบทุกวัตถุประสงค์และครบทุกสตริงคำตอบ จากนั้นจึงจะหยุดการทำงานและนำเซต *NORMALIZEOBJ* ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป สำหรับขั้นตอนการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) โดยสรุปแบบ Pseudo Code สามารถแสดงได้รูปที่ 3-14

Pseudocode for Normalization

```

1: Function Normalization (ObjValue)
2: Generate set MAXMIN and set NORMALIZEOBJ
3: Find maximum value and minimum value in each objective function from set ObjValue
4: Update maximum value and minimum value in set MAXMIN
5: for each  $p \in \text{ObjValue}$ 
6:   for each  $i = 1:\text{Amount of objective}$ 
7:     Calculate normalize objective function by using objective value in row  $p$  column  $i$  of set ObjValue
8:     Update normalize objective function value in row  $p$  column  $i$  of set NORMALIZEOBJ
9:   End for
10: End for
11: Return NORMALIZEOBJ

```

รูปที่ 3-14 Pseudo Code สำหรับโมดูลการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization)

3.4.5.6 การจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting)

โมดูลการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ หรือ *NONDOMINATED* ภายในฮิวริสติกส์นี้เป็นขั้นตอนการค้นหาและกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับแต่ละสตริงคำตอบหรือผลคำตอบ (Solution) โดยการกำหนดค่าความแข็งแรงนี้จะใช้วิธีการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำซึ่งมีการนำค่าฟังก์ชัน

วัตถุประสงค์เข้ามาพิจารณาไปด้วย อย่างไรก็ตามที่เซต *ObjValue* จากโมดูล *DECODING* จะถูกนำเข้ามาในโมดูลนี้สำหรับการเรียกใช้ข้อมูลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละสตริงคำตอบ ทั้งนี้การจัดลำดับแบบไม่ถูกรอรับได้ถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.4.1 และ 2.4.2

กระบวนการทำงานของโมดูล *NONDOMINATED* จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน โดยในส่วนที่ 1 หรือส่วนแรกนี้จะเป็นการหาสตริงคำตอบที่อยู่ในพرونเทียร์ระดับ 1 หรือมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ซึ่งเริ่มต้นด้วยการสร้างเซตว่าง *Domination* ให้กับสตริงคำตอบทั้งหมดสำหรับจัดเก็บว่าแต่ละสตริงคำตอบนั้นครอบงำสตริงคำตอบใดบ้าง ต่อมาทำการสร้างเซต *DominatedCount* ที่มีค่าเท่ากับ 0 ให้กับทุกสตริงคำตอบเพื่อจัดเก็บจำนวนครั้งที่แต่ละสตริงคำตอบถูกรอรับโดยสตริงคำตอบอื่น ถัดมาทำการสร้างเซตว่าง F_1 สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่อยู่ในพرونเทียร์ระดับ 1 และทำการสร้างเซตว่าง *Rank* สำหรับจัดเก็บค่าความแข็งแรงของสตริงคำตอบทั้งหมด จากนั้นเราจะนำค่าคำตอบ (Objective value) ของสตริงคำตอบตัวแรกที่เราจะพิจารณาทำการเปรียบเทียบกับค่าคำตอบของสตริงคำตอบที่เหลืออยู่โดยจะเป็นการเปรียบเทียบทีละสตริงคำตอบ ซึ่งหากสตริงคำตอบตัวแรกที่เรากำลังพิจารณาทำการครอบงำสตริงคำตอบใด (มีค่าคำตอบน้อยกว่า) ให้เราทำการเพิ่มสตริงคำตอบนั้นเข้าไปในเซต *Domination* แต่ถ้าหากสตริงคำตอบตัวแรกถูกรอรับโดยสตริงคำตอบอื่นให้เราทำการเพิ่มค่า 1 ลงไปในเซต *DominatedCount* ทั้งนี้เมื่อสตริงคำตอบตัวแรกที่กำลังพิจารณาทำการเปรียบเทียบค่าคำตอบครบทุกสตริงคำตอบที่เหลือแล้ว ให้ทำการตรวจสอบดูว่าเซต *DominatedCount* มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าหากมีค่าเท่ากับ 0 เราจะกำหนดค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ลงไปในเซต *Rank* ให้กับสตริงคำตอบที่เราากำลังพิจารณาอยู่และเพิ่มสตริงคำตอบที่เรากำลังพิจารณาอยู่เข้าไปจัดเก็บในเซต F_1 จากนั้นให้เรานำค่าคำตอบของสตริงคำตอบตัวถัดไปที่เราจะพิจารณาไปทำการเปรียบเทียบกับค่าคำตอบของสตริงคำตอบที่เหลืออยู่ใหม่ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไปข้างต้น และจะดำเนินการแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าสตริงคำตอบทุกตัวจะถูกเปรียบเทียบค่าคำตอบกันเองจนครบ จึงถือเป็นการสิ้นสุดในส่วนที่ 1

สำหรับส่วนที่ 2 นี้จะเป็นการหาสตริงคำตอบที่อยู่ในพرونเทียร์ตั้งแต่ระดับ 2 เป็นต้นไป โดยการหาสตริงคำตอบที่อยู่ในพرونเทียร์แต่ละระดับนั้นจะต้องใช้เซตของสตริงคำตอบที่มีพرونเทียร์อยู่ในระดับก่อนหน้ามาพิจารณาไปด้วย สำหรับขั้นตอนแรกจะเริ่มต้นด้วยการกำหนดตัวแปร k เท่ากับ 1 เมื่อ k คือระดับพرونเทียร์ ต่อมาทำการสร้างเซต F_k สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่อยู่ในพرونเทียร์ระดับ k โดยการหาสตริงคำตอบที่อยู่ในพرونเทียร์ระดับที่ 2 นี้ จะต้องใช้เซตของสตริงคำตอบที่มีพرونเทียร์อยู่ในระดับก่อนหน้ามาพิจารณาไปด้วยในที่นี้เราจะนำเซต F_1 ที่ได้จากส่วนที่

1 มาใส่ในเซต $F_{k=1}$ จากนั้นเราจะทำการสร้างเซตว่าง Q สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบในแต่ละรอบการทำงานของการทำงานหาฟรอนเทียร์แต่ละระดับ ถัดมาเราจะพิจารณาว่ามีสตริงคำตอบใดบ้างที่เป็นสตริงคำตอบที่อยู่ในฟรอนเทียร์ระดับ 1 โดยเราจะนำสตริงคำตอบตัวแรกที่เป็นฟรอนเทียร์ระดับ 1 มาพิจารณาว่าสตริงคำตอบตัวนี้ได้ครอบงำสตริงคำตอบตัวใดบ้างจากเซต *Domination* จากนั้นนำสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำตัวแรกจากเซต *Domination* มาลบค่า *DominatedCount* ออกไป 1 หน่วย แล้วตรวจสอบว่า *DominatedCount* มีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าหากสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำตัวนี้มี *DominatedCount* ไม่เท่ากับ 0 เราจะเปลี่ยนไปพิจารณาสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำตัวถัดไปจากเซต *Domination* แต่หากสตริงคำตอบตัวนี้มี *DominatedCount* เท่ากับ 0 เราจะกำหนดให้สตริงคำตอบตัวนั้นเป็นสตริงคำตอบที่อยู่ในฟรอนเทียร์ระดับ 2 โดยการระบุค่าความแข็งแรงเท่ากับ 2 ลงไปในเซต *Rank* ให้กับสตริงคำตอบตัวนั้นและจัดเก็บเข้าเซต Q จากนั้นให้ทำการนำสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำตัวถัดไปจากเซต *Domination* มาพิจารณาต่อและทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพิจารณาสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำซึ่งอยู่ในเซต *Domination* จนครบ

เมื่อทำการพิจารณาสตริงคำตอบที่ถูกครอบงำซึ่งอยู่ในเซต *Domination* ครบแล้ว ให้เราเปลี่ยนไปพิจารณาสตริงคำตอบตัวถัดไปที่ฟรอนเทียร์ระดับ 1 และให้ดำเนินการแบบเดียวกับตอนพิจารณาสตริงคำตอบตัวแรกที่เป็นฟรอนเทียร์ระดับ 1 ซึ่งได้กล่าวไปแล้วข้างต้นและทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพิจารณาสตริงคำตอบที่เป็นฟรอนเทียร์ระดับ 1 จนครบทุกตัว สุดท้ายเมื่อเราทำการพิจารณาสตริงคำตอบที่เป็นฟรอนเทียร์ระดับ 1 ครบ ให้เราเพิ่มค่าตัวแปร k เข้าไป 1 หน่วย และทำการจัดเก็บสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต Q มาเก็บในเซต F_k แทน จากนั้นให้วนกลับไปเริ่มต้นดำเนินการในส่วนที่ 2 ใหม่ตั้งแต่แรก โดยจะเปลี่ยนเป็นการหาสตริงคำตอบที่อยู่ในฟรอนเทียร์ระดับถัดไป ซึ่งเราจะทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าสตริงคำตอบจะถูกกำหนดค่าความแข็งแรงหรือระดับฟรอนเทียร์จนครบทุกตัว จากนั้นจึงจะหยุดการทำงานและนำเซต *Rank* กับเซต F_k ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป สำหรับขั้นตอนการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting) โดยสรุปแบบ Pseudo Code สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-15

Pseudocode for Non-Dominated Sorting

```

1: Function NONDOMINATED (ObjValue)
2: Stage-1
3: for each solution's objective function value  $p \in \text{ObjValue}$ 
4:   Generate set  $\text{Domination}_p = \emptyset$  and set  $\text{DominatedCount}_p = 0$ 
5:   for each solution's objective function value  $q \in \text{ObjValue}$ 
6:     if ( $p < q$ ) then
7:        $\text{Domination}_p = \text{Domination}_p \cup q$ 
8:     elseif ( $q < p$ ) then
9:        $\text{DominatedCount}_p = \text{DominatedCount}_p + 1$ 
10:    End if
11:  End for
12:  if  $\text{DominatedCount}_p = 0$  then
13:     $\text{Rank}_p = 1$ 
14:     $F_1 = F_1 \cup p$ 
15:  End if
16: End for
17: Stage-2
18: Define  $k = 1$ 
19: while  $F_k \neq \emptyset$ 
20:   Generate set  $Q = \emptyset$ 
21:   for each rank's solution  $p \in F_k$ 
22:     for each solution  $q \in \text{Domination}_p$ 
23:        $\text{DominatedCount}_q = \text{DominatedCount}_q - 1$ 
24:       if  $\text{DominatedCount}_q = 0$  then
25:          $\text{Rank}_q = k + 1$ 
26:          $Q = Q \cup q$ 
27:       End if
28:     End for
29:   End for
30:   Define  $k = k + 1$ 
31:   Update  $F_k = Q$ 
32: End while
33: Return Rank and  $F_k$ 

```

รูปที่ 3-15 Pseudo Code สำหรับโมดูลการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated sorting)

3.4.5.7 การหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุด

โมดูลการหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุด หรือ *ASSOCIATE* เป็นโมดูลสำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างสตริงคำตอบกับจุดอ้างอิง โดยการนำเอาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์

มัลไลเซชันของสตริงคำตอบหรือจุดคำตอบไปคำนวณหาระยะทางตั้งฉากกับเส้นอ้างอิง (Reference line) บนระนาบวัตถุประสงค์ (Hyperplane) เมื่อเราได้ระยะทางตั้งฉากระหว่างจุดคำตอบทุกจุดกับทุกเส้นอ้างอิงแล้ว ให้ทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงโดยพิจารณาระยะทางตั้งฉากระหว่างจุดคำตอบกับเส้นอ้างอิง (Reference line) ที่สั้นที่สุด ทั้งนี้เซต **NORMALIZEOBJ** จากโมดูล **Normalization** และตารางเวกเตอร์จุดอ้างอิง (Reference point vector) จากโมดูล **REFERENCEPOINT** จะถูกนำเข้ามาในโมดูลนี้สำหรับการเรียกใช้ข้อมูลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอร์มัลไลเซชันแล้วของแต่ละสตริงคำตอบกับข้อมูลเวกเตอร์จุดอ้างอิงตามลำดับ

สำหรับโมดูล **ASSOCIATE** จะเริ่มต้นด้วยการสร้างเซต **VolumeRP** สำหรับจัดเก็บข้อมูลขนาดของจุดอ้างอิงต่าง ๆ ถัดมาทำการสร้างเซต **DisV1** สำหรับจัดเก็บระยะทางจากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่เกิดมุมตั้งฉากกับแต่ละสตริงคำตอบ พร้อมทั้งสร้างเซต **DisV2** สำหรับจัดเก็บระยะทางตั้งฉากระหว่างเส้นอ้างอิงกับจุดคำตอบ และสุดท้ายทำการสร้างเซต **ARP** สำหรับจัดเก็บข้อมูลระยะทางตั้งฉากและความสัมพันธ์ของจุดอ้างอิงที่ได้เลือกให้กับสตริงคำตอบ

โดยเมื่อทำการสร้างเซตทั้งหมดแล้ว เราจะเริ่มทำการหาขนาดของจุดอ้างอิงในแต่ละจุดอ้างอิงโดยใช้ข้อมูลเวกเตอร์จุดอ้างอิงจากโมดูล **REFERENCEPOINT** เข้ามาร่วมการคำนวณด้วย จากนั้นเมื่อดำเนินการคำนวณหาขนาดของจุดอ้างอิงครบทุกจุดอ้างอิงแล้วให้นำมาเก็บไว้ในเซต **VolumeRP** ถัดมาทำการคำนวณค่าระยะทางจากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่เกิดมุมตั้งฉากกับจุดคำตอบของสตริงคำตอบ บนเส้นอ้างอิง ($d_{j,1}(x)$) ให้กับทุกสตริงคำตอบและทุกจุดอ้างอิง โดยเราจะเริ่มทำการคำนวณหาค่า $d_{j,1}(x)$ ที่ละสตริงคำตอบและที่ละจุดอ้างอิงซึ่งจะมีการใช้ข้อมูลขนาดของจุดอ้างอิงจากเซต **VolumeRP** รวมถึงข้อมูลค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกนอร์มัลไลเซชันจากโมดูล **Normalization** ที่เป็นสตริงคำตอบเดียวกันมาคำนวณด้วยโดยจะนำมาคำนวณตามสมการที่ (2-11) ในหัวข้อ 2.3.1.2 ทั้งนี้เมื่อเราได้ค่า $d_{j,1}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกกับจุดอ้างอิงตัวแรกแล้วให้นำค่า $d_{j,1}(x)$ ที่คำนวณมาได้ไปจัดเก็บในเซต **DisV1** จากนั้นเราจะเปลี่ยนไปหาค่า $d_{j,1}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกกับจุดอ้างอิงตัวถัดไปแทน โดยเราจะทำแบบนี้เรื่อย ๆ จนกว่าเราจะทำการคำนวณหาค่า $d_{j,1}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกครบทุกจุดอ้างอิง โดยเมื่อเราทำการคำนวณหาค่า $d_{j,1}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกจนครบทุกจุดอ้างอิงแล้ว เราจะทำการเปลี่ยนไปหาค่า $d_{j,1}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวถัดไปกับจุดอ้างอิงตัวแรกใหม่ ซึ่งเราจะทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าเราจะคำนวณค่า $d_{j,1}(x)$ ครบทุกสตริงคำตอบและทุกจุดอ้างอิง

จากนั้นทำการคำนวณค่าระยะทางตั้งฉากระหว่างเส้นอ้างอิงกับจุดคำตอบของสตริงคำตอบ ($d_{j,2}(x)$) ให้กับทุกสตริงคำตอบและทุกจุดอ้างอิง โดยเราจะเริ่มทำการคำนวณหาค่า $d_{j,2}(x)$ ที่ละสตริงคำตอบและทีละจุดอ้างอิงเหมือนเดิม โดยจะมีการใช้ข้อมูลขนาดของจุดอ้างอิงจากเซต *VolumeRP* รวมถึงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกลดเลขนอร์มัลไลเซชันจากโมดูล *Normalization* ที่เป็นสตริงคำตอบเดียวกัน และข้อมูลค่า $d_{j,1}(x)$ จากเซต *DisV1* ที่เราได้คำนวณเอาไว้ก่อนหน้านี้ มาร่วมคำนวณด้วยตามสมการที่ (2-12) ในหัวข้อ 2.3.1.2 ทั้งนี้เมื่อเราได้ค่า $d_{j,2}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกกับจุดอ้างอิงตัวแรกแล้ว ให้นำค่า $d_{j,2}(x)$ ที่คำนวณมาได้ไปจัดเก็บในเซต *DisV2* จากนั้นเราจะเปลี่ยนไปหาค่า $d_{j,2}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกกับจุดอ้างอิงตัวถัดไปแทน โดยเราจะทำแบบนี้เรื่อย ๆ จนกว่าเราจะทำการคำนวณหาค่า $d_{j,2}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกครบทุกจุดอ้างอิง โดยเมื่อเราจะทำการคำนวณหาค่า $d_{j,2}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวแรกจนครบทุกจุดอ้างอิงแล้ว เราทำการเปลี่ยนไปหาค่า $d_{j,2}(x)$ ของสตริงคำตอบตัวถัดไปกับจุดอ้างอิงตัวแรกใหม่ ซึ่งเราจะทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าเราจะคำนวณค่า $d_{j,2}(x)$ ครบทุกสตริงคำตอบและทุกจุดอ้างอิง จากนั้นเราจะนำเซต *DisV2* มาทำการพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างสตริงคำตอบกับจุดอ้างอิง โดยการพิจารณาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุด เมื่อเราทราบแล้วว่าแต่ละจุดอ้างอิงมีระยะทางตั้งฉากสั้นที่สุดกับสตริงคำตอบใดเราจะนำข้อมูลระยะทางตั้งฉากกับจุดอ้างอิงของแต่ละสตริงคำตอบไปจัดเก็บไว้ในเซต *ARP* จากนั้นจึงหยุดการทำงานและนำเซต *ARP* ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป สำหรับขั้นตอนการหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุดโดยสรุปแบบ Pseudo Code สามารถแสดงได้รูปที่

3-16

Pseudocode for Associate

```

1: Function ASSOCIATE (NORMALIZEOBJ, Reference point vector)
2: Generate set VolumeRP, set DisV1, set DisV2 and set ARP
3: for each reference point  $r \in \text{Reference point vector}$ 
4:   Compute reference point scale by using data Reference point vector
5:   Update reference point scale in set VolumeRP
6: End for
7: for each solution's normalize objective function value  $p \in \text{NORMALIZEOBJ}$ 
8:   for each  $i = 1 : \text{Amount of reference point}$ 
9:     Compute reference line of solution  $p$  and reference point  $i$  by using data from
       set NORMALIZEOBJp and set VolumeRPi
10:    Update reference line in set DisV1
11:  End for
12: End for
13: for each solution's normalize objective function value  $p \in \text{NORMALIZEOBJ}$ 
14:   for each  $i = 1 : \text{Amount of reference point}$ 
15:     Compute the perpendicular distance of solution  $p$  and reference point  $i$  by using
       data from set NORMALIZEOBJp, set VolumeRPi and set DisV1pi
16:     Update perpendicular distance line in set DisV2
17:   End for
18: End for
19: Find each reference point has the shortest perpendicular distance which solution?
20: Update reference point and perpendicular distance of each solution in set ARP
21: Return ARP

```

รูปที่ 3-16 Pseudo Code สำหรับโมดูลการหาระยะทางตั้งฉากที่สั้นที่สุด

3.4.5.8 การคัดเลือกคำตอบ (Selection)

โมดูลการคัดเลือกคำตอบ หรือ **SELECTION** เป็นโมดูลสำหรับการคัดเลือกสตริงคำตอบเพื่อลดขนาดจำนวนประชากรที่มีอยู่ให้เหลือเพียงขนาดตาม Population size หรือ N เพื่อที่จะนำสตริงคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกแล้วนี้ไปทำการพัฒนาต่อในรอบการทำงาน (Generation) ถัดไป ทั้งนี้สตริงคำตอบที่เราจะนำมาพิจารณาคัดเลือก หากเป็นรอบการทำงานครั้งแรก (Generation ที่ 1) เราจะใช้สตริงคำตอบจากเซต *string* ที่ได้จากโมดูล *Initial-Solution* กับเซต *pop_child* ที่ได้จากโมดูล *MUTATION* แต่ถ้าหากเป็นรอบการทำงานอื่น ๆ เราจะนำสตริงคำตอบจากเซต *NEWPOP*

จากโมดูล *SELECTION* ของรอบการทำงานก่อนหน้า (ที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วว่ามีค่าคำตอบที่ดี) มาใช้แทนเซต *string* นอกจากนี้เรายังมีการนำเข้าสู่ข้อมูลเซต F_k จากโมดูล *NONDOMINATED* และเซต *ARP* จากโมดูล *ASSOCIATE* สำหรับการเรียกใช้ข้อมูลเพื่อคู่สตริงคำตอบในแต่ละระดับ ฟรอนเทียร์และระยะทางตั้งฉากของแต่ละสตริงคำตอบ ตามลำดับ

สำหรับโมดูล *SELECTION* จะมีการสร้างเซต *NEWPOP* สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว ต่อมาทำการสร้างเซต *Lastfront* สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่อยู่ในฟรอนเทียร์ระดับสุดท้าย (F_l) พร้อมทั้งทำการสร้างเซต *rrho* สำหรับจัดเก็บค่าจำนวนความสัมพันธ์ของสตริงคำตอบที่มีต่อจุดอ้างอิงแต่ละจุด และสุดท้ายทำการสร้างเซตว่าง *AssociatedLastfront* สำหรับเก็บสตริงคำตอบที่มีที่มีความสัมพันธ์จุดอ้างอิงตรงกับจุดอ้างอิงที่เลือกมา จากนั้นเราจะเริ่มต้นดำเนินการจัดเก็บสตริงคำตอบของฟรอนเทียร์แต่ละระดับเอาไว้ภายในเซต *NEWPOP* โดยเริ่มจากฟรอนเทียร์ระดับ 1 (F_1) ไปจนกระทั่งถึงระดับฟรอนเทียร์ที่ทำให้จำนวนสตริงคำตอบในเซต *NEWPOP* มีจำนวนสตริงคำตอบเท่ากับ N หรือมีจำนวนสตริงคำตอบมากกว่า N เป็นครั้งแรก เราจะเรียกฟรอนเทียร์ระดับสุดท้ายภายในเซต *NEWPOP* ว่าเป็นฟรอนเทียร์ระดับ l (F_l) และสตริงคำตอบใดมีระดับฟรอนเทียร์ตั้งแต่ $l+1$ เป็นต้นไปจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งถ้าหากฟรอนเทียร์ระดับ l (F_l) นี้ทำให้จำนวนสตริงคำตอบภายในเซต *NEWPOP* มีจำนวนเท่ากับ N เราจะนำสตริงคำตอบในเซต *NEWPOP* นี้ไปใช้งานสำหรับการพัฒนาคำตอบต่อในรอบการทำงาน (Generation) ถัดไปได้เลย

แต่หากฟรอนเทียร์ระดับ l (F_l) นี้ทำให้จำนวนสตริงคำตอบภายในเซต *NEWPOP* มีจำนวนมากกว่า N เป็นครั้งแรก เราจะทำการเก็บสตริงคำตอบที่มีฟรอนเทียร์ตั้งแต่ระดับ 1 ถึง $l-1$ ไว้ในเซต *NEWPOP* และเก็บสตริงคำตอบที่มีฟรอนเทียร์ระดับ l (F_l) ไว้ในเซต *Lastfront* จากนั้นทำการหาจำนวนความสัมพันธ์ของสตริงคำตอบที่มีต่อจุดอ้างอิงโดยการนำสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต *NEWPOP* มาตรวจสอบผ่านทางเซต *ARP* ว่าแต่ละสตริงคำตอบที่อยู่ในเซต *NEWPOP* มีความสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงใด (สตริงคำตอบที่นำเข้าไปในโมดูลนี้จะผ่านการหาความสัมพันธ์จากโมดูล *ASSOCIATE* มาแล้ว) แล้วจึงทำการเพิ่มค่า 1 หน่วยให้กับจุดอ้างอิงนั้น ๆ ในเซต *rrho* เมื่อเราทำการตรวจสอบครบทุกสตริงคำตอบแล้ว ให้เราทำการเลือกจุดอ้างอิงในเซต *rrho* ที่มีค่าน้อยที่สุดมา จากนั้นให้ทำการตรวจสอบดูว่าสตริงคำตอบใดบ้างในเซต *Lastfront* ที่มีความสัมพันธ์จุดอ้างอิงตรงกับจุดอ้างอิงที่เลือกมา ถ้าหากไม่มีตรงกันเลยให้ทำการตัดจุดอ้างอิงนั้นออกจากการพิจารณาพร้อมทั้งเลือกจุดอ้างอิงในเซต *rrho* ใหม่ที่มีค่าน้อยที่สุดถัดมาแทน แต่ถ้าหากมีสตริงคำตอบที่มีความสัมพันธ์

จุดอ้างอิงตรงกับจุดอ้างอิงที่เลือกมาจากเซต $rrho$ ให้เรานำสตริงคำตอบนั้นมาจัดเก็บในเซตว่าง *AssociatedLastfront* แล้วทำการพิจารณาว่าค่าของจุดอ้างอิงที่เลือกมาจากเซต $rrho$ นั้นมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ โดยหาค่าของจุดอ้างอิงที่เลือกมาจากเซต $rrho$ นั้นมีค่าเท่ากับ 0 (แม้ว่าจะมีจำนวนสตริงคำตอบในเซต *AssociatedLastfront* เท่ากับหนึ่งตัวหรือมากกว่าหนึ่งตัว) ให้เราทำการเลือกสตริงคำตอบที่มีระยะทางตั้งฉากสั้นที่สุด จากนั้นนำสตริงคำตอบที่มีระยะทางตั้งฉากสั้นที่สุดไปจัดเก็บเพิ่มไว้ในเซต *NEWPOP* และลบสตริงคำตอบที่เลือกมาออกจากเซต *Lastfront* รวมถึงทำการเพิ่มค่า 1 หน่วย ให้กับจุดอ้างอิงที่เลือกมาจากเซต $rrho$ ด้วย แต่ถ้าหากค่าของจุดอ้างอิงที่ได้ทำการเลือกมาจากเซต $rrho$ นั้นมีค่ามากกว่า 0 ให้เราทำการสุ่มเลือกสตริงคำตอบจากเซต *AssociatedLastfront* ได้เลยจากนั้นนำสตริงคำตอบที่สุ่มเลือกมาไปจัดเก็บเพิ่มไว้ในเซต *NEWPOP* และลบสตริงคำตอบที่เลือกมาออกจากเซต *Lastfront* รวมถึงทำการเพิ่มค่า 1 หน่วย ให้กับจุดอ้างอิงที่เลือกมาจากเซต $rrho$ ด้วยเช่นกัน

จากนั้นให้เราทำการตรวจสอบว่าเซต *NEWPOP* มีจำนวนสตริงคำตอบครบเท่ากับจำนวน Population size (N) หรือไม่ ถ้ายังไม่ครบเราจะทำการเลือกจุดอ้างอิงในเซต $rrho$ ที่มีค่าน้อยที่สุดใหม่ และทำตามขั้นตอนตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นไปเรื่อย ๆ จนกว่าเซต *NEWPOP* จะมีจำนวนสตริงคำตอบครบเท่ากับ Population size (N) จึงจะหยุดการทำงาน และนำเซต *NEWPOP* ไปดำเนินการต่อในกระบวนการอื่นต่อไป สำหรับขั้นตอนการคัดเลือกคำตอบ (Selection) โดยสรุปแบบ Pseudo Code นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-17

Pseudocode for Selection

```

1: Function SELECTION (String or NEWPOP, pop_child,  $F_k$ , ARP, Population size)
2: Generate set NEWPOP and set Lastfront
3: for each rank  $k \in F_k$ 
4:   if amount of solution in set NEWPOP + solution rank  $k$  in set  $F_k > \text{Population size}$  then
5:     Update solution that has fitness rank  $k$  from set  $F_k$  to set Lastfront
6:     Skip and out from this loop for
7:   elseif amount of solution in set NEWPOP + solution rank  $k$  in set  $F_k = \text{Population size}$  then
8:     Update solution that has fitness rank  $k$  of set String or NEWPOP  $\cup$  pop_child in set NEWPOP
9:     Finish and out from this module including set NEWPOP
10:  End if
11:  Update solution that has fitness rank  $k$  of set String or NEWPOP  $\cup$  pop_child in set NEWPOP
12: End for
13: Generate set rrho
14: For each solution  $a \in \text{NEWPOP}$ 
15:   Check reference point (rf) of solution  $a$  by set ARP
16:   Define column rf of set rrho equal rrho(rf) + 1
17: End for
18: While amount of solution set NEWPOP < Population size
19:   Generate set AssociatedLastfront
20:   Select reference point (column  $j$ ) by choosing minimum column  $j$ 's value of set rrho
21:   for each solution  $l \in \text{Lastfront}$ 
22:     Check solution  $l$  has reference point like  $j$ ?
23:     if solution  $l$  like  $j$  then
24:       Update solution  $l$  in set AssociatedLastfront
25:     End if
26:   End for
27:   if set AssociatedLastfront =  $\emptyset$  then
28:     Define rrho( $j$ ) =  $\emptyset$ 
29:     Return to line 20 again
30:   End if
31:   if rrho( $j$ ) = 0 then
32:     Choose a solution in set AssociatedLastfront that has the shortest perpendicular distance
33:   elseif rrho( $j$ )  $\geq 1$  then
34:     Choose a solution by random
35:   End if
36:   Update solution in set NEWPOP
37:   Delete solution was selected in Lastfront
38:   Plus value 1 to rrho( $j$ )
39:   Check amount of solution in set NEWPOP
40: End while
41: Return NEWPOP

```

รูปที่ 3-17 Pseudo Code สำหรับโมดูลการคัดเลือกคำตอบ (Selection)

3.4.5.9 การเก็บชุดคำตอบที่ดี (Elite)

โมดูลการเก็บชุดคำตอบที่ดี หรือ **ELITES** เป็นโมดูลสำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่ดีที่อัลกอริทึมเคยค้นหาค้นพบ โดยจะเป็นการนำเอาสตริงคำตอบทั้งหมด (ก่อนเข้าโมดูลการคัดเลือก) ที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ของแต่ละรอบการทำงาน (Generation) มาทำการหาค่าความแข็งแรงด้วยวิธีจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำกับสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 ซึ่งถูกจัดเก็บอยู่ก่อนหน้า (จากรอบการทำงานก่อนหน้า) โดยการใช้โมดูล **NONDOMINATED** จากนั้นให้ทำการเลือกเก็บสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 เท่านั้น ไว้ภายในเซต **E** ซึ่งเป็นเซตที่ถูกนำเข้ามาสำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่ดี เหตุผลที่จัดทำโมดูลนี้เนื่องจากการเลือกเก็บคำตอบจากโมดูลการคัดเลือกคำตอบ หรือ **SELECTION** จะถูกกำหนดจำนวนการเก็บสตริงคำตอบตามขนาด Population size (N) จึงทำให้บางครั้งเราไม่สามารถเก็บสตริงคำตอบไว้ได้ทั้งหมดหากเรามีจำนวนสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มากกว่าขนาด Population size (N)

สำหรับการทำงานของโมดูล **ELITES** หากเป็นรอบการทำงานครั้งแรก (Generation ที่ 1) เราสามารถนำสตริงคำตอบในเซต **String** ที่ได้จากโมดูล **Initial-Solution** กับเซต **pop_child** ที่ได้จากโมดูล **MUTATION** ที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มาใส่ในเซต **E** ได้เลย แต่ถ้าหากเป็นรอบการทำงานถัดไปเราจะนำสตริงคำตอบในเซต **pop_child** ที่มีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 1 มาใส่เพิ่มในเซต **E** จากนั้นนำเซต **E** ไปดำเนินการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำในโมดูล **NONDOMINATED** เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสตริงคำตอบทั้งหมดใหม่ เมื่อทำการจัดลำดับแบบไม่ถูกครอบงำเสร็จให้เราทำการกำจัดสตริงคำตอบที่มีค่าความแข็งแรงไม่เท่ากับ 1ทิ้ง และถือเป็นการสิ้นสุดการทำงานสำหรับขั้นตอนการเก็บชุดคำตอบที่ดี (Elite) โดยสรุปแบบ Pseudo Code นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-18

Pseudocode for Elites

- 1: Function **ELITES** (*String*, *pop_child*, *Generation*, *E*)
 - 2: if *Generation* = 1
 - 3: Update solution that has fitness rank 1 from set *String* and *pop_child* to set *E*
 - 4: elseif *Generation* > 1
 - 5: Update solution that has fitness rank 1 from set *pop_child* to set *E*
 - 6: Call module **NONDOMINATED** for set *E*
 - 7: Eliminate solution which solution has fitness rank not equal 1
 - 8: End if
 - 9: Return *E*
-

รูปที่ 3-18 Pseudo Code สำหรับโมดูลการเก็บชุดคำตอบที่ดี (Elite)

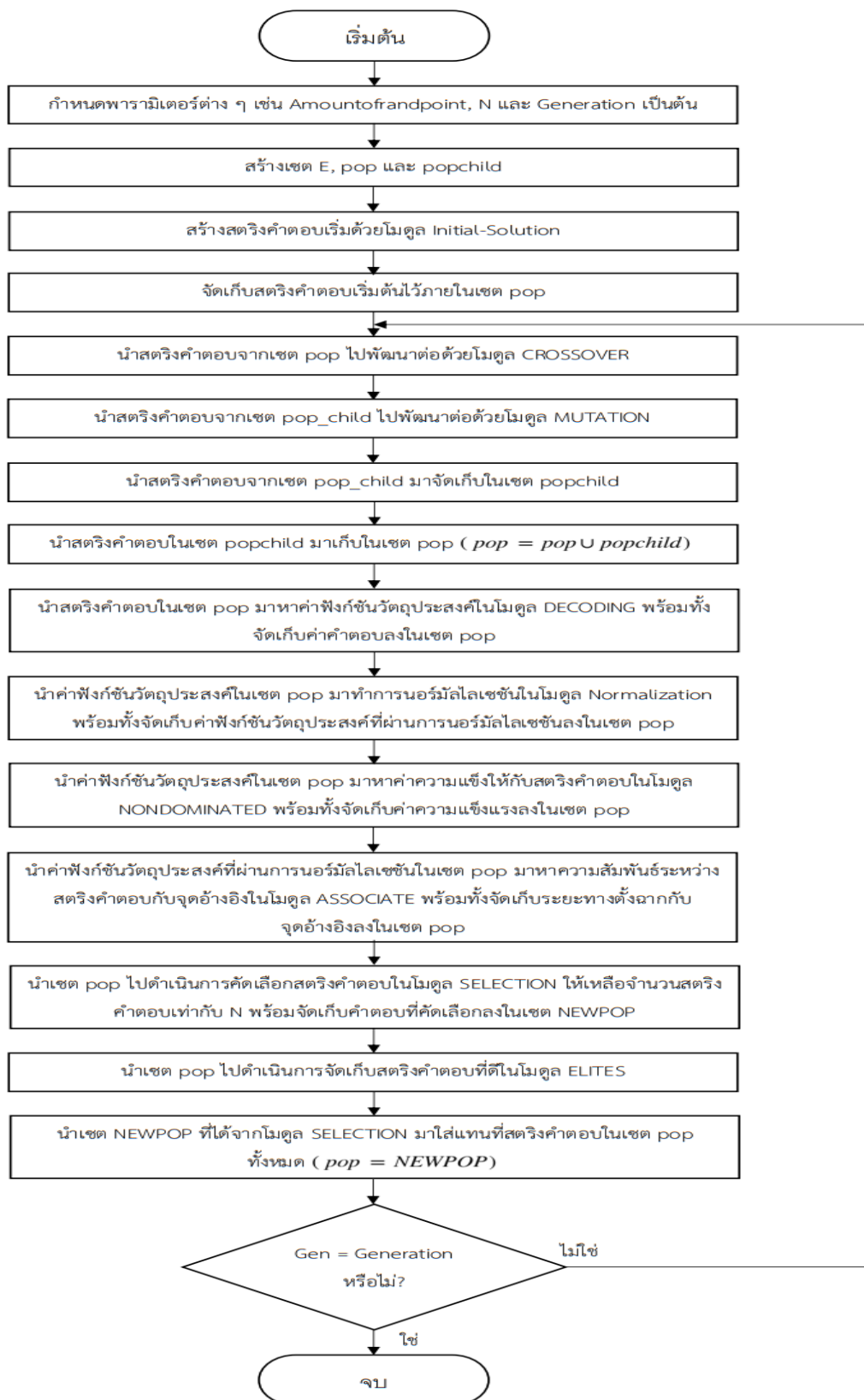
3.4.5.10 ภาพรวมการทำงานของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหา AGAP

กระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์ในภาพรวมนี้จะเป็นการอธิบายลำดับการทำงานหรือการเรียกใช้โมดูลต่าง ๆ ของฮิวริสติกส์ โดยกระบวนการหาคำตอบของฮิวริสติกส์จะเริ่มต้นจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4.1 นอกจากนี้จะมีพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นมาจากหัวข้อ 3.4.1 คือ พารามิเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดจำนวนคอลัมน์หรือเที่ยวบินที่จะกลายพันธุ์ (Amount of random point) สำหรับโมดูล **MUTATION** และตัวแปรสำหรับนับรอบการทำงาน (Gen)

จากนั้นเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการกำหนดพารามิเตอร์แล้ว เราจะเริ่มต้นด้วยการสร้างเซตว่าง E สำหรับจัดเก็บสตริงคำตอบที่ดี และเพื่อความสะดวกสำหรับการนำข้อมูลไปเข้าใช้ในโมดูลต่าง ๆ เรา จะทำการสร้างเซต **pop** กับ **popchild** ซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนประชากร (Population size) หรือ N สำหรับจัดเก็บข้อมูลต่าง ๆ ของสตริงคำตอบปกติกับสตริงคำตอบที่ผ่านการพัฒนาแล้วตามลำดับ โดยข้อมูลที่เรานำมาเก็บไว้ในเซตที่สร้างเหล่านี้ ได้แก่ ผลคำตอบหรือสตริงคำตอบ (Solution) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละวัตถุประสงค์หรือค่าคำตอบ (Objective value) ค่าความแข็งแรง (Rank) ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการนอร์มัลไลเซชัน ระยะทางตั้งฉาก และจุดอ้างอิงที่สตริงคำตอบมีความสัมพันธ์ด้วย ต่อมาจึงเข้าสู่ขั้นตอนแรกของการสร้างผลคำตอบ เริ่มต้นโดยการเรียกใช้โมดูล **Initial-Solution** ในหัวข้อ 3.4.5.2 ซึ่งจะเป็นการสร้างผลคำตอบขึ้นมาจำนวนทั้งหมดเท่ากับจำนวนประชากรแล้วจึงนำผลคำตอบทั้งหมดที่ได้ไปจัดเก็บไว้ในเซต **pop** ต่อไปจากนั้นจะเข้าสู่รอบการทำงานครั้งที่ 1 (Gen=1) โดยเราจะนำผลคำตอบที่ได้ซึ่งอยู่ในเซต **pop** มาเป็นสตริงคำตอบรุ่นพ่อและแม่แล้วนำไปพัฒนาต่อโดยการเรียกใช้งานโมดูล **CROSSOVER** ซึ่งหลังจากการใช้งานโมดูลนี้เสร็จเราจะได้ผลคำตอบรุ่นลูกที่อยู่ในเซต **pop_child** ออกมา จากนั้นให้นำเซต **pop_child** นี้เข้าดำเนินการในโมดูล **MUTATION** ต่อ

เมื่อดำเนินการเสร็จแล้วเราจะได้เซต **pop_child** ที่เป็นผลคำตอบหรือสตริงคำตอบรุ่นลูกที่ผ่านการพัฒนาคำตอบด้วยวิธี Crossover กับ Mutation จากนั้นจึงนำสตริงคำตอบรุ่นลูกในเซต **pop_child** ไปจัดเก็บไว้ในเซต **popchild** เมื่อจัดเก็บเสร็จแล้วเราจะนำเซต **pop** และเซต **popchild** มารวมกันโดยใช้ชื่อเซตว่า **pop** ตามเดิม ด้วยเหตุนี้จะทำให้เซต **pop** นั้นมีขนาดเท่ากับ $2N$ ถัดมาเราจะนำเซต **pop** ไปดำเนินการในโมดูล **DECODING** เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละวัตถุประสงค์ โมดูล **Normalization** เพื่อนำเอาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละวัตถุประสงค์ไปทำการนอร์มัลไลเซชัน โมดูล **NONDOMINATED** เพื่อกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับแต่ละสตริงคำตอบ

หรือผลคำตอบ (Solution) และโมดูล *ASSOCIATE* เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสตริงคำตอบกับ จุดอ้างอิง ตามลำดับ โดยทุกครั้งที่เซต *pop* ผ่านการดำเนินการในโมดูลใดตามที่ได้กล่าวไปนี้เราจะ นำเอาเซตคำตอบที่ได้จากโมดูลนั้น ๆ มาจัดเก็บในเซต *pop* เสมอ เช่น การนำเซต *pop* ไป ดำเนินการถอดรหัสสตริงคำตอบเพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละวัตถุประสงค์ด้วยการเรียกใช้ โมดูล *DECODING* เราจะนำคำตอบจากเซต *ObjValue* ที่ได้มาจัดเก็บในเซต *pop* เป็นต้น จากนั้นเราจะนำเซต *pop* เข้าไปดำเนินการในโมดูล *SELECTION* เพื่อลดจำนวนสตริงคำตอบที่จะ นำไปใช้ต่อให้เหลือจำนวนเท่ากับ *N* พร้อมทั้งจัดเก็บสตริงคำตอบที่คัดเลือกมาแล้วลงในเซต *NEWPOP* ซึ่งเมื่อดำเนินการเสร็จแล้วเราจะนำเอาเซต *pop* พร้อมกับเซต *E* เข้าดำเนินการต่อใน โมดูล *ELITES* เพื่อทำการจัดเก็บคำตอบที่ดี และสุดท้ายนี้เราจะนำคำตอบในเซต *NEWPOP* ที่ได้มา ไปแทนที่คำตอบในเซต *pop* ทั้งหมดต่อไป จากนั้นเราจะนำเซต *pop* วนกลับไปเข้าสู่รอบการทำงาน ครั้งที่2 (Gen=2) โดยเริ่มต้นด้วยการนำเอาสตริงคำตอบในเซต *pop* ไปทำการพัฒนาหาสตริงคำตอบ รุ่นลูกใหม่ ซึ่งเราจะทำแบบไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งครบรอบการทำงานตามพารามิเตอร์ Generation ที่ เรากำหนดไว้ ทั้งนี้ แผนภาพที่แสดงกระบวนการทำงานโดยภาพรวมของฮิวริสติกส์ และขั้นตอนโดย สรุบบแบบ Pseudo Code สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-19 และรูปที่ 3-20 ตามลำดับ



รูปที่ 3-19 แผนภาพแสดงกระบวนการทำงานภาพรวมของฮิวริสติกส์

Pseudocode for Main Heuristic

- 1: Begin
 - 2: Define all parameters such as *Amountofrandpoint*, *Generation* and *any data*
 - 3: Generate set *E*, set *pop* and set *popchild*
 - 4: Call module *Initial-Solution* (*population size*, *parameter*)
 - 5: Update solution of set *String* from module *Initial-Solution* to set *pop*
 - 6: Main Loop
 - 7: for each *Gen=1:Generation*
 - 8: Call module *CROSSOVER* (*pop*, *Pc*)
 - 9: Call module *MUTATION* (*pop_child*, *Amountofrandpoint*, *Pm*)
 - 10: Update solution of set *pop_child* to set *popchild*
 - 11: Update solution of set *popchild* to set *pop* ($pop = pop \cup popchild$)
 - 12: Call module *DECODING* (*pop*)
 - 13: Update data from set *ObjValue* to set *pop*
 - 14: Call module *Normalization* (*pop*)
 - 15: Update data from set *NORMALIZEOBJ* to set *pop*
 - 16: Call module *NONDOMINATED* (*ObjValue*)
 - 17: Update data from set *Rank* to set *pop*
 - 18: Call module *ASSOCIATE* (*pop*)
 - 19: Update data from set *ARP* to set *pop*
 - 20: Call module *SELECTION* (*pop*, F_k , *Population size*)
 - 21: Call module *ELITES* (*pop*, *Gen*, *E*)
 - 22: Update solution of set *NEWPOP* to set *pop* ($pop = NEWPOP$)
 - 23: End for
-

รูปที่ 3-20 Pseudo Code แสดงกระบวนการทำงานภาพรวมของฮิวริสติกส์

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

สำหรับบทนี้ทางผู้วิจัยจะกล่าวถึงการสร้างข้อมูลนำเข้าจำลอง และผลลัพธ์ของการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสนับสนุนการปฏิบัติงานที่ทางผู้วิจัยได้ออกแบบและจัดทำขึ้น โดยมีการใช้อัลกอริทึม NSGA-III เป็นระบบหลักในการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน ซึ่งในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพนั้นจะประกอบไปด้วย ค่าคำตอบ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์) ที่ได้จากอัลกอริทึม NSGA-III เปรียบเทียบกับค่าคำตอบที่ได้จากวิธีการหาค่าตอบแบบแม่นยำตรงโดยใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์ และผลการวัดสมรรถนะของอัลกอริทึมในการหาค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP)

4.1 Instance Generation

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของฮิวริสติกส์ หรือระบบสนับสนุนการปฏิบัติงานสำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) นั้น ขนาดของปัญหาหรือขนาดของข้อมูลนับเป็นส่วนสำคัญในการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบ รวมถึงการตอบสนองของฮิวริสติกส์ต่อปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการทดสอบนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้อมูลนำเข้าที่มีค่าคงที่ต่อทุกขนาดปัญหา เช่น เวลาขั้นต่ำระหว่างคู่เที่ยวบิน (buffer time) และจำนวนจุดรับส่ง (Point) โดยผู้วิจัยสามารถแสดงข้อมูลนำเข้า หรือพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่เหล่านี้ได้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงข้อมูลนำเข้า หรือพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่

No.	Parameters	Meaning	Value	Units
1	A, B	เลขฐานสำหรับสมการคำนวณ Conflict time	13.76902869, 0.93891258	-
2	buffer time	เวลาขั้นต่ำที่ต้องมีระหว่างคู่เที่ยวบิน ทั้งเที่ยวบินภายในประเทศ หรือระหว่างประเทศ	30	minute
3	points	จำนวนจุดปล่อยรถรวมถึงจุดที่คอยรับ-ส่งผู้โดยสาร ทั้งเที่ยวบินภายในประเทศ หรือระหว่างประเทศ	3	point

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงข้อมูลนำเข้า หรือพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (ต่อ)

No.	Parameters	Meaning	Value	Units
4	Consumption rate of tow	อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกทุกหนัก (18 ล้อ)	2.94	km/lite
5	Consumption rate of passenger	อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันของรถโดยสารประจำทางปรับอากาศ (ขสมก.)	3.5	km/lite
6	Distance gate to gate	ระยะทางระหว่างหลุมจอดอากาศยานใด ๆ ไปยังหลุมจอดหลุมจอดอากาศยานใด ๆ	เมตรริก	m
7	Distance point to gate	ระยะทางระหว่างจุดปล่อยยรถรวมถึงจุดรับ-ส่งผู้โดยสารไปยังหลุมจอดอากาศยานต่าง ๆ	เมตรริก	m

ส่วนข้อมูลนำเข้าประเภทที่สองคือ ข้อมูลนำเข้าที่จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดปัญหา เช่น จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยาน และจำนวนหลุมจอดอากาศยาน โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ให้ความสนใจกับการจำลองข้อมูลนำเข้าประเภทที่สอง ซึ่งเราสามารถแบ่งการจำลองข้อมูลนำเข้านี้ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

4.1.1 การจำลองข้อมูลนำเข้าด้านเที่ยวบิน

ปัจจุบันท่าอากาศยานสุวรรณภูมิได้รองรับการเดินทางทางอากาศทั้งภายในประเทศและระหว่างประเทศ ส่งผลให้จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีจำนวนที่สูง และด้วยการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมการบินภายในประเทศไทยยังส่งผลให้จำนวนเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องอีกด้วย (ช่วงก่อนเกิดสถานการณ์การระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยฉบับนี้ ได้นำข้อมูลเที่ยวบินที่เข้าใช้บริการท่าอากาศยานสุวรรณภูมิจริงโดยเป็นข้อมูลเที่ยวบินที่มีเวลาเข้า-ออกตามตาราง (Schedule plan) จำนวน 15 วัน จากบริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) มาทำการแบ่งออกเป็นกิจกรรมต่าง ๆ (Sub activity) ตามขั้นตอนการแปลงข้อมูลเที่ยวบินที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.4.4 ทั้งนี้เพื่อเป็นการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน ทางผู้วิจัยจึงกำหนดขนาดของปัญหาโดยใช้เวลาที่เที่ยวบินเข้าใช้บริการท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ และความสามารถในการหาคำตอบของโปรแกรม CPLEX OPL Solver เป็นเกณฑ์ โดยเราสามารถแบ่งขนาดของปัญหาออกเป็น 3 ขนาด คือ

- ปัญหาขนาดเล็ก: จำนวน 20 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน)
- ปัญหาขนาดกลาง: จำนวน 100 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน)
- ปัญหาขนาดใหญ่: จำนวน 300 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน)

สำหรับกิจกรรมของเที่ยวบินที่ใช้ในแต่ละขนาดปัญหาจะเกิดจากการสุมหยาบมาจากการแบ่งเที่ยวบินตามตาราง 1 วันออกเป็นกิจกรรมต่าง ๆ โดยเที่ยวบินตามตาราง 1 วันนี้จะถูกนำไปสร้างเป็นปัญหาขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ประกอบกับข้อมูลเที่ยวบินตามตารางที่ผู้วิจัยนำมาทดสอบภายในงานวิจัยฉบับนี้นั้นมีจำนวน 15 วัน จึงส่งผลให้เรามีข้อมูลสำหรับทดสอบดังนี้ ปัญหาขนาดเล็กจำนวน 15 ชุดข้อมูล ปัญหาขนาดกลางจำนวน 15 ชุดข้อมูล และปัญหาขนาดใหญ่จำนวน 15 ชุดข้อมูล

ในส่วนของเหตุผลที่ผู้วิจัยกำหนดให้ปัญหาขนาดใหญ่มีจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินเท่ากับ 300 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน) เนื่องจากท่าอากาศยานสามารถมีโอกาสดังกล่าวที่จะถูกก่อกรวน (Interruption) ได้ค่อนข้างสูง ไม่ว่าจะเป็นเกิดจากปัจจัยด้านสภาพอากาศ หรือปัจจัยอื่นที่ทำให้การเดินทางด้วยอากาศยานต้องหยุดชะงัก จึงอาจส่งผลให้กำหนดการการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ด้วยเหตุนี้ เที่ยวบินที่มีกำหนดการเวลาเข้าใช้บริการท่าอากาศยานบางช่วงเวลาอาจมีโอกาสดังกล่าวที่ยังไม่ถูกใช้งาน (ซึ่งหมายถึงอาจเกิดการเสียเวลาในการจัดสรรโดยไม่จำเป็น) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจกำหนดให้ปัญหาขนาดใหญ่มีขนาดปัญหาเท่ากับจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่ได้จากการนำเที่ยวบินที่มีการเข้าใช้บริการท่าอากาศยานภายในกรอบระยะเวลา 12 ชั่วโมง หรือครึ่งวัน (00.00 – 12.00 น. กับ 12.01 – 24.00 น.) มาแบ่งออกเป็นกิจกรรมต่าง ๆ และจากข้อมูลเที่ยวบินตามตารางจำนวน 15 วัน ที่ทางผู้วิจัยนำมาใช้งานนั้นพบว่าจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่ได้จากการนำเที่ยวบินที่มีการเข้าใช้บริการท่าอากาศยานภายในกรอบระยะเวลาดังกล่าวมาแบ่งออกเป็นกิจกรรมต่าง ๆ มีจำนวนประมาณ 200 - 300 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน) ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงทำการเลือกให้ปัญหาขนาดใหญ่มีขนาดของปัญหาอยู่ที่ 300 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน) ส่วนปัญหาขนาดกลางกับปัญหาขนาดเล็ก ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีขนาดของปัญหาอยู่ที่ 20 และ 100 เที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน) ตามลำดับ เนื่องจากผู้วิจัยต้องการให้ปัญหาแต่ละขนาดมีจำนวนเที่ยวบิน (กิจกรรมของเที่ยวบิน) ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

4.1.2 การจำลองข้อมูลนำเข้าด้านหลุมจอดอากาศยาน

ทรัพยากรหลุมจอดอากาศยาน ถือเป็นทรัพยากรที่สำคัญของท่าอากาศยานเนื่องจากเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัดและส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการรองรับเที่ยวบินที่จะเข้า

มาใช้บริการ อีกทั้ง ต้องใช้เวลาและเงินลงทุนที่สูงในการสร้างหลุมจอดอากาศยานเพิ่มเติม งานวิจัยฉบับนี้ได้นำข้อมูลหลุมจอดอากาศยานจริงจากบริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) มาใช้งาน โดยในปัจจุบันท่าอากาศยานสุวรรณภูมิมีหลุมจอดอากาศยานสำหรับรับ-ส่งผู้โดยสารทั้งหมด 109 หลุมจอด ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ หลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคารสำหรับเที่ยวบินภายในประเทศ (G1) จำนวน 12 หลุมจอด หลุมจอดอากาศยานประเภทประชิดอาคารสำหรับเที่ยวบินระหว่างประเทศ (G2) จำนวน 39 หลุมจอด หลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลสำหรับเที่ยวบินภายในประเทศหรือระหว่างประเทศ (G3) จำนวน 40 หลุมจอด และหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลสำหรับเที่ยวบินระหว่างประเทศ (G4) จำนวน 18 หลุมจอด สำหรับการกำหนดสัดส่วนประเภทหลุมจอดอากาศยานในแต่ละขนาดปัญหาเพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงกับข้อมูลที่ได้นำมาข้างต้น และเพื่อความสะดวก ทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดหลักเกณฑ์ขึ้นมาทั้งหมด 3 ข้อ ดังนี้ หลุมจอดประเภท G1 จะต้องมีย่านน้อยกว่าหรือเท่ากับหลุมจอดประเภท G2 หลุมจอดประเภท G3 ต้องมีจำนวนมากกว่าหลุมจอดประเภท G4 และจำนวนหลุมจอดประเภท G1 กับ G2 รวมกันจะต้องน้อยกว่าจำนวนหลุมจอดประเภท G3 กับ G4 รวมกัน ซึ่งจะทำให้เราได้จำนวนทรัพยากรหลุมจอดอากาศยาน และสัดส่วนประเภทหลุมจอดอากาศยานในแต่ละขนาดของปัญหาดังนี้

- ปัญหาขนาดเล็ก: จำนวน 12 หลุมจอด แบ่งเป็นหลุมจอดอากาศยานประเภท G1 2 หลุมจอด G2 2 หลุมจอด G3 5 หลุมจอด และ G4 3 หลุมจอด
- ปัญหาขนาดกลาง: จำนวน 40 หลุมจอด แบ่งเป็นหลุมจอดอากาศยานประเภท G1 7 หลุมจอด G2 8 หลุมจอด G3 15 หลุมจอด และ G4 10 หลุมจอด
- ปัญหาขนาดใหญ่: จำนวน 109 หลุมจอด แบ่งเป็นหลุมจอดอากาศยานประเภท G1 12 หลุมจอด G2 39 หลุมจอด G3 40 หลุมจอด และ G4 18 หลุมจอด

สำหรับหลุมจอดอากาศยานที่ใช้ในแต่ละขนาดปัญหาจะเกิดจากการสุ่มหยิบมาจากรายชื่อหลุมจอดอากาศยานจริง และทุกชุดข้อมูลในแต่ละขนาดปัญหา ทางผู้วิจัยจะกำหนดให้ทำการใช้หลุมจอดอากาศยานเดียวกันในการทดลอง โดยเหตุผลที่ผู้วิจัยกำหนดให้จำนวนหลุมจอดอากาศยานสำหรับปัญหขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ เท่ากับ 12 40 และ 109 หลุมจอด ตามลำดับ เนื่องจากปัญหขนาดเล็กกับปัญหขนาดกลาง เราจะใช้จำนวนหลุมจอดอากาศยานที่น้อยที่สุดที่สามารถแก้ไขปัญหากับทุกชุดข้อมูลในแต่ละขนาดปัญหาออก ส่วนปัญหขนาดใหญ่ทางผู้วิจัยต้องการให้สอดคล้องกับ

ความเป็นจริงมากที่สุด จึงเลือกใช้จำนวนหลุมจอดอากาศยานทั้งหมดที่ทางท่าอากาศยานสุวรรณภูมิใช้งานในปัจจุบัน

4.2 โปรแกรมและอุปกรณ์คำนวณ

ในการคำนวณและทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของฮิวริสติกส์ หรือระบบสนับสนุนการปฏิบัติงาน ทางผู้วิจัยได้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล AMD Ryzen7 3700X 8-Core และ RAM ขนาด 16 Gb. โดยโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน ได้แก่

- โปรแกรม CPLEX OPL 12.10 Solver สำหรับการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานด้วยวิธีการหาคำตอบแบบแม่นยำตรง
- โปรแกรม MATLAB R2020b สำหรับการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานด้วยวิธีการหาคำตอบฮิวริสติกส์

ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบกับปัญหาทั้ง 3 ขนาด (เล็ก กลาง และใหญ่) ตามที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งมีจำนวนชุดข้อมูลนำเข้า 15 ชุดข้อมูลในแต่ละขนาดปัญหา และทำการทดสอบประสิทธิภาพด้วยวิธีการหาคำตอบแบบใช้วัตถุประสงค์เดียว และแบบหลายวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์

4.3 ผลการทดสอบด้วยวิธีแบบวัตถุประสงค์เดียว

การทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบแบบใช้วัตถุประสงค์เดียวเป็นเกณฑ์ จะเป็นการนำเอาผลลัพธ์ (ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์) และระยะเวลาที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณระหว่างการหาคำตอบด้วยวิธีแม่นยำตรงกับการหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์ของแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้ ผลการทดสอบประสิทธิภาพจะมีเฉพาะแค่ปัญหขนาดเล็เท่านั้น เนื่องจากมีเพียงปัญหขนาดเล็เพียงขนาดเดียวที่วิธีแม่นยำตรงสามารถค้นหาคำตอบได้ ส่วนปัญหขนาดกลางและปัญหขนาดใหญ่นั้นคอมพิวเตอร์ของผู้วิจัยมีจำนวนพื้นที่หน่วยความจำ (RAM) ไม่เพียงพอ (Out of memory) ต่อการเก็บข้อมูลจึงส่งผลให้ไม่สามารถค้นหาคำตอบด้วยวิธีแม่นยำตรงได้ ผลการทดสอบประสิทธิภาพจากการหาคำตอบจำนวน 10 รอบ (Replicate) รอบละ 1000 รอบการคำนวณ (Generations) ต่อหนึ่งชุดข้อมูลนำเข้า รวมทั้งสิ้น 15 ชุดข้อมูลของปัญหขนาดเล็ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหขนาดเล็ก

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3
1	Direct Method	Obj Value	1	13.3807	4.2681E-14
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.714	1.02	0.843
	Heuristic	Best Obj	1	13.3807	4.2681E-14
		Avg Obj	1	13.3807	4.2681E-14
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	30.2297	33.3281	30.2984
		Sd of CPU Times	3.1552	3.3729	2.7078
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0
		CPU Times	4133.85%	3167.46%	3494.12%
2	Direct Method	Obj Value	3	16.4618	4.7056E-07
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.842	0.804	0.738
	Heuristic	Best Obj	3	16.4618	4.7056E-07
		Avg Obj	3.2	16.4618	4.7056E-07
		Sd of Obj	0.4216	0	0
		Avg CPU Times	30.1359	28.3922	28.2969
		Sd of CPU Times	2.7115	1.5145	1.4407
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	7%	0%	0%
		CPU Times	3479.09%	3431.37%	3734.26%
3	Direct Method	Obj Value	1	16.6623	0.000132791
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.625	0.777	0.711
	Heuristic	Best Obj	1	16.6623	0.000132791
		Avg Obj	1	16.6759	0.000132791
		Sd of Obj	0	0.0346	0
		Avg CPU Times	28.3906	28.9141	29.4578
		Sd of CPU Times	3.1070	2.8298	3.0972
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	8.1517E-04	0%
		CPU Times	4442.50%	3621.24%	4043.15%

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหขนาดเล็ก (ต่อ)

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3
4	Direct Method	Obj Value	3	15.3149	8.0726E-10
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.73	0.75	0.615
	Heuristic	Best Obj	3	15.3149	8.0726E-10
		Avg Obj	3	15.3149	8.0726E-10
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	30.6203	32.4031	31.5063
		Sd of CPU Times	3.0482	3.3228	3.5207
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	4094.56%	4220.42%	5022.97%
5	Direct Method	Obj Value	2	13.4495	9.4360E-09
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.64	0.754	0.807
	Heuristic	Best Obj	2	13.4495	9.4360E-09
		Avg Obj	2	13.4495	9.4360E-09
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	31.1563	31.9281	30.2063
		Sd of CPU Times	3.2707	3.0094	3.3206
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	4768.16%	4134.50%	3643.03%
6	Direct Method	Obj Value	0	14.0153	7.5897E-11
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.753	0.786	0.655
	Heuristic	Best Obj	0	14.0153	7.5897E-11
		Avg Obj	0	14.0153	7.5897E-11
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	32.7922	30.6625	32.2250
		Sd of CPU Times	3.0442	3.3009	3.4168
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	4254.87%	3801.08%	4819.85%

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหขนาดเล็ก (ต่อ)

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3
7	Direct Method	Obj Value	2	18.9222	2.4477E-08
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.666	0.859	0.869
	Heuristic	Best Obj	2	18.9222	2.4477E-08
		Avg Obj	2	18.9222	2.4477E-08
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	30.6531	31.2813	29.7766
		Sd of CPU Times	3.1911	2.7995	3.0248
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	4502.57%	3541.59%	3326.53%
8	Direct Method	Obj Value	3	16.0602	1.1461E-18
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.857	0.872	0.824
	Heuristic	Best Obj	3	16.0602	1.1461E-18
		Avg Obj	3	16.0602	1.1461E-18
		Sd of Obj	0	0	3.8711E-23
		Avg CPU Times	30.0453	30.7757	31.0063
		Sd of CPU Times	3.0370	3.0653	3.2440
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	1.6021E-05
		CPU Times	3405.87%	3429.33%	3662.89%
9	Direct Method	Obj Value	0	7.1495	4.4244E-13
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.884	0.964	0.883
	Heuristic	Best Obj	0	7.1495	4.4244E-13
		Avg Obj	0	7.1495	4.4244E-13
		Sd of Obj	0	0	3.9524E-22
		Avg CPU Times	30.8102	31.9281	30.1609
		Sd of CPU Times	3.3393	3.3985	2.7939
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	2.8249E-10
		CPU Times	3385.31%	3212.05%	3315.73%

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหขนาดเล็ก (ต่อ)

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3
10	Direct Method	Obj Value	5	18.6057	8.3234E-10
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.818	0.883	0.819
	Heuristic	Best Obj	5	18.6057	8.3234E-10
		Avg Obj	5.3	18.6057	8.3234E-10
		Sd of Obj	0.6749	0	5.3394E-25
		Avg CPU Times	31.3531	30.5797	30.5180
		Sd of CPU Times	2.9165	3.1042	2.9981
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	6%	0%	4.9690E-16
		CPU Times	3732.90%	3363.16%	3626.25%
11	Direct Method	Obj Value	3	20.8828	5.1569E-05
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.894	1.036	0.641
	Heuristic	Best Obj	3	20.8828	5.15689E-05
		Avg Obj	3	20.8828	5.15689E-05
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	30.5813	30.5797	30.4180
		Sd of CPU Times	3.2869	3.4102	3.4081
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	3320.72%	2851.71%	4645.40%
12	Direct Method	Obj Value	1	7.3722	1.4706E-06
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.744	1.025	0.619
	Heuristic	Best Obj	1	7.3722	1.4706E-06
		Avg Obj	1	7.3722	1.4706E-06
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	29.8141	29.5813	29.5203
		Sd of CPU Times	2.9833	3.0137	3.0512
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	3907.27%	2785.98%	4669.03%

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวสำหรับปัญหขนาดเล็ก (ต่อ)

Instances	Methods	Results	Obj1	Obj2	Obj3
13	Direct Method	Obj Value	1	14.2405	6.2349E-10
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.741	0.819	0.655
	Heuristic	Best Obj	1	14.2405	6.2349E-10
		Avg Obj	1	14.6205	6.2349E-10
		Sd of Obj	0	0.8011	0
		Avg CPU Times	29.7613	30.8672	30.0969
		Sd of CPU Times	3.2584	2.9804	3.0932
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	3%	0%
		CPU Times	3916.36%	3668.89%	4494.94%
14	Direct Method	Obj Value	2	10.8661	2.1652E-09
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.622	0.992	0.675
	Heuristic	Best Obj	2	10.8661	2.1652E-09
		Avg Obj	2	10.8661	2.1652E-09
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	30.1734	30.0031	29.9371
		Sd of CPU Times	2.9153	3.0710	3.0258
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	4751.03%	2924.51%	4335.12%
15	Direct Method	Obj Value	3	22.3322	0.000598738
		%Gap	0	0	0
		CPU Times	0.646	0.681	0.714
	Heuristic	Best Obj	3	22.3322	0.000598738
		Avg Obj	3	22.3322	0.000598738
		Sd of Obj	0	0	0
		Avg CPU Times	29.9734	29.9031	29.7371
		Sd of CPU Times	2.7456	2.8493	2.8855
	Differences	Best Obj	0%	0%	0%
		Avg Obj	0%	0%	0%
		CPU Times	4539.85%	4291.06%	4064.86%

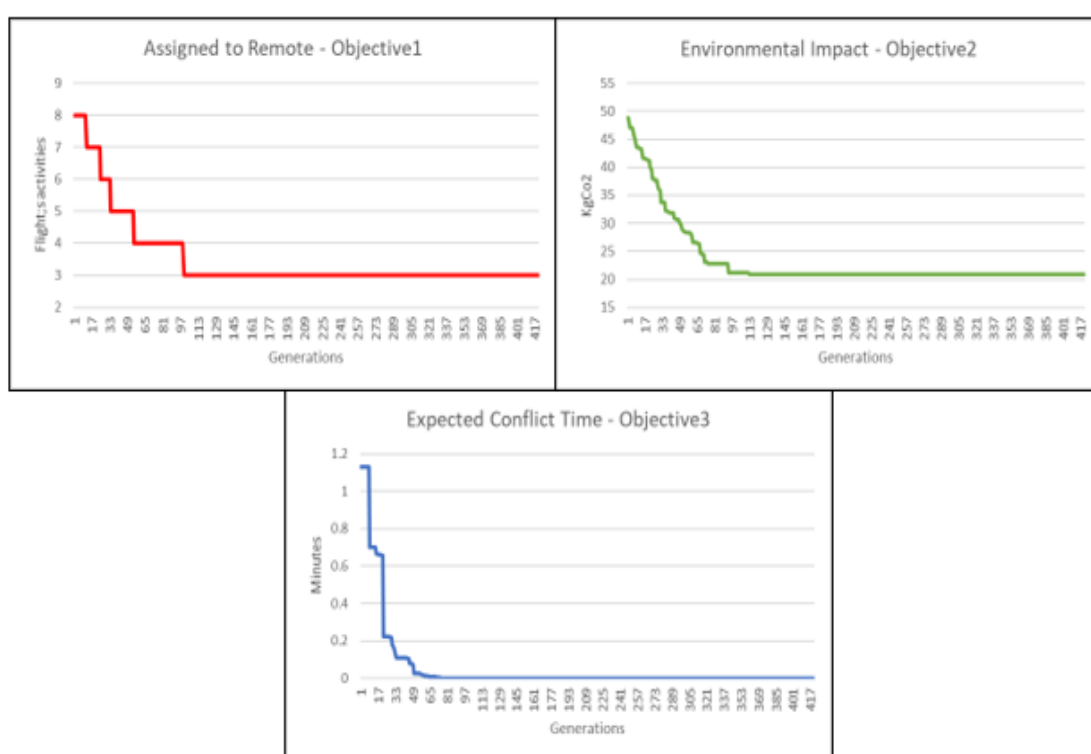
จากตารางที่ 4-2 จะเห็นว่า ประสิทธิภาพในการหาคำคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวด้วยวิธีแมนตรงสำหรับปัญหาขนาดเล็กนั้นให้ผลการค้นหาที่ดีในทุกวัตถุประสงค์ เนื่องจากมีค่าระยะห่างจากเป้าหมาย (%Gap) อยู่ที่ 0% ในทุกชุดข้อมูล และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบตั้งแต่ 0.619 วินาที ถึง 1.036 วินาที

เมื่อนำคำตอบที่ได้จากวิธีแมนตรงมาเปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุดของฮิวริสติกส์จากการค้นหาคำตอบจำนวน 10 รอบ พบว่าคำตอบที่ดีที่สุดจากฮิวริสติกส์สามารถหาคำตอบได้ดีเทียบเท่าวิธีแมนตรงในทุกชุดข้อมูล ในขณะเดียวกัน หากเราพิจารณาที่ค่าคำตอบเฉลี่ยของฮิวริสติกส์จะพบว่ามีบางชุดข้อมูลที่ให้ค่าคำตอบเฉลี่ยต่ำกว่าวิธีแมนตรง โดยส่วนต่าง (Difference) ระหว่างคำตอบของวิธีแมนตรงกับค่าคำตอบเฉลี่ยของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดเล็กจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0% จนถึง 7%

อย่างไรก็ดี ในส่วนของระยะเวลาในการค้นหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็ก วิธีแมนตรงจะสามารถค้นหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าฮิวริสติกส์ หรือกล่าวอีกนัยคือฮิวริสติกส์จะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ยาวนานกว่า (เมื่อให้จำนวนครบ 1000 รอบการทำงาน) โดยหากพิจารณาส่วนต่างระหว่างระยะเวลาของวิธีแมนตรงกับระยะเวลาเฉลี่ยของฮิวริสติกส์ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์แล้วจะพบว่าเวลาในการค้นหาคำตอบจะมีส่วนต่างอยู่ที่ช่วงระหว่าง 2,785.98% ถึง 5,022.97% ซึ่งดูเหมือนว่าเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แต่ถ้าหากเราลองพิจารณาที่เวลาเฉลี่ยของฮิวริสติกส์โดยตรงจะพบว่าเวลาในการค้นหาคำตอบเฉลี่ยต่ำที่สุดจะอยู่ที่ 28.29 วินาที และสูงที่สุดจะอยู่ที่ 33.32 วินาที ส่วนวิธีแมนตรงจะใช้เวลาในการค้นหาคำตอบต่ำที่สุดจะอยู่ที่ 0.619 วินาที และสูงที่สุดจะอยู่ที่ 1.036 วินาที ซึ่งจากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นเราจะพบว่าฮิวริสติกส์สามารถหาคำตอบได้โดยใช้เวลาประมาณครึ่งนาที (33 วินาที) ถึงแม้ว่าวิธีแมนตรงจะใช้เวลามากที่สุดประมาณ 1 วินาทีก็ตาม แต่ก็ถือว่าเวลาที่ต่างกันนี้ไม่ได้ต่างกันมากจนเกินไป อีกทั้งฮิวริสติกส์ยังสามารถค้นหาคำตอบได้ดีเทียบเท่ากับคำตอบที่ดีที่สุดของวิธีแมนตรงในทุกชุดข้อมูล ด้วยเหตุนี้ถึงแม้เวลาจะในการหาคำตอบของฮิวริสติกส์จะเพิ่มมากขึ้นกว่าวิธีแมนตรง แต่ด้วยคุณภาพของคำตอบที่ได้รวมถึงระยะเวลาในการหาคำตอบที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนักยังถือเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยสามารถยอมรับได้

และหากเราพิจารณาในส่วนของพฤติกรรมการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์ดังรูปที่ 4-1 ที่แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของจำนวนรอบการคำนวณ 1000 รอบการทำงาน (Generations) ที่ใช้ในการค้นหาและการพัฒนาคำตอบของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 111 รอบการค้นหาที่ 3 โดยแกน X แสดงจำนวนของรอบการคำนวณ และแกน Y แสดงค่าคำตอบตามแต่ละ

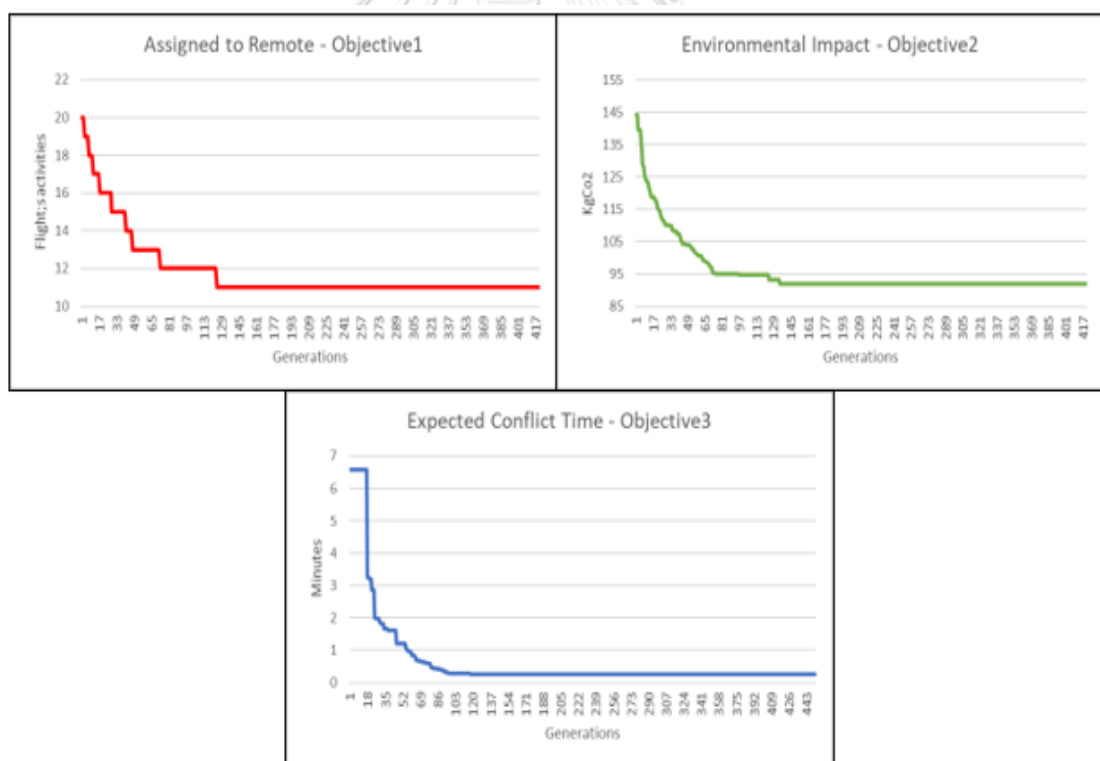
วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ จะพบว่า การรู้เข้าหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดเล็กนั้น สามารถหาคำตอบได้ดีเทียบเท่ากับวิธีแมนตรงโดยที่ยังทำการคำนวณไม่ครบ 1000 รอบการทำงาน ด้วยเหตุนี้ หากเรามีการกำหนดเกณฑ์การหยุดค้นหาคำตอบ (Stopping criteria) ในฮิวริสติกส์แบบไม่ต้องทำงานครบ 1000 รอบการทำงาน ก็จะสามารถทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของฮิวริสติกส์มีความใกล้เคียง หรือสูงกว่าระยะเวลาในการค้นหาคำตอบของวิธีแมนตรงไม่มากนัก (โดยมีความเป็นไปได้สูงที่เวลาในการค้นหาคำตอบจะต่ำกว่าครั้งนาที่)



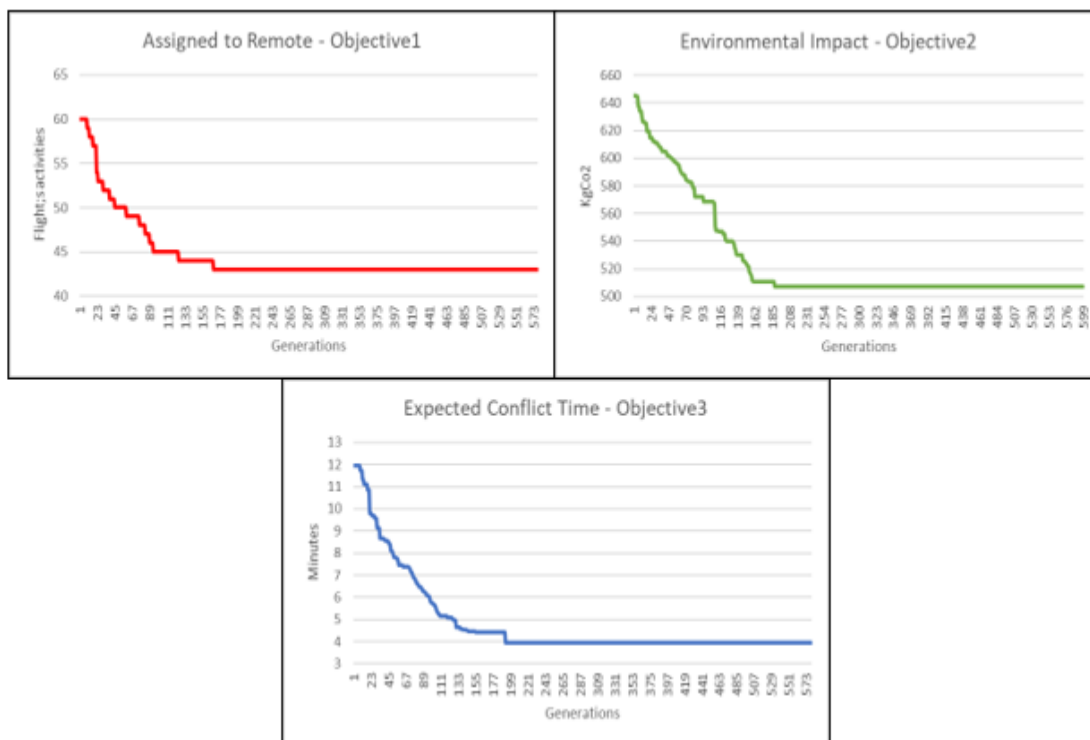
รูปที่ 4-1 กราฟแสดงลำดับการรู้เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดเล็ก

ถึงแม้ว่าเราจะไม่สามารถหาคำตอบด้วยวิธีแมนตรงสำหรับปัญหาขนาดกลาง และปัญหาขนาดใหญ่ เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับการหาคำตอบของฮิวริสติกส์ ด้วยจำนวนรอบการคำนวณ 1000 รอบการทำงาน (Generations) ได้ แต่จากการพิจารณาในส่วนของพฤติกรรมการรู้เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง และปัญหาขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4-2 และรูปที่ 4-3 ตามลำดับ ที่แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของจำนวนรอบการคำนวณ 1000 รอบการทำงาน ที่ใช้ในการค้นหาและการพัฒนาหาคำตอบของฮิวริสติกส์ที่ออกแบบขึ้นจากชุดข้อมูลนำเข้าที่ 202 รอบการค้นหาคำตอบที่ 5 กับชุดข้อมูลนำเข้าที่ 302 รอบการค้นหาคำตอบที่ 7 ของปัญหาขนาดกลางกับปัญหาขนาดใหญ่

ตามลำดับ โดยแกน X แสดงจำนวนของรอบการคำนวณ และแกน Y แสดงค่าคำตอบตามแต่ละวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ จะพบว่า การลู่เข้าหาคำตอบสำหรับปัญหาขนาดกลาง และขนาดใหญ่ นั้น มีการลู่เข้าสู่ค่าคำตอบที่น้อย (เจอค่าคำตอบที่ดีกว่า) ในช่วงแรก จากนั้นเมื่อถึงรอบการทำงานหนึ่ง ๆ จะไม่มีการพัฒนาค่าคำตอบหรือเจอค่าคำตอบที่ดีกว่า (เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state)) จนกระทั่งครบ 1000 รอบการคำนวณ ด้วยเหตุนี้ การที่การค้นหาคำตอบของฮิวริสติกส์เข้าสู่สภาวะคงตัว หรือการไม่เจอค่าคำตอบที่ดีกว่าก็มีความเป็นไปได้ว่าค่าคำตอบที่น้อยที่สุดที่ฮิวริสติกส์ได้พบนั้นอาจเป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว ซึ่งจะทำให้จำนวนรอบการคำนวณ 1000 รอบการทำงานนี้ มีความสมเหตุสมผลแก่การนำมาใช้ในปัญหาขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ทั้งนี้ หากเรามีการกำหนดเกณฑ์การหยุดค้นหาคำตอบ (Stopping criteria) ในฮิวริสติกส์แบบไม่ต้องทำงานครบ 1000 รอบการทำงานไว้ด้วยแล้ว ก็จะสามารถทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของฮิวริสติกส์นั้นมีระยะเวลาที่น้อยกว่าที่ควรจะเป็นได้ (ดีกว่าการคำนวณครบ 1000 รอบการทำงาน)



รูปที่ 4-2 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดกลาง



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงลำดับการลู่เข้าหาคำตอบของฮิวริสติกส์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่

4.4 ผลการทดสอบด้วยวิธีแบบหลายวัตถุประสงค์

ภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การแก้ปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์จะกล่าวถึงเพียงส่วนของผลลัพธ์จากการค้นหาคำตอบด้วยฮิวริสติกส์เพียงเท่านั้น โดยธรรมชาติแล้วการค้นหาคำตอบของการแก้ไขปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์จะต้องทำการค้นหาคำตอบหลาย ๆ ครั้งก่อนที่จะทำการเลือกหนึ่งคำตอบขึ้นมา ทั้งนี้ การตัดสินใจในการเลือกคำตอบจากกลุ่มคำตอบที่หามาได้เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อทุกวัตถุประสงค์ได้ตรงตามความต้องการมากที่สุดนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้การวัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ ได้แก่ การใช้ตัวชี้วัดการลู่เข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Generational Distance) ตัวชี้วัดสมรรถนะด้านการลู่เข้าและความหลากหลายของคำตอบ (Inverted Generational Distance) และตัวชี้วัดสมรรถนะด้านความหลากหลายของคำตอบ (Diversity Metrics / Spread) โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพจากการหาคำตอบจำนวน 10 รอบ (Replicate) ต่อหนึ่งชุดข้อมูลนำเข้า รวมทั้งสิ้น 15 ชุดข้อมูลต่อหนึ่งขนาดปัญหา สามารถแสดงได้ดังนี้

4.4.1 ปัญหาขนาดเล็ก

สำหรับปัญหาขนาดเล็ก เราสามารถเขียนตารางแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบ และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานในการค้นหาคำตอบ สำหรับชุดข้อมูลจำนวน 15 ชุดข้อมูล ได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดเล็ก

Instances	Value	Obj1	Obj2	Obj3	CPU Times	GD	IGD	Spread
1	Max	5	33.4136	0.0039241	40.14	0.0477	0.0874	0.6923
	Min	1	13.3807	4.2681E-14				
2	Max	5	32.9630	0.5045421	35.48	0.0754	0.0804	0.6674
	Min	3	16.4618	4.7056E-07				
3	Max	4	35.2027	0.4600956	41.94	0.0473	0.0566	0.5563
	Min	1	16.6623	0.0001328				
4	Max	8	43.3956	0.4595623	37.64	0.0309	0.0604	0.6622
	Min	3	15.3149	8.0726E-10				
5	Max	7	40.1783	0.0009898	36.29	0.0901	0.1299	0.5372
	Min	2	13.4495	9.4360E-09				
6	Max	3	31.1535	0.2693056	39.79	0.0452	0.0811	0.7603
	Min	0	14.0153	7.5897E-11				
7	Max	7	49.6544	0.0618209	36.48	0.0557	0.0941	0.7297
	Min	2	18.9222	2.4477E-08				
8	Max	6	33.8254	0.0673301	46.09	0.0505	0.0695	0.5119
	Min	3	16.0602	1.1461E-18				
9	Max	6	35.8849	1.0696717	36.98	0.0268	0.0479	0.7536
	Min	0	7.1495	4.4244E-13				
10	Max	8	35.3028	0.4881164	36.37	0.1034	0.1052	0.6133
	Min	5	18.6057	8.3234E-10				
11	Max	8	48.7606	1.1320905	41.64	0.0879	0.0997	0.6957
	Min	3	20.8828	5.1569E-05				

ตารางที่ 4-3 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดเล็ก (ต่อ)

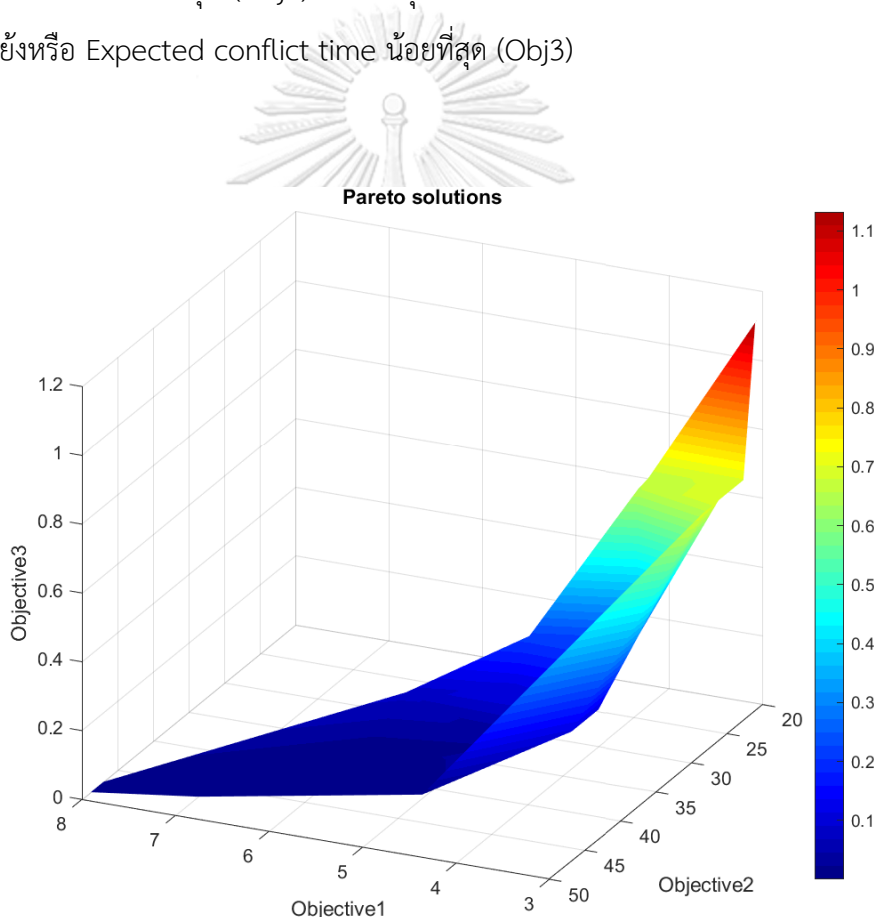
Instances	Value	Obj1	Obj2	Obj3	CPU Times	GD	IGD	Spread
12	Max	4	24.6913	0.0022660	43.89	0.0903	0.1417	0.6965
	Min	1	7.3721	1.4706E-06				
13	Max	6	42.3007	1.5846930	35.08	0.0374	0.0653	0.5131
	Min	1	14.2405	6.2349E-10				
14	Max	6	35.7059	0.1643605	36.91	0.0565	0.0859	0.5628
	Min	2	10.8661	2.1652E-09				
15	Max	6	39.3266	0.0005991	39.97	0.0888	0.1230	0.5686
	Min	3	22.3322	0.0005987				

จากข้อมูลในตารางที่ 4-3 เราจะพบว่า ค่าคำตอบของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะใกล้ที่น้อยที่สุด (Obj1) และวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยที่สุด (Obj2) มีความกว้างของค่าคำตอบอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ซึ่งสามารถระบุได้จากผลต่างระหว่างค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Max) และแย่ที่สุด (Min) โดยค่าผลต่างนี้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 38% จนถึง 100% และ 43% จนถึง 80% ของค่าคำตอบสูงสุดตามลำดับ ในส่วนของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) จะมีความกว้างของค่าคำตอบอยู่ในระดับที่สูงมาก โดยชุดข้อมูลส่วนใหญ่จะมีค่าผลต่างอยู่ที่ 100% ยกเว้นชุดข้อมูลที่ 3 ชุดข้อมูลที่ 12 และชุดข้อมูลที่ 15 ที่มีค่าผลต่างอยู่ที่ 99.97% 99.94% และ 0.06% ของค่าคำตอบสูงสุดตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในส่วนของระยะเวลาของการค้นหาคำตอบพบว่า สำหรับปัญหาขนาดเล็กจะใช้เวลาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 38.97 วินาทีต่อหนึ่งรอบการค้นหา โดยมีระยะเวลาการค้นหาลำบากที่สุดอยู่ที่ 35.08 วินาที และมีระยะเวลาการค้นหาลำบากที่สุดอยู่ที่ 46.09 วินาที

เมื่อเราทำการตรวจดูที่ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะพบว่า ปัญหาขนาดเล็กมีค่าดัชนีการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (GD) และค่าดัชนีการเข้าสู่และความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ที่ต่ำ โดยมีค่า GD และ IGD สูงสุดอยู่ที่ 0.1034 และ 0.1417 ตามลำดับ ซึ่งแปลว่าจุดคำตอบที่ฮิวริสติกส์ค้นพบนั้นมีความใกล้เคียง และอยู่ใกล้กันกับกลุ่มคำตอบพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ ส่วนค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบ (Spread) จะมีค่าอยู่ระหว่าง

0.5119 ถึง 0.7603 ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง หรือมีขอบเขตของกลุ่มคำตอบบางส่วนที่ครอบคลุมกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณ

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างกราฟพื้นผิวบนระนาบ 3 มิติเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ได้จากชุดข้อมูลที่ 11 สำหรับปัญหาขนาดเล็กดังรูปที่ 4-4 โดยจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) และวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3)



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดเล็ก

จากรูปที่ 4-4 แสดงให้เห็นว่า ภาพรวมของปัญหาขนาดเล็กนั้น วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) กับ วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) มีแนวโน้มไปในทิศทาง

เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อ Obj1 มีค่าน้อยลง Obj2 ก็จะมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเราสามารถบรรจุทั้ง 2 วัตถุประสงค์นี้ไปพร้อมกันได้โดยต้องแลกมากับค่าคำตอบของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) ที่แย่ง หรือเราสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า Obj1 กับ Obj2 มีความขัดแย้งกับ Obj3 นั้นเอง

ทั้งนี้ ในบางผลคำตอบ (Solution) เมื่อค่าของ Obj1 มีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ Obj2 กลับมีค่าน้อยลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj2 น้อยลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไม่เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยาน ในขณะที่การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารที่เกิดขึ้นแทนนั้นกลับมีปริมาณที่น้อยกว่า ประกอบกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสารทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณลดลง

ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการพิจารณากลุ่มของผลคำตอบ (Solution) ที่ให้ค่าของ Obj1 เท่ากัน ผู้วิจัยพบว่า บางผลคำตอบ (Solution) กลับให้ค่าของ Obj3 ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อได้ทำการตรวจสอบค่าของ Obj2 ร่วมด้วย จึงทำให้ทราบว่าค่าของ Obj3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อค่าของ Obj2 นั้นมีค่าลดลง โดยจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj3 มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการที่เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ทำให้เวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) ของเที่ยวบินนี้กับเที่ยวบินอื่น ๆ ที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันมีจำนวนที่น้อยลงจึงส่งผลให้ค่าของ Obj3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสารทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณน้อยลง (Obj2 ลดลง) และเที่ยวบิน

เหล่านี้ก็ยังได้มีการเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันจึงทำให้มีเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) ที่น้อยซึ่งส่งผลให้ค่าของ Obj3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

4.4.2 ปัญหาขนาดกลาง

สำหรับปัญหาขนาดกลาง เราสามารถเขียนตารางแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบ และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานในการค้นหาคำตอบ สำหรับชุดข้อมูลจำนวน 15 ชุดข้อมูล ได้ดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดกลาง

Instances	Value	Obj1	Obj2	Obj3	CPU Times	GD	IGD	Spread
1	Max	32	163.8750	4.3809294	189.21	0.2133	0.2217	0.7820
	Min	18	84.7125	0.0721556				
2	Max	20	144.0607	6.5822878	197.65	0.1301	0.2104	0.8607
	Min	11	91.8614	0.2468186				
3	Max	27	155.8839	5.4204349	175.47	0.1732	0.1859	0.8771
	Min	17	69.5462	0.3631155				
4	Max	22	124.5917	2.3569151	173.30	0.0840	0.1120	0.8413
	Min	14	76.2288	0.1498279				
5	Max	17	161.4361	3.1766742	218.34	0.2099	0.2384	0.9009
	Min	10	89.2201	0.1029751				
6	Max	26	161.6322	6.8364158	238.68	0.1342	0.1425	0.8519
	Min	16	92.0015	0.2715502				
7	Max	36	179.4173	5.4512601	188.61	0.1206	0.1565	0.8860
	Min	23	91.4761	0.2173553				
8	Max	24	133.4375	2.2890909	216.36	0.1803	0.1945	0.8838
	Min	13	65.3191	0.0958747				
9	Max	28	161.5558	3.6069816	201.77	0.1785	0.1916	0.8669
	Min	20	109.3992	0.3090323				

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดกลาง (ต่อ)

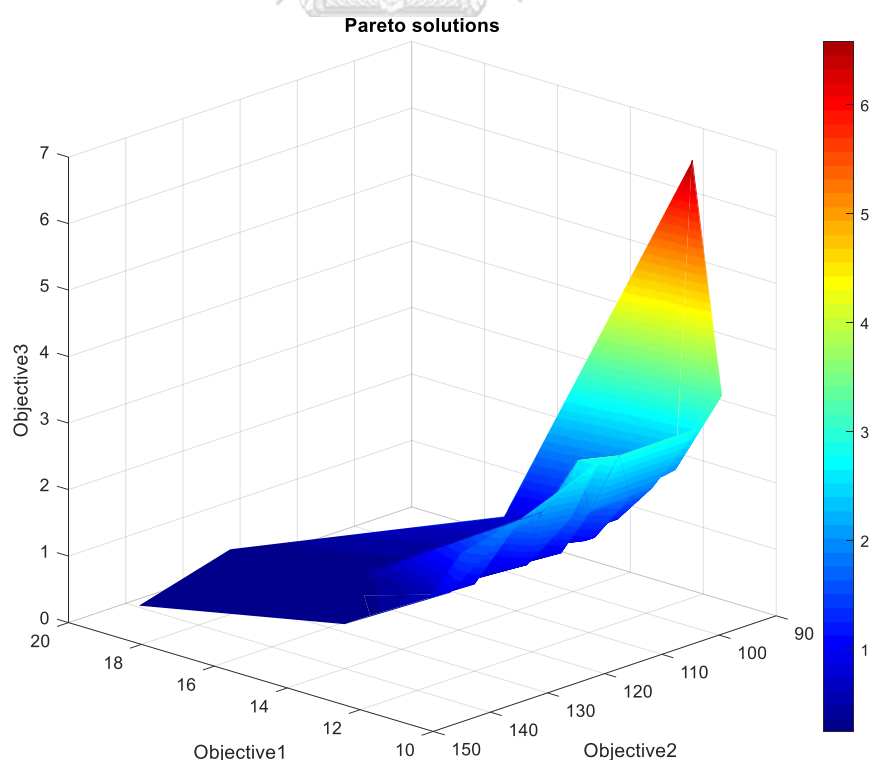
Instances	Value	Obj1	Obj2	Obj3	CPU Times	GD	IGD	Spread
10	Max	29	162.0985	4.8731856	195.12	0.1320	0.1571	0.7521
	Min	20	91.0622	0.3546075				
11	Max	28	144.6549	6.3200918	177.43	0.0917	0.1724	0.8192
	Min	19	83.8721	0.1373783				
12	Max	28	174.1211	7.6851136	236.73	0.0982	0.1469	0.8370
	Min	14	95.3024	0.1570796				
13	Max	27	140.6999	3.7158316	231.68	0.1298	0.1442	0.8474
	Min	19	74.0867	0.0728105				
14	Max	30	158.4410	5.5143091	188.42	0.0765	0.1456	0.8040
	Min	18	90.6942	0.1660878				
15	Max	26	141.9893	2.7438085	226.48	0.1583	0.1856	0.8322
	Min	20	95.3054	0.0781638				

จากข้อมูลในตารางที่ 4-4 เราจะพบว่า ค่าคำตอบของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) และวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) มีความกว้างของค่าคำตอบใกล้เคียงกันอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งสามารถระบุได้จากผลต่างระหว่างค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Max) และแย่ที่สุด (Min) โดยค่าผลต่างนี้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 23% จนถึง 50% และ 33% จนถึง 55% ของค่าคำตอบสูงสุดตามลำดับ ในส่วนของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) จะมีความกว้างของค่าคำตอบอยู่ในระดับที่สูงมากตั้งแต่ 91.43% จนถึง 98.35% ของค่าคำตอบสูงสุด ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในส่วนของระยะเวลาของการค้นหาคำตอบพบว่า สำหรับปัญหาขนาดกลางจะใช้เวลาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 203.68 วินาทีต่อหนึ่งรอบการค้นหา โดยมีระยะเวลาการค้นหาต่ำสุดอยู่ที่ 173.30 วินาที และมีระยะเวลาการค้นหาสูงสุดอยู่ที่ 238.68 วินาที

เมื่อเราทำการตรวจสอบที่ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะพบว่า ปัญหาขนาดกลางมีค่าดัชนีการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (GD) และค่าดัชนีการเข้าสู่และความ

หลากหลายของคำตอบ (IGD) ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าปัญหามินขนาดเล็ก แต่ก็ถือว่ายังคงมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำ โดยมีค่า GD และ IGD สูงสุดอยู่ที่ 0.2133 และ 0.2384 ตามลำดับ ซึ่งแปลว่าจุดคำตอบที่ฮิวริสติกส์ค้นพบนั้นมีความใกล้เคียง และอยู่ใกล้กันกับกลุ่มคำตอบพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ ส่วนค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบ (Spread) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7521 ถึง 0.9009 ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลางถึงแย่มาก หรือมีขอบเขตของกลุ่มคำตอบส่วนน้อยที่ครอบคลุมกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณ ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการที่ปัญหามินขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ขอบเขตของปริภูมิวัตถุประสงค์นั้นกว้างขึ้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างกราฟพื้นผิวบนระนาบ 3 มิติเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ได้จากชุดข้อมูลที่ 2 สำหรับปัญหามินขนาดกลางดังรูปที่ 4-5 โดยจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) และวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3)



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหามินขนาดกลาง

จากรูปที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่า ภาพรวมของปัญหาขนาดกลางนั้น วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) กับ วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อ Obj1 มีค่าน้อยลง Obj2 ก็จะมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเราสามารถบรรจุทั้ง 2 วัตถุประสงค์นี้ไปพร้อมกันได้โดยไม่ต้องแลกมากับค่าคำตอบของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) ที่แย่ง (มีค่าเพิ่มสูงขึ้น) หรือเราสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า Obj1 กับ Obj2 มีความขัดแย้งกับ Obj3 เช่นเดียวกับปัญหาขนาดเล็ก

ทั้งนี้ ในบางผลคำตอบ (Solution) เมื่อค่าของ Obj1 มีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ Obj2 กลับมีค่าน้อยลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj2 น้อยลงนั้นก็ยังคงมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก คือ เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไม่เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยาน ในขณะที่การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารที่เกิดขึ้นแทนนั้นกลับมีปริมาณที่น้อยกว่า ประกอบกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสารทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณลดลง

ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการพิจารณากลุ่มของผลคำตอบ (Solution) ที่ให้ค่าของ Obj1 เท่ากัน ผู้วิจัยพบว่า บางผลคำตอบ (Solution) กลับให้ค่าของ Obj3 ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อได้ทำการตรวจสอบค่าของ Obj2 ร่วมด้วย จึงทำให้ทราบว่าค่าของ Obj3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อค่าของ Obj2 นั้นมีค่าลดลง โดยจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj3 มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการที่เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ทำให้เวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) ของเที่ยวบินนี้กับเที่ยวบินอื่น ๆ ที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันมีจำนวนที่น้อยลงจึงส่งผลให้ค่าของ

Obj3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสารทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณน้อยลง (Obj2 ลดลง) และเที่ยวบินเหล่านี้ก็ยังได้มีการเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันทำให้มีเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) ที่น้อยลงจึงส่งผลให้ค่า Obj3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็ก

4.4.3 ปัญหาขนาดใหญ่

สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ เราสามารถเขียนตารางแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบ และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำงานในการค้นหาคำตอบ สำหรับชุดข้อมูลจำนวน 15 ชุดข้อมูล ได้ดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญห
ขนาดใหญ่

Instances	Value	Obj1	Obj2	Obj3	CPU Times	GD	IGD	Spread
1	Max	61	611.6241	11.8739924	1211.78	0.0948	0.1592	1.0288
	Min	43	505.2556	3.6191555				
2	Max	60	644.9497	11.9562173	1337.53	0.1744	0.1783	0.9316
	Min	43	507.2601	3.9398244				
3	Max	44	547.5772	19.0328014	1229.65	0.1159	0.1702	0.9488
	Min	38	482.9582	5.0809001				
4	Max	47	622.6850	18.6767673	1730.10	0.1976	0.2239	0.8963
	Min	40	568.3656	4.6626195				
5	Max	58	614.7562	14.8905262	1904.90	0.2187	0.2268	0.8456
	Min	47	531.5846	4.6047992				
6	Max	60	633.2198	16.9038709	1531.59	0.2017	0.2336	0.9140
	Min	50	559.9542	4.5306496				
7	Max	76	661.9379	11.3530112	1419.00	0.0810	0.1356	0.8922
	Min	61	579.3346	4.9298420				
8	Max	67	601.6966	7.3491983	1355.46	0.1147	0.1453	1.0178
	Min	52	513.3079	1.9077965				

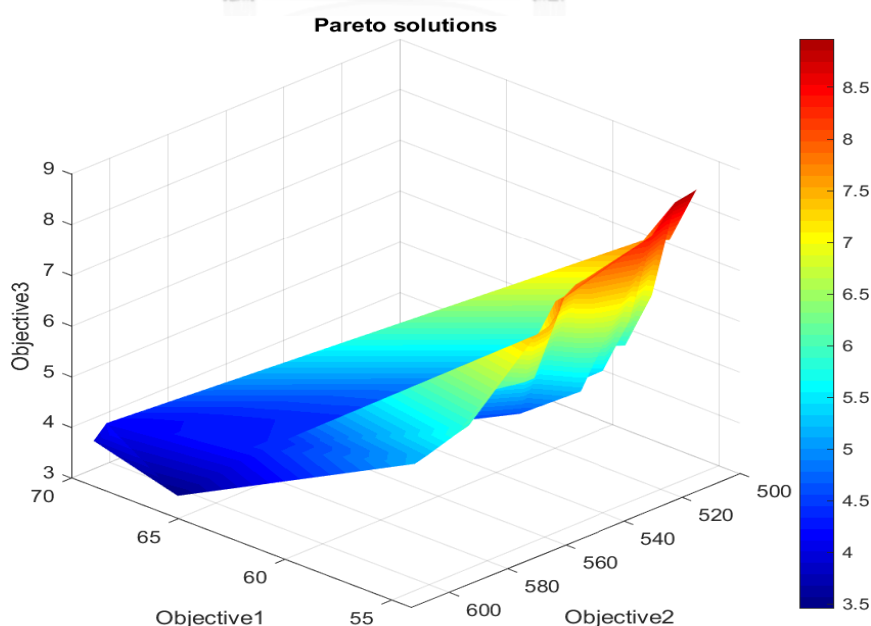
ตารางที่ 4-5 ตารางแสดงค่าคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์และค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพของปัญหาขนาดใหญ่ (ต่อ)

Instances	Value	Obj1	Obj2	Obj3	CPU Times	GD	IGD	Spread
9	Max	67	687.1830	13.9655819	1329.85	0.1470	0.1696	0.9368
	Min	48	524.5272	3.2267947				
10	Max	48	560.1228	9.6458166	1687.45	0.1738	0.1860	0.9253
	Min	40	489.0065	3.6233232				
11	Max	58	560.0022	14.6876807	1777.93	0.1608	0.2020	1.0158
	Min	51	489.2009	3.2470331				
12	Max	69	613.3186	8.9676493	1520.99	0.2104	0.2245	0.9638
	Min	54	514.9150	3.4557348				
13	Max	52	520.9941	7.0091047	1273.02	0.1023	0.1441	0.9308
	Min	39	475.8523	2.6202484				
14	Max	52	607.1753	9.8177656	1454.09	0.1627	0.2299	1.0604
	Min	42	490.4045	3.9589418				
15	Max	68	648.0880	12.2946226	1820.39	0.1245	0.1644	0.8728
	Min	57	561.0239	3.0708699				

จากข้อมูลในตารางที่ 4-5 เราจะพบว่า ค่าคำตอบของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะใกล้ที่น้อยที่สุด (Obj1) และวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยที่สุด (Obj2) มีความกว้างของค่าคำตอบใกล้เคียงกันอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งสามารถระบุได้จากผลต่างระหว่างค่าคำตอบที่ดีที่สุด (Max) และแย่ที่สุด (Min) โดยค่าผลต่างนี้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 12% จนถึง 30% และ 9% จนถึง 24% ของค่าคำตอบสูงสุดตามลำดับ ในส่วนของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) จะมีความกว้างของค่าคำตอบอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงตั้งแต่ 56.58% จนถึง 77.89% ของค่าคำตอบสูงสุด ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาในส่วนของระยะเวลาของการค้นหาคำตอบพบว่า สำหรับปัญหาขนาดใหญ่จะใช้เวลาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1505.58 วินาทีต่อหนึ่งรอบการค้นหาคำตอบ โดยมียุทธศาสตร์การค้นหาคำตอบที่ต่ำสุดอยู่ที่ 1211.78 วินาที และมีระยะเวลาการค้นหาคำตอบสูงสุดอยู่ที่ 1904.9 วินาที

เมื่อเราทำการตรวจดูที่ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจะพบว่า ปัญหาขนาดใหญ่มีค่าดัชนีการเข้าสู่กลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (GD) และค่าดัชนีการเข้าสู่และความหลากหลายของคำตอบ (IGD) ที่ยังถือได้ว่าต่ำอยู่และมีความใกล้เคียงกับปัญหาขนาดกลาง โดยมีค่า GD และ IGD สูงสุดอยู่ที่ 0.2187 และ 0.2336 ตามลำดับ ซึ่งแปลว่าจุดคำตอบที่ฮิวริสติกส์ค้นพบนั้นมีความใกล้เคียง และอยู่ใกล้กันกับกลุ่มคำตอบพาเรโตที่แท้จริงโดยประมาณ ส่วนค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบ (Spread) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8456 ถึง 1.0604 ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นถึงการกระจายตัวของกลุ่มคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ระดับค่อนข้างแย่ หรือมีขอบเขตของกลุ่มคำตอบที่ไม่ค่อยครอบคลุมกลุ่มคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงโดยประมาณ ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าแนวโน้มที่แย่งลงของค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบน่าจะเป็นผลมาจากการที่ปัญหามีขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้ขอบเขตของปริภูมิวัตถุประสงค์นั้นกว้างขึ้น โดยปัญหาในส่วนนี้ได้ถูกพบตั้งแต่ปัญหาขนาดกลางแล้ว (ค่าดัชนีความหลากหลายของคำตอบมีค่าเพิ่มขึ้น)

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างกราฟพื้นผิวบนระนาบ 3 มิติเพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ได้จากชุดข้อมูลที่ 12 สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ดังรูปที่ 4-6 โดยจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) และวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3)



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ของปัญหาขนาดใหญ่

จากรูปที่ 4-6 แสดงให้เห็นว่า ภาพรวมของปัญหาขนาดใหญ่ นั้น วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) กับ วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อ Obj1 มีค่าน้อยลง Obj2 ก็จะมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน ซึ่งเราสามารถบรรจุทั้ง 2 วัตถุประสงค์นี้ไปพร้อมกันได้โดยไม่ต้องแลกมากับค่าคำตอบของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) ที่แย่ง (มีค่าเพิ่มสูงขึ้น) หรือเราสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า Obj1 กับ Obj2 มีความขัดแย้งกับ Obj3 เช่นเดียวกันกับปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง

ทั้งนี้ ในบางผลคำตอบ (Solution) เมื่อค่าของ Obj1 มีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ Obj2 กลับมีค่าน้อยลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj2 น้อยลงนั้นก็ยังคงมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง คือ เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไม่เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยาน ในขณะที่การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารที่เกิดขึ้นแทนนั้นมีปริมาณที่น้อยกว่า ประกอบกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสารทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณลดลง

ในขณะเดียวกัน เมื่อทำการพิจารณากลุ่มของผลคำตอบ (Solution) ที่ให้ค่าของ Obj1 เท่ากัน ผู้วิจัยพบว่า บางผลคำตอบ (Solution) กลับให้ค่าของ Obj3 ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อได้ทำการตรวจสอบค่าของ Obj2 ร่วมด้วย จึงทำให้ทราบว่าค่าของ Obj3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อค่าของ Obj2 นั้นมีค่าลดลง โดยจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj3 มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากการที่เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ทำให้เวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) ของเที่ยวบินนี้กับเที่ยวบินอื่น ๆ ที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันมีจำนวนที่น้อยลงจึงส่งผลให้ค่าของ

Obj3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสารทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณน้อยลง (Obj2 ลดลง) และเที่ยวบินเหล่านี้ก็ยังได้มีการเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันทำให้มีเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) ที่น้อยลงจึงส่งผลให้ค่าของ Obj3 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันกับในปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลาง

4.5 การคัดเลือกกลุ่มคำตอบจากขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต

จากผลการทดสอบด้วยวิธีแบบหลายวัตถุประสงค์ในหัวข้อ 4.4 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุประสงค์แต่ละวัตถุประสงค์ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและขัดแย้งกัน ด้วยกราฟพื้นผิวระนาบ 3 มิติที่ถูกสร้างขึ้นจากขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Pareto Optimal Frontier) โดยเราจะเห็นได้ว่าจำนวนกลุ่มคำตอบที่อยู่บนขอบเขตดังกล่าวนี้มีจำนวนที่สูง ดังนั้น แม้ว่าเราจะได้กลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดมา แต่การตัดสินใจเลือกเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์แต่ละด้านซึ่งมีความสำคัญที่แตกต่างกันก็ยังคงเป็นไปได้ยาก ด้วยเหตุนี้ ทางผู้วิจัยจึงขอเสนอวิธีการสำหรับคัดเลือกกลุ่มคำตอบ โดยเรียงลำดับความสำคัญของวัตถุประสงค์จากจำนวนผู้ได้รับผลกระทบในแต่ละวัตถุประสงค์ดังนี้

- **Objective1:** วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด เป็นวัตถุประสงค์ที่เกี่ยวกับการนับจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินประเภท Arrival Departure และ Normal ที่ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล (Remote Gate) ซึ่งการที่กิจกรรมของเที่ยวบินเหล่านี้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกล ก็จะส่งผลกระทบในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ด้านผู้โดยสาร (ความพึงพอใจและความสะดวกสบายในการขึ้น-ลงอากาศยาน) ด้านสายการบิน (เสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการเคลื่อนย้ายผู้โดยสาร) ด้านท่าอากาศยาน (ภาพลักษณ์ในการจัดการท่าอากาศยานและการรองรับอากาศยาน) และด้านสิ่งแวดล้อม (ต้องใช้ยานพาหนะในการเคลื่อนย้ายผู้โดยสารระหว่างตัวอาคารรับรองกับตัวอากาศยาน สำหรับการขึ้น-ลงอากาศยาน) ด้วยเหตุนี้ การคัดเลือกกลุ่มคำตอบผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุดเป็นอันดับแรก ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพื่อหาตำแหน่งเปอร์เซ็นต์

ไทล์ (Percentile) ที่เหมาะสมกับการเป็นเกณฑ์คัดเลือกของวัตถุประสงค์นี้จากกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ ซึ่งได้ผลว่า ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 เป็นตำแหน่งที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้วัตถุประสงค์อื่น ๆ รวมถึงวัตถุประสงค์นี้มีความยืดหยุ่นในการเลือกคำตอบอยู่ (โดยวัตถุประสงค์นี้เป็นปัญหาน้อยที่สุด (Minimize) ดังนั้นคำตอบที่นำมาพิจารณาจึงเป็นคำตอบที่มีค่าไม่เกินคำตอบที่อยู่ในตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95)

- **Objective3:** วัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด เป็นวัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับการหาโอกาสการเกิดความขัดแย้งกันทางด้านเวลาจากการจัดสรรตารางการเข้าจอดของกิจกรรมของเที่ยวบินบนหลุมจอดอากาศยานทั้งหมด ซึ่งถ้าการจัดตารางการเข้าจอดในสถานการณ์จริงหากเราไม่ได้คำนึงถึงระยะห่างของเวลาระหว่างคู่เที่ยวบินที่มีผลต่อโอกาสความเป็นไปได้ของการเกิดความขัดแย้ง เมื่อเที่ยวบินเกิดความขัดแย้งทางด้านเวลาขึ้น ก็จะส่งผลกระทบในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ด้านผู้โดยสาร (เสียเวลาในการเดินทางและรอคอย) ด้านสายการบิน (เสียความน่าเชื่อถือ/ชื่อเสียง และค่าชดเชยต่าง ๆ) และด้านท่าอากาศยาน (เสียภาพลักษณ์ของการจัดการท่าอากาศยานและการรองรับอากาศยาน) ด้วยเหตุนี้ การคัดเลือกกลุ่มคำตอบผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุดเป็นอันดับที่สอง ทั้งนี้ ตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของคำตอบจากกลุ่มคำตอบที่เหลืออยู่ เป็นตำแหน่งที่น้อยที่สุดที่ยังคงทำให้วัตถุประสงค์สุดท้ายที่เหลือมีความยืดหยุ่นในการเลือกคำตอบ (โดยวัตถุประสงค์นี้เป็นปัญหาน้อยที่สุด (Minimize) เช่นเดียวกัน ดังนั้นคำตอบที่นำมาพิจารณาจึงเป็นคำตอบที่มีค่าไม่เกินคำตอบที่อยู่ในตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของกลุ่มคำตอบที่เหลืออยู่)
- **Objective2:** วัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด เป็นวัตถุประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการจัดสรรกิจกรรมของเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานโดยจะคำนวณจากจำนวนการใช้ยานพาหนะเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยานและการใช้ยานพาหนะสำหรับรับ-ส่งผู้โดยสาร โดยผลการทดสอบในหัวข้อ 4.4 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าวัตถุประสงค์นี้ได้มีแนวโน้มของคำตอบไปในทิศทางเดียวกันกับ Objective1 ประกอบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลกระทบโดยตรงเพียงด้านเดียว คือ ด้านสิ่งแวดล้อม (ปริมาณมลพิษที่จะถูกปล่อยเข้าสู่สิ่งแวดล้อม) ดังนั้นการคัดเลือกกลุ่มคำตอบของ

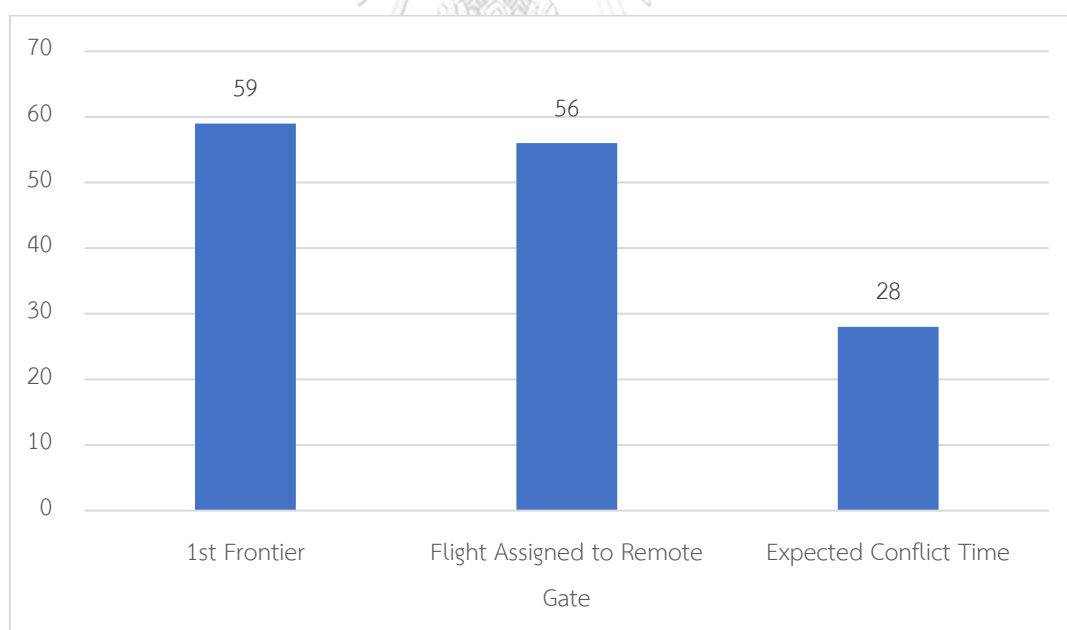
วัตถุประสงค์นี้ผู้วิจัยจึงได้ให้ความสำคัญเป็นลำดับสุดท้าย กล่าวคือ เมื่อผ่านการคัดเลือกกลุ่มคำตอบจากส่วนของ Objective1 และ Objective3 มาแล้ว จะทำการเลือกกลุ่มคำตอบสุดท้ายโดยมีวัตถุประสงค์นี้เป็นตัวช่วยในการเปรียบเทียบ

อย่างไรก็ดี ในส่วนของการอภิปรายผลนั้น ผู้วิจัยจะขอยกตัวอย่างเพียงในส่วนของปัญหาขนาดใหญ่เท่านั้น เนื่องจากเป็นขนาดปัญหาที่มีจำนวนเที่ยวบินและจำนวนหลุมจอดอากาศยานใกล้เคียงกับการปฏิบัติงานจริงมากที่สุด และยังสามารถแสดงให้เห็นถึงการคัดเลือกกลุ่มคำตอบตามที่กล่าวไว้ในย่อหน้าข้างต้นได้อย่างชัดเจน โดยหากอ้างอิงจากชุดข้อมูลที่ 12 ของผลการทดสอบด้วยวิธีแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาขนาดใหญ่ในหัวข้อที่ 4.4.3 จะได้ว่า จำนวนกลุ่มคำตอบที่อยู่บนขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโต (Frontier1) ที่อัลกอริทึมสามารถค้นหาได้ มีจำนวนทั้งหมด 59 กลุ่มคำตอบ และเมื่อผ่านการคัดเลือกโดยใช้วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะใกล้่น้อยที่สุด (Objective1) เป็นเกณฑ์แล้ว จะทำให้เหลือกลุ่มคำตอบจำนวน 56 กลุ่มคำตอบ ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้จำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะใกล้่น้อยที่สุดเป็นเกณฑ์

Solutions	Flight Assigned to Remote Gate	Environmental Impact	Expected Conflict Time
1	54	570.2828657	7.396294875
2	54	566.0125946	7.461164551
3	54	522.4360168	8.879834036
4	54	530.4104164	8.407484875
5	54	515.1409471	8.954072772
6	54	514.9150116	8.967649254
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
52	58	532.5362227	5.22541838
53	58	546.6032149	4.631530758
54	63	592.9751562	4.352913635
55	63	598.4282878	4.352822331
56	65	613.3185585	3.455734777

จากตารางที่ 4-6 จะเป็นการแสดงกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกครั้งแรกโดยเป็นกลุ่มคำตอบที่มีค่าคำตอบของ Objective1 ไม่เกินค่าคำตอบที่อยู่ในตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 95 ของกลุ่มคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ และทำการเรียงลำดับผลคำตอบจากน้อยไปหามาก ทั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่าวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด และวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุดจากกลุ่มคำตอบที่ได้ ยังคงมีขอบเขตล่าง (ค่าต่ำที่สุด) เท่ากับค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ คือ 514.915011645 และ 3.455734777 ตามลำดับ และเมื่อนำกลุ่มคำตอบข้างต้นนี้ไปผ่านการคัดเลือกอีกครั้งโดยใช้วัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Objective3) เป็นเกณฑ์ จะเหลือกลุ่มคำตอบเพียง 28 กลุ่มคำตอบ ซึ่งคิดเป็นจำนวน 47.46% ของกลุ่มคำตอบทั้งหมดบนขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดเชิงพาเรโตที่อัลกอริทึมหาได้ โดยเราสามารถสรุปจำนวนกลุ่มคำตอบที่เหลืออยู่จากการคัดเลือกกลุ่มคำตอบในแต่ละขั้นตอนให้อยู่ในรูปแบบของแผนภาพได้ดังรูปที่ 4-7 และสำหรับกลุ่มคำตอบทั้งหมดที่ผ่านการคัดเลือกจากรอบที่สองนี้จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-7



รูปที่ 4-7 แผนภาพแสดงจำนวนกลุ่มคำตอบในแต่ละขั้นตอนการคัดเลือก

ตารางที่ 4-7 ตารางแสดงกลุ่มคำตอบที่ถูกคัดเลือกโดยใช้สองวัตถุประสงค์เป็นเกณฑ์

Solutions	Flight Assigned to Remote Gate	Environmental Impact	Expected Conflict Time
1	55	530.8388617	6.579473224
2	55	538.3598668	6.491658006
3	55	562.4062479	6.38497008
4	55	563.6294507	6.218776804
5	55	564.5445025	6.218658075
6	55	566.1015556	6.218570893
7	55	567.0166074	6.218452164
8	55	586.2545398	5.813694511
9	55	590.5248109	5.748824835
10	56	556.4881683	6.586106761
11	56	556.7349364	6.584035635
12	56	524.9914081	5.792034224
13	56	532.5124132	5.704219005
14	56	532.7398723	5.473202138
15	56	540.2608774	5.245446327
16	56	593.2749914	5.229811118
17	56	597.5452625	5.164941441
18	57	526.7729463	5.65523875
19	57	529.5522074	5.362213854
20	57	537.0732125	5.134458042
21	57	537.3006716	5.043381768
22	58	532.5362227	5.22541838
23	58	538.8547507	4.950362845
24	58	539.0822098	4.906586294
25	58	546.6032149	4.631530758
26	63	592.9751562	4.352913635
27	63	598.4282878	4.352822331
28	65	613.3185585	3.455734777

จากตารางที่ 4-7 จะเป็นการแสดงกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกครั้งที่สองโดยเป็นกลุ่มคำตอบที่มีค่าคำตอบของ Objective3 ไม่เกินค่าคำตอบที่อยู่ในตำแหน่งเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ของกลุ่มคำตอบที่เหลืออยู่ (กลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกครั้งแรก) และทำการเรียงลำดับผลคำตอบจากน้อยไปหามากด้วยวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด ทั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่าวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด และวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกครั้งที่สองนั้น มีขอบเขตล่าง (ค่าต่ำที่สุด) ที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ คือ 54 และ 514.9150116 เพียง 1.85% และ 1.96% ตามลำดับ นอกจากนี้ เรายังสามารถนำค่าเฉลี่ยในแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกข้างต้นมาเปรียบเทียบกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้ และค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ตารางเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ของชุดข้อมูลที่ 12

		Flight Assigned to Remote Gate	Environmental Impact	Expected Conflict Time
ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมสามารถหาได้ (เลขตัวหนา)	Flight Assigned to Remote Gate (Flight)	54	515.1409471	8.954072772
	Environmental Impact ($KgCo_2$)	54	514.9150116	8.967649254
	Expected Conflict Time (Minute)	65	613.3185585	3.455734777
ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก (เลขตัวหนา)	Flight Assigned to Remote Gate (Flight)	55	586.2545398	5.813694511
	Environmental Impact ($KgCo_2$)	56	524.9914081	5.792034224
	Expected Conflict Time (Minute)	65	613.3185585	3.455734777
ค่าคำตอบโดยเฉลี่ยของแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก		57	557.025779	5.526554881

จากตารางที่ 4-8 จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก จะสังเกตได้ว่าค่าคำตอบโดยเฉลี่ยของแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วนั้น มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้อยู่ที่ 5.56% 8.18% และ 59.92% สำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งถือเป็นการเพิ่มขึ้นในระดับที่น้อยสำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1 กับ 2 และระดับปานกลางสำหรับวัตถุประสงค์ที่ 3 โดยสาเหตุเนื่องมาจากการที่ค่าคำตอบในวัตถุประสงค์ที่ 3 นั้นค่าคำตอบส่วนใหญ่เป็นค่าคำตอบที่มีค่าค่อนข้างสูงจึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยมีแนวโน้มไปในทิศทางที่สูงด้วย อย่างไรก็ตามหากเรานำค่าคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้มาเปรียบเทียบกันโดยตรงกลับพบว่า มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้เพียง 1.85% 1.96% และ 0% สำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่าค่าคำตอบมีการเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่ต่ำโดยไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และอาจกล่าวได้ว่าการกระบวนการคัดเลือกกลุ่มคำตอบที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 4.5 นี้ สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มคำตอบได้ ทั้งนี้ เพื่อเป็นการยืนยันข้อพิสูจน์ดังกล่าว ทางผู้วิจัยได้นำปัญหาขนาดใหญ่ซึ่งเป็นชุดข้อมูลใหม่ (ชุดข้อมูลที่ 1) มาแสดงการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก โดยใช้เกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มคำตอบเดียวกัน ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 ตารางเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ของชุดข้อมูลที่ 1

		Flight Assigned to Remote Gate	Environmental Impact	Expected Conflict Time
ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่อัลกอริทึมสามารถหาได้ (เลขตัวหนา)	Flight Assigned to Remote Gate (Flight)	43	553.9773470	7.635868144
	Environmental Impact ($KgCo_2$)	48	505.2555981	11.50904174
	Expected Conflict Time (Minute)	61	611.6241489	3.619155479

ตารางที่ 4-9 ตารางเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ของชุดข้อมูลที่ 1 (ต่อ)

		Flight Assigned to Remote Gate	Environmental Impact	Expected Conflict Time
ค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก (เลขตัวหนา)	Flight Assigned to Remote Gate (Flight)	46	554.1233070	5.773770943
	Environmental Impact ($KgCo_2$)	54	534.4842415	5.939762761
	Expected Conflict Time (Minute)	61	610.4512930	3.619219101
ค่าคำตอบโดยเฉลี่ยของแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก		54	577.7849249	4.655540225

จากตารางที่ 4-9 จะเป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่อัลกอริทึมสามารถหาได้กับค่าคำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละวัตถุประสงค์ที่ผ่านการคัดเลือก และค่าคำตอบโดยเฉลี่ยจากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือก จะสังเกตได้ว่าค่าคำตอบโดยเฉลี่ยของแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วนั้น มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้ อยู่ที่ 25.58%, 14.35% และ 28.64% สำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่ายังคงมีการเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่น้อย อย่างไรก็ตามหากเรานำค่าคำตอบที่ดีที่สุดของแต่ละวัตถุประสงค์จากกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วมาเปรียบเทียบโดยตรงกลับพบว่า มีค่าเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้เพียง 6.98%, 5.78% และ 0.002% สำหรับวัตถุประสงค์ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ถือได้ว่าค่าคำตอบมีการเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่ต่ำโดยมีความแตกต่างกับชุดข้อมูลที่ 12 ไม่มากนัก เมื่อพิจารณาภาพรวมแล้วเราสามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการคัดเลือกกลุ่มคำตอบที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้สามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มคำตอบได้

โดยสรุปแล้ว ผลการดำเนินงานวิจัยในข้างต้นนั้นนอกจากจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ของปัญหาการจัดสรรกิจกรรมของเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานด้วยฮิวริสติกส์ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบขึ้นแล้ว ยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการคัดเลือกผลคำตอบที่มีค่าคำตอบใกล้เคียงกับค่าคำตอบที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมสามารถหาได้อีกด้วย ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้คำนึงอยู่เสมอว่าสำหรับการคัดเลือกผลคำตอบเหล่านี้ ผู้วิจัยต้องการเพียงแค่จะลดจำนวนของกลุ่ม

คำตอบลงมาแต่ยังคงไว้ซึ่งความหลากหลายของคำตอบเพื่อให้ผู้ที่มีอำนาจหรือผู้ที่มีหน้าที่ในการตัดสินใจ (Decision Maker) เป็นผู้ตัดสินใจเลือกผลคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ให้คำตอบเป็นที่พึงพอใจเอง (ได้คำตอบตรงตามความต้องการ) เนื่องจากในแต่ละสถานการณ์นั้นองค์กรหรือผู้ที่มีหน้าที่ตัดสินใจอาจจะมโนนโยบายหรือความสนใจในวัตถุประสงค์ที่เปลี่ยนแปลงไป ประกอบกับวัตถุประสงค์บางตัวได้มีการขัดแย้งกันอย่างชัดเจนตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.4 ยกตัวอย่างเช่น เมื่อวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้วัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time มีค่าที่ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการดีกว่าที่ผู้วิจัยจะไม่ทำการสรุปเลือกผลคำตอบใดคำตอบหนึ่งว่าเป็นผลคำตอบที่ดีที่สุดที่ควรนำไปใช้ นอกจากนี้การคัดเลือกกลุ่มคำตอบอาจสามารถช่วยให้ผู้ตัดสินใจหรือผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถตัดสินใจเลือกคำตอบได้ง่ายขึ้นอีกด้วย



บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

สำหรับบทนี้ ผู้วิจัยจะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย โดยเริ่มต้นจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน ลักษณะของปัญหา แนวคิดและอัลกอริทึมที่ผู้วิจัยนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งแบบวัตถุประสงค์เดียว และแบบหลายวัตถุประสงค์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึม และสุดท้ายนี้ คือข้อเสนอแนะของงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 บทสรุปผลการดำเนินงานวิจัย

สำหรับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ผู้วิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์เป้าหมายจากการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยานไว้ทั้งหมด 3 วัตถุประสงค์ ได้แก่ จำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด ปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด และจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด โดยการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานนี้จะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ โดยเฉพาะข้อจำกัดด้านรอบเวลาเป็นสำคัญ จึงสามารถนับได้ว่าปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานนั้นเป็นปัญหาการจัดลำดับงาน ด้วยเหตุนี้ ความซับซ้อนของปัญหาจึงถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของปัญหาเอ็นพีแบบยาก ผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจนำฮิวริสติกส์เข้ามาช่วยในการหาคำตอบของปัญหา

โดยฮิวริสติกส์ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบขึ้นนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ III (NSGA-III) เข้ามาเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการจัดสรรเที่ยวบินหรืออากาศยานเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยาน ซึ่งกลุ่มของผลคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้นั้นจะถูกนำมาพิจารณาคัดเลือกด้วยการใช้วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด และวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด เป็นเกณฑ์ สำหรับใช้ในการกำหนดชุดคำตอบที่เหมาะสม

งานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของฮิวริสติกส์ในส่วนของการหาคำตอบทั้งแบบวัตถุประสงค์เดียว และแบบหลายวัตถุประสงค์ โดยใช้ปัญหาในการทดสอบทั้งหมด 3 ขนาด คือ ปัญหาขนาดเล็ก (20 เที่ยวบินกับ 12 หลุมจอดอากาศยาน) ปัญหาขนาดกลาง (100 เที่ยวบินกับ

40 หลุมจอดอากาศยาน) และปัญหาขนาดใหญ่ (300 เที่ยวบินกับ 109 หลุมจอดอากาศยาน) โดยปัญหาแต่ละขนาดนี้จะถูกทำการทดสอบประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบจากชุดข้อมูลนำเข้าจำนวน 15 ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลละ 10 รอบ ทั้งนี้ ในส่วนของการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพการหาคำตอบเพียงแค่ปัญหาขนาดเล็กเท่านั้น เนื่องจากปัญหขนาดกลางและขนาดใหญ่ วิธีแมนตรงไม่สามารถหาคำตอบได้ ซึ่งจากการทดสอบผู้วิจัยพบว่า การค้นหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวด้วยฮิวริสติกส์ สามารถหาคำตอบได้เป็นอย่างดี โดยให้คำตอบที่ดีเท่ากับวิธีแมนตรงในทุกชุดข้อมูลของปัญหาขนาดเล็ก อีกทั้งฮิวริสติกส์ยังใช้เวลาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30 วินาที (คำนวณครบ 1000 รอบการทำงาน) สำหรับการค้นหาคำตอบของปัญหาขนาดเล็ก (โดยเราสามารถลดเวลาในการหาคำตอบลงได้ หากเรามีการกำหนดเกณฑ์การหยุดค้นหาคำตอบ (Stopping criteria) ในฮิวริสติกส์แบบไม่ต้องทำงานครบ 1000 รอบการทำงาน) ส่วนในกรณีของการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยพบว่าค่าตัวชี้วัดประสิทธิภาพการค้นหา GD และ IGD มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีในการหาคำตอบที่แท้จริงโดยประมาณ ในขณะที่ค่า Spread แสดงถึงการกระจายตัวตั้งแต่ระดับดีถึงปานกลางที่ 0.5119 ในปัญหาขนาดเล็ก ไปจนถึงค่อนข้างแย่ที่ 1.0604 ในปัญหาขนาดใหญ่

กราฟพื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นจากขอบเขตคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของคำตอบในแต่ละวัตถุประสงค์ไว้ค่อนข้างใกล้เคียงกับที่ผู้วิจัยคาดการณ์เอาไว้ คือ วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยที่สุด (Obj1) และวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) บางส่วนมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากการที่มีเที่ยวบินเข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลน้อยลงจะทำให้มีการใช้ยานพาหนะรับ-ส่งผู้โดยสารที่น้อยลงจึงส่งผลให้มีปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยลงตาม แต่สำหรับวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด (Obj3) กลับมีความขัดแย้งกับสองวัตถุประสงค์ข้างต้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ Obj1 และ Obj2 นั้นจะเกี่ยวข้องกับปริมาณเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาระหว่างคู่เที่ยวบิน (Separation time) โดยตรงในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ เมื่อเที่ยวบินมีการย้ายไปจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะไกลเพิ่มขึ้น (Obj1 มีค่าเพิ่มสูงขึ้น) จะทำให้เที่ยวบินมีการเข้าจอดที่กระจายตัวมากขึ้นและส่งผลทำให้เวลาระหว่างคู่เที่ยวบินมีจำนวนที่เพิ่มขึ้น (ทำให้ Obj3 มีค่าน้อยลง)

แต่ก็มีหลายครั้งที่ค่าของ Obj1 มีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ Obj2 กลับมีค่าน้อยลง ซึ่งจากการวิเคราะห์ตารางการจัดสรรการเข้าจอดของเที่ยวบิน พบว่า ที่ค่าของ Obj2 น้อยลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่เที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาเข้า (Arrival activity) หรือเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทขาออก (Departure activity) หรือเที่ยวบินทั้ง 2 ประเภท ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานเดียวกันกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทจอดรอ (Parking activity) ซึ่งเป็นเที่ยวบินเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไม่เกิดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเคลื่อนย้ายอากาศยานระหว่างหลุมจอดอากาศยาน ในขณะที่การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารที่เกิดขึ้นแทนนั้นกลับมีปริมาณที่น้อยกว่า ประกอบกับเที่ยวบินที่เป็นกิจกรรมประเภทการเปลี่ยน (Switching activity) ส่วนใหญ่ได้ถูกจัดสรรให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานที่อยู่ใกล้กับจุดปล่อยรถโดยสาร ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการรับ-ส่งผู้โดยสารนั้นมีปริมาณลดลง โดยกรณีดังกล่าวนี้ก็จะเป็นตัวยืนยันและถือเป็นข้อพิสูจน์ว่าวัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะใกล้น้อยที่สุด (Obj1) นั้นมีการแลกเปลี่ยนบางอย่างและไม่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุด (Obj2) เสมอไป

นอกจากนี้ ผู้วิจัยพบว่ากลุ่มคำตอบบนขอบเขตคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาแบบหลายวัตถุประสงค์นั้นสามารถนำมาคัดกรองหรือคัดเลือกเพื่อให้ได้กลุ่มคำตอบที่ตอบสนองต่อความต้องการขององค์กรหรือผู้ที่มีหน้าที่ในการตัดสินใจ (Decision Maker) โดยกลุ่มคำตอบที่ผ่านการคัดเลือกมานี้ มีการให้ผลคำตอบสำหรับวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุดที่ค่อนข้างต่ำ ในขณะที่วัตถุประสงค์ด้านจำนวนกิจกรรมของเที่ยวบินที่เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานประเภทระยะใกล้น้อยที่สุด และวัตถุประสงค์ด้านปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดต่ำกว่าค่าที่ดีที่สุดที่อัลกอริทึมหาได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งกลุ่มคำตอบเหล่านี้จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อองค์กรหรือผู้ที่มีหน้าที่ในการตัดสินใจมีความสนใจในวัตถุประสงค์เหมือนกันกับที่ผู้วิจัยได้กำหนดเอาไว้ แต่ทั้งนี้ องค์กรหรือผู้ที่มีหน้าที่ตัดสินใจอาจมีนโยบายหรือความสนใจในวัตถุประสงค์ที่แตกต่างหรือเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละสถานการณ์เพื่อการได้มาซึ่งผลคำตอบ (Solution) ที่ให้คำตอบเป็นที่พึงพอใจตามสถานการณ์นั้น ๆ ต่อไป

และท้ายที่สุดนี้ จากการศึกษาปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยาน (AGAP) ด้วยการใช้ข้อมูลทดสอบจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ผู้วิจัยพบว่า แม้การจัดตารางการเข้าจอดอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยานด้วยวิธีสถิติจะสามารถหาคำตอบได้ดีทั้งแบบวัตถุประสงค์เดียว

และแบบหลายวัตถุประสงค์ แต่การค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์นั้นถือเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และมีความเหมาะสมกว่าการค้นหาแบบวัตถุประสงค์เดียว เนื่องจากการหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์นี้สามารถให้ผลคำตอบ (Solution) ที่หลากหลาย โดยผลคำตอบเหล่านี้อาจเป็นผลคำตอบที่สามารถให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละวัตถุประสงค์เป็นที่น่าสนใจไปพร้อม ๆ กันได้ หรืออาจให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นที่น่าสนใจในวัตถุประสงค์ใดวัตถุประสงค์หนึ่งได้เช่นเดียวกัน ทำให้เรามีทางเลือกในการเลือกผลคำตอบที่มากขึ้นและอาจช่วยให้ง่ายต่อการตัดสินใจ ณ ช่วงเวลาใด ๆ ที่เราอาจมีความสนใจในวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป ประกอบกับปัจจุบันนี้การจัดตารางการเข้าจอดโดยคำนึงถึงผลกระทบหลาย ๆ ด้านที่อาจจะเกิดขึ้นก็ถือเป็นสิ่งสำคัญและดีกว่าการพิจารณาเพียงด้านใดด้านหนึ่ง อีกทั้งการจัดตารางการเข้าจอดโดยคำนึงถึงการรองรับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด (Robustness) ที่ถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนเที่ยวบินกับการมีทรัพยากรหลุมจอดอากาศยานที่จำกัดในปัจจุบัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Daş et al. (2020) ที่กล่าวว่าฮิวริสติกส์และเมต้าฮิวริสติกส์นั้นมีความสำคัญซึ่งจะให้โอกาสในการเจอคำตอบที่ตรงหรือใกล้เคียงกันสำหรับการหาคำตอบแบบวัตถุประสงค์เดียวกับแบบหลายวัตถุประสงค์ อีกทั้งการค้นหาคำตอบแบบหลายวัตถุประสงค์ยังมีความเหมาะสมและเริ่มเป็นที่นิยมใช้มากกว่าแบบวัตถุประสงค์เดียว (ซึ่งเป็นที่ยอมรับตั้งแต่ปี 1990) โดยเฉพาะการนำเอาเรื่องของความทนทานหรือการรองรับกับเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด (Robustness) เข้ามาใช้งานมากขึ้นโดยจะนำไปพิจารณาร่วมกับผลกระทบด้านอื่น ๆ ขณะทำการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากข้อมูลท่าอากาศยานที่จำกัด ทำให้ผู้วิจัยต้องทำการสมมติจุดปล่อยรถโดยสารสำหรับไปรับ-ส่งผู้โดยสาร และจุดรองรับผู้โดยสารขาเข้าภายในประเทศและระหว่างประเทศขึ้นมา ดังนั้น หากต้องการความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น สามารถติดต่อขอข้อมูลจากทางบริษัทท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) เพิ่มเติมได้
- เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถหาข้อมูลอัตราสิ้นเปลืองของทรัพยากรยานพาหนะที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายอากาศยานรวมถึงผู้โดยสารได้ ทำให้ผู้วิจัยต้องอ้างอิงอัตราสิ้นเปลืองดังกล่าวจากรถบรรทุกหนัก (18 ล้อ) และรถบรรทุกบริการ (ขสมก) แทน ดังนั้น เพื่อการได้มาซึ่งปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แม่นยำของยานพาหนะที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เราสามารถติดต่อขอข้อมูลอัตราสิ้นเปลืองของยานพาหนะจากทางสายการบินเพิ่มเติมได้

- เนื่องจากผู้วิจัยไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลการเข้าหลุมจอดอากาศยานของทางสายการบินได้ ทำให้การจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้คำนึงถึงข้อจำกัดดังกล่าว ดังนั้น หากต้องการเพิ่มข้อจำกัดดังกล่าวในการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยาน สามารถร้องขอข้อมูลเพิ่มเติมจากทางบริษัทท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) ได้ โดยข้อจำกัดดังกล่าวจะช่วยให้การจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานสอดคล้องกับการดำเนินการในปัจจุบันมากขึ้น
- ระยะเวลาในการค้นหาคำตอบยังคงเป็นประเด็นที่น่ากังวลใจในกรณีที่ขนาดของปัญหานั้นใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีจำนวนเที่ยวบิน และจำนวนหลุมจอดอากาศยานที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคต การหาทางพัฒนาประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมรวมถึงการเพิ่มความเร็วในการค้นหาคำตอบให้มากขึ้นยังคงเป็นประเด็นที่ควรศึกษาต่อไป
- เนื่องด้วยข้อมูลเที่ยวบินจริงอยู่ในรูปแบบที่ยากต่อการนำมาใช้งานประกอบกับระยะเวลาในการดำเนินงานที่จำกัด ส่งผลให้ผู้วิจัยเลือกใช้งานข้อมูลดังกล่าวเพียง 1 วัน ในการสร้างพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการการคำนวณของวัตถุประสงค์ด้านจำนวนของเวลาที่คาดการณ์ว่าจะเกิดความขัดแย้งหรือ Expected conflict time น้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้ การสร้างพารามิเตอร์สำหรับใช้ในสมการวัตถุประสงค์ดังกล่าวเพื่อให้มีความแม่นยำในการคาดการณ์ที่เพิ่มสูงขึ้น เราควรใช้จำนวนข้อมูลเที่ยวบินจริงที่เพิ่มขึ้นรวมถึงอาจจะใช้ข้อมูลเที่ยวบินจริงที่มีวันตรงกันหรือใกล้เคียงกับวันของข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง
- ควรนำเอาอัลกอริทึมอื่น ๆ มาทำการทดลองค้นหาคำตอบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับฮิวริสติกส์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน เพื่อค้นหาอัลกอริทึมหรือฮิวริสติกส์ที่มีความเหมาะสมกับปัญหาการจัดสรรเที่ยวบินเข้าหลุมจอดอากาศยานทั้งในด้านของเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบและคุณภาพของคำตอบที่ได้รับ
- งานวิจัยฉบับนี้ เป็นเพียงการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยานสำหรับใช้ในสถานการณ์ปกติเท่านั้น แต่เนื่องด้วยในสถานการณ์จริงอาจเกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่ไม่คาดคิดขึ้น ที่อาจจะส่งผลให้แผนการจัดตารางการเข้าจอดของอากาศยานบนหลุมจอดอากาศยานไม่เป็นไปตามกำหนดการที่วางเอาไว้และอาจทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงกำหนดการอยู่เรื่อย ๆ (จากการโยกย้ายอากาศยานให้เข้าจอดบนหลุมจอดอากาศยานอื่น) ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาระบบการจัดตารางการเข้าจอดให้สามารถแก้ไขและทำการจัดตารางการเข้าจอดใหม่ (Reassignment) หรือการทำให้เป็นรูปแบบเรียลไทม์ (Real time) สำหรับ

รับมือกับสิ่งต่าง ๆ ที่จะทำให้การจัดตารางการเข้าจอดไม่เป็นไปตามกำหนดการที่วางเอาไว้
ก็ถือเป็นประเด็นที่สนใจในการศึกษาต่อไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- Bus&Truck. (2019). BMTA chose Hino as a hybrid bus Help save costs - protect the environment. Retrieved from <https://www.busandtruckmedia.com/11011/>
- Cai, X., Sun, W., Misir, M., Tan, K. C., Li, X., Xu, T., & Fan, Z. (2021). A Bi-Objective Constrained Robust Gate Assignment Problem: Formulation, Instances and Algorithm. *IEEE Trans Cybern*, 51(9), 4488-4500. doi:10.1109/TCYB.2019.2956974
- Coello, C. A. C., & Cortés, N. C. (2005). Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system. *Genetic programming and evolvable machines*, 6(2), 163-190. doi:<https://doi.org/10.1007/s10710-005-6164-x>
- Daş, G. S., Gzara, F., & Stützle, T. (2020). A review on airport gate assignment problems: Single versus multi objective approaches. *Omega*, 92. doi:10.1016/j.omega.2019.102146
- Das, I., & Dennis, J. E. (1998). Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems. *SIAM Journal on Optimization*, 8(3), 631-657. doi:10.1137/s1052623496307510
- Deb, K., & Jain, H. (2013). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (Volume: 18, Issue: 4, Aug. 2014), 577 - 601. doi:10.1109/TEVC.2013.2281535
- Ding, H., Lim, A., Rodrigues, B., & Zhu, Y. (2003). *The Airport Gate Assignment Problem*. Paper presented at the Decision Science Institute Annual Meeting, Washington, DC.
- Feuser, F., H., & Müller, C. (2019). Optimization of the waiting time and makespan in aircraft departures: A real time non-iterative sequencing model. *Journal of Air Transport Management*, 79. doi:10.1016/j.jairtraman.2019.101686
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. *Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.*
- GoogleEarthPro. (2021). การวัดระยะทาง.
- Jarumaneeroj, P., & Sakulsom, N. (2021). An adaptive large neighborhood search for the

- multiple-day music rehearsal problems. *Computers & Industrial Engineering*, 157. doi:10.1016/j.cie.2021.107279
- Kim, S. H. (2013). *Airport control through intelligent gate assignment*. (Doctoral Degree), Georgia Institute of Technology,
- Kim, S. H., & Feron, E. (2013). Numerical Analysis of Gate Conflict Duration and Passenger Transit Time in Airport.
- Lim, A., & Wang, F. (2005). *Robust Airport Gate Assignment*. Paper presented at the International Conference on Tools with Artificial Intelligence.
- Pternea, M., & Haghani, A. (2019). An aircraft-to-gate reassignment framework for dealing with schedule disruptions. *Journal of Air Transport Management*, 78, 116-132. doi:10.1016/j.jairtraman.2019.01.005
- Tang, C.-H., & Wang, W.-C. (2013). Airport gate assignments for airline-specific gates. *Journal of Air Transport Management*, 30, 10-16. doi:10.1016/j.jairtraman.2013.02.003
- Yu, C., Zhang, D., & Lau, H. Y. K. (2016). MIP-based heuristics for solving robust gate assignment problems. *Computers & Industrial Engineering*, 93, 171-191. doi:10.1016/j.cie.2015.12.013
- Yu, C., Zhang, D., & Lau, H. Y. K. (2017a). An adaptive large neighborhood search heuristic for solving a robust gate assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 84, 143-154. doi:10.1016/j.eswa.2017.04.050
- Yu, C., Zhang, D., & Lau, H. Y. K. (2017b). A heuristic approach for solving an integrated gate reassignment and taxi scheduling problem. *Journal of Air Transport Management*, 62, 189-196. doi:10.1016/j.jairtraman.2017.04.006
- Yuan, X., Tian, H., Yuan, Y., Huang, Y., & Ikram, R. M. (2015). An extended NSGA-III for solution multi-objective hydro-thermal-wind scheduling considering wind power cost. *Energy Conversion and Management*, 96, 568-578. doi:10.1016/j.enconman.2015.03.009
- Yuan, Y., Xu, H., & Wang, B. (2014). *An improved NSGA-III procedure for evolutionary many-objective optimization*. Paper presented at the Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation.
- ตรัยรัตน์ เกิดโภคทรัพย์. (2560). การจัดลำดับการผลิตรถยนต์แบบมากวัตถุประสงค์บนสายการ

ประกอบผลิตภัณฑ์ผสมแบบสองด้าน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทศพล นาสวัสดิ์. (2556). การศึกษาอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถบรรทุก. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ท่าอากาศยานไทย (2021a). [เอกสารข้อมูลท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ].

ท่าอากาศยานไทย. (2021b). สถิติขนส่งทางอากาศ 2558-2562. Retrieved from

<https://www.airportthai.co.th/th/%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A-%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%97/%E0%B8%AA%E0%B8%96%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%82%E0%B8%99%E0%B8%AA%E0%B9%88%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8/>

ท่าอากาศยานไทย. (2021c). สถิติขนส่งทางอากาศ 2563. Retrieved from <https://aot-th.listedcompany.com/transport.html>

สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย. (2021). รายงานพยากรณ์ความต้องการการเดินทางทางอากาศของประเทศ. Retrieved from <https://www.caat.or.th/th/archives/53358>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรกร เขาวงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	8 สิงหาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	92/77 หมู่5 ซอย10 หมู่บ้านสุขาวาลัยพระราม5 ตำบลบางศรีเมือง อำเภอเมืองนนทบุรี 11000

